

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO GRITS NAS
PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE TIJOLO SOLO-CIMENTO**

FABRÍCIO BAGLI SIQUEIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
FEVEREIRO-2013**

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO GRITS NAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE TIJOLO SOLO-CIMENTO

Fabício Bagli Siqueira

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

Orientador: Prof. Dr. José Nilson França de Holanda

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FVEREIRO-2013

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO GRITS NAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE TIJOLO SOLO-CIMENTO

Fabício Bagli Siqueira

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

Aprovado em 28 de fevereiro de 2013.

Comissão Examinadora:

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

Prof. Roberto da Trindade Faria Júnior (D.Sc., Física) – UENF

Prof. Bruno Carlos Alves Pinheiro (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – UEMG

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

Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico em especial a Deus pela força e proteção. A minha esposa Verônica Siqueira. A meus pais Ubaldino Siqueira e Marlene Siqueira. Aos meus irmãos, pelo carinho, apoio e por estarem sempre presentes em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo amor e proteção.

A minha querida esposa Verônica Siqueira, pelo amor, paciência, companheirismo e apoio, nos principais momentos da minha vida.

Aos meus irmãos Felipe e Sarah pelo carinho e incentivo.

Aos meus pais, Ubaldino e Marlene, por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos, sempre com muita dedicação, amor, carinho, preocupação e esforço por mim.

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

Aos professores Ana Lúcia, Eduardo Atem, Angelus, Sérgio Neves, Carlos Maurício, Lioudmila e Daniel por compartilharem seus conhecimentos, e pela importante contribuição em todo desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores Roberto Trindade e Bruno Carlos por aceitarem fazer parte desta banca.

Aos Técnicos e funcionários da UENF: Renan com sua ajuda e amizade; Vanússia, pelos ensaios químicos e mineralógicos da dissertação; Carlan, Miessy e Rômulo, pelos ensaios mecânicos; Luciana e Elaine, por sua ajuda no MEV e Raios-X; Shirlene pela ajuda burocrática, e ensaios no Microscópio Confocal.

A UENF pela oportunidade e a Capes pelo apoio financeiro.

A FIBRIA e a Cerâmica Sardinha pelo fornecimento das matérias-primas utilizadas nesse trabalho.

Enfim, agradeço a todos os meus familiares diretamente ligados à minha formação pessoal e/ou acadêmica, com ou sem vínculos sanguíneos, pois como bem disse Shakespeare “bons amigos são a família que nos permitiram escolher”.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tabelas	XIV
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Justificativas	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Solo.....	4
2.2. Cimento Portland.....	5
2.2.1. Cura.....	8
2.2.2. Tipos de Cimento Portland.....	8
2.2.2.1. Cimentos Portland Comuns e Compostos.....	9
2.2.2.2. Cimentos Portland de Alto-Forno e Pozolânicos	10
2.2.2.3. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	11
2.2.2.4. Cimentos Portland Resistentes aos Sulfatos.....	12
2.2.2.5. Cimentos Portland de Baixo Calor de Hidratação	12
2.2.2.6. Cimento Portland Branco (CPB).....	13
2.2.2.7. Cimento para Poços Petrolíferos.....	14
2.3. Água	16
2.4. Tijolo solo-cimento.....	17
2.4.1. Definições	17
2.4.2. Aplicações.....	18
2.4.3. Vantagens.....	19
2.4.4. Processo de fabricação.....	21
2.5. Resíduos sólidos	27
2.6. Processo de obtenção de celulose	28
2.6.1. Processo Kraft.....	29

2.6.2. O ciclo de recuperação	30
2.7. Caracterização do grits	32
2.8. Quantidade de resíduo sólido gerado	33
2.9. Potencial Poluidor do grits	34
2.10. Métodos de Reciclagem do grits.....	35
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1. Matérias-primas	40
3.2. Metodologia	41
3.2.1. Beneficiamento das matérias-primas	41
3.2.2. Caracterização das matérias-primas.....	44
3.2.2.1. Caracterização mineralógica	44
3.2.2.2. Caracterização química	44
3.2.2.3. Análise morfológica	45
3.2.2.4. Caracterização Física	45
3.2.2.4.1. Análise granulométrica	45
3.2.2.4.2. Determinação da finura	45
3.2.2.4.3. Determinação da atividade pozolânica.....	46
3.2.2.4.4. Plasticidade	47
3.2.2.5. Caracterização do cimento	48
3.2.3. Formulação e preparação dos traços com adição de resíduo sólido grits	48
3.2.4. Preparação dos corpos cimentícios	49
3.2.5. Etapa de cura dos corpos cimentícios.....	51
3.2.6. Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova cimentícios	52
3.2.6.1. Massa específica Aparente	52
3.2.6.2. Resistência à compressão simples	52
3.2.6.3. Absorção de água	53
3.2.6.4. Comportamento Linear.....	54
3.2.6.5. Medida da Durabilidade.....	54
3.2.7. Caracterização microestrutural e de fases dos corpos cimentícios.....	56
CAPÍTULO 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57

4.1. Caracterização das Matérias-Primas Utilizadas	57
4.1.1. Análise Mineralógica	57
4.1.2. Caracterização Química	59
4.1.3. Análise térmica	61
4.1.4. Granulometria	64
4.1.5. Determinação da finura	66
4.1.6. Determinação da atividade pozolânica	67
4.1.7. Morfologia	68
4.1.8. Plasticidade	69
4.2. Propriedades das Misturas Preparadas	70
4.2.1. Resistência à Compressão	70
4.2.2. Absorção de Água	73
4.2.3. Massa Específica Aparente	74
4.2.4. Comportamento Linear	75
4.2.5. Durabilidade dos Corpos Cimentícios	77
4.3. Análise de fases e microestrutural dos corpos cimentícios curados	78
4.3.1. Análise Microestrutural	78
4.3.2. Análise de fases	85
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	88
5.1. Conclusões	88
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	89
Referências Bibliográficas	90

Lista de Figuras

Figura 2. 1. - Perfil do solo (United States Department of Agriculture, 2012).....	5
Figura 2. 2. - Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland (ABCP, 1999)	15
Figura 2. 3. – (a) Tijolos de solo-cimento e (b) Construção civil em solo-cimento (Lima, 2006; Destefani, 2009)	18
Figura 2. 4. – (a) Rasgo em alvenaria convencional e (b) Passagem de tubulações pelos furos (Destefani, 2009)	21
Figura 2. 5. – Fluxograma do processo para fabricação de solo-cimento (Pedroti, 2007)	21
Figura 2. 6. - Verificação da umidade ideal da mistura (Banco Nacional da Habitação/CEPEA, 1985).....	24
Figura 2. 7. - Esquema de teste de umidade ideal (Banco Nacional da Habitação/CEPEA, 1985).....	24
Figura 2. 8. - Etapa de prensa do tijolo solo-cimento (Monteiro tijolos, 2011).....	25
Figura 2. 9. – Tijolo solo-cimento com suas respectivas dimensões (FUNTAC, 1999).	26
Figura 2. 10. - Esquema de classificação dos resíduos sólidos segundo a fonte geradora (Cabral, 2007).....	28
Figura 2. 11. - Cavacos de madeira de aproximadamente 1 cm preparados para produção de celulose (ABTCP, 2012).....	29
Figura 2. 12. - Diagrama simplificado da recirculação química no processo kraft (Gullichen e Fogelholn, 2000).	30
Figura 2. 13. - Ciclo de recuperação do processo kraft – esquema (Gullichen e Fogelholn, 2000).	31

Figura 2. 14. - Esquema do Reator de Apagamento (Gullichen e Fogelholn, 2000).	32
Figura 2. 15. - Valores de resistência à compressão aos 14 e 28 dias (Miranda et al., 2011).	37
Figura 2. 16. - Valores de absorção dos diversos traços de solo-grits e comparação com os limites permitidos pela NBR 8491 (Miranda et al., 2011).	38
Figura 3. 1. – Fluxograma das etapas envolvidas neste trabalho.	40
Figura 3. 2. - Vista da FIBRIA CELULOSE da unidade de Aracruz em Barra do Riacho - ES (FIBRIA, 2011).	41
Figura 3. 3. - a) Resíduo sólido grits in natura; b) Resíduo sólido grits após seco e em fração de 200 mesh (75 µm ASTM).	42
Figura 3. 4. - a) Graal e pistilo de porcelana; b) Moinho de bolas Gardelin.	42
Figura 3. 5. - Peneira de 200 mesh (75 µm ASTM).	42
Figura 3. 6. - a) Solo in natura; b) solo pronto para utilização.	43
Figura 3. 7. - Estufa utilizada para secagem.	43
Figura 3. 8. - Peneira de 4 mesh (4,75 mm ASTM).	43
Figura 3. 9. - Fluxograma das etapas de produção da mistura para confecção dos corpos-de-prova incorporados com resíduo.	50
Figura 3. 10. – a) Prensa hidráulica METALPEM, modelo PHP 15 t; b) molde cilíndrico de aço utilizado na moldagem dos corpos cimentícios; e c) Balança digital marca Gehaka, modelo BG-2000 Classe II.	51
Figura 3. 11. - Câmara úmida para processo de cura.	51
Figura 3. 12. - Paquímetro digital utilizado no trabalho.	52
Figura 3. 13. - Máquina de ensaios universal utilizada no ensaio de resistência à compressão simples.	53
Figura 3. 14. – Escova de tiras de chapa de aço utilizada no ensaio.	56

Figura 3. 15. - Microscópio Confocal utilizado no trabalho.....	56
Figura 4. 1. – Difratoograma de raios-X do solo arenoso: C = Caulinita; G = Gipsita; Go = Goetita; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzo.	57
Figura 4. 2. – Difratoograma de raios - X para a amostra de resíduo grits: Co = CaCO ₃ ; W = FeO; N = Na ₂ CO ₃ ; Pi = CaNa ₂ (CO ₂) ₂ 2H ₂ O; Ph = Ca(OH) ₂	58
Figura 4. 3. – Difratoograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS: 1 = Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF); 2 = Alita (C ₃ S); 3 = Carbonato de cálcio; 4 = Belita (C ₂ S); 5 = Aluminato tricálcio (C ₃ A); 6 = Óxido de cálcio; 7 = Gipsita (CaSO ₄).	59
Figura 4. 4. – Curvas de análises térmicas diferenciais e termogravimétricas (ATD e ATG) para o solo arenoso.	62
Figura 4. 5. – Curvas de análises térmicas diferenciais e termogravimétricas (ATD e ATG) para o resíduo grits.	63
Figura 4. 6. - Curva granulométrica do solo arenoso utilizado.	64
Figura 4. 7. – Distribuição de tamanho de partícula do resíduo grits.	66
Figura 4. 8. – Morfologia das partículas do resíduo grits: (a) 200X; (b) 500X; (c) 1000X; d) 2000x.	69
Figura 4. 9. – Espectro de EDS para o resíduo grits.	69
Figura 4. 10. - Valores de resistência à compressão versus Porcentagem de Resíduo grits dos corpos-de-prova cilíndricos curados a 7 dias.....	71
Figura 4. 11. - Valores de resistência à compressão versus Porcentagem de Resíduo grits dos corpos-de-prova cilíndricos curados a 14 dias.....	71
Figura 4. 12. - Valores de resistência à compressão versus Porcentagem de Resíduo grits dos corpos-de-prova cilíndricos curados a 28 dias.....	72
Figura 4. 13. – Corpos-de-prova cilíndricos após a cura de 28 dias	72

Figura 4. 14. - Absorção de água versus porcentagem de resíduo grits incorporado aos corpos-de-prova cilíndricos aos 28 dias de cura.	73
Figura 4. 15. - Massa específica aparente em função da porcentagem de incorporação de resíduo grits, dos corpos-de-prova pós-moldagem.....	74
Figura 4. 16. - Massa específica aparente em função da porcentagem de incorporação de resíduo grits, dos corpos-de-prova após 28 dias de cura.	75
Figura 4. 17. - Expansão linear dos corpos cimentícios.	76
Figura 4. 18. - Retração Linear Diametral dos corpos cimentícios.	76
Figura 4. 19. - Retração Volumétrica dos corpos cimentícios.	77
Figura 4. 20. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0 % de resíduo grits: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.....	79
Figura 4. 21. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 10 % de resíduo grits: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.....	80
Figura 4. 22. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 20 % de resíduo grits: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.....	81
Figura 4. 23. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 30 % de resíduo grits: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.....	82
Figura 4. 24. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0, 10, 20 e 30 % de resíduo grits em 216X.	83
Figura 4. 25. - Micrografias da análise de fratura dos corpos cimentícios, após 28 dias de cura: a) 0% de resíduo; b) 10% de resíduo; c) 20% de resíduo; d) 30% de resíduo.	84
Figura 4. 26. – Espectro de EDS da análise de fratura dos corpos cimentícios, após 28 dias de cura: a) 0% de resíduo; b) 10% de resíduo; c) 20% de resíduo; c) 30% de resíduo.	85

Figura 4. 27. – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0, 10, 20 e 30% de resíduo grits após 7 dias de cura: C = Caulinita; G = Gipsita; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzo; B = Belita (C₂S); P = Portlandita (CH); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita; At = Aluminato tricálcico; Co = CaCO₃; Pi = CaNa₂(CO₂)₂2H₂O.....86

Figura 4. 28. – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0, 10, 20 e 30 % de resíduo grits após 14 dias de cura: C = Caulinita; G = Gipsita; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzo; B = Belita (C₂S); P = Portlandita (CH); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita; At = Aluminato tricálcico; Co = CaCO₃; Pi = CaNa₂(CO₂)₂2H₂O.....86

Figura 4. 29. – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0, 10, 20 e 30 % de resíduo grits após 28 dias de cura: C = Caulinita; G = Gipsita; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzo; Go = Goetita; B = Belita (C₂S); P = Portlandita (CH); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita; At = Aluminato tricálcico; Co = CaCO₃; S = SiO₃; W = FeO; N = Na₂CO₃; Pi = CaNa₂(CO₂)₂2H₂O.....87

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1. – Composição química do clínquer (ABCP, 2002).	6
Tabela 2. 2. – Compostos principais do cimento Portland (Neville, 1997).	7
Tabela 2. 3. – Classificação dos cimentos Portland segundo a ABNT (ABCP, 2002). 9	
Tabela 2. 4. – Composição química da escória de alto forno do cimento Portland CPIII - 40RS (Pinto, 2010).....	10
Tabela 2. 5. - Composição dos cimentos Portland comuns e compostos (ABCP, 2002).	10
Tabela 2. 6. - Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos (ABCP, 2002).	11
Tabela 2. 7. - Composição do cimento Portland de alta resistência inicial (ABCP, 2002).	12
Tabela 2. 8. - Composição dos cimentos Portland branco (ABCP, 2002).	13
Tabela 2. 9. - Exigências físicas e mecânicas de diversos cimentos (ABCP, 2002). 14	
Tabela 2. 10. - Exigências químicas de diversos cimentos (ABCP, 2002).	15
Tabela 2. 11. - Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland (ABCP, 2002). 16	
Tabela 2. 12. – Características de solos para fabricação de tijolos de solo-cimento (ABCP, 1985).	23
Tabela 2. 13. – Valores de resistência à compressão e absorção de água para tijolo de solo-cimento (ABNT, 1994).	26
Tabela 2. 14. - Principais componentes químicos do grão expressa na forma de óxidos (Machado et al, 2003; Pereira et al, 2006b; e Souza e Cardoso, 2008).	33
Tabela 2. 15. - Geração de resíduos sólidos (base seca) (CENIBRA, 2011).	34
Tabela 3. 1. - Caracterização física do cimento Portland CPIII - 40RS.	48

Tabela 3. 2. – Composição das massas Cimentícias (% em massa).....	49
Tabela 4. 1. - Composição química do solo arenoso, resíduo grits e cimento Portland CIII-40RS (%).....	61
Tabela 4. 2. – Variação da massa em função da temperatura na análise termogravimétrica do solo arenoso.	62
Tabela 4. 3. - Valores de massa específica real dos grãos de alguns tipos de minerais.....	65
Tabela 4. 4. - Resultado do ensaio de determinação de finura.	66
Tabela 4. 5. - Índice de atividade pozolânica utilizando o método Luxan et al. (1989).	67
Tabela 4. 6. - Índice de atividade pozolânica utilizando a norma NBR 5752 (ABNT 1992) expressa em MPa.	67
Tabela 4. 7. – Limites de consistência de Atterberg do solo arenoso (%).....	70
Tabela 4. 8. - Perda de massa total ao fim do sexto ciclo.	78

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

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO GRITS NAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE TIJOLO SOLO-CIMENTO

Fabício Bagli Siqueira

28 de Fevereiro de 2013

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

A indústria de celulose gera no seu processo produtivo grandes quantidades de resíduos, sendo que um deles é o resíduo grits. Este resíduo é rico em carbonato de cálcio, particularmente calcita. Em geral este resíduo é descartado em aterros próximos as fábricas. No entanto, a disposição ilimitada deste resíduo no solo pode causar sérios problemas ambientais. Este trabalho tem por objetivo avaliar a incorporação de resíduo grits em corpos cimentícios para produção de tijolo solo-cimento. Neste contexto, o resíduo grits substitui parcialmente o cimento Portland, que é um material que emite enorme quantidade de CO₂ durante o seu processo de fabricação. As matérias-primas utilizadas foram: solo, cimento Portland e resíduo grits proveniente da indústria de celulose. As matérias-primas foram caracterizadas quanto a difração de raios-X, composição química, análise térmica, análise granulométrica, análise morfológica e plasticidade. Quatro misturas de solo-cimento contendo 0, 10, 20 e 30 % em peso de resíduo sólido grits em substituição ao cimento portland foram preparadas. Os corpos cimentícios foram confeccionados por prensagem uniaxial a 18 MPa, teor de umidade de 16 % e curados durante 7, 14 e 28 dias. Os corpos cimentícios curados foram caracterizados em termos de absorção de água, massa específica bulk, durabilidade e resistência à tração por ensaio de compressão diametral. Os resultados experimentais indicaram que para as condições estudadas, é possível incorporar até 20 % em peso de resíduo sólido grits em substituição ao cimento Portland nos corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento.

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

EVALUATION OF INCORPORATION OF GRITS WASTE IN THE PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF SOIL-CEMENT BRICK

Fabício Bagli Siqueira

February 28th, 2013

Advisor: Prof. José Nilson França de Holanda

The cellulose industry generates in its production process large amounts of waste, one of which is the grits. This waste is rich in calcium carbonate, particularly calcite. In general, this waste is disposed of in landfills near the mills. However, the unlimited provision of this waste in the soil can cause serious environmental problems. This work aims to evaluate the incorporation of grits waste in cementitious bodies to produce soil-cement brick. In this context, the grits waste partially replace the Portland cement, which is a material that emits large amounts of CO₂ during its manufacturing process. The raw materials used were: soil, Portland cement and grits waste from cellulose industry. The raw materials were characterized as X-ray diffraction, chemical composition, thermal analysis, particle size analysis, morphological analysis and plasticity. Four soil-cement mixtures containing 0, 10, 20 and 30% Wt. % of grits waste replacing the Portland cement were prepared. The cementitious bodies were prepared by uniaxial pressing at 18 MPa, moisture content of 16%, and cured during 7, 14 and 28 days. The cementitious bodies cured were characterized in terms of water absorption, bulk density, durability, and tensile strength. The experimental results indicated that for the conditions studied, it was found that it is possible to incorporate up to 20% Wt. % of grits waste in replacement of Portland cement in cementitious bodies for use in soil-cement brick.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Os resíduos industriais vêm se tornando um dos mais sérios problemas que a sociedade enfrenta. Sua disposição de forma inadequada provoca a degradação do meio ambiente como, por exemplo, a contaminação dos mananciais de água e do solo (Collatto e Bergmann, 2009). No entanto, o reaproveitamento desses resíduos torna-se uma forma de proporcionar um destino nobre e ecologicamente correto.

O processo de reutilização de resíduos industriais poluentes por incorporação em materiais cerâmicos para a construção civil tem ganhado grande destaque no Brasil e no mundo, sobretudo no campo acadêmico. Este processo consiste, por exemplo, em incorporar o resíduo numa matriz cerâmica usada na fabricação de materiais cerâmicos para construção civil como tijolos maciços, blocos cerâmicos, telhas, revestimentos de piso e parede, argamassas e tijolos solo-cimento (Perez *et al.*, 1996; Grande, 2003).

Como a indústria de construção civil consome enorme volume de matérias-primas naturais, a incorporação de resíduos poluentes é atrativa devido aos seguintes fatores:

- 1) Possibilita menor consumo de matérias-primas naturais;
- 2) O processo produtivo geralmente não sofre grandes modificações com a introdução do resíduo na massa cerâmica;
- 3) Produtos cerâmicos para construção civil permitem larga variabilidade de sua composição química e mineralógica; e
- 4) Possibilidade de inertizar resíduos poluentes na estrutura do material cerâmico.

A indústria de celulose gera no seu processo produtivo grandes quantidades de resíduos, sendo que, um deles é o resíduo grits (Assumpção *et al.*, 1988; Machado *et al.*, 2006). O resíduo grits é proveniente do processo kraft de extração de celulose durante a recuperação da soda cáustica. Este resíduo é rico em carbonato de cálcio (calcita), que em geral é acondicionado em aterros próximos às fábricas (Miranda *et al.*, 2011). No entanto, Machado *et al.* (2006) afirma que a disposição ilimitada deste resíduo no solo pode causar sérios problemas ambientais como: i) a poluição do ar pela exalação de odores, fumaça, gases tóxicos ou

material particulado; ii) poluição das águas superficiais pelo escoamento de líquidos percolados ou carreamento de resíduos pela ação das águas de chuva e poluição do solo; e iii) poluição das águas subterrâneas pela infiltração de líquidos percolados. Neste contexto, a busca de uma solução correta, na forma de uma alternativa viável economicamente e ambientalmente para disposição final deste abundante resíduo é de alto interesse da indústria de celulose e da sociedade como um todo.

O presente trabalho de Mestrado se propôs a estudar a viabilidade de se incorporar resíduo sólido grits em corpo cimentício para produção de tijolo do tipo solo-cimento. Em particular o resíduo sólido grits foi utilizado em substituição parcial do cimento Portland, que em seu processo de fabricação emite enorme quantidade de CO₂, o chamado gás carbônico. Este gás é considerado prejudicial à saúde quando sua eliminação ocorre de forma desordenada, como através da queima de combustíveis fósseis e das mudanças no uso da terra (desmatamentos e queimadas, principalmente) impostas pelo homem. Isto leva a importantes alterações nos estoques naturais de carbono que tem um papel fundamental na mudança do clima do planeta, fator que contribui para o efeito estufa.

1.2. Objetivos

Este trabalho de dissertação de mestrado teve como objetivo principal, o estudo da influência da adição de resíduo sólido grits, proveniente da indústria de celulose, nas propriedades tecnológicas e na microestrutura de corpo cimentício para produção de tijolo solo-cimento.

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) Caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas.
- b) Formulação e preparação dos traços.
- c) Preparação das massas cimentícias incorporadas com resíduo grits.
- d) Caracterização física e mecânica dos corpos cimentícios.
- e) Caracterização microestrutural e estrutural dos corpos cimentícios.

1.3. Justificativas

O cimento Portland gera problemas ambientais no seu processo de fabricação, tais como, o alto consumo de energia elétrica e calórica e uma alta

eliminação de gás carbônico (CO₂) (Bernardo, 2009). Por outro lado, tem-se o grits que é um resíduo sólido de características arenosas e coloração acinzentada, gerado pela indústria de celulose durante o processo Kraft na etapa de recuperação do licor branco empregado no cozimento dos cavacos. Esse resíduo é gerado em grandes quantidades com cerca de 340.430 toneladas por ano, e ainda possui um pH elevado, tornando inviável o seu acondicionamento em aterros sanitários (CENIBRA, 2011).

Os tijolos solo-cimento apresentam excelentes características físicas e mecânicas, além de baixo custo, contribuindo para um aspecto econômico que os tornam altamente atrativos para fabricação de casas populares para a população de baixa renda. Neste trabalho de Mestrado foram desenvolvidos corpos cimentícios, destinados à produção de tijolos solo-cimento incorporados com resíduo sólido grits. Este resíduo foi incorporado em substituição parcial do cimento Portland, que é uma matéria-prima convencional.

Este estudo não apenas apresenta o benefício ambiental de destinar corretamente o resíduo, como também contribui para uma menor utilização de cimento Portland proporcionando o surgimento de novos materiais para a construção civil.

Portanto, espera-se ter contribuído para uma solução tecnológica viável, propondo uma nova alternativa que supera em custo e benefício ao método tradicional de disposição final do resíduo sólido grits que é poluente, e contribui ao mesmo tempo para reduzir a quantidade necessária de cimento na composição do tijolo solo-cimento.

Este trabalho está inserido na diretriz principal do Setor de Materiais e Meio Ambiente (SEMMA) do LAMAV/UENF, ao qual tem como prioridade, apresentar soluções para problemas ambientais que envolvam o emprego de materiais.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Solo

O solo é um aglomerado de partículas provenientes de decomposição da rocha, chamado de processo de intemperismo. Pode ser escavado com facilidade, sem o emprego de explosivos, o que se propicia a serem utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas (Ortigão, 2007).

O solo é um sistema dinâmico constituído por componentes sólidos, líquidos e gasosos de natureza mineral e orgânica, que ocupa a maior parte das superfícies continentais do planeta Terra. É estruturado em camadas denominadas horizontes, sujeitas a constantes transformações entrópicas, através de processos de adição, remoção, translocação de natureza química, física e biológica (Embrapa, 2006).

A rocha matriz é o fator que determina a composição mineralógica do solo, onde ocorre uma variabilidade muito grande de sua composição. A maioria dos minerais que compõem as rochas são silicatos e óxidos que contêm silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K). Além destes, outros minerais podem estar presentes no solo como o quartzo, sesquióxidos, talco, sulfetos, sulfatos e fosfatos (Jennys, 1994).

A estrutura do solo nada mais é do que a união de partículas unitárias de areia, silte e argila em partículas compostas ou grumos (Tomé, 1997).

Qualquer solo, alterado ou não, possui uma característica peculiar, ou seja, um perfil que pode ser visualizado através de cortes verticais em profundidade mediante abertura de uma trincheira. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de solos (2006), em solos inalterados em sua integridade estrutural de origem, um perfil típico pode ser dividido em três camadas distintas denominadas de:

- Horizonte O: camada superficial pouco espessa de resíduos orgânicos em decomposição, com uma coloração muito escura;
- Horizonte A: camada superior de um perfil, em geral de textura leve (arenosa), é a região que concentra maiores proporções de raízes, micro-organismos e matéria orgânica, podendo expressar alto grau de lixiviação. É o horizonte que sofre maior interferência do clima e da biomassa;
- Horizonte B: (subsuperficial) possui uma zona de iluviação onde parte dos sais lixiviados e argilas podem ser acumuladas. É o solo com coloração mais forte;

- Horizonte C: onde tem início uma camada de acúmulo de óxidos de ferro e de alumínio, argilas, carbonatos e minerais primários parcialmente intemperizados, o que equivale aproximadamente ao conceito de saprólito.

A Figura 2.1 ilustra um perfil de solo em corte, mostrando a distinção entre os horizontes.

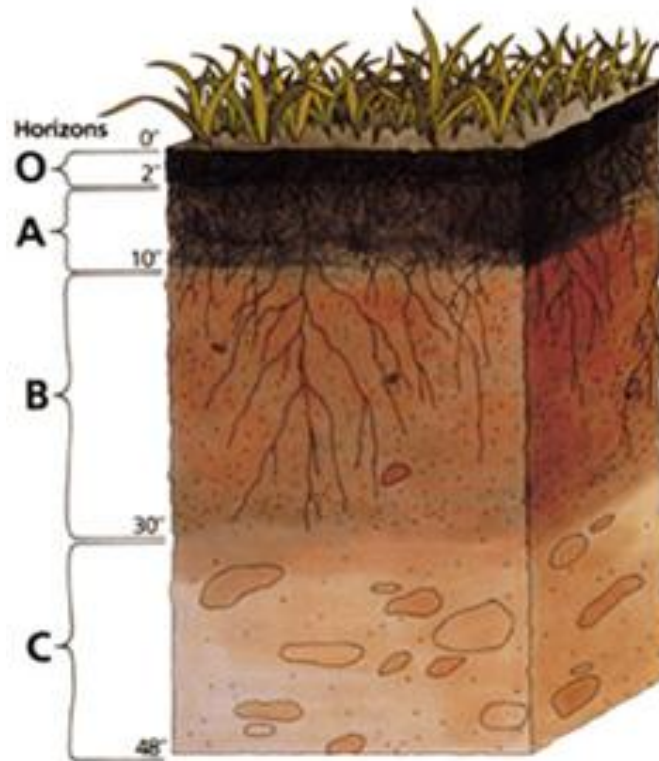


Figura 2. 1. - Perfil do solo (United States Department of Agriculture, 2012).

De acordo com Ferraz et al. (2000), a utilização do solo para construção civil pode ser tanto na forma em que ele é encontrado ou, após correção de algumas propriedades. Podem ser empregados diversos métodos para correção, sendo um deles a correção granulométrica.

2.2. Cimento Portland

Cimento é uma palavra derivada do latim *caementum*, que os romanos denominavam a mistura de cal com terra pozolana (cinzas vulcânicas das ilhas Gregas de Santorim e da região Pozzuoli, próximo a Nápoles), resultando em uma

massa aglomerante utilizada em obras de alvenaria, pontes e aquedutos (Grande, 2003).

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais (ABCP, 2002).

Segundo Taylor (1994) o cimento é um sólido fino resultante de uma mistura de clínquer e aditivos em proporções definidas. O cimento apresenta propriedades adesivas, que em contato com a água, produz uma reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, ganhando assim, resistência mecânica.

Neville (1997) afirma que para a fabricação do cimento são empregados materiais calcários, como gesso, alumina e sílica. O processo de fabricação do cimento Portland consiste em moer as matérias-primas, misturá-las nas proporções adequadas e queimar essa mistura em um forno rotativo até uma temperatura de cerca de 1450 °C. Nessa temperatura, o material sofre uma fusão desenvolvendo pelotas, conhecidas como clínquer, o qual a composição está disposta na Tabela 2.1. Após formação do clínquer, este é resfriado e moído, até um pó bem fino, geralmente menor que 75 µm, com adição de um pouco de gesso, resultando o cimento Portland largamente usado em todo mundo. A mistura e moagem das matérias-primas podem ser feitas tanto em via úmida quanto em via seca, ou seja, podem ser feitas em água ou a seco.

Tabela 2. 1. – Composição química do clínquer (ABCP, 2002).

Óxido	Teor (%)
CaO	60 – 67
SiO₂	17 – 25
Al₂O₃	3 – 8
Fe₂O₃	0,50 – 0,60
MgO	0,50 – 4,00
Alcalis	0,30 – 1,20
SO₃	2,00 – 3,50

Quando em queima ocorrem inúmeras reações de estado sólido entre as fases constituintes, reações envolvendo essas fases e a parte fundida do material e, ainda, a ocorrência de transformações mineralógicas devido ao resfriamento,

gerando os principais componentes do cimento (Tabela 2.2), que quando hidratados fornecem as principais propriedades deste material (Zampieri,1989).

Tabela 2. 2. – Compostos principais do cimento Portland (Neville, 1997).

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviação	Composição
O Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	42 – 60 %
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	14 – 35 %
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 – 13 %
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 – 10 %
Gesso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2	1 – 4 %

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

As reações químicas entre os silicatos e aluminatos relacionados na Tabela 2.2 com a água são denominadas de reações de hidratação do cimento e geram uma massa firme e resistente. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o cimento Portland não aglomera os agregados, ele só adquire propriedade adesiva quando misturado à água. Dessa forma a hidratação é importante para adesão e para gerar produtos que possuem características de pega e endurecimento. Além disso, o C_3S apresenta rápida hidratação, desprendendo uma quantidade média de calor, gerando um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-H), também conhecido como portlandita. Este composto contribui para elevar a resistência inicial da pasta endurecida e aumentar sua resistência final. Já o C_2S , que desprende uma quantidade pequena de calor durante sua lenta hidratação, também é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas e produz um volume menor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em comparação com o C_3S . Responsável pelas primeiras reações de hidratação, o C_3A libera uma grande quantidade de calor para formar aluminatos hidratados. O C_4AF também se hidrata rapidamente, semelhante ao C_3A , mas exerce pouca influência sobre a resistência mecânica da pasta (Grande, 2003).

