

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO  
DE RESÍDUOS DE MADEIRA PROVENIENTES  
DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**Maxiliano Perdigão dos Santos**

**Belo Horizonte**

**2009**

**FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO  
DE RESÍDUOS DE MADEIRA PROVENIENTES  
DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**Maxiliano Perdigão dos Santos**

**Maxiliano Perdigão dos Santos**

**FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO  
DE RESÍDUOS DE MADEIRA PROVENIENTES  
DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da  
Universidade Federal de Minas Gerais como requisito  
parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção  
Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Resíduos como Materiais de  
Construção Civil

ORIENTADORA: Professora Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2009

S237f

Santos, Maxiliano Perdigão dos  
Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira  
provenientes da construção civil [manuscrito] / Maxiliano Perdigão dos  
Santos – 2009.  
108 f., enc.: il.

Orientador: Maria Teresa Paulino Aguilár

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 87-93

1. Construção civil – Teses 2. Construção de solo-cimento – Teses  
3. Madeira - pesquisa - Teses 4. Resíduos vegetais – Teses I. Aguilár,  
Maria Teresa Paulino II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola  
de Engenharia III. Título.

CDU: 691.11 (043)

**Maxiliano Perdigão dos Santos**

**FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO  
DE RESÍDUOS DE MADEIRA PROVENIENTES  
DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada na sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 26 de junho de 2009

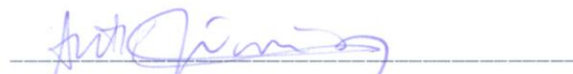
Banca examinadora:



Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Paulino Aguilár  
DEMC/UFMG (Orientadora)



Prof. Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elaine Carballo Siqueira Corrêa  
CEFET/MG



Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior  
DEMC/UFMG

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos que participaram do desenvolvimento desse trabalho que, apesar do caráter individual, contou com o imprescindível apoio de muitas pessoas e instituições.

À Universidade Federal de Minas Gerais que, como instituição pública, nos dá a liberdade de expor nossas idéias;

À Professora Maria Teresa pela orientação, apoio, incentivo, e principalmente pela paciência e solidariedade nos momentos difíceis que cruzaram o caminho desse trabalho;

À Dorinha Alvarenga, da Fundação IBISOL, pelo apoio, incentivo e compartilhamento da sua experiência em arquitetura de terra;

Ao Senhor Sérgio Lopes, da MULTILIX, pelo fornecimento dos resíduos utilizados;

Aos técnicos: Ricardo, Machado (Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – DEMC) e Geraldo (Departamento de Estruturas), e aos funcionários do setor administrativo do DEMC: Isa, Admilson, Gilmar, Luiz Cláudio e Ivonete;

Aos Professores Antônio Junior, Abdias (DEMC) e à Professora Elaine Corrêa (CEFET) pela pronta disposição nas horas necessárias;

Ao engenheiro e amigo João Tadeu e ao engenheiro Benjamim, da empresa Engesolo;

Ao Professor Lucio Flávio, Tatiana (técnica de laboratório), Alonso, Gustavo, Ezequiel (bolsistas) e Paulo Diniz (doutorando). Pela disponibilidade de uso do laboratório, ajuda e experiência passada em minha estadia no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia e Transporte da UFMG;

Aos colegas de mestrado: Edmundo, Paula, Augusto, Sílvio Motta e, principalmente, ao Sílvio Martins, pela grande ajuda, incentivo e disposição a todo o momento;

Ao Dr. Walter Brito do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, pelas análises de difração de raios-X realizadas;

Ao Namir, pela grande ajuda na construção de alguns dispositivos utilizados no trabalho;

Aos meus clientes, pelas férias dos últimos meses, necessária para finalização do trabalho;

Às montanhas e aos companheiros de caminhada e escalada que, nos momentos de estresse, estão sempre presentes para ajudar no restabelecimento de energias;

À Angélica, Eliana e Sandra que, na ajuda do meu desenvolvimento como pessoa, contribuíram de forma fundamental para a condução e finalização desse trabalho;

Aos familiares e amigos pela compreensão do meu distanciamento durante esse período;

À minha mãe e irmãos que sempre me encorajaram buscar meus ideais. Em especial meu irmão, Christian, com quem pude contar em vários momentos nesse trabalho;

Meu agradecimento especial à Stela, minha esposa, peça fundamental no meu desenvolvimento como pessoa e profissional que, de maneira incondicional, está presente em todos os momentos, desde que nos conhecemos.

