

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE TIJOLO  
ECOLÓGICO MODULAR DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO  
DE RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DE PAPEL

**WELLINGTON FERNANDES JUNIOR**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
AGOSTO/2017



AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE TIJOLO  
ECOLÓGICO MODULAR DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO  
DE RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DE PAPEL

**WELLINGTON FERNANDES JUNIOR**

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

Orientador: D. Sc. Jonas Alexandre

Co-orientador: D. Sc. Sergio Rafael Cortes de Oliveira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO/2017

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

65/2017

Fernandes Junior, Wellington

Avaliação das propriedades tecnológicas de tijolo ecológico modular de solo-cimento com incorporação de resíduo da fabricação de papel / Wellington Fernandes Junior. – Campos dos Goytacazes, 2017.

xj, 53 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2017.

Orientador: Jonas Alexandre.

Coorientador: Sérgio Rafael Cortes de Oliveira.

Área de concentração: Estruturas.

Bibliografia: f. 45-53.

1. SOLO-CIMENTO 2. RESÍDUOS DE PAPEL - REAPROVEITAMENTO 3. TIJOLO ECOLÓGICO 4. MODULAR I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 624.183

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE TIJOLO  
ECOLÓGICO MODULAR DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO  
DE RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DE PAPEL

**WELLINGTON FERNANDES JUNIOR**

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

Aprovado em 29 de agosto de 2017.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Frederico Muylaert Margem (D.Sc), UniREDENTOR

---

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira (D.Sc), UENF

---

Prof. Gustavo de Castro Xavier (D.Sc), UENF

---

Prof. Sergio Rafael Cortes de Oliveira (D.Sc), IFF  
Co-orientador

---

Prof. Jonas Alexandre (D.Sc), UENF  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

Nunca poderia me esquecer de agradecer a diversas pessoas que me ajudaram, de forma direta e indireta, na conclusão deste difícil trabalho:

Primeiramente agradeço ao meu Senhor e Rei Jesus Cristo, o principal responsável por eu estar aqui! Sem Ele, nada disso seria possível;

À minha família, em especial aos meus pais Wellington e Verônica, meus irmãos Victor e Lucas, minhas avós Enagede e Neiva e minha Namorada Thaís, que entenderam momentos de ausência ou de dificuldades e sempre estiveram ao meu lado me apoiando;

Ao meu orientador, Professor Jonas Alexandre, por ter me conduzido no mestrado, querendo que eu aproveitasse cada segundo dentro do mestrado para absorver algum tipo de conhecimento;

Ao meu co-orientador, Professor Sergio Rafael, pelo orientação e apoio, além de sua competência e especial atenção nas sugestões, fatores fundamentais para a conclusão deste trabalho.;

Ao Professor Gustavo Xavier, pela paciência e ajuda em sanar problemas e orientações;

Ao professor Carlos Mauricio, pelo aprendizado, apoio, incentivo e sugestões do material trabalhado;

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil pelo apoio técnico excepcional, em especial o Milton, pela disponibilidade e boa vontade, que o fez muitas vezes um verdadeiro amigo. Serei sempre grato a ele;

Ao Gelcimar, técnico do Laboratório de Argamassa e Materiais Cerâmicos pela amizade e apoio, por estar sempre disposto a ajudar na execução deste trabalho, principalmente até tarde da noite e nos finais de semana;

Aos meus amigos do Laboratório de Argamassa e Materiais Cerâmicos, pelos momentos divididos juntos, que tornaram mais leve meu trabalho. Obrigado por dividir comigo as angústias e alegrias e ouvirem minhas bobagens. Foi bom poder contar com vocês!;

Aos inúmeros amigos que conheci durante o curso e durante meus dois anos na UENF, que sempre me ajudaram em momentos difíceis e incentivaram na conclusão deste curso;

À FAPERJ e CAPES pelo apoio financeiro na execução deste trabalho;

À Cia Paduana de Papeis – COPAPA, que prontamente nos ajudou e forneceu o material necessário a pesquisa.

# SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT .....	xi
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.2.1 Objetivo geral .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 JUSTIFICATIVA .....	3
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 SOLOS .....	4
2.1.1 Estabilização dos solos .....	5
2.1.2 O solo-cimento .....	9
2.2 RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DE PAPEL .....	12
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>14</b>
3.1 MATERIAIS .....	14
3.1.1 Solo .....	14
3.1.2 Cimento Portland.....	14
3.1.3 Areia .....	16
3.1.4 Resíduo da fabricação de papel.....	16
3.1.5 Água.....	16
3.2 MÉTODOS .....	17
3.2.1 Caracterização dos materiais .....	17
3.2.1.1 Caracterização física .....	17
Análise granulométrica .....	17
Limites de Atterberg .....	18
Massa específica real dos grãos .....	18
3.2.1.2 Caracterização química.....	18
Espectroscopia de raios X (EDX) .....	18
3.2.1.3 Índice de atividade pozolânica do resíduo.....	19
3.2.2 Definição dos traços .....	20
3.2.3 Determinação da umidade ótima.....	20

3.2.3.1 Ensaio de compactação .....	21
3.2.3.2 Força de prensagem .....	22
3.2.4 Confeção dos tijolos .....	23
3.2.5 Prensagem dos tijolos .....	23
3.2.6 Ensaio tecnológicos.....	25
3.2.6.1 Absorção de água .....	25
3.2.6.2 Resistência à compressão .....	25
3.2.6.3 Durabilidade .....	27
<b>CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS MATERIAIS .....	27
4.1.1 Caracterização física e química do cimento .....	27
4.1.2 Caracterização física dos agregados .....	28
4.1.2.1 Análise granulométrica .....	28
4.1.2.2 Limites de Atterberg .....	29
4.1.2.3 Massa específica real do grãos.....	30
4.1.3 Caracterização química dos agregados .....	30
4.1.4 Índice de atividade pozolânica do resíduo.....	31
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TRAÇOS.....	31
4.2.1 Análise granulométrica.....	31
4.2.2 Limites de Atterberg .....	32
4.2.3 Massa específica real do grãos.....	32
4.2.4 Compactação .....	33
4.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE ÓTIMA DE MOLDAGEM.....	33
4.4 FORÇA DE PRENSAGEM.....	37
4.5 GRAU DE EMPACOTAMENTO DOS TIJOLOS .....	38
4.6 ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	39
4.6.1 Absorção de água .....	39
4.6.2 Resistência à compressão .....	40
4.6.3 Durabilidade .....	42
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>44</b>
<b>CAPÍTULO 7 - BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>45</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Resíduo da fabricação de papel cedido pela COPAPA.....	16
Figura 3.2 – Fluxograma das etapas de caracterização dos materiais .....	17
Figura 3.3 – Equipamento Shimadzu EDX-700.....	18
Figura 3.4 – Ensaio de condutividade .....	19
Figura 3.5 – Corpos de prova cilíndricos produzidos com diferentes umidades .....	21
Figura 3.6 – Execução do ensaio de compactação Proctor Normal.....	22
Figura 3.7 – Ensaio de Compactação Proctor Normal .....	22
Figura 3.8 – Manômetro da prensa hidráulica .....	22
Figura 3.9 – Prensa hidráulica 7000 Turbo II da Ecomáquinas.....	22
Figura 3.10 – Misturador .....	23
Figura 3.11 – Blocos após moldagem.....	24
Figura 3.12 – Transporte dos tijolos imediatamente após moldagem .....	24
Figura 3.13 – Câmara úmida para cura dos tijolos.....	24
Figura 3.14 - Indicação de umidade e temperatura no interior da câmara úmida ....	24
Figura 3.15 – Secagem dos tijolos em estufa.....	25
Figura 3.16 – Saturação dos tijolos .....	25
Figura 3.17 – Regularização das superfícies dos tijolos .....	26
Figura 3.18 – Capeamento dos tijolos.....	26
Figura 3.19 – Saturação dos tijolos capeados.....	26
Figura 3.20 – Realização do ensaio de resistência à compressão.....	26
Figura 3.21 – Corpos de prova cilíndricos para ensaio de durabilidade.....	27
Figura 4.1 – Curva umidade x densidade do traço T0.....	34
Figura 4.2 – Curva umidade x densidade do traço T1.....	34
Figura 4.3 – Curva umidade x densidade do traço T2.....	35
Figura 4.4 – Curva umidade x densidade do traço T3.....	36
Figura 4.5 – Curva umidade x densidade do traço T4.....	36
Figura 4.6 – Relação densidade x força de prensagem .....	38
Figura 4.7 – Absorção de água dos tijolos .....	40
Figura 4.8 – Resistência à compressão dos tijolos .....	41
Figura 4.9 – Perda de massa dos traços.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros para caracterização do cimento .....	15
Tabela 3.2 – Traços produzidos .....	20
Tabela 4.1 – Caracterização física e química do cimento .....	28
Tabela 4.2 – Análise granulométrica dos materiais .....	29
Tabela 4.3 – Limites de Atterberg dos materiais .....	29
Tabela 4.4 – Massa específica real dos materiais.....	30
Tabela 4.5 – Espectroscopia de raios-X dos materiais .....	30
Tabela 4.6 – Classificação de atividade pozolânica .....	31
Tabela 4.7 – Análise granulométrica dos traços.....	32
Tabela 4.8 – Limites de Atterberg dos traços .....	32
Tabela 4.9 – Massa específica real dos traços .....	33
Tabela 4.10 – Compactação Proctor Normal dos traços .....	33
Tabela 4.11 – Umidade de moldagem dos tijolos.....	37
Tabela 4.12 – Massa específica dos materiais.....	38
Tabela 4.13 – Densidade dos tijolos .....	38
Tabela 4.14 – Grau de empacotamento dos tijolos .....	39
Tabela 4.15 – Valores médios de absorção de água de cada tempo de cura.....	39
Tabela 4.16 – Valores médios de resistência à compressão dos tijolos .....	41

## RESUMO

O uso de blocos de solo-cimento é considerado um método construtivo mais barato do que o convencional, visto que uma das matérias-primas, o solo, é abundante. Soma-se a isto, o fato de não haver uma destinação correta para o resíduo proveniente da fabricação de papel. Visando redução de custo de produção de tijolos de solo-cimento e uma alternativa sustentável para aproveitamento do resíduo, a proposta do presente trabalho é avaliar a incorporação do resíduo da fabricação de papel na mistura solo-cimento para confecção de tijolos modulares prensados com dimensões de 30cmx15cmx7cm. Foram testadas diferentes proporções de solo e resíduo, mantendo sempre a mesma massa de cimento. Foram realizados ensaios de durabilidade aos 7 dias de cura e absorção de água e resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias de cura. Os resultados foram analisados a fim de verificar a viabilidade da incorporação do resíduo nos tijolos em maior quantidade possível, obedecendo às exigências impostas pelas normas regulamentadoras de blocos de solo-cimento. Foi concluído que a incorporação do resíduo, em quantidades adequadas, é viável na produção de tijolos de solo-cimento, reduzindo o custo da produção, além de diminuir os impactos ambientais com o destino correto do resíduo.

**Palavras-chave:** Solo-cimento; Resíduo de fabricação de papel; Tijolo ecológico; Modular.

## ABSTRACT

The use of soil-cement bricks is considered a cheaper construction method than conventional, since one of the raw materials, the soil, is abundant. Added to this is the fact that there is not a correct destination for the waste from papermaking. Aiming to reduce the production cost of soil-cement bricks and a sustainable alternative for the use of the waste, the purpose of this work is to evaluate the incorporation of the papermaking residue in the soil-cement mixture for the manufacture of compressed modular bricks with dimensions of 30cmx15cmx7cm. Different proportions of soil and residue were tested, the same cement mass was always maintained. Water absorption and compressive strength tests were performed at 7, 14 and 28 days of cure and durability at 7 days of cure. The results were analyzed in order to verify the viability of the incorporation of the residue in the bricks as much as possible, obeying the requirements imposed by the regulation regulations of soil-cement blocks. It was concluded that the incorporation of the waste, in adequate quantities, is feasible in the production of soil-cement bricks, reducing the cost of production, besides reducing the environmental impacts with the correct destination of the waste.

**Keywords:** Soil-cement; Waste from papermaking; Ecological brick; Modular.

## **1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O Brasil passa por uma grave crise financeira e um dos setores mais afetados é o da construção civil, em que há inúmeras obras paralisadas. Isso se deve à falta de consumidores também afetados pela crise e, conseqüentemente, por falta de dinheiro das construtoras que estão sem consumidores. Uma das alternativas para driblar a crise é a redução de despesas nas obras, mas isso acarretaria em uma mão de obra menos qualificada e materiais de má qualidade. Numa obra, de 4% a 8% do valor total é gasto com alvenaria. Essa alvenaria é feita com tijolos cerâmicos, que apesar do baixo custo, necessitam de grandes quantidades de argamassa para assentamento, chapisco, emboço e reboco, elevando, assim, o custo do metro quadrado da alvenaria acabada. Há também o problema ambiental relacionado à alvenaria, em que os tijolos necessitam ser calcinados, assim como o processo de fabricação do cimento utilizado na argamassa para assentamento e acabamento da alvenaria, o que gera grande poluição ambiental.