O cimento é a segunda substância mais utilizada no mundo, porém sua produção gera grande impacto ao meio ambiente. A fabricação do cimento Portland é responsável por cerca de 5 % das emissões mundiais de gases estufa (Mendes *et al.*, 2008). Além disso, o impacto ambiental é gerado pela queima de combustível para a realização do processo de clínquerização e, também, pela liberação de CO_2

através da decomposição da calcita contida no calcário, durante a etapa de queima. No total, cada tonelada de cimento produzida, libera de 0,85 a 1,1 toneladas de CO₂ dependendo do combustível e da eficiência do processo, e consome cerca de 0,30 a 0,35 toneladas de argila (solo) (Karstensen *et al.*, 2006).

2.2.1. Cura

Segundo Castro (2008) a cura, em condições adequadas, tem como objetivos: i) impedir a perda da água de hidratação do cimento; ii) controlar a temperatura do material, até que se alcance o nível de resistência desejado; iii) e suprir água extra para as reações de hidratação. A cura é essencial para garantir a durabilidade adequada de superfícies expostas e desenvolvimento das resistências mecânicas. Sabe-se que a cura inadequada pode influir na qualidade final do produto, independente dos cuidados como preparo e transporte (Presa, 2011).

2.2.2. Tipos de Cimento Portland

A princípio o cimento Portland pode ser constituído unicamente de clínquer e de uma substância reguladora de pega, caracterizando o que se convencionou denominar “cimento Portland comum”. Entretanto, ao longo do tempo, outros materiais começaram a ser utilizados em conjunto com o clínquer, constituindo os “cimentos com adições” (Garcez, 2005). Desta forma, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define o cimento Portland em tipos e classes de acordo com os seus componentes e propriedades. A classe do cimento caracteriza sua resistência mínima potencial aos 28 dias, sendo dividida em três níveis: 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa.

A Associação Brasileira de Cimento Portland em 2002 relatou que no Brasil existem diferentes tipos de cimento Portland. Os mais empregados na construção civil são: cimento Portland comum, cimento Portland composto, cimento Portland de alto-forno e cimento Portland pozolânico.

Existem outros tipos de cimento no mercado, porém em menor escala comercial, devido a sua menor oferta, ou alto custo, ou pelas características especiais de aplicação, os quais são: cimento Portland de alta resistência inicial, cimento Portland resistente aos sulfatos, cimento Portland branco, cimento Portland

de baixo calor de hidratação e cimento para poços petrolíferos. A Tabela 2.3 mostra classificação dos cimentos Portland de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Tabela 2. 3. – Classificação dos cimentos Portland segundo a ABNT (ABCP, 2002).

Nome técnico	Sigla
Cimento Portland comum	CP I
Cimento Portland comum com adição	CP I-S
Cimento Portland com escória	CP II-E
Cimento Portland com pozolana	CP II-Z
Cimento Portland com filer	CP II-F
Cimento Portland de alto-forno	CP III
Cimento Portland pozolânico	CP IV
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V
Cimento Portland resistentes a sulfatos	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS
Cimento Portland de baixo calor de hidratação	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC
Cimento Portland branco estrutural	CPB
Cimento Portland para poços de petróleo	CPP

2.2.2.1. Cimentos Portland Comuns e Compostos

O primeiro cimento Portland lançado no mercado brasileiro foi o conhecido **CP**, correspondendo atualmente ao **CP I**, um tipo de cimento Portland comum sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega). A partir do amplo domínio científico sobre o cimento Portland comum, é que se puderam desenvolver outros tipos de cimentos. Em 1991 surgiu no mercado brasileiro um novo tipo de cimento denominado de cimento Portland composto, cuja composição é intermediária entre os cimentos Portland comuns e os cimentos Portland com adições (alto-forno e pozolânico) (ABCP, 2002). Na Tabela 2.4 podemos observar a composição química da escória de alto-forno.

Os cimentos Portland compostos (Tabela 2.5) são os mais encontrados atualmente no mercado, respondendo por aproximadamente 75 % da produção

industrial brasileira. Eles são utilizados na maioria das aplicações usuais, em substituição ao antigo CP.

Tabela 2. 4. – Composição química da escória de alto forno do cimento Portland CPIII - 40RS (Pinto, 2010).

Óxido	Teor (%)
CaO	41,60
SiO ₂	33,65
Al ₂ O ₃	12,42
MgO	7,95
TiO	0,73
FeO	0,45

Tabela 2. 5. - Composição dos cimentos Portland comuns e compostos (ABCP, 2002).

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

2.2.2.2. Cimentos Portland de Alto-Forno e Pozolânicos

O consumo apreciável de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou mundialmente a busca de medidas para diminuição do consumo energético. Nos cimentos Portland de Alto-Forno e Pozolânico foram utilizadas alternativas para contornar o problema energético. Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto-forno, que são resíduos de siderúrgicas que funcionam como ligante hidráulico, ao qual proporciona o aumento da impermeabilidade e da resistência final. Foram acrescentados ainda materiais

pozolânicos derivados de compostos vulcânicos, certas argilas queimadas, resíduos de carvoarias, o que proporcionou uma maior impermeabilidade (ABCP, 2002).

Segundo Velten *et al.* (2006) as escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, ou seja, da maneira como são obtidas endurecem quando misturadas com água. Porém, as reações de hidratação das escórias são lentas, o que limitam sua aplicação prática. A cal liberada durante a hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória quando é adicionada ao cimento, proporcionando uma rápida hidratação. Já a ativação física é conseguida pelo aumento da finura quando a escória é moída separada ou com o clínquer. Os materiais pozolânicos, ao contrário das escórias granuladas de alto-forno, não reagem com a água da forma como são adquiridas (Gomes, 2003). Mas, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a compostos com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio é um produto normalmente resultante da hidratação deste (Silva, 2011). A Tabela 2.6 mostra a composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos.

Tabela 2. 6. - Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos (ABCP, 2002).

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória Granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

2.2.2.3. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias de sua aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem (Tabela 2.7) diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele

adquirir elevadas resistências, com maior velocidade. A NBR 5733 (ABNT, 1991) é quem fixa as condições exigíveis no recebimento do cimento Portland de alta resistência inicial (CP V - ARI).

Tabela 2. 7. - Composição do cimento Portland de alta resistência inicial (ABCP, 2002).

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Material carbonático	
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	0-5	NBR 5733

2.2.2.4. Cimentos Portland Resistentes aos Sulfatos

Segundo a NBR 5737 (ABNT, 1992), os cimentos Portland resistentes aos sulfatos são aqueles que têm a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados, tais como os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos. Qualquer um dos cinco tipos básicos (**CP I**, **CP II**, **CP III**, **CP IV** e **CP V-ARI**) pode ser considerado resistente aos sulfatos, desde que obedçam ao pelo menos uma das seguintes condições:

- teor de aluminato tricálcico ($(CaO)_3Al_2O_3$) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente.
- cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa.
- cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa.
- cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

2.2.2.5. Cimentos Portland de Baixo Calor de Hidratação

De acordo com a ABCP (2002), o aumento da temperatura no interior de grandes estruturas de concreto devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento pode levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica, que podem

ser evitadas se forem usados cimentos com taxas lentas de evolução de calor, os chamados cimentos Portland de baixo calor de hidratação.

Segundo a NBR 13116, esse tipo de cimento apresenta taxas lentas de evolução de calor que varia entre 260 J/g até 300 J/g aos 3 dias e 7 dias de hidratação.

2.2.2.6. Cimento Portland Branco (CPB)

É um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração. A cor branca é conseguida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e manganês e por condições especiais durante a fabricação, especialmente com relação ao resfriamento e à moagem do produto.

O CPB é dividido em dois subtipos: cimento Portland branco estrutural e cimento Portland branco não estrutural, cujas composições são mostradas na Tabela 2.8.

Tabela 2. 8. - Composição dos cimentos Portland branco (ABCP, 2002).

Tipo de cimento Portland	Código de identificação (sigla + classe)	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer branco + gesso	Material carbonático	
Branco estrutural	CPB-25 CPB-32 CPB-40	100-75	0-25	NBR 12989
Branco não estrutural	CPB	74-50	26-50	

O cimento Portland branco estrutural é aplicado em concretos brancos para fins arquitetônicos, possuindo as classes de resistência 25, 32 e 40, similares às dos outros tipos de cimento. Já o cimento Portland branco não estrutural não tem indicação de classe e é aplicado, por exemplo, no rejuntamento de azulejos e na fabricação de ladrilhos hidráulicos, ou seja, em aplicações não estruturais, sendo esse aspecto ressaltado na sacaria para evitar uso indevido por parte do consumidor (NBR 12989).

2.2.2.7. Cimento para Poços Petrolíferos

O consumo desse tipo de cimento é pouco expressivo quando comparado aos outros tipos de cimentos normalizados no País. Sua composição não se observam outros componentes além do clínquer e do gesso para retardar o tempo de pega. No processo de fabricação do cimento para poços petrolíferos são tomadas precauções para garantir que o produto conserve as propriedades reológicas (plasticidade) necessárias nas condições de pressão e temperatura elevadas presentes a grandes profundidades, durante a aplicação nos poços petrolíferos.

As Tabelas 2.9 e 2.10 apresentam os limites estabelecidos de exigências químicas, físicas e mecânicas para os diferentes tipos de cimento em suas aplicações. As exigências químicas visam a limitar o teor de adições, a pré-hidratação e falhas no processo de fabricação, enquanto que as exigências físico-mecânicas garantem o desempenho mecânico e reológico quando da aplicação em pastas, argamassas e concretos.

Tabela 2.9. - Exigências físicas e mecânicas de diversos cimentos (ABCP, 2002).

Tipo de cimento Portland	Classe	Finura		Tempos de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão				
		Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m ² /Kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
CP I	25	≤ 12	≥ 240						≥ 8	≥ 15	≥ 25	
	32	≤ 12	≥ 260	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
	40	≤ 10	≥ 280						≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CP II- E	25	≤ 12	≥ 240						≥ 8	≥ 15	≥ 25	
	32	≤ 12	≥ 260	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
	40	≤ 10	≥ 280						≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CP III ⁽²⁾	25			≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5		≥ 8	≥ 15	≥ 25	≥ 32 ⁽¹⁾
	32	≤ 8	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40 ⁽¹⁾
	40								≥ 12	≥ 23	≥ 40	≥ 48 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾	25			≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5		≥ 8	≥ 15	≥ 25	≥ 32
	32	≤ 8	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40
CP V- ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5,0	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-	-

(1) Ensaio facultativo.
(2) Outras características podem ser exigidas, como calor de hidratação, inibição da expansão devida à relação álcali-agregado, resistência a meios agressivos, tempo máximo de início de pega.

Tabela 2. 10. - Exigências químicas de diversos cimentos (ABCP, 2002).

Tipo de cimento Portland	Resíduo insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CO ₂ (%)	S (%)
CP I	≤ 1,0	≤ 2,0			≤ 1,0	-
CP I-S	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-
CP II- E	≤ 2,5					-
CP II- Z	≤ 16,0	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	-
CP II- F	≤ 2,5					-
CP III	≤ 1,5	≤ 4,5	-	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 1,0 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾⁽³⁾	⁽⁴⁾	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-
CP V- ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 3,5 ≤ 4,5 ⁽⁵⁾	≤ 3,0	-

(1) Ensaio facultativo.
(2) A atividade pozolânica do cimento, determinada conforme a NBR 5753, deve ser positiva.
(3) A atividade do material pozolânico, determinada conforme a NBR 5752, deve ser maior que 75%.
(4) O teor de material pozolânico deve ser determinado pelo ensaio de resíduo insolúvel.
(5) O teor de SO₃ igual a 3,5% aplica-se quando C₃A ≤ 8,0, e 4,5% quando C₃A ≥ 8,0%.

A Figura 2.2 mostra a evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland mencionados anteriormente. Podemos observar que o cimento que possui a maior resistência à compressão é o CP V. Este tipo de cimento não é recomendado para a fabricação de tijolo solo-cimento, motivo pelo qual não foi utilizado neste trabalho.

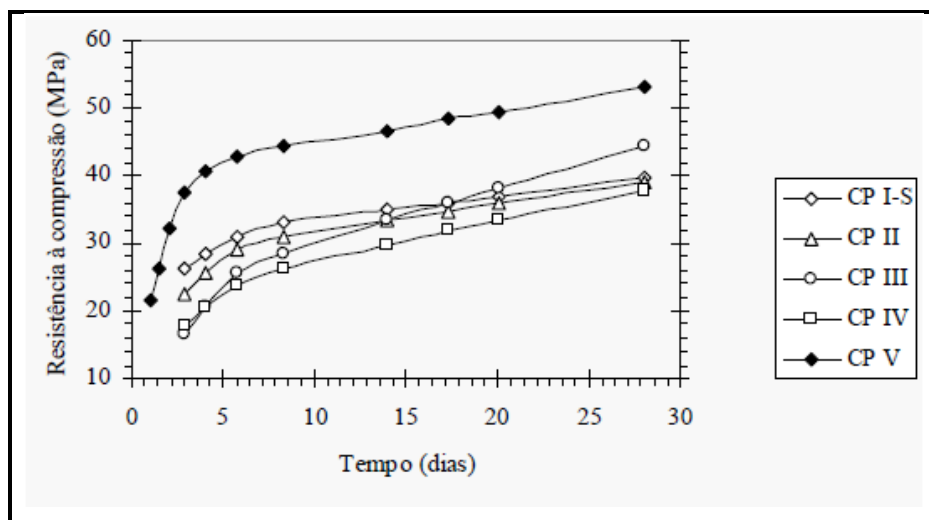


Figura 2. 2. - Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland (ABCP, 1999).

O cimento Portland de alto-forno CP III foi escolhido para utilização neste trabalho. A escolha foi baseada na facilidade de encontrá-lo no âmbito comercial, seu baixo custo e principalmente por ser dentre os recomendados na fabricação de tijolos solo-cimento, pela ABCP o cimento com maior resistência à compressão após 28 dias de cura, o qual pode ser observado a seguir na Figura 2.2 e na Tabela 2.11.

Tabela 2. 11. - Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland (ABCP, 2002).

Aplicação	Tipos de cimento Portland
Argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Concreto protendido com protensão das barras antes do lançamento do concreto	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-Z, CP II-F), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento para desforma rápida, curados por aspersão de água.	de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Pavimento de concreto simples ou armado	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Solo-Cimento	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)

2.3. Água

Segundo Zampieron (2010), pode ser dito que a água é uma substância insípida, inodora e incolor, e que em temperatura ambiente, é encontrada no estado líquido. Ela entra em pequenas proporções na mistura do solo-cimento, com o objetivo de conferir plasticidade e resistência mecânica ao solo. Isto torna possível a conformação e manuseio da mistura, antes do endurecimento (Silva, 2005).

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

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

Para amenizar este cenário é necessária uma conscientização da população com relação ao uso correto da água, um investimento maior em saneamento por parte dos governantes e buscar atividades mais sustentáveis (Victorino, 2007).

Na fabricação do tijolo solo-cimento não é produzido nenhum efluente que possa causar dano ao meio ambiente, contribuindo para que este produto esteja em conformidade com a crescente preocupação de preservação ambiental (Taveira, 1987).

2.4. Tijolo solo-cimento

2.4.1. Definições

Segundo Ferraz (2000), o tijolo de solo-cimento (Fig. 2.3a) é uma das alternativas para a construção de alvenaria em habitações e demais edificações (Fig. 2.3b). As vantagens do uso do tijolo de solo-cimento vão desde a fabricação até sua utilização no canteiro de obras (Webb, 1992). Os equipamentos utilizados na fabricação são simples e de baixo custo. A mão de obra para operar a máquina de fabricação não precisa ser especializada, permitindo sua operação no próprio local de obra, dessa forma reduzem-se os custos com transporte. Sua resistência à compressão é semelhante à do tijolo convencional, mas a qualidade final é superior, possuindo dimensões regulares e faces planas (Ferraz, 2004).

O tijolo solo-cimento é um material alternativo de baixo custo, sendo o produto final da mistura homogênea e compactada de solo (argila arenosa), cimento Portland comercial e água em proporções adequadas obtidas de ensaios específicos ou determinadas pela experiência local (Bouth, 2005). O produto final deste processo é um material com boa resistência a compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade, tratando-se de um processo físico-químico de estabilização, quando submetido à cura adequada. Esta mistura no início aparenta uma "farofa" úmida e, após ser compactada ou prensada ela

endurece e, com a cura ganha consistência e durabilidade suficiente para várias aplicações (Grande, 2003).

Já se utilizava desde a antiguidade o solo como principal agregado para a construção, o qual era intercalado com varas de madeira, resultando assim na intitulada casa de “pau a pique”. Ainda, produziam-se tijolos apenas com o solo ou adicionando a ele, outro tipo de material natural que o tornava mais garboso e resistente (Cruz, 2007). Porém, atualmente esses materiais naturais deram lugar a um produto industrializado de qualidade controlada o qual conhecemos como cimento (SEBRAE, 2011).

No solo-cimento, o cimento entra em quantidade que varia de 5 a 10 % do volume do solo, que é o suficiente para estabilizá-lo e conferir bons resultados com relação às propriedades de resistências à compressão e absorção de água. De acordo com a norma NBR 10834 (ABNT, 1994) a resistência à compressão deve ser maior que 2 MPa e a absorção de água menor que 20 %. O solo-cimento tem um custo final de acordo com o SEBRAE (2009) de 50 % mais barato que o produto convencional.

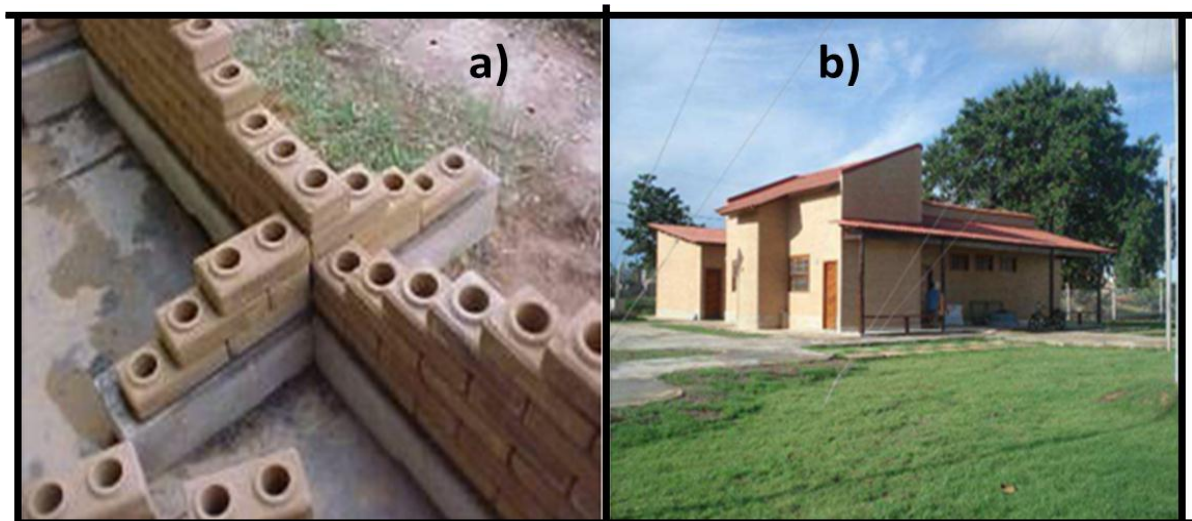


Figura 2. 3. – (a) Tijolos de solo-cimento e (b) Construção civil em solo-cimento (Lima, 2006; Destefani, 2009).

2.4.2. Aplicações

Não se sabe ao certo quando o tijolo solo-cimento começou a ser utilizado, mas sabe-se que desde 4000 a.C. os materiais cerâmicos já eram utilizados, devido

sua durabilidade e abundância da matéria-prima (argila), o que proporcionava um excelente abrigo das forças naturais (Castro, 2008).

Em 1915, nos EUA, foi utilizada pela primeira vez pelo engenheiro Bert Reno uma mistura de conchas marítimas, areia e cimento Portland, com a finalidade de pavimentar uma rua, o qual em 1920 foi patenteado o solo-cimento (Cruz, 2007). O uso efetivo aconteceu em 1929 com a descoberta da relação umidade/peso específico aparente na compactação de solos, permitindo uma infinidade de usos para o solo-cimento, tais como: pavimentação, revestimento de canais, diques, reservatórios e barragens de terra, estabilização de taludes, injeções, ladrilhos, tijolos, blocos, painéis e paredes monolíticas (Pitta, 1995).

Pitta (1995) faz o relato, que em 1935 foi realizado pela Portland Cement Association (PCA), o primeiro estudo quantitativo na busca por novas tecnologias para a fabricação e aplicação do material.

Na década de 60, o solo-cimento passou a ser mais estudado e aplicado com maior frequência no mundo todo (Fiquerola, 2004). Segundo Mercado (1990), no Brasil, só a partir de 1970 que se tornou objeto de intensas pesquisas, principalmente da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia (CEPED) e no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

Na atualidade um dos principais itens a ser destacado no desenvolvimento do tijolo solo-cimento é a confecção de alvenarias, que se refere a um processo construtivo que pode ser empregado tanto em casas como em edifícios de múltiplos pavimentos (SEBRAE, 2011).

2.4.3. Vantagens

São muitas as vantagens acerca do tijolo solo-cimento, a começar por sua fabricação que é uma tecnologia alternativa de baixo custo e de fácil implementação, que possibilita a utilização de solo como um de seus componentes, que é um elemento em abundância na natureza. O solo pode ser adquirido muitas das vezes no próprio local da obra ou próxima a ela, que implica na economia do frete. Esse material é que entra em maior proporção na composição, devendo ser escolhido e misturado de maneira a proporcionar o uso de menor quantidade possível de cimento (Lopes, 2002).

Diferentemente do tijolo convencional, o tijolo solo-cimento necessita apenas de um pequeno período de cura, o que garante resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade e durabilidade maior que a dos outros tijolos cerâmicos (Carneiro et al., 2001).

O tijolo de solo-cimento constitui uma das alternativas para a construção de alvenaria. O seu processo de execução é muito simples, podendo ser efetuado por pessoa experiente em qualquer outro tipo de construção civil, dispensando mão de obra especializada (Neves, 1989).

Segundo o relato de Silva (2005) os tijolos solo-cimento possuem furos verticais, que contribuem para:

- Agilidade no encaixe, na hora da execução da obra;
- A redução de seu peso, facilitando seu manuseio de forma geral;
- Isolamento térmico do calor, formados por câmaras térmicas, evitando que o calor do lado de fora penetre no interior da residência. Com isso a temperatura interna é inferior à externa;
- Isolamento térmico do frio formado pelas câmaras térmicas que conservam no inverno o calor proporcionado pelo sol, e as mesmas à noite fazem com que a temperatura interior seja maior que a exterior;
- Facilitam as instalações hidráulicas (Figura 2.4b) e elétricas, evitando quebrar os tijolos;
- Facilidade em embutir a estrutura de sustentação por ser aplicado espaçadamente nesses furos, concreto e ferragem na parede, ficando distribuída ao longo de sua extensão, e não nos cantos como nos sistemas convencionais;
- Elimina o uso de formas de madeira, juntamente com sua mão de obra para sua construção e resíduos de madeira ao fim da obra; e
- Proteção de umidade, pois propiciam a evaporação do ar, evitando com isso, a formação de umidade nas paredes e interior da construção, que causa danos à saúde e danos materiais.

Além disso, a planeza e lisura das faces desses tijolos solo-cimento fazem com que o material usado para assentamento (argamassa), tenha uma aplicação de espessura mínima e uniforme. 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).

Segundo o SEBRAE (2009), existe uma economia de 50 % em relação ao preço final da obra, o que chama desperta muita atenção. Apresenta-se então, o tijolo solo-cimento como possível alternativa em reduzir o problema do déficit populacional brasileiro, dando ao governo a oportunidade de resolver com um gasto bem menor.

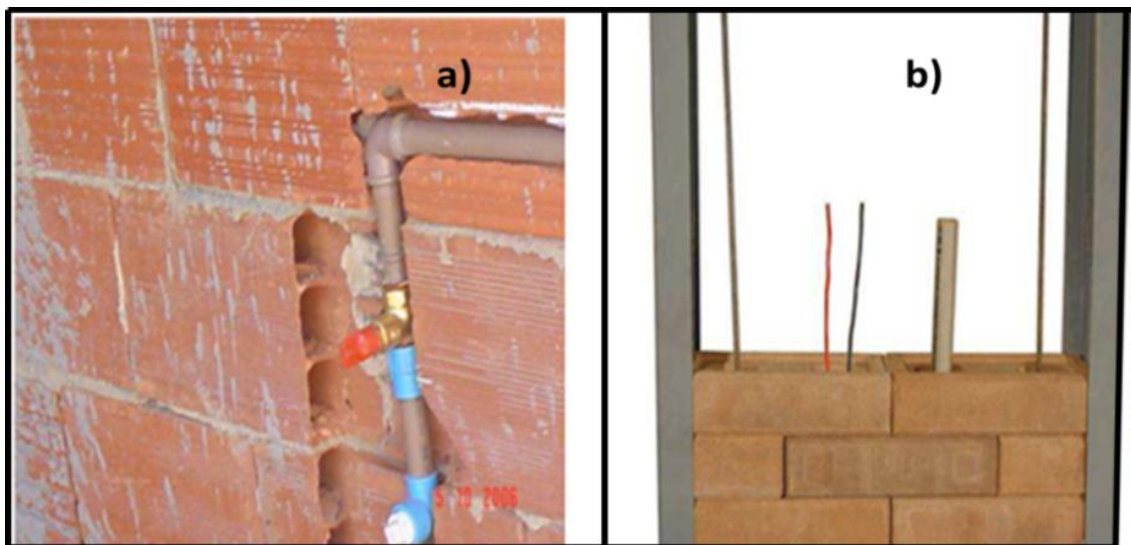


Figura 2. 4. – (a) Rasgo em alvenaria convencional e (b) Passagem de tubulações pelos furos (Destefani, 2009).

2.4.4. Processo de fabricação

A Figura 2.5 ilustra o fluxograma do processo de produção do solo-cimento, segundo Pedroti (2007).

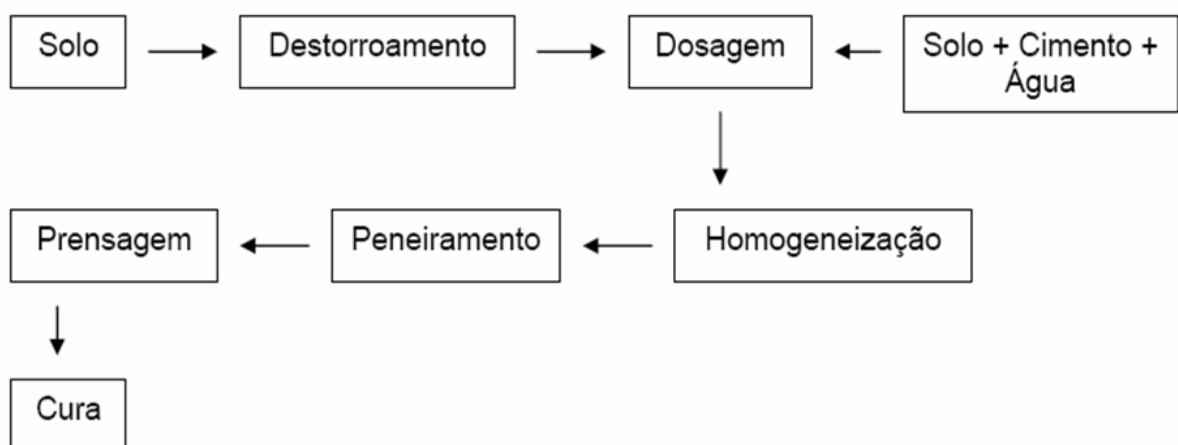


Figura 2. 5. – Fluxograma do processo para fabricação de solo-cimento (Pedroti, 2007).

A fabricação do tijolo solo-cimento é constituída de quatro etapas; as quais estão descritas a seguir:

Etapa 1 - Preparação do solo:

O solo é o elemento que entra em maior proporção na mistura, devendo ser escolhido de modo que permita o uso de menor quantidade de cimento (Lopes, 2002).

A utilização do solo como material de construção pode-se dar tanto na forma como ele é (solo natural), ou após a correção de algumas de suas propriedades de engenharia. Para essa correção podem ser empregados diversos métodos, entre os quais a correção granulométrica e a adição de compostos químicos (Ferraz et al., 2000).

A estabilização de um solo consiste em dotá-lo de condições para resistir a deformações e ruptura durante o período em que estiver exercendo funções que exijam essas características, num pavimento ou outra obra qualquer (Senço, 2001). A formação e a estabilização dos agregados do solo ocorrem simultaneamente na atuação dos processos físicos, químicos e biológicos (Silva e Mielniczuk, 1997). Esses processos atuam por mecanismos próprios em que os agregados são envolvidos por substâncias que agem na agregação e na estabilização, entre estas, as principais são: argila, sílica coloidal, compostos orgânicos, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Ferraz, 2004). Modernamente adota-se a prática de estabilizar o solo com aditivos químicos, tais como cimento, cal, borra de carbureto, cinzas volantes, escórias de alto-forno e materiais pozolânicos em geral. A estabilização do solo é feita para várias finalidades, entre elas a esterilização de misturas solo-cimento para produção de tijolos (Valenciano, 1999).

Normalmente, os solos arenosos com baixa umidade estabilizam-se com pequenas quantidades de cimento. A presença de argila na composição do solo é necessária para dar à mistura de solo e cimento, quando umedecido e compactado, coesão suficiente que permita a conformação e o manuseio dos tijolos após a prensagem. Não devem ser utilizados solos que contenham matéria orgânica, pois esta pode interferir na hidratação do cimento (PCA, 1969).

Segundo a ABCP (1985), os solos adequados para a fabricação de blocos vazados e tijolos maciços de solo-cimento devem atender características apresentadas na Tabela 2.12.

Tabela 2. 12. – Características de solos para fabricação de tijolos de solo-cimento (ABCP, 1985).

Características	Requisitos (%)
% passando na peneira # 4 (4,75 mm)	100
% passando na peneira # 200 (0,075 mm)	10 a 50
Limite de Liquidez (LL)	≤ 45
Índice de Plasticidade (IP)	≤ 18
% de areia	50 a 70
% de silte	10 a 20
% de argila	10 a 20

Depois de selecionado o solo, seja em uma jazida ou no próprio canteiro de obras, ele deve passar numa peneira de 4,75 mm (ABNT), no intuito de desagregar os torrões e eliminar o material que não conseguiu ultrapassar a malha da peneira.

Etapa 2 - Preparação da mistura:

O solo preparado (destorroado e peneirado) e o cimento são misturados como se fosse uma argamassa, até a completa homogeneização, que é alcançada quando a mistura adquire coloração uniforme (ABCP,1985).

Conforme a ABCP (2002) recomenda-se moldar tijolos com as proporções, em volume, de cimento e solo de 1:9, 1:10, 1:12 e 1:14, ou seja, uma parte de cimento para 9, 10, 12 ou 14 partes de solo. A escolha do traço adequado deve ser o que apresente menor consumo de cimento e atenda as normas de resistência à compressão e absorção de água estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1988).

A água, se necessária, deve ser adicionada em forma de chuva, até atingir a umidade ideal, obtendo uma argamassa farofada (CEPED,1982).

Quando não se possui misturador mecânico, o solo é espalhado sobre uma superfície lisa numa camada de até 20 cm, e em seguida, o cimento é distribuído sobre a camada de solo e, com o auxílio de pás e enxadas é processada a mistura de solo com o cimento (CEBRACE, 1981).

Segundo o Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT,1985) a verificação da umidade da mistura é feita, com razoável precisão, da seguinte forma prática:

a) Toma-se um punhado da mistura e aperta-se energicamente entre os dedos e a palma da mão. Ao se abrir a mão, o bolo deverá ter a marca deixada pelos dedos de acordo com a Figura 2.6.

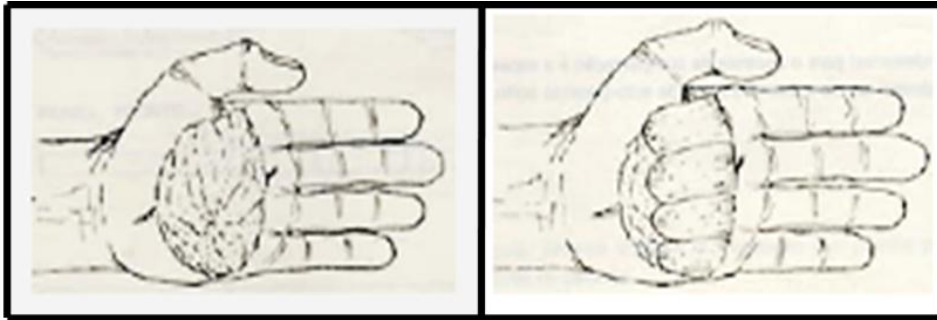


Figura 2. 6. - Verificação da umidade ideal da mistura (Banco Nacional da Habitação/CEPEA, 1985).

b) Deixando-se o bolo cair de uma altura aproximada de 1 m, sobre uma superfície dura (Figura 2.7), ela deverá esfarelar-se ao chocar-se com a superfície. No caso disto não ocorrer, a mistura estará muito úmida.