## RESUMO

A combinação entre soluções construtivas vernaculares e novos tipos de materiais provenientes da desconstrução do nosso ambiente tem se apresentado como uma maneira de minimizar o impacto gerado pela exploração de novas jazidas e ambientes naturais intocados. Levando em consideração a sabedoria dos povos que ao redor do mundo utilizam o solo como material de construção, muitas vezes associado a fibras vegetais, e o conceito de aproveitamento de resíduos em sua fonte produtora, esse trabalho analisa a associação de resíduos de madeira provenientes da construção civil (RMCC) ao solo-cimento. A partir do estudo da literatura, foram realizados experimentos relacionados à moldagem dos corpos-de-prova (CPs), ensaios de variação dimensional, absorção de água, compressão simples, flexotração e módulo de elasticidade dinâmico. Os ensaios permitiram avaliar o desempenho do material solo-cimento-RMCC frente à amostra referência de solo-cimento e, quando disponível, às normas e estudos anteriores. Além da amostra referência, foram moldados CPs de solo-cimento aos quais foi adicionado o RMCC nos teores de 1,5; 3,0; 5,0 e 6,5%. Os estudos indicam que a inserção de RMCC não contribui para variação dimensional das amostras, e aumenta sua absorção de água em até 15% se comparada à amostra referência. De forma geral, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade são gradativamente reduzidos na medida em que é aumentado o teor de RMCC. Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que o material à base de solo-cimento-RMCC possui indicativos que o qualificam para o uso na construção civil e encorajam o aprofundamento e a ampliação das investigações relacionadas a esse material.

Palavras-chave: Resíduos de madeira. Solo-cimento. Arquitetura de terra.



## ABSTRACT

Traditional constructive solutions and new materials originated from the deconstruction of the natural environment are nowadays being combined to minimize the impact of extracting new materials from mineral deposits. Learning from the ancient experiences of traditional communities around the world that employ earth as a construction material, sometimes associated to vegetal fibers, and applying the concept of recycling waste at the source, this document analyzes the association of construction wood waste (RMCC, in Portuguese) and soil-cement. Based on the literature review, experiments related to specimen molding, dimensional variation analysis, axial compression, flexure test and dynamic elasticity modulus were carried out. The new material (soil-cement-RMCC) performance was compared to the soil-cement reference material and, when available, to standards and results from previous studies. Specimens of the reference material and of soil-cement with 1.5, 3.0, 5.0 and 6.5% of RMCC, in weight, were prepared. The results of the tests on the specimens demonstrated that the addition of RMCC do not contribute for the dimensional variation and increases the water absorption by up to 15% if compared to the reference material. In general, the mechanical resistance and the elasticity modulus become gradationally lower as RMCC load increases. In the context of this study, the results obtained for the soil-cement-RMCC properties render this material eligible to be used as a construction material. Further investigations related to this material are encouraged in order to confirm and extend the results obtained.

Key words: Wood waste. Soil-cement. Earth architecture.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema geral e seção transversal de uma peça de MLC. ....	12
Figura 2 – Ginásio olímpico com estrutura em MLC na Noruega .....	13
Figura 3 – Painel OSB (Oriented Strand Board) .....	14
Figura 4 – Aplicação do OSB em painéis pré-moldados para utilização na construção civil. Utilização do OSB na alma de vigas de madeira .....	15
Figura 5 – Tijolos de adobe em processo de secagem.....	21
Figura 6 – Fabricação de parede em taipa de pilão .....	22
Figura 7 – Casas de taipa de mão nos arredores de Alcântara, MA .....	23
Figura 8 – Casa construída em taipa de sopapo, fins do século XIX – região de Porto Alegre, RS.....	25
Figura 9 - Comparação entre a resistência à compressão simples média nos corpos-de-prova para os solos Homog. 01 e 03 .....	34
Figura 10 – Módulo de elasticidade determinado a partir de corpos-de-prova para os solos Homog. 01 e 03.....	35
Figura 11 – Molde utilizado para confecção dos corpos-de-prova .....	44
Figura 12 – Relação entre a quantidade de RMCC, solo e cimento.....	45
Figura 13 – Moldagem do corpo-de-prova.....	46
Figura 14 – Desmoldagem do corpo-de-prova.....	47
Figura 15 – Marcação e posicionamento do corpo-de-prova para o ensaio de flexotração .....	49
Figura 16 – Aparelho para o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.....	50
Figura 17 – Amostra do RMCC coletado .....	53
Figura 18 – Imagens do RMCC após a análise granulométrica (abertura das peneiras em milímetros).....	55
Figura 19 – Curva granulométrica do solo UFMG obtida por peneiramento e sedimentação .....	58
Figura 20 – Gráfico do ensaio de limite de liquidez.....	60