Atualmente, outro grande problema ambiental é o descarte de resíduos sólidos. A evolutiva degradação ambiental e a carência dos recursos naturais causadas não só pela exploração indiscriminada, mas, principalmente, pela disposição inadequada de resíduos das atividades humanas no ambiente, e a busca por alternativas visando reverter essa situação são os temas dentre os mais discutidos atualmente. Ao atuar sem o licenciamento ambiental, a empresa torna-se alvo dos órgãos regulatórios e de fiscalização, os quais têm plenos poderes para autuar os estabelecimentos, aplicando multas ou sanções mais graves, e para interditar a atividade, caso as irregularidades persistam (Associação Brasileira de Celulose e Papel - BRACELPA, 2011).

A Companhia Paduana de Papéis (COPAPA), localizada na cidade de Santo Antônio de Pádua, na região noroeste do estado do Rio de Janeiro, é uma empresa que utiliza papel reciclado, celulose semi-processada e celulose branqueada 100% virgem para fabricar papéis tissue. Sua produção representa mais de 50% de toda a produção de papel para fins sanitários do estado do Rio de Janeiro, caracterizando-a como a maior produtora do estado, gerando assim uma razoável quantidade de resíduos (COPAPA, 2017).

A produção de resíduos pelas indústrias de papel e celulose vem crescendo continuamente, gerando gastos com estocagem ou aumentando os impactos

ambientais, visto que estes materiais são destinados aos aterros. O aproveitamento desses resíduos como material de construção para a produção de novas tecnologias para a construção civil representa a minimização dos danos ambientais. Soma-se a isso o fato de que o uso de blocos de solo-cimento é considerado um método construtivo mais barato do que o convencional, visto que uma das matérias-primas, o solo, é abundante (RODRIGUES, 2008).

Visando a redução de custos na construção civil, mas permanecendo com as mesmas especificações de qualidade impostas pelas normas técnicas brasileiras e, ao mesmo tempo, uma alternativa sustentável para destinação do resíduo da fabricação de papel, neste trabalho propõe-se a incorporação do resíduo da indústria do papel na fabricação de tijolos modulares prensados de solo-cimento com dimensões de 30cmx15cmx7cm. O tijolo de solo-cimento incorporado com resíduo da fabricação de papel é um material alternativo para a construção civil, de baixo custo, visto que o solo e o resíduo atualmente estão disponíveis e sem custos. Sendo viável, esta possibilidade torna-se uma importante alternativa para construção civil, podendo, com maquinários simples, produzir tijolos no próprio local, e minimizando a degradação do meio ambiente, uma vez que todo o resíduo poderá ser destinado à produção destes blocos, uma solução ecologicamente mais adequada.

## **1.2 - OBJETIVOS**

### **1.2.1 – Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade da incorporação de resíduo de fabricação de papel em tijolos de solo-cimento como alternativa para uso na construção civil, considerando os parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

### **1.2.2 – Objetivos específicos**

- Caracterizar física e quimicamente os materiais;
- Identificar proporções de cimento e resíduo da fabricação de papel a serem adicionadas ao solo, de forma que promovam melhorias nas propriedades físico-mecânicas dos tijolos;

- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos de solo-cimento com a incorporação de resíduo da fabricação de papel a partir das exigências das normas da ABNT para blocos de solo-cimento convencional;
- Estudar a durabilidade dos tijolos de solo-cimento incorporados com resíduos de celulose, através de ciclos de molhagem e secagem.

### **1.3 – JUSTIFICATIVA**

Há tempo inúmeros setores produtivos têm se preocupado com a sustentabilidade, no que se refere a qualidade de vida da população atual e das futuras gerações. O uso inadequado dos recursos naturais e o desperdício de matérias-primas disponíveis, a mão-de-obra ociosa e desvalorizada e os altos custos de produção, têm sido alvos das grandes discussões e debates na comunidade científica.

A indústria da construção civil evidencia um grande potencial na reciclagem de resíduos de outros segmentos industriais, segundo pode ser apurado em diversos temas de estudo nos principais centros de pesquisas do país, inclusive na Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, com posição de destaque neste setor.

Assim, a incorporação do resíduo da fabricação de papel no solo-cimento na produção de tijolos alternativos para a construção civil é justificada pelos seguintes fatores:

- Aproveitamento de resíduos sólidos industriais em processos produtivos com a dispensa do processo de queima, que é uma questão ambiental de expressiva importância;
- Considerável redução do valor final do insumo, visto que não é necessário mão de obra especializada e gastos com calcinação;
- Disponibilidade de resíduo devido à grande produção de papel;
- Grande disponibilidade de matéria-prima;
- Utilização de equipamentos simples e que ocupam pouco espaço físico, não sendo necessário uso de grandes espaços.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – SOLOS

Os solos são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas por desintegração mecânica ou decomposição química. Por desintegração mecânica, através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, formam-se os pedregulhos e areias (solos de partículas grossas) e até mesmo os siltes (partículas intermediárias) e, somente em condições especiais, as argilas (partículas finas). Por decomposição química entende-se o processo em que há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. O principal agente é a água e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o último produto do processo de decomposição. Normalmente esses processos atuam simultaneamente; em determinados locais e condições climáticas, um deles pode ter predominância sobre o outro. O solo é, assim, uma função da rocha-mãe e dos diferentes agentes de alteração. Os que mantêm uma nítida macroestrutura herdada da rocha da origem são designados por solos saprolíticos (CAPUTO, 1988).

O solo pode ter inúmeras definições, de acordo com cada ciência que o estuda. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1999), o solo é uma coleção de corpos naturais, que possui três fases (sólida, líquida e gasosa), que forma a maior parte do manto superficial das extensões continentais. Ele pode ser vegetado e conter matérias vivas, podendo também ser modificado pela ação humana.

De acordo com Pinto (1998), os solos podem ser definidos por um conjunto de partículas sólidas provenientes da desagregação de rochas por ações físicas e químicas, com água (ou outro líquido) e ar, ou ainda ambos, em seus espaços intermediários. Assim, é definido por Blücher (1951), uma estrutura porosa, sendo que as partículas, de maneira geral, se encontram livres para se deslocarem. O comportamento dos solos depende dessa movimentação das partículas sólidas entre si, o que altera as porcentagens em volume das suas fases constituintes.

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



O solo é um dos materiais mais abundantes no planeta, de tal sorte que sua utilização, como material de construção, remonta aos tempos mais primitivos (FERREIRA, 2003).

### **2.1.1 – Estabilização dos solos**

A utilização do solo como material de construção pode ocorrer tanto na forma como ele é encontrado (solo natural) ou decorrida a correção de algumas de suas propriedades de engenharia. Para essa correção podem ser empregados diversos métodos, entre os quais são citados a correção granulométrica e a adição de compostos químicos (FERRAZ *et al.*, 2000).

A aplicação do solo natural só é possível em local onde o mesmo seja de boa qualidade, isto é, que atenda aos requisitos da engenharia para o tipo de aplicação previsto. A correção granulométrica e a estabilização química englobam os casos de regiões de solos impróprios em que o uso dos processos de estabilização pode ser uma boa opção para tornar o solo apto para emprego como material de construção (FERRAZ *et al.*, 2000).

A estabilização do solo é um processo natural e artificial, pelo qual o solo, sob efeito de cargas aplicadas, torna-se mais resistente à deformação e ao deslocamento do que o solo original. Esse processo consiste em modificar as características naturais do solo com a finalidade de se obter propriedades físico-mecânicas resistentes e de longa duração (FERREIRA *et al.*, 2005).

A estabilização de solos através da incorporação de aditivo como o cimento, constitui um processo de tratamento com base em reações químicas entre as partículas do solo, a água e os materiais adicionados, resultando alterações no solo e originando um novo material com características diferentes e necessariamente aproximadas do que se pretende para a confecção de materiais para construção civil e rural (MILANI, 2008).

A utilização do cimento na estabilização do solo iniciou-se com a aplicação na pavimentação de estradas e rodagens. Hoje, o cimento está sendo utilizado como agente estabilizador do solo na produção de materiais para a construção civil e rural de baixos custos e uso ecológico (MONTE, 2012).

Segundo Cristelo (2001), o cimento é utilizado como agente estabilizador do solo plástico ou não plástico, com teores de água suficientemente elevados, para não

impedir a adequação aos trabalhos com solo-cimento. A utilização do cimento na estabilização de solos tem como objetivo melhorar as características físicas e mecânicas e maior estabilidade relativa à variação do teor de água. Na estabilização de solos, os cimentos de tipos Portland são os mais utilizados, embora praticamente todos os tipos de cimento possam ser utilizados. O cimento deve estar conforme às especificações que o caracterizam, devendo ser de qualidade e em ótimo estado.

O cimento Portland é uma substância alcalina composta na sua maior parte por silicatos e aluminatos de cálcio que durante a reação com água liberam hidróxidos de cálcio, dando origem a compostos cristalinos hidratados e gel. Esses compostos cristalinos criam estruturas que dão resistência ao material, enquanto que o gel do cimento se desenvolve espontaneamente sobre a superfície mineral, ligando-se aos íons de oxigênio exposto nos silicatos e incorporando íons de cálcio livre a uma superestrutura formada pelo agrupamento de silicatos (FERREIRA, 2003).

A reação do cálcio livre liberado durante o processo de hidratação do cimento provoca a agregação do solo-cimento. Uma das mais importantes características do cimento é a condutibilidade elétrica das suas partículas apresentada na 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 agregados (FERREIRA, 2003). As partículas de cimento envolvem os grânulos do solo formando agregados aumentando de tamanho à medida que se processa a hidratação e a cristalização do cimento. A estabilidade do solo-cimento ocorre principalmente com a hidratação do cimento e não pela coesão e atrito interno dos componentes, assim sendo, pode-se utilizar todos os tipos de solo e combinações de solo para a mistura de solo-cimento. Os solos finos necessitam de maior percentual de cimento que os solos granulares, por apresentarem maior superfície específica (FERREIRA, 2003).

SENÇO (2001) relata que a estabilização de solos pode ser obtida simplesmente pela adequada distribuição das diversas porções de diâmetros dos grãos (estabilização granulométrica). A distribuição das porções de tamanhos diferentes é tal que os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelos grãos médios, e os vazios destes, pelos miúdos.

A estabilização da mistura solo-cimento é influenciada por inúmeros fatores que condicionam as propriedades físicas dos solos estabilizados com cimento, tratados adiante. O cimento exerce a função de estabilização conforme o teor utilizado na

mistura. Quando os teores de cimento são altos ocorre um efeito preponderante que consiste no aumento de resistência mecânica devido à ação aglutinante do aditivo e quando os teores de cimento são baixos consiste fundamentalmente na alteração da fração argilosa do solo, na diminuição da plasticidade e podendo ocorrer uma redução na resistência mecânica (CRISTELO, 2001).

➤ O tipo de solo

Todos os tipos de solo podem ser estabilizados com cimento Portland, dependendo dos aspectos físico-químicos do solo e do cimento, sob as condições de avaliação de distribuição granulométrica, Limite de Liquidez e de Plasticidade, Índice de Plasticidade e teor de umidade ótima de compactação para se obter um bom desempenho físico-mecânico e durabilidade do produto final (DELGADO e GUERRERO, 2007).

Milani (2005) durante a pesquisa sobre a estabilidade de um solo argiloso observou-se que os solos com Índice de Plasticidade e Limite de Liquidez elevados dificultam a estabilização do solo, por isso, requerem teores elevados de cimento para que a mistura de solo-cimento possa atingir a resistência mínima para fins de utilização como tijolos prensados. Quando a granulometria do solo não é adequada para a estabilização com cimento, pode-se corrigi-la adicionando-se outros tipos de solos.

Sousa e Barbosa (2000) trabalharam com solo arenoso. Para que esse solo conferisse coesão para moldagem de tijolos de solo-cimento, foi necessário adicionar solos finos contendo silte e argila.

Segundo a ABCP (1985) *apud* FERREIRA (2003), os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, mas sendo necessária a presença de argila na sua composição, visando dar a mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas.

➤ Presença no solo de materiais nocivos ao cimento

Segundo Marques (2010), a presença de matéria orgânica no solo afeta a hidratação do cimento, devido à absorção dos íons do cálcio que resulta queda no PH da mistura e aos sulfatos encontrados nas águas do solo que combinam com o aluminato tricálcio do cimento hidratado formando o sulfoaluminato de cálcio que provoca queda de ligações cimentícias.

➤ Teor de cimento

O teor de cimento depende do tipo de solo a ser utilizado na mistura solo-cimento. Quanto maior for o percentual de silte e argila, maior será o teor de cimento exigido na mistura. Para se obter o teor ideal de cimento para um determinado tipo de solo, deve-se recorrer aos procedimentos de dosagens (MARQUES, 2010). Segundo Milani (2008), o teor de cimento a ser adicionado ao solo depende de critérios técnicos (resistência e durabilidade) e critérios econômicos que se pretende alcançar para o produto final. Sendo que, a resistência do solo aumenta em função do aumento do teor de cimento, dependendo do tipo de solo utilizado na mistura solo-cimento. Isso ocorre devido às alterações físico-químicas produzidas pela interação entre as partículas do solo e as do cimento hidratado. A determinação do teor de cimento para a estabilização do solo apresenta algumas complexidades. O aumento do teor de cimento faz com que a resistência seja mais elevada, mas a utilização de cimento em quantidades superiores às necessárias para a mistura de solo-cimento apresenta inconveniências técnicas e econômicas (MARQUES, 2010).