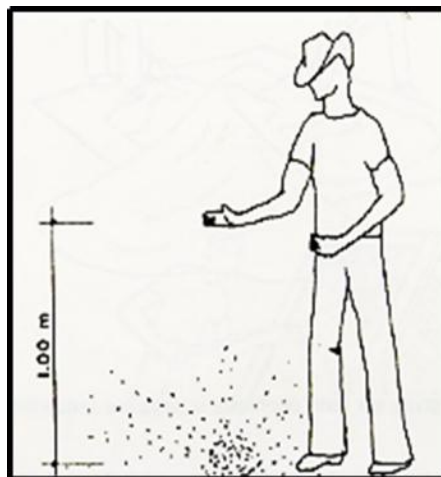


Figura 2. 7. - Esquema de teste de umidade ideal (Banco Nacional da Habitação/CEPEA, 1985).

Etapa 3 - Fabricação da peça:

O processo de fabricação dos tijolos solo-cimento segundo a norma NBR 10832 (ABNT, 1989) compreende as fases de destorroamento, seguida pelo

peneiramento e secagem do solo. Após seu beneficiamento, faz-se uma mistura homogênea do solo com o cimento adicionando água em quantidades definidas. Logo após a mistura é prensada, e então a peça produzida é expelida pela prensa sobre os paletes (bandejas) e está pronta para ser curada na sombra, ou em câmara úmida, sobre uma superfície plana, em pilhas de altura máxima de 1,5 m (Presca, 2011). A Figura 2.8 ilustra um dos tipos de prensa que podem ser utilizadas para produção do solo-cimento.

Se o solo for muito arenoso e não for possível empilhar as peças logo após a fabricação, costuma-se deixá-las no primeiro dia, depositadas sobre os paletes, fazendo-se o empilhamento no segundo dia (Fiquerola, 2004).



Figura 2. 8. - Etapa de prensa do tijolo solo-cimento (Monteiro tijolos, 2011).

Etapa 4 - Cura:

Decorridas seis horas da moldagem e durante os sete primeiros dias, as peças devem ser umedecidas constante e frequentemente com regador munido de chuveiro, a fim de garantir cura necessária (CEBRACE, 1981).

Há casos em que não há condições de cura em local coberto. Neste caso se deve proteger a pilha com uma lona (Taveira, 1987).

Existe também o processo de cura em câmara úmida, em que a NBR 12024 (ABNT, 1992) estabelece que o período de cura ocorra dentro de um recipiente fechado, onde se tenha o controle da umidade relativa do ar não inferior a 95% e uma temperatura de $(23 \pm 2^\circ\text{C})$, em um período obrigatoriamente de no mínimo 7 dias.

A NBR 10834 (ABNT, 1994) é quem estabelece valores a serem seguidos com relação às propriedades tecnológicas para a fabricação de tijolos solo-cimento (Tabela 2.13), visando um produto final de qualidade.

Tabela 2. 13. – Valores de resistência à compressão e absorção de água para tijolo de solo-cimento (ABNT, 1994).

Valores-limite (aos 28 dias)	Média	Individual
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 2,0$	$\geq 1,7$
Absorção de água (%)	≤ 20	≤ 22

De acordo com a cartilha para produção de tijolo solo-cimento da Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC, 1999), a Figura 2.9 mostra as dimensões do tijolo solo-cimento.

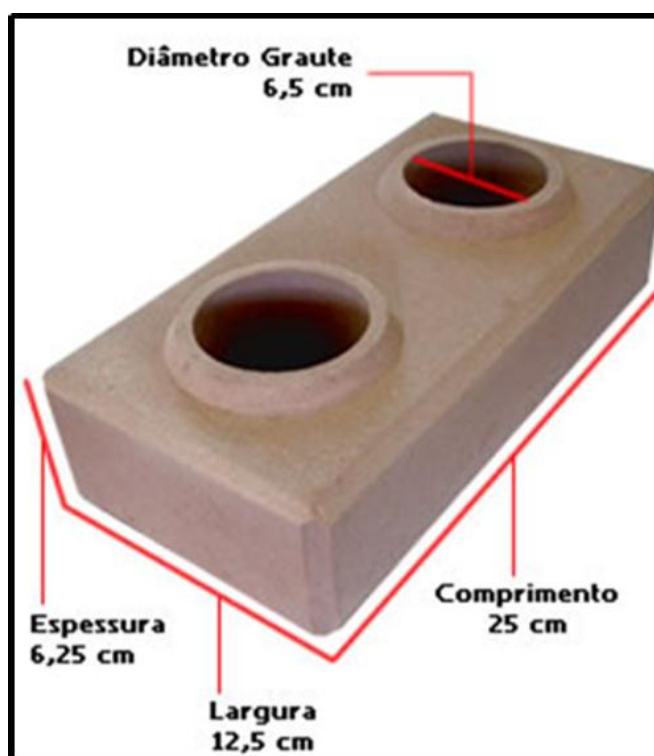


Figura 2. 9. – Tijolo solo-cimento com suas respectivas dimensões (FUNTAC, 1999).

2.5. Resíduos sólidos

De acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos sólidos podem ser definidos como resíduos nos estados sólido ou semissólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluídos nesta definição estão os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Os resíduos sólidos podem ser classificados, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública. Dessa forma são classificados em:

- **Resíduos classe I** – resíduos perigosos: aqueles que, em função das suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente ou apresentem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- **Resíduos classe II A** – resíduos não inertes: são aqueles que não apresentam periculosidade, mais apresentam características tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Ficam ainda incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, e os gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, assim como líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos de água, ou que exijam para isso soluções inviáveis técnica e economicamente em face à melhor tecnologia disponível;
- **Resíduos classe II B** – resíduos inertes: são aqueles que, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de portabilidade da água, executando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Na Figura 2.10 é apresentado o detalhamento da classificação dos 18 resíduos sólidos segundo NBR 10004 (ABNT, 2004).

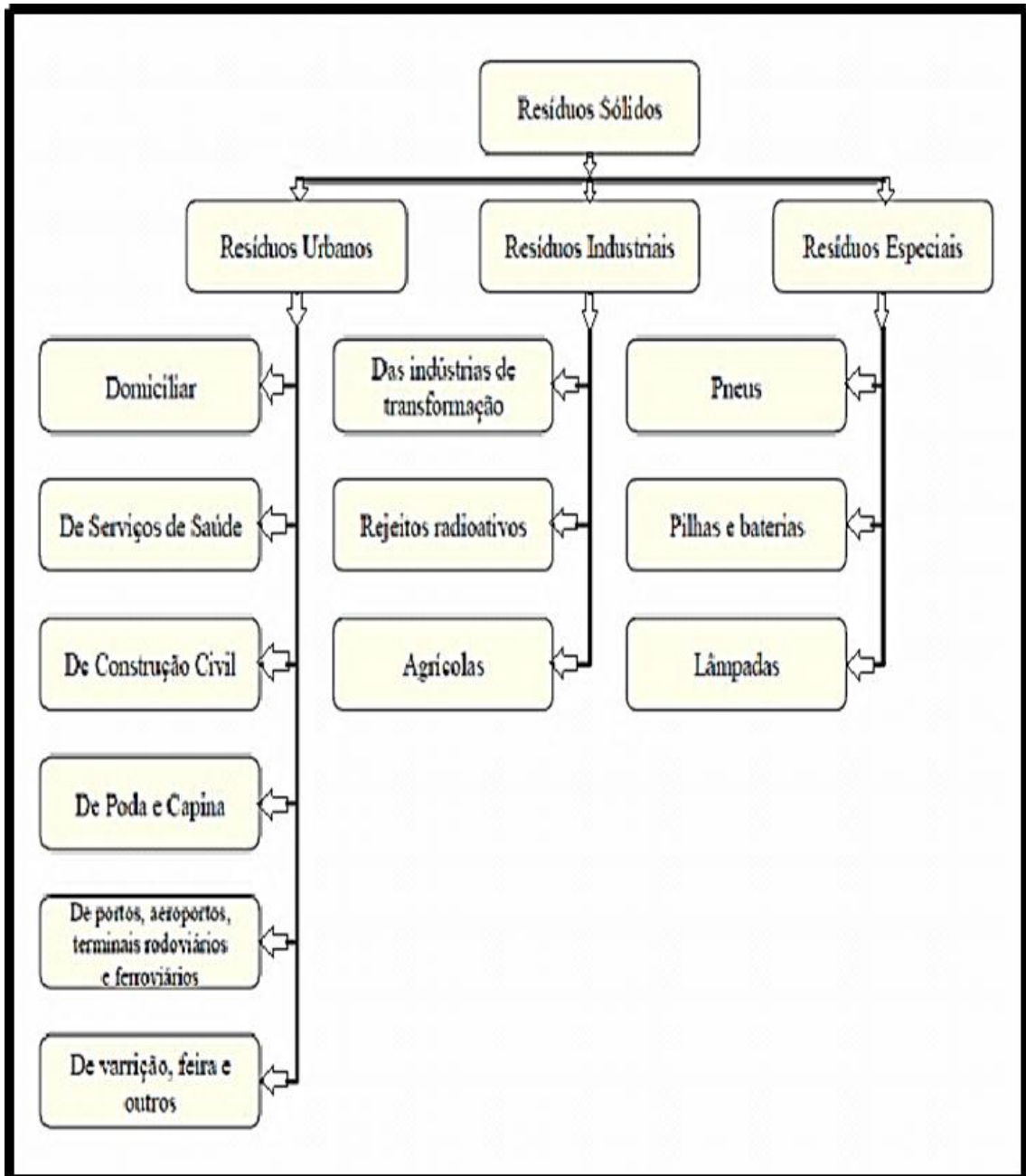


Figura 2. 10. - Esquema de classificação dos resíduos sólidos segundo a fonte geradora (Cabral, 2007).

2.6. Processo de obtenção de celulose

O principal processo de obtenção de celulose da atualidade é o “Kraft”, que em português significa “força”. Segundo Gullichen e Fogelholm (2000) este processo é a evolução do processo Soda patenteado em 1867, e que teve a primeira planta industrial em 1885 na Suécia. De acordo com Lima (2010), esse processo também é conhecido como “sulfato”, pois é utilizado o sulfato de sódio (Na_2SO_4) para reposição

das perdas dos compostos químicos inorgânicos, durante a recuperação química do licor negro no processo que será detalhado a seguir.

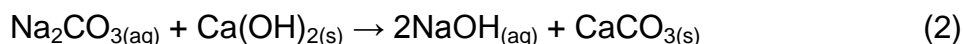
2.6.1. Processo Kraft

Segundo Gullichen e Fogelholn (2000) o processo Kraft consiste na separação da celulose da lignina através do cozimento dos cavacos de madeira de aproximadamente 1 cm (Figura 2.11), em temperaturas que variam de 160 °C a 170 °C na presença do licor branco. O licor branco é uma solução fortemente alcalina (pH 14), sendo seus componentes ativos, o hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na₂S). O licor branco também contém pequenas quantidades de carbonato de sódio (Na₂CO₃), sulfato de sódio (Na₂SO₄), tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃), cloreto de sódio (NaCl) e carbonato de cálcio (CaCO₃). Estes últimos compostos são considerados inertes do ponto de vista do cozimento da madeira e são adicionados ao licor branco em função dos contaminantes que acompanham as matérias-primas (ou insumos) ou em consequência da ineficiência do ciclo de recuperação química. Durante o cozimento, as fibras são separadas por meio da dissolução da lignina e de parte das hemiceluloses no licor de cozimento, transformando-o em licor negro, denominado também de licor preto (Lima, 2010). A Figura 2.12 apresenta o diagrama simplificado da recirculação química no processo Kraft.



Figura 2. 11. - Cavacos de madeira de aproximadamente 1 cm preparados para produção de celulose (ABTCP, 2012).

caustificação. No reator de apagamento ocorre a formação de hidróxido de cálcio, segundo a reação 1 e, simultaneamente, a formação de hidróxido de sódio (reação de caustificação) segundo a reação 2, estendendo-se ao longo dos vários reatores de caustificação (Meneses, 2005). As reações são:



A reação 1 é fortemente exotérmica e tem rendimento máximo em torno de 70 %. A reação 2 é fracamente exotérmica (Andreola et al., 2000). A Figura 2.13 apresenta o esquema do ciclo de recuperação do processo Kraft.

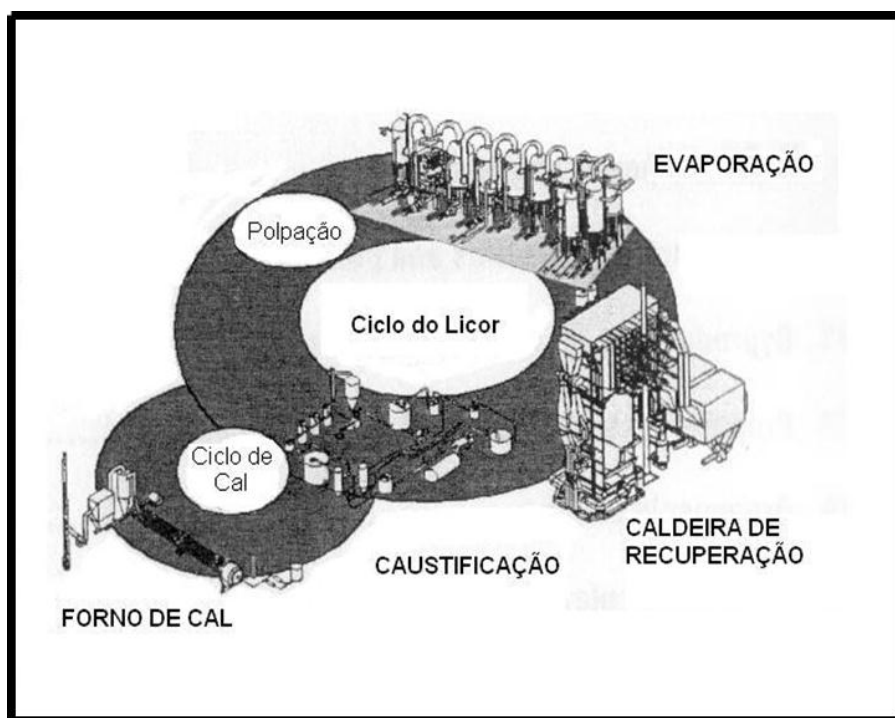


Figura 2. 13. - Ciclo de recuperação do processo kraft – esquema (Gullichen e Fogelholn, 2000).

De acordo com Meneses (2005) o processo de caustificação do licor verde tem dois objetivos: produzir licor branco para o cozimento da madeira e produzir lama de cal para o forno de cal. Segundo Andreola (2000) e Lima (2010), durante a caustificação são gerados duas correntes distintas: a de lama de cal (enviada para o forno de cal) e a de sólidos inertes, denominados “grits”, que são extraídos do processo e constituem-se nos principais pontos de purga dos materiais inertes no

sistema. Conforme Modolo (2006) o resíduo grits tem a sua origem no forno da cal e na preparação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para a caustificação do licor verde. Considerando-se que a lama de cal possui sódio residual e que no forno de cal atingem-se temperaturas da ordem dos 1200 °C, este material fundindo provoca a granulação da cal (peletização da cal), ocasionando a formação do grits. Estes são posteriormente recolhidos e retirados do processo. A Figura 2.14 apresenta o esquema do reator de caustinação, com o ponto de saída do grits.

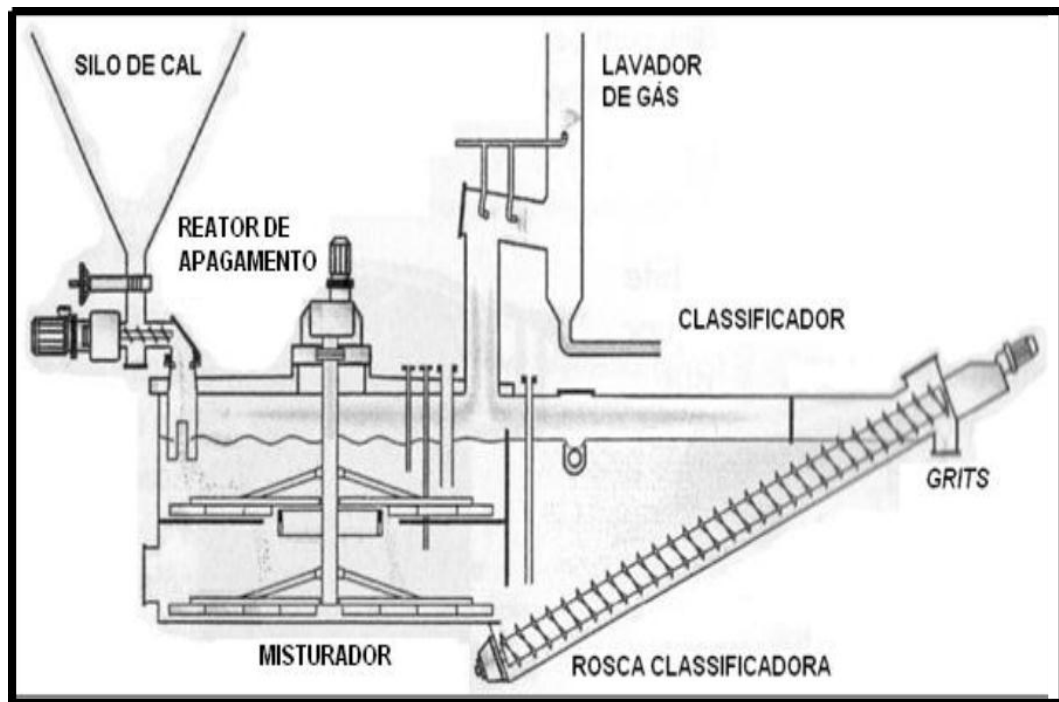


Figura 2. 14. - Esquema do Reator de Apagamento (Gullichen e Fogelholn, 2000).

2.7. Caracterização do grits

A caracterização do resíduo grits realizada por Machado et al. (2003), Pereira et al. (2006b) e Souza e Cardoso (2008), indicam que o grits é um resíduo rico em cálcio. A perda ao fogo elevada e o alto teor de óxido de cálcio (CaO) confirmam a constituição carbonácea do resíduo grits. Foi ainda detectada a fase calcita (CaCO_3) no resíduo. Por meio da análise dos extratos de lixiviação e solubilização, o resíduo grits foi classificado como classe II A, isto é, resíduo não perigoso e não inerte (Souza e Cardoso, 2008; Machado et al., 2009). Conforme Machado et al. (2007) o resíduo grits in natura, apresenta uma granulometria variada, sendo constituído de areia, pedregulho, calcário (CaCO_3). Podendo ainda conter também quantidades de

CaO, Ca(OH)₂ e Na₂CO₃. A Tabela 2.14 apresenta a composição química dos constituintes expressa na forma de óxidos.

Tabela 2. 14. - Principais componentes químicos do grits expressa na forma de óxidos (Machado et al, 2003; Pereira et al, 2006b; e Souza e Cardoso, 2008).

Referência	Composição Química (%)							
	Ca	Mg	SiO ₂	P	K	Na	S	Al
1	20,0	ND	79,00	-	-	-	-	ND
2	53,50 *	0,60 *	-	0,26	0,12	0,70	0,18	0,09
3	35,28 *	0,43 *	-	0,37	0,04	0,22	0,13	0,13
4	95,40 *	-	0,78	-	0,08 *	0,76 *	-	< 0,1 *

1-Machado et al (2003); 2 e 3- Pereira et al (2006b); 4- Souza e Cardoso (2008).
 ND- abaixo do limite de detecção.
 * em forma de óxido

Segundo Morris e Nutter (1996), o grits formado no circuito cáustico de recuperação possui consideráveis teores de hidróxido de sódio e sódio cáustico dissolvido.

De acordo com Souza e Cardoso (2008) os resultados da análise granulométrica indicaram faixas granulométricas semelhantes às areias e britas naturais, sendo possível substituir os agregados naturais utilizados na dosagem de concretos e argamassas pelo resíduo.

Segundo Miranda (2011) o grits é um resíduo sólido com características arenosas e coloração acinzentada gerado na indústria de polpa kraft, caracterizada pela recuperação dos reagentes empregados no cozimento da madeira.

2.8. Quantidade de resíduo sólido gerado

Segundo a Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP, 2012), nos processos industriais que envolvem a madeira, usualmente, geram-se resíduos com alto percentual de matéria orgânica. São definidos como resíduos das

indústrias de base florestal as sobras que ocorrem no processamento mecânico, físico ou químico, e que não são incorporados ao produto final. As fábricas de celulose deparam-se com problemas de ordem ambiental, devido à grande quantidade de resíduos gerados onde os valores podem ser observados na Tabela 2.15 (CENIBRA, 2011).

A geração de resíduos tem sido significativa no setor florestal, sendo aproximadamente 48 toneladas de resíduos para cada 100 toneladas de celulose produzida. A opção por aterro sanitário para disposição final destes resíduos é inviável, em função dos altos custos para sua implantação e manutenção, além da exigência de cuidados especiais no manuseio, tendo em vista os riscos de contaminação ambiental (Albuquerque, 2011).

Tabela 2. 15. - Geração de resíduos sólidos (base seca) (CENIBRA, 2011).

Tipo de resíduo	%	Quantidade gerado (T/ano)
Lenhosos (Casca de madeira e serragem)	77,60	5.251.968,00
Grits	5,03	340.430,40
Lama de Cal	4,17	282.225,60
Lodo Biológico	3,60	243.648,00
Dregs	3,59	242.971,20
Fibra de tratamento primário	2,51	169.876,80
Rejeito de depuração	1,93	130.622,40
Cinzas	1,57	106.257,60

De acordo com Cenibra (2011), o resíduo sólido grits é gerado de forma bem significativa, sendo na proporção de 340.430,40 toneladas por ano.

A FÍBRIA relatou em 2010, que seu gasto com proteção ambiental com relação a resíduos, foi de R\$ 768.208,62, só nas unidades de Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia.

2.9. Potencial Poluidor do grits

Este resíduo é acondicionado em aterros industriais próximos às fábricas (Lima, 2010). A maior parte das unidades possuem hoje, aterros controlados para a

deposição segura de resíduos, assim como dispõe de mecanismos para a sua separação por tipos, permitindo o tratamento, reciclagem, reutilização ou valorização energética de parte de resíduos produzidos, reduzindo deste modo a necessidade de deposições em aterro (Machado et al., 2006).

Entretanto, a disposição indiscriminada do resíduo grits no solo pode causar a poluição do ar pela exalação de odores, fumaça, gases tóxicos ou material particulado; poluição das águas superficiais pelo escoamento de líquidos percolados ou carreamento de resíduos pela ação das águas de chuva e poluição do solo e das águas subterrâneas pela infiltração de líquidos percolados. Estes despejos são originários de resfriamentos, lavagens, descargas, extrações, impregnações, tratamentos químicos entre outros (Machado *et al.*, 2003).

2.10. Métodos de Reciclagem do grits

Por razões ambientais, econômicas e sociais, a reciclagem de resíduos sólidos é uma atividade crescente no Brasil (Conceição, 2009). Segundo o Compromisso Empresarial pela Reciclagem (CEMPRE, 2012), comparado a outros países, o Brasil apresenta elevados índices de reciclagem e tem potencial de se desenvolver ainda mais nessa área.

Segundo dados fornecidos em 2012 pela Bracelpa, os altos investimentos da indústria e o desenvolvimento econômico do Brasil tiveram impactos expressivos na produção de celulose na última década. O segmento praticamente dobrou o volume de celulose produzido nesse período, com um crescimento médio de 6,5% ao ano, números singulares se forem comparados aos mercados mais tradicionais dessa indústria. Em 2008, o setor teve uma grande conquista: alcançou o posto de quarto produtor mundial de celulose – atrás apenas de Estados Unidos, Canadá e China. O recorde foi obtido em um período adverso, durante a crise financeira internacional. A posição foi mantida em 2009, quando o setor produziu 13,5 milhões de toneladas de celulose. Em 2010, a produção brasileira de celulose chegou a 14 milhões de toneladas, e de acordo como os dados fechou 2011 totalizando 14,2 milhões de toneladas de celulose.

A reciclagem de materiais é um dos pontos mais importantes no gerenciamento sustentável de resíduos, ao qual compõe a mundialmente conhecida estratégia dos três R (reduzir, reutilizar e reciclar) (IBGE, 2010).

A economia gerada com o aproveitamento de resíduo sólido é muito expressiva em função do fator escala e do aumento da vida útil do aterro industrial, já que reduz a quantidade do resíduo a ser depositado no local e ainda proporciona a eliminação dos riscos que podem ser inerentes ao acúmulo desses resíduos com o meio ambiente (PGIRS, 2008).

De acordo com o Ministério do meio Ambiente (2001), além dos benefícios ambientais, a reciclagem de materiais é uma oportunidade de negócios, atividade geradora de emprego e renda, e subsidia estratégias de conscientização da população para o tema ambiental e a promoção do uso eficiente dos recursos.

No intuito de vivificar tantos pontos positivos advindos de uma reciclagem, pesquisadores vêm obtendo bons resultados com relação à disposição final do resíduo grits (Arroja et al., 2001).

Uma parceria entre a empresa Organoeste, especializada na aplicação de biotecnologia para degradação acelerada de resíduos orgânicos de classe II – não inertes, e a Aracruz Celulose para o tratamento de dregs e grits (resíduos da produção de celulose) tem gerado bons resultados. Trata-se da aplicação do fertilizante Organomax (fertilizante produzido com resíduos orgânicos de celulose e outros) no plantio de eucaliptos da Aracruz no Espírito Santo. O resultado foi a obtenção de um adubo orgânico capaz de substituir os corretivos do solo e fertilizantes NPK (nitrogênio-fósforo-potássio) convencionais, além de melhorar as características físicas e microbiológicas do solo (FIEMG, 2011).

Machado *et al.* (2003) afirma que o resíduo sólido industrial grits mostrou-se potencialmente utilizável como agente estabilizante do solo pesquisado para pavimentos de estradas florestais. Em termos de ganhos de resistência mecânica, o tratamento térmico a 600 °C foi o mais eficiente.

Segundo Martins (2006), o grits apresenta como principais compostos: a calcita (CaCO_3), a portlandita (Ca(OH)_2) e a pirsonita ($\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), apresentando também brucita (Mg(OH)_2) e larnita (Ca_2SiO_4). Esse autor sugeriu a utilização do grits como matéria-prima para a fabricação de cimento.

De acordo com Pereira et al. (2007), a imersão em água das misturas solo-grits, compactadas e curadas, conseguem influenciar significativamente os valores de resistência mecânica dessas misturas, a depender do tipo de ensaio empregado, tipo de solo, teor de grits, energia de compactação e período de cura. No entanto,

quanto maior o teor de grits, melhor o desempenho mecânico da mistura, para aplicações em estradas florestais.

A utilização do resíduo grits como agregado graúdo no concreto em substituição a rocha natural gnaíse, mostrou-se viável dentro dos parâmetros avaliados neste estudo. Os resultados da primeira etapa do estudo indicam que o resíduo grits, pode ser utilizado como agregado graúdo onde a resistência à abrasão não seja um fator determinante (tais como: concretos de baixa resistência ou de enchimento, contra pisos em locais que sofrerão revestimento posterior), pois o mesmo se mostrou potencialmente inócuo para a RAA (Reação Álcali-Agregado) e apresentou perda de massa acima do determinado pela NBR 7211 (1986) (Lima, 2010).

Miranda et al. (2011) teve como objetivo de estudo, a análise do potencial do grits como material de construção, considerando-se a sua empregabilidade na fabricação de tijolos de solo-cimento, em substituição parcial ao solo. Para a determinação da quantidade ideal de resíduo, foram estudados os traços em volume 1:14:0; 1:10,5:3,5; 1:7:7; 1:3,5:10,5; e 1:0:14 de cimento, solo e grits, respectivamente. Ficou concluído nesse trabalho, que os tijolos fabricados com maior quantidade de grits apresentaram uma resistência mecânica acima do estabelecido.

Com a análise dos resultados dos ensaios apresentados na Figura 2.15, pôde-se observar que, quanto à resistência à compressão simples aos 28 dias, todos os traços apresentados atingiram o mínimo de 2,0 MPa, conforme estabelecido na NBR 8491 (ABNT, 1984).

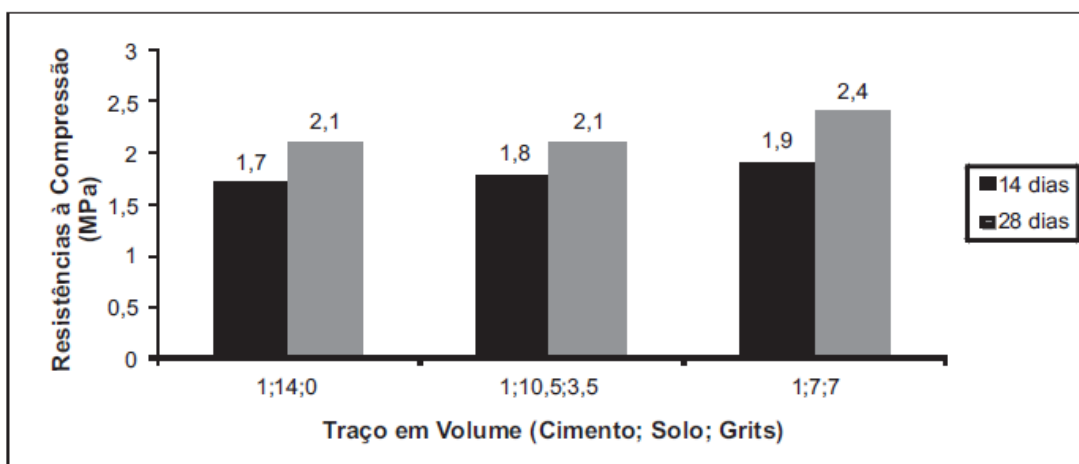


Figura 2. 15. - Valores de resistência à compressão aos 14 e 28 dias (Miranda et al., 2011).

Observa-se na Figura 2.16 que os resultados da absorção se encontram abaixo do máximo valor médio prescrito na norma (20%), e nenhum valor individual ultrapassou o limite máximo prescrito (22%). Pode-se perceber também que o traço 1:7:7 de cimento, solo e grits apresentou o melhor desempenho quanto à resistência à compressão, se comparado aos outros. Com isso, entende-se que maior quantidade de grits, considerando as limitações para a moldagem dos tijolos, favorece as características de resistência mecânica do tijolo de solo-cimento.

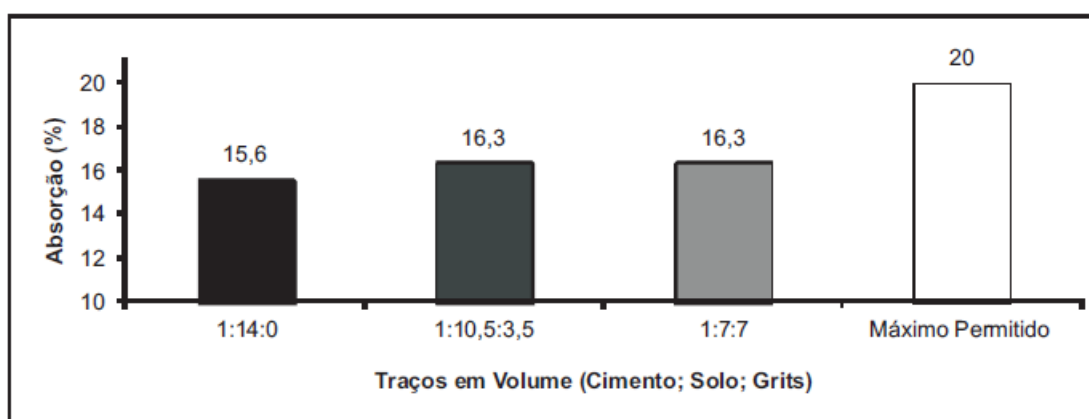


Figura 2. 16. - Valores de absorção dos diversos traços de solo-grits e comparação com os limites permitidos pela NBR 8491 (Miranda et al., 2011).