Figura 21 – Curvas de compactação do solo UFMG e do solo-cimento realizadas pelo método Proctor Normal .....	61
Figura 22 – Curvas de compactação para solo-cimento, obtidas pelo método Proctor Normal e na máquina universal de ensaios mecânicos Instron 5582.....	63
Figura 23 – Curvas de compactação para solo-cimento (SC) e .....	64
Figura 24 – CP deformado devido à abertura do molde .....	65
Figura 25 – Efeito de expansão do CP em mistura com 8% de RMCC.....	66
Figura 26 – Influência do tempo de desforma na qualidade do.....	67
Figura 27 – Influência do tempo de desmoldagem na capacidade de absorção de água do corpo-de-prova .....	69
Figura 28 – Compressão simples: influência do tempo de desmoldagem na resistência do corpo-de-prova .....	70
Figura 29 – Fissuração em CPs com 3% de RMCC desmoldados imediatamente após sua confecção .....	71
Figura 30 – Flexo-tração: influência do tempo de desmoldagem na resistência do corpo-de-prova .....	71
Figura 31 – Influência do tempo de desmoldagem no módulo de elasticidade .....	72
Figura 32 – Gráfico de absorção de água após 24h de imersão.....	74
Figura 33 – Resíduos aparentes na face do corpo-de-prova .....	75
Figura 34 – Comparação entre a média da resistência à compressão simples para os corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-RMCC.....	76
Figura 35 – Comparação entre a média da resistência à flexo-tração para os corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-RMCC .....	79
Figura 36 – Relação entre as resistências médias à flexo-tração e .....	80
Figura 37 – Comparação entre a média do módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-RMCC.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Uso potencial para materiais de construção reciclados.....	6
Tabela 2 – Potencialidade da madeira para prevenção e minimização de resíduos ....	9
Tabela 3 – Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cimento moldados com teores de cimento de 6, 8, 10, 12 e 14%, aos 7 e 28 dias de idade ...	27
Tabela 4 – Resistência à compressão simples .....	28
Tabela 5 – Módulo de elasticidade estático .....	28
Tabela 6 – Métodos qualitativos de escolha do solo .....	31
Tabela 7 – Teor de umidade do RMCC .....	52
Tabela 8 – Frações do resíduo de madeira retidas por peneiramento .....	54
Tabela 9 – Classificação granulométrica do RMCC.....	54
Tabela 10 – Teor de umidade do solo .....	56
Tabela 11 – Resultados da Difratomia de raios-X.....	57
Tabela 12 – Granulometria por peneiramento para os solos UFMG e OP .....	57
Tabela 13 – Classificação do solo UFMG segundo a ABNT .....	58
Tabela 14 – Limite de plasticidade .....	59
Tabela 15 – Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal para o solo UFMG e solo-cimento.....	61
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de compactação para solo-cimento .....	62
Tabela 17 – Valores máximos obtidos nos ensaios de compactação para o solo-cimento e solo-cimento-RMCC .....	64
Tabela 18 – Influência do tempo de desmoldagem na variação dimensional do corpo-de-prova.....	69
Tabela 19 – Percentual de queda na qualidade da amostra “1,5 imediato” para os ensaios de compressão simples, flexo-tração e módulo de elasticidade .....	72
Tabela 20 – Cálculo do desvio padrão para os ensaios entre os CPs desmoldados após a confecção e 24 h após a moldagem.....	73
Tabela 21 – Variação dimensional dos corpos-de-prova .....	74
Tabela 22 – Cálculo do desvio padrão para ensaio de compressão simples .....	77