➤ Teor de umidade da mistura solo-cimento

Para as misturas de solo-cimento é necessário um teor de umidade que conduza à massa específica seca máxima para uma dada energia de compactação. Mellace *et al.* (2002), com o objetivo de determinar o teor de umidade das misturas de solo-cimento, investigaram dois tipos de solos, um solo arenoso e outro siltoso, ambos com baixa plasticidade. Os solos foram estabilizados com cimento Portland na proporção em volume de 1:10 para fabricação de blocos prensados com dois teores de umidade para moldagem (16% e 22%). Após 28 dias de cura, os blocos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples e à tração na compressão diametral e os valores obtidos nos ensaios, segundo os autores, foram influenciados pelos tipos de solo e pela relação água/solo-cimento utilizada na compactação, sendo que a umidade de moldagem próxima ao teor de umidade ótima da mistura apresentou maiores valores de resistência.

➤ Processo de compactação

O processo de compactação da mistura solo-cimento é um fator muito importante para o desempenho físico-mecânico, pois na compactação pode-se trabalhar umidades de moldagem em torno do teor ótimo, pois as umidades ótimas oferecem a máxima densidade do sistema solo-cimento e, conseqüentemente, maior resistência. Quanto maior for o efeito da estabilização do solo, menor será a perda de massa (MILANI, 2008).

➤ Tempo e condições de cura

A mistura solo-cimento na produção de materiais para construção civil e rural ganha resistência por processo de cimentação das partículas durante o período de cura. No período de cura deve ser garantido um teor de umidade adequado à mistura solo-cimento compactada (MARQUES, 2010).

### **2.1.2 – O solo-cimento**

O solo-cimento é um material alternativo de baixo custo, obtido pela mistura de solo, cimento e água. Há registros que esse tipo de mistura tem sido utilizado na construção civil há mais de dez mil anos, com menor impacto ambiental, diferente dos tijolos comuns em que os principais impactos estão relacionados à matéria-prima, fontes energéticas, geração de resíduos e emissões de CO<sub>2</sub>. O solo-cimento vem conquistando seu espaço com tecnologia alternativa por ter como o principal componente da mistura – o solo – em abundância na natureza e também por não exigir mão de obra qualificada. Apresenta boas condições de conforto, comparáveis às construções de alvenaria de tijolos e/ou blocos cerâmicos, não oferecendo condições para instalações e proliferações de insetos nocivos à saúde pública, atendendo às condições mínimas de habitabilidade. É um material de boa resistência e perfeita impermeabilidade, resistindo ao desgaste do tempo e à umidade, facilitando a sua conservação (RODRIGUES, 2008).

No início, a mistura solo-cimento parece uma “farofa úmida”, mas após compactação e cura úmida, resulta num produto com características de durabilidade e resistência mecânica definidas. A massa compactada endurece com o tempo, e em poucos dias ganha consistência e durabilidade suficientes para diversas aplicações na construção civil, indo de paredes e pisos até muros de arrimo. Os solos adequados são os chamados solos arenosos, e devem ter as seguintes características granulométricas:

- Argila  $\leq 20\%$ ;
- $10\% \leq$  Silte  $\leq 55\%$ ;
- $45\% \leq$  Areia  $\leq 90\%$ ;
- Passar 100% do material na peneira n° 4 (4,8 mm);
- Passar de 10% a 50% do material na peneira n° 200 (0,075 mm);
- Limite de Liquidez  $\leq 45\%$ ;
- Índice de Plasticidade  $\leq 18\%$ .

De acordo com Neto (2010), é conhecido apenas por tijolo, mas há alguns anos mais uma palavra foi acrescentada ao seu nome: ecológico. Em tempos de sustentabilidade ambiental, o tijolo ecológico ou tijolo modular destaca-se por apresentar uma menor agressão ao meio ambiente na sua fabricação.

Os tijolos ecológicos são assim chamados por permitirem o uso de areia, resíduos de usinas siderúrgicas e petroquímicas que, através do emprego de cimento e água, geram peças padronizadas e altamente resistentes. Por não usar o barro vermelho (matéria-prima tradicional dos tijolos convencionais), evita-se também a degradação do meio ambiente causada por sua extração. A grande vantagem logística destes tijolos é que podem ser fabricados e armazenados na própria obra.

Outra vantagem referente à questão ecológica é que o processo de produção dos tijolos não necessita de fornos. Este fato gera grande economia energética e evita que muitas florestas sejam destruídas para a obtenção da lenha. Os tijolos ecológicos, como os tijolos de solo-cimento, servem para todos os padrões sociais e vêm sendo cada vez mais difundidos.

Segundo estudos realizados em todo o Brasil, o sistema construtivo dos tijolos ecológicos traz para a obra de 20% até 40% de economia com relação ao sistema construtivo convencional. Um dos motivos é que não há desperdício, como neste último. “Hoje em uma obra convencional cerca de 1/3 do material vai para o lixo” (NETO, 2010).

O tijolo ecológico modular de solo-cimento tem como diferencial o reaproveitamento de resíduos de outros processos e atividades que são utilizados como sua matéria-prima. Esses rejeitos são provenientes muitas vezes do próprio segmento da construção civil.

São muitas as vantagens acerca do tijolo de solo-cimento, a começar por sua fabricação que é uma tecnologia alternativa de baixo custo e de fácil implementação,

que possibilita a utilização de solo como um de seus componentes, que é um elemento em abundância na natureza. O solo pode ser adquirido muitas das vezes no próprio local da obra ou próxima a ela, o que implica na economia do transporte. Esse material é que entra em maior proporção na composição, devendo ser escolhido e misturado de maneira a proporcionar o uso de menor quantidade possível de cimento (LOPES, 2002).

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

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

Segundo Milani (2008), o solo-cimento como material de construção tem se destacado na forma de blocos ou tijolos prensados e seu processo de fabricação passa pelas fases de destorroamento, peneiramento e secagem do solo, mistura homogênea do solo com o cimento e uma quantidade adequada de água. A prensagem é feita em prensa mecânica ou manual. Os blocos ou tijolos devem ser molhados três ou quatro vezes ao dia durante uma semana.

Em publicação da ABCP (1985), cita-se que os blocos ou tijolos de solo-cimento apresentam as seguintes vantagens:

- Podem ser produzidos no próprio local do solo;
- Requerem argamassa e revestimento de espessuras mínimas e uniformes;
- O revestimento pode ser dispensado, desde que seja protegido da ação direta da água.

A possibilidade da fabricação dos blocos na própria construção, como já mencionado, gera diminuição de custo no transporte e economia de combustível. Os tijolos de solo-cimento possuem aparência regular, dispensando o uso de revestimentos. Em construções com esse material não há necessidade de mão-de-obra especializada. Uma boa dosagem, seguida de uma compactação bem executada e uma boa cura do cimento, faz do bloco em solo-cimento uma alternativa simples e

econômica para a habitação. Outra grande vantagem dos blocos prensados é o formato de encaixe do tipo macho e fêmea, o que acelera o processo de montagem e diminui o desperdício, pois as tubulações podem ser embutidas, passando entre os furos, evitando os rasgos nas paredes.

Os processos de moldagem dos blocos podem ser feitos por prensas hidráulicas, mecânicas ou manuais. A produtividade e a qualidade de prensagem são fatores importantes que diferenciam tais equipamentos. A prensagem, usando um equipamento manual, dependendo da demanda, pode comprometer todo o processo e o cronograma de obra; uma alternativa é o uso pelo equipamento automatizado, que possui características que garantem uma melhor uniformidade da peça, já que a força de prensagem é mecânica ou hidráulica.

## **2.2 – RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DE PAPEL**

Resíduo gerado seja pela atividade industrial ou doméstica, que não tem um destino correto ou definido não deve ser jogado em qualquer lugar, sem o devido tratamento ou cuidado prévio. Segundo as novas diretrizes ambientais vigentes no Brasil, instituída pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, as indústrias geradoras são as responsáveis pelo seu correto destino, seja colocando-os em aterros sanitários ou utilizando-os em outra cadeia industrial. É neste sentido que pesquisas que dão uma finalidade adequada e ambientalmente correta para estes resíduos sólidos é fundamental para o desenvolvimento da cadeia produtiva no Brasil. De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são classificados em três classes:

- Resíduos classe I – Perigosos: São aqueles que apresentam riscos à saúde pública em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Resíduos classe II A – Não inertes. Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B- Inertes, nos termos da referida norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou



deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

No Brasil, a indústria de celulose e papel é uma das mais promissoras áreas de negócio, ocupando atualmente a quarta posição no ranking dos maiores produtores mundiais de celulose (Instituto Brasileiro de Árvores - IBÁ, 2013).

O IBÁ (2013) relatou que o Brasil alcançou a quarta posição no ranking dos maiores produtores mundiais de celulose, ultrapassando países como Japão, Suécia e Finlândia, além de ser um dos nove maiores produtores de papel do mundo. Os volumes de papel e celulose produzidos em 2016 merecem destaque. No total, foram 18.773.000 toneladas de celulose e 10.335.000 toneladas de papel com crescimento de 14,47% e 3,66%, respectivamente, em relação ao montante produzido em 2015 (IBÁ, 2017).

Na fabricação de papel ocorre a geração de um resíduo em forma líquida com alto teor de sólidos em suspensão. Esse líquido é submetido a um tratamento primário e desaguamento, gerando assim uma forma sólida denominada lodo primário. O resíduo resultante do processo de fabricação do papel não é considerado tóxico para sua manipulação e está inserido na Classe II-A– não inertes, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004). Esse resíduo é composto basicamente de caulim, celulose, traços não significativos de substâncias químicas e água.

A crescente produção de papel e a busca por produtos de melhor qualidade levam a indústria de papel gerar grandes quantidades de resíduos que se tornam problema tanto ambiental quanto econômico para nossa sociedade. Diante desse quadro, alternativas de reaproveitamento desses resíduos vêm sendo estudadas na tentativa de minimizar o impacto causado pelos mesmos.

Misawa (2002) observou que o lodo da indústria de papel revelou-se excelente isolante termo acústico, podendo ser empregado na produção de blocos, tijolos, entre outros; Estes produtos assemelham-se à madeira, podendo ser cortados com serra, furados e lixados.

Segundo Vaz *et al.* (1989), as soluções de aterro e incineração são, até agora, os processos mais largamente usados no mundo, não só para a indústria de celulose e papel, como também para lixos e biomassas residuais em geral.

De acordo com Nolasco (1993), devido ao alto teor de umidade e baixo poder calorífico, a incineração deste resíduo torna-se dispendiosa, sendo necessário adicionar líquido combustível ao material, o que torna este processo inviável economicamente inviável.

### **3 - MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 - MATERIAIS**

Os tijolos produzidos neste trabalho foram constituídos de solo argiloso, cimento Portland, areia, resíduo da fabricação de papel e água.

##### **3.1.1 – Solo**

O solo que foi utilizado nos experimentos é proveniente do distrito de Poço Gordo, no município de Campos dos Goytacazes, no norte do Estado do Rio de Janeiro.

O solo foi coletado e transportado até o campus da UENF, onde passou por um processo de secagem, sendo exposto ao sol até que estivesse seco o suficiente para ser triturado. Em seguida foi levado para um triturador com regulagem de tamanho dos grãos, em que foi utilizada uma regulagem para que todo o material passasse pela peneira nº 10, a fim de diminuir o número de vazios que poderiam ser formados para os casos de grãos maiores que 2,0 mm.

##### **3.1.2 - Cimento Portland**

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP V-ARI da marca Votoran, obedecendo às especificações físicas e químicas impostas pela NBR 5733 (ABNT, 1991), conforme Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Parâmetros para caracterização do cimento.**

<b>CIMENTO CP V -ARI RS</b>		
<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>	<b>LIMITES DA NORMA</b>	<b>VALORES DO CIMENTO</b>
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	≥3000	NBR NM 76/1998
Tempo de início de pega (min)	≥60	NBR NM 65/2003
Tempo de fim de pega (min)	≤600	NBR NM 65/2003
Finura na peneira # 200 (%)	≤6,0	NBR 11579/2012
Finura na peneira # 325 (%)	—	NBR 11579/2012
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582/2016
Consistência normal (%)	—	NBR NM 43/2003
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	≥14,0	NBR 7215/1997
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥24,0	NBR 7215/1997
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥34,0	NBR 7215/1997
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	—	NBR 7215/1997
Densidade	—	NBR NM 23/2001
<b>ENSAIOS QUÍMICOS</b>		
Perda ao fogo (%)	≤4,5	NBR 5743/1989
Resíduo insolúvel (%)	≤1,0	NBR 5744/1989
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	≤3,5	NBR 5745/1989
Óxido de Cálcio - CaO (%)	—	NBR 9203/1985
Óxido de Magnésio - MgO (%)	≤6,5	NBR 9203/1985
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	—	NBR 9203/1985
Óxido de Silício - SiO <sub>2</sub> (%)	—	NBR 9203/1985
Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	—	NBR 9203/1985

A escolha do cimento Portland CP V-ARI deve-se a sua capacidade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade. O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais. O CP V-ARI assim como o CP-I é um cimento puro, ou seja, não contém adições. O que o diferencia deste último é o processo de dosagem e produção do clínquer. Esta diferença de produção confere a este tipo de cimento uma alta resistência inicial, podendo atingir 26MPa de resistência à compressão em apenas 1 dia de idade. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, onde se exige desforma rápida.