Segundo Machado e Portugal (2012), quando analisado a influência das diversas frações granulométricas do resíduo grits nos parâmetros ótimos de compactação, resistência mecânica e expansão, notou-se que a fração fina do grits é a que mais contribui para ganhos de resistência mecânica, o que evidencia a sua importância na reatividade das misturas, sendo a fração pedregulho a menos influente no ganho de capacidade de suporte dos solos.

Com base no discutido anteriormente, pode-se observar que existe na literatura apenas um estudo sobre a incorporação de resíduo sólido de grits, em substituição parcial ao solo. Diferente deste, meu trabalho se propõe a substituir parcialmente o cimento Portland na fabricação de tijolo solo-cimento. Isto significa que existe uma necessidade premente neste estudo, com ênfase especial sobre os efeitos deste resíduo nas propriedades tecnológicas, microestrutura, durabilidade e caracterização químico-ambiental de tijolos solo-cimento. Dessa forma, o presente projeto de dissertação pretende contribuir com a disposição final correta deste abundante resíduo, proporcionar a diminuição do uso do cimento Portland e buscar

o desenvolvimento de novos tijolos solo-cimento incorporados com resíduo sólido grãos proveniente da Indústria de Celulose.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos empregados nesta dissertação de mestrado, que envolve diversas etapas relacionadas às matérias-primas, o processamento e os ensaios que foram utilizados. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma experimental que foi seguido no desenvolvido deste trabalho.

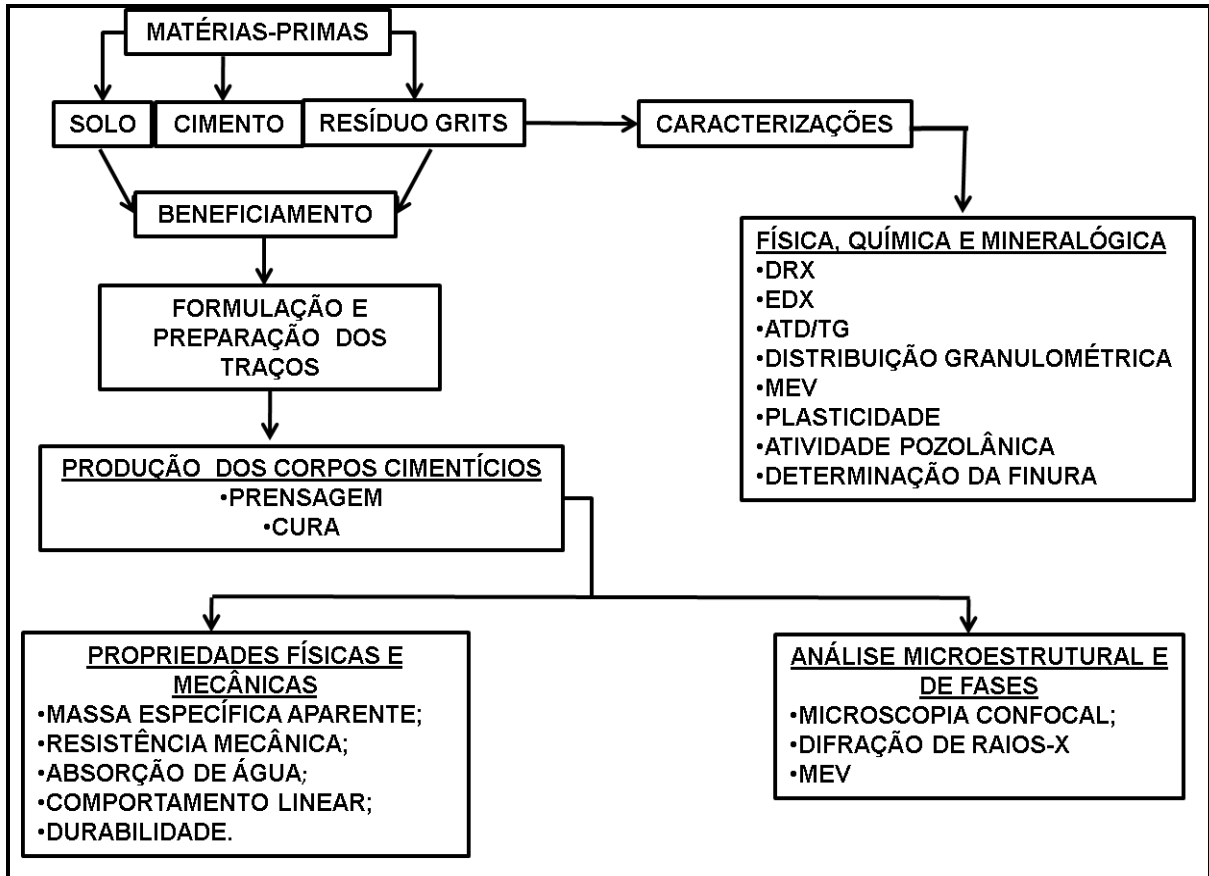


Figura 3. 1. – Fluxograma das etapas envolvidas neste trabalho.

3.1. Matérias-primas

Neste trabalho foram utilizadas as seguintes matérias-primas: solo arenoso, cimento Portland, resíduo sólido grits e água. O solo arenoso foi coletado na empresa Artecerâmica Sardinha, localizada no município de Campos dos Goytacazes/RJ. O cimento utilizado foi do tipo cimento Portland CPIII - 40RS, devido à facilidade de encontrá-lo, 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. O resíduo sólido grits utilizado foi coletado na empresa FIBRIA CELULOSE na unidade de Aracruz - ES (Figura 3.2), localizada no município Barra do Riacho - ES. Foi utilizada a água potável coletada da rede de distribuição de água do município de Campos dos Goytacazes - RJ, fornecida pela Companhia Águas do Paraíba.



Figura 3. 2. - Vista da FIBRIA CELULOSE da unidade de Aracruz em Barra do Riacho - ES (FIBRIA, 2011).

3.2. Metodologia

3.2.1. Beneficiamento das matérias-primas

O resíduo sólido grits in natura (Figura 3.3 a), em forma de grumos, foi coletado no aterro B (destinado a produtos inertes) da FIBRIA CELULOSE na unidade de Aracruz. Após a coleta, a amostra de resíduo foi depositada em recipientes para secagem em estufa de laboratório a 105 °C durante 48 h. O resíduo foi cominuído em um moinho de bolas, marca Gardelin, modelo 1A – MB5 (Figura 3.4 b), e depois desagregado com graal e pistilo (Figura 3.4 a) até a passagem completa em peneira de 200 mesh (75 μ m ASTM) (Figura 3.5). Ao final (Figura 3.3 b) foi colocado em vasilhames fechados para sua posterior utilização, de modo a não absorver umidade do ar.

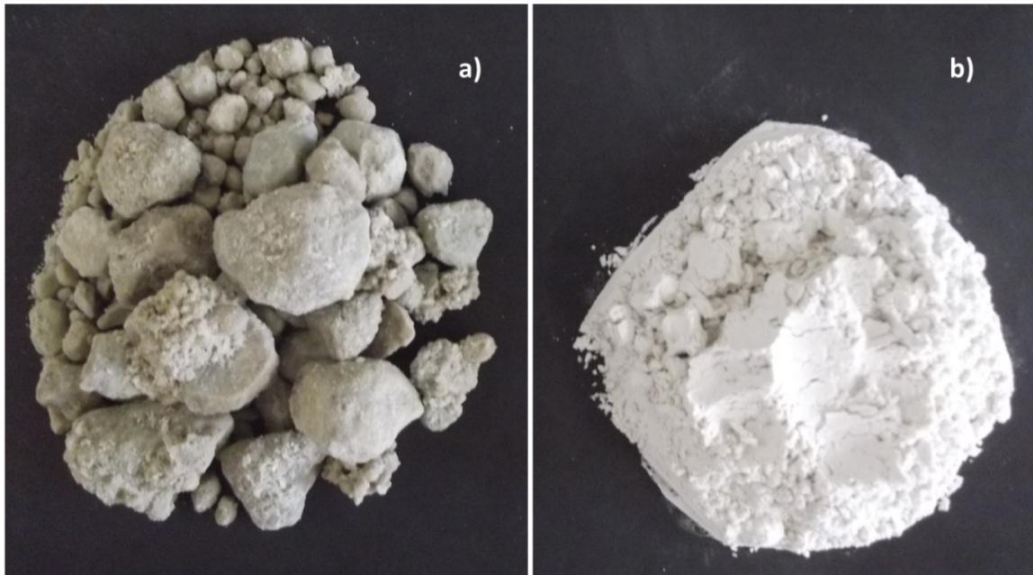


Figura 3. 3. - a) Resíduo sólido grits in natura; b) Resíduo sólido grits após seco e em fração de 200 mesh (75 μm ASTM).



Figura 3. 4. - a) Graal e pistilo de porcelana; b) Moinho de bolas Gardelin.



Figura 3. 5. - Peneira de 200 mesh (75 μm ASTM).

O solo in natura (Figura 3.6 a) foi coletado na empresa Artecerâmica Sardinha, localizada no Pólo de Cerâmica Vermelha de Campos dos Goytacazes/RJ. O solo foi submetido a processo de secagem, onde primeiramente

foi posto para secar ao ar livre (sol) durante uma semana. Depois foi colocado, em proporções adequadas, em uma estufa (Figura 3.7) a 105 °C, durante 24 horas, a fim de eliminar a umidade residual. Posteriormente esse solo foi desagregado manualmente com graal e pistilo de porcelana (Figura 3.4 a), até passagem completa em peneira de 4 mesh (4,75 mm ASTM) (Figura 3.8). Ao final dessas etapas, o solo (Figura 3.6 b) foi colocado em vasilhames fechados para sua posterior utilização, de modo a não absorver umidade do ar.

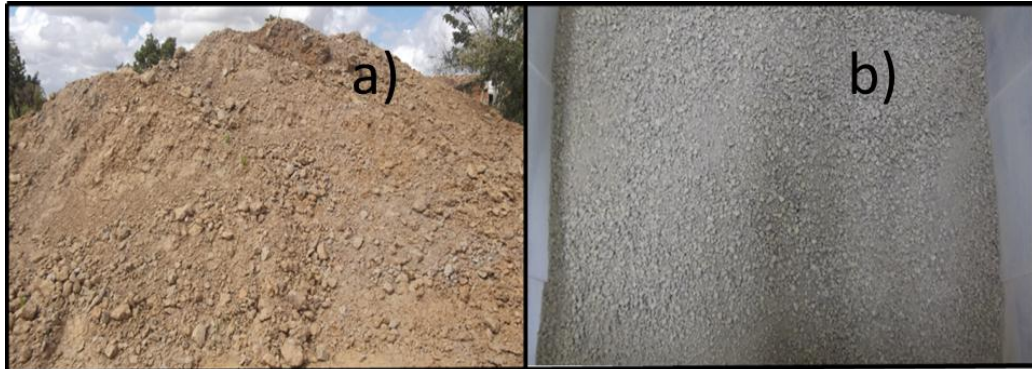


Figura 3. 6. - a) Solo in natura; b) solo pronto para utilização.



Figura 3. 7. - Estufa utilizada para secagem.



Figura 3. 8. - Peneira de 4 mesh (4,75 mm ASTM).

3.2.2. Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram submetidas à caracterização mineralógica, física e química por meio de técnicas de difração de raios-X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial e termogravimétrica, análise de tamanho de partículas, microscopia eletrônica de varredura (MEV), perda ao fogo e plasticidade.

3.2.2.1. Caracterização mineralógica

A análise mineralógica qualitativa dos minerais presentes no solo, no resíduo sólido grits e no cimento 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 8 até 70°, velocidade de 1,5°/min e tempo por passo de 0,8 segundos. 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 – 05-0490), Gipsita (JCPDS – 33-0018), Belita (JCPDS – 32-0149), Goetita (JCPDS – 17-0536), Etringita (JCPDS – 41-1451), Alita (JCPDS – 31-0301), Calcita (JCPDS – 29-0306), Gipsita (JCPDS – 01-0385), Wustita (JCPDS – 33-0664), Pirsonita (JCPDS – 36-0398), Portlandita (JCPDS – 01-1079), Mulita (JCPDS – 02-415), Mica (JCPDS – 47-0222) e Ilita (JCPDS – 25-1157).

No intuito de obter melhores resultados, também foi feita análises térmicas, diferencial (ATD) e termogravimétrica (TG/DTG), sendo realizadas em um analisador simultâneo ATG-ATD, marca Shimadzu, modelo DTG-60H. O ensaio foi realizado sob atmosfera de nitrogênio, em que a temperatura variou de 28° C até 1000° C, com uma taxa de aquecimento de 10° C/min durante 30 minutos.

3.2.2.2. Caracterização química

Para a identificação dos componentes químicos das amostras, de solo, resíduo grits e cimento, foram analisadas quimicamente. Foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios-X, de energia dispersiva (EDX), marca Shimadzu, modelo 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 – perda ao fogo;

M_s – massa da amostra seca a 105 °C em estufa;

M_c – 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.

3.2.2.3. Análise morfológica

A morfologia das partículas do resíduo grits foi determinada por microscopia eletrônica de varredura, utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura, marca Shimadzu, modelo SSX-550, após cobertura das partículas com uma fina camada de paládio.

3.2.2.4. Caracterização Física

3.2.2.4.1. Análise granulométrica

Análises granulométricas do solo e do resíduo grits foram determinadas através de procedimentos de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984), pelo processo combinado de sedimentação e peneiramento. Nessa etapa foi utilizada a picnometria para determinar a massa específica real dos grãos.

3.2.2.4.2. Determinação da finura

A finura do cimento Portland na forma em que foi adquirido e do resíduo sólido grits já beneficiado e passado em peneira 200 mesh (75 µm ASTM) foi determinada de acordo com a NBR 9202 (ABNT, 1985). O intuito desse ensaio era observar o comportamento granulométrico do resíduo grits após beneficiado, em relação ao cimento.

3.2.2.4.3. Determinação da atividade pozolânica

A atividade pozolânica foi realizada utilizando os métodos proposto por Luxan et al. (1989) e aquele descrito na norma NBR 5752 (ASTM, 1992).

O ensaio proposto por Luxan *et al.* (1989) foi realizado com uma solução de hidróxido de cálcio saturada preparada minutos antes, em que começou-se medindo 200 ml de água destilada. Os 200 ml foram condicionados em um Becker e mantidos em agitação e aquecidos a 40 °C em agitador magnético com aquecimento.

Após a estabilização da temperatura foi adicionado 2 g de hidróxido de cálcio puro. Quando percebida a dissolução de todo Ca(OH)_2 , a solução foi transferida para um balão volumétrico de um litro e adicionou-se água destilada até completar esse volume. A solução passou por um processo de decantação e filtragem em filtro de papel para o uso.

Mediu-se 200 ml de solução de Ca(OH)_2 filtrada, que foram acondicionadas em um becker de 600 ml, posicionado em cima de um agitador magnético que manteve a solução em agitação por meio da inserção de um bastão magnético dentro do Becker. O controle de agitação foi mantido na posição 2 e o controle de temperatura próximo a temperatura de 40°C. A temperatura da solução foi controlada por meio de um termômetro de mercúrio.

A determinação da atividade pozolânica prevista por Luxan et al. (1989), consiste em medir a pozolanicidade através da variação de condutividade de uma solução saturada de Ca(OH)_2 antes e depois de 2 minutos da pozolana (grits) ter sido adicionada e misturada de forma contínua na solução a 40 °C (5 g de pozolana para 200 ml de solução). Após a adição da pozolana (grits), a condutividade decresceu devido à menor quantidade de íons Ca^{+2} e $(\text{OH})^-$ na solução, sendo o índice de atividade pozolânica definido como a relação entre a condutividade elétrica antes de a pozolana (grits) ser adicionada à solução, e após o tempo decorrido de 120 segundos. Então foi possível classificar o material da seguinte forma:

- Materiais sem atividade pozolânica: $< 0,4 \mu\text{S/cm}$.
- Materiais de atividade pozolânica moderada: $< 1,2 \mu\text{S/cm}$.
- Materiais de boa atividade pozolânica: $> 1,2 \mu\text{S/cm}$.

No entanto, para alguns autores, entre eles Rodrigues (2004), o método de Luxan et al. (1989) não garante que o decréscimo da condutividade elétrica pode

não refletir de forma realista o grau de atividade pozolânica da adição mineral. Isto porque, em muitos casos, pode ocorrer a nucleação com os íons Ca^{+2} , sendo atraídos para a superfície das partículas, sem necessariamente ocorrer a reação entre íons e sílica amorfa; principalmente considerando-se o curto período empregado na obtenção da variação da condutividade elétrica. Desta forma, o decréscimo na condutividade seria muito mais uma função da superfície das partículas do que do teor e da qualidade de sua fase ativa.

Então, a norma NBR 5752 (ASTM, 1992) foi utilizada para que os resultados fossem comparados com o método proposto por Luxan et al. (1989), a fim de que se tenha respostas convictas. O ensaio consistiu na execução de duas argamassas, sendo a primeira com traço 1:3 (em massa) de cimento e areia normal, ajustando-se a água para um índice de consistência de (225 ± 5) mm (NBR 7215/1986); na segunda, 35% do volume de cimento utilizado na primeira argamassa foram substituídos por pozolana (grits), acrescentando-se água também para um índice de consistência de (225 ± 5) mm. Foram moldados 3 corpos-de-prova (seguindo as prescrições da NBR7215/1986) para cada argamassa. Nas primeiras 24 horas, as argamassas foram curadas nos moldes e, decorrido esse prazo, foram retiradas dos mesmos e levadas à cura por 27 dias, em um tanque imerso e a uma temperatura de $(38 \pm 2)^\circ\text{C}$. Os corpos-de-prova então foram resfriados à temperatura ambiente, capeados a quente com enxofre e ensaiados à compressão axial. O índice de atividade pozolânica representa a razão entre a resistência à compressão axial média da argamassa com pozolana e a resistência à compressão axial média da argamassa de controle, em MPa, expressa em valor percentual, aos 28 dias, sendo que a norma NBR12653 (ASTM, 1992) exige valores iguais ou superiores a 75%, para ser considerado um material pozolânico.

3.2.2.4.4. Plasticidade

As propriedades plásticas (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) foram determinadas de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado pela expressão (3.2):

$$\text{IP} = \text{LL} - \text{LP} \quad (3.2)$$

Onde:

IP – índice de plasticidade;

LL – limite de liquidez;

LP – limite de plasticidade.

3.2.2.5. Caracterização do cimento

Parte dos resultados de caracterização do cimento Portland CP III - 40RS utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa fabricante e são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1. - Caracterização física do cimento Portland CPIII - 40RS.

Ensaio	Norma	Resultado
Superfície Específica Blaine	NBR NM 76/1998	400 m²/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	NBR NM 65/2003	300 min
Finura na #200	NBR 11579/1991	0,10 %
Resistência à compressão axial	NBR 7215/1996	3 dias- 17 MPa 7 dias- 30 MPa 28 dias- 45 MPa
Massa específica	NBR NM 23/2001	2,98 g/cm³

3.2.3. Formulação e preparação dos traços com adição de resíduo sólido grits

Esta etapa consiste na formulação dos traços com incorporação do resíduo sólido grits, ao qual foram obtidos seguindo os procedimentos da norma ABNT 12024 (ASTM, 1992) – Solo-cimento – Método A. Foi utilizada uma mistura de solo-cimento padrão determinada de acordo com a ABCP (1999), sendo 9:1, ou seja, nove partes de solo para uma parte de cimento. A massa foi umedecida com o teor de 16% em peso de água, através de um borrifador. Estudos realizados por Amaral *et al.* (2011) mostraram que, para o mesmo solo utilizado neste trabalho, este teor de umidade proporciona propriedades mais favoráveis para a fabricação de tijolos solo-cimento.

Para a mistura de referência de solo-cimento foi adicionado o resíduo grits em substituição parcial do cimento, em proporções de 10, 20 e 30 %. Os traços com adição de resíduo são: 9:0,9:0,1; 9:0,8:0,2 e 9:0,7:0,3 (solo, cimento e resíduo respectivamente).

Para cada traço foram fabricados 45 corpos-de-prova em três etapas, para que cada massa preparada fosse consumida em até uma hora, a fim de assegurar boas propriedades finais, lembrando que uma hora é o tempo mínimo que começa a cura da massa cimentícia.

As matérias-primas devidamente secas foram misturadas manualmente de acordo com as proporções dadas nas Tabelas 3.2.

Tabela 3. 2. – Composição das massas Cimentícias (% em massa).

Massa Cimentícia	Solo	Água	Cimento	Resíduo grits
MCR	90	16	10	0
MC1	90	16	9	1
MC2	90	16	8	2
MC3	90	16	7	3

3.2.4. Preparação dos corpos cimentícios

Inicialmente foi realizada a pesagem das matérias-primas beneficiadas com o auxílio de uma balança digital marca Gehaka, modelo BG-2000 Classe II (Fig. 3.10 c), disponível no LAMAV/UENF.

Os procedimentos realizados na preparação dos corpos cimentícios são constituídos de etapas que estão descritas a seguir.

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

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

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

Para conferir que não houve a formação excessiva de grumos a Mistura – 3 foi passada pela mesma peneira de 4 mesh (4,75 mm ASTM) que foi utilizada para conferir a granulometria adequada ao solo (Figura 3.8). Obtendo por fim a mistura que foi usada na fabricação dos corpos-de-prova cilíndricos.

Os corpos-de-prova foram conformados por prensagem uniaxial em prensa hidráulica (Figura 3.10 a), de fabricação da METALPEM, modelo PHP com capacidade de 15 toneladas. A carga utilizada no trabalho para os traços foi de 2 toneladas e uma umidade de 16% da massa, a fim de propiciar melhores condições para manusear, máxima compactação do material, maiores valores de densidade, resistência e durabilidade. A matriz utilizada foi de forma cilíndrica ($\varnothing = 37,27$ mm) e pistões de aço (Figura 3.10 b), proporcionando 56 mm de altura. Essas condições geraram aos corpos-de-prova cimentícios uma pressão de compactação de 18 MPa.

A Figura 3.9 mostra a sequência de etapas para produção da mistura para confecção dos corpos-de-prova.

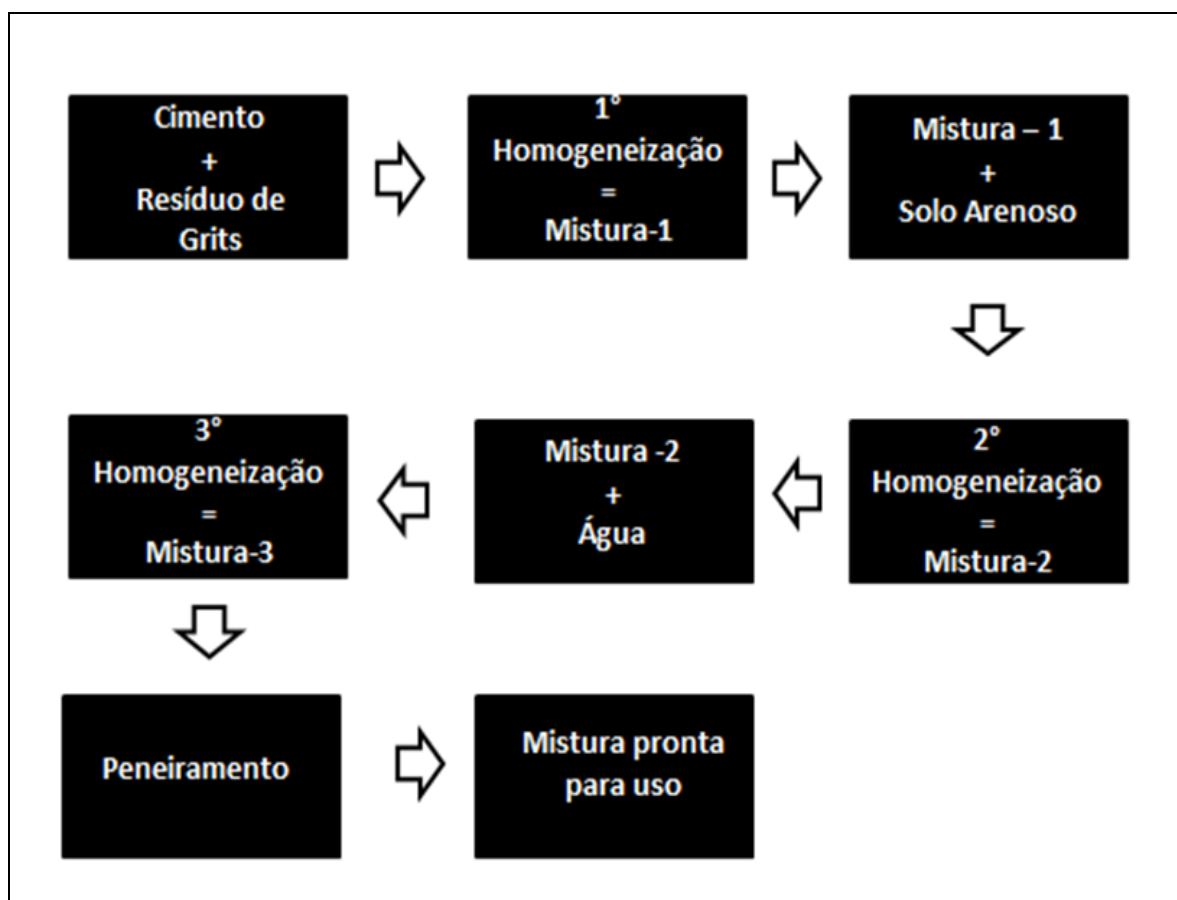


Figura 3. 9. - Fluxograma das etapas de produção da mistura para confecção dos corpos-de-prova incorporados com resíduo.

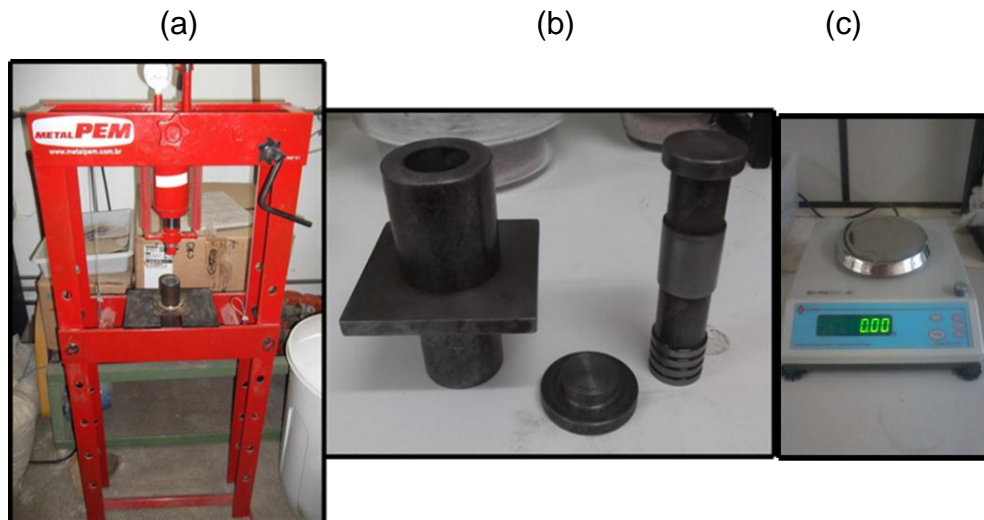


Figura 3. 10. – a) Prensa hidráulica METALPEM, modelo PHP 15 t; b) molde cilíndrico de aço utilizado na moldagem dos corpos cimentícios; e c) Balança digital marca Gehaka, modelo BG-2000 Classe II.

3.2.5. Etapa de cura dos corpos cimentícios

Após a prensagem, os corpos cimentícios foram desmoldados, devidamente pesados, medidos, identificados e então depositados em uma câmara úmida. Os corpos cimentícios permaneceram durante 7, 14 e 28 dias até a realização dos ensaios tecnológicos. Na câmara úmida (Figura 3.11) os corpos-de-prova permaneceram 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, 1992).



Figura 3. 11. - Câmara úmida para processo de cura.

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

3.2.6.1. Massa específica Aparente

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

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

Onde:

ρ_b – massa específica Aparente, em g/cm³;

M – massa do corpo cimentício, em gramas;

V – volume do corpo cimentício, em cm³.

As medidas de massa dos corpos-de-prova foram feitas com o auxílio da balança digital marca Gehaka, modelo BG-2000 Classe II (Fig. 3.10 c). O diâmetro e a altura dos corpos-de-prova foram medidos com o auxílio de um paquímetro digital Miltutoyo ($\pm 0,01$) (Fig. 3.12).



Figura 3. 12. - Paquímetro digital utilizado no trabalho.

3.2.6.2. Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples foi determinada após os períodos de cura de 7, 14 e 28 dias, com o auxílio de uma máquina de ensaios universal, marca Instron, modelo 5582 (Fig. 3.13), disponível no LAMAV/CCT/UENF.

Os ensaios de compressão simples foram realizados em 5 corpos-de-prova cilíndricos de cada traço estudado, com idades de 7, 14 e 28 dias, totalizando 60 peças ensaiadas. A velocidade de aplicação da carga utilizada foi de 1 mm/min.

A resistência à compressão dos corpos cimentícios foi obtida a partir da expressão (3.4):

$$T = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

Onde:

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

F – carga de ruptura, em N;

A – área das peças curadas, em mm²;

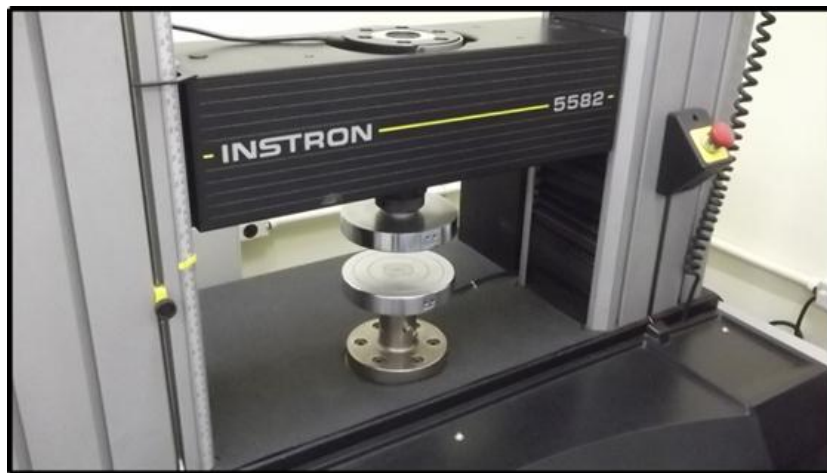


Figura 3. 13. - Máquina de ensaios universal utilizada no ensaio de resistência à compressão simples.

3.2.6.3. Absorção de água

A determinação dos corpos-de-prova cilíndricos foi feita seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 10836 (ABNT, 1994). Na realização deste ensaio foram utilizadas 5 peças de cada traço, com idade de 28 dias, uma balança digital BG-2000 Classe II, de fabricação da Gehaka (Figura 3.10 c), a estufa da Brasdonto, modelo 3 (Figura 3.7), e um recipiente plástico, que foi utilizado como tanque de imersão.

O valor de absorção de água é obtido por meio da expressão (3.5):

$$AA(\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde:

AA – absorção de água, em %;

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

M_s – massa do corpo cimentício seco, em gramas.

3.2.6.4. Comportamento Linear

Em função das características distintas, e no intuito de observar o comportamento de materiais cimentícios durante o período de cura, foi determinado o diâmetro, altura e calculado o volume de cada corpo-de-prova através da expressão 3.6. Nesse ensaio foi utilizado um paquímetro digital (Figura 3.12) em função da determinação das medidas. O valor foi determinado pela ponderação direta das propriedades de cada componente.

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h \quad (3.6)$$

Onde:

V = Volume (mm^3)

R = Raio (mm)

h = Altura (mm)

3.2.6.5. Medida da Durabilidade

O ensaio de durabilidade foi realizado de acordo com a NBR 13554 (ABNT, 1996). Os procedimentos relacionados ao ensaio, constitui um ciclo (48 horas) de molhagem e secagem, repetidos durante 6 ciclos, sendo feito a cada fim de ciclo uma escovação nos determinados corpos-de-prova.

