



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CLÉLIA RIBEIRO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DE SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM
FIBRAS DO COCO DE BABAÇU PARA PRODUÇÃO DE
TIJOLO MODULAR ECOLÓGICO

MARABÁ
2011

CLÉLIA RIBEIRO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DE SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM
FIBRAS DO COCO DE BABAÇU PARA PRODUÇÃO DE
TIJOLO MODULAR ECOLÓGICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Engenharia de Materiais para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de
Materiais da Universidade Federal do Pará.
Orientador: Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo

MARABÁ
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA

Oliveira, Clélia Ribeiro de

Avaliação de solo-cimento reforçado com fibras de coco de babaçu para produção de tijolo modular ecológico / Clélia Ribeiro de Oliveira; orientador, Adriano Alves Rabelo. — 2011.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2011.

1. Solo-cimento. 2. Babaçu. 3. Tijolos. 4. Desenvolvimento sustentável.
I. Rabelo, Adriano Alves, orient. II. Título.

CDD: 19. ed.: 620.135

CLÉLIA RIBEIRO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DE SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM
FIBRAS DO COCO DE BABAÇU PARA PRODUÇÃO DE
TIJOLO MODULAR ECOLÓGICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Engenharia de Materiais para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de
Materiais da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo

Defendido e aprovado em: ____/____/____

Banca examinadora:

– Orientador

Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Elias Fagury Neto
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Federal do Pará

Prof. MSc. Márcio Côrrea de Carvalho
Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais
Universidade Federal do Pará

Dedico este trabalho
Aos meus pais Berenice e Jozué
Aos meus irmãos Cledenilson e Janilson
E ao meu esposo Ernesto.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à:

Deus, primeiramente, por ter concedido a dádiva de estar aqui e de ter nascido numa família linda e maravilhosa, minha fonte de inspiração;

Agradeço aos meus pais, Berenice e Jozué, pela dedicação, ajuda e apoio incondicional;

Meus irmãos Cledenilson e Janilson, pela sincera amizade;

Ernesto, companheiro amado com quem quero caminhar por muito tempo;

Ao professor Dr. Adriano Alves Rabelo, meu orientador, pela paciência, incentivo e ter acreditado em mim;

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Materiais por tudo que aprendi durante esses 5 anos de curso;

Ao Daniel por ter me ajudado a executar os ensaios mecânicos;

Aos técnicos, Gilson e Artur, por ter apoiado a execução dos ensaios necessários no Laboratório de Química;

A técnica do Laboratório de Materiais Cerâmicos Tatiani por ter me ajudado na execução de alguns ensaios.

Ao professor Dr. Rômulo Simões Angélica pela execução dos ensaios de difração de raios-X nas amostras de solo.

Ao grupo de mulheres MIQCB por ter disponibilizado o resíduo do coco de babaçu e ao Jeferson por ter extraído as fibras do mesmo.

Aos meus amigos Mirly, Michel e Elizeth, “os supers”, por estes anos de alegrias, aventuras e de muito aprendizado, em especial, à Mirly, por ter me ajudado na confecção dos corpos-de-prova.

Aos familiares, amigos e colegas que de alguma forma contribuíram com este trabalho e torceram pelo meu sucesso.....

..... A todos muito obrigada!

Existe apenas um bem, o saber, e apenas um mal, a ignorância.

Sócrates

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1.OBJETIVO GERAL	19
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1.SOLO	20
3.1.1. Estrutura do solo	23
3.1.2. Características físicas do solo	24
3.1.3. Características químicas e mineralógicas dos solos	26
3.1.4. Classificação dos solos da região sudeste paraense	27
3.1.5. Estabilização de solos	30
3.1.5.1. Estabilização do solo com cimento Portland	31
3.1.5.2. Fatores que influenciam na estabilização do solo-cimento	32
3.2.CIMENTO PORTLAND	34
3.3.SOLO-CIMENTO	37
3.3.1. Solo-cimento em habitações	40
3.3.2. Principais reações químicas entre o solo e cimento	41
3.3.3. Vantagens e desvantagens do tijolo solo-cimento	44
3.3.4. Dosagem do solo-cimento	45
3.4.FIBRAS NATURAIS.....	47
3.4.1. Fibra de coco babaçu	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1.MATERIAIS.....	51
4.1.1. Solo	51
4.1.2. Cimento Portland	55
4.1.3. Fibras de coco babaçu	55
4.2.MÉTODOS.....	55
4.2.1. Caracterização do solo	55

4.2.1.1. Ensaio de granulometria por peneiramento.....	55
4.2.1.2. Difração de raios-X.....	56
4.2.1.3. Limites de consistência	57
4.2.1.4. Ensaio de retração de secagem	59
4.2.2. Caracterização das fibras de coco babaçu	59
4.2.2.1. Determinação da massa específica real.....	60
4.2.2.2. Determinação do teor de umidade	61
4.2.2.3. Determinação da absorção de água.....	61
4.2.2.4. Determinação da resistência à tração das fibras.....	62
4.2.2.5. Análise morfológica das fibras de coco babaçu.....	62
4.2.3. Confeção dos corpos de prova e propriedades tecnológicas	62
4.2.3.1. Moldagem e cura dos corpos de prova	62
4.2.3.2. Resistência à compressão simples	65
4.2.3.3. Absorção de água dos corpos de prova	66
4.2.3.4. Durabilidade por molhagem e secagem	67
4.2.3.5. Análise morfológica do solo-cimento-fibra	70
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	71
5.1.1. Granulometria por peneiramento	71
5.1.2. Difração de raios-X	72
5.1.3. Limite de consistência	78
5.1.4. Ensaio de retração.....	79
5.2. CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE COCO BABAÇU	80
5.3. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS CORPOS DE PROVA	84
5.3.1. Resistência à compressão simples	84
5.3.2. Absorção de água.....	87
5.3.3. Análise morfológica do solo-cimento-fibra	88
5.3.4. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.....	90
5.3.4.1. Resistência à compressão após o ensaio de durabilidade.....	92
6. CONCLUSÕES.....	94
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS.....	97

RESUMO

O desenvolvimento sustentável com utilização de recursos naturais abundantes renováveis e processos produtivos sem emissões de poluentes se torna a cada dia uma exigência para o setor industrial. Neste enfoque, este trabalho visa avaliar as características de tijolos solo-cimento reforçado com fibras de coco de babaçu. O solo-cimento é um produto endurecido resultante da cura de uma mistura homogênea compactada de solo, cimento, água e eventualmente aditivos, em proporções requeridas que garantem boa resistência mecânica e durabilidade. As matérias-primas utilizadas são abundantes e de fácil aquisição na região sudeste paraense. Foram coletadas diferentes amostras de solo e realizados os ensaios de granulometria, limites de consistência, difração de raios-X e retração por secagem, de acordo com as normas brasileiras. As fibras de coco de babaçu foram tratadas quimicamente com solução de NaOH 0,1N por 2 horas. As fibras tratadas e não tratadas quimicamente foram caracterizadas quanto à massa específica real, teor de umidade, absorção de água, morfologia e ensaio de resistência à tração para as fibras não tratadas. Foram estudados dois traços 7/1 e 10/1 com teores de 0%, 0,30% e 0,60% de fibras de coco babaçu e avaliadas segundo as idades de 7, 14 e 28 dias através dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e de durabilidade para a idade de cura de sete dias. Os resultados indicaram que a adição de fibras 0,30% e 0,60% para os traços 7/1 e 10/1 melhoraram a resistência à compressão. Os ensaios de resistência à compressão e absorção de água indicaram que os melhores resultados foram com o teor de fibra de 0,30% 7/1 e 0,60 10/1. Neste aspecto, a melhor composição, traço e custo foi o traço 10/1 com 0,60 % de fibra.

Palavras-chave: Solo-cimento; reforço; fibras de coco babaçu.

ABSTRACT

The sustainable development with the use of renewable and abundant natural resources, and production processes without pollutants emission, each day becomes a requirement for the industrial sector. In this approach, this study aims to evaluate the characteristics of soil-cement bricks reinforced with babassu coconut fibers. The soil-cement is a hardened product resulting from the curing of homogeneous mixture of compacted soil, cement, water and possibly additives, proportions required to ensure good mechanical strength and durability. The raw materials are abundant and affordable in the southeast of Para. Different samples of soil and grading the tests, consistency limits, x-ray diffraction and drying shrinkage, according to brazilian standards. The babassu coconut fibers were, chemically treated with a NaOH 0,1N 2 solution for 2 two hours. The fibers chemically treated and not treated has been characterized as the specific mass, moisture content, water absorption, morphology and tensile strength test for the not treated fibers. The study features two 7/1 and 10/1 with levels of 0%, 0,30% and 0,60% of babassu coconut fibers and evaluated according to the ages of 7, 14 and 28 days through the testing of compressive strength water absorption and the durability to seven days curing. The results showed that adding fiber 0,30% and 0,60% for traces 7/1 and 10/1 improved the compressive strength. The compressive strength and water absorption tests indicated that the best results were the fiber content of 0,30% 7/1 and 0,60 10/1. In this sense, the best composition, trace and cost was 10/1 with 0,60% fiber.

Keywords: Soil-cement; reinforcement; babassu coconut fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação dos solos ⁽³⁾	21
Figura 2 - Representação dos perfis ⁽⁴⁾	21
Figura 3 - Fases encontradas no solo ⁽⁸⁾	23
Figura 4 - Estados de consistência do solo ⁽¹⁰⁾	25
Figura 5 - Mapa esquemático de classificação dos solos dos principais solos da microrregião. Adaptado pelo Autor utilizando a base de dados do IBGE ⁽¹³⁾	28
Figura 6 - Casa construída com tijolo modular de solo-cimento ⁽³⁴⁾	40
Figura 7 - Mecanismo de estabilização entre a cal liberada durante a hidratação e os argilominerais ⁽³⁸⁾	42
Figura 8 - Cortes: transversal (A) e longitudinal (B). Componentes: epicarpo (a), mesocarpo (b), endocarpo (c) e amêndoa (c) ⁽⁵¹⁾	49
Figura 9 - Fluxograma para confecção dos corpos de prova solo-cimento-fibra.	51
Figura 10 - Amostras de solo coletadas em diversas regiões.	53
Figura 11 - Mapa de localização dos pontos de extração dos solos.	54
Figura 12 - Ensaio granulométrico das amostras de solo.	56
Figura 13 - Aparelho de Casagrande.	58
Figura 14 - Ensaio de retração do solo (ordem AS1 até AS8).....	59
Figura 15 - Tratamento químico nas fibras de coco babaçu.	60
Figura 16 - Ensaio de massa específica real das fibras tratadas e não tratada.	60
Figura 17 - Dosagem da mistura solo-cimento-fibra.....	64
Figura 18 - Corpos de prova após moldagem sob condições de cura: A – composição 7/1 (0%, 0,30% e 0,60% de fibra) e B - composição 10/1 (0%, 0,30% e 0,60% de fibra).	65
Figura 19 - Ensaio de Resistência à compressão.	65
Figura 20 - Corpos de prova imersos em água.	66
Figura 21 - Escovação dos corpos de prova.	67
Figura 22 – Curvas de distribuição granulométrica das amostras de solo.	71
Figura 23 - Difratograma de raios-X do solo AS1.....	74
Figura 24 - Difratograma de raios-X do solo AS2.....	74
Figura 25 - Difratograma de raios-X do solo AS3.....	75
Figura 26 - Difratograma de raios-X do solo AS4.....	75
Figura 27 - Difratograma de raios-X do solo AS5.....	76

Figura 28 - Difratoograma de raios-X do solo AS6.....	76
Figura 29 - Difratoograma de raios-X do solo AS7.....	77
Figura 30 - Difratoograma de raios-X do solo AS8.....	77
Figura 31 - Faixa de Plasticidade das amostras de solo coletadas.....	79
Figura 32 - Ensaio de retração do solo após 7 dias.	80
Figura 33 - Fibras de coco babaçu após tratamento químico.	81
Figura 34 - Absorção de água das fibras de coco babaçu.	82
Figura 35 – Morfologia da fibra não tratada quimicamente: A – longitudinal; B – Longitudinal fratura; C: Transversal fratura.	83
Figura 36 – Morfologia da fibra tratada quimicamente: A – longitudinal; B – Longitudinal fratura; C - Transversal fratura.	84
Figura 37 - Resistência à compressão traço 7/1 com 7, 14 e 28 dias de cura.	85
Figura 38 - Resistência à compressão traço 10/1 com 7, 14 e 28 dias de cura.	86
Figura 39 - Fratura dos corpos de prova após ensaio de resistência à compressão.	87
Figura 40 - Absorção de água traço 7/1 com 7, 14 e 28 dias de cura.	87
Figura 41 - Absorção de água traço 10/1 com 7, 14 e 28 dias de cura.	88
Figura 42 - Morfologia solo-cimento-fibra.....	89
Figura 43 - EDS do solo-cimento-fibra.	89
Figura 44 - Variação de volume traço 7/1 com diferentes teores de fibra.	90
Figura 45 - Variação de volume traço 10/1 com diferentes teores de fibra.	91
Figura 46 - Corpos de prova após os 6 ciclos do ensaio de durabilidade traços 7/1 e 10/1 com teores de fibra 0%, 0,30% e 0,60%	92
Figura 47 - Comparativo da resistência à compressão antes e após o ensaio de durabilidade traço 7/1 – 7 dias de cura.	93
Figura 48 - Comparativo da resistência à compressão antes e após o ensaio de durabilidade traço 10/1 – 7 dias de cura.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa granulométrica ⁽⁵⁾	24
Tabela 2 - Especificação do solo para produção de tijolo solo-cimento ⁽¹¹⁾	26
Tabela 3 - Capacidade de troca catiônica de alguns minerais presentes em argilas ⁽¹²⁾	27
Tabela 4 - Tipo de solo no município de Marabá ^(2,13)	29
Tabela 5 - Tipo de solo no município de Itupiranga e Ipixuna ^(2,13)	29
Tabela 6 - Tipo de solo no município de Rondon do Pará ^(2,13)	30
Tabela 7 - Tipo de solo no município de São João e São Domingos do Araguaia ^(2,13)	30
Tabela 8 - Tipo de solo no município de Bom Jesus do Tocantins ^(2,13)	30
Tabela 9 - Tipo de solo no município de Brejo Grande do Araguaia ^(2,13)	30
Tabela 10 - Composição química dos principais Cimentos Portland ^(24, 25, 26, 27,28)	36
Tabela 11 - Exigências mínimas de resistência a compressão e absorção de água aos 28 dias de cura ⁽³¹⁾	38
Tabela 12 - Tipos de tijolo solo-cimento ⁽³²⁾	39
Tabela 13 - Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação do solo-cimento NBR 12253/1992 ⁽⁴¹⁾	46
Tabela 14 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais ⁽⁴⁸⁾	48
Tabela 15 - Composição média do coco de babaçu ⁽⁵¹⁾	50
Tabela 16 - Exigências físicas, químicas e mecânicas do CP II F-32* NBR 11578/1991 ⁽²⁶⁾	55
Tabela 17 - Proporção das matérias-primas utilizadas em peso.....	63
Tabela 18 - Quantificação dos corpos de prova de acordo com os teores de matéria-prima.....	63
Tabela 19 - Classificação dos solos: pedológica e HBR.....	72
Tabela 20 - Limite de consistência das amostras coletadas.....	78
Tabela 21 - Resultado dos ensaios de retração.....	80
Tabela 22 - Resultados físicos das fibras de coco babaçu.....	81
Tabela 23 – Resultados físicos - mecânicos da fibra de coco babaçu NTQ.....	82
Tabela 24 - Resultados do ensaio de durabilidade dos traços 7/1 e 10/1 com teores de 0%, 0,30% e 0,60% de fibras para 7 dias de cura.....	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LC	Limite de contração
LP	Limite de plasticidade
LL	Limite de liquidez
IP	Índice de plasticidade
mEq	Número de miliequivalentes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo
RL	Neossolo Litólico
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo
LA	Gleissolo Háplico
GX	Latossolo Amarelo
RQ	Neossolo Quartzarênico
CP	Cimento Portland
C ₃ S	Silicato tricálcico ou alita
C ₂ S	Silicato dicálcico ou belita
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita
CH	Hidróxido de cálcio
CP I	Cimento Portland Comum
CP I – S	Cimento Portland Comum com Adição
CP II	Cimento Portland Composto
CP F	Cimento Portland Composto com Fíler
CP E	Cimento Portland Composto com Escória
CP Z	Cimento Portland Composto com pozolona
CP III	Cimento Portland de Alto-Forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
RS	Cimento Portland de Alta Resistente aos sulfatos
CPB	Cimento Portland branco
BC	Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
CPP	Cimento para poços petrolíferos

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
CSH	Silicato de cálcio hidratado
CAH	Aluminato hidratado de cálcio
HBR	Highway Research Board
MIQCB	Movimento Interestadual das Quebradeiras de Coco Babaçu
UTM	Universal Transverse Mercator
GPS	Global Positioning System
AS	Amostra de solo
RI	Resíduo insolúvel
PF	Perda ao fogo
NTQ	Não tratada quimicamente
TQ	Tratada quimicamente
NP	Não-plástico
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
EDS	Espectrometria por Energia Dispersiva de Raios-X
RC	Resistência à compressão

LISTA DE SÍMBOLOS

H_{LP}	Teor de umidade do solo
P_H	Peso bruto úmido
P_S	Peso seco
H_{LL}	Teor de umidade do solo
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
ρ	massa específica real
P_1	massa do picnômetro vazio
P_2	massa do picnômetro com fibra
P_3	massa do picnômetro contendo água e fibras
P_4	massa do picnômetro preenchido com água
H	Teor de umidade da fibra de coco babaçu
P_a	Massa seca da fibra de coco babaçu na estufa
P_e	Massa seca ao ar da fibra de coco babaçu
A_F	Absorção de água das fibras
M_u	Massa úmida da fibra
M_s	Massa seca da fibra
σ	Tensão de ruptura
A_{sc}	Absorção de água
m_{sc1}	Massa constante após a cura
m_{sc2}	Massa após imersão em água
$P_{m(5,6)}$	Perda de massa dos corpos de prova 5 e 6
$M_{i(5,6)}$	Massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem dos corpos de prova 5 e 6
$M_{fc(5,6)}$	Massa seca final corrigida, dos corpos de prova 5 e 6

1. INTRODUÇÃO

A construção civil em todo território nacional passa por um momento de crescimento que por consequência a aquisição de materiais do setor também aumentou. Diante dessas circunstâncias a busca pelo desenvolvimento sustentável, emprego viável de novas ferramentas, reciclagem de resíduos e o desenvolvimento sustentável fazem com que novos materiais de elevado desempenho sejam amplamente pesquisados. Este trabalho visa estudar o comportamento físico-químico e mecânico de diversas matérias-primas para produção de tijolos solo-cimento com adição de fibras de coco babaçu.

Promover o desenvolvimento sustentável significa contribuir, de alguma forma, para que os recursos ambientais não sejam dilapidados ao serem utilizados no presente e, com isso, interferirem negativamente na qualidade de vida das novas gerações. As necessidades humanas, dentre elas a habitação, precisam de uma atuação conjunta para que a sociedade organize ambientes de qualidade e de custo acessível⁽⁶⁰⁾.

O solo-cimento é um material alternativo que está plenamente de acordo com os princípios de sustentabilidade, ele é ambientalmente correto, economicamente viável, socialmente justo e culturalmente aceito. A utilização de solo e cimento em sistemas construtivos é uma técnica antiga, mas atualmente há diversas pesquisas para melhorar o processo produtivo e a qualidade desses tipos de tijolos por ser uma alternativa economicamente viável para a construção de alvenaria em habitações e outras edificações. Além disso, a responsabilidade ambiental requer processos produtivos que tenha boa resposta para a sociedade e que seja de cunho sustentável, já que a produção desses materiais não necessita de queima.

O solo é um material abundante, de fácil obtenção e de baixo custo. O solo-cimento tem ampla utilização em pavimentação, camadas de fundações e base para pavimentos rígidos e flexíveis de estradas e aeroportos; revestimentos de canais, reservatórios e barragens de terra; estabilização e proteção superficial de taludes; fundações de edifícios; muros de arrimo e em alvenarias de tijolos e blocos prensados ou painéis de paredes monolíticas para construção de moradias. E pode ser definido como um produto endurecido resultante da cura de uma mistura

homogênea compactada de solo, cimento, água e eventualmente aditivos, em proporções requeridas que garante boa resistência mecânica e durabilidade ⁽²⁹⁾.

O processo construtivo do solo-cimento é muito simples. Apresentam boas condições de conforto, comparáveis às construções de alvenarias de tijolos ou blocos cerâmicos, não oferecendo condições para a instalação e proliferação de insetos nocivos à saúde pública, atendendo às condições mínimas de habitabilidade ⁽⁴³⁾. É caracterizado por possuir baixo custo e não produzir danos ambientais pode ser uma alternativa viável para diminuir o custo na construção civil e conseqüentemente na construção de casas populares.

O foco deste estudo é avaliar o comportamento das matérias-primas locais para confecção de solo-cimento em corpos de prova cilíndricos para produção de tijolos modulares com variação nos teores de cimento e adição de fibras de coco babaçu. Os mesmos foram submetidos aos ensaios de compressão, absorção de água e durabilidade por secagem e molhagem. Os ensaios serão realizados de acordo com o tempo de cura e as normas relacionadas com a pesquisa proposta.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

→ Avaliar o desempenho do solo-cimento reforçado com fibras de coco babaçu (*Orbignya phalerata*) em corpos de prova cilíndricos para produção de tijolo modular ecológico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

→ Adicionar ao solo diferentes teores de fibras de coco babaçu, possibilitando outro destino para as fibras além da produção de carvão vegetal;

→ Verificar a proporção/dosagem mais adequada, levando em consideração o traço mais econômico;

→ Avaliar as propriedades tecnológicas das matérias-primas e formulações propostas;

→ Verificar o comportamento mecânico dos corpos de prova com adição de fibras naturais variando o seu teor e idades de cura;

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. SOLO

O solo é um termo genérico aplicado a todo material da crosta terrestre, proveniente da decomposição de rochas, constituído por elementos minerais e/ou orgânicos, que dependem da composição química e mineral da rocha de origem, das características do relevo, dos diferentes climas e do tempo de exposição às intempéries ⁽¹⁾. É ainda, uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta ⁽²⁾.

A classificação dos solos, através de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, é tratada de acordo com os fundamentos da Ciência dos Materiais, tanto no campo da Geologia, da Mecânica dos Solos e Fundações, da Agronomia, como de Estradas ⁽¹⁾. Conforme a área que estuda, o solo recebe designações diversas e pode ser denominado como ⁽¹⁾:

- **Classificação genética:** solo pedogenético, solo saprolítico, solo transportado;
- **Classificação granulométrica:** arenoso, argiloso, siltoso;
- **Classificação pedológica:** horizontes, sendo eles o superficial, subsolo e rocha mãe.

O solo passa gradualmente no seu limite inferior, em profundidade, para rocha dura ou solos saprolíticos que não apresentam sinais de atividades animal, vegetal ou outras indicações da presença de atividade biológica. O material subjacente (não-solo) contrasta com o solo, pelo decréscimo nítido de constituintes orgânicos, decréscimo de alteração e decomposição dos constituintes minerais, enfim, pelo predomínio de propriedades mais relacionadas ao substrato rochoso ou ao material de origem não consolidado ⁽²⁾. O solo também pode ser entendido como um conjunto de camadas sobrepostas de aspecto e constituição diferentes, essas são denominadas como horizontes ⁽³⁾. O conjunto desses horizontes, num corte vertical que vai da superfície até o material semelhante ao que deu origem ao solo é o perfil do solo ⁽³⁾. A estrutura dos horizontes irá depender do intemperismo, este é definido pela ação sistêmica e gradual dos fenômenos naturais ilustrados na Figura 1.



Figura 1 – Formação dos solos ⁽³⁾.

De acordo com a classificação pedológica o solo é formado principalmente pelos horizontes O, H, A, E, B, C, F e R. A Figura 2 delimita esses perfis ⁽⁴⁾.

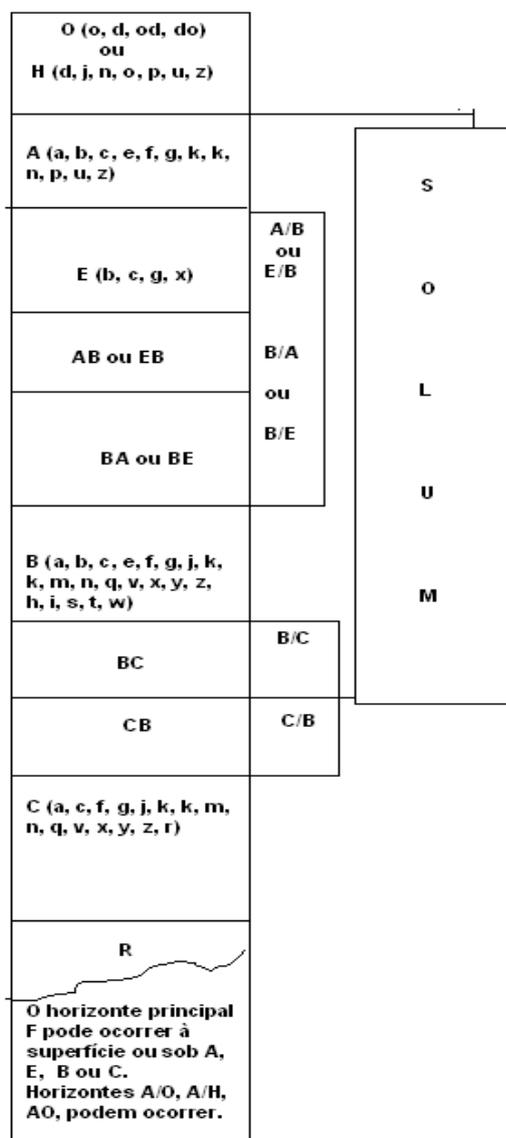


Figura 2 - Representação dos perfis ⁽⁴⁾.