### 3.1.3 – Areia

A areia utilizada nesta pesquisa é proveniente da bacia do Rio Paraíba do Sul, localizada no município de Campos dos Goytacazes, sendo uma areia natural de quartzo.

A areia foi coletada e transportada até o campus da UENF, onde passou por um processo de secagem natural, sendo exposta ao sol. Em seguida foi peneirada em uma peneira n° 10, a fim de eliminar a fração de pedregulho existente no material.

### 3.1.4 - Resíduo da fabricação de papel

O resíduo utilizado é o lodo primário proveniente da fabricação de papel (Figura 3.1) e foi fornecido e transportado pela Companhia Paduana de Papéis (COPAPA) até o campus da UENF.



**Figura 3.1 – Resíduo da fabricação de papel cedido pela COPAPA.**

O material passou por um processo de secagem, exposto ao sol até que estivesse seco o suficiente para ser moído. Em seguida, passou por um moinho de bolas e foi moído até que todo o material passasse pela peneira n° 35.

### 3.1.5 – Água

A água utilizada nos experimentos é proveniente da Concessionária Águas do Paraíba, localizada no município de Campos dos Goytacazes.

## 3.2 – MÉTODOS

### 3.2.1 – Caracterização dos materiais

A seguir é apresentado o fluxograma simplificado da metodologia de caracterização dos materiais (Figura 5.2).

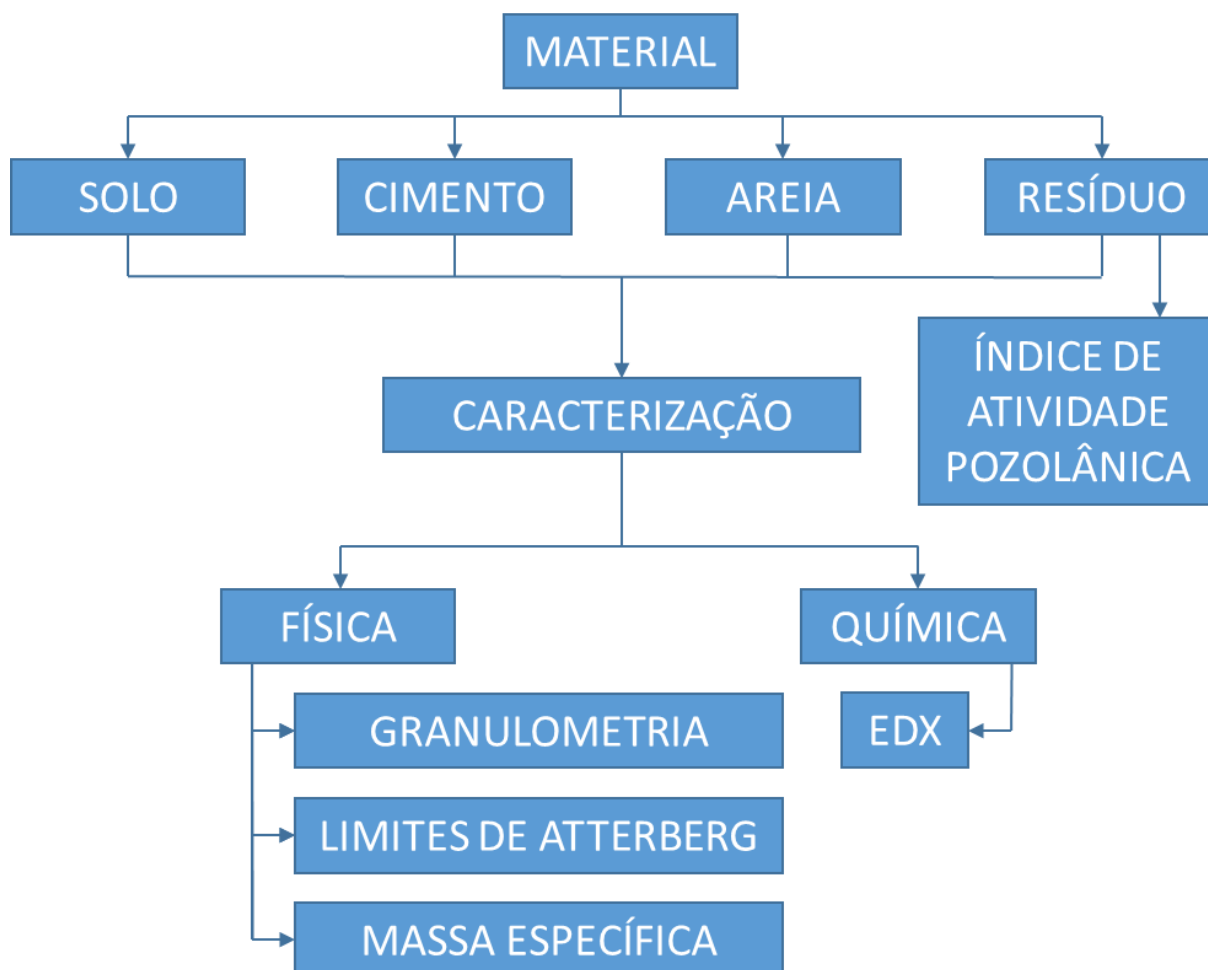


Figura 3.2 – Fluxograma das etapas de caracterização dos materiais.

#### 3.2.1.1 – Caracterização física

##### a) Análise granulométrica

A determinação do tamanho das partículas é de extrema importância para a definição da proporção de cada material para a confecção dos blocos. As curvas de distribuição granulométrica da argila e do resíduo foram determinadas segundo a prescrição da NBR 7181 (ABNT, 1984), que consiste na combinação entre o peneiramento do material e sua sedimentação. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF.

b) Limites de Atterberg

A determinação da consistência define a umidade dos materiais através de métodos empíricos como Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP). Os ensaios para determinação dos Limites de Atterberg foram executados no Laboratório de Solos do LECIV/UENF, de acordo com as prescrições da NBR 6459 (ABNT, 1984) e da NBR 7180(ABNT, 1984).

c) Massa específica real dos grãos

A determinação da massa específica real dos grãos foi realizada de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1984) e a NBR 6457 (ABNT, 1986). Este ensaio foi executado no Laboratório de Solos do LECIV/UENF.

### 3.2.1.2 – Caracterização química

#### Espectroscopia por fluorescência de raios X (EDX)

A caracterização química por EDX apresenta grande importância para identificação mineralógica dos materiais, visto que auxilia no conhecimento das porcentagens de cada óxido presente em sua composição. Apesar da análise química não proporcionar uma avaliação completa em relação à composição mineralógica e das propriedades físico-químicas de cada material, ela indica dados importantes que contribuem na identificação dos minerais contidos na amostra. A composição química das matérias primas utilizadas foi obtida através de análise realizada na Oficina de Microanálise do LECIV da UENF, com o equipamento Shimadzu EDX-700 (Figura 5.3).



Figura 3.3 – Equipamento Shimadzu EDX-700.

### 3.2.1.3 – Índice de atividade pozolânica do resíduo

Segundo Luxán *et al.* (1989), um método rápido para a avaliação de uma atividade pozolânica é através da medição de condutividade que pode ser aplicada a muitos produtos naturais. Neste método, é definido um índice de atividade pozolânica baseado na variação da condutividade elétrica de um material em uma solução saturada de hidróxido de cálcio em determinado intervalo de tempo.

A avaliação da pozolanicidade do material pela medição da condutividade pode conduzir a seguinte classificação: não pozolânico, pozolanicidade média e boa pozolanicidade.

Se o resultado indicar que o material possui atividade pozolânica, significa que sua mistura ao cimento propiciará ganho de resistência no produto final.

O ensaio de condutividade elétrica foi realizado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (Figura 3.4).



**Figura 3.4 – Ensaio de condutividade.**

O procedimento constituiu nas seguintes etapas:

- Colocação de água para o banho em um béquer;
- Colocação de 70 ml de água destilada em outro béquer e aquecimento até 40° C;
- Adição de 98,7 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$  e o ímã de homogeneização no béquer menor;
- Colocação na velocidade 4 e estabilização por 20 min;
- Posicionamento do termostato e condutímetro na mesma altura;
- Ligação do condutímetro (primeira escala: 0-20 mS);
- Adição de 1,75 g de material (possível pozolana).

### 3.2.2 – Definição dos traços

As proporções de cada material foram definidas a partir da análise dos resultados da caracterização do solo e do resíduo, mas mantendo em todos traços a quantidade correspondente a 10% de cimento em massa.

Inicialmente, seria utilizado um traço referência composto por solo e cimento. Porém, após a caracterização do solo utilizado neste trabalho, foi constatado que o material em questão não atendia às características exigidas pela NBR 10833 (ABNT, 2012). Assim, uma solução encontrada foi a correção granulométrica do solo. Foi manipulado um novo solo, denominado T1, sendo formado por 70% de solo natural e 30% de areia. Foram estudados cinco diferentes traços, sendo um traço formado com solo e cimento, denominado T0; um traço referência composto pelo solo estabilizado (T1) e cimento; e três traços com substituição parcial do solo T1 pelo resíduo em proporções de 5%, 10% e 15%, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Traços produzidos.

TRAÇOS	(CIMENTO : SOLO : AREIA : RESÍDUO)	
	MASSA	%
T0	1 : 9 : 0 : 0	10 : 90 : 0 : 0
T1	1 : 6,3 : 2,7 : 0	10 : 63 : 27 : 0
T2	1 : 5,95 : 2,55 : 0,5	10 : 59,5 : 25,5 : 5
T3	1 : 5,6 : 2,4 : 1	10 : 56 : 24 : 10
T4	1 : 5,25 : 2,25 : 1,5	10 : 52,5 : 22,5 : 15

### 3.2.3 – Determinação da umidade ótima

A umidade ótima de moldagem é um fator de extrema importância na confecção de tijolos de solo-cimento, porém ainda não há um critério específico pelo qual a umidade possa ser determinada para esta aplicação. O método mais utilizado é o da compactação Proctor Normal, mas não é o mais adequado, pois a força aplicada no ensaio de compactação pode não ser igual à força aplicada na prensa na etapa de moldagem dos tijolos.

Assim, após a definição dos traços, foi determinada a umidade ótima de moldagem para cada traço. Para isto, foi necessário realizar ensaio de compactação



dos traços e o cálculo da força aplicada pela prensa na moldagem dos blocos. A partir do valor de umidade ótima encontrado para cada traço no ensaio de compactação, foram moldados corpos de prova cilíndricos com este valor encontrado, dois valores abaixo e dois valores acima da umidade ótima de compactação, correlacionando os valores das umidades com a densidade dos corpos de prova. Os corpos de prova foram moldados com uma pressão de 15MPa, a mesma pressão aplicada pela prensa para confecção dos blocos. Foram moldados seis corpos de prova para cada traço e para cada umidade. A Figura 3.5 mostra os corpos de prova após a moldagem.



**Figura 3.5 – Corpos de prova cilíndricos produzidos com diferentes umidades.**

### **3.2.3.1 – Ensaio de compactação**

Foi realizado o ensaio de compactação normal de Proctor, para a determinação da massa específica aparente seca máxima do solo natural e da umidade ótima correspondente, de acordo com a norma NBR 12023 (ABNT, 1992). As Figuras 3.6 e 3.7 mostram algumas etapas da execução do ensaio.



**Figura 3.6 – Execução do ensaio de compactação Proctor Normal.**



**Figura 3.7 – Ensaio de Compactação Proctor Normal.**

### 3.2.3.2 – Força de prensagem

Na prensa há um manômetro que indica a pressão de prensagem dos tijolos (Figura 3.8). Porém, para efeito de verificação, foram moldados corpos de prova com as mesmas umidades e diferentes forças de prensagem a fim de comparar as densidades obtidas em cada força de prensagem com as densidades dos tijolos moldados na prensa (Figura 3.9).



**Figura 3.8 – Manômetro da prensa hidráulica.**



**Figura 3.9 – Prensa hidráulica 7000 Turbo II da Ecomáquinas.**

### 3.2.4 – Confeção dos tijolos

Após definir as proporções de material de cada traço, os materiais foram pesados em balança digital. Foram determinadas as umidades do resíduo, do solo e da areia. As umidades encontradas definiram a quantidade de água que teve de ser descontada da quantidade de água ideal caso a amostra estivesse seca, a fim de chegar na umidade ótima. Em seguida, os materiais foram levados para um misturador (Figura 3.10) até que a mistura ficasse homogeneizada. Foi utilizada uma bomba costal para umedecer a mistura até que atingisse a umidade ideal, formando uma farofa úmida. Utilizou-se a bomba costal a fim de evitar a formação de grumos na mistura, que seriam formados caso a água fosse acrescentada de vez.



**Figura 3.10 – Misturador.**

### 3.2.5 – Prensagem dos tijolos

A mistura na umidade ideal, conforme a NBR 10833 (ABNT, 2012), foi levada à prensa hidráulica modelo 7000 Turbo II da marca Ecomáquinas, com capacidade de produção de dois blocos por prensagem (Figura 3.11).

Após a prensagem, os tijolos foram vedados com sacolas plásticas para que não houvesse perda de umidade durante o transporte para a câmara úmida (Figura 3.12). Em seguida, foram curados em câmara úmida para ganho de resistência e só foram retirados para ensaios em idades pré-determinadas (Figura 3.13).