Para cada mistura, os corpos-de-prova destinados ao ensaio de durabilidade, após desmoldagem, foram identificados como corpo-de-prova nº 1 (CP1), corpo-de-

prova nº 2 (CP2) e corpo-de-prova nº 3 (CP3). O CP1 foi tomado como referência, sendo usado apenas para obtenção da variação de umidade e de volume durante o ensaio. Os demais corpos-de-prova (CP2 e CP3) foram submetidos a ciclos de desgaste acelerado, incluindo escovação. Os três corpos-de-prova foram pesados e foi determinado o volume do CP1. Em seguida, os três foram colocados na câmara úmida, à temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar não inferior a 95%. Após o término da cura, o CP1 foi novamente pesado e os três corpos-de-prova foram submetidos a seis ciclos de desgaste, que constaram de:

- imersão em água, por um tempo de 5 h, ao término do qual foram retirados do tanque, enxutos com um pano úmido e o CP1 foi pesado e teve seu volume medido;
- permanência em estufa, com temperatura de 71 ± 2 °C, por 42 horas, quando foram, então, retirados e o CP1 pesado e o seu volume medido;
- escovação dos corpos-de-prova CP2 e CP3, no prazo de 1 h, após secagem em estufa.

A escova utilizada teve as seguintes características, conforme NBR 13554 (ABNT, 1996): ser composta por tiras de chapa de aço do tipo SAE 1020 nº 26, de 50,8 mm de comprimento por 1,6 mm de largura, reunidas em 50 grupos de dez tiras cada e montadas em cinco filas longitudinais e dez transversais, em um bloco de madeira dura de 190 mm por 65 mm (Figura 3.14). Seguindo a norma citada, a escova foi aplicada em toda superfície do corpo-de-prova, com intensidade de 15 N. Na superfície lateral são requeridas de 18 a 20 escovações verticais, com a escova estando com seu eixo longitudinal paralelo ao eixo longitudinal do corpo-de-prova. Já em cada base, foram necessárias quatro escovações, sendo duas em um sentido e as outras duas no sentido perpendicular ao anterior. A escovação e resfriamento dos corpos-de-prova deram-se no prazo de 1 hora. Assim, a duração de cada ciclo de molhagem e secagem correspondeu a 48 h. Após o sexto ciclo, tanto os corpos-de-prova escovados, quanto o corpo-de-prova nº 1 foram levados para a estufa, em temperatura entre 105 °C e 110 °C, até obtenção de constância de massa.

Com os valores de massa e volume obtidos durante os ciclos, foi possível calcular a variação de volume e umidade do CP1 e as perdas de massa dos CP2 e CP3, para avaliação da durabilidade de misturas de solo-cimento.



Figura 3. 14. – Escova de tiras de chapa de aço utilizada no ensaio.

3.2.7. Caracterização microestrutural e de fases dos corpos cimentícios

A microestrutura dos corpos-de-prova cimentícios incorporados e após a cura de 28 dias, foi analisada através de microscopia Confocal. O microscópio utilizado foi a laser de medição 3D, modelo LEXT OLS 4000, de fabricação Olympus (Figura 3.15). Foi feita a análise da superfície de fratura das peças cimentícias.

A análise de fases dos corpos cimentícios incorporados foi feita por difração de raios-X, na qual foram identificadas as fases cristalinas remanescentes e as novas fases formadas durante o processo da cura. A análise de difração de raios-X (DRX) foi realizada em um difratômetro Shimadzu, XRD-7000, utilizando radiação monocromática de $\text{Cu-K}\alpha$ a uma velocidade de $1,5^\circ$ (2θ) por minuto.

A microestrutura dos corpos cimentícios após 28 dias de cura, também foi analisada via microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de acompanhar as mudanças da microestrutura com a quantidade de resíduo incorporado. Foi usado um microscópio eletrônico de varredura, marca Shimadzu, modelo SSX-550. Foi feita a análise da superfície de fratura das peças cimentícias após metalização com uma fina camada de paládio.



Figura 3. 15. - Microscópio Confocal utilizado no trabalho.

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 para o solo puro, que corresponde a uma das matérias-primas de referência neste trabalho. Pode-se observar que o solo apresenta picos característicos predominantes de caulinita, illita/mica, quartzo, gibsita e goetita. O argilomineral caulinita é o principal componente mineral encontrado no solo, o qual é característico das argilas vermelhas da região de Campos dos Goytacazes (Vieira et al., 2001). Ele é responsável pela plasticidade do solo quando misturado em água. A presença de gibsita faz com que haja um aumento da perda de massa durante a queima e contribui para a refratariedade da peça. Foram identificados alguns picos de goetita, que representa o alto teor de ferro presente no solo. O quartzo é um mineral encontrado naturalmente nas argilas e solos, considerado uma impureza, e atua como material inerte diminuindo a plasticidade do material. Deve-se ressaltar que a presença de alta quantidade de quartzo no solo arenoso é altamente desejável para o uso desse material como um componente de tijolo solo-cimento. A illita/mica representam minerais ricos em óxidos fundentes, que são responsáveis por promover a fase líquida nas peças sinterizadas.

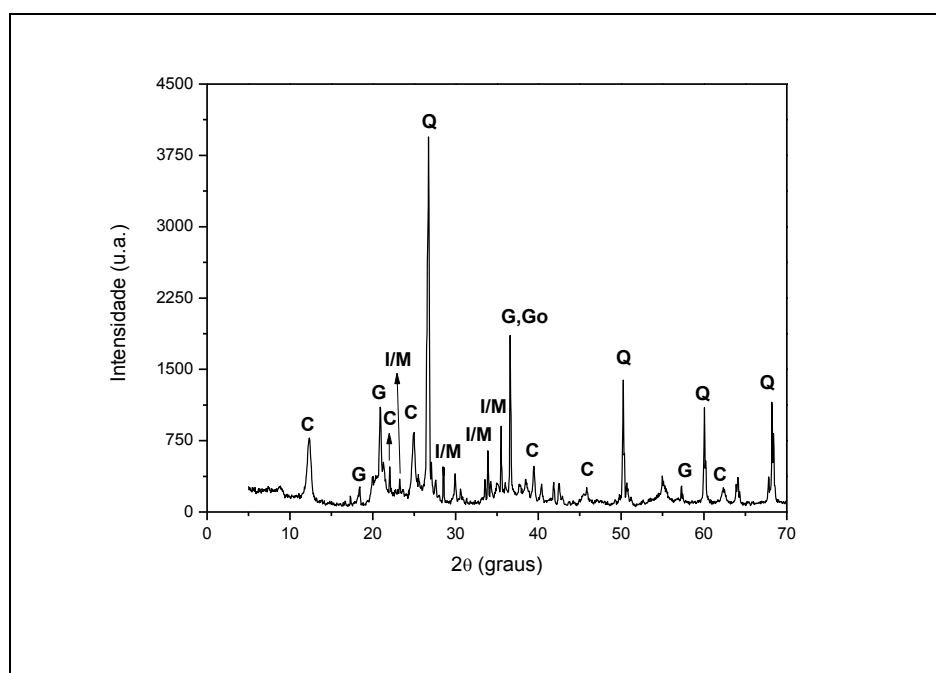


Figura 4. 1. – Difratograma de raios-X do solo arenoso: C = Caulinita; G = Gibsita; Go = Goetita; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzo.

O difratograma de raios-X para a amostra do resíduo sólido grits é apresentado na Figura 4.2, onde as principais fases cristalinas identificadas foram: calcita (CaCO_3), wustita (FeO), pirsonita ($\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Nota-se que o resíduo sólido grits é rico em materiais a base de cálcio, sobretudo calcita (CaCO_3). Segundo Carvalho e Almeida a calcita (CaCO_3) é o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármore com elevada pureza. O calcário é encontrado extensivamente em todos os continentes extraídos de pedreiras ou depósitos que variam em idade, desde o Pré-Cambriano até o Holoceno. As reservas de rochas carbonatadas são grandes e intermináveis, entretanto, a sua ocorrência com elevada pureza corresponde a menos que 10% das reservas de carbonatos lavradas em todo mundo.

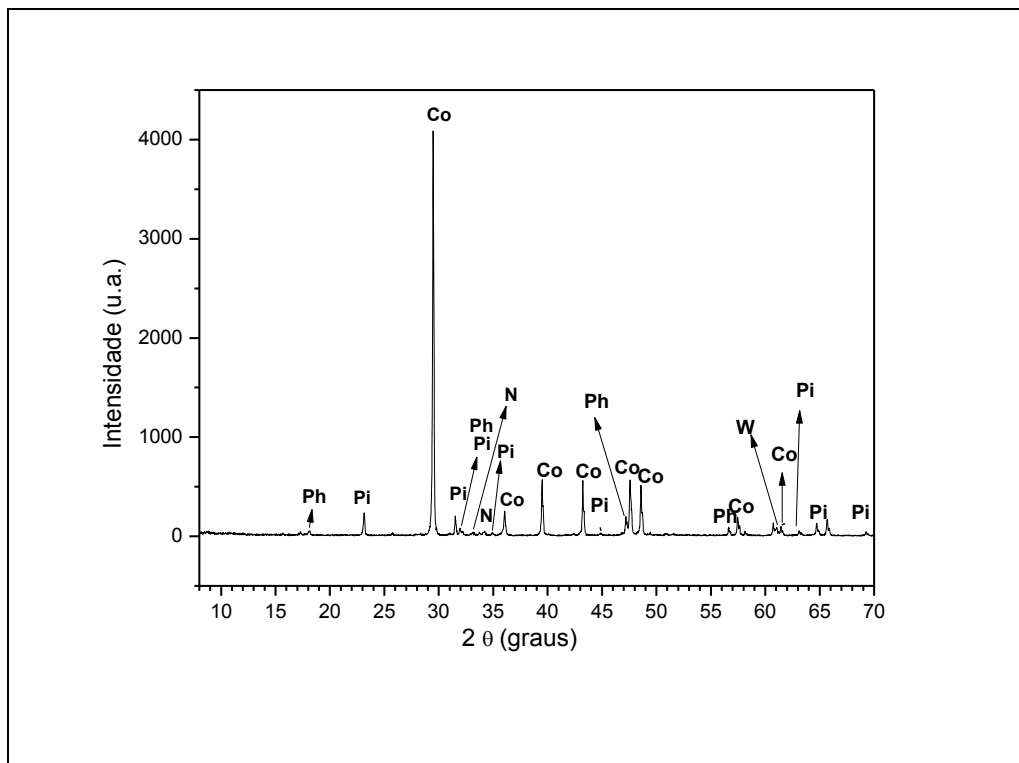


Figura 4. 2. – Difratograma de raios - X para a amostra de resíduo grits: Co = CaCO_3 ; W = FeO ; N = Na_2CO_3 ; Pi = $\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Ph = $\text{Ca}(\text{OH})_2$

A Figura 4.3 apresenta o difratograma de raios-X do cimento Portland CP-III-40RS. Foram identificadas as seguintes fases mineralógicas: silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) também conhecido como alita, silicato bicálcio ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) 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. Além dessas fases, foi identificada a presença de CaO , que pode estar

relacionado a composição da escória de alto forno do cimento estudado (Tabela 2.4), e ao calcário (CaCO_3), uma das matérias-primas do cimento Portland.

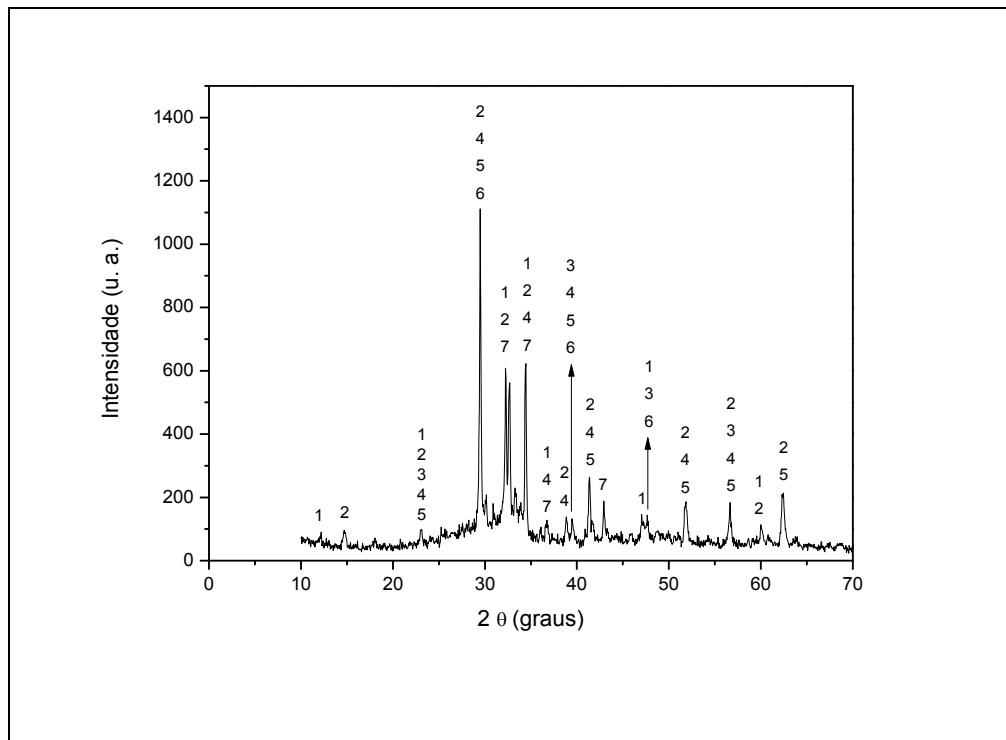


Figura 4. 3. – Difratograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS: 1 = Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF); 2 = Alita (C_3S); 3 = Carbonato de cálcio; 4 = Belita (C_2S); 5 = Aluminato tricálcio (C_3A); 6 = Óxido de cálcio; 7 = Gipsita (CaSO_4).

4.1.2. Caracterização Química

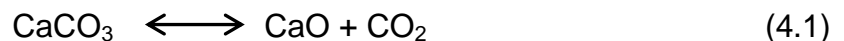
A composição química e a perda ao fogo das matérias-primas utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 4.1, podendo-se nela observar que o resíduo grits é constituído essencialmente por CaO . O solo arenoso apresenta como compostos majoritários Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , mas com predominância de sílica. O cimento Portland CPIII - 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 apresentados na Tabela 4.1, o solo é constituído quimicamente por SiO_2 (46,700 %), Al_2O_3 (28,630 %) e Fe_2O_3 (7,400 %). No solo, a sílica (SiO_2) apresenta-se normalmente na forma de sílica livre (quartzo) ou presentes nos minerais argilosos. A alumina (Al_2O_3) que é o segundo elemento mais

abundante e encontra-se quase sempre formando parte da estrutura dos aluminossilicatos como a caulinita e minerais micáceos e também da gibsita. O óxido de ferro (Fe_2O_3) está presente como uma das impurezas mais frequentes associadas aos solos. Ainda seguindo a Tabela 4.1, nota-se a presença de óxidos fundentes como, óxido de potássio e óxido de cálcio (K_2O e CaO). O CaO é mais escasso com teor de 0,980 %, enquanto o K_2O está em torno de 3,800 %. Os óxidos álcalis encontram-se nos solos na forma de compostos insolúveis (feldspatos e micas), como íons livres no retículo cristalino de minerais (ilita) e como sais solúveis (cloretos e sulfatos). A perda ao fogo do solo é da ordem de 7,800 %, a qual pode estar relacionada à presença de argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica.

Os resultados da composição química e perda ao fogo da amostra do resíduo grits apresentadas na Tabela 4.1, demonstram que ele é constituído predominantemente de CaO com cerca de 68,665 % em peso, seguido de quantidades pouco consideráveis de SO_3 com 1,057 % em peso, K_2O com 1,039% em peso, SrO com 0,155 % em peso e ZrO_2 com 0,006 % em peso.

Com relação à perda ao fogo do resíduo, nota-se também na Tabela 4.1 que foi relativamente alta, da ordem de 29,078 % em peso. Isto é devido principalmente a liberação de CO_2 proveniente da decomposição de calcita para formação de CaO , que pode ser observado na equação química (Carvalho e Almeida, 1997):



O resíduo grits também apresentou valor de umidade higroscópica de 0,5 %, sendo usada para designar a máxima quantidade de água, em porcentagem, que uma amostra de um material é capaz de absorver da atmosfera, em forma de vapor, e manter em equilíbrio com o ambiente. Sendo um indicativo de que o grits não atrapalha no processo de hidratação do cimento.

O cimento Portland CPIII - 40RS é composto principalmente por CaO , com teor de 66,830 % em peso e, também, por Al_2O_3 e SiO_2 , correspondendo a 7,280 % e 19,350 % respectivamente. O CaO está relacionado ao calcário, um dos constituintes do cimento Portland e pode ser proveniente da composição da escória de alto forno do cimento analisado. Já o Al_2O_3 e SiO_2 encontram-se na argila que juntamente com o calcário, após queima, formará o clínquer (Tabela 2.1). Observa-se que a perda ao fogo é baixa, em torno de 2,500 %.

Tabela 4. 1. - Composição química do solo arenoso, resíduo grits e cimento Portland CPIII-40RS (%).

Compostos	Solo Arenoso (% em peso)	Resíduo grits (% em peso)	Cimento (% em peso)
SiO₂	46,700	-	18,870
Al₂O₃	28,630	-	7,110
Fe₂O₃	7,400	-	1,210
K₂O	3,800	1,039	0,560
TiO₂	2,210	-	0,530
SO₃	2,000	1,057	3,710
CaO	0,980	68,665	65,150
CuO	-	-	-
ZrO₂	0,240	0,006	-
V₂O₅	0,130	-	-
MnO	0,070	-	0,300
Rb₂O	-	-	-
ZnO	0,020	-	-
SrO	0,010	0,155	0,060
Y₂O₃	0,010	-	-
Perda ao fogo (1000 °C)	7,800	29,078	2,500

4.1.3. Análise térmica

O comportamento térmico do solo arenoso e do resíduo grits foi estudado por meio de análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG).

A Figura 4.4 mostra as curvas de ATG e ATD do solo estudado. Os aspectos fundamentais do comportamento térmico do solo são:

- Pico endotérmico na temperatura de 52 °C devido à perda de água fisicamente adsorvida, associado a uma perda de massa de 0,72 %.

- Em 270 °C ocorre um evento endotérmico que está relacionado à perda de água de hidratação de hidróxidos tais como gibsita e goetita, confirmando o resultado de difração de raios-X. A perda de massa associada a esse pico é de cerca de 1,76 %.

- Um evento endotérmico ocorre a 490 °C devido à desidroxilação da caulinita, associada a uma perda de massa de 4,97 %. Neste caso a perda de hidroxilas leva a formação de uma fase amorfa denominada de metacaulinita.

Para uma melhor análise, a variação da massa em função da temperatura, na análise termogravimétrica do solo arenoso pode ser observada a Tabela 4.2.

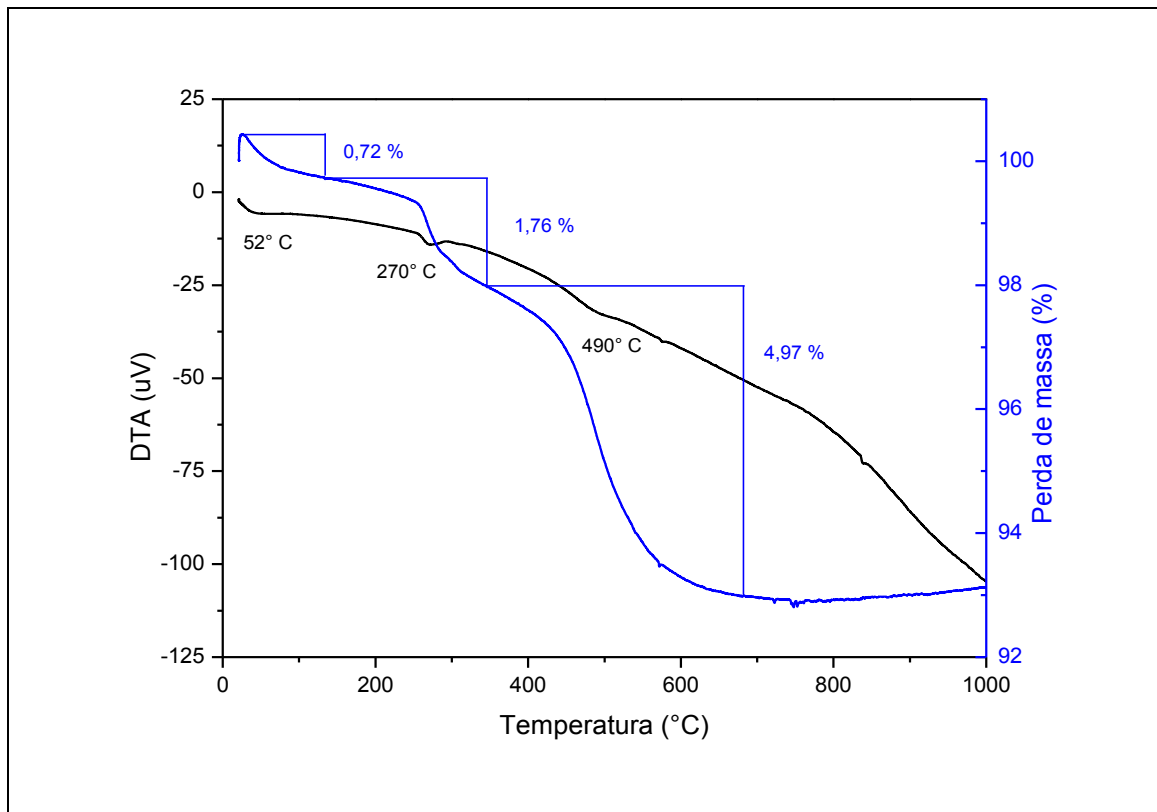


Figura 4. 4. – Curvas de análises térmicas diferenciais e termogravimétricas (ATD e ATG) para o solo arenoso.

Tabela 4. 2. – Variação da massa em função da temperatura na análise termogravimétrica do solo arenoso.

Varição de massa (%)	Temperatura (°C)
0,72	52
1,76	270
4,97	490

A curva de análise térmica diferencial (ATD) para a amostra de resíduo grits estudado é apresentada na Figura 4.5. A curva de ATD é caracterizada por quatro eventos endotérmicos em distintas regiões de temperatura. O primeiro evento

endotérmico por volta de 43 °C está relacionado à perda de água fisicamente adsorvida sobre as superfícies das partículas do resíduo grits. O segundo evento endotérmico em torno de 176 °C pode estar relacionado à desidratação da pirsonita ($\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2\text{H}_2\text{O}$, carbonato de cálcio e sódio hidratado). O terceiro evento endotérmico em torno de 480 °C está provavelmente associado à desidroxilação da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Em seguida observa-se outro evento endotérmico intenso, em torno de 756 °C, que é devido principalmente à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3 , calcita).

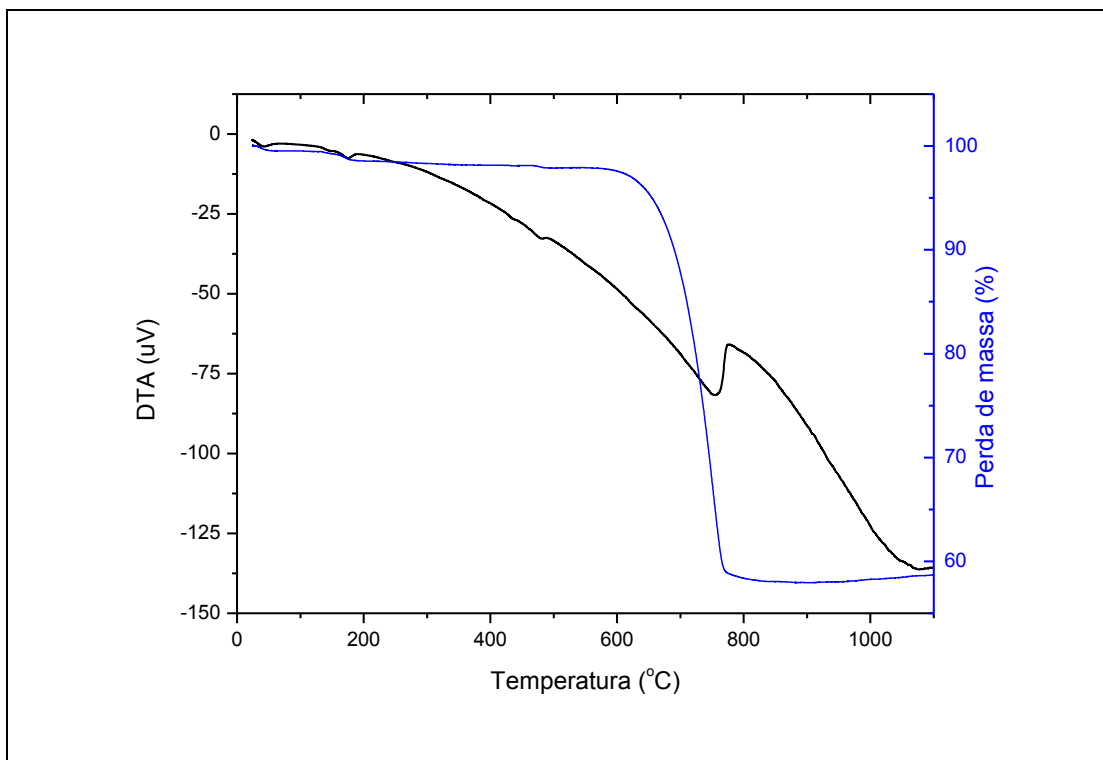


Figura 4. 5. – Curvas de análises térmicas diferenciais e termogravimétricas (ATD e ATG) para o resíduo grits.

A Figura 4.5 também apresenta a curva de análise termogravimétrica (ATG) para a amostra do resíduo estudado. A curva de ATG indica que ocorreu uma grande perda de massa (~ 60 %) em torno de 750 °C durante o aquecimento da amostra. Esta alta perda de massa provavelmente está relacionada à decomposição do carbonato de cálcio para formação de CaO e liberação de CO_2 . Estes resultados estão em concordância com os resultados de DRX e ATD.

4.1.4. Granulometria

A Figura 4.6 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas do solo, obtida via análise combinada de sedimentação e peneiramento. Observa-se que o solo apresenta um percentual de 22,40 % de partículas abaixo de 2 μm , que corresponde à fração argila. O teor de silte ($2 \mu\text{m} \leq \phi < 60 \mu\text{m}$) é cerca de 28,40 %. O teor de areia ($60 \mu\text{m} \leq \phi < 600 \mu\text{m}$) é da ordem de 49,20 %. De forma que o solo utilizado proveniente da região de Campos dos Goytacazes – RJ, apresenta composição granulométrica próxima daquela recomendada pela ABCP (2002), para produção de tijolo solo-cimento: fração argila: 10 a 20 %; fração silte: 10 a 20 %; e fração areia: 50 a 70 %.

Verifica-se que o solo utilizado apresenta alto percentual de partículas grosseiras, particularmente de partículas de quartzo. Isto é muito importante na preparação da mistura solo-cimento, pois 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, permitirá a liberação de maior quantidade de cimento para aglomerar os grãos menores. Essas características reduzem a quantidade de poros abertos, o que favorece uma menor absorção de água e uma maior resistência mecânica.

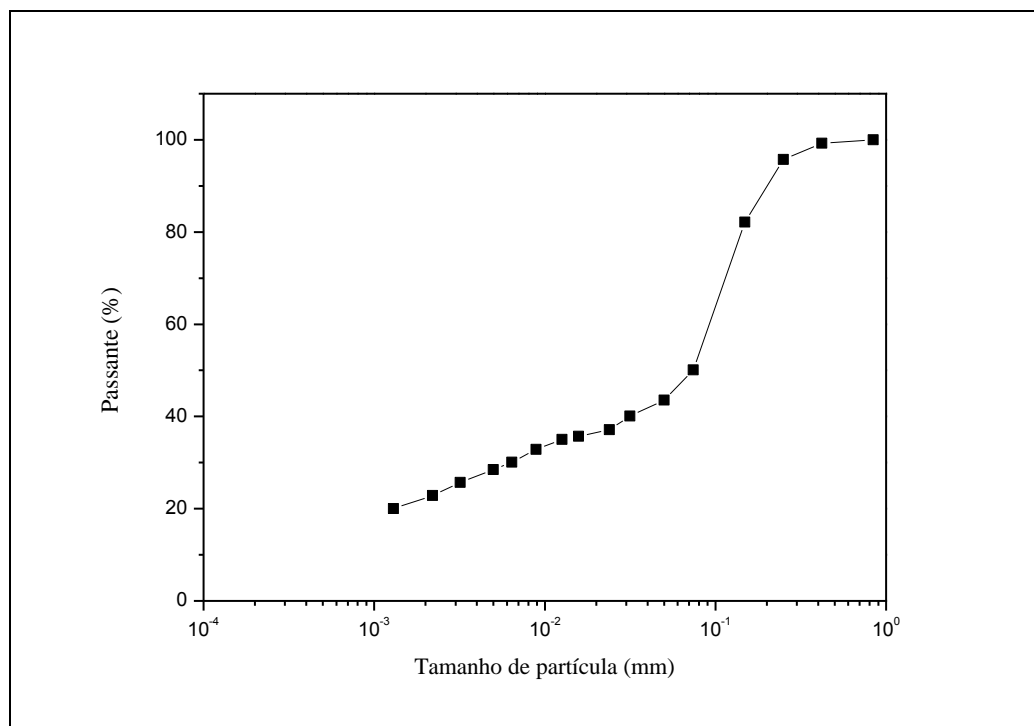


Figura 4. 6. - Curva granulométrica do solo arenoso utilizado.

A massa específica real dos grãos da amostra de solo determinada via picnometria foi de $2,72 \text{ g/cm}^3$. A rigor este valor representa a média das massas específicas dos minerais que compõem a fase sólida, que podem ser observados na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3. - Valores de massa específica real dos grãos de alguns tipos de minerais.

Mineral	(g/cm³)
Quartzo	2,65 - 2,67
Caulinita	2,61 - 2,66
Ilita	2,60 - 2,86
Mullita	3,10 - 3,20
Gibsita	2,40 – 2,44
Goetita	3,3 – 4,3
Solo	2,72

A curva de distribuição de tamanho de partícula do resíduo grits na forma in natura é apresentada na Figura 4.7. O resíduo apresenta uma granulometria grosseira. Verifica-se que o resíduo é constituído de 9 % de fração silte ($2 < \phi \leq 60 \mu\text{m}$), 33 % de fração areia e 58 % de fração pedregulho. A fração areia corresponde à cerca de 4 % de areia fina ($60 \leq \phi \leq 200 \mu\text{m}$), 7 % de areia média ($200 \leq \phi < 600 \mu\text{m}$) e 21 % de areia grossa ($600 \leq \phi < 2000 \mu\text{m}$). Por outro lado, a fração pedregulho corresponde à cerca de 36 % de pedregulho fino ($2000 \leq \phi < 6000 \mu\text{m}$) e 22 % de pedregulho médio ($6000 \leq \phi < 20000 \mu\text{m}$). Observa-se que a distribuição granulométrica do grits é muito ampla em tamanhos, ocasionado naturalmente de uma formação por aglomeração de partículas de meios diversos, resultado provável da incorporação não só de impurezas da rocha calcária calcinada para produção de cal, como também de resíduos do próprio forno, de seus refratários, e da própria lama de cal reprocessada (Ribeiro, 2010).

O valor da massa específica real dos grãos da amostra do resíduo grits obtido foi de $2,82 \text{ g/cm}^3$, valor que reflete as fases mineralógicas presentes no resíduo. Experimentos foram feitos com o objetivo de determinar as propriedades plásticas da amostra de resíduo. Entretanto, eles não tiveram sucesso devido à natureza não coesiva desse material. Portanto, o resíduo grits pode ser considerado um material

não plástico (NP). Isso indica que ele pode, por exemplo, atuar como redutor de plasticidade em formulações argilosas usadas na indústria cerâmica.

Com base nos resultados da granulometria do solo e do grits, percebe-se que existe uma uniformidade de dados quando comparados com os seus respectivos DRX e análise térmica.