O horizonte O ou H é região onde se encontra a maior parte da matéria orgânica. O horizonte A é a camada mineral mais próxima da superfície e há acúmulo de matéria orgânica decomposta e perda ou decomposição principalmente de componentes minerais. (Fe, Al e argila) ⁽⁵⁾. O horizonte B situa-se abaixo do horizonte A ou E. É caracterizado pelo máximo desenvolvimento de cor e estrutura ^(3,4).

O horizonte E é mineral, possui característica de perda de argilas silicatadas, óxidos de ferro e alumínio ou matéria orgânica, individualmente ou em conjunto, com resultante concentração residual de areia e silte constituídos de quartzo ou outros minerais resistentes e/ou resultante descoloramento ⁽⁴⁾.

O conhecimento do perfil de solo e de sua subdivisão em horizontes permite algumas observações relevantes no uso prático do solo-cimento ⁽⁶⁾.

No horizonte A podem existir celulose e húmus. A celulose é inerte, mas o húmus é um ácido orgânico que tem grande afinidade química com a cal livre (CaO) liberada na hidratação do cimento e, mesmo em baixas concentrações, pode afetar a resistência do material. Em alguns casos, quando não há mais alternativas, é recomendável adicionar cal nos solos do horizonte A antes da adição do cimento, porém esse procedimento envolve outras variáveis como o teor de cal necessário e o custo dessa operação ⁽⁷⁾.

Os solos do horizonte B são, em geral, argilosos com predominância da caulinita, uma vez que esse horizonte se forma em ambientes de boa drenagem. São solos de difícil pulverização (destorroamento) e isso é um grande problema na homogeneização da mistura do solo-cimento ⁽⁷⁾.

No horizonte C os solos são arenosos e de fácil pulverização, o que indica preferência em emprego em solo-cimento. Mesmo assim, devido à sua composição mineralógica de origem, que pode conter partículas friáveis, há a necessidade de um estudo de dosagem antes da utilização ⁽⁷⁾.

O horizonte F ou camada de material consolidada, à superfície, sob A, E, B ou C, é rico em ferro e/ou alumínio e pobre de matéria orgânica, proveniente do endurecimento irreversível da plintita, ou originado de formas de concentração possivelmente não derivadas de plintita, inclusive promovidas por translocação lateral de ferro e/ou alumínio ⁽⁵⁾. E o horizonte R constitui uma camada de solo consolidado, rochoso e praticamente contínuo.

3.1.1. Estrutura do solo

O solo é um material constituído por partículas sólidas e pelo espaço (vazios) entre elas, que pode estar preenchido por água ou ar, a Figura 3 exemplifica os principais constituintes do solo. Constitui assim um sistema de três fases: sólida, líquida e gasosa ⁽⁸⁾.

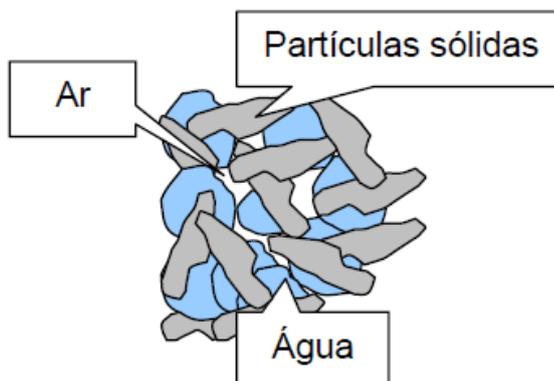


Figura 3 - Fases encontradas no solo ⁽⁸⁾.

A fase sólida é constituída por grãos minerais, com ou sem presença de matéria orgânica. As principais características a observar nos grãos são tamanho, peso específico, forma e composição química. Um grão visível a olho nu em geral tem origem de natureza mecânica, e as três dimensões na mesma ordem de grandeza (como exceção se pode citar as micas). Quimicamente, os silicatos (feldspato, mica, quartzo, serpentina, clorita, talco) compõem a maioria, seguida pelos óxidos (hematita, magnetita, limonita), pelos carbonatos (calcita, dolomita), e pelos sulfatos (gesso, anidrita) ⁽⁸⁾.

Fase líquida é responsável por grande parte das propriedades e do comportamento do solo. A água atua física e quimicamente na composição de minerais argilosos, faz parte da composição das pressões a que um solo fica submetido, altera a consistência e peso específico (aparente) de uma massa de solo ⁽⁸⁾.

A água pode aparecer nos solos como ⁽⁸⁾.

- **Água de constituição** - faz parte da estrutura molecular de partículas sólidas, principalmente nos minerais argilosos;
- **Água adesiva** - película de água que adere fortemente à superfície de cada partícula com espessura média 0,005 μm , as forças eletrostáticas que unem suas

moléculas mais próximas aos sólidos as submetem a pressões na ordem de grandeza de 20.000 Kg/cm^2 , tornando-a semi-sólida. Por isso é chamada também “água dura”. As mais afastadas apenas apresentam alta viscosidade.

→ **Água higroscópica** – é a que permanece em uma amostra de solo que foi seca ao ar livre;

→ **Água livre** – enche todos os vazios do material;

→ **Água capilar** – nos solos finos, a água sobe pelos interstícios existentes entre as partículas sólidas, acima do nível máximo da água livre em locais onde estas existam. A água adere à superfície de cada partícula, por forças de natureza eletrostática. A proporção de água adesiva (e capilar também) tende a ser tanto maior quanto maior for a sua superfície específica (relação entre a superfície de um corpo e sua massa).

A fase gasosa é constituída por ar, vapor d’água e carbono combinados.

3.1.2. Características físicas do solo

O solo é composto por várias faixas granulométricas à Tabela 1 especifica o tamanho das partículas e o tipo ⁽⁵⁾. Para composição de solo-cimento o solo é o material que entra em maior proporção, devendo ser selecionado de modo que permita o menor consumo possível de cimento.

Tabela 1 - Faixa granulométrica ⁽⁵⁾.

Tipo	Tamanho das partículas (mm)
Argila	0,002
Silte	0,002 - < 0,05
Areia fina	0,05 - < 0,2
Areia grossa	0,2 - < 2
Pedregulho	2 - < 76,0

Essas faixas granulométricas irão determinar diretamente da qualidade do solo-cimento ⁽⁵⁾:

→ Pedregulho e areia: são sólidos de quartzo (SiO_2 cristalina) de formas arredondadas ou angulares e com rugosidade superficial, que mobilizam o atrito

interno entre os grãos e, conseqüentemente, propiciam maiores resistências aos esforços mecânicos.

→ Silte: são sólidos de forma achatada ou poliédrica que apresentam pouca ou nenhuma plasticidade e propiciam a diminuição do atrito interno devido ao rearranjo das partículas ao sofrer compactação.

→ Argila: são partículas lamelares ou alongadas, quimicamente ativas e denominadas de argilominerais. Apresenta grande superfície específica, alto grau de plasticidade e pode ser constituída por três frações principais: caulinita, ilita e montmorilonita ⁽⁹⁾.

Outro ponto importante para caracterizar o solo é quanto à sua plasticidade, ou seja, a propriedade do solo que consiste na sua maior ou menor capacidade de ser moldado sob certas condições de umidade. Para tanto, existem os limites de consistência do solo (limites de Atterberg), definindo o limite de contração (LC) como sendo o teor de umidade abaixo do qual o solo passa da condição “semi-sólida” para a condição “sólida”; o limite de plasticidade (LP) como sendo o teor de umidade abaixo do qual o solo torna-se quebradiço, ou seja, adquire uma condição “semi-plástica”; o limite de liquidez (LL) como sendo o teor de umidade que corresponde à transição entre a condição de consistência fluida (teor de umidade acima do LL) e a de consistência plástica (teor de umidade abaixo do LL e acima do LP) e o índice de plasticidade (IP) como sendo o teor de umidade dentro da qual o solo possui plasticidade, sendo calculado pela diferença numérica entre LL e LP ⁽⁹⁾, esquema está ilustrado na Figura 4.

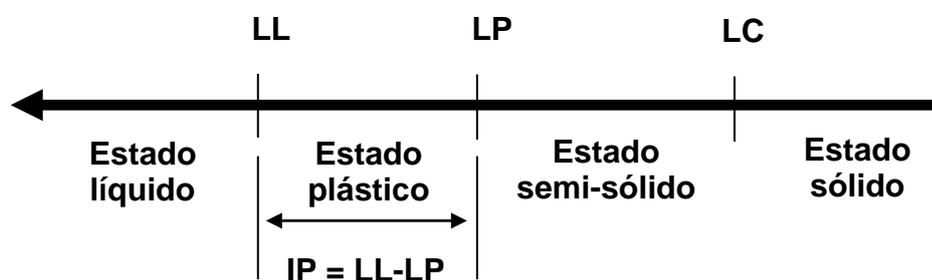


Figura 4 - Estados de consistência do solo ⁽¹⁰⁾.

Essas características físicas são necessárias para confecção do tijolo solo-cimento devendo o solo atender aos seguintes aspectos ⁽¹¹⁾, Tabela 2:

Tabela 2 - Especificação do solo para produção de tijolo solo-cimento ⁽¹¹⁾.

Variante	Valores (%)
% passando na peneira 4,8 mm (# 4)	100 %
% passando na peneira 0,075 mm (# 200)	10 % a 50 %
Limite de liquidez	≤ 45 %
Índice de plasticidade	≤ 18 %

3.1.3. Características químicas e mineralógicas dos solos

Os solos são constituídos por quatro componentes principais: partículas minerais, materiais orgânicos, água e ar e o teor de cada um irá depender da ação sofrida no decorrer do tempo ⁽³⁾.

Os constituintes minerais do solo são do tipo remanescente da rocha que deu origem ao solo (primários) ou secundários, decompostos e/ou recomposto depois da intemperização dos minerais da rocha-mãe. Os minerais primários são quartzo, mica, zircão, turmalina, magnetita, ilmenita, feldspatos e hornblenda. E os secundários são óxidos de ferro e partículas de sílica amorfa ⁽³⁾.

A argila é bastante ativa quimicamente, devido principalmente ao pequeno tamanho de suas partículas conferindo afinidade pela água (é explicado pela grande superfície específica e existência de cargas elétricas nessa superfície) e por elementos químicos nela dissolvidos. Quanto maior essa superfície nas argilas maior é a propriedade de expansão quando umedecidas, por terem capacidade de adsorver grande quantidade de moléculas de água e de cátions trocáveis ⁽³⁾.

Argilas podem ser constituídas de caulinita, illita e montmorilonita, estes componentes são os que podem reagir bem ou não com os estabilizantes químicos incorporados ao solo, devido à sua Capacidade de Troca Catiônica, a Tabela 3 mostra valores de capacidade catiônica de alguns minerais presentes em argilas. A caulinita é menos susceptível a variações de volume por absorção de água e possui menor capacidade de troca catiônica que as illitas; por sua vez, as montmorilonitas são mais instáveis em virtude de sua fácil expansão pela água, a qual molda uma estrutura porosa que facilita a troca catiônica ^(9,12).

Tabela 3 - Capacidade de troca catiônica de alguns minerais presentes em argilas⁽¹²⁾.

Mineral	Capacidade de troca (mEq/100g)*
Caulinita	0-10
Ilita	80-100
Montmorilonita	800-1500
Óxidos de Fe e Al	20-40

*mEq/100g: número de miliequivalentes por 100 gramas.

3.1.4. Classificação dos solos da região sudeste paraense

Os solos do município de Marabá e entorno podem ser classificados, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE sistematizado na Figura 5.

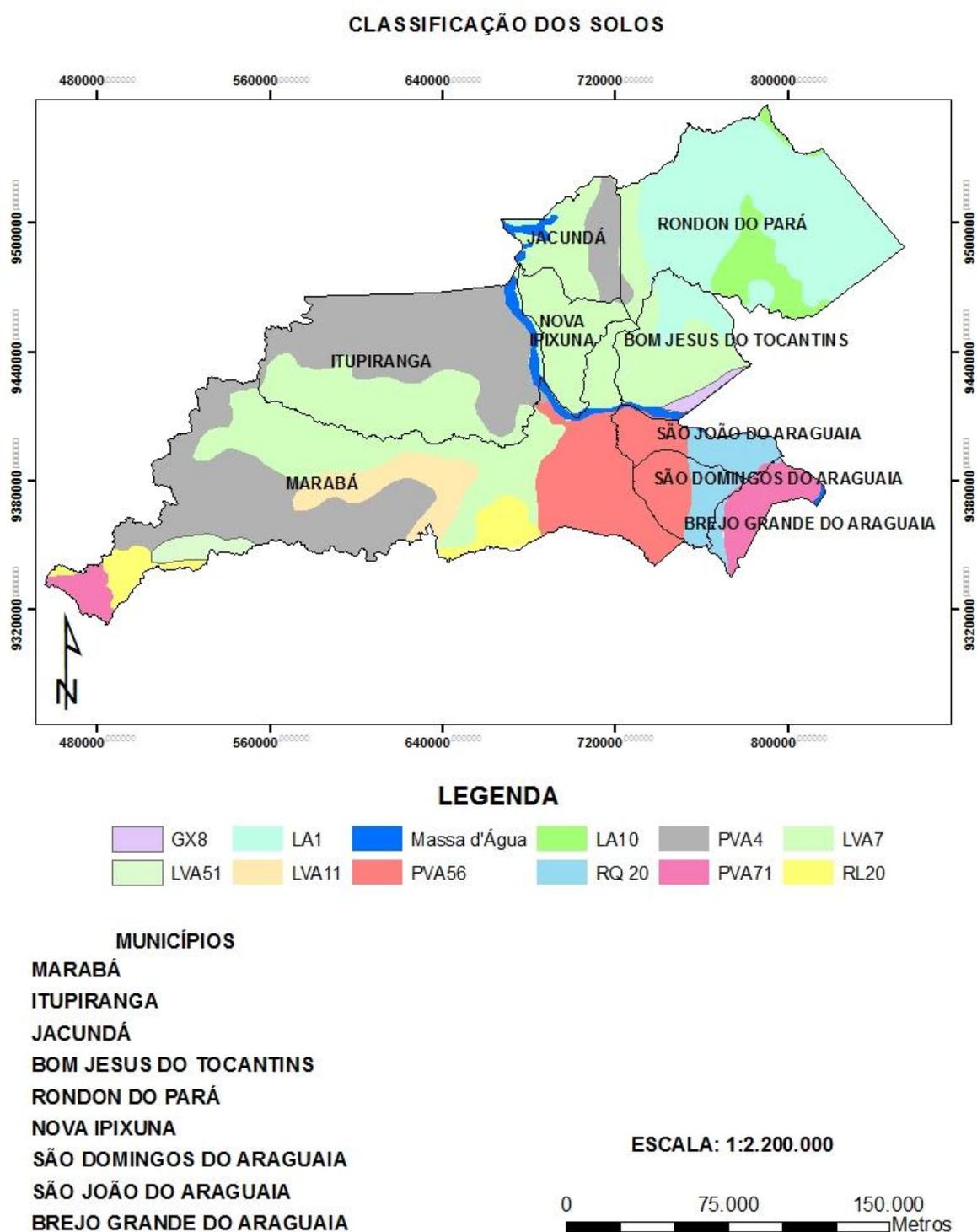


Figura 5 - Mapa esquemático de classificação dos solos dos principais solos da microrregião. Adaptado pelo Autor utilizando a base de dados do IBGE ⁽¹³⁾.

O município de Marabá e entorno encontra-se os tipos argissolo, latossolo e algumas manchas de neossolo e gleissolo. Os argissolos são solos constituídos por material mineral com argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação

por bases baixa ou caráter alítico e horizonte B textural imediatamente abaixo do horizonte A ou E. O tipo latossolo apresenta concentração relativa de argilominerais resistentes e/ou óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. O tipo neossolo compreende solos constituídos por material mineral, ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem, como maior resistência ao intemperismo ou composição química, ou dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos. O gleissolo compreende solos hidromórficos, constituídos por material mineral, não apresentam textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes, pode haver cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, devido à redução e solubilização do ferro, permitindo a expressão das cores neutras dos minerais de argila, ou ainda precipitação de compostos ferrosos ⁽²⁾.

As Tabelas 4, 5, 6, 7, 8 e 9 especificam detalhadamente o tipo de solo em cada município.

Tabela 4 - Tipo de solo no município de Marabá ^(2,13).

SIMBOLO	NOME
PVA71	Argissolo Vermelho-Amarelo
RL20	Neossolo Litólico
LVA51	Latossolo Vermelho-Amarelo
PVA4	Argissolo Vermelho-Amarelo
LVA11	Latossolo Vermelho-Amarelo
LVA7	Latossolo Vermelho-Amarelo
PVA56	Argissolo Vermelho-Amarelo

Tabela 5 - Tipo de solo no município de Itupiranga e Ipixuna ^(2,13).

SIMBOLO	NOME
PVA4	Argissolo Vermelho-Amarelo
LVA7	Latossolo Vermelho-Amarelo

Tabela 6 - Tipo de solo no município de Rondon do Pará ^(2,13).

SIMBOLO	NOME
LA10	Latossolo Amarelo
LA1	Latossolo Amarelo

Tabela 7 - Tipo de solo no município de São João e São Domingos do Araguaia ^(2,13).

SIMBOLO	NOME
RQ20	Neossolo Quartzarênico
PVA56	Argissolo Vermelho-Amarelo

Tabela 8 - Tipo de solo no município de Bom Jesus do Tocantins ^(2,13).

SIMBOLO	NOME
LVA7	Latossolo Vermelho-Amarelo
GX8	Gleissolo Háplico
LA1	Latossolo Amarelo

Tabela 9 - Tipo de solo no município de Brejo Grande do Araguaia ^(2,13).

SIMBOLO	NOME
PVA71	Argissolo Vermelho-Amarelo
RQ20	Neossolo Quartzarênico

3.1.5. Estabilização de solos

Estabilizar um solo natural é propiciar-lhe resistência ao cisalhamento e à abrasão, de modo que seja capaz de suportar cargas ou agentes externos, sem deformações excessivas ou prejudiciais e sob qualquer condição climática. Os métodos de estabilização incluem a compactação, o adensamento e a adição de outros materiais. Em todos eles, tanto a granulometria quanto a umidade e o grau de compactação tem muita importância para a obtenção de um adequado grau de estabilização ⁽¹⁴⁾.

3.1.5.1. Estabilização do solo com cimento Portland

O cimento possui partículas que se comportam como eletricamente carregadas, aumentando a condutividade elétrica da mistura de solo-cimento. A presença de cargas elétricas nas partículas de cimento provoca uma atração entre o cimento e as partículas de argila, produzindo agregação. A aglomeração de partículas de argila é, posteriormente, incrementada pela reação com o cálcio livre liberado durante o processo de hidratação do cimento ⁽¹⁵⁾.

O processo de estabilização após a mistura do solo com cimento apresenta forte tendência a ter sua plasticidade inicial elevada devido à fração argilosa do solo original, seguida por uma drástica redução da plasticidade. Essa redução é causada provavelmente pela liberação de íons de cálcio no início das reações de hidratação do cimento, ocorre uma troca de cátions, ou uma saturação de cátions adicionais nas partículas de argila, o que provoca a mudança de carga elétrica ao redor destas que então formam pela atração elétrica, conglomerados cujos diâmetros são muito superiores aos das partículas naturais ⁽¹⁴⁾.

As novas partículas assim formadas comportam-se como se fossem silte ou areia fina, com baixa ou nenhuma plasticidade e coesão. O grau de redução da plasticidade depende, portanto do tipo de solo, da porcentagem de finos, das características das argilas, dos teores de cimento, da umidade, do tempo de repouso da mistura antes do ensaio ⁽¹⁴⁾.

Se a mistura de solo e cimento for compactada em presença de umidade ocorrerá o que se denomina cimentação. A cimentação aumenta de intensidade com o desenvolvimento das reações de hidratação do cimento e pode ser definida como a ligação ou encadeamento químico de grãos de cimento vizinhos e de grãos de cimento e partículas de solo adjacentes a eles ⁽¹⁴⁾.

A liberação de cal durante o processo tem importante papel na cimentação, principalmente no caso de solos coesivos e muito plásticos. Há duas maneiras distintas de estabilização com cimento uma com o solo predominantemente fino e a outra com solo granular ⁽¹⁴⁾.

Os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, sendo necessária a presença de argila na sua composição, visando dar à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas ⁽¹⁶⁾.

Os solos granulares estabilizam-se pela cimentação nos pontos de contato entre os agregados que os compõem (areia pedregulho ou pedras). A estrutura cimentada do solo-cimento forma-se por um processo similar ao do concreto, nesta estrutura, a pasta não ocupa todos os vazios pela pequena quantidade de cimento e água empregada, dando a ela uma menor resistência quando comparada ao concreto, por ter um maior número de vazios e menor densidade ⁽¹⁶⁾.

Os solos finos necessitam de mais cimento para a sua estabilização se comparados aos solos grossos, pelo fato de apresentarem maior superfície específica ⁽¹⁶⁾.

3.1.5.2. Fatores que influenciam na estabilização do solo-cimento

Por envolver aspectos físico-químicos tanto do cimento quanto do solo, a estabilização é influenciada por inúmeros fatores:

→ **Tipo de solo** – alguns solos possuem melhor trabalhabilidade e relação ao consumo de cimento. Os limites de consistência: LL – limite de liquidez e LP – limite de plasticidade, são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade. Solos com limites de consistência elevados são mais difíceis de serem estabilizados, exigindo maiores teores de cimento ⁽¹⁷⁾. Solos muito plásticos podem requerer teores tão altos quanto 15 % ou 20 % de cimento, em massa ⁽⁹⁾. Solos de granulometria desuniforme são ideais, pois além de requererem menor teor de estabilizante, os espaços existentes entre os grãos maiores são preenchidos por partículas menores do próprio solo e, neste caso, os produtos formados das reações de solo-aditivo, ao invés de preencherem os vazios, agem de forma integral na ligação entre os grãos. Quando a granulometria do solo não é adequada, pode-se corrigi-la granulometricamente adicionando-se outros tipos de solo ⁽⁹⁾.

→ **Presença no solo de materiais nocivos ao cimento** – a presença de matéria orgânica prejudica as reações de interação com solo-cimento devido à sua grande capacidade de troca catiônica que pode determinar a absorção de íons de cálcio, liberados na hidratação do cimento, principalmente compostos que tenham baixo peso molecular como o ácido húmico. Os sulfatos de cálcio e magnésio quando presentes em teores maiores que 1 %, reagem com o aluminato tricálcio do

cimento hidratado, provocando aumento e conseqüente desagregação do solo-cimento. Os sais inorgânicos solúveis em presença de água podem se expandir e causar a desintegração do solo-cimento ⁽¹⁷⁾.

→ **Teor de cimento** – a resistência cresce com o aumento do teor de cimento e dependendo do tipo de solo empregado ⁽¹⁸⁾. Para teores acima de 13% de cimento deve-se avaliar a viabilidade econômica ⁽¹⁷⁾.

→ **Teor de umidade da mistura** – deve-se trabalhar com umidades de moldagem em torno do teor ótimo, pois umidades ótimas acarretam a máxima densidade do sistema e, conseqüentemente, maior resistência. Quanto maior for o efeito da estabilização do solo, menor deve ser a perda de massa, indicando que o componente construtivo possui durabilidade e resistência ⁽⁹⁾.

→ **Operações de mistura e compactação** – a água deve ser adicionada vagarosamente até a coloração apresenta de forma uniforme, indicando que a homogeneização foi suficiente ⁽¹⁹⁾. A mistura de solo-cimento é submetida à compactação através de um processo de aplicação de cargas dinâmicas no material com a finalidade de reduzir seu volume de vazios, a fim de se conseguir maior resistência. A densidade do solo compactado é função do teor de umidade no momento da compactação, ou seja, o teor de umidade ótima promove uma lubrificação das partículas, facilitando, quando se imprime uma energia de compactação, o preenchimento de todos os vazios possíveis. Assim, o solo compactado reduz sua permeabilidade, compressibilidade e capacidade de absorção de água, tornando-se mais estável. Portanto é imprescindível conhecer a umidade ótima do solo numa determinada energia de compactação aplicada para obter sua massa específica aparente seca máxima ^(9,19).

→ **Temperatura e tempo cura** – a cura é um conjunto de operações ou procedimentos adotados para se evitar a evaporação da água de amassamento e hidratação do cimento presente nas regiões superficiais do material. A cura, em condições adequadas, tem como objetivo: impedir a perda da água de hidratação do cimento; controlar a temperatura do material, até que se alcance o nível de resistência desejado; e suprir água extra para as reações de hidratação. Temperaturas elevadas produzem incrementos na resistência, mas a secagem em excesso pode também produzir fissuramento ou ruptura ^(18,19).

3.2. CIMENTO PORTLAND

O cimento é um aglomerante hidráulico, alcalina, resultante da mistura de calcário e argila, gesso (para regular o tempo de início de hidratação ou o tempo inicial de “pega”), e calcinada em fornos. As matérias primas utilizadas na fabricação de cimento devem conter cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe), pois são estes os elementos químicos que, combinados, vão produzir compostos hidráulicos ativos ^(7,9,20).

Esses compostos liberam hidróxido de cálcio durante a reação com a água. Os cristais que se formam apresentam formas alongadas, prismáticas, ou formas de agulhas de monossilicatos de cálcio hidratados e de aluminatos hidratados; esses cristais aciculares acabam se entrelaçando à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos. O gel do cimento desenvolve-se espontaneamente sobre a superfície mineral, ligando-se aos oxigênios expostos, crescendo por polimerização dos grupos SiO_4 e incorporando íons de cálcio livre à superestrutura formada pelos grupamentos de SiO_4 ⁽⁹⁾.