A temperatura e a umidade relativa do ar da câmara úmida foram controladas diariamente através de um termo higrômetro (Figura 3.14), para garantir que estava

atendendo aos requisitos da NBR 12024 (ABNT, 2012), que especifica que a câmara úmida deve ter temperatura de  $(23 \pm 2^\circ\text{C})$  e umidade relativa do ar não inferior a 95%.



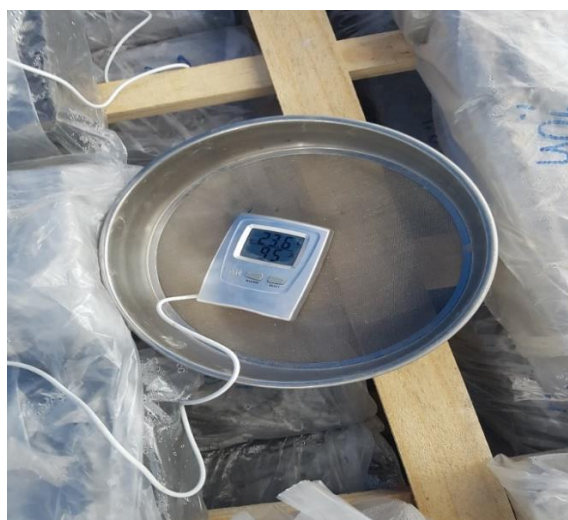
**Figura 3.11 – Blocos após moldagem**



**Figura 3.12 – Transporte dos tijolos imediatamente após moldagem.**



**Figura 3.13 – Câmara úmida para cura dos tijolos.**



**Figura 3.14 - Indicação de umidade e temperatura no interior da câmara úmida.**

### 3.2.6 – Ensaios tecnológicos

#### 3.2.6.1 – Absorção de água

Após períodos de cura de 7, 14 e 28 dias em câmara úmida, seis tijolos de cada traço foram retirados da câmara úmida e secos em estufa em temperatura de 105°C a 110°C até constância da massa, para determinação da massa seca (Figura 3.15). Após pesagem, foram imersos na água por 24 horas e depois pesados novamente (Figura 3.16). Em seguida, calculou-se a absorção de água de acordo com a NBR 10836 (ABNT, 2013), que regulamenta que os tijolos devem ter absorção de água média menor ou igual a 20% e valor individual de até 22%.



Figura 3.15 – Secagem dos tijolos em estufa.



Figura 3.16 – Saturação dos tijolos.

#### 3.2.6.2 – Resistência à compressão

Para os ensaios de resistência à compressão, seis tijolos de cada traço foram ensaiados em três diferentes idades de cura (7, 14 e 28 dias) a fim de acompanhar o ganho de resistência ao longo de 28 dias. Seguindo a NBR 10836 (ABNT, 2013), os tijolos foram devidamente capeados com uma pasta à base de cimento e água a fim de uniformizar a base e a parte superior do tijolo (Figuras 3.17 e 3.18). Os tijolos foram imersos em água por 24 horas (Figura 3.19) e em seguida ensaiados em uma prensa da marca SOLOTEST disponível no LECIV/UENF (Figura 3.20). A resistência à

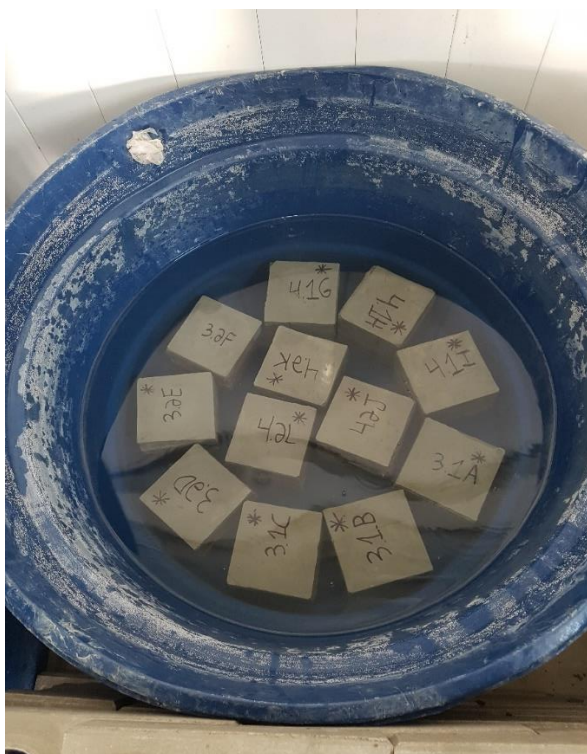
compressão média dos blocos deve ser maior ou igual a 2,0 MPa e com valor individual maior ou igual a 1,7 MPa, de acordo com a referida norma.



**Figura 3.17 – Regularização das superfícies dos tijolos.**



**Figura 3.18 – Capeamento dos tijolos.**



**Figura 3.19 – Saturação dos tijolos capeados.**



**Figura 3.20 – Realização do ensaio de resistência à compressão.**

### 3.2.6.3 – Durabilidade

Após um período de cura de sete dias em câmara úmida (Figura 3.21), seis corpos de prova de cada traço foram submetidos a ciclos de molhagem em água e secagem em estufa para determinar a perda de massa, conforme a NBR 13554 (ABNT, 2012).



Figura 3.21 – Corpos de prova cilíndricos para ensaio de durabilidade.

## 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 – Caracterização física e química do cimento

Os dados, fornecidos pelo fabricante, de caracterização do cimento Portland CP-V ARI RS utilizado neste trabalho são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Caracterização física e química do cimento.

<b>CIMENTO CP V -ARI RS</b>		
<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>	<b>LIMITES DA NORMA</b>	<b>VALORES DO CIMENTO</b>
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	≥3000	4790
Tempo de início de pega (min)	≥60	144
Tempo de fim de pega (min)	≤600	225
Finura na peneira # 200 (%)	≤6,0	4,0
Finura na peneira # 325 (%)	—	36,0
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	0,00
Consistência normal (%)	—	27,0
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	≥14,0	19,61
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥24,0	32,63
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥34,0	40,34
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	—	51,51
Densidade	—	3,06
<b>ENSAIOS QUÍMICOS</b>		
Perda ao fogo (%)	≤4,5	2,96
Resíduo insolúvel (%)	≤1,0	0,32
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	≤3,5	3,17
Óxido de Cálcio - CaO (%)	—	60,28
Óxido de Magnésio - MgO (%)	≤6,5	2,21
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	—	5,79
Óxido de Silício - SiO <sub>2</sub> (%)	—	21,29
Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	—	2,67

Os resultados indicam que o aglomerante está em conformidade com a NBR 5733 (ABNT, 1991).

#### 4.1.2 – Caracterização física dos agregados

##### 4.1.2.1 – Análise granulométrica

A Tabela 4.2 apresenta as frações granulométricas do solo, da areia e do resíduo.



Tabela 4.2 – Análise granulométrica dos materiais.

GRANULOMETRIA			
	AREIA	SILTE	ARGILA
<b>SOLO</b>	23,0%	28,0%	49,0%
<b>AREIA</b>	98,0%	2,0%	0,0%
<b>RESÍDUO</b>	4,0%	50,0%	46,0%

De acordo com a BRACELPA (1984), o solo ideal para mistura solo-cimento deve ter uma fração de areia entre 45% e 90% e a soma da fração silte com a fração argila deve estar entre 10% e 55%. O resultado da caracterização mostra que o solo utilizado não é adequado para confecção de tijolos de solo-cimento. Com o objetivo de adequar o solo às características necessárias para a mistura solo-cimento, foi realizada uma correção granulométrica do solo com areia.

#### 4.1.2.2 – Limites de Atterberg

A Tabela 4.3 apresenta os Limites de Atterberg do solo, da areia e do resíduo.

Tabela 4.3 – Limites de Atterberg dos materiais.

LIMITES DE ATTERBERG			
	LL	LP	IP
<b>SOLO</b>	49,90%	30,10%	19,80%
<b>AREIA</b>	N/P	N/P	N/P
<b>RESÍDUO</b>	106,80%	72,00%	24,80%

Para atender aos requisitos impostos pela NBR 10833 (ABNT, 2012), o solo deve ter o Limite de Liquidez menor ou igual a 45% e o Índice de Plasticidade menor ou igual a 18%. Os resultados indicam que o solo utilizado não atende aos requisitos.

A areia foi classificada como material não plástico devido a sua impossibilidade de adquirir plasticidade.

Foram constatados valores elevados para o resíduo da fabricação de papel, devido à grande quantidade de água necessária para que o material atinja a fase plástica.

#### 4.1.2.3 – Massa específica real dos grãos

A Tabela 4.4 apresenta a massa específica real dos grãos do solo, da areia e do resíduo. É possível verificar que o resíduo da fabricação de papel é um material menos denso que a areia e o solo.

**Tabela 4.4 – Massa específica real dos materiais.**

DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	
SOLO	2,54
AREIA	2,61
RESÍDUO	1,83

#### 4.1.3 – Caracterização química dos agregados

A Tabela 4.5 apresenta a composição química dos materiais a partir da espectroscopia por fluorescência de raios X (EDX).

O solo é composto basicamente por sílica e alumina, indicando a estrutura da caulinita.

A areia estudada é formada predominantemente por sílica, que indica o quartzo.

No resíduo da fabricação de papel o alto teor de óxido de cálcio, indica a presença de calcita, proveniente do processo de branqueamento da celulose.

**Tabela 4.5 – Espectroscopia de raios X dos materiais.**

	EDX (%)		
	SOLO	AREIA	RESÍDUO
SiO <sub>2</sub>	55,698	85,143	8,559
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,588	8,239	8,898
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,153	0,815	0,751
K <sub>2</sub> O	1,811	2,772	1,163
S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,639	1,503	1,106
TiO <sub>2</sub>	1,232	0,219	0,352
CaO	0,753	1,037	79,006
MnO	0,051	0,005	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,043	0	0
ZnO	0,017	0	0,052
ZrO <sub>2</sub>	0,016	0,013	0,007
SrO	0,007	0,009	0,105

#### 4.1.4 – Índice de atividade pozolânica do resíduo

O ensaio de atividade pozolânica, realizado com o método de condutividade elétrica, demonstrou que o resíduo utilizado neste trabalho apresenta média pozolanicidade conforme pode ser visto na Tabela 4.6. Segundo Luxán *et al.* (1989), para ser considerado um material com boa pozolanicidade o resultado deveria ser maior que 1,2 mS/cm. O valor encontrado pode auxiliar no entendimento dos resultados, pois a média pozolanicidade pode aferir ao compósito melhoria na sua resistência, pois formam-se novos cristais e novos hidratos, gerando assim um melhor empacotamento do sistema.

**Tabela 4.6 – Classificação de atividade pozolânica.**

ATIVIDADE POZOLÂNICA	
CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL	VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (mS/cm) AOS 2 MINUTOS
NÃO POZOLÂNICO	< 0,4
MÉDIA POZOLANICIDADE	$0,4 \leq \text{CONDUTIVIDADE} \leq 1,2$
BOA POZOLANICIDADE	> 1,2
CONDUTIVIDADE INICIAL	6,27
CONDUTIVIDADE FINAL	6,17
VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO RESÍDUO (mS/cm) AOS 2 MINUTOS - <b>1,00</b> CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO - <b>MÉDIA POZOLANICIDADE</b>	

## 4.2 – CARACTERIZAÇÃO DOS TRAÇOS

Visando atender aos requisitos impostos pela NBR 10833 (ABNT, 2012) para as características físicas do solo a ser utilizado na mistura solo cimento, foi realizada uma estabilização granulométrica do solo com areia. A seguir são apresentados os resultados das análises de cada traço.

### 4.2.1 – Análise granulométrica

A Tabela 4.7 apresenta a granulometria de cada traço, onde T0 é o solo natural, T1 é solo estabilizado com areia e T2, T3 e T4 são os traços com a incorporação do resíduo da fabricação de papel. É possível notar que o solo ao ser estabilizado, se enquadra nos critérios de seleção de solo estudado por CEPED (1984), que determina que a fração areia deve estar entre 45% e 90% e a soma da fração silte com a fração argila deve estar entre 10% e 55%. Ao ser adicionado resíduo da fabricação de papel na mistura, sua granulometria diminui proporcionalmente. Isso se deve ao fato de o resíduo ser um material bem fino.

Tabela 4.7 – Análise granulométrica dos traços.

GRANULOMETRIA			
TRAÇO	AREIA	SILTE	ARGILA
TO	23,0%	28,0%	49,0%
T1	51,4%	18,6%	30,0%
T2	48,5%	19,9%	31,6%
T3	46,3%	21,6%	32,1%
T4	44,0%	23,1%	32,9%

#### 4.2.2 – Limites de Atterberg

A Tabela 4.8 apresenta os valores encontrados para os Limites de Atterberg dos traços estudados. Ao ser estabilizado, o solo se enquadra nos limites estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012), que determina que o solo deve ter Limite de Liquidez menor ou igual a 45% e Índice de Plasticidade menor ou igual a 18%. Isso se deve ao fato de a areia ser um material não plástico, diminuindo a plasticidade do solo quando misturados. Os valores aumentam proporcionalmente com a quantidade de resíduo adicionado à mistura, com os traços T3 e T4 superando os valores máximos de Índice de Plasticidade impostos pela referida norma.

Tabela 4.8 – Limites de Atterberg dos traços.