Tabela 23 - Cálculo do desvio padrão para ensaio de flexo-tração.....	79
Tabela 24 – Cálculo do desvio padrão para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.....	82
Tabela 25 – Resistência à fissuração .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CIWMB – California Integrated Waste Management Board
- CRATerre-EAG – International Centre for Earth Construction – School of Architecture of Grenoble
- CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
- CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
- CP – Corpo-de-prova
- EPA – Environmental Protection Agency
- FUNTAC – Fundação de Tecnologia do Estado do Acre
- GATE – Stands for German Appropriate Technology Exchange
- GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
- ICDD – International Center for Diffraction Data
- JCPDS – Joint Committee on Powder Diffraction Standards
- MLC – Madeira Laminada Colada
- NBR – Norma brasileira
- OSB – Oriented Strand Board
- SINDUSCON-MG – Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais
- SINDUSCON-SP – Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de São Paulo
- RMCC – Resíduo de Madeira Proveniente da Construção Civil
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
- WAMBUCO – European Waste Manual for Building Construction (Manual Europeu de Resíduos da Construção de Edifícios)

# SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
2.	Objetivos.....	4
3.	Revisão bibliográfica.....	5
3.1	Resíduos de construção civil .....	5
3.2	Resíduos de madeira na construção civil .....	7
3.2.1	Reaproveitamento dos resíduos de madeira .....	7
3.2.2	Reaproveitamento dos resíduos em escala industrial.....	11
3.2.3	Reaproveitamento dos resíduos com a matriz cimento .....	15
3.3	Arquitetura de terra .....	18
3.3.1	A terra como elemento construtivo .....	19
3.3.2	Técnicas construtivas em terra.....	20
3.4	Solo-cimento .....	26
3.4.1	O solo-cimento como material de construção.....	26
3.4.2	Vantagens na utilização de solo-cimento .....	28
3.4.3	CrITÉrios para escolha do solo .....	29
3.5	Solo-cimento e o resÍduo de madeira .....	32
4.	Materiais e métodos .....	36
4.1	Caracterização dos materiais .....	36
4.1.1	Procedência do resÍduo de madeira .....	36
4.1.2	Caracterização física do resÍduo de madeira.....	36
4.1.3	Procedência do solo.....	37
4.1.4	Caracterização física e mecânica do solo.....	38
4.2	Confecção dos corpos-de-prova.....	43
4.2.1	Molde utilizado .....	43
4.2.2	Dosagem das misturas.....	44
4.2.3	Moldagem .....	45

4.3	Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova de solo-cimento com e sem adição de RMCC.....	47
4.3.1	Variação dimensional e absorção de água .....	47
4.3.2	Ensaio de compressão simples .....	48
4.3.3	Ensaio de flexo-tração.....	49
4.3.4	Módulo de elasticidade dinâmico.....	50
5.	Resultados e discussões .....	52
5.1	Caracterização dos materiais .....	52
5.1.1	Caracterização do resíduo de madeira.....	52
5.1.2	Teor de umidade do solo.....	56
5.1.3	Difratometria de raios-X.....	56
5.1.4	Análise granulométrica dos solos .....	57
5.1.5	Limite de plasticidade do solo.....	59
5.1.6	Limite de liquidez do solo .....	59
5.1.7	Massa específica do solo .....	60
5.1.8	Ensaio de compactação .....	60
5.2	Moldagem dos corpos-de-prova .....	65
5.3	Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova de solo-cimento com e sem adição de RMCC.....	68
5.3.1	Efeito da desmoldagem na qualidade dos corpos-de-prova .....	68
5.3.2	Variação dimensional e absorção de água .....	73
5.3.3	Ensaio de compressão simples .....	76
5.3.4	Ensaio de flexo-tração.....	78
5.3.5	Módulo de elasticidade dinâmico.....	81
6.	Conclusões.....	84
7.	Sugestões para estudos futuros .....	86
	Referências bibliográficas.....	87
	Apêndices .....	94
	Anexos .....	107





# 1. INTRODUÇÃO

A atual preocupação com o meio ambiente tem levado as pessoas a questionar seu modo de vida e um dos reflexos dessa preocupação pode ser visto no desenvolvimento de novas tecnologias e materiais. Seguindo esse caminho, a construção civil tem dado respostas de inúmeras formas, criando edifícios inteligentes providos de recursos que, dentre outras soluções, os tornam capazes de acumular energia solar e do vento, graduar a luminosidade ante as fases da lua e posicionamento do sol, aproveitar água de chuva e tratar o próprio esgoto.

Paralelo a esse desenvolvimento tecnológico de ponta, soluções consideradas de baixa tecnologia têm atingido certo número de construções que, em caráter individual ou coletivo, tem dado resposta a essa nova demanda contemporânea através das ecovilas, bioarquitetura, permacultura e utilização de técnicas construtivas milenares, dentre outras.