O cimento Portland (CP) foi criado por um construtor inglês, Joseph Aspdin, que o patenteou em 1824. Nessa época, era comum na Inglaterra construir com pedra de Portland, uma ilha situada no sul desse país. Como o resultado da invenção de Aspdin se assemelhava na cor e na dureza dessa pedra de Portland, ele registrou esse nome em sua patente. É por isso que o cimento é chamado cimento Portland ⁽²¹⁾.

O cimento portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento portland. As adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento. As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento portland hoje disponíveis no mercado. As principais adições são: escória de alto forno, as cinzas volantes, as sílicas ativas, etc. ^(7,21).

O clínquer de cimento Portland pode ser definido como um material obtido através da sinterização de rochas carbonáticas e argilosas, ou outro material similar que possua composição semelhante e suficiente reatividade. O clínquer contém basicamente uma série de compostos anidros, dos quais os principais são ^(7,22):

- Silicato tricálcico ou alita - (C_3S);
- Silicato dicálcico ou belita - (C_2S);
- Aluminato tricálcico - (C_3A);
- Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita - (C_4AF).

A alita é o de maior influência no desenvolvimento das resistências mecânicas a todas as idades do cimento, principalmente no início, propicia alto despreendimento de calor, libera cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio (CH) e é constituindo de 50 a 70% do clínquer. Esta fase reage rapidamente com a água e em cimentos Portland comuns é a mais importante das fases ^(7,22).

A belita é um dos constituintes principais do clínquer Portland, com contribuição significativa nas resistências mecânicas do cimento a idades mais longas. Esta fase reage lentamente com a água, contribuindo pouco para a resistência nos primeiros 28 dias, baixa liberação de calor e produz cerca de 18% em massa de CH ^(7,22).

O C_3A tem um papel importante na resistência dos cimentos às águas agressivas, sendo o tipo de cristalização o fator preponderante quanto ao seu comportamento. É também o componente que apresenta o maior calor de hidratação, sendo o principal responsável pela “pega” do cimento. Reage rapidamente com a água, conferindo ao cimento, juntamente com o C_3S , a resistência inicial às solicitações mecânicas, propicia pouco desenvolvimento de resistência e forte retração ^(7,22).

O C_4AF possui baixa reatividade hidráulica e tem pequena participação na resistência aos esforços mecânicos do cimento. Sua propriedade principal é imprimir resistência à corrosão química do cimento ⁽²²⁾.

Existem no Brasil vários tipos de cimento portland, o que difere um do outro é a sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado são ^(21,23):

- Cimento Portland Comum – CP I;
- Cimento Portland Comum com Adição - CP I – S;
- Cimento Portland Composto – CP II;
- Cimento Portland Composto com Fíler – CP F;
- Cimento Portland Composto com Escória – CP E;
- Cimento Portland Composto com pozolona – CP Z;
- Cimento Portland de Alto-Forno – CP III;

→ Cimento Portland Pozolânico – CP IV.

Em menor escala são consumidos, seja pela menor oferta, ou seja, pelas características especiais de aplicação os seguintes tipos de cimento ^(21,23):

→ Cimento Portland de alta resistência inicial – CP V-ARI;

→ Cimento Portland de Alta Resistente aos sulfatos - RS;

→ Cimento Portland branco - CPB;

→ Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação - BC;

→ Cimento para poços petrolíferos - CPP.

A Tabela 10 mostra a composição química dos principais Cimentos Portland de acordo com as Normas Brasileira.

Tabela 10 - Composição química dos principais Cimentos Portland ^(24, 25, 26, 27,28).

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição química (% 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	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

No solo-cimento, assim como em concretos e argamassas, a natureza do cimento deve ser considerada para a proposta de desenvolvimento de pesquisas que visam melhorar o desempenho desse material. Sabe-se que diferentes composições do cimento conduzem a comportamentos distintos da mistura de solo-cimento, principalmente nos que se referem à fissuração por retração ⁽⁷⁾:

→ A retração do solo-cimento diminui com o aumento do C_3S na composição do cimento. Os cimentos com elevada saturação de cal contém sempre uma quantidade expressiva de cal livre e esta, quando hidratada, provoca expansões que reduzem a retração do material ⁽⁷⁾;

→ A retração aumenta com teores mais elevados de C_3A , existe uma porcentagem ótima de gesso para um dado clínquer para a qual a retração por secagem aos sete dias de idade é mínima. Esse teor ótimo de gesso é função do conteúdo de C_3A , de álcalis ou da finura do cimento ⁽⁷⁾;

→ A retração aumenta com o aumento da área específica do cimento;

→ O processo de hidratação característico dos diversos tipos de cimentos é responsável pela ocorrência de fissuras causadas, por uma auto-secagem ⁽⁷⁾.

A escolha do cimento deverá levar em consideração os custos, o tempo de pega e os constituintes químicos. O tipo de cimento mais adequado para confecção de tijolos solo-cimento são: 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) ⁽⁵⁾.

3.3. SOLO-CIMENTO

O solo-cimento pode ser definido como um produto endurecido resultante da cura de uma mistura homogênea compactada de solo, cimento, água e eventualmente aditivos, em proporções requeridas que garante boa resistência mecânica e durabilidade ⁽²⁹⁾.

O solo-cimento foi introduzido no Brasil, em 1936, pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP. O emprego em habitações no Brasil foi iniciado em 1948, podendo ser empregado de duas formas: paredes monolíticas, tijolos ou blocos prensados ⁽³⁰⁾.

As paredes monolíticas são compactadas no próprio local, em camadas sucessivas, no sentido vertical, com auxílio de formas e guias. O processo de

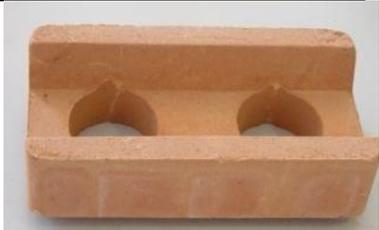
produção assemelha-se ao sistema antigo de taipa, formando painéis inteiriços, sem juntas horizontais. Os tijolos de solo-cimento também chamados tijolos ecológicos são produzidos em prensas hidráulicas ou mecânicas, dispensando a queima em fornos ⁽³⁰⁾. Os tijolos devem atender algumas exigências mínimas aos 28 dias de cura para ser utilizado em construções habitacionais, conforme especificação contida na Tabela 11.

Tabela 11 - Exigências mínimas de resistência a compressão e absorção de água aos 28 dias de cura ⁽³¹⁾.

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

Há diversos modelos de tijolos de solo-cimento prensados a escolha dependerá das necessidades do projeto, como mostra Tabela 12.

Tabela 12 - Tipos de tijolo solo-cimento ⁽³²⁾.

TIPO	DIMENSÕES	USO	MODELO
Tijolo maciço comum	(5 x 10 x 20) cm	Assentamento de alvenaria semelhante ao tijolo convencional.	
Tijolo maciço com encaixe	(5 x 10 x 21) cm	Assentamento com baixo consumo de argamassa.	
½ Tijolo com encaixe	(5 x 10 x 10,5) cm	Elemento para conectar as juntas e amarrações sem necessidade de quebras.	
Tijolo com dois furos e encaixe	(5 x 10 x 20) cm (7 x 12,5 x 25) cm (7,5 x 15 x 30) cm	Assentamento a seco, com cola rança ou argamassa plástica. As tubulações das instalações hidro-sanitárias, elétricas e outras, passam pelos furos.	
½ Tijolo com furo e encaixe	(5 x 10 x 10) cm (7 x 12,5 x 12,5) cm (7,5 x 15 x 15) cm	Elemento para conectar as juntas e amarrações sem necessidade de quebras.	
Caneletas	(5 x 10 x 20) cm (7 x 12,5 x 25) cm (7,5 x 15 x 30) cm	Empregado em execução de vigas, reforços estruturais, cintas de amarração e passagem de tubulações horizontais.	

3.3.1. Solo-cimento em habitações

A carência habitacional no Brasil requer uma busca contínua por métodos alternativos de construção aliado ao desenvolvimento sustentável. Neste contexto, o solo-cimento possibilita uma alternativa viável para atender estes parâmetros com baixo custo ⁽³³⁾.

O tijolo solo-cimento pode ser produzido no próprio canteiro de obras. As habitações são construídas com paredes intertravadas com tijolo ou modular (sistema de encaixe), sem revestimento, apenas rejuntadas e pintadas ou envernizadas ⁽³³⁾, Figura 6. A utilização destes materiais além de ser considerado ecológico, traz economia de energia com um canteiro de obras bem administrado e a casa pode sair até 30% mais barata que uma construída em alvenaria tradicional ⁽³⁴⁾.

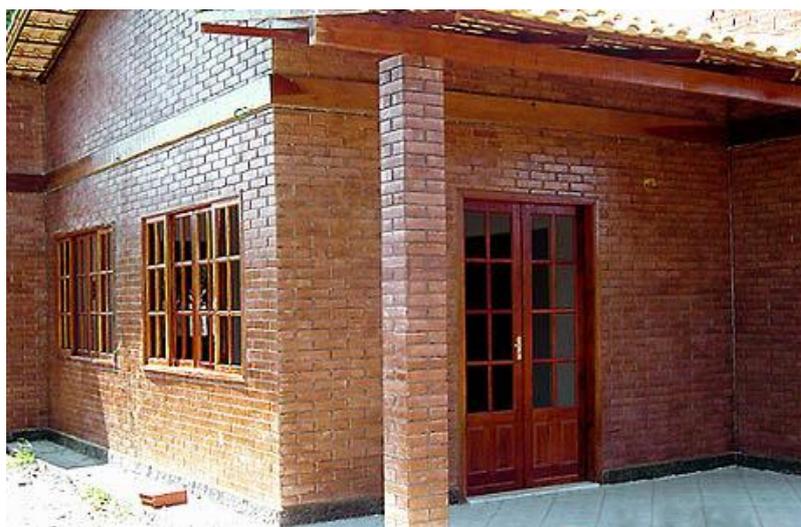


Figura 6 - Casa construída com tijolo modular de solo-cimento ⁽³⁴⁾.

O sistema modular apresenta algumas vantagens em relação aos materiais de construção convencionais ⁽³⁴⁾:

- Rapidez – devido ao sistema de encaixe;
- Praticidade - sistema de encaixe ajuda no assentamento, e dois furos no centro, servem para embutir toda à parte de esgoto, hidráulica, elétrica e estrutural, a construção é erguida com mais facilidade e organização, e praticamente sem desperdícios, pois é uma obra limpa e dinâmica.

→ Durabilidade – apresenta nível de durabilidade equiparada ou superior aos tijolos convencionais;

→ Versatilidade – o solo cimento não é somente para construções de baixa renda, ele se sai muito bem em casas de alto padrão. O tijolo modular adapta-se perfeitamente a todos os tipos de projetos, seja ele, comercial, residencial ou industrial. É uma construção inteligente e versátil.

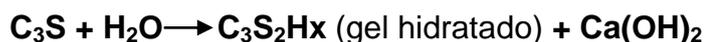
3.3.2. Principais reações químicas entre o solo e cimento

Os mecanismos pelos quais a mistura de solo com cimento se torna um material estável são muito complexos. Por isto foram criadas várias hipóteses para descrição do mecanismo, baseada na natureza dos compostos finais e nas diferentes fases de hidratação do cimento e sobre sua ação na microestrutura do solo ⁽³⁵⁾.

Na estabilização do solo com o cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe resistência inicial, paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas dos argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado ⁽³⁶⁾.

Durante o processo de estabilização do solo com cimento, ocorrem dois tipos de reações: as reações de hidratação do cimento Portland e as reações entre os argilominerais e a cal liberada na hidratação do cimento (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF + H_2O) ⁽³⁷⁾. Estas reações podem ser exemplificadas da seguinte forma:

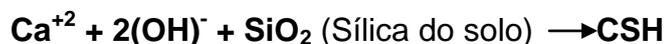
→ **Reações de hidratação do cimento:**



Onde: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; H = H₂O

CSH = Silicato hidratado de cálcio;

→ **Reações entre a cal gerada na hidratação e os argilominerais do solo:**



Onde: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; H = H₂O;

CSH = Silicato hidratado de cálcio;

CAH = Aluminato hidratado de cálcio;

As últimas reações são chamadas pozolânicas e ocorrem em velocidade mais lenta. O CSH é um composto cimentante semelhante ao C₃S₂H_x.⁽³⁷⁾ Estas reações só ocorrem em presença de água, que tem a função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila⁽³⁸⁾. Este mecanismo é mostrado na Figura 7.

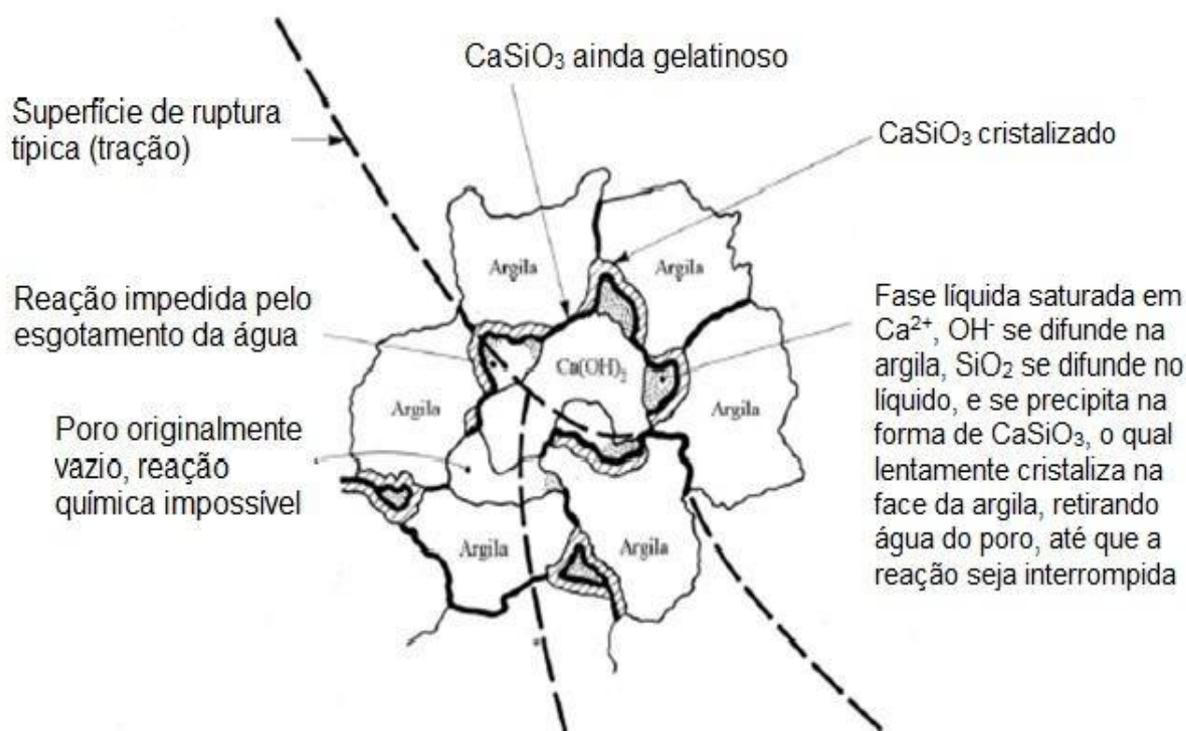


Figura 7 - Mecanismo de estabilização entre a cal liberada durante a hidratação e os argilominerais⁽³⁸⁾.

Em uma mistura de solo-cimento, as partículas de cimento comportam-se como eletricamente carregadas aumentando a condutividade elétrica da massa compactada. A interação elétrica entre as partículas argilosas e as do cimento em hidratação produzem rápidas alterações físico-químicas, resultando em uma substancial variação volumétrica da mistura solo-cimento, quando esta se encontra em suspensão aquosa. Assim, com base nas variações volumétricas ocorridas durante o processo de interação do solo com o cimento, pode-se determinar o teor de cimento que leva a uma mistura estável ⁽³⁵⁾.

Nos solos finos, os mecanismos de estabilização levam ao surgimento de matrizes hexagonais, similares a um favo de mel, geradas pelas ligações químicas entre as partículas de solos e os grãos de cimento. A matriz envolve fortemente as partículas conglomeradas e, ligando-se por sua vez às matrizes contíguas a ela, impede o deslizamento de umas sobre as outras, ou seja, gera ou aumenta a resistência de cisalhamento. A liberação de cal durante o processo tem grande importância na cimentação, principalmente em solos coesivos e muito plásticos ⁽³⁵⁾.

As principais reações que ocorrem na estabilização de um solo na presença de cal podem ser agrupadas em quatro categorias: troca de íons, floculação, carbonatação e reação pozolânica ou cimentação. A pasta de cimento envolve, fisicamente, os grânulos do solo formando agregados que aumentam de tamanho à medida que se processam a hidratação e cristalização do cimento ⁽³⁵⁾.

Grandes quantidades de finos são responsáveis pelo enfraquecimento do efeito aglutinante entre a pasta de cimento e a fração arenosa do solo. Embora o cimento reaja até mesmo com solos finos e tenda a estabilizá-los, a resistência da estrutura colóide/cimento é significativamente mais fraca que a estrutura granular/cimento. O solo argiloso proporciona melhores resultados em termos de resistência anisotrópica obtida pela combinação de ensaios destrutivos e não-destrutivos. Os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, sendo necessária à presença de argila na sua composição, visando dar à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas ⁽³⁵⁾.

Os solos granulares estabilizam-se pela cimentação nos pontos de contato entre os agregados que os compõem (areia pedregulho ou pedras). A estrutura cimentada do solo-cimento forma-se por um processo similar ao do concreto, nesta estrutura, a pasta não ocupa todos os vazios pela pequena

quantidade de cimento e água empregada, dando a ela uma menor resistência quando comparada ao concreto, por ter um maior número de vazios e menor densidade ⁽³⁵⁾.

Os solos finos necessitam de mais cimento para a sua estabilização se comparados aos solos grossos, pelo fato de apresentarem maior superfície específica ⁽³⁵⁾.

3.3.3. Vantagens e desvantagens do tijolo solo-cimento

O tijolo solo-cimento possui inúmeras vantagens como:

- A fabricação de tijolo de solo-cimento minimiza a agressão ao ambiente, pois, além de utilizar solo natural e uma quantidade menor de cimento, não necessita de queima, uma vez que os tijolos são apenas prensados e curados, é um produto enquadrado nas condições de desenvolvimento sustentável ⁽³⁹⁾;
- A disponibilidade de solo propiciando o uso intensivo de recursos materiais locais. O solo a ser utilizado geralmente está disponível no local da obra ou próximo a ela, dispensando transporte e a utilização de equipamentos sofisticados, o que torna o custo da escavação baixo. Caso o solo não se enquadre no projeto, são permitidas correções na sua granulometria ⁽³⁹⁾;
- Tecnologia simples, de fácil assimilação do processo construtivo, não necessitando por isso, de mão de obra especializada. Podem ser adotados sistemas familiares e comunitários. Essa favorece ainda a formação de cooperativas, possibilitando assim uma independência cultural, econômica e energética ⁽³⁹⁾;
- Apresenta boas condições de conforto térmico e acústico, comparáveis às das construções em alvenaria de tijolos cerâmicos. As construções com solo-cimento são muito confortáveis, pois a “terra crua” é má condutora de calor. Além disso, o tijolo modular intensifica essas características devido às aberturas que serve tanto para o encaixe uma com as outras, como a transmissão o sistema hidráulico e elétrico. Construções em solo-cimento são também resistentes ao fogo ⁽³⁹⁾;
- As paredes não oferecem a menor condição para instalação e proliferação de insetos nocivos à saúde levando assim a uma maior higiene do local ⁽³⁹⁾;

→ Grande durabilidade e manutenção reduzida, pois, por apresentar elevada resistência e boa impermeabilidade, as construções com ele executadas são muito duráveis, resistindo ao longo dos anos ao desgaste e à umidade ⁽³⁹⁾;

→ Nas edificações de solo-cimento dispensa-se o uso de revestimentos tais como chapisco, emboço ou reboco. Isto é devido ao acabamento liso das paredes monolíticas ou à perfeição das faces das peças prensadas. Uma pintura simples é necessária apenas para aumentar a impermeabilidade das paredes e melhorar o aspecto visual e as condições de conforto e higiene ⁽³⁹⁾.

A principal desvantagem está na grande variedade de solos existentes o que implica na execução de ensaios para a caracterização dos solos utilizados. Tais ensaios podem ser executados em qualquer laboratório por se tratarem de ensaios simples e rotineiros. Os ensaios necessários à avaliação da mistura solo-cimento são: granulometria, compactação e compressão simples ⁽³⁹⁾.

3.3.4. Dosagem do solo-cimento

Para o solo-cimento destinado à moldagem de tijolos, blocos ou paredes monolíticas para a construção de alvenaria, a dosagem está condicionada a obedecer a especificações de valores mínimos de resistência à compressão e absorção de água, prescritos por norma. O resultado de um estudo de dosagem seria a fixação de três quesitos básicos: o teor de cimento a ser adicionado no solo, a umidade a ser incorporada na mistura e a massa específica desejada. Os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, porém é necessária a presença de argila na sua composição, visando dar à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas ^(40,7).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT possui uma normativa que regulamenta a dosagem de solo-cimento a NBR 12253/1992 - Solo-Cimento - Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento ⁽⁴¹⁾.

Em termos de dosagem a ABCP recomenda-se moldar tijolos com proporções, em volume, de cimento e solo de 10/1, 12/1 e 14/1. A escolha do traço adequado deve ser a que apresentar menor consumo de cimento e atender aos

critérios de resistência à compressão e absorção de água estabelecida na NBR 10834/1994 ⁽³¹⁾.

Os procedimentos de dosagem se constituem em ensaios preliminares do solo (massa específica, limites de consistência e granulometria) para classificação do solo (*Highway Research Board* - HBR) e escolha do teor de cimento, baseado na Tabela 13, para ensaio de compactação, moldagem e cura de três corpos de prova cilíndricos nas condições estipuladas pela NBR 12024/1992. ^(41,42).

Tabela 13 - Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação do solo-cimento NBR 12253/1992 ⁽⁴¹⁾.

Classificação do solo HBR*	Teor de cimento sugerido, em massa (%)
A 1 – a	5
A 2 – b	6
A 2	7
A 3	9
A 4	10
A5	10
A6	12
A7	13

* *Highway Research Board* - HBR.

Decorrido o período de cura, os corpos de prova devem ser levados para ensaio de resistência à compressão simples. O resultado da dosagem deverá ser aquele que apresentar os resultados de resistência mínimos de 2,1 MPa, aos 28 dias de idade com menor teor de cimento (NBR 10834/1994) ⁽⁴¹⁾.

O proporcionamento dos materiais presentes em uma mistura é denominado de traço. O método mais recomendado é o traço em massa, no entanto, é algo impraticável em obra. Portanto, o método praticado, na maioria das vezes é o traço em volume ⁽⁴³⁾.

A proporção entre o solo corrigido utilizado e o cimento, é o traço da mistura solo-cimento. Ele é dado em partes de solo para partes de cimento (solo/cimento). Para a determinação de um traço observam-se dois parâmetros fundamentais: resistência mecânica conferida, e viabilidade econômica ⁽⁴³⁾.

3.4. FIBRAS NATURAIS

As fibras vegetais são divididas em quatro grupos as provenientes da folha, talo, lenho e fibras superficiais. As fibras foliares aparecem em forma de agulhas ligadas uma as outras por lignina, são bastante rijas e grosseiras. As fibras oriundas do talo ocorrem no floema sob a forma de agulhas, as do lenho são pequenas e rígidas e as superficiais formam uma camada de proteção em caules, folhas, frutos e sementes das plantas ⁽⁴⁴⁾.

As fibras vegetais são feixes constituídos por um grande número de células individuais compostas de microfibrilas ricas em celulose, um polímero vegetal. As diversas células que compõem a fibra encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular composta de substâncias amorfas como hemicelulose, pectina e principalmente lignina. Destas substâncias, a lignina é facilmente decomposta em meios alcalino e aquoso, onde sofre um processo de lixiviação. A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade denominada lacuna, responsável pela sua elevada capacidade de absorver água ⁽³⁰⁾.

A função principal das fibras é possibilitar reforço mecânico da matriz na qual estão inseridas, de modo que absorva energia. Normalmente, o seu volume em relação ao volume da matriz é bem menor, mesmo para fibras com resistência mecânica inferior ao da matriz ^(30,45). A adição de fibras aos solos reflete no aumento da capacidade de carga e da resistência à compressão simples e a melhoria das características mecânicas de alguns solos ⁽⁴⁶⁾. Isso pode ser explicado pela proximidade das interfaces fissuradas, aumentando a ductilidade, uma vez que, ao serem contornadas pelas fissuras, contribuem para o aumento da resistência, da deformação na ruptura e da tenacidade ⁽⁴⁵⁾.

Os principais parâmetros a serem observados para o bom desempenho do solo-cimento é o teor de fibras (é favorável até certo limite), módulo de elasticidade das fibras, aderência entre as fibras e matriz, resistência das fibras e comprimento das fibras ⁽⁴⁵⁾.

Para obtenção de um compósito com características físico-mecânicas desejáveis, é necessário que o processo de fabricação garanta certo grau de adensamento, adequada porosidade e um bom envolvimento das fibras pela matriz, o que se consegue via compactação manual, prensagem ou vibração. Outra exigência importante são as dimensões (comprimento, diâmetro) e volume das fibras

a serem adicionadas aos compósitos, pois valores excessivos comprometem a interação entre a fibra e a matriz, aumentando a porosidade e o volume de água de amassamento ⁽⁴⁷⁾.