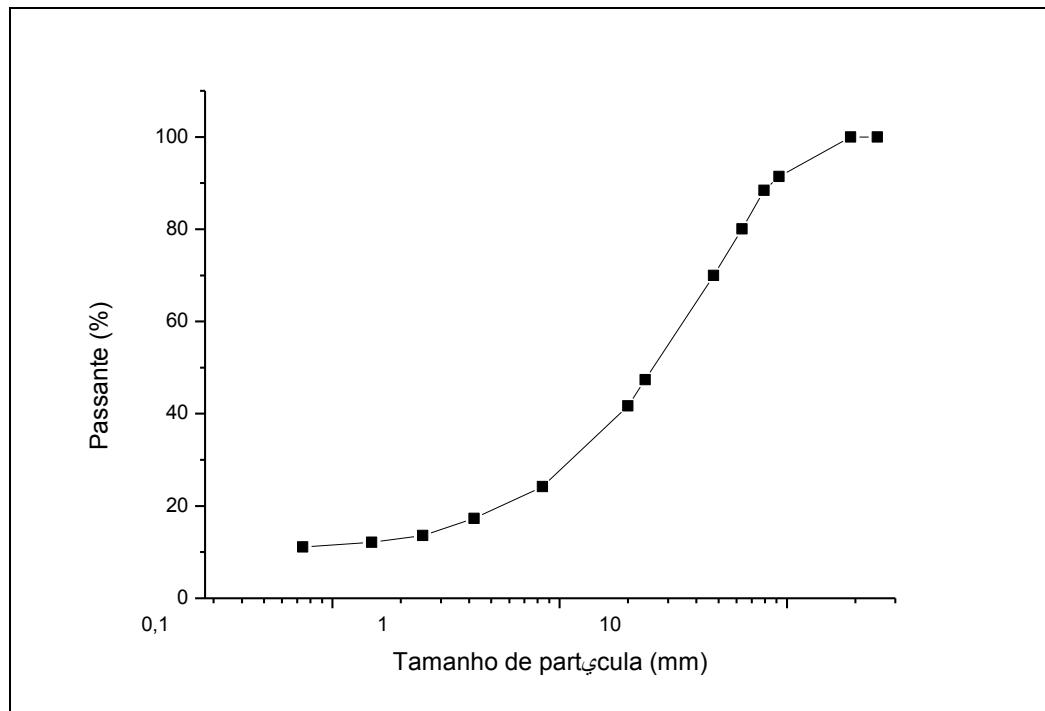


Figura 4. 7. – Distribuição de tamanho de partícula do resíduo grits.

4.1.5. Determinação da finura

A Tabela 4.4 apresenta a finura do cimento e do resíduo sólido grits. Os resultados expressam a porcentagem de material em que ficou retido na malha de cada peneira. Observa-se que o resíduo após o beneficiamento possui uma finura muito próxima do cimento. Isto é muito importante por indicar uma finura adequada, o qual contribui para a incorporação do resíduo.

Tabela 4. 4. - Resultado do ensaio de determinação de finura.

Resultado	Resíduo Grits	Cimento	Norma
% retido em peneira de #250	0,73	0,21	NBR 9202/1985
% retido em peneira de #270	0,71	0,15	*NBR 9202/1985
% retido em peneira de #325	4,36	0,84	*NBR 9202/1985

*A norma também foi utilizada com peneiras de #270 e #250

4.1.6. Determinação da atividade pozolânica

Os resultados desse ensaio tanto utilizando o método proposto por Luxan et al. (1989) e a norma NBR 5752 (ABNT 1992), demonstram que o resíduo sólido grits não interfere nas características do cimento, ou seja, é um material sem atividade pozolânica.

A Tabela 4.5 apresenta o resultado do ensaio pozolânico utilizando o método Luxan et al. (1989). A condutividade encontrada na solução padrão foi de 18,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e na solução com adição de grits representou 18,40 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Quando se analisa a diferença que existe entre as soluções, encontra-se um valor de 0,18 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este valor se encontra abaixo de 0,40 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o qual está compreendido na faixa de valores para materiais que não possuem atividade pozolânica.

Tabela 4. 5. - Índice de atividade pozolânica utilizando o método Luxan et al. (1989).

Condutividade $\mu\text{S}/\text{cm}$		
Solução Padrão	Solução com adição de grits	Resultado da atividade pozolânica
18,22	18,40	0,18

A Tabela 4.6 apresenta os resultados do ensaio pozolânico utilizando a norma NBR 5752 (ABNT 1992). Estes resultados representam o cálculo da resistência à compressão média dos três corpos-de-prova cilíndricos de cada traço analisado, conforme prescreve a NBR 7215. Quando o traço padrão foi submetido ao ensaio de compressão, encontrou-se uma resistência de 20,784 MPa, que representa praticamente o dobro do resultado do traço com adição de grits.

Tabela 4. 6. - Índice de atividade pozolânica utilizando a norma NBR 5752 (ABNT 1992) expressa em MPa.

	Traço padrão	Traço com a adição de resíduo
Média da carga de ruptura a compressão em MPa	20,78	10,20

O índice de atividade pozolânica com cimento Portland é definido pela equação 4.1:

$$\frac{f_{cb}}{f_{ca}} \cdot 100(\%) = \frac{10,20}{20,78} \cdot 100(\%) = 49,08 \% \quad (4.1)$$

Onde:

f_{cb} = Resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento e material pozolânico (Traço com resíduo grits).

f_{ca} = Resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento (Traço padrão).

A norma NBR ABNT 12653 estabelece que um material para ser considerado pozolânico, o mesmo deve apresentar um índice de atividade pozolânica > 75 %. Verifica-se que o valor encontrado para a amostra de resíduo foi de 49,08 %. Portanto, o resíduo grits segundo a norma NBR 12653 (ABNT 1992) é considerado um material não pozolânico.

4.1.7. Morfologia

Os aspectos morfológicos das partículas do pó do resíduo grits são apresentados na Figura 4.8. O pó de resíduo grits consiste basicamente de partículas com morfologia irregular e textura suave. Nota-se também que o pó de resíduo grits apresenta uma larga distribuição de tamanho de partículas, comprovando os dados granulométricos do resíduo (Figura 4.7). Isto se deve ao processo de obtenção do resíduo durante o processo Kraft para produção de celulose.

Na Figura 4.9 é apresentado o espectro de elementos obtido via MEV/EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) para a amostra do resíduo grits. Nota-se que foram detectados os seguintes elementos: C, O, Na, e Ca. Estes resultados são consistentes com os dados de composição química e difração de raios-X.

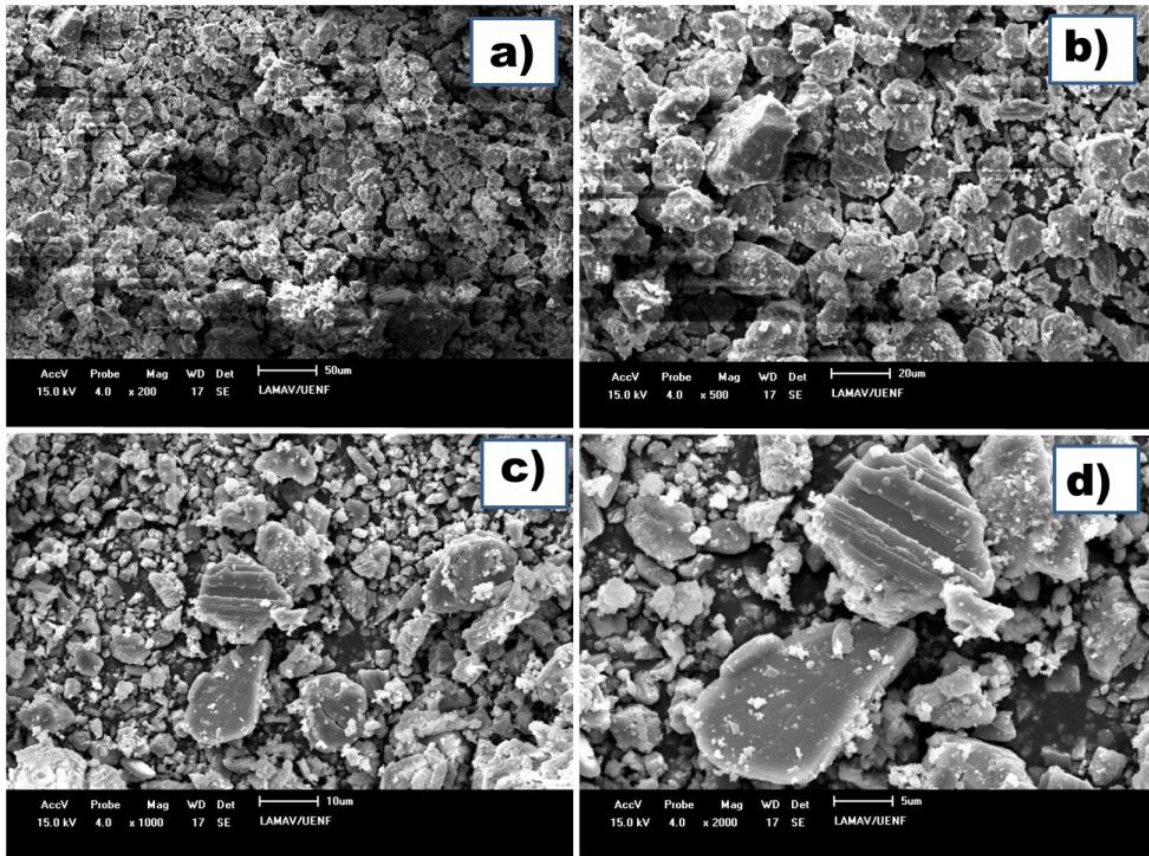


Figura 4. 8. – Morfologia das partículas do resíduo grits: (a) 200X; (b) 500X; (c) 1000X; d) 2000x.

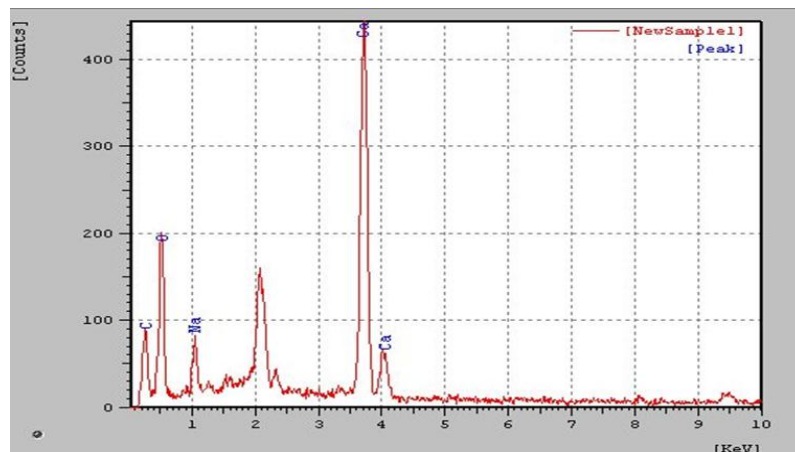


Figura 4. 9. – Espectro de EDS para o resíduo grits.

4.1.8. Plasticidade

Os limites de consistência são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade dos solos. 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 necessita para apresentar 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. Segundo a ABCP (1985), os solos adequados para a fabricação de blocos vazados e tijolos de solo-cimento devem atender um $LL \leq 45 \%$ e $IP \leq 18 \%$. A Tabela 4.7 apresenta os valores dos limites de consistência de Atterberg do solo utilizado neste trabalho.

Tabela 4. 7. – Limites de consistência de Atterberg do solo arenoso (%).

Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
27,9	18,4	9,5

O solo estudado apresentou limite de liquidez em torno de 27,9 % e índice de plasticidade da ordem de 9,5 %. Observa-se que os valores de limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) estão dentro da faixa de valores recomendados pela ABCP (1985) ($LL \leq 45 \%$ e $IP \leq 18 \%$) para produção de tijolo solo-cimento. Ressalta-se que os solos arenosos são indicados para fabricação de tijolo solo-cimento, pois estabilizam com menores quantidades de cimento. 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.

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.

4.2. Propriedades das Misturas Preparadas

4.2.1. Resistência à Compressão

Na Figura 4.10 é apresentado o comportamento da resistência à compressão dos corpos cimentícios ensaiados aos 7 dias de cura. Pode-se observar na Figura 4.10 que já aos 7 dias de cura, todas as incorporações de resíduo analisadas já se encontram dentro do estabelecido pela NBR 10834 (1994), que é de 2 MPa. Estes resultados confirmam que nesta idade o cimento já iniciou seu processo de hidratação.

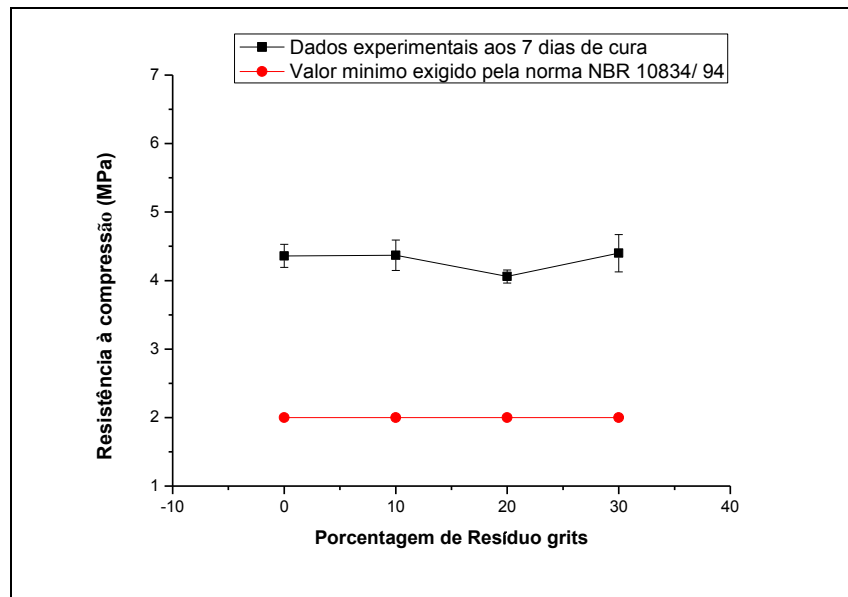


Figura 4. 10. - Valores de resistência à compressão versus Porcentagem de Resíduo grits dos corpos-de-prova cilíndricos curados a 7 dias.

A Figura 4.11, representa o ensaio de resistência à compressão dos corpos cimentícios curados em 14 dias. Nesta idade os valores também apresentaram estar em conformidade com a NBR 10834 (1994). Os resultados são um pouco mais expressivos que os apresentados aos 7 dias de cura (Figura 4.10), por causa do avanço do processo de hidratação do cimento, ao qual, desempenhou melhor sua função de adesivo.

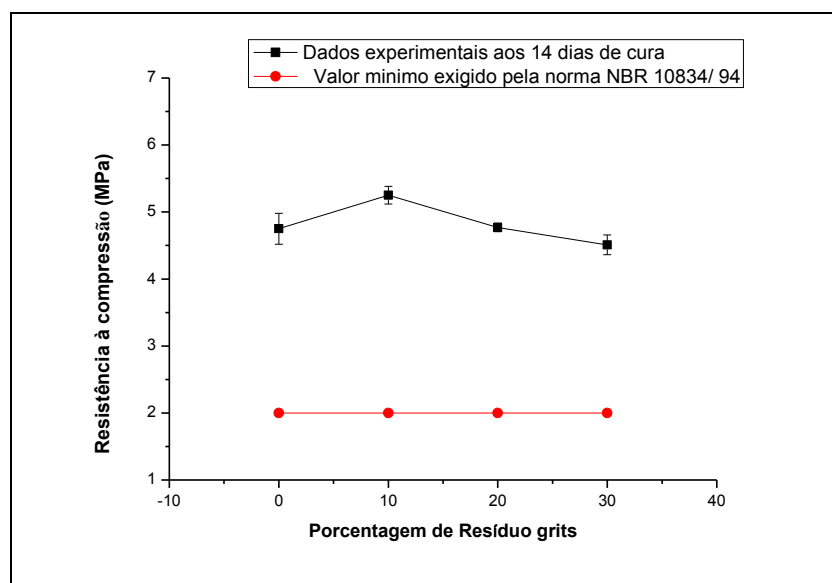


Figura 4. 11. - Valores de resistência à compressão versus Porcentagem de Resíduo grits dos corpos-de-prova cilíndricos curados a 14 dias.

Verifica-se que a resistência mecânica dos corpos-de-prova atinge o valor máximo, quando os corpos cimentícios são curados em 28 dias (Figura 4.12). Nessa idade de cura, a função de adesivo que o cimento proporciona, agiu com maior eficácia. Percebe-se que com a substituição de até 10 % do cimento por resíduo grits a resistência à compressão tende a aumentar. Em incorporações acima de 10 % tendem a diminuir levemente a resistência mecânica dos corpos-de-prova. Isto ocorre porque há redução da quantidade de cimento no traço.

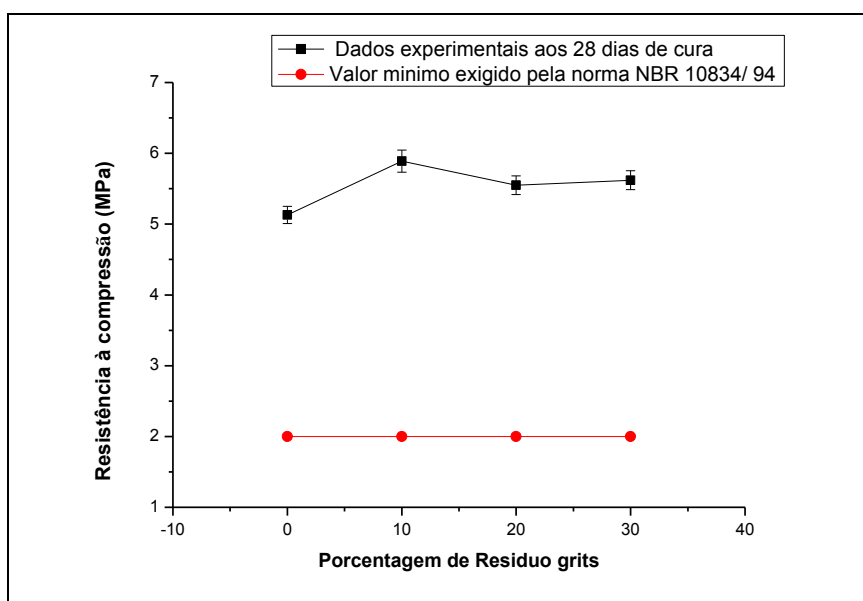


Figura 4. 12. - Valores de resistência à compressão versus Porcentagem de Resíduo grits dos corpos-de-prova cilíndricos curados a 28 dias.

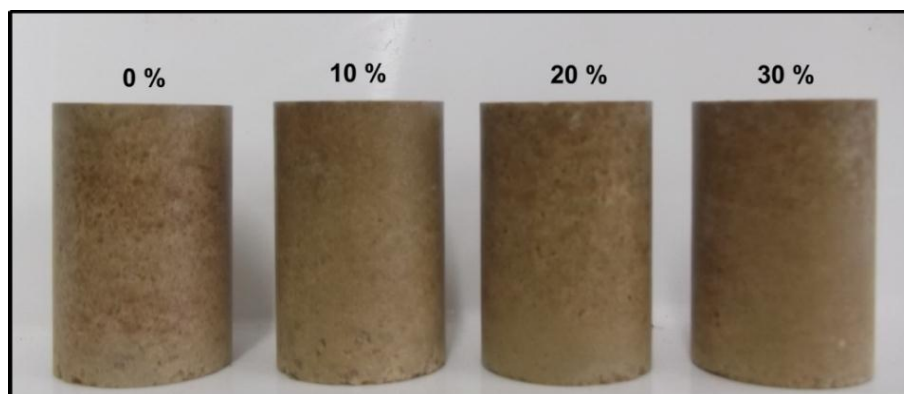


Figura 4. 13. – Corpos-de-prova cilíndricos após a cura de 28 dias

Por outro lado, os resultados das Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 também mostram que todos os corpos-de-prova apresentaram valor de resistência à compressão média muito acima do estabelecido pela norma NBR 10834, independentemente do

traço utilizado. Isto significa que, em termos de resistência mecânica, todos os traços estudados podem ser usados na fabricação de tijolos solo-cimento.

4.3.2. Absorção de Água

Na Figura 4.14 é apresentado o comportamento da absorção de água (porosidade aberta) em função do teor de resíduo incorporado para os corpos-de-prova ensaiados após os 28 dias de cura. Nesta figura é também apresentado o valor máximo médio de absorção de água ($\leq 20\%$) de acordo com a norma NBR 10834.

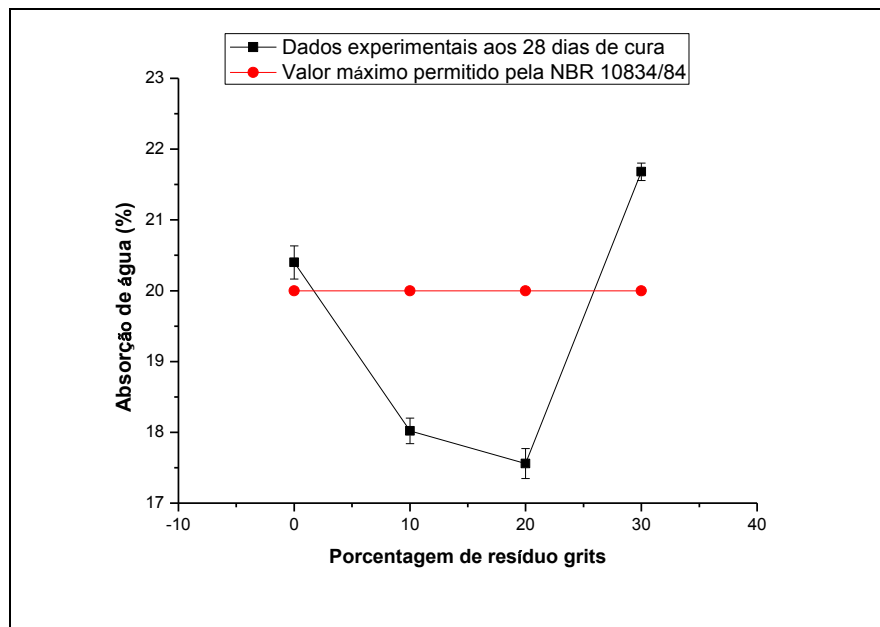


Figura 4. 14. - Absorção de água versus porcentagem de resíduo grits incorporado aos corpos-de-prova cilíndricos aos 28 dias de cura.

Os resultados indicaram que tanto o traço referência quanto o traço MC3 (adição de 30% de resíduo grits) estão fora do estabelecido pela NBR 10834, ou seja, apresentam uma absorção de água acima de 20 %. Já os traços com adição de 10 e 20 % apresentaram valores de absorção de água médios dentro do estabelecido pela NBR 10834. Observa-se também que entre 0 e 20 % de resíduo grits ocorreu uma diminuição significativa no valor de absorção de água. Adições de resíduo acima de 20 % aumentam significativamente os valores de absorção de água. Isto porque até 20 % de incorporação, o resíduo atuou como um filler, ou seja,

reduzindo a porosidade aberta, e ainda, o cimento continuou existindo em quantidade favorável para a união dos agregados.

Então pode-se afirmar, que em termos de absorção de água, os traços MC1 (adição de 10% de resíduo grits) e MC2 (adição de 20% de resíduo grits) dos estudados podem ser usados para a confecção de tijolos solo-cimento.

4.2.3. Massa Específica Aparente

Na Figura 4.15 é apresentado o comportamento da massa específica aparente, em função do teor de resíduo incorporado, para os corpos-de-prova ensaiados após moldagem. Os resultados mostraram que os corpos-de-prova incorporados com 20 e 30 % de resíduo grits apresentaram a maior massa específica aparente, inclusive do que aqueles da mistura padrão, ou seja, isenta de resíduo.

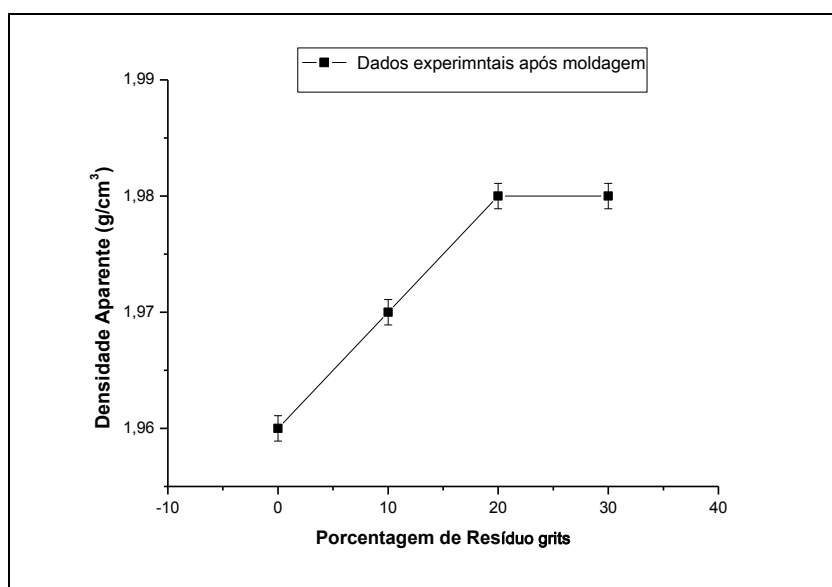


Figura 4. 15. - Massa específica aparente em função da porcentagem de incorporação de resíduo grits, dos corpos-de-prova pós-moldagem.

A figura 4.16 apresenta o comportamento da massa específica aparente, em função do teor de resíduo incorporado, para os corpos-de-prova ensaiados após 28 dias de cura. Os resultados mostraram que os corpos-de-prova incorporados com até 20 % de resíduo grits apresentaram o mesmo comportamento da massa específica aparente de pós-moldagem. Já os corpos-de-prova incorporados com

30% de grits apresentaram uma redução na massa específica aparente, comprovando que realmente o grits agiu como um filler, mas a quantidade de cimento não foi o suficiente para que se unissem os agregados, não mantendo o empacotamento de pós-moldagem. Isso justifica uma maior absorção de água em relação aos outros traços estudados.

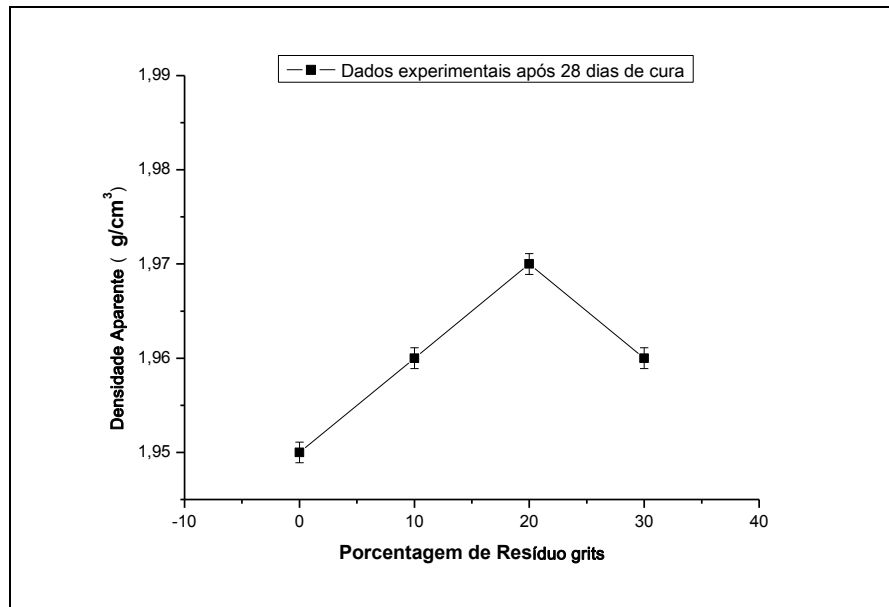


Figura 4. 16. - Massa específica aparente em função da porcentagem de incorporação de resíduo grits, dos corpos-de-prova após 28 dias de cura.

A incorporação de 20 % representa um maior empacotamento, ou seja, existe uma menor quantidade de poros abertos. Quando a Figura 4.14 é analisada percebemos que de acordo que se vai incorporando resíduo, isso até 20 %, a porosidade aberta vai diminuindo, o que justifica uma menor absorção de água em relação aos outros traços estudados, apresentando conformidade com os dados analisados.

4.2.4. Comportamento Linear

O esperado seria uma retração da altura, mas isto não ocorreu, porque a prensagem foi uniaxial, o que promove a não uniformidade de propriedades ao longo de toda a peça, principalmente na base da mesma. Observa-se na Figura 4.17 que a expansão linear correspondente à altura, reduz com uma incorporação de até 20% de resíduo grits. Acima dessa porcentagem volta a aumentar a dilatação linear. Quando se compara esse gráfico com a Figura 4.16, percebe-se que essa dilatação

ocorre de forma idêntica com a massa específica, onde a incorporação de 20 % possui um maior empacotamento, o que reflete em uma menor dilatação linear da altura.

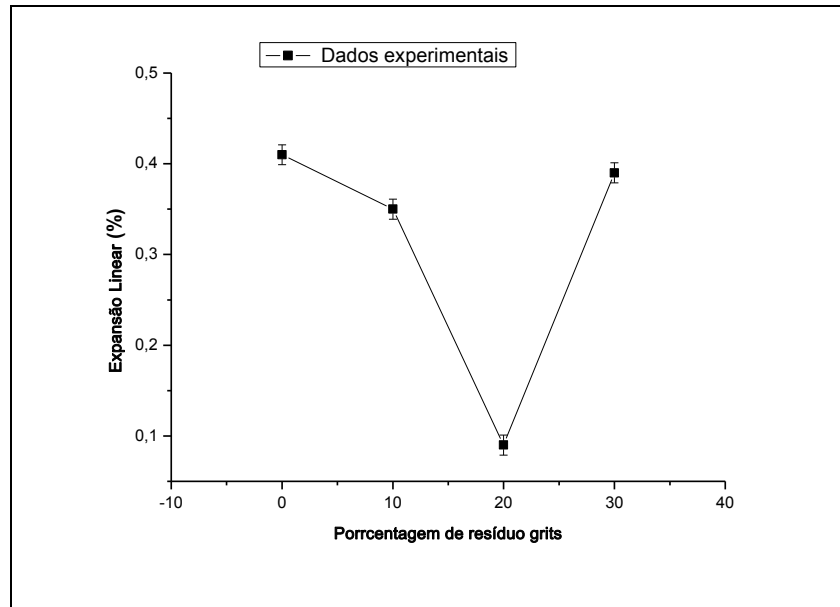


Figura 4. 17. - Expansão linear dos corpos cimentícios.

Na Figura 4.18 é apresentada a retração diametral dos corpos-de-prova estudados. Nota-se que a retração diametral, foi a mesma para todos os traços estudados. Isto se deve ao fato de que a matriz utilizada na fabricação dos corpos-de-prova, possuir um diâmetro fixo, e ainda este não depender da carga aplicada na matriz cilíndrica.

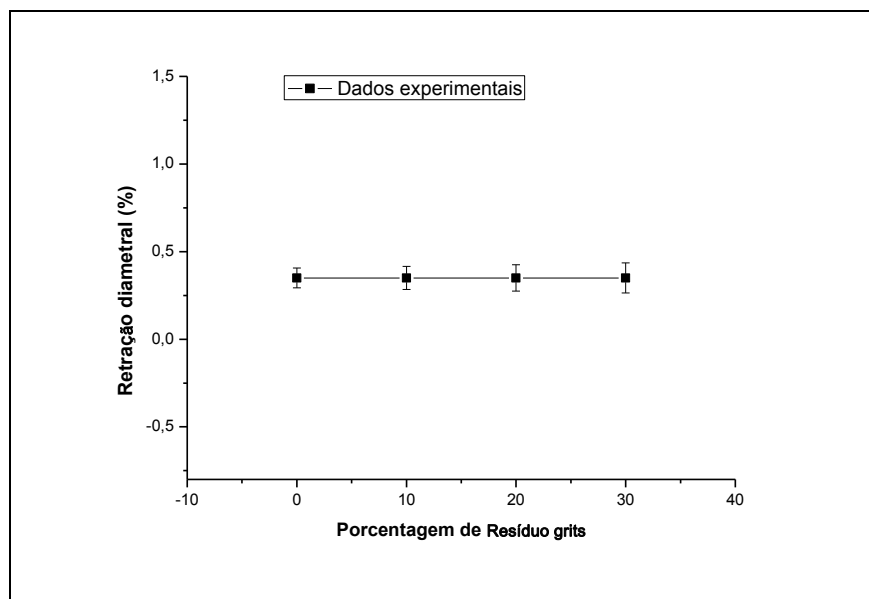


Figura 4. 18. - Retração Linear Diametral dos corpos cimentícios.

De uma forma geral observa-se que o material analisado é anisotrópico, ou seja, os corpos-de-prova comportaram-se de forma diferente, quando analisada a altura e o diâmetro.

Com tudo houve uma retração volumétrica (Figura 4.19), em que, observou-se que o traço padrão e o com 10 % de incorporação de resíduo, possuem os menores percentuais de retração. Com 20 % de incorporação de resíduo atinge-se o maior percentual, voltando a diminuir quando se adiciona 30 % de resíduo de grits. O que está em consonância com as propriedades mecânicas analisadas.