A associação de soluções construtivas vernaculares aos novos tipos de materiais provenientes da desconstrução do nosso ambiente, tem se apresentado como uma maneira de minimização do impacto gerado pela exploração de novas jazidas e ambientes naturais intocados.

Nesse contexto, o solo, usado há milhares de anos pelo homem como material de construção e que deixou legados da arquitetura e da engenharia como a grande Muralha da China, vem retomando sua vocação construtiva. Com seu uso relativamente recente na história brasileira, é possível encontrar em áreas rurais pessoas já idosas que exerceram com maestria, durante anos, a técnica construtiva com terra crua. Esse legado, que aos poucos foi perdendo frente para materiais industrializados, vem sendo recuperado seja pela preocupação ambiental ou pela necessidade de produzir edificações com um custo reduzido.

Talvez o tipo de associação tecnológica de baixo custo mais comum feita ao solo seja a adição de cimento Portland, que ocasiona o composto solo-cimento (SC). Esse composto se vale da técnica de compactação do solo, à qual se acrescenta uma pequena quantidade de cimento para reduzir sua contração e aumentar sua resistência. Devido ao seu baixo custo de produção e a relativa facilidade de se montar uma linha de produção sem grandes investimentos, esse composto é muito utilizado na fabricação de blocos e tijolos prensados a frio pelo sistema de cooperativa ou mutirão, normalmente em comunidades carentes. A sua qualidade associada ao baixo custo, a preocupação com o meio ambiente e a necessidade das

peças fazerem parte de um ambiente menos industrializado, fazem com que a arquitetura de terra em suas diversas técnicas, em especial o uso dos tijolos de solo-cimento, transcenda a imagem de material de construção para os menos abastados e pode ser vista atualmente em construções localizadas em bairros e condomínios de classe média e alta. Algo que fortalece e prospera sua utilização pelas gerações futuras.

Por outro lado, o alto índice de industrialização alcançado pelo homem tem produzido nas cadeias extrativista e de produção uma nova linha de matéria-prima antes vista como refugo. A partir da necessidade econômica e posteriormente em atenção a uma demanda ambiental, os resíduos resultantes dos mais diversos tipos produção tem sido reutilizados na própria linha na qual foram originados e também na composição de insumos para produção de novos materiais. Dentre eles, destacam-se os resíduos de madeira.

A madeira, que é tida como uma fonte renovável de matéria-prima, quando usada em larga escala produz um grande volume de resíduo que, se não for direcionado para uma cadeia de produção, pode ser nocivo ao meio ambiente como qualquer outro material. Com o desenvolvimento da indústria química, em especial os adesivos, os resíduos de madeira têm sido amplamente empregados nos mais diversos setores industriais, dentre eles a construção civil. Sua aplicação é notória em países que têm por tradição o uso da madeira como um dos principais material de construção, onde são produzidos painéis para confecção de pisos e paredes, estruturas capazes de vencerem grandes vãos, sistemas pré-moldados e uma vasta gama de acessórios.

No Brasil, o aproveitamento desse resíduo na construção de edificações é de certa forma tímido. Esse tipo de material tem sido usado como fôrma para estruturas de concreto e, aos poucos, na construção de paredes em alguns sistemas de construção a seco. É importante ressaltar que os resíduos de madeira utilizados nesses processos são em sua maioria provenientes do desdobro de árvores e de serrarias, onde o material não passou por processos de produção, o que, de certa forma, resulta em um resíduo livre de impurezas.

Em contrapartida ao resíduo de madeira utilizado em seu estado virgem, existem resíduos provenientes de produtos industrializados ou ao qual foram adicionados outros materiais como a tinta e o plástico. Esse tipo de resíduo, quando não é reutilizado no estado em que se encontra, é comumente utilizado como combustível em fornos ou destinado ao aterro sanitário.

O resíduo de madeira gerado pela construção civil, incluindo o proveniente de demolição e tendo como referência apenas a brasileira, é em grande parte constituído por materiais que sofreram algum tipo de interferência durante o uso da madeira. Dentre as adições feitas a esse tipo de resíduo podem ser citadas: concreto, tinta e vernizes, pregos, laminados sintéticos para acabamento, adesivos e produtos químicos para tratamentos diversos.