Tanto a biomassa vegetal como o cimento tem características e propriedades que influenciam o comportamento do compósito criando incompatibilidades, que devem ser consideradas e estudadas. A presença de substâncias químicas pode retardar ou mesmo inibir a pega do cimento ⁽⁴⁸⁾.

No meio alcalino os produtos de hidratação do cimento, costuma causar degradação de alguns dos constituintes das fibras vegetais. A celulose é relativamente imune ao ataque por álcalis ou ácidos diluídos. Além disso, substâncias agressivas costumam penetrar no lúmen, a exemplo dos compostos hidratados de cimento. Esses compostos podem sofrer cristalização nessa cavidade central, e demais vazios das fibras, causando enrijecimento desse reforço e sua conseqüente fragilização ⁽⁴⁹⁾.

Tratamentos físicos o químicos são necessários para evitar a incompatibilidade química com o cimento. Os tratamentos podem ser: lavagem, torrefação, pulverização, química e impregnação. Os objetivos dos métodos são: proteger as fibras vegetais contra a agressividade do meio alcalino promovido pelo cimento; imobilizar a matéria orgânica constituinte reduzindo sua capacidade de absorção de água; reduzir ao mínimo a sua interferência nas reações de pega e endurecimento do cimento e melhorar a qualidade do compósito produzindo em relação à durabilidade, resistência ao fogo e resistência ao ataque de microrganismos ⁽⁴⁸⁾. A Tabela 14 mostra as propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras.

Tabela 14 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais ⁽⁴⁸⁾.

FIBRAS	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	TENSÃO DE TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO ATÉ RUPTURA (%)
Coco	2,8	180	29,2
Bambu	28,8	575	3,2
Sisal	15,2	458	4,3
Vidro	55,6	1328	3,77
Aço	200	1000-3000	3-4

3.4.1. Fibra de coco babaçu

A palmeira de babaçu (*Orbignya phalerata*), nativa do norte, nordeste e centro-oeste do Brasil, tem aproximadamente 15 metros de altura e costuma produzir mais de 500 frutos a cada florada. Da palmeira de babaçu podem ser extraídos cerca de 68 sub-produtos. A palmeira de babaçu possui três estágios de crescimento. O primeiro é constituído pelas pindovas, é quando a palmeira apresenta até três folhas definitivas. O segundo, denominado palmiteiro, pode ser identificado pelo palmito, quase ao nível do solo. No terceiro, o caule já se encontra formado, correspondendo à fase anterior à fase adulta ⁽⁵⁰⁾.

O babaçu é constituído de quatro partes principais: o epicarpo, o mesocarpo, o endocarpo e o fruto (amêndoa), a Figura 8 mostra as partes do coco babaçu ⁽⁵⁰⁾.

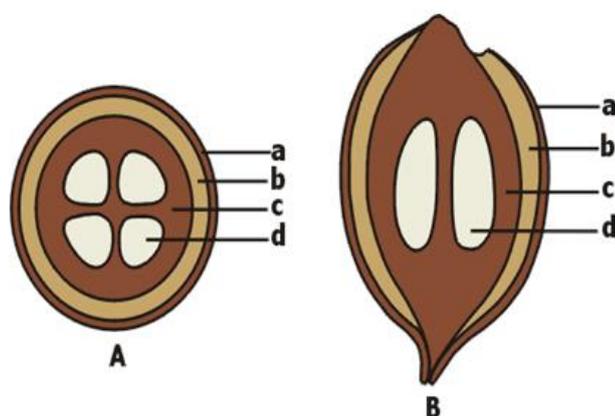


Figura 8 - Cortes: transversal (A) e longitudinal (B). Componentes: epicarpo (a), mesocarpo (b), endocarpo (c) e amêndoa (c) ⁽⁵¹⁾.

A distribuição média de cada componente em relação ao peso é mostrada na Tabela 15. Observa-se que o endocarpo, que apresenta uma constituição lenhosa com fibras longitudinais, corresponde a mais da metade do peso do coco ⁽⁵¹⁾.

Tabela 15 - Composição média do coco de babaçu ⁽⁵¹⁾.

Componente	Participação em peso (%)
Epicarpo	12
Mesocarpo	24
Endocarpo	57
Amêndoas	7

O Movimento das Mulheres Quebradeiras de Coco Babaçu - MIQCB grupo que se concentra nos estados do Piauí, Tocantins, Pará e Maranhão, é o principal agente étnico-social responsável pela exploração do coco babaçu em escala comercial ⁽⁵⁰⁾ e artesanal. No Pará, no coco babaçu é extraído o óleo da amêndoa e o endocarpo, mesocarpo e epicarpo são destinados para produção de carvão vegetal.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução deste trabalho foram realizadas as seguintes etapas demonstradas na Figura 9:

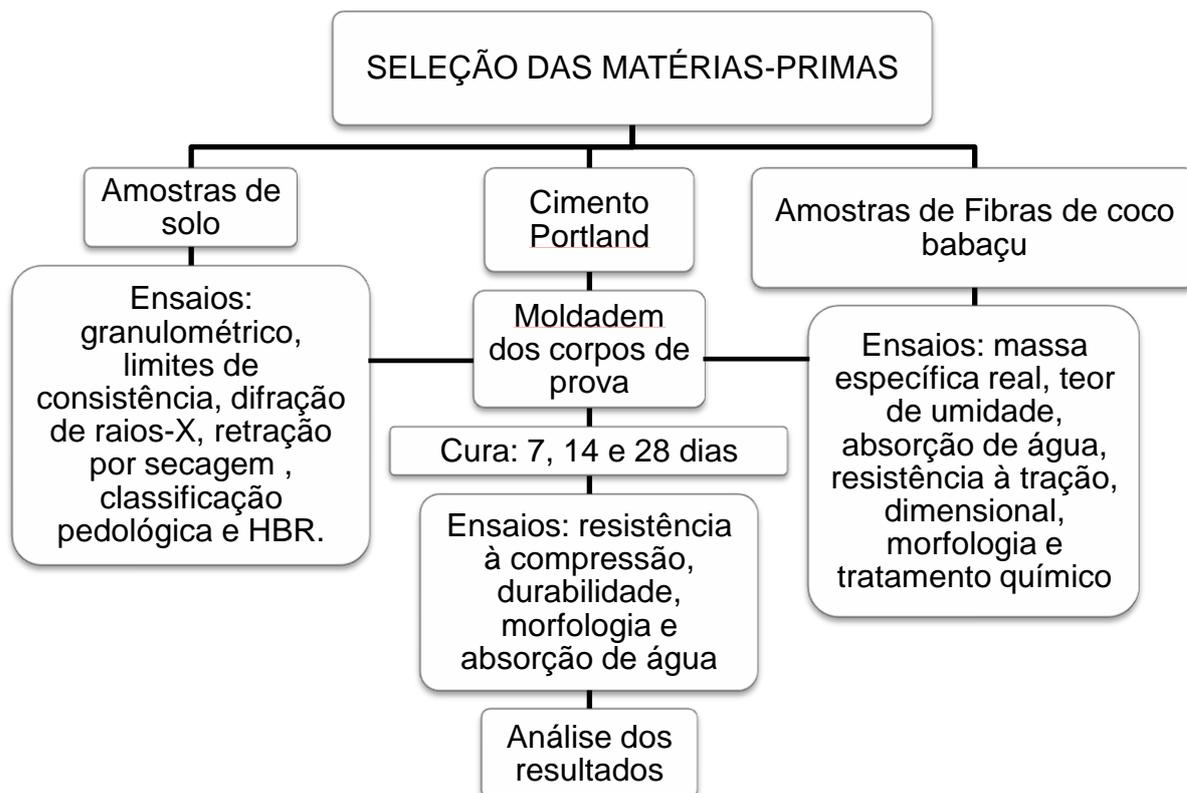


Figura 9 - Fluxograma para confecção dos corpos de prova solo-cimento-fibra.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Solo

Foram coletadas sete amostras de solos de áreas distintas, além de outra amostra já estudada no laboratório (AS1- Barro Bom). A Figura 10 indica as regiões onde foram extraídas as amostras de solo expressas por coordenadas geográficas em UTM - *Universal Transverse Mercator*, obtida pelo aparelho de GPS - *Global Positioning System*, Garmin Vista H Etrex. Cada amostra de solo recebeu uma identificação como Amostra de Solo – AS (AS1, AS2, AS3, AS4, AS5, AS6, AS7 e AS8). As amostras foram submetidas a vários ensaios preliminares (análise granulométrica, retração de secagem, limite de consistência e difração de raios-X) e

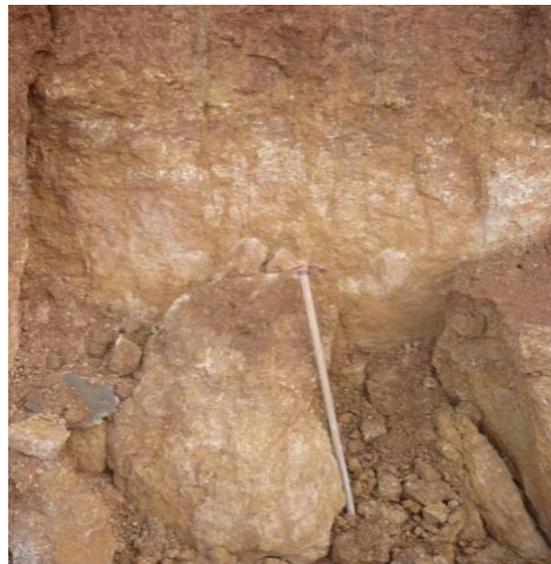
classificado segundo a ABNT 12253/1992 ⁽⁴¹⁾ para determinação do teor de cimento. Conhecidas as propriedades dos solos escolheu-se aquele que melhor se adequaria ao propósito de estudo de acordo com normas existentes.



Coordenada Geográfica: UTM 0704569;
9403693

Região: Marabá/PA

Designação: AS1



Coordenada Geográfica: UTM
0704337; 9405961

Região: Marabá/PA

Designação: AS2



Coordenada Geográfica: UTM 0764111;
9348609

Região: Brejo Grande do Araguaia/PA

Designação: AS3



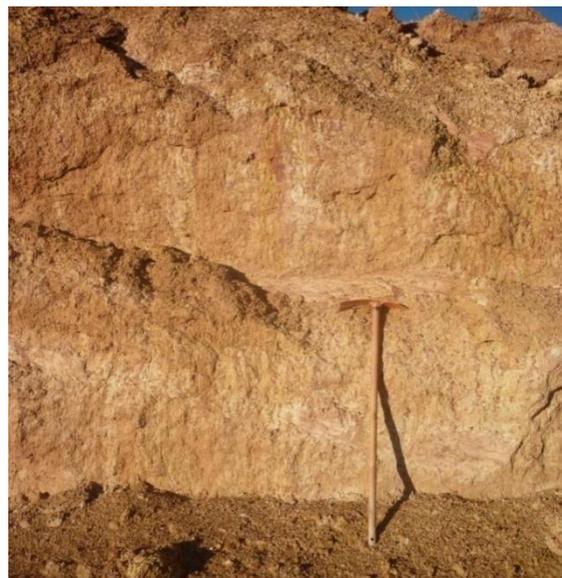
Coordenada Geográfica: UTM
711146,785; 9486947,231

Região: Jacundá/PA

Designação: AS4



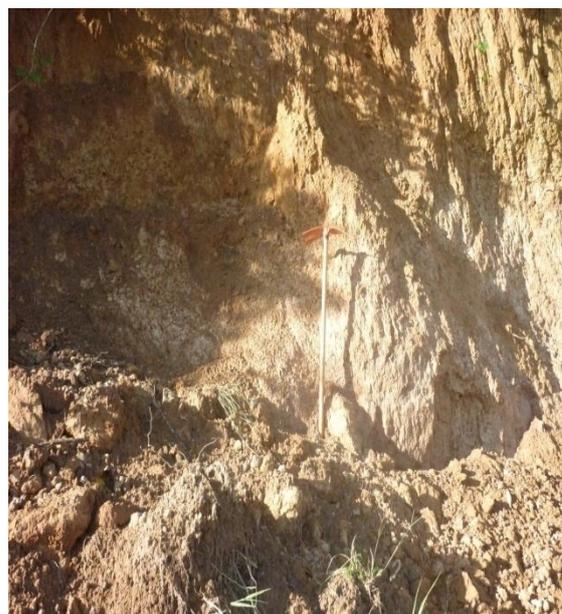
Coordenada Geográfica: UTM
713728,315; 9476651,504
Região: Jacundá/PA
Designação: AS5



Coordenada Geográfica: UTM
713356,771; 9449683,633
Região: Ipixuna/PA
Designação: AS6



Coordenada Geográfica: UTM 0713768;
9405242
Região: Marabá/PA
Designação: AS7



Coordenada Geográfica: UTM
715904,799;9462808,365
Região: Ipixuna/PA
Designação: AS8

Figura 10 - Amostras de solo coletadas em diversas regiões.

A Figura 11 mostra a região exata onde foram coletadas as amostras de solo, obtidas através da coordenadas geográficas em UTM. Foram determinadas as

categorias de solos segundo os mapas pedológicos do Estado do Pará, obtido pela base de dados do IBGE.

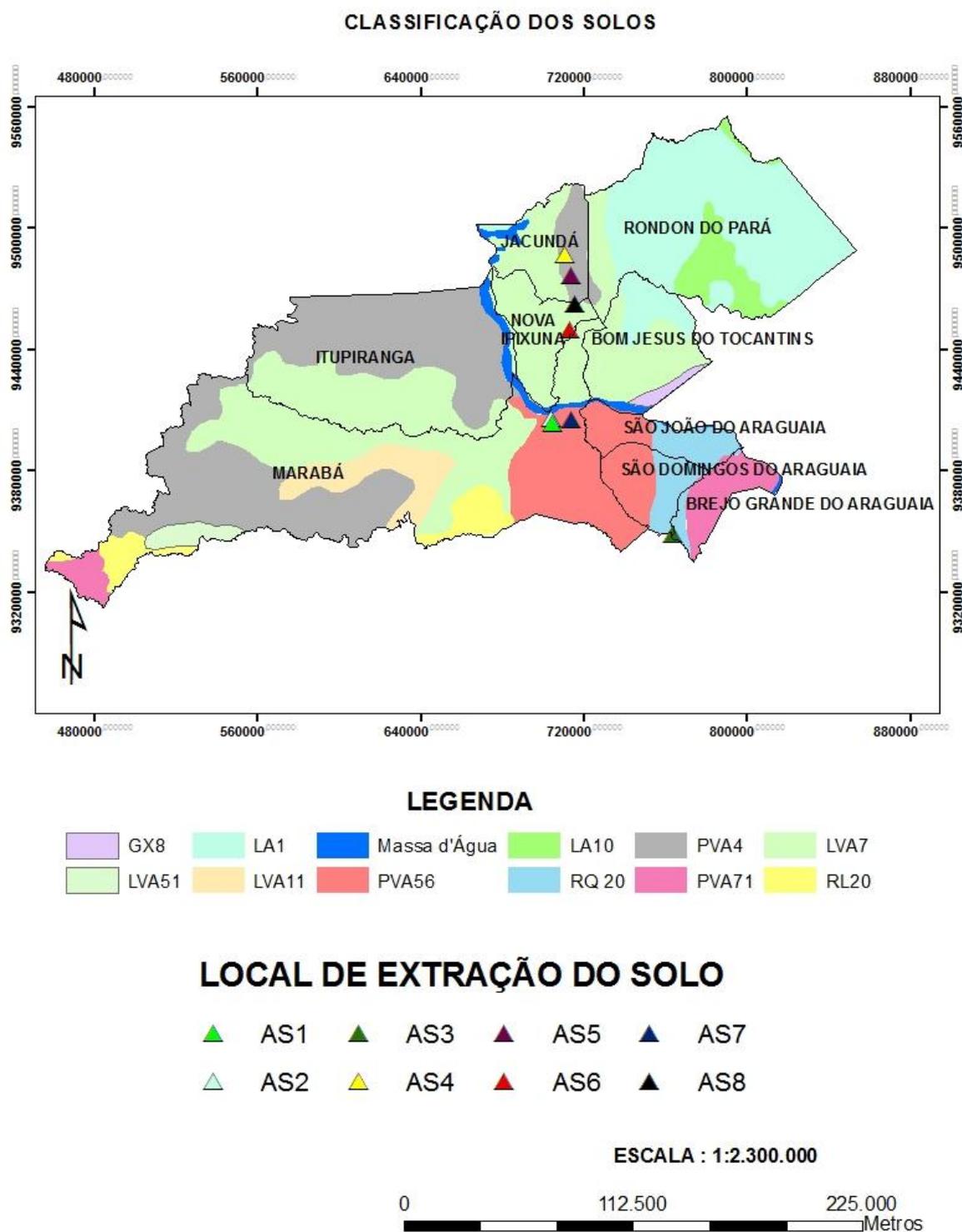


Figura 11 - Mapa de localização dos pontos de extração dos solos.

4.1.2. Cimento Portland

O cimento adotado foi o CP II F-32 por apresentar características favoráveis para o bom desempenho do tijolo solo-cimento e pela disponibilidade na região. Este cimento possui as seguintes características: é composto de silicatos de cálcio, alumínio, ferro, sulfato de cálcio e filler carbonático, dados obtidos pela especificação contida da embalagem, e deve atender algumas exigências físicas, químicas e mecânicas conforme disposto na Tabela 16.

Tabela 16 - Exigências físicas, químicas e mecânicas do CP II F-32* NBR 11578/1991 ⁽²⁶⁾.

Determinações físicas e mecânicas	3 dias	7 dias	28 dias
Resistência a Compressão (MPa normatizada)	≥10	≥20	≥32
Tempo de início de pega (horas)		≥1	
Tempo de fim de pega (horas)		≤50	
Determinações químicas		Limites (% da massa)	
Resíduo insolúvel (RI)		≤2,5	
Perda ao fogo (PF)		≤6,5	
Óxido de magnésio (MgO)		≤6,5	
Trióxido de enxofre (SO ₃)		≤4,0	
Anidrido carbônico (CO ₂)		≤5,0	

*Classe de resistência.

4.1.3. Fibras de coco babaçu

As fibras de coco de babaçu foram adquiridas pelas quebradeiras de coco babaçu integrante do Movimento Interestadual das Quebradeiras de Coco Babaçu - MIQCB em São Domingos do Araguaia/PA.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Caracterização do solo

4.2.1.1. Ensaio de granulometria por peneiramento

A análise granulométrica consiste na determinação do tamanho de partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência. Os ensaios para a determinação da curva granulométrica foram realizados segundo as prescrições da ABNT NBR 7181/1984 ⁽⁵²⁾. As peneiras utilizadas foram ABNT Nº 16, 30, 70, 100, 140 e 200, marca BETEL, correspondendo às seguintes aberturas em milímetros (mm) 1,18; 0,6; 0,212; 1,15; 0,106 e 0,075, respectivamente para cada peneira. O peneiramento foi realizado por um agitador de peneiras marca BETEL conforme mostrado na Figura 12. A partir das massas retidas em cada peneira, determinou-se as porcentagens de solo referentes aos determinados diâmetros das partículas de solo e classificado pela *Highway Research Board* - HBR referente aos limites de consistência e granulometria.



Figura 12 - Ensaio granulométrico das amostras de solo.

4.2.1.2. Difração de raios-X

As análises por difração de raios-X foram realizadas em equipamento da marca PANalytical, modelo X'Pert PRO MPD (PW 3040/60) com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e ânodo de Cu ($K_{\alpha 1}$ 1,540598 Å).

A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore Plus versão 2.0a, também da PANalytical. Foram utilizadas as seguintes condições de análise: passo de 0,02°/s e tempo de contagem de 20 s.

4.2.1.3. Limites de consistência

Os limites de consistência são as variáveis que melhor expressam as condições de menor ou maior capacidade dos solos serem moldados, sob condições de certas de umidade, sem variação de volume.

Para determinação dos limites de consistência ou limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade dos solos) foram utilizadas as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 ^(53,54). Para determinação da plasticidade foi utilizado uma placa de vidro (Marca Solotest), gabarito metálico de 3 mm de diâmetro e cápsulas de alumínio para determinação da umidade; as amostras de solo foram moldados manualmente até o início do fissuramento nas dimensões do gabarito por 5 vezes, pesadas e levadas para estufa a 110 °C por 12 horas e obtido o peso seco. O limite de plasticidade foi calculado pela média dos valores de umidade das amostras, utilizando a Equação 1.

$$H_{LP} = \frac{P_H - P_S}{P_H} * 100 \quad (1)$$

Onde:

H_{LP} = Teor de umidade do solo, em %;

P_H = Peso bruto úmido, em g;

P_S = Peso seco, em g.

O limite de liquidez indica o valor de umidade para o qual o solo passa de um comportamento plástico para líquido, devendo ser, portanto, um valor superior ao limite de plasticidade. O ensaio foi executado através do (aparelho de Casagrande, com cinzéis, marca Solotest, modelo 1.040.220) ilustrado na Figura 13. O material úmido foi colocado na concha do aparelho e aberto uma canelura de uma

extremidade a outra no centro da concha; o ensaio foi finalizado quando as bordas inferiores da canelura se uniram numa extensão de 1 cm a aproximadamente 10 golpes, podendo variar ± 2 golpes, dessa região foi transferido aproximadamente 6 g do material para a capsula de alumínio, e em seguida foi pesado e levado para estufa a 110°C por 6 horas.

O ensaio foi repetido mais 4 vezes para obter a união da canelura em 20, 30, 40 e 50 golpes.



Figura 13 - Aparelho de Casagrande.

O limite de liquidez foi obtido pelo teor de umidade correspondente a intersecção relativa a 25 golpes, pelo gráfico de dispersão, onde no eixo das ordenadas em escala logarítmica são os números de golpes e as abscissas em escala aritmética são os teores de umidade, este foi obtido pela Equação 2.

$$H_{LL} = \frac{P_H - P_S}{P_H} * 100 \quad (2)$$

Onde:

H_{LL} = Teor de umidade do solo, em %;

P_H = Peso bruto úmido, em g;

P_S = Peso seco, em g.

O índice de plasticidade foi obtido pela a Equação 3:

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Onde:

IP = Índice de plasticidade, em %;

LL = Limite de liquidez, em %;

LP = Limite de plasticidade, em %;

4.2.1.4. Ensaio de retração de secagem

O ensaio de retração é destinado para determinar a presença de argilas expansivas no solo, pois podem comprometer o desempenho do material em razão da retração na secagem. As argilas expansivas absorvem muita água e após secagem ocasionam o aparecimento de fissuras e até trincas.

Neste ensaio, aproximadamente 4 Kg de amostra de solo foi passada na peneira 4,8 mm e umedecida até que se obtivesse um material de consistência plástica, sendo então colocada dentro de uma caixa (60 cm de comprimento, 8 cm de largura e 3,5 cm de espessura). Após a realização do adensamento manual o material ficou em repouso à sombra durante 7 dias conforme Figura 14; após este período realizou-se a medida da retração no sentido do comprimento da caixa, sendo que a soma das leituras deve ser inferior a 2 cm e a amostra não deve, após os 7 dias, apresentar nenhuma fenda transversal na parte central da amostra ^(43,55).



Figura 14 - Ensaio de retração do solo (ordem AS1 até AS8).

4.2.2. Caracterização das fibras de coco babaçu

As fibras de coco babaçu foram retiradas da região do epicarpo e mesocarpo e submetida ao ensaio de tração na máquina de ensaio universal (marca Emic, modelo - DL10000). Em seguida foram diminuídas na faixa de 15 a 20 mm no

comprimento e tratadas com solução NaOH 0,1N por 2 horas, lavadas e secadas na estufa a 110°C por uma hora, Figura 15. Posteriormente, foi determinada a massa específica real, teor de umidade e absorção de água para as fibras não tratada quimicamente – NTQ e fibras tratada quimicamente – TQ.



Figura 15 - Tratamento químico nas fibras de coco babaçu.

As fibras foram adicionadas na mistura após a homogeneização do solo com o cimento antes da adição de água potável.

4.2.2.1. Determinação da massa específica real

A massa específica real das fibras foi determinada pelo método do picnômetro. Foram utilizados dois picnômetros. Em um picnômetro foi colocados 1 g de fibra não tratada quimicamente e no outro 1 g de fibra de tratada, de 10 mm de comprimento, e o frasco foi preenchido com água até cobrir as fibras, Figura 16.



Figura 16 - Ensaio de massa específica real das fibras tratadas e não tratada.

As fibras ficaram imersas por 24 horas, permitindo a saída de ar contido nos vazios. Após esse período, o picnômetro foi completamente preenchido com água e determinado sua massa ⁽⁴⁹⁾. A medida da massa específica real foi obtida através da Equação 4.

$$\rho = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (4)$$

Onde:

ρ = massa específica real em g/cm³;

P_1 = massa do picnômetro vazio (g);

P_2 = massa do picnômetro com fibra (g);

P_3 = massa do picnômetro contendo água e fibras (g);

P_4 = massa do picnômetro preenchido com água (g).

4.2.2.2. Determinação do teor de umidade

Foi determinado o teor de umidade que a fibra de coco babaçu apresenta quando exposta ao ar, no ambiente de laboratório, tanto das fibras tratadas e não tratadas quimicamente. As fibras foram cortadas em um comprimento de 15 mm e depois secas em estufa a 60 °C até constância de massa, obtendo a massa seca (P_e). Depois foram retiradas da estufa e deixadas expostas ao ar por 24 horas, obtendo-se a massa seca ao ar (P_a) ⁽⁴⁹⁾. O teor de umidades das fibras foi calculado pela Equação 5.

$$H = \frac{(P_a - P_e)}{P_e} * 100 \quad (5)$$

Onde:

H = Teor de umidade da fibra de coco babaçu (%);

P_a = Massa seca da fibra de coco babaçu na estufa (g);

P_e = Massa seca ao ar da fibra de coco babaçu (g).