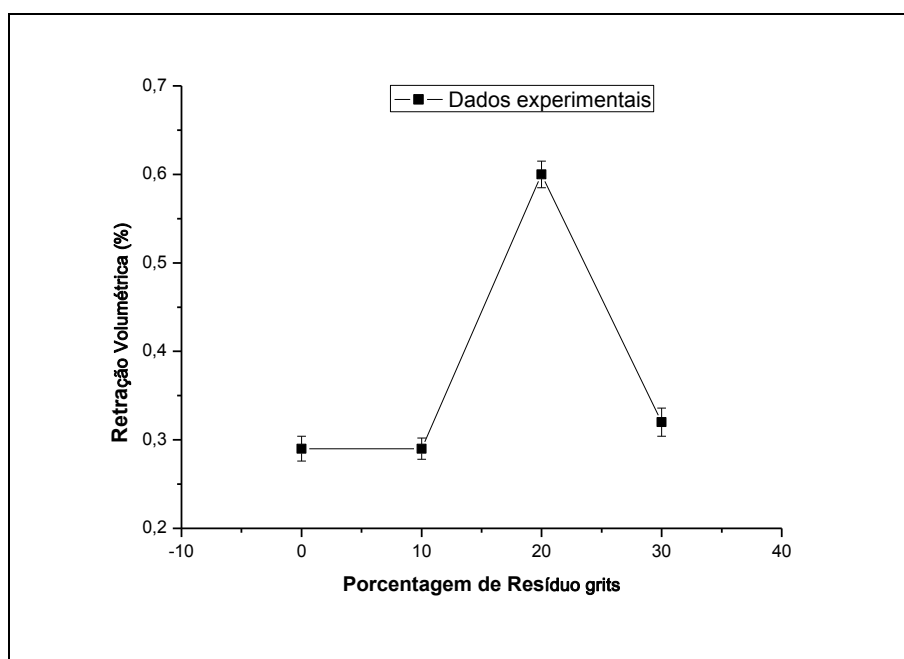


Figura 4. 19. - Retração Volumétrica dos corpos cimentícios.

4.2.5. Durabilidade dos Corpos Cimentícios

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados de durabilidade dos corpos cimentícios. Os valores de perda de massa dos corpos-de-prova submetidos à escovação foram determinados de acordo com a NBR 13554 (ABNT, 1996). Os corpos cimentícios preparados com o traço referência (TR) apresentaram valor de perda de massa de 11,85%, o traço com incorporação de 10% de resíduo grits (T1) apresentou perda de massa de 7,27 %, o traço com incorporação de 20 % de resíduo grits (T2) apresentou perda de massa de 6,48 % e o traço com incorporação de 30 % de resíduo grits (T3) apresentou perda de massa de 18,29 %.

Tabela 4. 8. - Perda de massa total ao fim do sexto ciclo.

Traço	Perda de massa total (%)
TR	11,85
T1	7,27
T2	6,48
T3	18,29
NBR 13554	10,00

Observa-se que para os traços T1 e T2 os valores da perda de massa ao fim do sexto ciclo, apresentaram-se abaixo do valor máximo permitido pela NBR 13553 (ABNT, 1996), que é de 10%. Já para as misturas com os traços TR e T3, ambos os corpos-de-prova submetidos à escovação, mostraram perda de massa superior à permitida pela NBR 13553 (ABNT, 1996).

Esses resultados estão em consonância com os resultados dos demais ensaios físicos e mecânico realizados. Como mostrado anteriormente, os traços T1 e T2 apresentaram maior resistência mecânica, menor absorção de água e maior massa específica aparente. Então, pode-se afirmar que em termos de durabilidade, os traços T1 e T2 estudados, podem ser usados para a confecção de tijolos solo-cimento.

Essas informações comprovam que a massa cimentícia elaborada neste trabalho, pode ser utilizada na fabricação de tijolo solo-cimento, ao qual resultará em um produto de alta qualidade.

4.3. Análise de fases e microestrutural dos corpos cimentícios curados

4.3.1. Análise Microestrutural

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

A Figura 4.20 apresenta as micrografias obtidas por microscopia confocal, em três aumentos da superfície de fratura, para os corpos de solo-cimento preparados com a massa cimentícia referência, ou seja, corpos cimentícios sem incorporação de resíduo grits. Todos os corpos cimentícios foram curados durante 28 dias.

Observa-se que o traço de referência apresenta grande quantidade de partículas de quartzo. Isso pode estar relacionado com o alto teor de partículas de quartzo livre (SiO_2) encontrado no solo arenoso (Tabela 4.1). Nota-se que as partículas de quartzo estão localizadas entre a pasta de cimento, pasta essa formada pelas fases anidras do cimento que em contato com água formam 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.

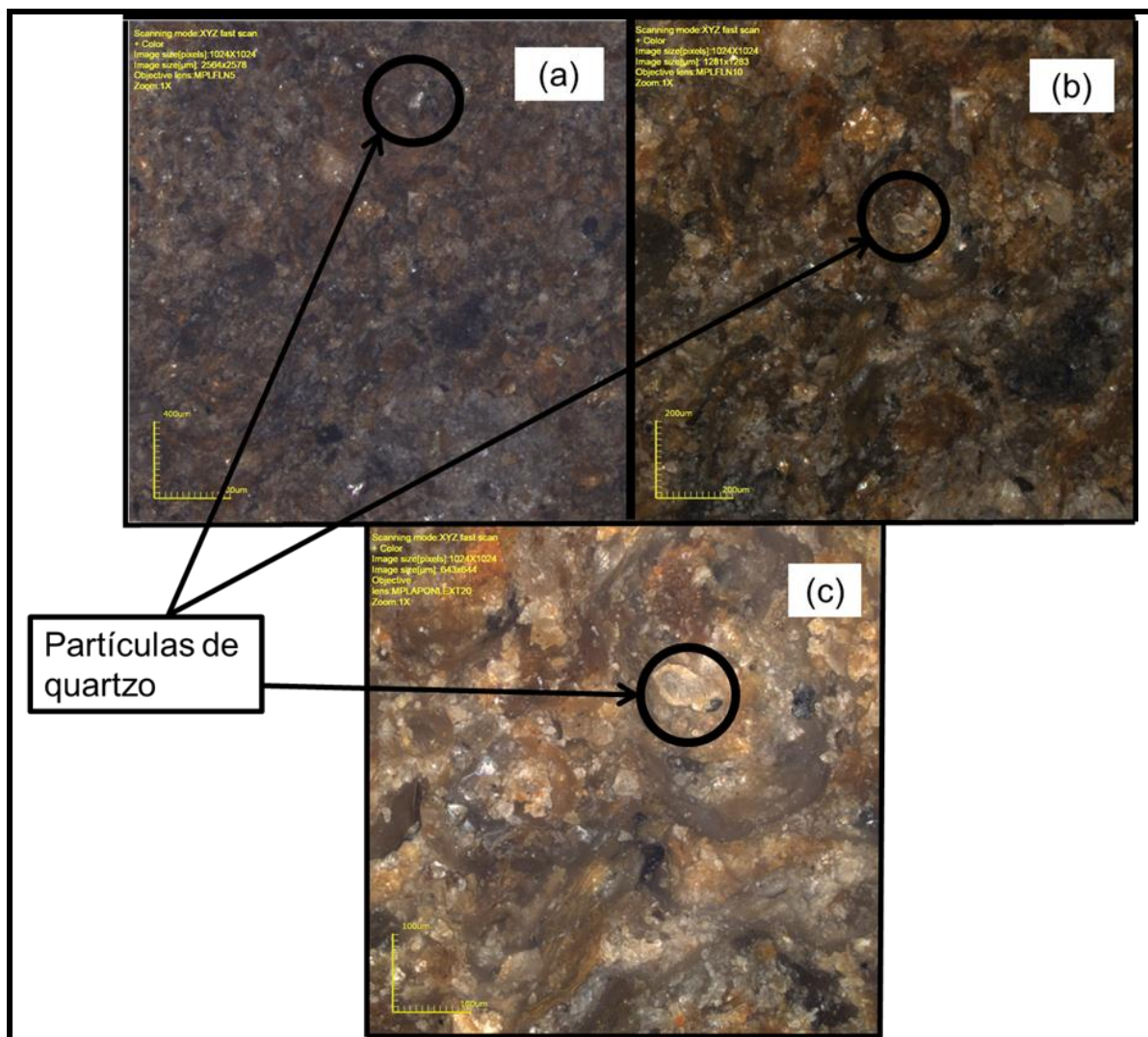


Figura 4. 20. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0 % de resíduo grits: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.

A Figura 4.21 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios com incorporação de 10 % de resíduo

grits. Todos os corpos cimentícios foram curados durante 28 dias. Percebe-se a presença de partículas de quartzo. Ainda, observa-se que a massa cimentícia incorporada com o resíduo grits apresenta aglomerados do resíduo, identificados através de quadrados amarelos, que pode estar relacionado com o processo de homogeneização da mistura das matérias-primas.

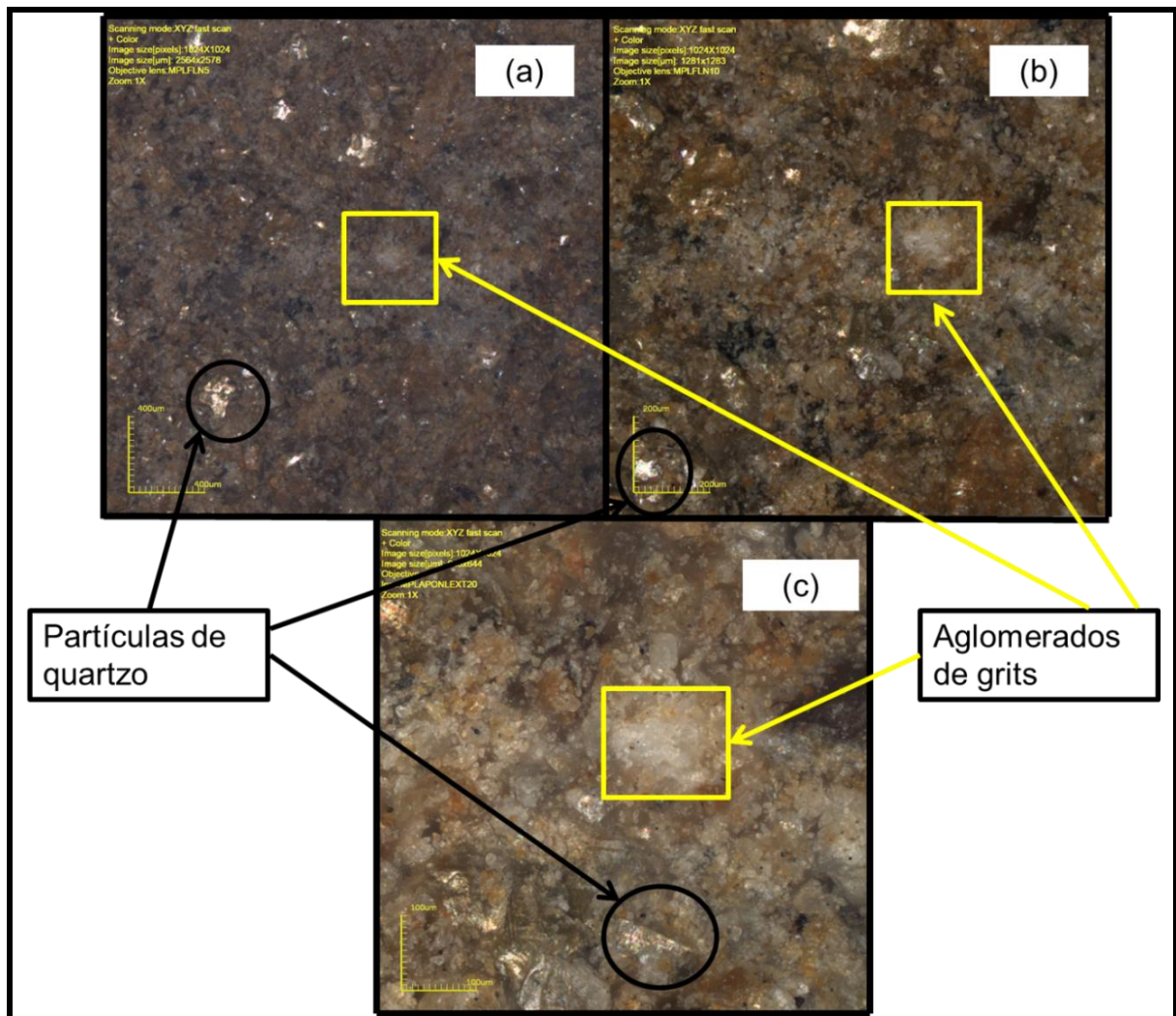


Figura 4. 21. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 10 % de resíduo grits: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.

A pasta de cimento aparece em meio ao resíduo, apresentando uma boa consistência, o que pode estar relacionado à umidade higroscópica do resíduo grits, o qual colaborou com uma menor absorção de água. Isto é um indicativo de que o grits não prejudica o processo de hidratação do cimento.

A Figura 4.22 mostra a microestrutura da superfície de fratura obtida via microscopia confocal dos corpos cimentícios incorporados com 20 % de resíduo grits. Nota-se a presença das partículas do quartzo.

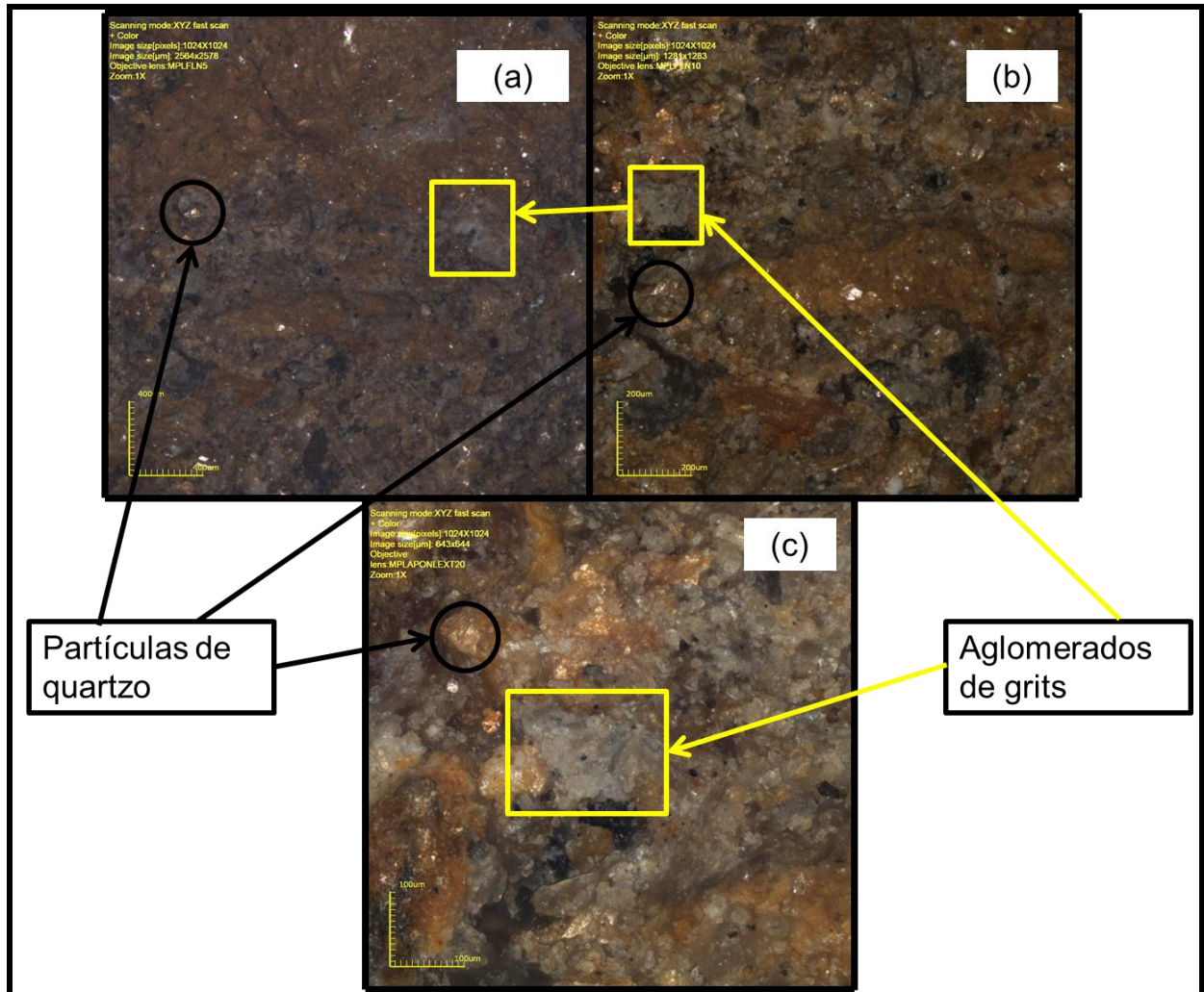


Figura 4. 22. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 20 % de resíduo grits: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.

Pode-se observar que a massa cimentícia incorporada com 20 % do resíduo grits, apresenta aglomerados identificados através de quadrados amarelos, que também pode estar relacionado com o processo de homogeneização da mistura das matérias-primas. A pasta de cimento aparece em meio ao resíduo ainda consistente. Nesta porcentagem de resíduo a absorção de água foi menor que a incorporação de 10 %.

A microscopia das massas com incorporação de 30 % de resíduo grits é apresentada na Figura 4.23, através da microestrutura da superfície de fratura. Nessa incorporação já não foi possível uma boa homogeneização. Lembrando que,

o resíduo é não plástico (NP), e em questão de um aglomerado ele funciona como um poro vazio, ao qual contribui para uma maior absorção de água, uma baixa resistência mecânica e um menor empacotamento. Isto se deve a incorporação de 30 % possuir uma menor quantidade de cimento, o que reduz a fase anidra, que é a responsável por unir os agregados.

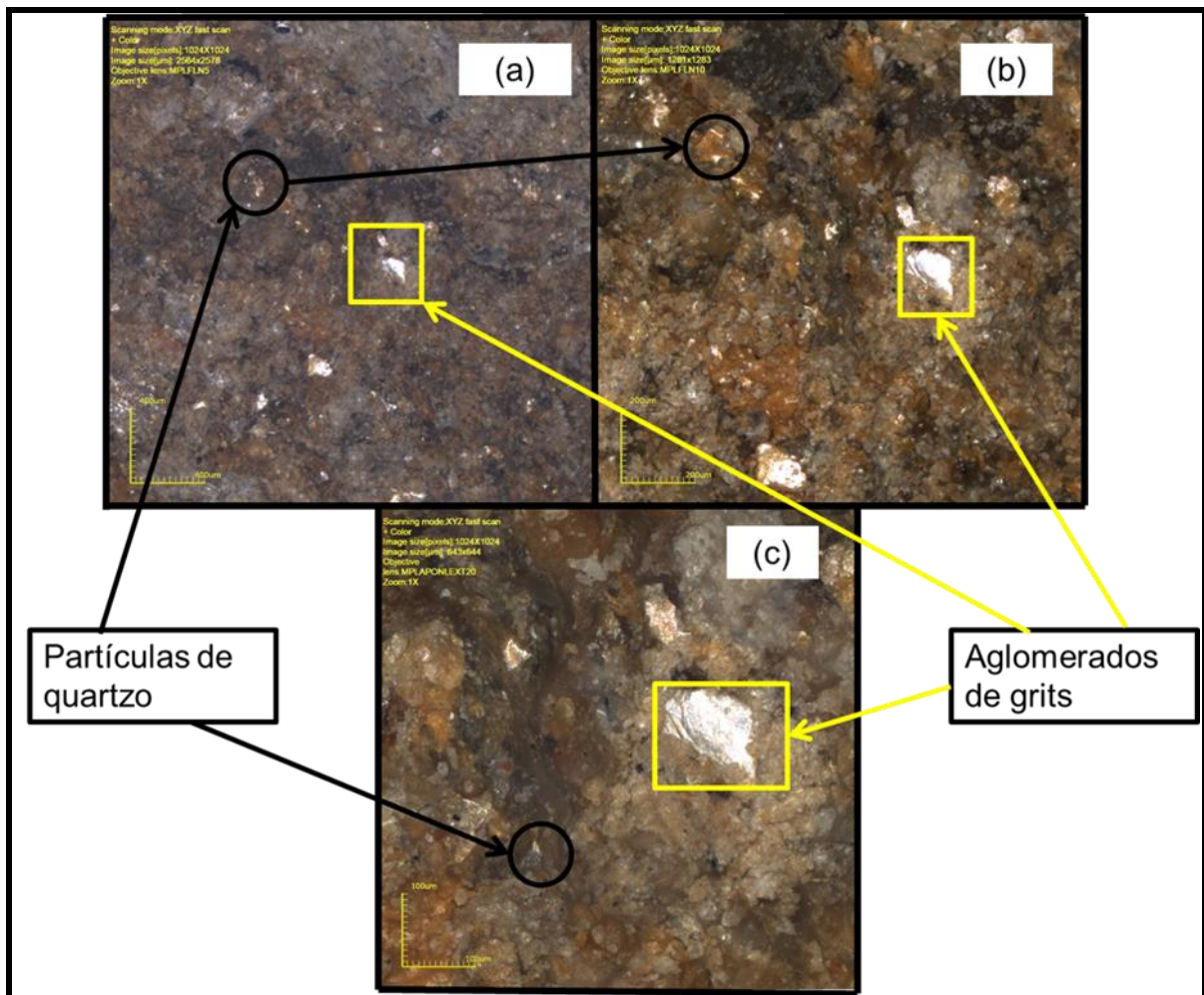


Figura 4. 23. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 30 % de resíduo grits: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.

Na Figura 4.24 pode-se observar na micrografia dos quatro traços estudados. Nota-se que com o aumento da porcentagem do resíduo grits, é perceptível o surgimento dos aglomerados. Quando é analisada a incorporação de 30 % percebemos aglomeração de resíduo grits. Essa análise comprova que o acúmulo de resíduo ao longo da estrutura do material danifica suas propriedades físicas, resultando em uma menor resistência mecânica, maior absorção de água, menor empacotamento e uma maior quantidade de poros abertos.

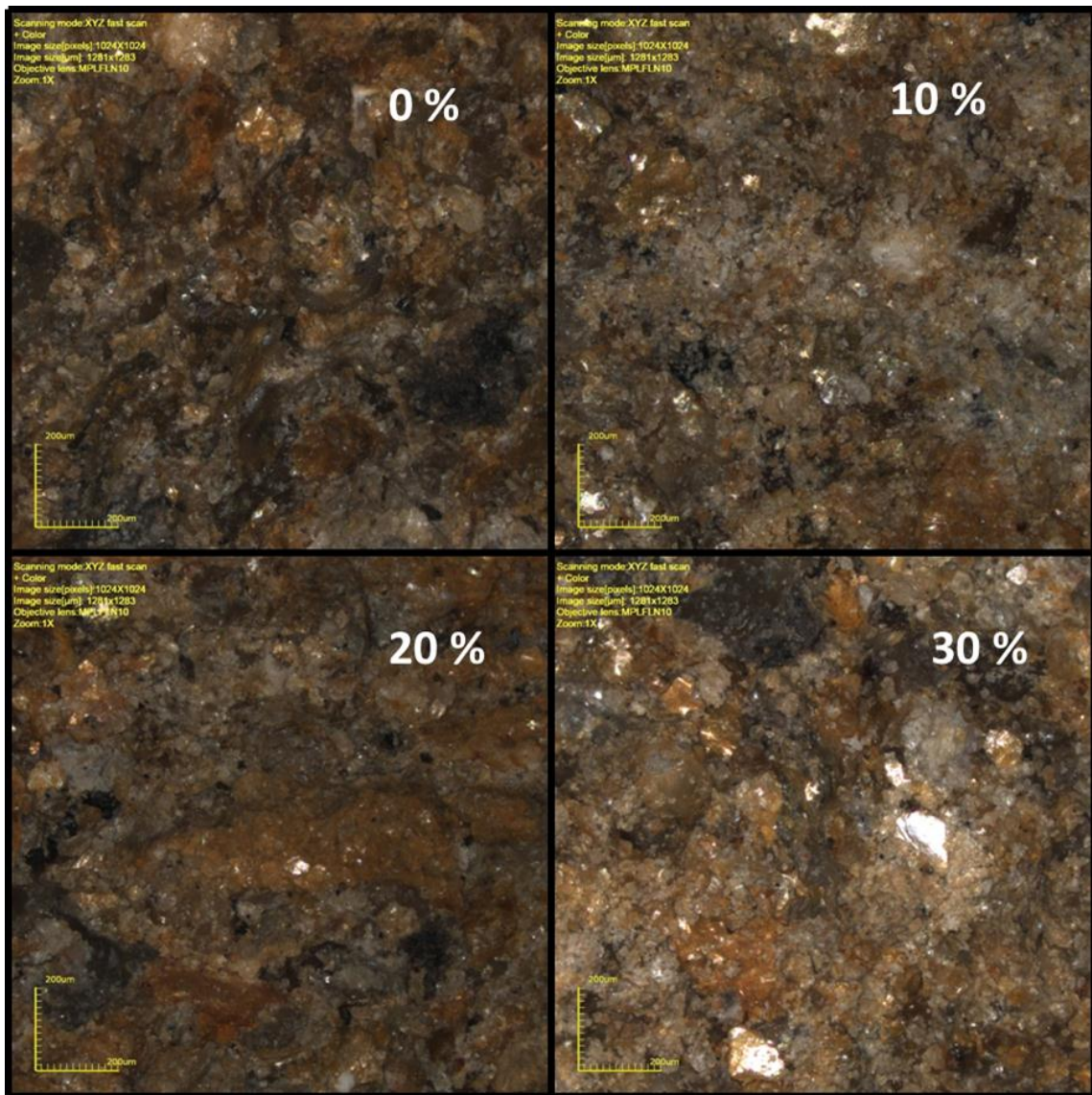


Figura 4. 24. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0, 10, 20 e 30 % de resíduo grits em 216X.

A Figura 4.25 apresenta as micrografias obtidas por MEV da superfície de fratura dos corpos cimentícios, com substituição parcial ao cimento em 0, 10, 20 e 30 % por resíduo sólido grits após 28 dias de cura. Observa-se que todos os corpos cimentícios apresentam uma superfície de fratura rugosa de aspecto lamelar. É possível constatar que o traço referência (sem resíduo) (Figura 4.25 a) apresenta, em comparação com os traços incorporados com 10 e 20 % de resíduo (Figura 4.25 b e Figura 4.25 c), uma região de fratura com maior quantidade de defeitos tais como poros e trincas. Estes defeitos são responsáveis por uma maior absorção de água, menor resistência mecânica e uma menor densidade. O resíduo agiu como um filler, ou seja, enchendo os poros vazios. Só que em uma adição de 30% de

resíduo (Figura 4.25 d) já se observa em comparação as incorporações de 10 e 20% de resíduo, um aumento de defeitos, ao qual também proporcionou uma maior absorção de água e uma menor densidade. Estes defeitos são originados devido a esse traço possuir em comparação aos demais traços uma menor quantidade de cimento, diminuindo a fase anidra, que é a principal responsável pela união dos diferentes constituintes, ficando assim a massa cimentícia vulnerável à ação abrasiva e com uma maior quantidade de poros abertos.

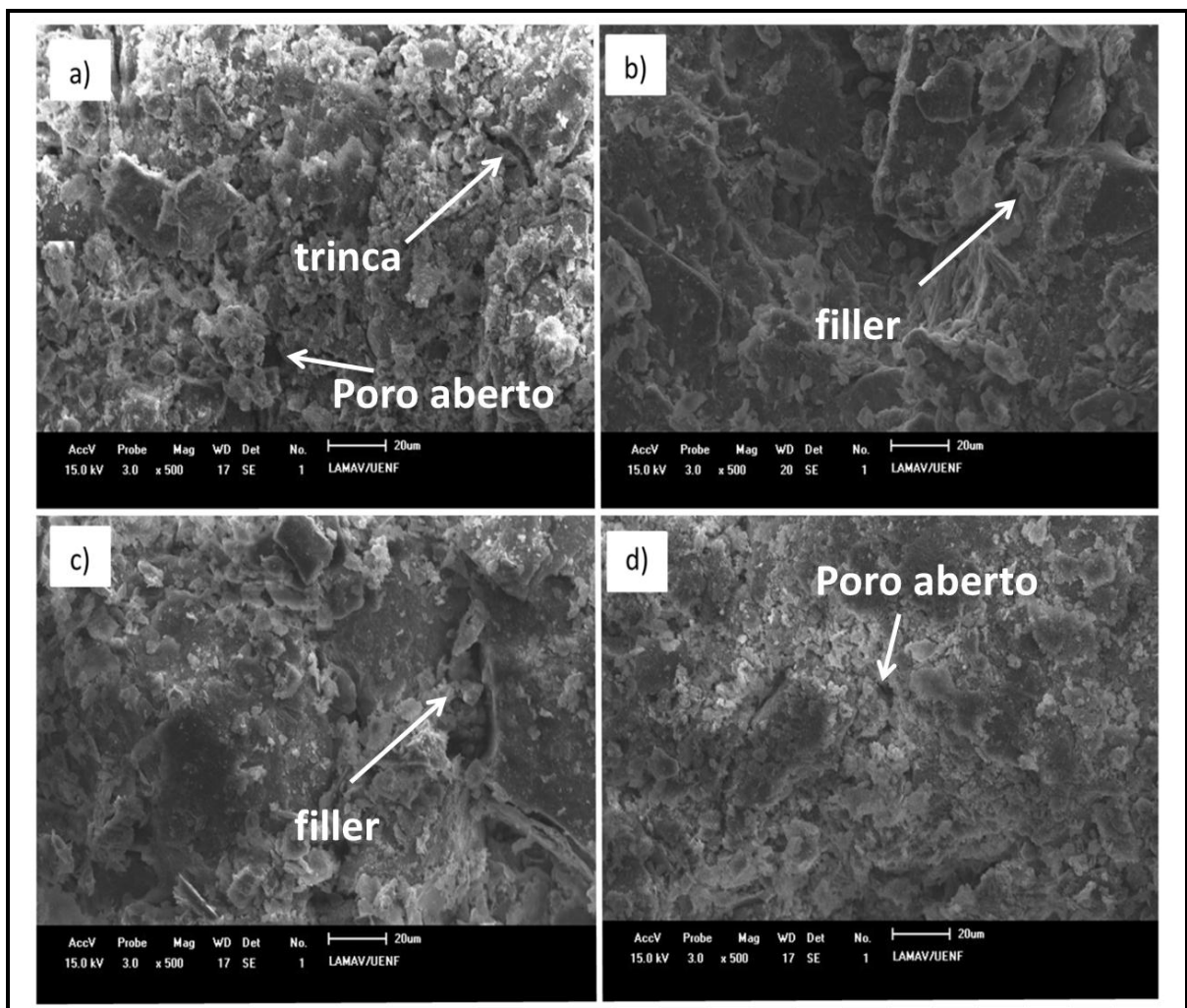


Figura 4. 25. - Micrografias da análise de fratura dos corpos cimentícios, após 28 dias de cura: a) 0% de resíduo; b) 10% de resíduo; c) 20% de resíduo; d) 30% de resíduo.

O espectro de EDS para os corpos cimentícios curados pode ser analisado na Figura 4.26. Os componentes químicos identificados nessa análise, também foram encontrados na composição química das matérias-primas, e no DRX dos corpos cimentícios curados. O que demonstra que todos os dados estão em consonância.