Dentro de um conceito onde se busca o aproveitamento dos resíduos diretamente em sua fonte produtora e levando em consideração a sabedoria ancestral que utilizava a terra associada às fibras vegetais como material de construção, esse trabalho propõe investigar a possibilidade de associação entre o solo-cimento e os resíduos de madeira proveniente da construção civil (RMCC).

Para sua elaboração foi analisada bibliografia relacionada à utilização dos resíduos de madeira na construção civil, à arquitetura de terra, o solo-cimento e à associação do solo-cimento ao resíduo de madeira. Após o estudo dos métodos a serem seguidos, procedeu-se a caracterização dos materiais a serem utilizados para realização dos ensaios de compressão simples, flexo-tração, módulo de elasticidade dinâmico, variação dimensional e absorção de água. Para os ensaios citados foram preparados corpos-de-prova com cinco teores de RMCC, os quais foram comparados entre si e, quando possível, com a bibliografia estudada.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir na busca de novas soluções que sejam de baixo custo e que respeitem o meio-ambiente, através do desenvolvimento de um material que associe o uso dos resíduos de madeira proveniente da construção civil ao solo-cimento.

Para isso os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos:

- a. determinação dos parâmetros de compactação do material em estudo;
- b. determinação do teor de resíduo adequado a ser adicionado ao solo-cimento;
- c. avaliação do desempenho do material produzido.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentados os pontos principais dos seguintes tópicos: resíduos de construção civil, resíduos de madeira na construção civil, arquitetura de terra, solo-cimento e solo-cimento com adição de madeira.

#### **3.1 Resíduos de construção civil**

Atualmente, dentre as várias condições essenciais para o crescimento econômico das nações, pode ser citado o desenvolvimento de novas soluções baseadas no conceito de eficiência energética e de proteção do meio ambiente. Nesse contexto, o estudo sobre a utilização de resíduos provenientes de inúmeros meios de produção é fundamental para consolidação de uma matriz produtiva, capaz de consumir essa nova gama de matéria-prima.

Segundo a EPA (2000), os resíduos de construção e demolição são materiais provenientes da produção de novas construções, reformas e demolição de edifícios e estruturas de todos os tipos, residenciais e não residenciais, e também estradas e pontes. Os materiais componentes dos resíduos de construção e demolição variam de acordo com as regulamentações locais dos estados americanos, mas de uma forma geral, estão incluídos: concreto, asfalto, madeira, metais, painéis de gesso acartonado, cerâmicas de piso e parede, telhas, plásticos, material elétrico e hidráulico, vidro e, em alguns estados, materiais provenientes de limpeza de terrenos, como madeira de poda de árvores, rochas e terra, dentre outros.

De acordo com DANTAS Filho (2004), resíduo é qualquer material proveniente da sobra de uma ação ou processo produtivo gerados nas fases de extração e transformação de produtos naturais, de fabricação, de utilização de produtos e serviços, podendo ser sólido, líquido ou gasoso.

A construção civil, como agente de produção, é uma grande geradora de resíduos e, dessa forma, deve implementar condições para que os resíduos por ela gerados sejam aproveitados na própria construção. De acordo com HORVATH (2004), na Austrália, Finlândia, Alemanha, Holanda e Estados Unidos, dos resíduos sólidos gerados, de 13 a 29% são provenientes de construção e demolição. No Brasil, esse número é em torno de 50% do total de resíduos sólidos gerados (SPOSTO, 2006).

Existem muitas oportunidades e desafios no campo da reciclagem de resíduos da construção civil que emergem a partir de um potencial ganho ambiental e econômico

que esses novos materiais podem proporcionar. A tendência pelo uso de materiais reciclados ganha força porque sua utilização não demanda mudança nas práticas de construção antigas e novas tecnologias (HORVATH, 2004). A Tabela 1 apresenta usos em potencial para os resíduos de materiais de construção reciclados.

**Tabela 1 – Uso potencial para materiais de construção reciclados**

<b>Material</b>	<b>Uso potencial</b>
Madeira	Reutilização, combustível, forração para leito de animal, produtos para construção, composto para plantas.
Tijolos	Reutilização, trituração para agregados.
Asfalto	Novo piso de asfalto, substrato de base para estrada.
Concreto	Trituração para agregados de asfalto ou concreto, fundações, enchimentos, base para estrada.
Drywall	Gesso para acerto de solo, drywall.
Telhado	Telhas de asfalto para piso de asfalto, reutilização de telhas de barro.
Metais	Sucata para novo processamento.
Plástico	Objetos de plástico, barreiras de auto estrada, cones de sinalização.