4.2.2.3. Determinação da absorção de água

Na determinação da absorção da água, as fibras (tratadas e não tratadas quimicamente) de 15 mm de comprimento foram colocadas na estufa a 60°C até a constância de massa, em seguida foram imersas em água e tiveram suas massas determinadas. Procedeu-se então às determinações de massa em intervalos de 5 minutos, 30 minutos, 1 hora e 2 horas. A partir daí, foram feitas as determinações em intervalos de 24 horas até atingir a saturação ⁽⁴⁹⁾. Para calcular a absorção foi utilizada a Equação 6.

$$A_F = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} * 100 \quad (6)$$

Onde:

A_F = Absorção de água das fibras (%);

M_u = Massa úmida da fibra (g);

M_s = Massa seca da fibra (g).

4.2.2.4. Determinação da resistência à tração das fibras

O ensaio de resistência à tração das fibras foi realizado na Máquina Universal de ensaios mecânicos. O ensaio foi repetido mais 2 vezes para obter uma média dos valores das fibras não tratada quimicamente.

4.2.2.5. Análise morfológica das fibras de coco babaçu

A análise morfológica foi realizada nas fibras tratadas e não tratada quimicamente pelo Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, modelo TM 3000 Tabletop Microscope, marca HITACHI e software de captura da imagem Hitachi TM3000. O funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KV ⁽⁶¹⁾. Foi analisada a seção transversal e longitudinal das mesmas.

4.2.3. Confecção dos corpos de prova e propriedades tecnológicas

4.2.3.1. Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu a norma da ABNT NBR 12024/1992 ⁽⁴²⁾ adotando o método “A”, usando 100% do material que passa na peneira nº 4 (4,8mm), utilizando os traços 7/1 e 10/1. A mistura é composta por percentuais, de solo, cimento Portland, 10% de água e fibras de coco babaçu tratada quimicamente, os teores utilizados em percentual estão descritos na Tabela 17:

Tabela 17 - Proporção das matérias-primas utilizadas em peso.

TRAÇO SOLO- CIMENTO	TEOR DE SOLO (%)	TEOR CIMENTO (%)	TEOR DE FIBRAS (%)		
7/1*	87,50	12,50	0	0,30	0,60
10/1	90,91	9,09	0	0,30	0,60

*Tantas partes de solo para uma de cimento.

Foram confeccionados 108 corpos de prova conforme Tabela 18. Destes, 27 foram destinadas para o ensaio de resistência a compressão e 27 para o ensaio de absorção de água para cada traço. Os ensaios foram realizados nos corpos de prova de acordo com o tempo de cura de 7, 14 e 28 dias.

O ensaio de durabilidade por molhagem e secagem foi realizado nos corpos de prova para a idade de 7 dias de cura de acordo com o traço/composição.

Tabela 18 - Quantificação dos corpos de prova de acordo com os teores de matéria-prima.

TRAÇO	TEOR DE FIBRA			TOTAL
	0% DE FIBRA	0,30% DE FIBRA	0,60% DE FIBRA	
7/1	18	18	18	54
10/1	18	18	18	54
TOTAL				108

Os corpos de prova foram moldados em molde cilíndrico com diâmetro 52,86 mm e altura 94,74 mm e prensados (prensa hidráulica TIL MARCON – 15 ton) com uma tensão de 2,21 MPa.

A Figura 17 descreve detalhadamente a moldagem dos corpos de prova de solo-cimento-fibra.



Solo peneirado 4,8 mm



Cimento



Mistura solo-cimento



Mistura solo-cimento-fibra



Mistura úmida



Moldagem por pressão

Figura 17 - Dosagem da mistura solo-cimento-fibra.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram levados para caixa de isopor para tornar o ambiente propício para a cura completa, sem perda de umidade, e após as 6 horas de cura as amostras foram molhadas 3 vezes ao dia durante 7 dias (Figura 18). Posteriormente, eles foram destinados para os ensaios de acordo com as idades estudadas.

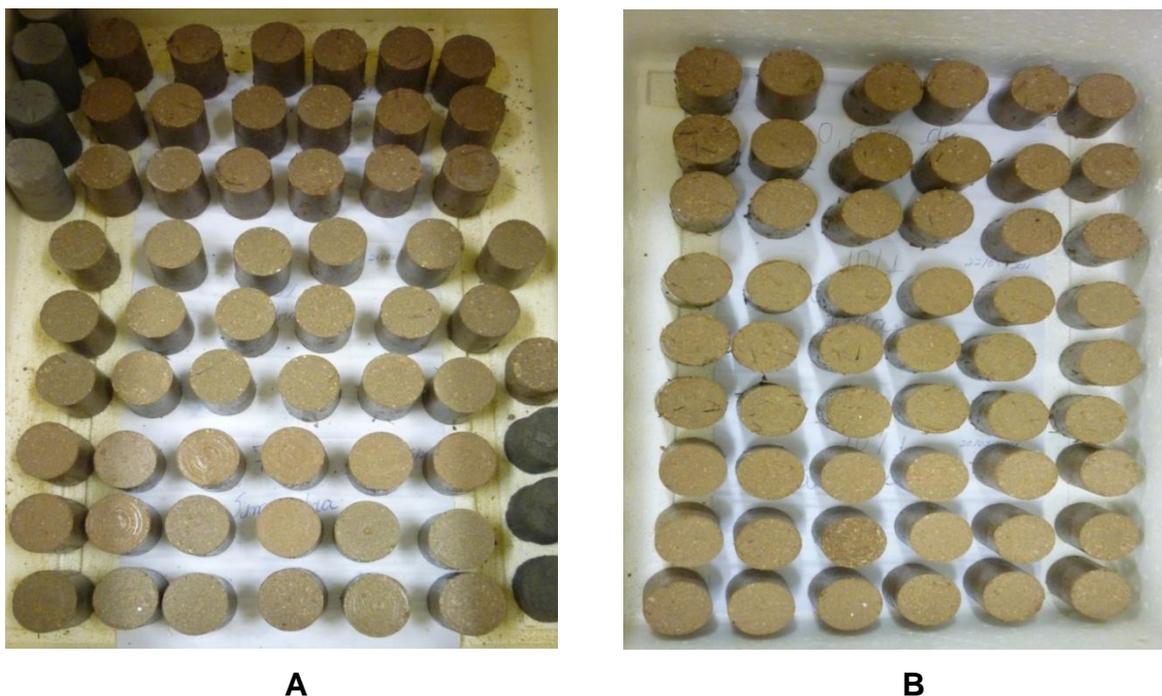


Figura 18 - Corpos de prova após moldagem sob condições de cura: A – composição 7/1 (0%, 0,30% e 0,60% de fibra) e B - composição 10/1 (0%, 0,30% e 0,60% de fibra).

4.2.3.2. Resistência à compressão simples

O ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos foi precedido segundo norma ABNT NBR 12025/1990 ⁽⁵⁶⁾, na qual após as idades de cura os corpos de prova foram submetidos à 4 horas de imersão em água, retiradas da água e obtidas as dimensões dos corpos de prova e realizado o ensaio de compressão na Máquina Universal de ensaios mecânicos, conforme Figura 19.



Figura 19 - Ensaio de Resistência à compressão.

O carregamento foi iniciado continuamente e sem choques durante todo o decorrer do ensaio. A movimentação da cabeça de carga foi de aproximadamente 1mm/min. A tensão de ruptura à compressão foi obtida através da Equação 7.

$$\sigma = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (7)$$

Onde:

σ = Tensão de ruptura (MPa);

F= Carga de ruptura (N);

D= Diâmetro do corpo de prova (mm²).

4.2.3.3. Absorção de água dos corpos de prova

O ensaio de absorção foi realizado de acordo com a NBR 13555/1996 ⁽⁵⁷⁾. Os corpos de prova após um período de cura de 7 dias em ambiente úmido, foram levados à estufa até atingir massa constante e obtendo-se m_{SC1} , em gramas. Em seguida foram imersos em um recipiente durante 24 horas (Figura 20).



Figura 20 - Corpos de prova imersos em água.

Após foram retirados e enxutos superficialmente e registrado a massa m_{SC2} , em gramas. O resultado de absorção de água foi determinado pela Equação 8.

$$A_{SC} = \frac{(m_{SC1} - m_{SC2})}{m_{SC1}} * 100 \quad (8)$$

Onde:

A_{sc} = Absorção de água (%);

m_{sc1} = Massa constante após os dias de cura (g);

m_{sc2} = Massa após a imersão (g).

4.2.3.4. Durabilidade por molhagem e secagem

Esse ensaio determina a perda de massa, variação de umidade e variação do volume por ciclos de molhagem e secagem de corpos-de-prova de solo-cimento através da norma NBR 13554/1996 ⁽⁵⁸⁾.

Foram destinados três corpos de prova para cada composição (traço/teor de fibra) da idade de 7 dias de cura, designados como 4, 5 e 6. Sendo que o corpo de prova 4 foi utilizado para obter a variação de umidade e volume durante o ensaio; e os corpos de prova 5 e 6 para obter a perda de massa.

Registrou-se o volume após desmoldagem e depois de 7 dias de cura do corpo de prova 4. Em seguida, foram colocados os três corpos de prova imersos em água por 5 horas. Após foram determinados a massa e o volume do corpo de prova 4 e levados os três corpos de prova para estufa a uma temperatura de $71 \pm 2^\circ\text{C}$ por 42 h e então retirados e novamente registrado a massa e volume do corpo de prova 4 e realizado escovação com escovas de cerdas metálicas nos corpos de prova 5 e 6 (foram realizadas 18 escovações paralelo ao eixo longitudinal e 4 paralela as suas bases, Figura 21).

Foram repetidos as etapas de imersão, secagem e escovação mais cinco vezes até completar 6 ciclos, onde cada ciclo teve a duração de 48 h.



Figura 21 - Escovação dos corpos de prova.

Ao final desta fase foram realizados os cálculos de variação de umidade e variação de volume do corpo de prova 1 e a perda de massa dos corpos de prova 2 e 3, utilizando as Equações 9, 10 e 11.

→ Variação do volume:

$$V_{v,n} = \frac{(V_i - V_n)}{V_i} * 100 \quad (9)$$

Onde:

$V_{v,n}$ = Variação de volume do corpo de prova 4 em cada etapa, em %;

V_i = Volume inicial do corpo de prova 4;

V_n = Volume do corpo de prova 4 em cada etapa.

→ Variação de umidade:

$$V_{h,n} = \frac{(h_i - h_n)}{h_i} * 100 \quad (10)$$

Onde:

$V_{h,n}$ = Variação de umidade do corpo de prova 4 em cada etapa, em %;

h_i = Umidade inicial do corpo de prova 4, em %,

h_n = Umidade do corpo de prova 4 em cada etapa, em %.

A determinação da umidade foi através da equação:

$$h = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} * 100 \quad (11)$$

Onde:

h = Teor de umidade do material, em %;

M_1 = Massa final da amostra seca em estufa, em g;

M_2 = Massa inicial da amostra nas referidas condições, em g.

→ Perda de massa

Para cálculo de perda de massa foi obtido a quantidade relativa de água nos corpos de prova 5 e 6 após atingir massa constante que deverá ser igual à de água retida no corpo de prova 1, através da Equação 12.

$$A = \frac{(M_{f(4)} - M_{i(4)})}{M_{i(4)}} \quad (12)$$

Onde:

A = Água retida no corpo de prova 4, em %;

$M_{f(4)}$ = Massa seca final do corpo de prova 4 após atingir massa constante, em g;

$M_{i(4)}$ = Massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem do corpo de prova 4, em g.

Foram corrigidas as massas secas dos corpos de prova 5 e 6, descontando a água que reagiu com o cimento e o solo durante o ensaio e que ficou retida no corpo de prova 1 a 110°C, conforme Equação 13:

$$M_{fc(5,6)} = \frac{M_{f(5,6)}}{(A + 1,00)} \quad (13)$$

Onde:

$M_{fc(5,6)}$ = Massa seca final corrigida dos corpos de prova 5 e 6, em g;

$M_{f(5,6)}$ = Massa seca final dos corpos de prova 5 e 6 após atingir massa constante, em g;

A = Água retida no corpo de prova 4, em %.

Para calcular perda de massa, utilizou-se a Equação 14:

$$P_{m(5,6)} = \frac{(M_{i(5,6)} - M_{fc(5,6)})}{M_{i(5,6)}} * 100 \quad (14)$$

Onde:

$P_{m(5,6)}$ = Perda de massa dos corpos de prova 5 e 6, em %;

$M_{i(5,6)}$ = Massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem dos corpos de prova 5 e 6, em g;

$M_{fc(5,6)}$ = Massa seca final corrigida, dos corpos de prova 5 e 6, em g.

No final do ensaio foi determinada a resistência à compressão para verificar o grau de influência deste ensaio nas propriedades mecânicas finais das

amostras para os corpos de prova submetidos à escovação. Os resultados de variação de umidade, variação de volume e perda de massa foram comparados com a ABNT NBR 13553/1996 ⁽⁶⁰⁾.

4.2.3.5. Análise morfológica do solo-cimento-fibra

A análise morfológica foi realizada para as amostras de solo-cimento e fibra no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, modelo TM 3000 Tabletop Microscope, marca HITACHI e software de captura da imagem Hitachi TM3000. E complementação com a análise dos elementos químicos presentes na amostra por Espectrometria por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), modelo SwiftED 300, s-stream.

Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado ⁽⁶¹⁾.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

5.1.1. Granulometria por peneiramento

O ensaio de granulometria de um solo tem influência direta na qualidade e no custo do solo-cimento, sendo mais indicados na sua confecção os solos com características arenosas. Considera-se importante a presença de areia grossa e até de pedregulhos na composição do solo, pois sendo materiais inertes, com função apenas de enchimento, haverá liberação de maiores quantidades de cimento para aglomerar os grãos menores. As frações menores são aquelas que irão favorecer nas reações químicas entre o solo e cimento.

A Figura 22 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos solos estudados.

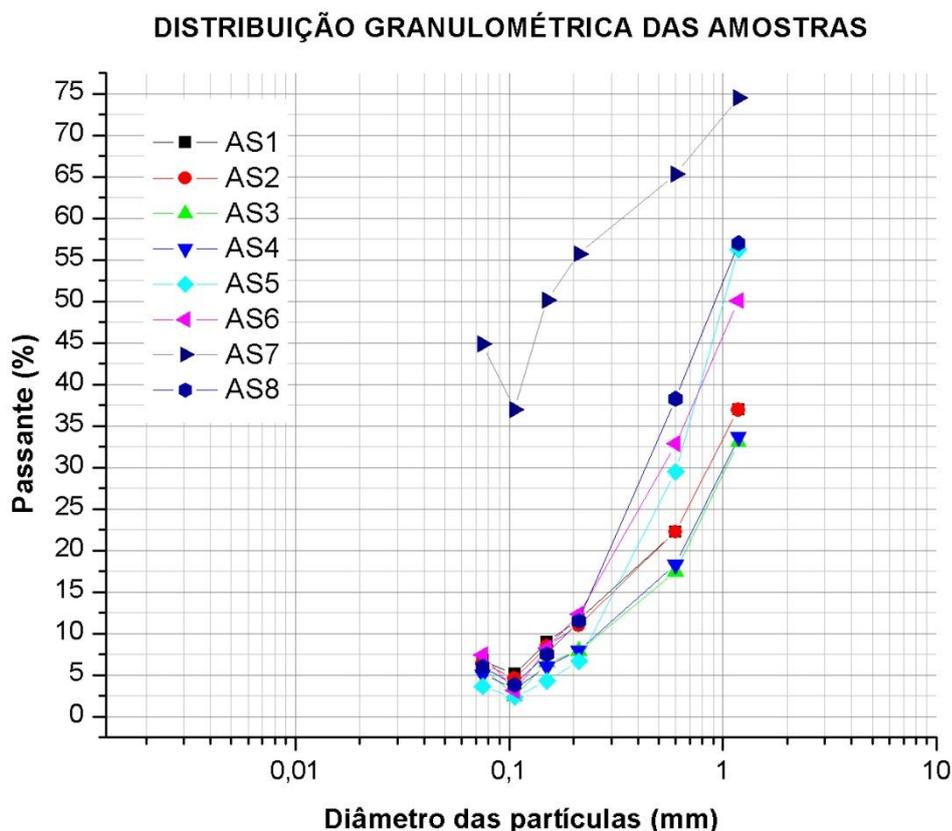


Figura 22 – Curvas de distribuição granulométrica das amostras de solo.

As porcentagens que passaram na peneira ABNT Nº 4 (4,8 mm) para todas as amostras de solo foram 100% e apenas a AS1, AS2, AS3, AS6 e AS7 estiveram

valores de massa passante entre 10 a 50% na peneira ABNT N° 200 (0,0075 mm) estando estes materiais atendendo as especificações da norma ABNT NBR 10833/1989. As amostras AS4, AS5 e AS8 tiveram os valores de massa passante abaixo de 10%.

A Tabela 19 mostra os resultados de classificação pedológica dos solos (obtida pela localização dos pontos no mapa – Figura 11) e HBR (referente aos limites de consistência e granulometria). A classificação pedológica obtida através da localização das coordenadas geográficas no mapa foram Argissolo Vermelho-Amarelo (textura média cascalhenta/argilosa), Latossolo-Vermelho Amarelo (textura média cascalhenta/média) e Neossolo Quartzarênico (areias quartzosas). Estas classes de solo são ricas em argilominerais e/ou óxidos, hidróxidos de ferro e alumínio.

A classificação de solos pela HBR determina os materiais como areia e areia silte ou argilosa. Geralmente esses materiais possuem plasticidade podendo sofrer variação volumétrica entre os estados secos e úmidos, estão enquadrados como excelente a bom.

Tabela 19 - Classificação dos solos: pedológica e HBR.

AMOSTRAS	CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA	CLASSIFICAÇÃO HBR
AS1	PVA56	A-2-7
AS2	PVA56	A-2-7
AS3	RQ 20	A-2-7
AS4	PVA4	A-2-7
AS5	PVA4	A-2-7
AS6	LVA7	A-2-7
AS7	PVA56	-
AS8	LVA7	A-2-6

5.1.2. Difração de raios-X

Os resultados de difração de raios-X estão apresentados nas Figuras 23 a 30. É observada a predominância de quartzo (Q) e dos argilominerais caulinita (C) e muscovita (M) e traços de óxido de ferro (F), na maioria das amostras de solos. O

quartzo (SiO_2) diminui a plasticidade em presença de água, aumenta a permeabilidade da peça e controla a retração.

A presença Fe_2O_3 na forma de hematita garante a coloração avermelhada. Quando o ferro está presente em quantidade significativa reduz a plasticidade, mas também diminui a retração e facilita a secagem. No solo-cimento se o ferro ocorrer como partículas discretas, estas não influenciam nas reações. Se a sua ocorrência for como partículas encobrindo as superfícies do argilomineral ou como agente cimentante podem inibir as reações entre o cálcio e a sílica.

O alto teor de caulinita no solo indica que o cimento é o estabilizante mais adequado para ser usado na mistura com o solo estudado. A caulinita é considerada estável, sendo atacada inicialmente nas arestas e dentro das lâminas de silicato.

Os silicatos têm papel importante na determinação das características de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência). Os aluminatos hidratam-se mais rapidamente que os silicatos determinando a pega (perda de consistência) do material, a velocidade inicial da reação deve ser lenta.

O aumento de resistência é influenciado pelas reações pozolânicas do solo e a cal resultante da hidratação. Esse aumento é influenciado pelas fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagindo com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes: os silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Os silicatos resultantes da reação cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Esta reação ocorre na presença de água, e tem a função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila.

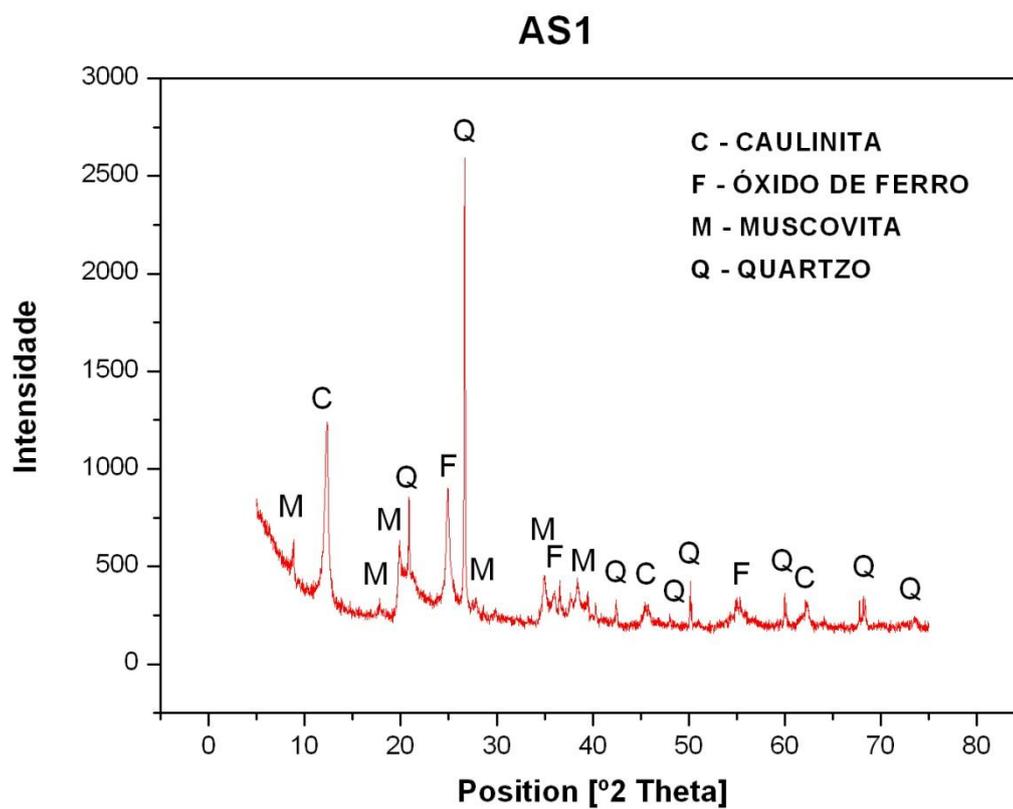


Figura 23 - Difratoograma de raios-X do solo AS1.

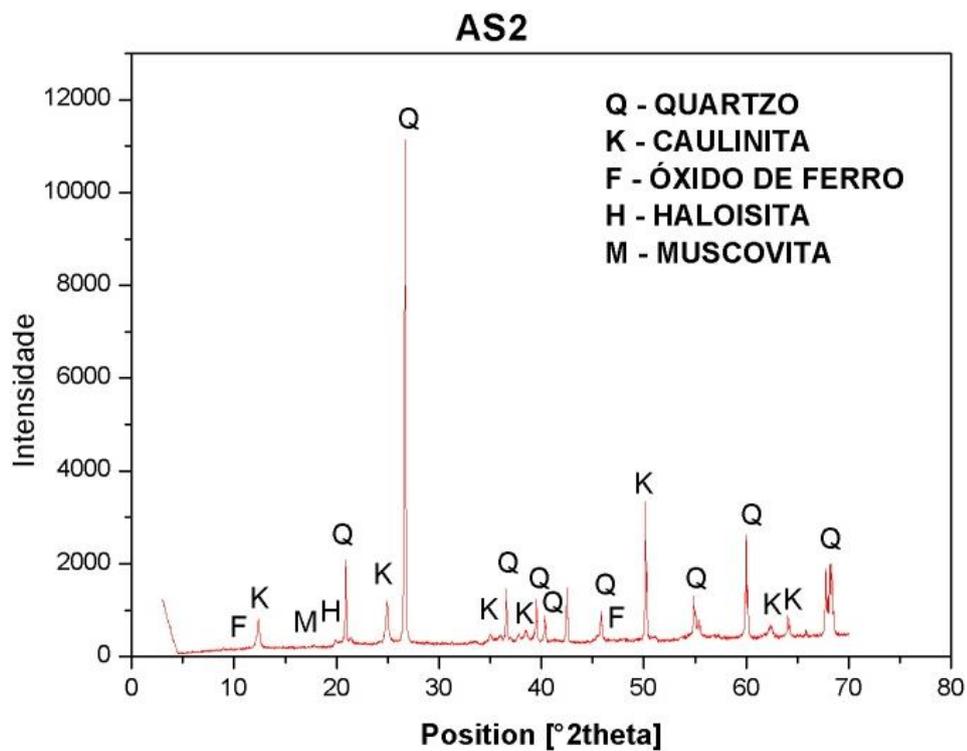


Figura 24 - Difratoograma de raios-X do solo AS2.