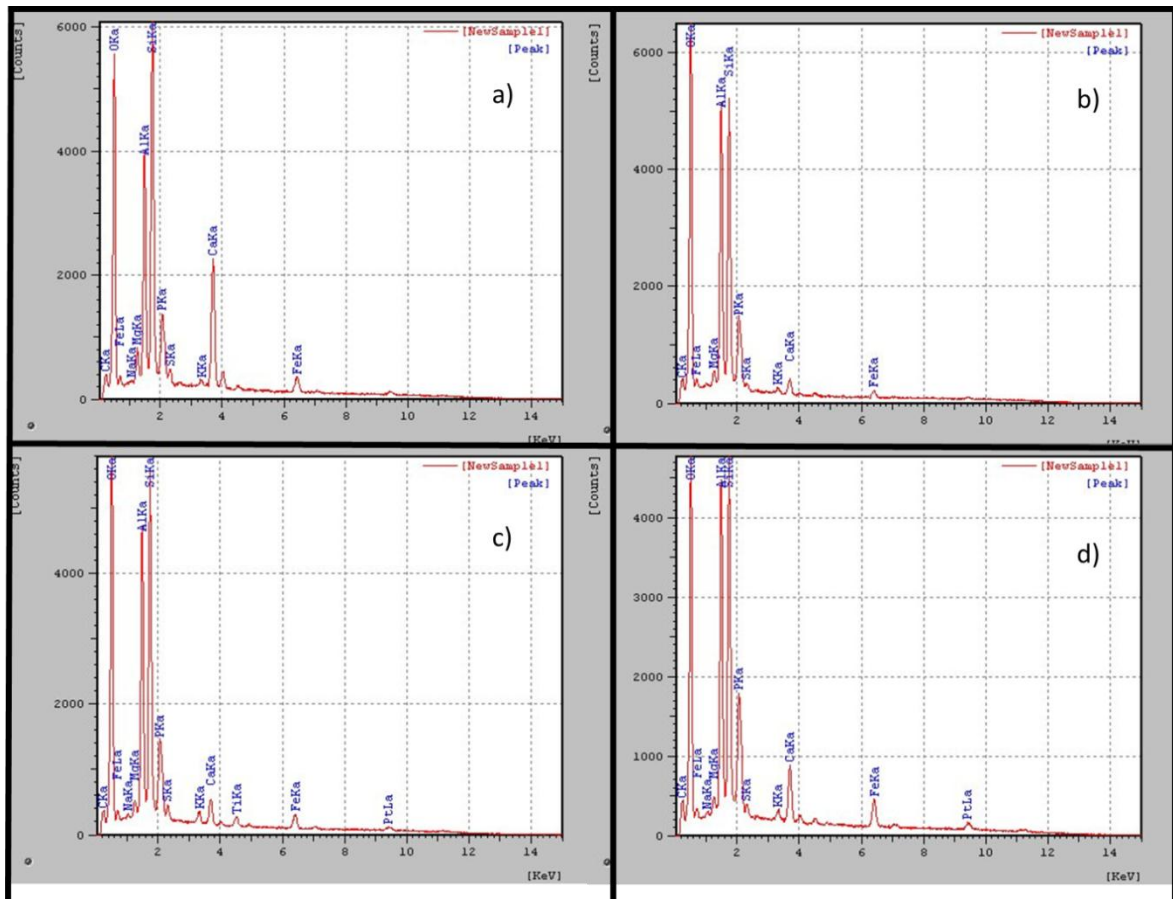


Figura 4. 26. – Espectro de EDS da análise de fratura dos corpos cimentícios, após 28 dias de cura: a) 0% de resíduo; b) 10% de resíduo; c) 20% de resíduo; c) 30% de resíduo.

4.3.2. Análise de fases

As figuras a seguir representam o DRX dos corpos cimentícios curados em 7 (Figura 4.27), 14 (Figura 4.28) e 28 dias (Figura 4.29). Esta análise foi feita a fim de identificar as fases cristalinas remanescentes e o surgimento de novas fases, através do processo de hidratação do cimento.

A reação pozolânica, segundo MEHTA (1987), ocorre de forma lenta, assim como a taxa de desenvolvimento de resistência e o calor de hidratação associado a essa reação. Por outro lado, a hidratação do C_3S do cimento Portland é rápida, e, portanto a taxa de desenvolvimento da resistência e o calor de hidratação são altos.

Analisando as Figuras 4.27 e 4.28, que correspondem aos corpos cimentícios curados em 7 e 14 dias, percebe-se que já existem as correspondentes fases hidratadas do cimento, que são representadas pela portlandita, Etringita, Silicato de cálcio hidratados. Segundo Cook (1986) isto é devido a reação pozolânica ter início

entre 7 e 15 dias após a mistura, quando a hidratação do cimento se apresenta já em estado avançado.

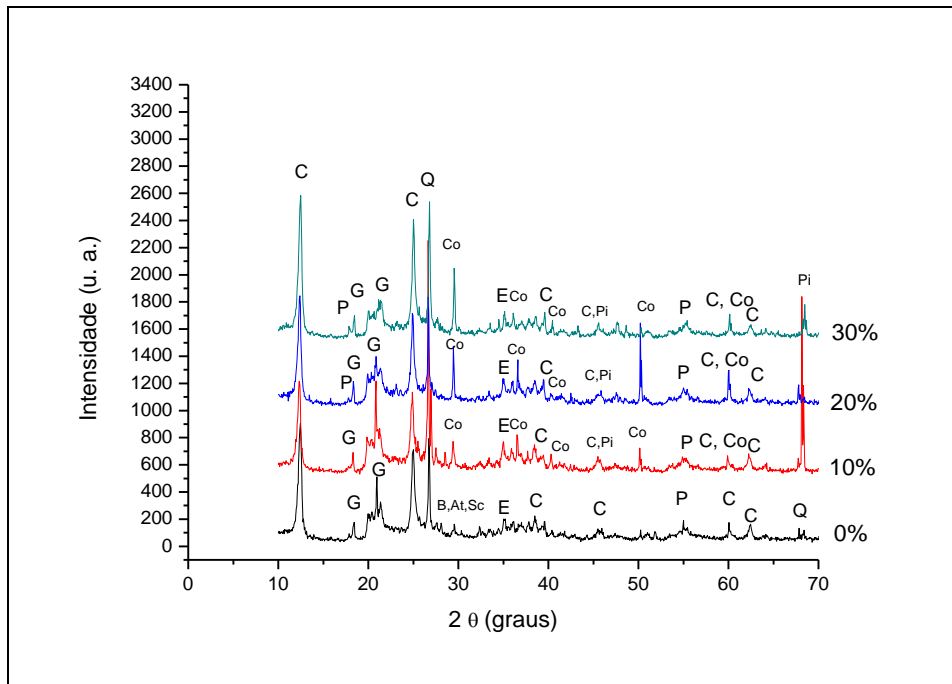


Figura 4. 27. – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0, 10, 20 e 30% de resíduo grits após 7 dias de cura: C = Caulinita; G = Gibsitá; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzó; B = Belita (C₂S); P = Portlandita (CH); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita; At = Aluminato tricálcico; Co = CaCO₃; Pi = CaNa₂(CO₂)₂·2H₂O.

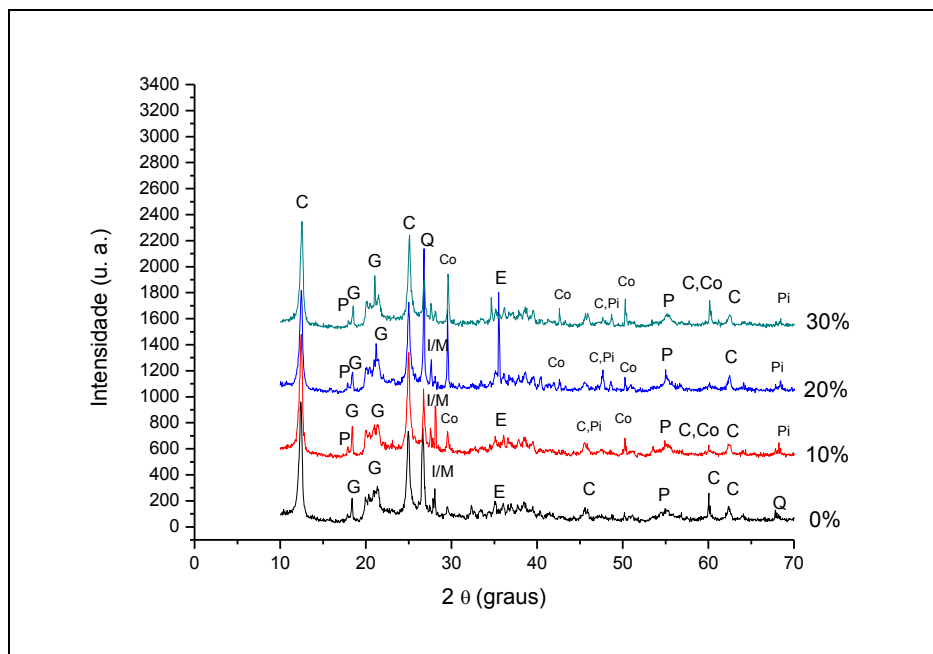


Figura 4. 28. – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0, 10, 20 e 30% de resíduo grits após 14 dias de cura: C = Caulinita; G = Gibsitá; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzó; B = Belita (C₂S); P = Portlandita (CH); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita; At = Aluminato tricálcico; Co = CaCO₃; Pi = CaNa₂(CO₂)₂·2H₂O.

A Figura 4.29 apresenta os difratogramas de raios-X de todos os corpos cimentícios com incorporação de 0, 10, 20 e 30 % de resíduo grits, aos 28 dias de cura. A adição do resíduo grits não modificou as fases cristalinas: caulinita, ilita/mica, gibsita, quartzo e goetita. Nota-se que houve formação de novas fases como etringita, portlandita (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essas fases são decorrentes da hidratação das fases anidras do cimento (Figura 4.3) durante o processo de cura.

Observa-se que, quando comparado o difratograma de raios-X de 10, 20 e 30% de incorporação de grits, com os difratogramas com 0 % houve o aparecimento do pico de carbonato de cálcio. Isto ocorreu devido à composição química do grits possuir quase em sua totalidade carbonato de cálcio.

Relacionado aos gráficos, existem diferenças relacionadas às idades de cura, devido ao clínquer e a pozolana apresentarem processos de reação muito diferentes, cada um reagindo em diferentes estágios da hidratação.

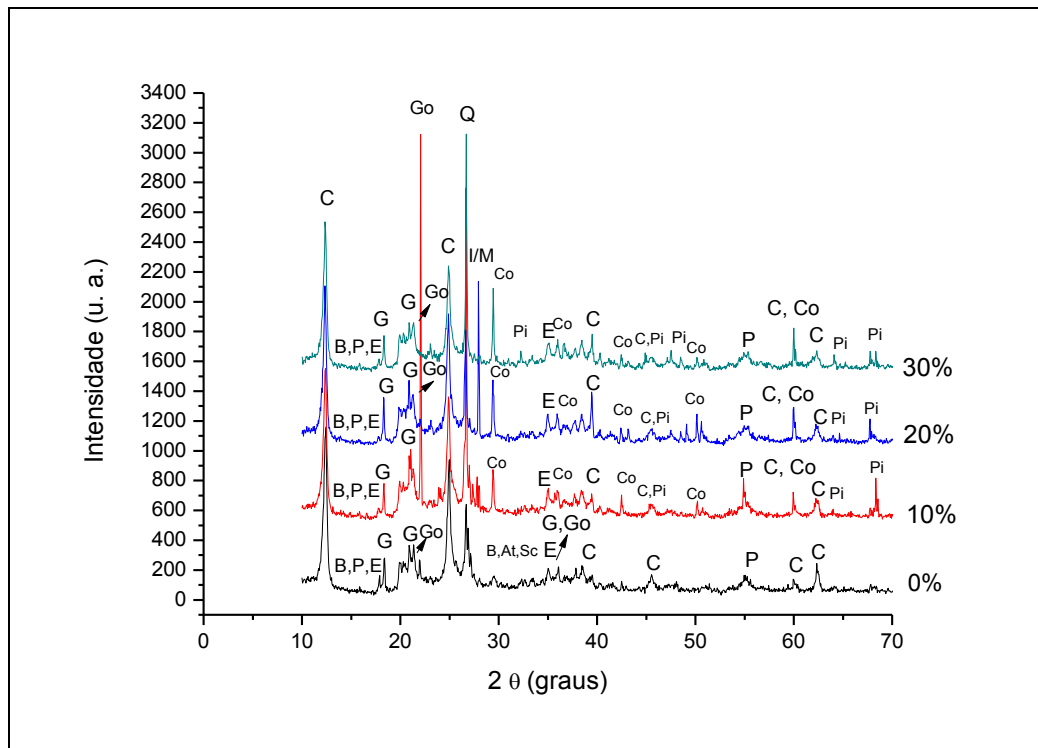


Figura 4. 29. – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0, 10, 20 e 30 % de resíduo grits após 28 dias de cura: C = Caulinita; G = Gibsita; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzo; Go = Goetita; B = Belita (C_2S); P = Portlandita (CH); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita; At = Aluminato tricálcico; Co = $CaCO_3$; S = SiO_3 ; W = FeO ; N = Na_2CO_3 ; Pi = $CaNa_2(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

5.1. Conclusões

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho de dissertação de Mestrado permitem as seguintes conclusões:

1. O solo arenoso é constituído quimicamente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), possuindo uma perda ao fogo da ordem de 7,8 %. Sendo do ponto de vista mineralógico, constituído principalmente por quartzo e do ponto de vista físico, apresentando alto teor de areia ($60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$), da ordem de 49,20 %, resultando em uma distribuição granulométrica muito próxima daquela recomendada para a produção de tijolo solo-cimento de acordo com a ABCP. O solo arenoso utilizado é um material que apresenta média plasticidade ($\text{IP} = 9,5 \%$).
2. O resíduo sólido grits é quimicamente composto principalmente de óxido de cálcio (CaO). Do ponto de vista mineralógico, é constituído principalmente de material a base de cálcio, principalmente calcita (CaCO_3).
3. A incorporação do resíduo sólido grits influenciou positivamente as propriedades tecnológicas e densificação dos corpos cimentícios de solo-cimento.
4. Os traços formulados com até 20% em peso de resíduo sólido grits em substituição ao cimento Portland apresentaram valores de resistência à compressão e absorção de água dentro das faixas estabelecidas pela norma NBR 10834 para produção de tijolo solo-cimento. Para uma futura fabricação de tijolos solo-cimento, essa incorporação pode ser utilizada, ao qual resultará em um produto de alta qualidade.
5. O reuso de resíduo sólido grits na produção de tijolo solo-cimento pode ser uma alternativa tecnológica viável para o destino final deste abundante resíduo proveniente da indústria de celulose.
6. O resíduo de grits pode ser utilizado como matéria-prima alternativa de baixo custo em substituição parcial do cimento em até 25 % na produção de tijolos solo-cimento. Pois, além de se estabelecer uma nova alternativa para reaproveitamento deste abundante resíduo, a incorporação resulta em vantagens técnicas e ainda promove uma redução no custo do produto final.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

1. A partir do traço ótimo que atenda as especificações exigidas pelas normas técnicas brasileiras, realizar a fabricação de tijolos solo-cimento incorporados com resíduo grits em escala piloto, submetendo-os a processo de cura e ensaios tecnológicos;
2. Realizar análise químico-ambiental nos tijolos de solo-cimento contendo resíduo grits, com ênfase sobre o seu potencial poluidor (ensaio de lixiviação e solubilização);
3. Realizar um estudo de análise de custo do tijolo solo-cimento;
4. Aumentar a quantidade de corpos-de-prova para uma análise estatística mais apurada;
5. Estudar a possibilidade de se incorporar o resíduo grits em outros materiais cerâmicos para a construção civil, como pisos e revestimentos cerâmicos.

Referências Bibliográficas

Agenda ambiental na administração pública (2001). Disponível em: <<http://pactoglobalcreapr.files.wordpress.com/2010/10/a3p.pdf>>. Acesso em: 27/12/2012.

Albuquerque, E.R.G.M. (2011) Aproveitamento do resíduo da indústria de celulose no cultivo do bambu. Tese (Mestrado em Química) – Recife – PE, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, 52p.

American Society for Testing and Materials (1994) Test method for water absorption, bulk density and apparent porosity. ASTM- C373-88.

Andreola, R.; Vieira, O; Santos, O; Jorge, L. (2000) Modelagem e simulação de um reator de caustificação. In: CIADICYP - Congresso Iberoamericano de Investigación em Celulosa y Papel.

Arroja L., Capela I., Cabral F., Ferreira V., Matos M., Pereira F. (2001), Sludge management in Kraft pulp mills, Specialised Conference in Sludge Managment: regulation, treatment, reutilisation and disposal, October 25-27, Acapulco México.

Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) (2012). Disponível em: <<http://www.abtcpblog.org.br/?m=20110301>> Acesso em: 11/02/2012.

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

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1995) Agregados para concreto. São Paulo.

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

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1983) Agregado para Concreto: NBR 7211. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Análise Granulométrica - Solo: NBR 7181. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Determinação de limites de plasticidade - Método de ensaio: NBR 7180. Rio de Janeiro.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Determinação da massa específica: NBR 6508. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984) Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d' água: NBR 8492. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991) Cimento Portland de alta resistência inicial: NBR 5733. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 12024. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Cimentos Portland resistentes a sulfatos: NBR 5737. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensamaneira: NBR 10.832. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993) Cimento Portland branco: NBR 12989. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) Bloco vazado de solo-cimento. Especificação. Método de ensaio: NBR 10834. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) Bloco vazado de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e a absorção de água. Método de ensaio: NBR 10836. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) Cimento Portland de baixo calor de hidratação: NBR 13116. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: NBR 10834. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996) Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: NBR 13554. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) Amostragem de resíduos sólidos: NBR 10007. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) Resíduos Sólidos - Classificação: NBR 10004. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) Resíduos Sólidos – Lixiviação: NBR 10005. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) Resíduos Sólidos - Solubilização: NBR 10006. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) Blocos Cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e Requisitos: NBR 15270. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006) Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos- Requisitos e métodos de ensaio: NBR 9831. Rio de Janeiro.

Associação Nacional de Indústria Cerâmica (2011). Disponível em: <<http://www.anicer.com.br>> Acesso em: 15/08/2011.

Assumpção, R.M.V.; Pinho, M.R.R.; Cahen, R.; Philipp, P. (1988) Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2.ed. São Paulo: IPT, 1:169-319.

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

Bernardo, A.C.S.M. (2009) Otimização Estocástica Multi-objetivos na Produção de Cimento Portland com Co- Processamento de Resíduos e Adição de Mineralizadores. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Itajubá – MG, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 225p.

Bingham, P.A., Hand, R.J.,(2006), Vitrification of toxic wastes: a brief review, *Advances in Applied Ceramics*, 105(1): 21-31.

Bouth, J.A.C. (2005) Estudo da potencialidade da produção de tijolo de adobe misturado com outros materiais – uma alternativa de baixo custo para a construção civil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 81p.

Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Mierzwa, J. C., Barros, M. T. L, Spencer, M., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N., Eiger, S. (2005) Introdução à Engenharia Ambiental. 2º ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 108-110p.

Bueno B. S., Vilar O. M. (1980) Mecânica dos Solos. Imprensa Universitária, UFV, Viçosa-MG, 131p.

Cabral, A. E. B. (2007) Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. Tese (Doutorado em Engenharia) — Universidade de São Carlos, 254p.

Carneiro, A. P.; Brum, I. A. S.; Cassa, J. C. S. (2001) Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. ENDUFBA; Caixa Econômica Federal, Salvador- BA.

CARVALHO, E. A., ALMEIDA, S. L.M. (1997). Caulim e carbonato de cálcio: competição na indústria de papel. Série Estudos e Documentos, n^o 41, Rio de Janeiro, CETEM.

Castro, S.F. (2008) Incorporação de resíduos de caulim em solo-cimento para construções civis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Campina Grande – PB, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 117p.

Celulose Nipo-Brasileira S/A – CENIBRA (2011) Relatório de Sustentabilidade. Disponível em: <<http://www.cenibra.com.br>> Acesso em: 22/12/2012.

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

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia – CEPED (1982). Cartilha da Construção com solo-cimento. Camaçari-Ba.

Collato, D., Bergmann, C. P. (2009) Emprego de Resíduo de Celulose da Indústria de Papel como Matéria-prima para Fabricação de Material Cerâmico. Cerâmica Industrial, 14 (3): 30-35.

Compromisso Empresarial pela Reciclagem – CEMPRES (2012). Disponível em: <<http://www.cempre.org.br/>> Acesso em: 27/12/2012.

Conceição, M.M. (2009) A Reciclagem dos Resíduos Sólidos Urbanos e o uso das Cooperativas de Reciclagem – Uma alternativa aos problemas do Meio Ambiente. *Centro Científico Conhecer - ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Goiânia, 5(8):01:16.

Cook, D. J. Rice husk ash. (1986) In: Swamy, R. N. (ed). *Concrete technology and design – v.3: Cement replacement materials*. London: Blackie & Son Ltd., 170p.

Crespo, M.S.H., Rincón, J.M., (2002), New porcelainized stoneware materials obtained by recycling of MSW incinerator fly ashes and granite sawing residues. *Ceramics International*, 27: 713-720.

Cruz, T.F.S. (2007) A arquitetura e o urbanismo de uma Vila Ferroviária. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) São Carlos – SP, Universidade de São Paulo – USP, 219p.

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

Dondi, M., Marsigli, M., Fabbri, B., (1997), Recycling of industrial and urban wastes in brick production – a review. *Tile & Brick International*, 13: 218-225.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (1997) Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro Embrapa Solos, 212p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (1999) Sistema brasileiro de classificação de solos - Brasília. Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 412p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2006) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Brasília, Produção de Informação, 306p

Ferraz, R. L.; Belicanta, A., Gutierrez, N. H. M. (2000) Estudo comparativo de alguns métodos de dosagens de misturas de solo-cimento. Editora Eduem, UEM, Maringá-PR, 6p.

Ferraz, A.L.N. (2004) Análise da Adição de Resíduos de Argamassa de Cimento em Tijolos Prensados de Solo-Cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Ilha Solteira - SP Universidade Estadual Paulista - UNESP, 114p.

FIBRIA (2011). Disponível em: <<http://www.fibria.com.br>> Acesso em: 10/10/2011.

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

Freire, W. J. Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento (1976). Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Piracicaba – SP, Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz – ESALQ-USP, 142p.

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.

Garcez, E. O. (2005) Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a carga de impacto. Tese (Mestrado em Engenharia) – Porto Alegre- RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, 113p.

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

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

Grande, F. M. (2003) Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual com e sem Adição de Sílica Ativa. Tese (Mestrado em

Arquitetura) -SãoCarlos- SP, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo - USP, 165p.

Gullichen, J.; Fogelholm, C-J. (2000) Chemical pulping (book 6) in Papermaking science and technology. Helsinki: Fapet, 693 p.

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

Jennys, H. (1994) Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology. New York: Dover Press, 191p.

Júnior, V. M. T., Mymrine, V., Ribeiro, R. A. C., Ponte, H. A. (2007) Reciclagem de Resíduos Industriais em Materiais Cerâmicos. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, ABC. Salvador, BA. 8p.

Karstensen, K.H., Kinh, N.K., Thang, L.B. (2006) Environmentally sound destruction of obsolete pesticides in developing countries using cement kilns. *Environmental Science & Policy*, 9: 577-586.

Lébeis, V. D. L. (2003) Viabilidade do uso do resíduo da fabricação do papel em argamassas. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) -Campinas- SP. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 96p.

Leite, M. B. (2001) Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Porto Alegre- RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 270p.

Lima, T. V. (2006) Estudo da produção de blocos de solo-cimento com matérias-primas do núcleo urbano da cidade de Campos dos Goytacazes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 107p.

Lopes, W. G. R. (2002), Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas. Dissertação de Doutorado, Campinas, SP, UNICAMP, 158p.

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

Machado, C. C., Pereira, R. S., Lima, D. C., Carvalho, C. A. B, Pires, D. M. (2007) Caracterização tecnológica de misturas solo-grits para pavimentos de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas. *Revista Árvore*, Viçosa, 31(3):487:494.

Machado, C.C., Pires, J.M.M., Pereira, R.S., Fontes, M.P.F., Lima, D.C., (2006), Comportamento químico e ambiental de resíduos sólidos em pavimentos de estradas florestais. *Scientia Forestalis*, 70:131-136.

Machado, C.C.; Pereira, R. S.; Pires, J. M. M., (2003), Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (Grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. *Revista Árvore*, Viçosa, 27 (4): 543-550.

Machado, C.C., Pires, J.M.M., Pereira, R.S., Fontes, M.P.F., Lima, D.C., (2006), Comportamento químico e ambiental de resíduos sólidos em pavimentos de estradas florestais. *Scientia Forestalis*, 1 (70):131-136.

Machado, C.C., Portugal, C.R.M. (2012) Comportamento geotécnico de misturas granulométricas de solo-grits. *Revista Árvore*, Viçosa, 36, (3): 519-526.

Machado, C.C.; Santanna, G.L.; Lima, D. C.; Carvalho, C. A. B; Pereira, R. S.; Fernandes, D.C.M., (2009), Comportamento geotécnico de misturas granulométricas de solo-grits. *Revista Árvore*, Viçosa, 33 (3): 555-562.

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

Meneses, R.F. (2005) Modelagem do sistema de recuperação do licor de cozimento na produção de celulose. Trabalho de fim de curso – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 23p.

MERCADO, M.C. (1990) Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – São Paulo- SP, Universidade de São Paulo-USP.

Miranda, L. A., Alvarenga, R. C. S. S., Júnior, P. C. M. P., Júnior, E.D. P., Carvalho, C.A.B., Fossoni, D. P., Couto L. G., (2011) Avaliação do potencial do grits como material de construção na produção de tijolos de solo-cimento. Revista Árvore, Viçosa, 35, (6): 1335-1340.

Morris, L.A. and W. L. Nutter (1996). *Pinus taeda seedling growth following application of ash and sludge residues from Kraft pulp mills: glasshouse and first year field trial*. In P. Polglase and W. Tunningley (ed.) Land Application of Wastes in Australia and New Zealand. New Zealand Forest Research Institute, Rotorua, p. 56-66.

Modolo, R.C.E. (2006) Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil. Tese (Mestrado em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos) – Universidade de Aveiro - UA, Portugal, 119p.

Monteiro Tijolos (2011). Disponível em: <<http://www.monteirotijolos.com>> Acesso em: 25/11/2011.

Montgomery, D. C. (1997) *Design and analysis of experiments*, 4 th edition, New York, Wiley, 704p.

Neves, C. M. M. (1989) Tijolos de solo-cimento. In: Dez alternativas Tecnológicas para habitação. Brasília. Anais. Minter / Pnud. p. 141-166.

Ortigão, J.A.R.(2007) Introdução da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. 3º Ed. Rio de Janeiro: Terratek, 391p.

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, 21:1-13.

Pereira, R.S. (2005) Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Viçosa- MG, Universidade Federal de Viçosa -UFV, 329p.

Pereira, R. S.; Machado, C. C.; Lima, D. C.; Carvalho, C. A. B.; Pires, D. M., (2007), *Influência da imersão em água na resistência mecânica de misturas solo-grits compactadas e curadas com vistas a aplicações em estradas florestais. Revista Árvore, Viçosa, 31(3):479-486.*

Mendes, P.M., Maladoz, L.M., Pereira, R. O., Pouey, M.T., Raubach, C.W. (2008) Caracterização preliminar da cinza de lenha de eucalipto com vistas à avaliação de sua pozolanicidade e de outras possibilidades de uso. XVII Congresso de Iniciação Científica. UFPEL – Universidade Federal de Pelotas. Disponível resumo em: <http://www.ufpel.edu.br/cic/2008/cd/pages/pdf/EN/EN_00471.pdf> Acesso em: 23/11/2012.

Perez, E.J.A., Terradas, R., Manent, M.R., Seijas, M., Martinez, S., (1996), Inertization of industrial wastes in ceramic materials. *Industrial Ceramics*, 16(1): 7-10.

Pitta, M. R. (1995) Estabilização com solo-cimento. *Revista Techne*, Editora Pini, São Paulo-SP, Nº 17, Julho/Agosto.

Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos – PGIRS (2008). Disponível em: <<http://www.rionegro.pr.gov.br/downloads/documentos/pgrsmunvol01.pdf>> Acesso em: 27/12/21012.

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

Presa, M.B. (2011) Resistencia à compressão e absorção de água em tijolos de solo cimento. Tese (Monografia de graduação) – Brasília - DF, Universidade de Brasília – UnB, 51p.

Plano de gerenciamento integrado de resíduos sólidos – PGIRS (2008) Diagnóstico. Rio Negro – PR, ETC, 171p.

Reed, J.S., Principles of Ceramic Processing (1995) Wiley Interscience, 2. Edition, New York, 658p.

Ribeiro, A. P. (2010) Avaliação do uso de Resíduos Sólidos Inorgânicos da Produção de Celulose em Materiais Cerâmicos. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – São Paulo- SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- USP, 142 p.

Russo, M. A. T. (2003) Tratamento de resíduos sólidos. Apostila do curso de tratamento de resíduos da Faculdade de Ciência e Tecnologia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra – Portugal, 196p.

Saboya, F., Xavier, G.C., Alexandre, J., (2007), The use of the powder marble by-product to enhance the properties of bricks ceramics, *Construction and Building Materials*. 21(10): 1950-1960.

Sanchez, E. S. Caustificação. In: Curso de Recuperação de Produtos Químicos. ABTCP, São Paulo. P. 1-20.

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

Scribd: Cartilha para produção de tijolo solo-cimento (2011). Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/3107168/CARTILHA-PARA-PRODUCAO-DE-TIJOLO-SOLOCIMENTO>> Acesso em 13/11/2011.

SEBRAE: Sistema Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (2011). Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br>> Acesso em 28/11/2011.

Senço, W. (2007). *Manual de Técnicas de Pavimentação*, 2. ed., São Paulo, Editora Pini, v.1, 774p.

Silva, I. F., Mielniczuk, J. ,(1997), Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21:113-117.

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

Silva, M.V. (2011) Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água. Tese (mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – São Paulo – SP, Universidade de São Paulo – USP, 132p.

Sistema FIEMG (2011). Disponível em: <<http://www.fiemg.org.br>> Acesso em: 13/09/2011.

Souza, G.P., Holanda, J.N.F., (2005), Densification behaviour of petroleum waste bearing clay-based ceramic bodies, *Ceramics International*, 30(1):99-104.

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

Souza, G. P., Sanchez, R., Holanda, J. N. F., (2002), Characteristics and physical-mechanical properties of fired kaolinitic materials. *Revista Cerâmica*, São Paulo, 48(306): 102-107.

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

Swanda, A.P., (1994), Process modeling and control system evaluation for the pulp and paper recausticizing process. M.S. thesis, University of California, Santa Barbara, USA, 40p.

Taylor, G. D. (1994) Materials In Construction. London: Longman Scientific & Technical. 2ª ed. 284p.

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.

Tijolo Ecológico Solo-cimento “Autêntico” (2012). Disponível em: <<http://tijoloecologicoautentico.blogspot.com>> Acesso em: 20/01/2012.

Tomé Jr., J. B. (1997) Manual para interpretação de análise de solo. Livraria e Editora Agropecuária. Guaíba-RS, 247p.

Tucci, A., Esposito, L., Rastelli, E., Palmonari, C., Rambaldi, E., (2004), Use of soda lime scrap glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix, *Journal of the European Ceramic Society*, 24(1):83-92.

Uchimura, M. S.(2007). Cintas de amarração com tijolo ecológico. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas - Banco de Respostas - Resposta Técnica - Instituto de Tecnologia do Paraná - TECPAR, 10/01/2008. Disponível em: <<http://www.sbrt.ibict.br>> Acesso em: 15/09/2011.

United States Department of Agriculture (2012). Disponível em: <<http://www.usdabrazil.org.br>> Acesso em: 22/04/2012.

Valenciano, M. D. C. M. (1999) *Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento*. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Campinas-SP, Faculdade de Engenharia Agrícola/ Universidade de Campinas - FEAGRI/UNICAMP, 102p.

Velten, R.Z., Sant'Ana, A.P., Lima, D.C., Silva, C.H., Carvalho, C.A.B., Couto, L.G., Machado, C.C. (2006) Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para aplicações em estradas florestais. *Revista Árvore*, Viçosa, 30(2): 235-240.

Victorino, C.J.A. (2007) Introdução: Planeta água morrendo de sede. Planeta Água morrendo de sede: uma visão analítica na metodologia do uso e abuso dos recursos hídricos. 1 ed.. Porto Alegre: EDIPUCRS, p. 10 - 14.

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

Webb, D. J. T. (1992) Lime stabilized soil blocks for third world housing. In: HILL, N.; HOLMES, S.; MATHER, D. Lime and other alternative cements. *London: Intermediate Technology*, p. 246-257.

WIKPÉDIA a enciclopédia Livre (2011). Disponível em: <<http://www.wikipedia.com.br>> Acesso em: 13/09/2011.

Zampieri, V. A. (1989) Mineralogia e Mecanismo de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas. Tese (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) - São Paulo – SP, Instituto de Geociências-USP, 191p.

Zampieron, S. L. M., Vieira, J. L. A. (2010) Água doce e limpa: de "dádiva" à raridade. Disponível em: <<http://www.socioambiental.org/esp/agua/pgn/>> Acesso em: 03/03/2012.