LIMITES DE ATTERBERG			
TRAÇO	LL	LP	IP
TO	49,90%	30,10%	19,80%
T1	30,60%	15,80%	14,80%
T2	33,50%	16,50%	17,00%
T3	37,30%	19,20%	18,10%
T4	42,60%	21,70%	20,90%

#### 4.2.3 – Massa específica real dos grãos

A Tabela 4.9 mostra o valor da massa específica real dos grãos de cada traço. O solo estabilizado com areia apresenta uma massa específica maior do que o solo natural. No entanto, com a incorporação do resíduo, este valor diminui devido à baixa densidade do resíduo da fabricação de papel em relação ao solo e a areia.

Tabela 4.9 – Massa específica real dos traços.

DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	
T0	2,54
T1	2,57
T2	2,54
T3	2,49
T4	2,44

#### 4.2.4 – Compactação

A Tabela 4.10 apresenta o valor da umidade ótima de moldagem para cada traço através do ensaio de compactação Proctor Normal. Foi possível verificar que o aumento da quantidade de resíduo de papel, aumenta também a quantidade de água necessária para que a mistura atinja sua umidade ótima de compactação. Este fato se deve à grande absorção de água do resíduo. O solo estabilizado com areia e sem adição de resíduo requereu uma menor quantidade de água que o solo natural e os demais traços, devido à menor área superficial específica da areia.

Tabela 4.10 – Compactação Proctor Normal dos traços.

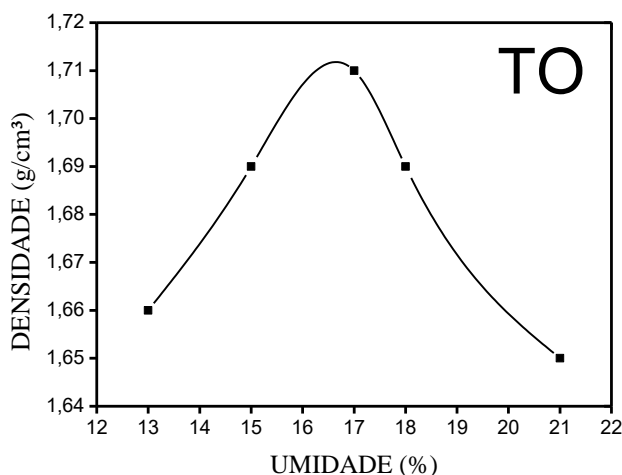
COMPACTAÇÃO	
TRAÇO	UMIDADE ÓTIMA
T0	19,40%
T1	15,40%
T2	19,10%
T3	21,60%
T4	22,70%

#### 4.3 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE ÓTIMA DE MOLDAGEM

A partir dos valores encontrados de umidade ótima para cada traço pelo método da compactação Proctor Normal, foram moldados corpos de prova cilíndricos com valores acima e abaixo deste valor e com a mesma força de prensagem (1,70 toneladas) a fim de verificar com qual umidade os corpos de prova apresentariam maior densidade.

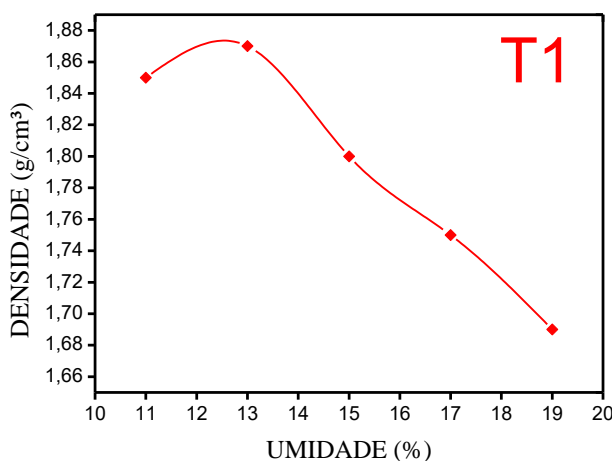
O gráfico da Figura 4.1 apresenta a curva obtida para o traço T0. Foi encontrado no ensaio de compactação o valor de 19,40% de umidade. Inicialmente seriam

moldados corpos de prova com umidades de 19%, 15%, 17%, 21% e 23%. Porém, ao moldar corpos de prova com 21%, foi constatado que o valor da densidade diminuiu em relação ao valor de partida de 19%. Assim, os corpos de prova foram moldados com umidades de 17%, 15% e 13% para identificar o pico da densidade. Contrariando o valor encontrado pelo método de Proctor Normal de 19,40%, o traço T0 apresentou maior densidade para aproximadamente 17% de umidade, com valor de 1,71 g/cm<sup>3</sup>.



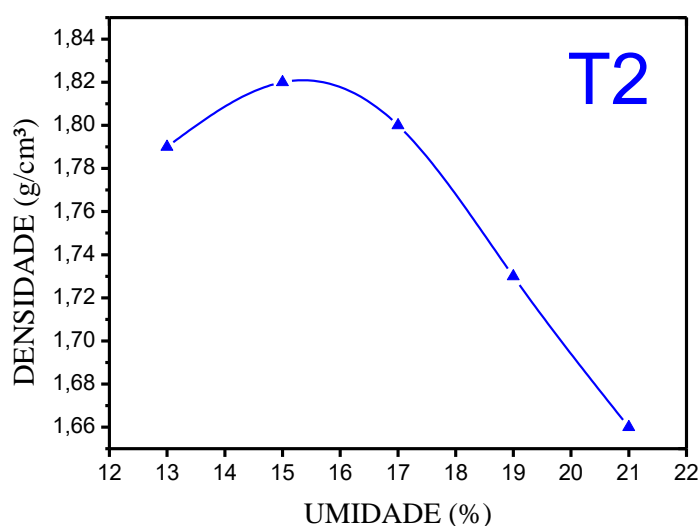
**Figura 4.1 – Curva umidade x densidade do traço T0.**

O gráfico da Figura 4.2 apresenta a curva obtida para o traço T1. Foi encontrado no ensaio de compactação o valor de 15,40% de umidade. Foram moldados corpos de prova com umidades de 15%, 11%, 13%, 17% e 19%. Contrariando o valor encontrado pelo método de Proctor Normal de 15,40%, o traço T1 apresentou maior densidade para cerca de 13% de umidade, com valor de 1,87 g/cm<sup>3</sup>.



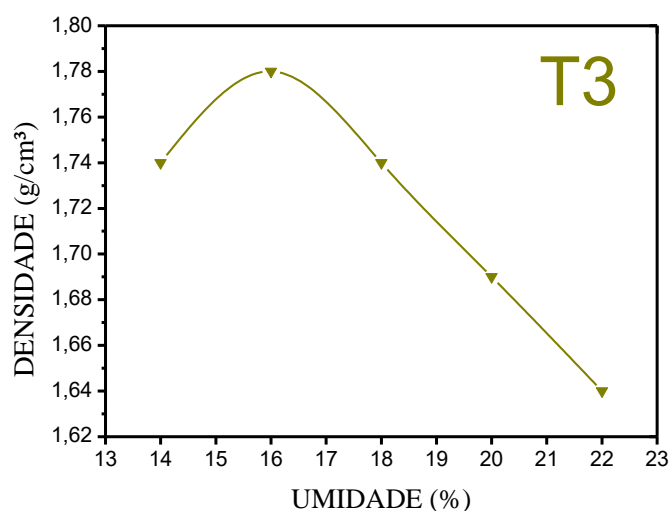
**Figura 4.2 – Curva umidade x densidade do traço T1.**

O gráfico da Figura 4.3 apresenta a curva obtida para o traço T2. Foi encontrado no ensaio de compactação o valor de 19,10% de umidade. Inicialmente seriam moldados corpos de prova com umidades de 19%, 15%, 17%, 21% e 23%. Porém, ao moldar corpos de prova com 17% e 21%, foi constatado um aumento da densidade com 17% de umidade e uma diminuição da densidade com 21% de umidade. Assim, os corpos de prova foram moldados com umidades abaixo de 17% a fim de chegar ao ponto máximo de densidade. Contrariando o valor encontrado pelo método de Proctor Normal de 19,10%, o traço T2 apresentou maior densidade para aproximadamente 15% de umidade, com valor de 1,82 g/cm<sup>3</sup>.



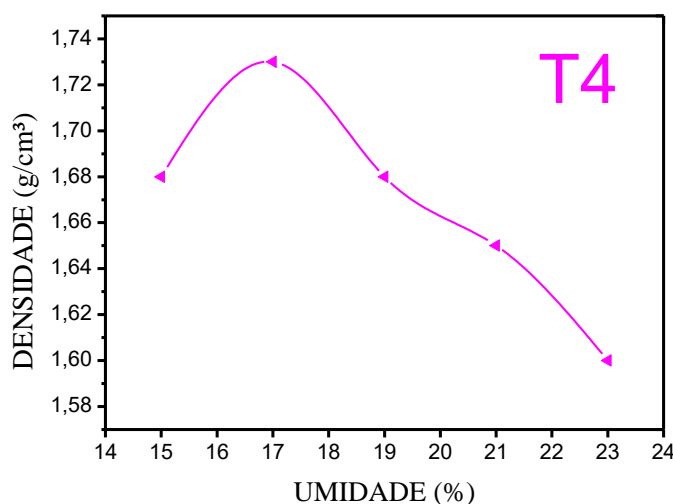
**Figura 4.3 – Curva umidade x densidade do traço T2.**

O gráfico da Figura 4.4 apresenta a curva obtida para o traço T3. Foi encontrado no ensaio de compactação o valor de 21,60% de umidade. Inicialmente seriam moldados corpos de prova com umidades de 22%, 18%, 20%, 24% e 26%. Porém, ao moldar corpos de prova com 20% de umidade, foi constatado um aumento do valor da densidade em relação ao valor de partida de 22%. Assim, os corpos de prova foram moldados com umidades decrescendo até o ponto em que o valor da densidade diminuísse. Foram moldados corpos de prova com 18%, 16% e 14% de umidade. Contrariando o valor encontrado pelo método de Proctor Normal de 21,60%, o traço T3 apresentou maior densidade para cerca de 16% de umidade, com valor de 1,78 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura 4.4 – Curva umidade x densidade do traço T3.**

O gráfico da Figura 4.5 apresenta a curva obtida para o traço T4. Foi encontrado no ensaio de compactação o valor de 22,70% de umidade. Inicialmente seriam moldados corpos de prova com umidades de 23%, 19%, 21%, 25% e 27%. Porém, ao moldar corpos de prova com 21% de umidade, foi constatado um aumento do valor da densidade em relação ao valor de partida de 23%. Assim, os corpos de prova foram moldados com umidades decrescendo até o ponto em que o valor da densidade diminuísse. Foram moldados corpos de prova com 19%, 17% e 15% de umidade. Contrariando o valor encontrado pelo método de Proctor Normal de 22,70%, o traço T4 apresentou maior densidade com cerca de 17% de umidade, com valor de 1,73 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura 4.5 – Curva umidade x densidade do traço T4.**



A Tabela 4.11 apresenta os valores de umidade em que os tijolos de cada traço foram moldados.

**Tabela 4.11 – Umidade de moldagem dos tijolos.**

<b>UMIDADE DE MOLDAGEM</b>	
<b>TRAÇO</b>	<b>UMIDADE</b>
<b>T0</b>	<b>17%</b>
<b>T1</b>	<b>13%</b>
<b>T2</b>	<b>15%</b>
<b>T3</b>	<b>16%</b>
<b>T4</b>	<b>17%</b>

#### **4.4 – FORÇA DE PRENSAGEM**

Na prensa onde os tijolos foram moldados há um manômetro que indica a pressão aplicada pelo equipamento. Os tijolos, em todos os traços, foram moldados com uma pressão de 150 bar, que equivale a uma pressão de 15 MPa. Foi calculada a área do tijolo com intuito de calcular a força aplicada pelo equipamento. Descontando os furos do tijolo, obteve-se a área de 29,32 cm<sup>2</sup>. Então, foi concluído que foi aplicada uma força de aproximadamente 4,50 toneladas no processo de moldagem dos tijolos.

A fim de verificar a precisão do manômetro para que os corpos de prova fossem moldados com a mesma pressão dos tijolos, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos com 3,71 cm de diâmetro com diferentes forças de prensagem e relacionando as forças aplicadas com a densidade de corpos de prova, para assim chegar a um valor próximo da densidade obtida pelos tijolos.

Com a área dos corpos de prova de 10,81 cm<sup>2</sup> e visando obter uma pressão de 15 MPa, foi calculada a força de prensagem em aproximadamente 1,70 tonelada. Assim, os corpos de prova foram moldados, cada traço em seu umidade ótima, em cinco diferentes forças de prensagem, sendo elas 1,0 t, 1,30 t, 1,50 t, 1,70 t e 2,0 t.

A Figura 4.6 apresenta o valor médio de densidade de seis corpos de prova para cada traço e cada força de prensagem. Foi possível verificar que os valores indicados para força aplicada de 1,70 t são similares aos valores da densidade dos tijolos, podendo, assim, confirmar a precisão do manômetro da prensa hidráulica. Porém,

pode-se afirmar que quanto maior a força de prensagem, maior é a densidade para os níveis de tensão aplicada.