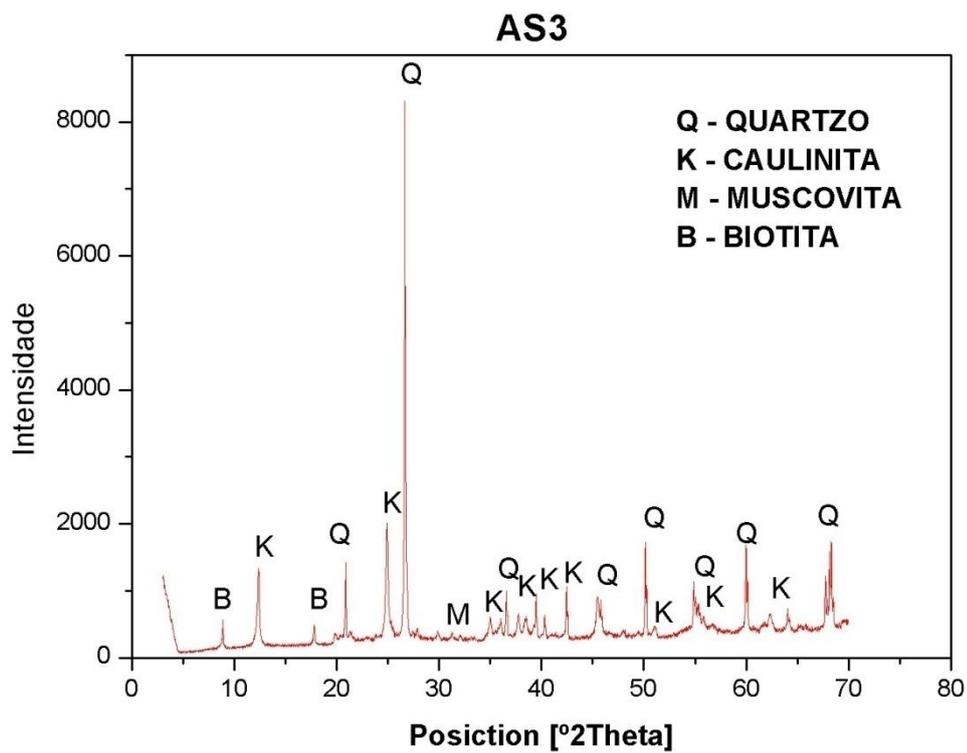


Figura 25 - Difratoograma de raios-X do solo AS3.

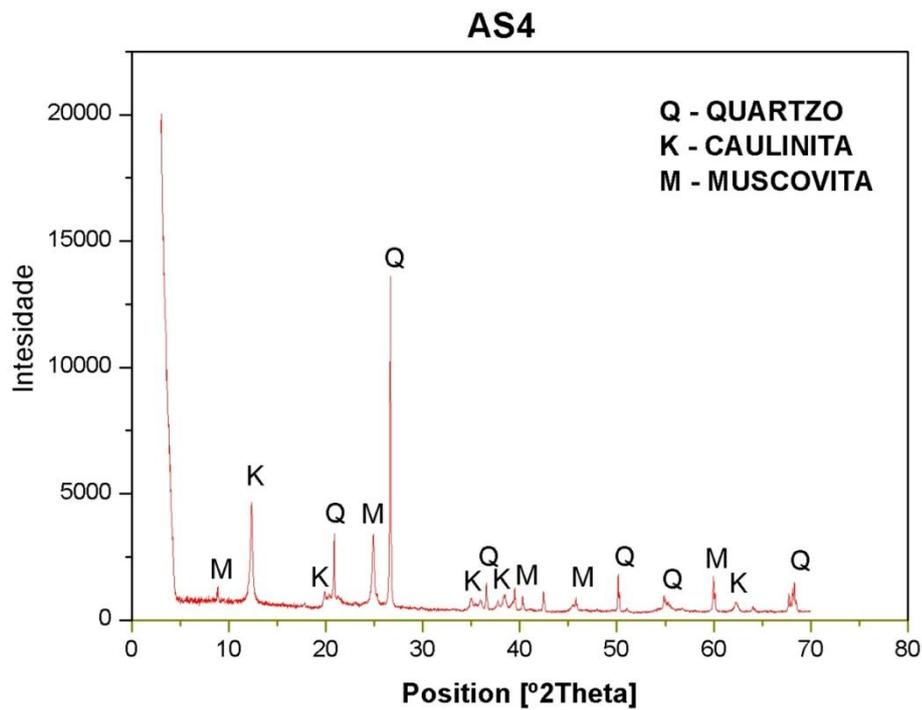


Figura 26 - Difratoograma de raios-X do solo AS4.

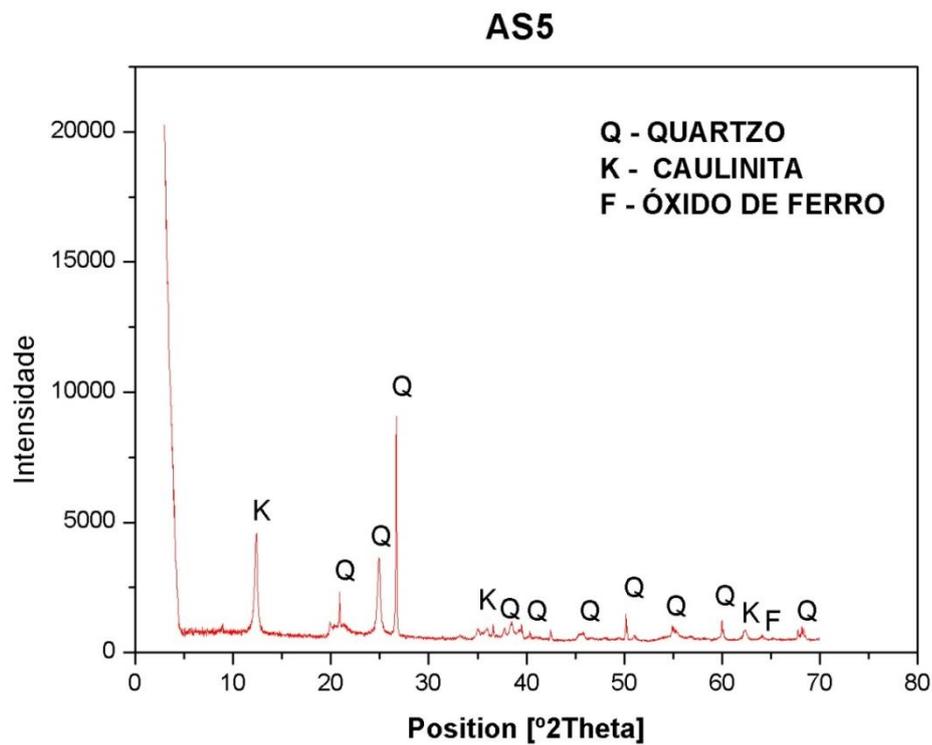


Figura 27 - Difratoograma de raios-X do solo AS5.

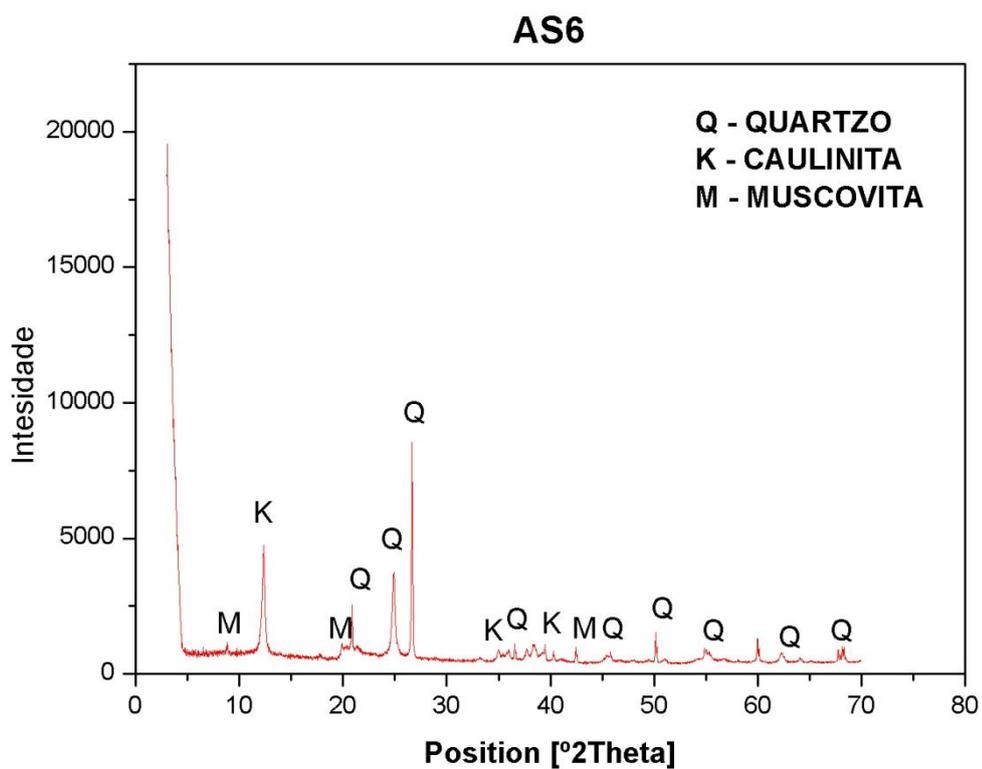


Figura 28 - Difratoograma de raios-X do solo AS6.

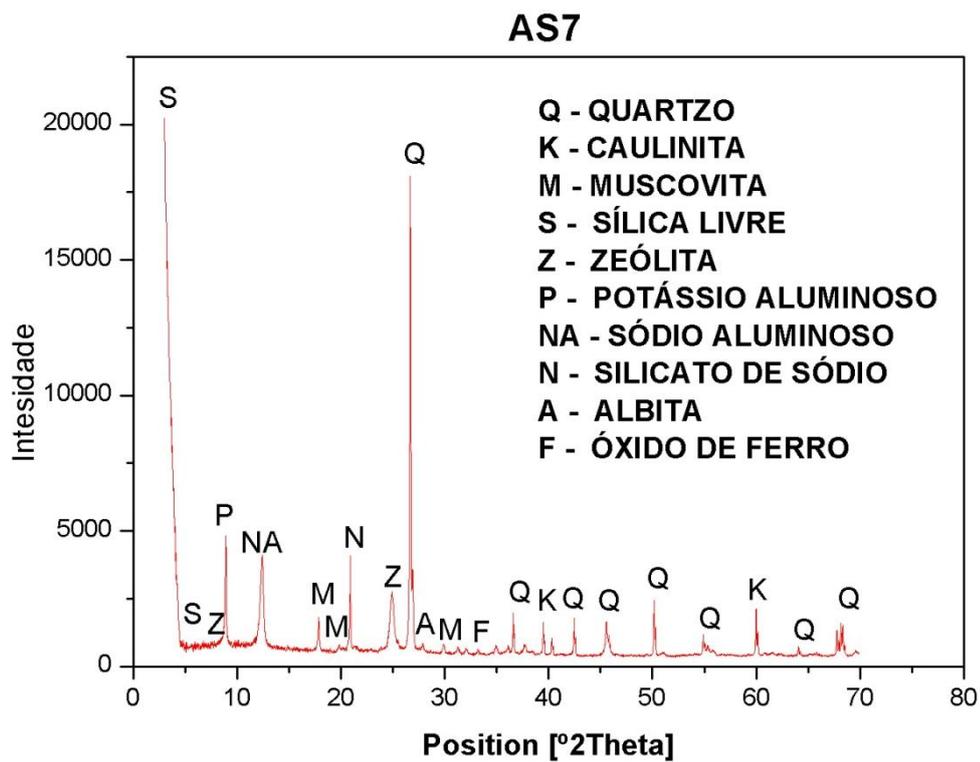


Figura 29 - Difratoograma de raios-X do solo AS7.

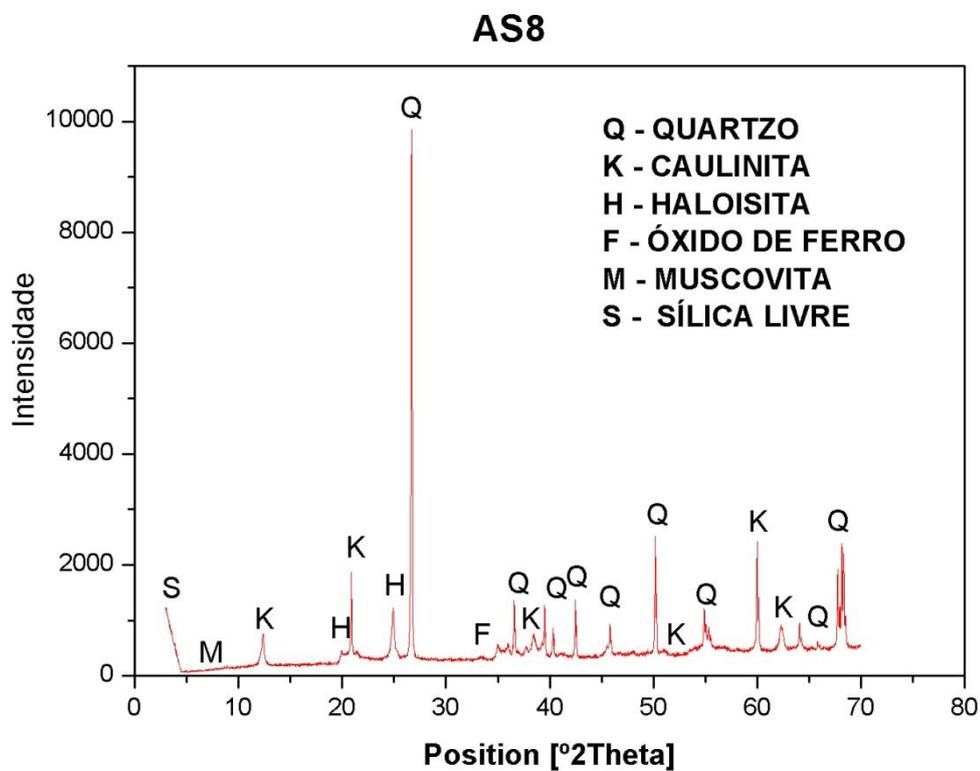


Figura 30 - Difratoograma de raios-X do solo AS8.

5.1.3. Limite de consistência

Analisando os resultados da Tabela 20 o solo mais adequado para aplicação em solo-cimento foi o AS8 por apresentar valores próximos da faixa especificada pela norma ABNT NBR 10833/1989 ⁽¹¹⁾, onde LL deverá ser menor que 45% e o IP menor de 18%. Valores elevados podem conduzir a maiores dificuldades na secagem e no destorroamento, e também no processo de mistura dos componentes.

Quanto maior o índice de plasticidade, mais o material estará sujeito às variações dimensionais resultantes da expansão do solo, quando úmido, e de sua retração, quando seco. O índice de plasticidade foi de 12,86% para o AS8 obtido pela diferença numérica entre os limites de liquidez e de plasticidade. Em razão disso, o solo foi considerado como moderadamente plástico.

Tabela 20 - Limite de consistência das amostras coletadas.

SOLO	LL (%)	LP (%)	IP (%)
AS1	49,45	28,69	20,76
AS2	43,60	25,25	18,35
AS3	47,20	34,39	12,81
AS4	54,90	35,02	19,88
AS5	57,50	39,53	17,97
AS6	55,70	37,31	18,39
AS7	NP*	NP	NP
AS8	35,00	22,14	12,86

*Não plástico.

Analisando a Figura 31 apenas as amostras AS2 (Zona Limite) e AS8 (Zona Preferencial) se enquadraram dentro da região hachurada, regiões de trabalho aceita para solo-cimento. Diante destes resultados o solo escolhido para compor a composição solo-cimento-fibra foi a AS8.

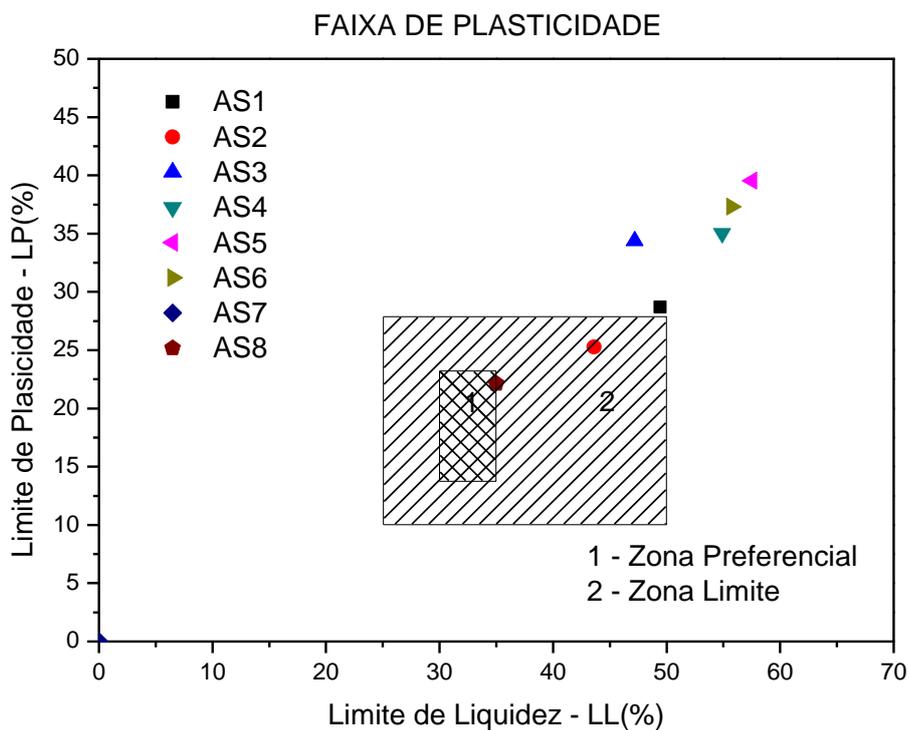


Figura 31 - Faixa de Plasticidade das amostras de solo coletadas.

5.1.4. Ensaio de retração

A Tabela 21 mostra os valores obtidos do ensaio de retração das amostras de solo. Apenas a amostra AS8 obteve resultados desejáveis, ou seja, as somas da retração no sentido do comprimento não ultrapassaram 2 cm, e nem apresentou fissuramento conforme visualização na Figura 32. Portanto, este solo é predominante arenoso, pois não houve variação de volume e ideal para aplicação em solo-cimento.

Amostras com maiores fissuramentos e retrações indicam presença de argila ativa que promove elevada absorção de água e variação do volume.

Tabela 21 - Resultado dos ensaios de retração.

SOLO	LEITURAS DE RETRAÇÃO (mm)	SURGIMENTO DE TRINCAS
AS1	6,0	Sim
AS2	6,0	Sim
AS3	6,0	Não
AS4	6,0	Sim
AS5	2,0	Sim
AS6	8,0	Sim
AS7	7,5	Sim
AS8	2,0	Não



Figura 32 - Ensaio de retração do solo após 7 dias.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE COCO BABAÇU

Os resultados de caracterização das fibras estão apresentados na Tabela 22. Observa-se que há um aumento no teor de umidade na fibra tratada e diminuição da massa específica real. O tratamento químico provocou a destruição lignina (Figura 33), contribuindo para aumentar a durabilidade da fibra em relação a propagação de fungos no interior do solo-cimento, rompendo a ligação entre as células fibrosas da celulose destruindo o arranjo espacial das paredes das fibras. A

massa específica das fibras que sofreram tratamento químico é menor que das fibras não tratadas quimicamente, isto é devido à remoção da lignina.



Figura 33 - Fibras de coco babaçu após tratamento químico.

Tabela 22 - Resultados físicos das fibras de coco babaçu.

Parâmetros físicos	Valores	
	Fibra NTQ*	Fibra TQ**
Massa específica real (g/cm ³)	0,91	0,14
Teor de umidade (%)	3	7

* NTQ: Não tratada quimicamente; ** TQ: Tradada quimicamente.

As fibras com tratamento químico absorvem substancialmente mais água que as fibras sem tratamento (Figura 34). A provável explicação para isso é a possível remoção da lignina e outros componentes presentes na fibra vegetal tornando a fibra mais rugosa, mais irregular e com maior área superficial de contato. Este fato poderá introduzir defeitos no solo-cimento através da absorção de água contida na matriz para fibra, inviabilizando a continuidade da hidratação, ou diminuição da aderência fibra-matriz devido à expansão da fibra quando úmido ou retração quando seca, gerando deslocamento na interface matriz-fibra. Por outro lado, essa absorção poderá ser benéfica podendo haver reações de hidratação nas proximidades das fibras.

A propriedade da fibra absorver a água é conhecida como mucilagem, substância gelatinosa de estrutura complexa que ao reagir com a água aumento de volume ⁽³⁰⁾.

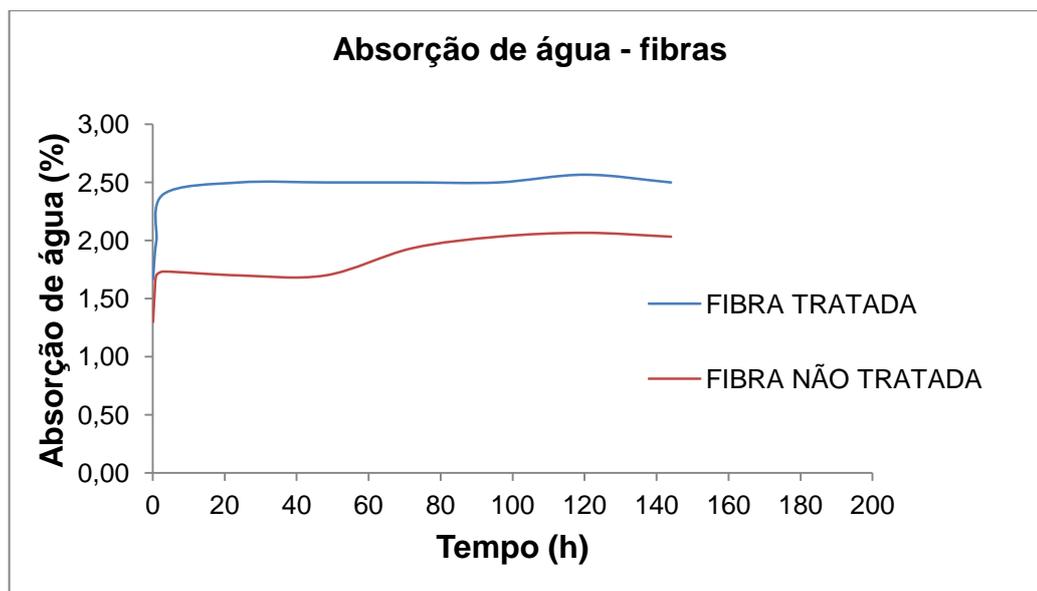


Figura 34 - Absorção de água das fibras de coco babaçu.

Os resultados físico-mecânicos das fibras de coco babaçu não tratada quimicamente expressos na Tabela 23 foram superiores aos encontrados literatura para fibras de coco, revelando a importância desta matéria-prima em aplicações como reforço.

Tabela 23 – Resultados físicos - mecânicos da fibra de coco babaçu NTQ.

PARÂMETROS FÍSICOS - MECÂNICOS	VALORES	
	FIBRA DE COCO BABAÇU	FIBRA DE COCO ⁽⁴⁸⁾
Módulo de elasticidade (MPa)	8590	2800
Força de ruptura (N)	61,47	-
Tensão de ruptura (MPa)	183,8	180
Força máxima (N)	63,87	-
Deformação força máxima (mm)	1,281	-

Em relação aos resultados morfológicos das fibras de coco babaçu para os dois estados tratado e não tratado quimicamente, a Figura 35 mostra claramente a constituição das fibras em várias fibras individuais, conhecida também como microfibras. São células longas e pontiagudas, aderidas por uma lamela

intermediária, composta principalmente por um composto orgânico complexo, a lignina, que é uma espécie de matriz natural. Cada microfibrila é formada por quatro camadas, com diferentes teores de celulose, hemicelulose e lignina, sendo as moléculas de celulose as responsáveis pela resistência das fibras. Na superfície longitudinal ilustrado na Figura 35 – A, observa-se certa homogeneidade estrutural, diferentemente do que ocorre na fibra que sofreu tratamento químico com NaOH na qual há fissuras ao longo das fibra, Figura 36 - A, esses defeitos podem gerar outros no solo-cimento, como migração dos compostos do cimento para estas cavidades e propiciar no aumento da absorção de água.