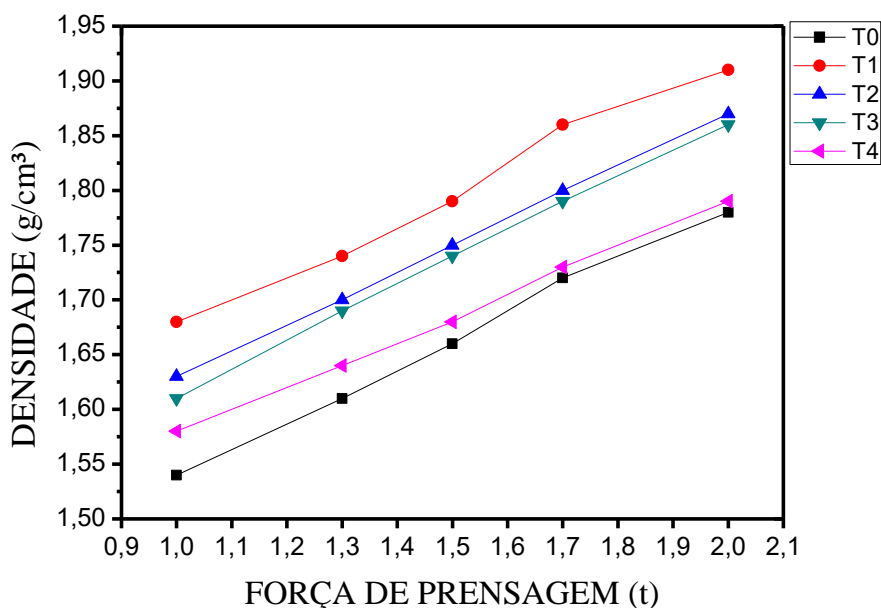


Figura 4.6 – Relação densidade x força de prensagem.

#### 4.5 – GRAU DE EMPACOTAMENTO DOS TIJOLOS

A fim de verificar o melhor empacotamento dos tijolos, foi calculado o grau de empacotamento dos blocos de cada traço, obtido pela divisão da densidade do tijolo pela soma de produtos das massas específicas dos grãos dos materiais pelas suas respectivas proporções.

A Tabela 4.12 mostra o valor da massa específica real dos grãos de cada material.

A Tabela 4.13 mostra o valor da densidade média dos tijolos de cada traço.

Tabela 4.12 – Massa específica dos materiais.

MATERIAL	DENSIDADE
CIMENTO	3,06
SOLO	2,54
AREIA	2,61
RESÍDUO	1,83

Tabela 4.13 – Densidade dos tijolos.

TIJOLO	DENSIDADE
T0	1,72
T1	1,86
T2	1,8
T3	1,79
T4	1,73

A Tabela 4.14 mostra o valor calculado do grau de empacotamento de cada traço. Foi verificado que apesar de apresentar uma densidade menor que os traços T1 e T2, o traço T3 teve um melhor empacotamento que o traço T2 e grau de empacotamento idêntico ao traço T1. Esse fator é explicado pela melhor acomodação dos grãos devido ao alto teor de finos do resíduo, mesmo com baixa densidade do material.

**Tabela 4.14 – Grau de empacotamento dos tijolos.**

<b>GRAU DE EMPACOTAMENTO</b>	
<b>T0</b>	<b>0,66</b>
<b>T1</b>	<b>0,71</b>
<b>T2</b>	<b>0,70</b>
<b>T3</b>	<b>0,71</b>
<b>T4</b>	<b>0,69</b>

#### **4.6 – ENSAIOS TECNOLÓGICOS**

Os tijolos produzidos com incorporação de resíduo da fabricação de papel em diferentes traços foram ensaiados em três diferentes idades de cura e os resultados foram analisados, comparando-os com o tijolo padrão produzido apenas com a mistura solo-cimento, a fim de verificar a viabilidade da incorporação do resíduo nos tijolos em maior quantidade possível, obedecendo às exigências dos ensaios tecnológicos impostos pelas normas regulamentadoras de blocos de solo-cimento

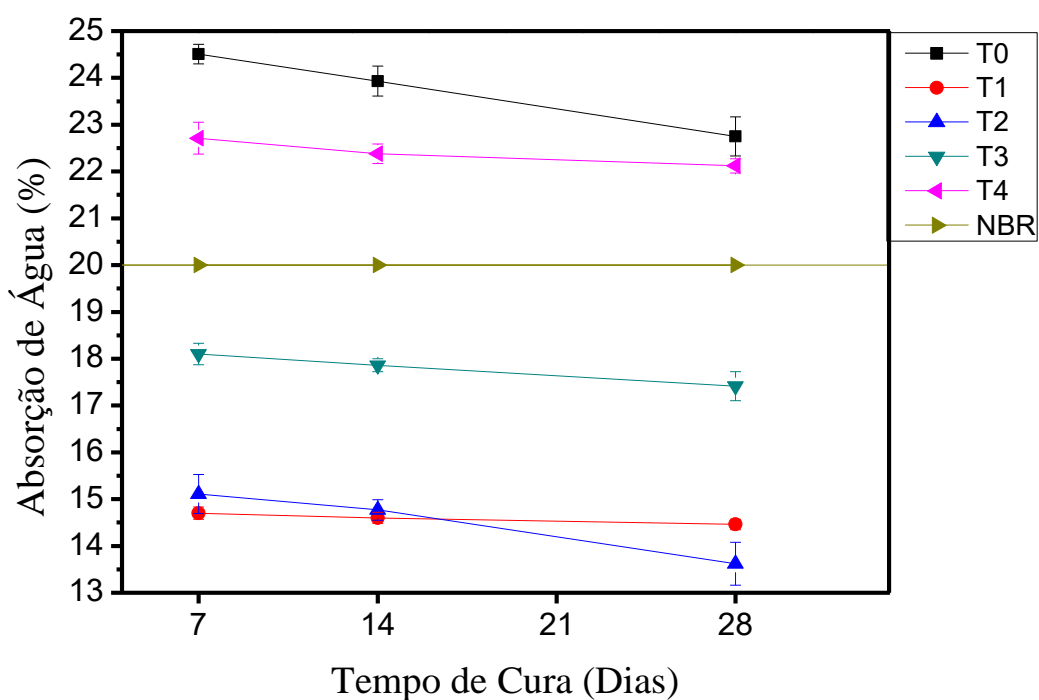
##### **4.6.1 – Absorção de água**

A Tabela 4.15 indica o valor médio da absorção de água para cada tempo de cura de cada um dos traços.

**Tabela 4.15 – Valores médios de absorção de água de cada tempo de cura.**

<b>ABSORÇÃO DE ÁGUA</b>			
	<b>7 DIAS</b>	<b>14 DIAS</b>	<b>28 DIAS</b>
<b>T0</b>	24,51%	23,93%	22,75%
<b>T1</b>	14,70%	14,60%	14,46%
<b>T2</b>	15,11%	14,77%	13,62%
<b>T3</b>	18,10%	17,86%	17,41%
<b>T4</b>	22,71%	22,38%	22,12%

O gráfico da Figura 4.7 apresenta a evolução da absorção de água dos tijolos ao longo das três idades de cura. Os traços T1, T2 e T3 apresentam, já a partir do sétimo dia de cura, valores de absorção de água abaixo do valor máximo permitido pela NBR 10836 (ABNT, 2013), que determina o valor médio máximo de 20% para absorção de água de tijolos de solo-cimento. Os traços T0 e T4 apresentam valores acima do máximo permitido pela norma. Esses valores são justificados pelo alto teor de finos presentes no solo em estado natural e na mistura com 15% de resíduo da fabricação de papel, o que é justificado também pela análise física do traço, onde os Limites de Atterberg do traço T4 não estão dentro dos parâmetros exigidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012).



**Figura 4.7 – Absorção de água dos tijolos.**

#### 4.6.2 – Resistência à compressão

A Tabela 4.16 indica o valor médio da resistência à compressão para cada tempo de cura de cada um dos traços.

Tabela 4.16 – Valores médios da resistência à compressão dos tijolos.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
T0	1,78	2,29	2,42
T1	2,73	3,15	3,52
T2	2,31	3,18	3,42
T3	2,16	2,54	2,81
T4	0,43	0,62	0,75

O gráfico da Figura 4.8 apresenta o ganho de resistência dos tijolos ao longo de 28 dias de cura. Os traços T1, T2 e T3 apresentam, já a partir do sétimo dia de cura, valores de resistência à compressão acima do valor mínimo exigido pela NBR 10836 (ABNT, 2013), de 2,0 MPa aos 28 dias de cura, idade esta que os tijolos destes traços apresentaram valores bem superiores ao mínimo. O traço T0 apresenta resistência à compressão de 1,78 MPa aos 7 dias de cura, porém aos 14 dias de cura atinge valor superior ao mínimo exigido pela norma e obtendo uma resistência de 2,42 MPa aos 28 dias de cura. Já o traço T4 não atingiu a resistência mínima exigida pela norma, obtendo valor de 0,75 MPa aos 28 dias de cura. Estes valores podem ser justificados pelo alto teor de finos na mistura, que absorvem muita água, dificultando o processo de hidratação do cimento, diminuindo assim a resistência à compressão dos tijolos.

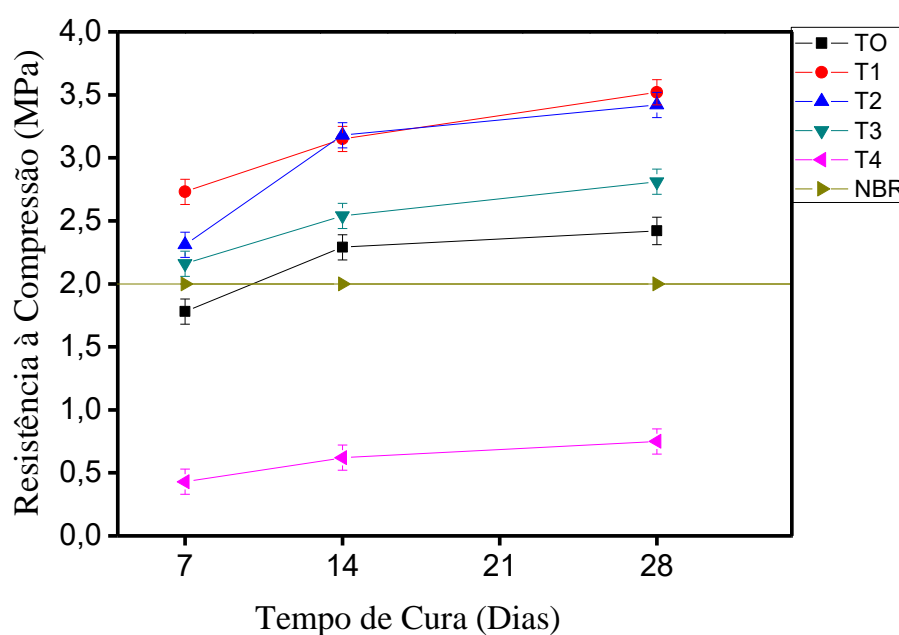
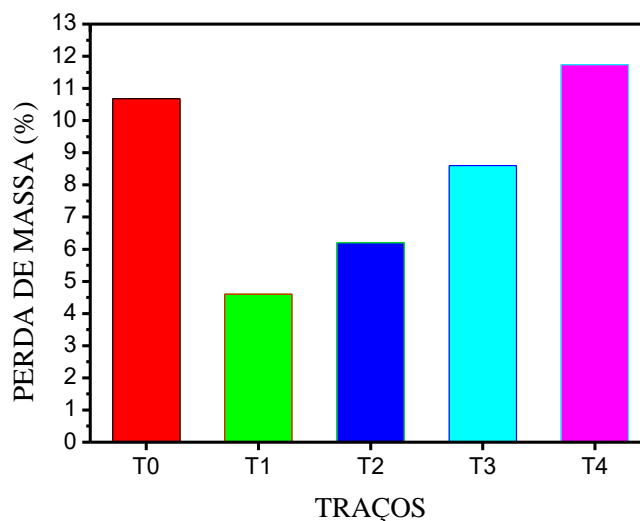


Figura 4.8 – Resistência à compressão dos tijolos.

### 4.6.3 - Durabilidade

O gráfico da Figura 4.9 mostra os resultados da perda de massa de corpos de prova cilíndricos de cada traço após seis ciclos de molhagem e secagem, com início do ensaio aos sete dias de cura. Os traços T1, T2 e T3 obtiveram valores abaixo do máximo de 10% permitido pela NBR 13554 (ABNT, 2012). Os traços T0 e T4 apresentaram valores, respectivamente, de 10,68% e 11,74% de perda de massa, acima do máximo permitido pela norma. Com o aumento da incorporação do resíduo na mistura, há um aumento na perda de massa do corpo de prova, pois aumenta a absorção de água, gerando assim um aumento da lixiviação de suas partículas.