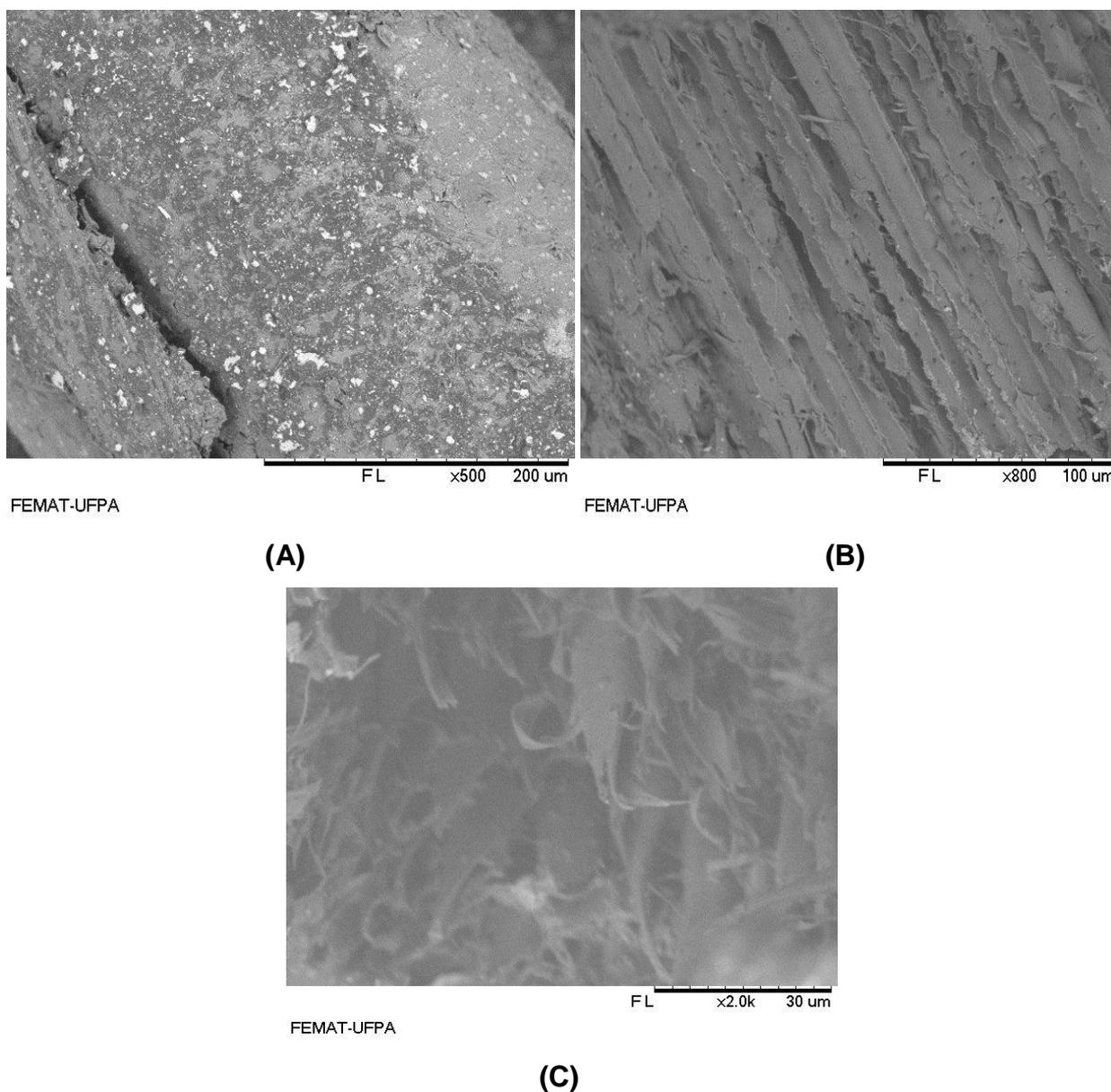


Figura 35 – Morfologia da fibra não tratada quimicamente: A – longitudinal; B – Longitudinal fratura; C: Transversal fratura.

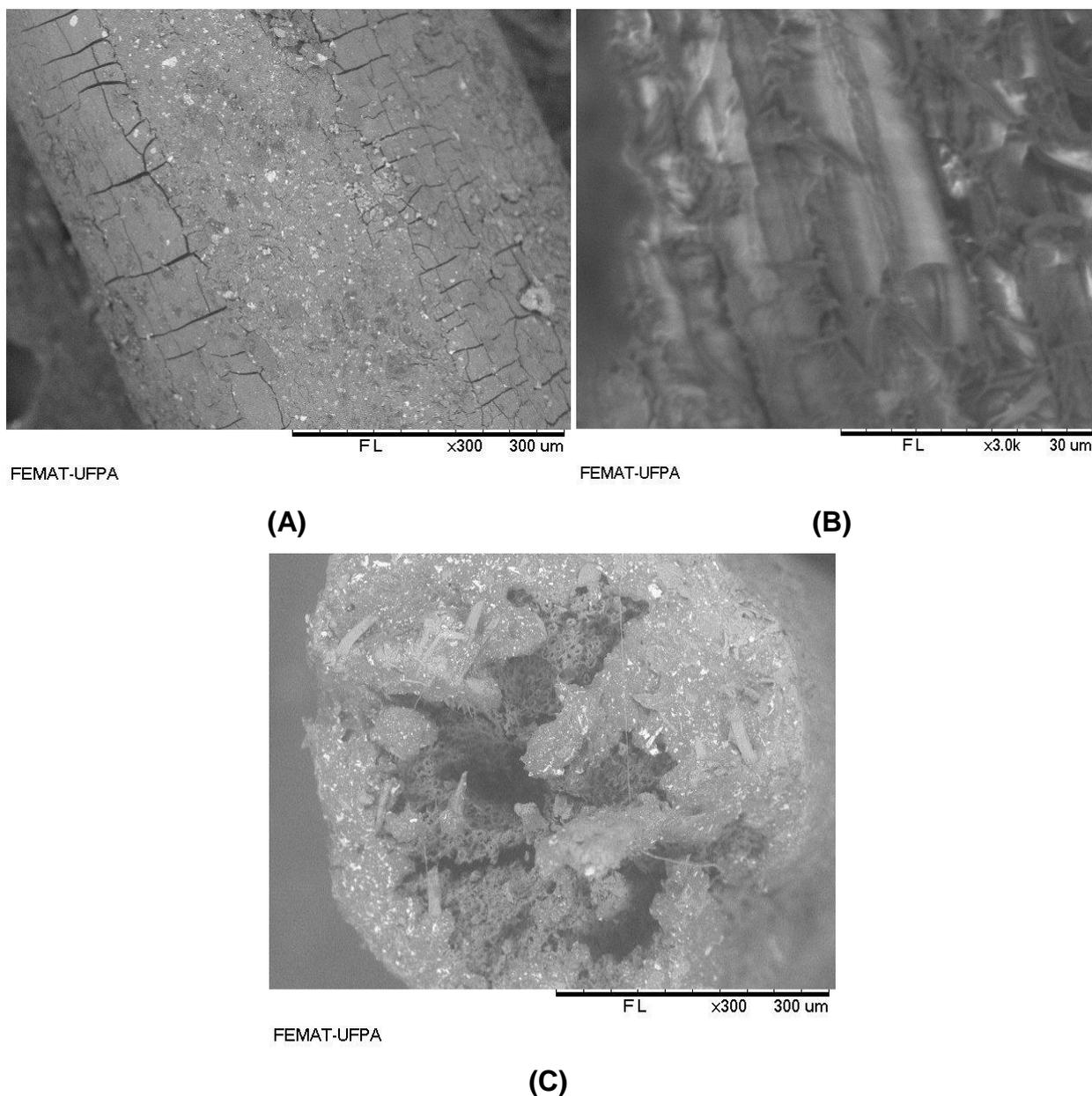


Figura 36 – Morfologia da fibra tratada quimicamente: A – longitudinal; B – Longitudinal fratura; C - Transversal fratura.

5.3. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS CORPOS DE PROVA

5.3.1. Resistência à compressão simples

Os resultados de resistência á compressão para o traço 7/1 e 10/1 estão expressos nas Figuras 37 e 38 de acordo com idade de cura, traço e teor de fibra. O comportamento dos corpos de prova com adição de 0,30% e 0,60% fibras de coco babaçu apresentaram melhores resultados em relação ao solo-cimento

convencional. Os valores de resistência à compressão com adição de fibras na idade de 28 dias de cura apresentaram-se, na ordem de 6,06 MPa, 8,39 MPa e 7,25 MPa, com respectivamente, 0%, 0,30% e 0,60% de fibra. Tais resultados satisfizeram as condições de utilização após a idade de 28 dias, que corresponde à média dos valores de resistência à compressão igual ou maior que 2,0 MPa, e valores individuais iguais ou maiores que 1,7 MPa, exigidos pela norma da ABNT NBR 10834/1994 ⁽³¹⁾. Contudo, o traço 7/1 com 0,30% de fibra apresentou o melhor resultado de resistência aos 28 dias, com 8,39 MPa.

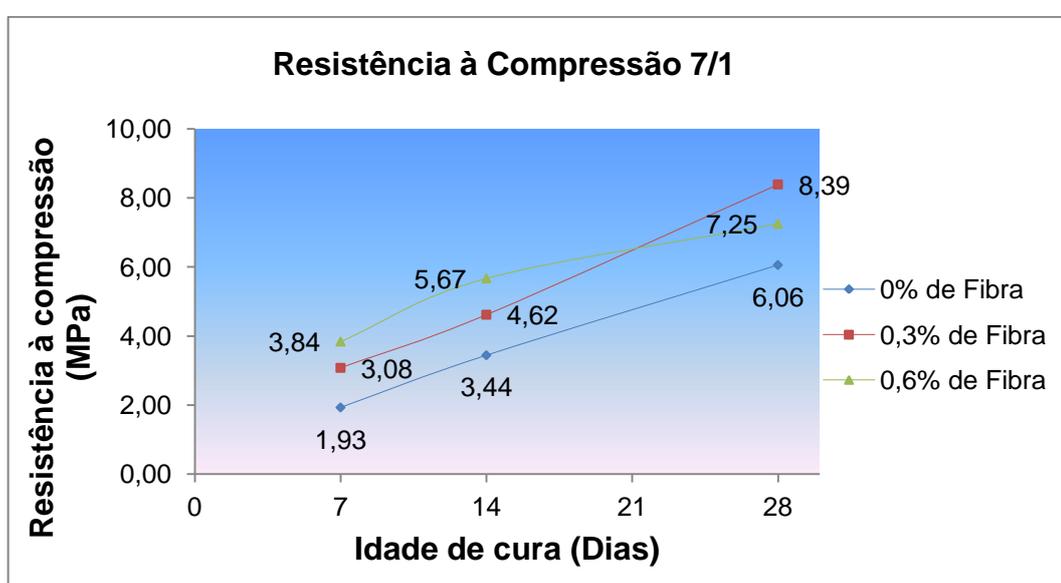


Figura 37 - Resistência à compressão traço 7/1 com 7, 14 e 28 dias de cura.

Os valores de resistência à compressão para o traço 10/1 com adição de fibras na idade de 28 dias de cura apresentaram-se, na ordem de 2,24 MPa, 2,99 MPa e 4,02 MPa, com respectivamente, 0%, 0,30% e 0,60% de fibra (Figura 38), o que satisfaz as condições de utilização após a idade de 28 dias, que corresponde a média dos valores de resistência à compressão igual ou maior que 2,0 MPa, e valores individuais iguais ou maiores que 1,7 MPa exigido pela norma da ABNT NBR 10834/1994 ⁽³¹⁾. No entanto esses valores são inferiores se comparado com o traço 7/1.

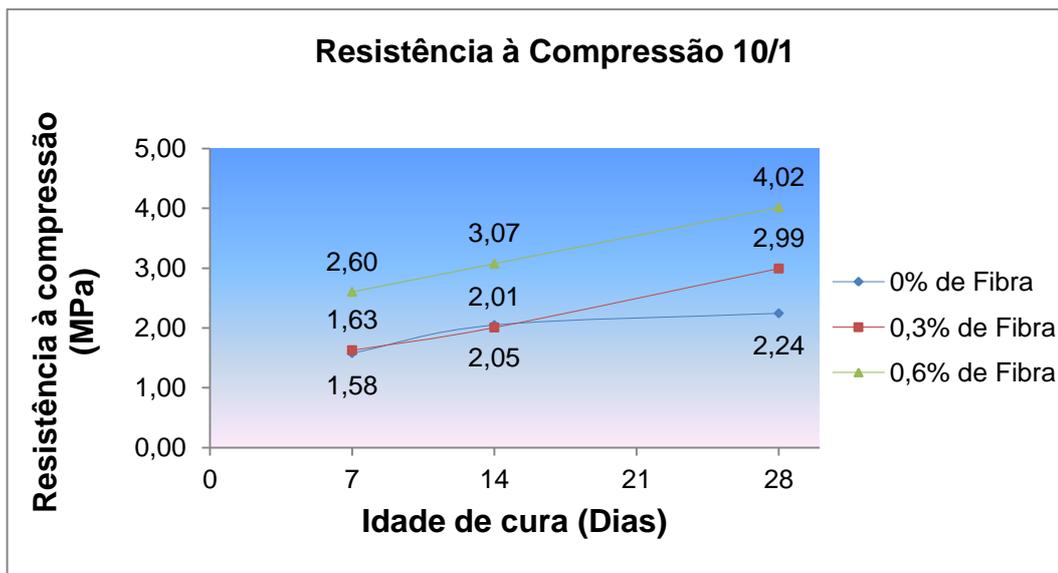


Figura 38 - Resistência à compressão traço 10/1 com 7, 14 e 28 dias de cura.

Com o aumento do teor de fibra há um aumento considerável na resistência à compressão. Vários são os mecanismos que podem explicar este fenômeno, tal como: as fibras transferem esforços para o solo, provocando uma redistribuição de tensões e, portanto deformações no interior do solo; esse resultado é positivo, pois quanto maior for a interação entre a interface destas duas fases melhor será o resultado. A condutividade hidráulica é favorecida com a adição das fibras, uma vez que há um aumento na permeabilidade, sendo maior esse aumento quanto maior for a quantidade de fibras, assim as reações de hidratação do cimento serão efetivadas.

As fibras com alta absorção de água retiveram a água da mistura, não deixando tanta água disponível para ser perdida para o meio, por secagem, aumentando assim a resistência. A água retida pelas fibras pode promover uma espécie de cura interna do solo com o cimento, favorecendo o ganho de resistência.

Em relação à fratura pode-se observar, no ensaio de resistência à compressão, um aumento da ductilidade das amostras de solo-cimento pós-fissuração, em relação à matriz. Mesmo após a fissuração da matriz as fibras mantiveram as faces das fissuras unidas, não permitindo, assim, a perda da continuidade do material e evitando sua fratura catastrófica (Figura 39). Isso vem mostrar o papel das fibras como elementos capazes de promover maior capacidade de deformação, o que pode contribuir para o aumento da tenacidade do material e

uma capacidade, mesmo que progressivamente diminuída, de suporte de carregamento, após a fissuração da matriz.



Figura 39 - Fratura dos corpos de prova após ensaio de resistência à compressão.

5.3.2. Absorção de água

Os resultados apresentados na Figura 40 mostram valores de absorção de água dos corpos-de-prova incorporados com 0%, 0,30% e 0,60 % de fibra de coco babaçu para o traço 7/1 de acordo com idade de cura e teor de fibra. Observa-se que a absorção de água em geral está enquadrada no limite exigido pela NBR10834/1994 ⁽³¹⁾ a qual diz que a média é $\leq 20\%$ e o valor individual superior a 22%. Na idade de 7 dias de cura a absorção de água foi maior do que as outras idades, diminui na idade de 14 dias e sofre um aumento na última idade. A composição para este traço que apresentou melhor comportamento foi com adição de 0,30% de fibra.

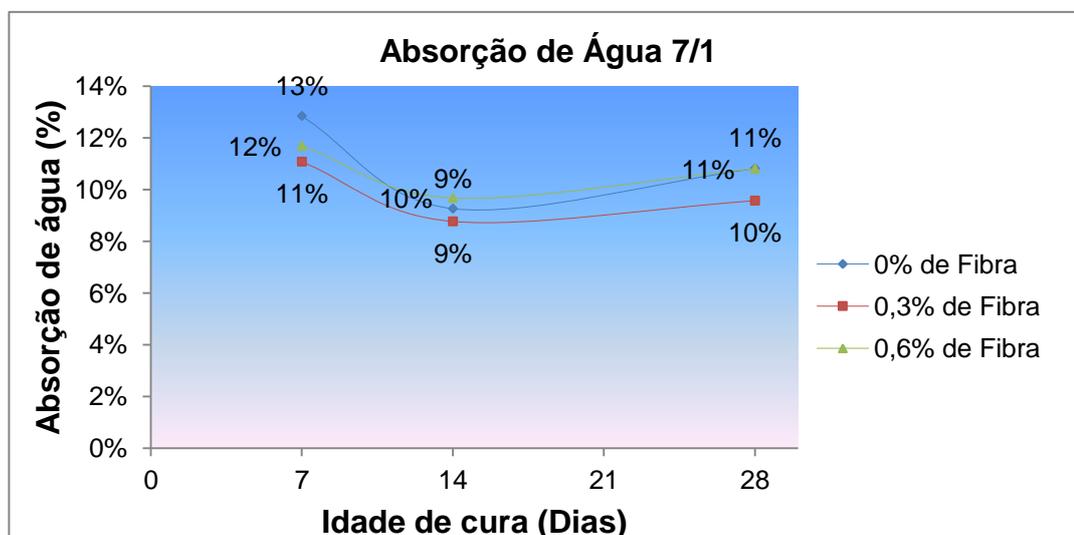


Figura 40 - Absorção de água traço 7/1 com 7, 14 e 28 dias de cura.

Na Figura 41 estão contidos os valores de absorção de água dos corpos-de-prova incorporados com 0%, 0,30% e 0,60 % de fibra de coco babaçu para o traço 10/1 de acordo com idade de cura e teor de fibra. A absorção de água também sofreu um acréscimo na idade de 7 dias, há uma diminuição em 14 dias de idade e aumento na última idade. Todos os resultados estão enquadrados na NBR10834/1994 ⁽³¹⁾. A composição que apresentou melhores resultados foi para o teor de 0,60% de fibra.

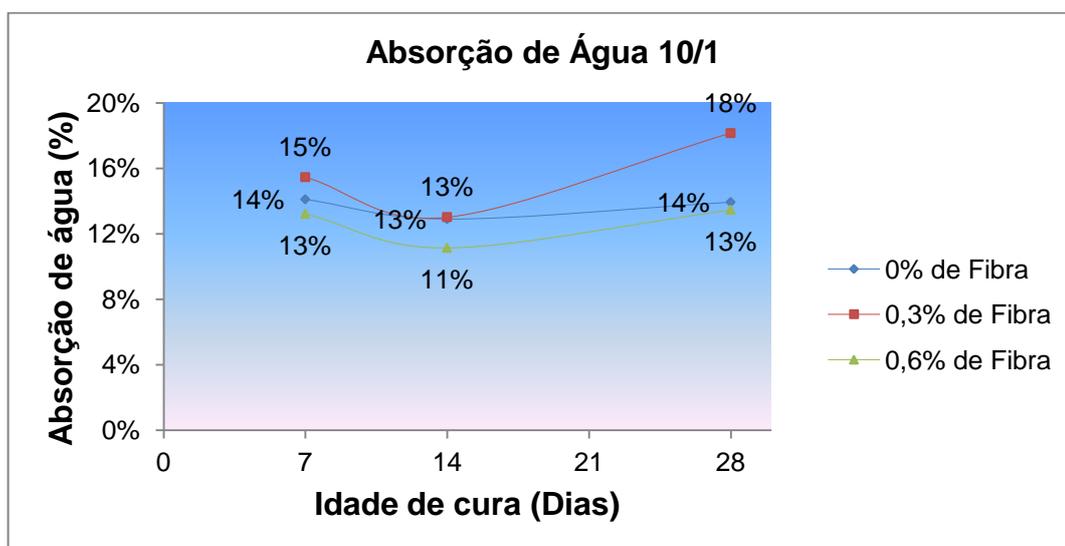


Figura 41 - Absorção de água traço 10/1 com 7, 14 e 28 dias de cura.

O aumento da absorção de água na última idade pode ser explicado por uma possível fragilização da fibra pelo processo de mineralização, resultante da migração de produtos de hidratação, especialmente o hidróxido de cálcio, para a cavidade central, paredes e vazios da fibra, onde cristalizam. Ou formação de defeitos com aumento de vazios durante a secagem, ou ainda, a água presente na fibra pode ter sido absorvida pela matriz solo-cimento para dar prosseguimento nas reações de hidratação e ter gerado espaços vazios entre a fibra e solo-cimento favorecendo a maior absorção de água.

5.3.3. Análise morfológica do solo-cimento-fibra

A Figura 42 mostra o aspecto das fibras na matriz solo-cimento. Observa-se a migração dos compostos do cimento para a fibra, parte clara, e espaços vazios

na interface fibra e solo-cimento. Esses compostos hidratados do cimento podem sofrer cristalização nessas regiões e causar um possível enrijecimento desse reforço e sua conseqüente fragilização.



FEMAT-UFFPA

Figura 42 - Morfologia solo-cimento-fibra.

Os constituintes químicos presentes na fibra (Figura 43) são parte integrante do solo, dos argilominerais, da parte orgânica da fibra e formação dos compostos de hidratação.

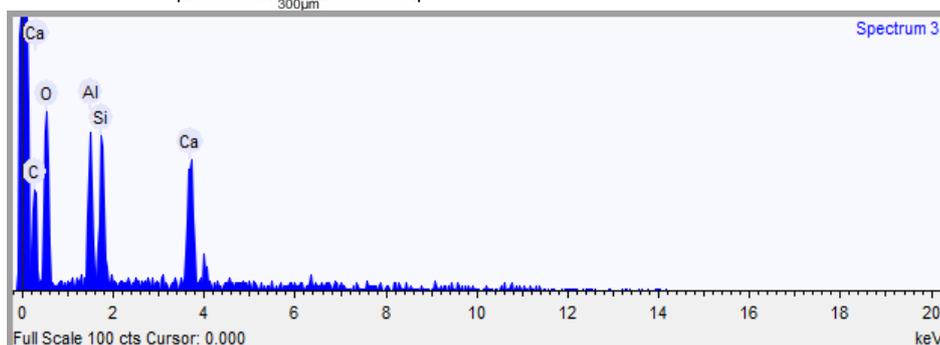
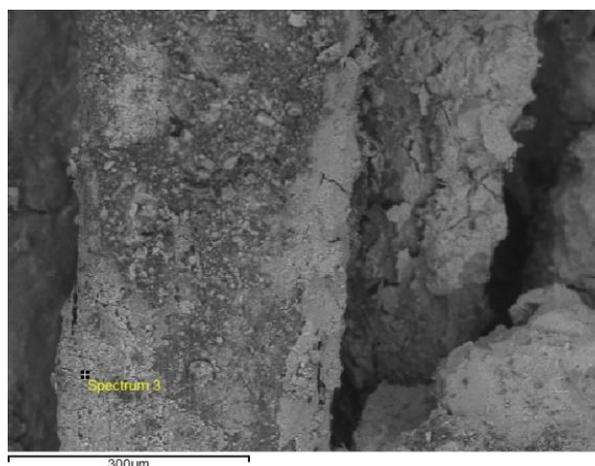


Figura 43 - EDS do solo-cimento-fibra.

5.3.4. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

De acordo com norma ABNT NBR 13553/1996 ⁽⁵⁹⁾ a variação de volume, após o sexto ciclo do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, deve ser igual ou inferior a 1% e a perda de massa não deve ser superior, levando em consideração a classificação do A-2-6, a 10%.

As figuras 44 e 45 indicam os valores de variação de volume durante os 6 ciclos do ensaio de durabilidade para os traços 7/1 e 10/1 e respectivos teores de fibra. A variação de volume ao 6º ciclo foi superior a 1% nos corpos de prova com adições de fibra para o traço 7/1. As sucessivas molhagens e secagens podem ter gerado defeitos na interface matriz-fibra, devido à capacidade de absorção de água das fibras, retração durante a secagem e absorção de água pela matriz solocimento.

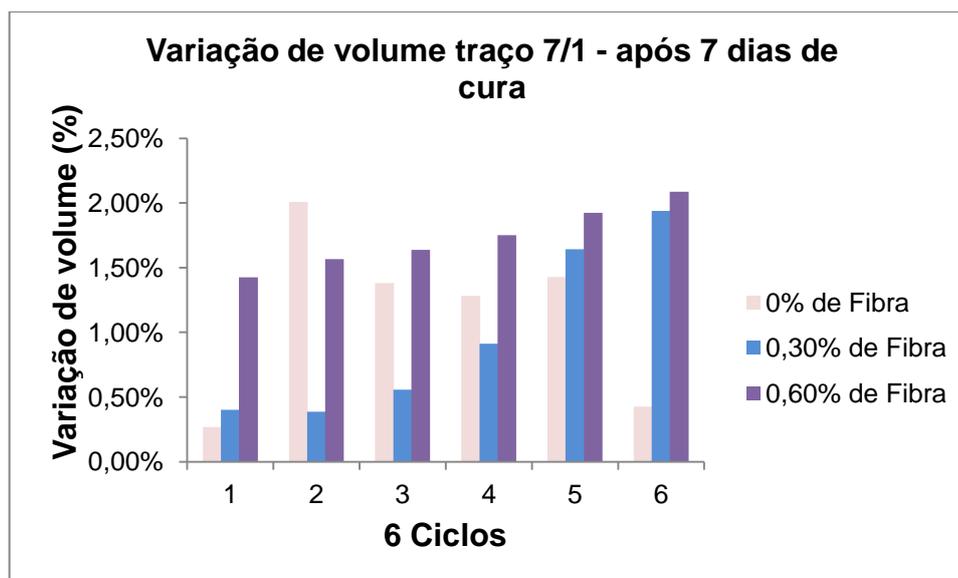


Figura 44 - Variação de volume traço 7/1 com diferentes teores de fibra.

No traço 10/1 nenhuma composição atendeu as especificações expressas na norma (Figura 45); todas tiveram variação de volume superiores a 1%. E entretanto, a variação de volume foi mais significativa na composição sem adição de fibra, e isto pode ser explicado pelo baixo teor de cimento, impossibilitando a hidratação e reação da cal gerada com os argilominerais.

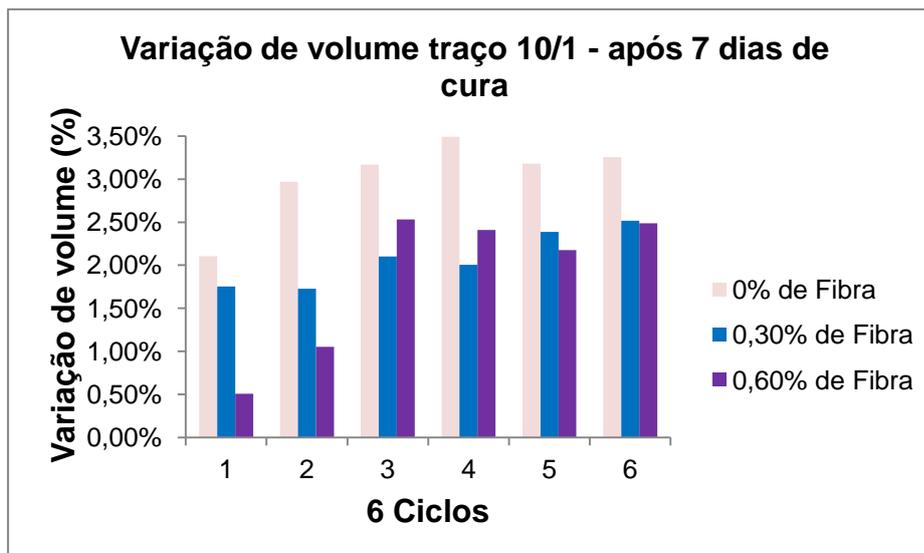


Figura 45 - Variação de volume traço 10/1 com diferentes teores de fibra.

Os valores de perda de massa estão na Tabela 24, na qual se observa que as médias dos valores diminuíram com o aumento do teor de fibras para o traço 10/1 e que se mantiveram constante para o traço 7/1. Verificando-se a norma, a porcentagem de perda de massa está superior ao recomendado, sendo menor para o traço 7/1. Provavelmente o teor de cimento elevado possibilitou maior interação com as partículas do solo, ou melhor, com os argilominerais.

Tabela 24 - Resultados do ensaio de durabilidade dos traços 7/1 e 10/1 com teores de 0%, 0,30% e 0,60% de fibras para 7 dias de cura.

Composição		Água retida corpo de prova 4 (%)	Massa seca final corrigida dos corpos de prova 5 e 6 (g)		Perda de massa (%)		
		A4	M _{fc(5)}	M _{fc(6)}	5	6	MÉDIA
7/1	0%	9	255,47	243,09	16	22	19,0
	0,30%	10	249,96	247,78	19	19	19,0
	0,60%	10	248,84	249,66	19	19	19,0
10/1	0%	12	233,95	237,61	23	23	23,0
	0,30%	13	225,24	245,59	25	24	24,5
	0,60%	12	239,51	239,69	21	21	21,0

Na Figura 46 estão apresentados os corpos de prova para os traços 7/1 e 10/1 com diferentes teores de fibra após os ensaios de durabilidade. Os dois últimos corpos de prova para cada traço/composição foram àqueles submetidos à escovação, nos quais, observa-se pela análise visual que a composição com 0,60% de fibra para o traço 7/1 e 0,30% de fibra para o traço 10/1 foram os que

apresentaram maiores defeitos superficiais provocado pela escovação, deixando-a irregular. Esses defeitos são maiores na interface matriz-fibra.

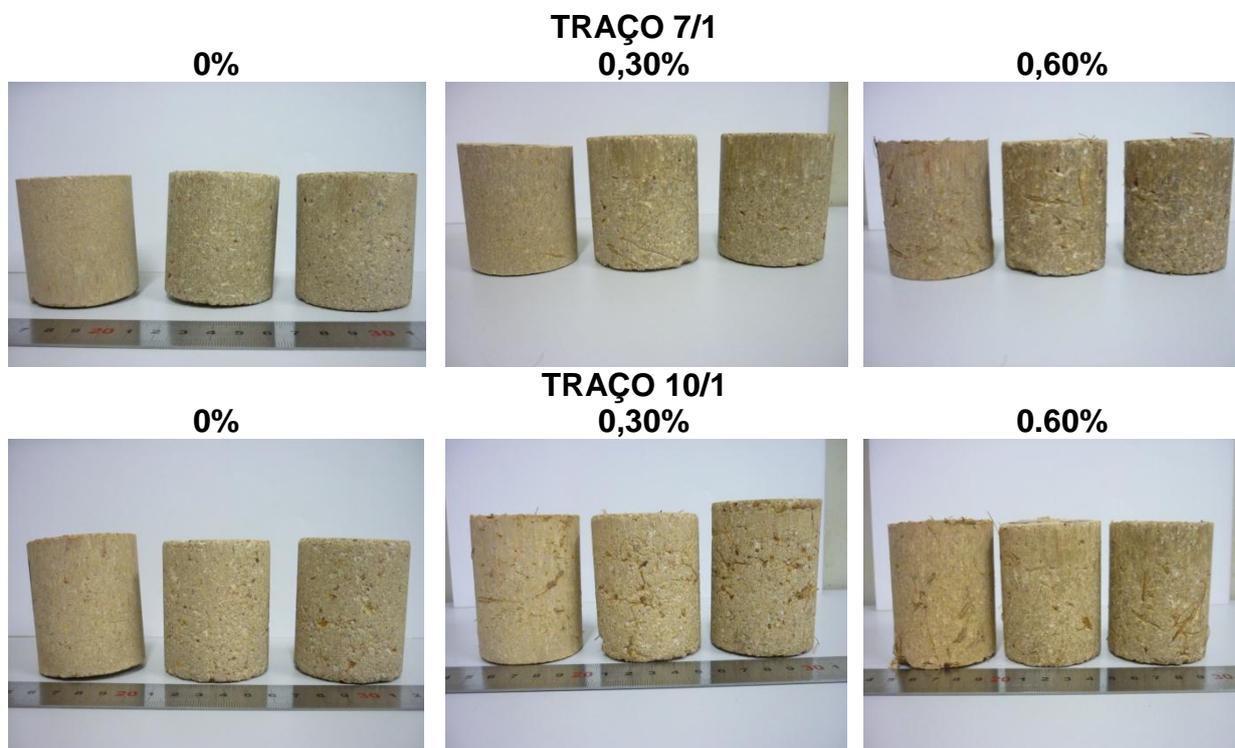
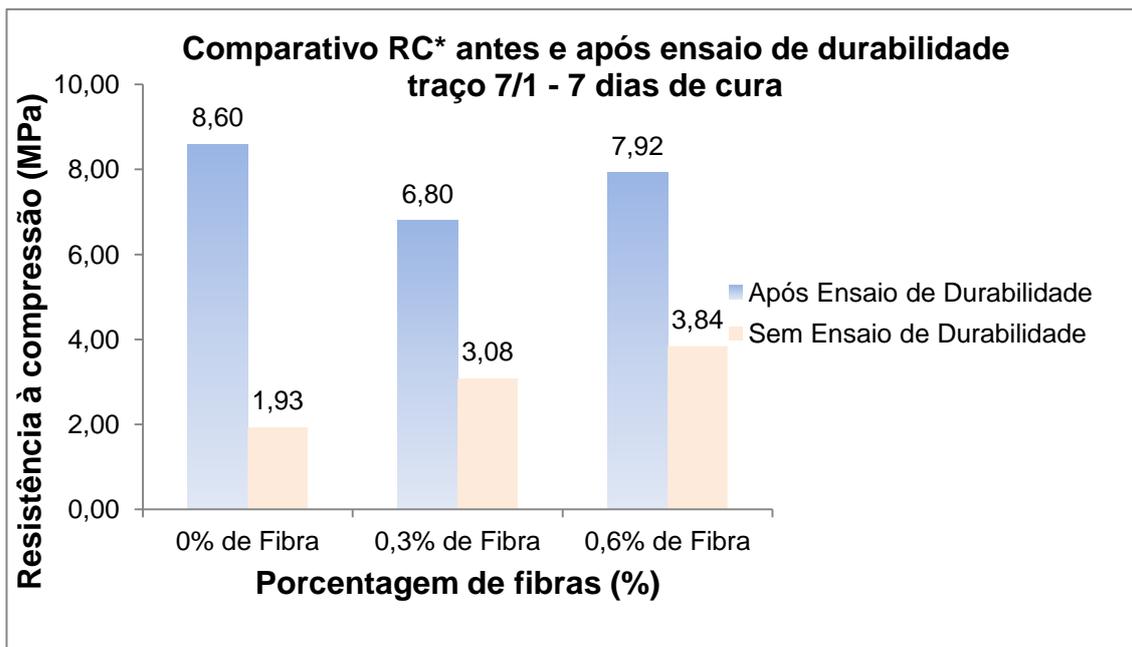


Figura 46 - Corpos de prova após os 6 ciclos do ensaio de durabilidade traços 7/1 e 10/1 com teores de fibra 0%, 0,30% e 0,60%

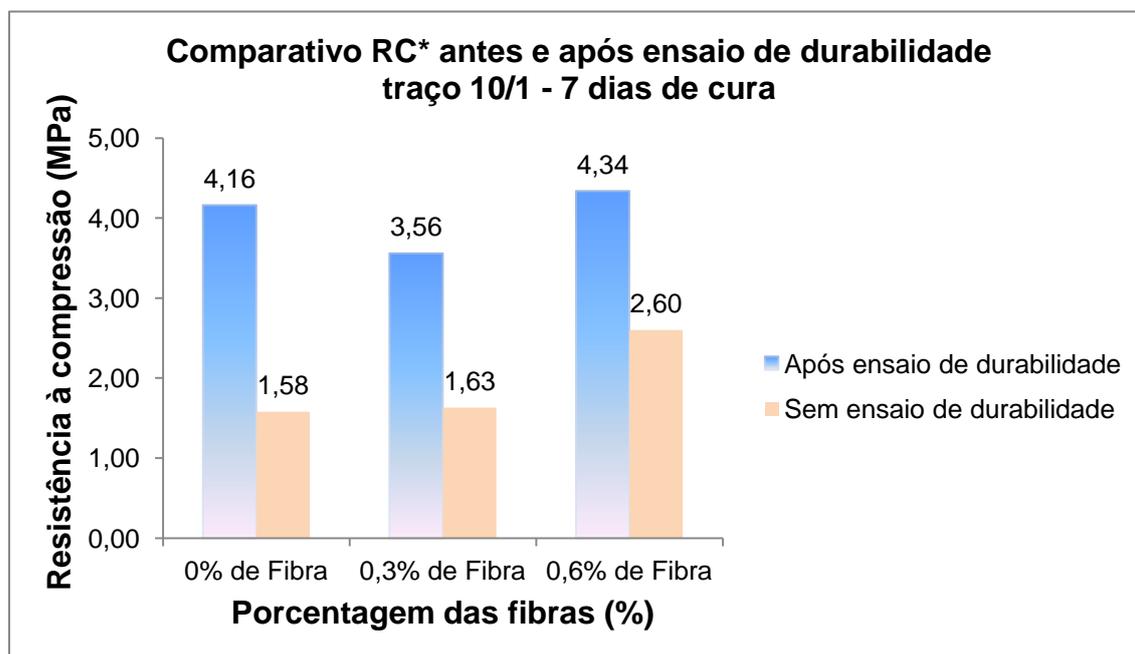
5.3.4.1. Resistência à compressão após o ensaio de durabilidade

Os resultados de resistência à compressão - RC após os ensaios de durabilidade para os traços 7/1 e 10/1 de acordo com os teores 0%, 0,30% e 0,60%, estão expressos nas Figuras 47 e 48. Observa-se que a resistência à compressão obteve um aumento significativo após o ensaio de durabilidade se comparado com os resultados dos corpos de prova sem o ensaio com a idade de 7 dias de cura. Este fato pode ser explicado pelo aumento da condutividade hidráulica favorecida pela superfície irregular dos corpos de prova depois da escovação, culminando em um processo de cura completo. Essa elevação da resistência à compressão é mais intensa nos corpos de prova com maiores teores de cimento, o traço 7/1.



*RC- Resistência à compressão.

Figura 47 - Comparativo da resistência à compressão antes e após o ensaio de durabilidade traço 7/1 – 7 dias de cura.



*RC- Resistência à compressão.

Figura 48 - Comparativo da resistência à compressão antes e após o ensaio de durabilidade traço 10/1 – 7 dias de cura.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como foco avaliar o comportamento das matérias-primas locais para fabricação de solo-cimento com variação nos teores de cimento e adição de fibras de coco babaçu. Os mesmos foram submetidos aos ensaios de compressão, absorção de água e durabilidade. Os ensaios foram realizados de acordo com o tempo de cura e as normas relacionadas com a pesquisa proposta.

Dentro desse contexto são apresentadas, a seguir, as principais considerações obtidas.

→ A partir dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização das matérias-primas utilizadas para execução deste trabalho foi possível determinar o melhor solo a ser incorporado no solo-cimento levando em consideração a granulometria, os limites de consistência, a difração de raios-X e a retração por secagem, sendo escolhido o solo AS8 por ser o mais adequado para processos de estabilização com cimento Portland.

→ Os resultados de difração de raios-X mostraram a presença de constituintes químicos importantes para as reações de hidratação e endurecimento entre o solo e cimento Portland, na presença de água;

→ As fibras de coco babaçu apresentaram elevado potencial para aplicações como reforço em solo-cimento e elevaram a resistência à compressão dos mesmos;

→ Os corpos de prova atenderam às condições mínimas de resistência à compressão e absorção de água aos 28 dias de idade para os diferentes teores de cimento e fibra.

→ Aumento gradativo do teor de cimento melhorou significativamente o desempenho mecânico das misturas de solo-cimento-fibra, sendo que as combinações com 0,30% de fibra levaram aos maiores valores de resistência à compressão simples para o traço 7/1 e 0,60% para o traço 10/1.

→ As fibras atuaram como elementos de reforço, reagindo como obstáculos à propagação de fissuras.

→ Os resultados dos ensaios de absorção de água também se enquadraram nas especificações exigidas pelas normas brasileiras. No traço 7/1 a composição mais adequada foi a de 0,30% de fibra e para o traço 10/1 foi a 0,60% de fibra.

→ Os resultados de resistência à compressão e absorção de água foram melhores para o teor de fibra de 0,30% 7/1 e 0,60% 10/1. Neste aspecto, o melhor custo-benefício foi o traço 10/1 com 0,60% de fibra.

→ Os resultados do ensaio de durabilidade em relação à porcentagem de perda de massa e variação de volume foram superiores ao recomendado pela norma, para as composições com fibra do traço 7/1 e todas as composições do traço 10/1. Vale ressaltar, que os resultados de durabilidade foram comparados com os valores dispostos na norma ABNT NBR 13553/1996 para aplicações de solo-cimento em paredes monolíticas, e não para uma norma voltada para produção de tijolo.

No geral, os resultados obtidos neste estudo permitiram concluir que o material à base de solo-cimento-fibra possui indicativos que o qualificam para o uso na construção civil, mais precisamente para produção de tijolo modular destinado para habitações, e que atende aos requisitos de desenvolvimento sustentável.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa apresentou resultados satisfatórios do solo-cimento para seu emprego na produção de tijolos modulares na construção civil, no entanto, há outros parâmetros que podem ainda ser analisados e estudados de maneira mais aprofundada, neste enfoque, a seguir serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios mecânicos em tijolos modulares de solo-cimento com o melhor resultado obtido em dimensões de utilização na construção civil.
- Realizar ensaio de compactação no solo, para determinação do teor de umidade ótima e massa específica aparente das misturas;
- Avaliar a influência do tipo de solo em busca de outros resultados em termos de resistência à compressão, absorção e durabilidade, uma vez que a escolha do solo é um fator econômico (solos argilosos requerem mais cimento e o contrário menos);
- Analisar a influência dos outros tipos de cimento Portland na estabilização de solos com fibra, pois a composição química do cimento influencia nas reações com o solo;
- Avaliar a absorção de água com adição de fibras para idades superiores a 28 dias de cura;
- Avaliar amostras de solo-cimento quanto à durabilidade por molhagem e secagem sucessivas para idades de cura maiores de 14 dias com e sem fibra;
- Avaliar a influência do comprimento da fibra na mistura solo-cimento.

REFERÊNCIAS

- [1] NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; CEVALLOS, P. S.; HOFFMANN, M. V. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo**. Rede Ibero - americana PROTERRA, 2009. Disponível em: <<http://www.redproterra.org>>. Acesso em: 04/04/11.
- [2] EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 1999. xxvi, 412p.
- [3] LEPSCH, IGO F. **Formação de conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2002.
- [4] EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Definição e notação de horizontes e camadas do solo**. 2.Ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1988. 54p.
- [5] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manuais Técnicos em Geociências: Manual Técnico de Pedologia**. N. 4. 2ª Edição. Rio de Janeiro 2007. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursosnaturais/pedologia/manual_tecnico_pedologia.pdf>. Acesso em: 02/03/11.
- [6] PINHEIRO, R. **Princípios da estabilização dos solos**. Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Disponível em: <http://www.ufsm.br/engcivil/Material_Didatico/TRP1002_Mat_para_infraestrutura_de_transp/notas_de_aula/Estabilizacao_dos_solos.pdf>. Acesso em: 03/03/11.
- [7] MAZEO, F. G. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. DISSERTAÇÃO. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-07072003-160408/pt-br.php>>. Acesso em: 25/02/11.
- [8] ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de engenharia. Departamento de transportes. Disponível em: <http://www.ufrjr.br/institutos/it/deng/rosane/downloads/material%20de%20apoio/APOSTILA_SOLOS.pdf>. Acesso em: 23/04/11.
- [9] MILANI, A. P. S. **Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento- cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica**. Campinas, SP: [s.n.], 2008. Disponível em: <<http://cutter.unicamp.br/document/?code=vtls000435409>>. Acesso em: 10/03/11.
- [10] GRECO, J. A. S. **Solos – Conceitos e Ensaio da Mecânica dos Solos**. Disponível em:

<<http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/Notas%20de%20aula%20solos.pdf>>. Acesso em: 20/03/11.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10833 – Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica**. Rio de Janeiro, 1989. 3p.

[12] PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. Viçosa/MG, 2008. Disponível em: <http://www.dec.ufv.br/modules/mastop_publish/files/files_4cacd6f105645.pdf>. Acesso em: 04/04/11.

[13] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapas interativos – Mapa de solo**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/solos/viewer.htm>>. Acesso em: 05/04/11.

[14] PITTA, M. R. **Como construir: Estabilização com solo-cimento**. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABPC. Ed. 17. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/17/artigo31887-1.asp>>. Acesso em: 20/04/11.

[15] FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos**. Campinas, SP: [s.n.], 2003. Disponível em: <<http://cutter.unicamp.br/document/?code=vtls000318359&fd=y>>. Acesso em: 10/03/11.

[16] LIMA, T. V.; ALEXANDRE, J. **Estabilização de três solos argilosos para a produção de blocos ecológicos (solo-cimento)**. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ENTAC, Salvador [s,n], 2006. Disponível em: <<http://entac.pcc.usp.br>>. Acesso em: 20/04/11.

[17] DIAS DE OLIVEIRA, LUÍS CARLOS. **Estabilização de solos aplicada à habitação, um estudo de misturas solo-cimento**. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&task=view&id=2803&Itemid=178>. Acesso em: 03/04/11.

[18] ENAMORADO, M. A. **Estudo comparativo entre o método mecânico e o método físico-mecânico para dosagem de solo-cimento**. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1990. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&task=view&id=2691&Itemid=178>. Acesso em: 03/04/11.

[19] CASTRO, S. F. **Incorporação de resíduos de caulim em solo-cimento para construções civis**. Dissertação, UFCG, Campina Grande, 2008. Disponível em: <http://www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public_325.pdf>. Acesso em: 11/05/11.

- [20] ROBERTO, F. A. C. **Cimento – Balanço Mineral Brasileiro 2011**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/cimento.pdf>. Acesso em: 03/03/11.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Boletim técnico – Guia básico de utilização do cimento portland**. São Paulo, 2002. Disponível em: http://www.abcp.org.br/conteudo/wpcontent/uploads/2009/12/BT106_2003.pdf. Acesso em: 01/03/11.
- [22] CLÍNQUER DE CIMENTO PORTLAND. Disponível em: http://www.tede.udesc.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1195. Acesso em: 15/04/11.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **A versatilidade do cimento brasileiro**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro>. Acesso em: 14/04/11.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland Comum**. NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland Composto**. NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland de Alto-forno**. NBR 5735. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland Pozolânico**. NBR 5736. Rio de Janeiro, 1991. 6p.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**. NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural**. NBR 13553. Rio de Janeiro, 1996. 2p.
- [30] SILVA, R. S. **Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira**. Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <http://www.pos.dees.ufmg.br/dissertacoes/167.pdf>. Acesso em: 23/02/11.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural**. NBR 10834. Rio de Janeiro, 1994. 3p.
- [32] LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. Campina Grande, 2010.

Disponível em: http://www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public_325.pdf. Acesso em: 11/05/11.

[33] LIMA, S. M. Z.; SANTOS, F. A.; PASSOS, M. E. M. **Utilização de tijolos solo-cimento na construção de casas populares: treinamento de mão-de-obra e resultados**. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENESEP2001_TR19_0369.pdf>. Acesso em: 17/05/11.

[34] CONSTRUÇÃO ECOLÓGICA. **Tijolo de solo-cimento**. Disponível em: <<http://www.construecol.com.br/produto-01.htm>>. Acesso em: 22/06/11.

[35] LIMA, T. V.; ALEXANDRE, J.; ALVES, M. G. **Estabilização de solos argilosos para a produção de blocos ecológicos**. Número 34, Engenharia Civil • UM. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/revista/n34/Pag_15-26.pdf>. Acesso em: 10/04/11.

[36] MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. **Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz**. Eng. Agríc. Jaboticabal, v.26, n.1, p.1-10, jan./abr. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30090.pdf>>. Acesso em: 10/04/11.

[37] MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos solos para fins de Pavimentação**. Juiz de Fora/MG. Capítulo 4, 2011. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/cap4.pdf>>. Acesso em: 02/03/11.

[38] LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6646/000444396.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 25/03/11.

[39] SANTOS, M. P. **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil**. Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/1843/ISMS7VZJYP/1/dissertacao_maxiliano_perdigao_dos_santos.pdf>. Acesso em: 11/05/11.

[40] ALBUQUERQUE, L. Q. C.; BIASCARO, G. A.; NEGRO, S. R. L.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, L. A.; LEAL, S. T. **Resistência à compressão de tijolo de solo-cimento fabricados com o montículo do cupim *Cornitermes cumulans* (Kollar, 1832)**. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 32, n. 2, p. 553-560, mar./abr., 2008. Disponível em: <http://www.editora.ufla.br/site/_adm/upload/revista/32-2-2008_32.pdf>. Acesso em: 28/03/11.

[41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento**. NBR 12253. Rio de Janeiro, 1992. 4p.

- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. NBR 12024. Rio de Janeiro, 1992. 5p.
- [43] KOLLING, E. M. **Avaliação física-mecânica de traços de solo-cimento constituídos com solo argiloso**. UTFPR, Pato Branco/PR, 2010. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/index.php/sicite/2010/paper/.../836/555>>. Acesso em: 02/05/11.
- [44] SAVASTANO, H. JR. **Fibras vegetais para construção civil – fibra de coco**. Boletim técnico, Companhia Cimento Portland Itaú, 1986. Disponível em: <http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BTs_Petreche/BT04-%20Savastano%20Jr..pdf>. Acesso em: 05/05/11.
- [45] SANTOS, A. P. S. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral**. Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3920/000450704.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 25/03/11.
- [46] CABALA, G. V. E. **Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu**. Natal/RN, 2007. Disponível em: <<http://www.gemaa.ifba.edu.br/Dados/Disserta%C3%A7%C3%B5es/Disseta%C3%A7%C3%A3o%20-%20GuilhermoVEC.pdf>>. Acesso em: 05/05/11.
- [47] MILANI, A. P. S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz**. Campinas/SP, 2005. Disponível em: <<http://cutter.unicamp.br/document/?code=vtls000347884&fd=y>>. Acesso em: 03/05/11.
- [48] FERNANDES, M. S. C. **Pisos de argamassa reforçada com partículas de bambu**. Campinas/SP, 2002. Disponível em: <<http://cutter.unicamp.br/document/?code=vtls000271612>>. Acesso em: 03/05/11.
- [49] CAMPOS, E. R. **Desempenho à compressão de compósitos reforçados por fibras de coco**. Aracaju/SE, 2008. Disponível em: <<http://www.skynet.eng.br/projetos/dec/tcc/12855966600951.pdf>>. Acesso em: 03/05/11.
- [50] BARBOSA, V. O. **Na terra das palmeiras: gênero, trabalho e identidades no universo das quebradeiras de coco babaçu no Maranhão**. Salvador/BA, 2007. Disponível em: <http://www.posafro.ufba.br/_ARQ/dissertacao_viviane_barbosa.pdf>. Acesso em: 10/04/11.
- [51] EMMERICH, F. G. **Modelo granular, percolação-resistividade, RSE e módulo de elasticidade de materiais carbonosos: aplicação ao endocarpo de babaçu tratado termicamente até 2200°C**. Campinas/SP, 1987. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/21/042/21042228.pdf>. Acesso em: 04/05/11.

- [52] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo: análise granulométrica – método de ensaio.** NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
- [53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo: determinação do limite de liquidez – método de ensaio.** NBR 6459. Rio de Janeiro, 1984. 6p.
- [54] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo: determinação do limite de plasticidade.** NBR 7180. Rio de Janeiro, 1984. 3p.
- [55] PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. **Utilização de solos arenosos para obtenção de tijolos de solo-cimento.** Revista Industrial. Associação Brasileira de Cerâmica. V 15, N 5-6, SET/DEZ 2010.
- [56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos – método de ensaio.** NBR 12025. Rio de Janeiro, 1990. 2p.
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo-cimento: determinação da absorção d'água – método de ensaio.** NBR 13555. Rio de Janeiro, 1996. 1p.
- [58] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo-cimento: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – método de ensaio.** NBR 13554. Rio de Janeiro, 1996. 3p.
- [59] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural – especificação.** NBR 13553. Rio de Janeiro, 1996. 2p.
- [60] GESTÃO AMBIENTAL . **Habitação social com tijolo de solo-cimento, como elemento estruturador do desenvolvimento sustentável de João Dourado (BA).** Revista Brasileira de Ciências Ambientais, Nº 4, 2006. Disponível em: <http://www.rbciamb.com.br/images/online/04_artigo_5_artigos91.pdf>. Acesso em: 10/04/11.
- [61] MICROLAB. **Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV/Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X – EDS.** Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>>. Acesso em: 27/06/11.