**Figura 4.9 – Perda de massa dos traços.**

## 5 – CONCLUSÕES

Após análises e interpretações dos resultados, chegou-se às seguintes conclusões:

- De acordo com a caracterização física do solo, foi possível verificar que o solo utilizado não é adequado para a confecção de tijolos de solo-cimento sem que haja uma correção granulométrica;
- Foi constatado que a umidade calculada pela compactação Proctor Normal não é o método adequado para determinação da umidade ótima de moldagem de tijolos de solo-cimento, pois a pressão aplicada influencia na determinação da umidade ótima;
- Verificou-se que o solo em estado natural e a mistura com 15% de resíduo não atenderam aos requisitos físicos do solo e obtiveram valores acima do permitido para absorção de água;
- Verificou-se que os traços de solo corrigido com areia e incorporação em até 10% de resíduo da fabricação de papel atingiram já aos 7 dias de cura valores de resistência à compressão superiores ao mínimo exigido pela NBR 10836 (ABNT, 2013);
- Os blocos compostos por solo natural só atingiram os valores de resistência à compressão mínima aos 14 dias de cura;
- Os blocos com 15% de incorporação de resíduo não atingiram a resistência mínima exigida pela NBR 10836 (ABNT, 2013);
- Os traços T1, T2 e T3 tiveram uma perda de massa abaixo do máximo exigido pela NBR 13554 (ABNT, 2012). Já os traços T0 e T4 tiveram perda de massa acima do valor limite;
- Com os resultados, conclui-se que a quantidade máxima de resíduo a ser incorporada ao solo estabilizado é de 10%. Valores acima de 10% não atendem aos requisitos das normas no que diz respeito à absorção de água, resistência à compressão e perda de massa. Os traços T1, T2 e T3 atenderam a todos requisitos para blocos de solo-cimento.

## 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliação da incorporação de resíduo da fabricação de papel em diferentes tipos de solo na mistura solo-cimento;
- Determinação da força de prensagem aplicada por prensas manuais na fabricação de bloco de solo-cimento;
- Determinação da umidade ótima para cada força de prensagem de solo-cimento;
- Influência da energia de prensagem na densidade dos blocos e, conseqüentemente, na resistência à compressão;
- Redução do consumo de cimento em misturas solo-cimento;
- Análise econômica e ambiental entre tijolos cerâmicos e tijolos de solo-cimento;
- Construir protótipos em alvenaria utilizando blocos de solo-cimento incorporados com resíduo de papel, para verificar as condições de construção e o estudo sobre o conforto térmico e acústico.



## 7 – BIBLIOGRAFIA

ALCANTARA, Cícero Alves de. Reutilização de resíduos sólidos da construção civil. 2005. (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo.

AMORIM, F. R. Co-processamento de dregs em argila para produção de cerâmica vermelha. 2007. 108p. (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Área de concentração em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

ANDRADE, R.O.B.; TACHIZAWA, T. & CARVALHO, A.B. Gestão ambiental: enfoque estratégico aplicado ao desenvolvimento sustentável. São Paulo: Makron Books, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). Considerações gerais sobre a atividade de reciclagem de papel no Brasil. São Paulo: BRACELPA, 1998. 14p. Palestra proferida no III Seminário de Avaliação de Experiências Brasileiras de Coleta Seletiva de Lixo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL [base de dados na Internet]. Relatório Estatístico 2007/2008. São Paulo: BRACELPA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL [base de dados na Internet]. Relatório Estatístico Mensal – Março 2011. São Paulo: BRACELPA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL (ABTCP). 2004. Disponível em: <http://www.abctp.org.br>. Acesso em 26 de julho de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensa manual. – São Paulo, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 43: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5743: Cimento Portland – Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5744: Cimento Portland – Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5745: Cimento Portland – Determinação do anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Solo - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9202: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira número 325. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9203: Cimento Portland comum e clínquer – Análise química por complexometria. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10836: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira número 200. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12023: Solo-cimento: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12024: Solo-Cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13554: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro, 2012.

BANDEIRA, Z. R. Utilização racional de resíduos da indústria de celulose como matéria-prima para a construção civil – Considerações ambientais. 1996.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D.; FERREIRA, C.A.; ANDRADE, G.C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. Boletim de pesquisa florestal, Colombo, n. 37, p. 99-106, Jul./Dez, 1998.

BLÜCHER, E. Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários – volume I. São Paulo, Blücher. 1951.

BOUTH, J.A.C. Estudo da potencialidade da produção de tijolo de adobe misturado como outros materiais – uma alternativa de baixo custo para a construção

civil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. 2005

CAMPREGHER, N., Estudo de viabilidade da incorporação do lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel, celulose e aparas em material cerâmico, Dissertação de M.Sc., UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações – 6ª edição -1988.

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. ENDUFBA; Caixa Econômica Federal, Salvador- BA. 2001.

CASANOVA, F. J.O. C. Apresentação no 5º EENG 2004. Palestra: O Solo como material de construção. 5º Encontro de Engenharias da UENF, 22 a 25 de novembro. 2004.

CEPED (1984) CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DA BAHIA. Cartilha para construção de paredes monolíticas em solo-cimento. 3ª Edição Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 32p.

COMPANHIA PADUANA DE PAPÉIS [base de dados na Internet]. Relatório Estatístico Mensal – Junho 2017. Santo Antônio de Pádua/RJ: COPAPA.

CRISTELO, Nuno M. C. Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Dissertação de Mestrado. Braga/PT: Universidade do Minho, 2001.

CYTRYN, S. (1957). Soil construction: its principles and application for housing. State of Israel – Ministry of Labor – House Division. The Weizmann Science Press of Israel. Jerusalem.

DELGADO, M. C. J.; GUERRERO, I. C. The selection of soils for unstabilised earth building: a normative review. Construction and Building Materials. N. 21, 2007.

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

FERRAZ, A.L.N. Análise da adição de resíduos de argamassa de cimento em tijolos prensados de solo-cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Ilha Solteira - SP Universidade Estadual Paulista – UNESP. 2004.

FERRAZ, R. L.; BELICANTA, A.; GUTIERREZ, N. H. M. Estudo comparativo de alguns métodos de dosagens de misturas solo-cimento. Editora EDUEM, UEM, Maringá, PR. 2000.

FERREIRA R. C. Desempenho físico-mecânico e propriedades termo físicas de tijolos e mini painéis de terra crua tratada com aditivos químicos. Dissertação de Mestrado, Campinas, SP, FEAGRI, UNICAMP. 2003.

FERREIRA, R. C.; FALEIRO, H. T; FREIRE, W. J. Desempenho físico-mecânico de solo argiloso estabilizado com cal e silicato de sódio visando aplicação em construção rural. Campinas/SP: Revista de Pesquisa Agropecuária Tropical, 35 (3), 2005.

FIQUEROLA, V. Alvenaria de solo-cimento. Revista Técnica, Editora Pini, São Paulo-SP, nº 85. 2004.

GRANDE, F. M. Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual com e sem Adição de Sílica Ativa. Tese (Mestrado em 97 Arquitetura) -São Carlos- SP, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo – USP. 2003.

HUNT, C.B. & AUSTER, E.R. Proactive environmental management: avoiding the toxic trap. Sloam Management Review, v. 31, n. 2, p. 7-18, winter, 1990.

INGLES, O. G. & METCALF, J.B. (1972). Soil stabilization: principles and practice. Butterworths, Sydney – Melbourne – Brisbane.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES [base de dados na Internet]. Relatório Estatístico Mensal – Outubro 2013. Brasília: IBÁ.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES [base de dados na Internet]. Relatório Estatístico Mensal – Julho 2017. Brasília: IBÁ.

JENNYS, H. Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology. New York: Dover Press. 1994.

LOPES, W.G.R. Solo-cimento reforçado com bambu: Características físico-mecânicas. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 165 p., 2002.

LUXÁN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research*. Vol.19, 1989, p. 63-68.

MACHADO, C. C.; SANTANNA, G. L.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B; PEREIRA, R. S.; FERNANDES, D. C. M Comportamento geotécnico de misturas granulométrica de solo-grits. *Revista Arvore*, Viçosa, vol.33, n.3, p.555-562, junho 2009.

MACHADO, C.C; Pires, J.M.M; PEREIRA, R.S; FONTES, M.P.F; LIMA, D.C. Comportamento químico e ambiental de resíduos sólidos em pavimentos de estradas florestais. *Scientiar Forestalis*, n.70, p. 131-136, 2006.

MARQUES, G. L. O. Estabilização dos solos para fins de pavimentação. Juiz de Fora/MG: Faculdade de Engenharia – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2010.

MARTINS, F. M. Caracterização Química e Mineralógica de Resíduos Sólidos Industriais Mineraiis do Estado do Paraná. 2006. 126p. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MELLACE, R. F.; ALDERETE, C. F.; ARIAS, L. E. Centro regional de investigaciones de tierra cruda – Sistema Constructivo “LAMARS”. In: I Seminário Ibero-Americano de Construção com terra. Anais... Edição: C. Neves; C. Santiago. Salvador: 2002. p. 57-69.

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

MEYER, C. The greening of the concrete industry. *Cement & Concrete Composites*, v.31, p.601-605, 2009.

MILANI, A. P. S. Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de cal adicionado de casca de arroz. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MILANI, A. P. S. Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica. Tese de Doutorado. Campinas/SP: UNICAMP, 2008.

MISAWA, C., Aproveitamento de resíduos sólidos em fábrica de celulose e papel, Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2002.

MODOLO, R. C. E. Valorização de resíduos do setor de pasta e papel em produtos da construção civil. 2006. 119p. (Dissertação de Mestrado) – Universidade de Aveiro, Portugal. Disponível em <http://biblioteca.sinbad.ua.pt/teses/2007001047>. Acesso em 20 de julho de 2016.

MONTE, M. A. V. Aplicação de solo-cimento em pavimentos flexíveis. 2012. 101p. (Dissertação de Mestrado) – Universidade do Porto.

NAIKI, T. R., FRIBERG, T. S., CHUN, Y. Use of pulp and paper mill residual solids in production of cellucrete. 2004. USA.

NETO, O. Construções ecológicas com ecotijolos (Tijolos ecológicos modulares de solo-cimento). Publicação 14/01/10. Disponível em: <http://ecotijolos.wordpress.com/2010/01/14/construcoes-ecologicas-com-ecotijolos-tijolos-ecologicos-modulares-de-solo-cimento/> Acesso em: 13 de julho de 2017.

NEVES, C. M. M. Tijolos de solo-cimento. In: Dez alternativas Tecnológicas para habitação. Brasília. Anais. Minter / Pnud. 1989.

NOLASCO, A.M. Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil. Dissertação – Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 1993.

ORTIGÃO, J.A.R. Introdução da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. 3º Ed. Rio de Janeiro: Terratek. 2007.

OSTERAS, A. H., SUNNERDAHL, I., GREGER, M. The impact of wood ash and green liquor dregs application on Ca, Cu, Zn and Cd contents in bark and wood of Norway spruce. 2005. Sweden.

PINHEIRO, R.M. Reciclagem de lodo primário da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel em cerâmica vermelha. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais). 2008, Universidade Estadual do Norte Fluminense.

PINTO, C. S. Propriedades dos solos. In: Fundações: teoria e prática / Waldemar Hadrich et al. Editora Pini. São Paulo, 1998.

PINTO, S. DE J. F. Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves. 2005. 118p. (Dissertação de Mestrado) –

Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro – Universidade de Aveiro, Portugal. Disponível em <http://biblioteca.sinbad.ua.pt/teses/2007000206>. Acesso em 20 julho de 2017.

PIOTTO, Z. C. Eco eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso. 2003. 379p. (Doutorado em Engenharia, Área de concentração em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

RAMEZANIANPOUR, Ali A. et al. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. 2009. *Cement & Concrete Composites*, v. 31.

RODRIGUES, S.M. (2008) Adição de resíduo de argamassas mistas na produção de tijolos modulares de solo-cimento. 106p. Dissertação (Mestrado) Pós-graduação em Engenharia do Meio Ambiente. Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade federal de Goiás.

SENÇO, W. (2001) Manual de técnicas de pavimentação, Capítulo 4, Volume II, 1ª Edição, Editora Pini, São Paulo.

SILVA, C.M., PINHEIRO, R.M., SANTOS, J.A., REZENDE, A.A.P., Relatório técnico: Resíduos sólidos da COPAPA, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2006.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas-SP, v.21, 1997

SILVA, M. G.; BRINGUETE, A.P.O.; CASTELLO G.M. e NUNES, F.L. Avaliação Técnica de Resíduos Industriais da Grande Vitória; In: Seminário IPT/UFES Resíduos Industriais para Redução de Custos na construção Habitacional, Espírito Santo, 1994.

SMOOK, G.A., Handbook for pulp and paper technologists. Joint Textbook. Committee of the Paper Industry. TAPPI, Atlanta, 1989.

SOUZA, S. M. T.; BARBOSA, N. P. Estabilização granulométrica de solo para a confecção de tijolos prensados de terra crua. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Salvador/BA: Anais. [s. n]. 2000.

TAYLOR, G. D. *Materials In Construction*. London: Longman Scientific & Technical. 2ª ed. 1994.



TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1961). Mecânica dos solos na prática da engenharia. Rio de Janeiro, Sedegra.

THOMAS, C. O., THOMAS, R. C., HOVER, K. C. Wastepaper fibers in cementitious composites. Journal of Environmental Engineering, v. 113, n.1, New York, 1987.

TOMÉ Jr., J. B. Manual para interpretação de análise de solo. Livraria e Editora Agropecuária. Guaíba-RS. 1997.

VALENCIANO, M. D. C. M. Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento. Tese de Mestrado, Campinas, SP, FEAGRI, UNICAMP, 1999.

VAZ, A.R.; VALENTE, C.A. Lama do efluente de fábrica de celulose – algumas soluções para seu aproveitamento. 22º Congresso Anual de Celulose e Papel. Anais, São Paulo, 1989. Vol. 1p.625-641.