Fonte: HORVATH, 2004

Resíduos de construção e demolição podem ser aproveitados através da reutilização direta do material ou por meio de reciclagem. Para que os materiais possam ser aproveitados, deve ser feita uma seleção criteriosa nos canteiros de obras, separando os diferentes tipos de entulho. No caso da demolição, além da separação deve-se ter o cuidado de separar peças que possam ser reaproveitadas diretamente

(portas, janelas, tubulação, etc.) ou que necessitem de pequenos reparos para serem utilizadas.

Segundo a EPA (2000), dentre os benefícios da utilização de resíduos da construção, pode-se citar:

- redução do impacto sobre o meio ambiente quanto à extração, transporte e processamento dos materiais;
- redução no custo de projetos para áreas de disposição dos resíduos e compra de novos materiais;
- melhora a imagem pública das empresas e organizações que reduzem a geração de resíduos;
- conservação do espaço que seria destinado à disposição dos resíduos para outro tipo de resíduo que não possa ser reciclado.

Com o objetivo de contextualizar esse trabalho, os elementos principais usados para seu desenvolvimento, que são os resíduos de madeira, a arquitetura de terra e o solo-cimento, serão mostrados a seguir, levando-se em consideração seu aspecto histórico e sua aplicação na construção civil.

## **3.2 Resíduos de madeira na construção civil**

Inicialmente será apresentada uma visão geral sobre o uso de resíduos de madeira no mundo e no Brasil. Em seguida serão apresentadas as principais utilizações de forma mais detalhada: estrutura de madeira laminada colada, painéis OSB e o uso associado à matriz cimento.

### **3.2.1 Reaproveitamento dos resíduos de madeira**

Apesar de ser um material proveniente de fonte renovável, a madeira é também um tipo de resíduo que afeta o meio ambiente. Nesse sentido, é necessário dar um destino para o resíduo de madeira que não seja as áreas de disposição final de entulho (CIWMB, 1998).

Segundo o CIWMB – California Integrated Waste Management Board (1998), o uso da madeira reciclada proveniente de construção é limitado. Isso ocorre porque geralmente a madeira é contaminada por outros produtos como tinta e concreto, ou está em má condição de uso, o que inviabiliza economicamente o processo de limpeza ou recuperação do material.



Tendo em vista a limitação da reciclagem, o CIWMB possui um programa que orienta os cidadãos quanto a disposição dos resíduos de madeira, a fim de otimizar o maior aproveitamento do material e tem como princípio a conscientização do usuário quanto à evitar a geração de resíduos (CIWMB, 1998; 2002). As bases de orientação ao usuários são as seguintes:

- planejamento da construção para evitar desperdícios;
- compra de material proveniente de reciclagem, manutenção e conservação de peças de madeira, como portas, janelas, forros e estruturas para evitar a reposição por outra peça;
- encontrar outro uso para o resíduo da madeira que demande o mínimo de processamento antes da reutilização;
- utilização como matéria prima para fabricação de madeira processada, como por exemplo, chapas OSB;
- procurar uma empresa que recicle a madeira conforme orientação da CIWMB;
- encaminhar o resíduo da madeira que não possa ser reciclada a uma empresa que produza energia a partir de biomassa;
- como última alternativa, encaminhar o resíduo para a disposição em área específica para entulhos.

De acordo com o Projeto WAMBUCO - Manual Europeu de Resíduos da Construção de Edifícios (União Européia, 2002), a reutilização da madeira de construção é possível desde que sejam respeitados os parâmetros de firmeza e dilatação do material. Em diversas aplicações como barreiras protetoras ou paletes, esse material pode ser reutilizado três ou quatro vezes. Se os elementos da madeira não se encontram em situação que permita a reutilização direta e se não for possível fazer algum tratamento para reutilização, deve-se optar pelo seu uso em elementos que utilizam a madeira colada como, por exemplo, em painéis. Segundo o Projeto WAMBUCO (União Européia, 2002), deve ser levado em consideração que a madeira usada possui teor de umidade equilibrado e o fato da tendência de criar fissuras ser visível, isso faz com que sua utilização seja preferível à da madeira nova. Dessa forma, 70% da madeira utilizada na construção pode ser reaproveitada. No caso de reciclagem, a madeira deve estar limpa de substâncias estranhas. Uma das opções citadas é a redução do material em lascas e serragem para que possam ser utilizados na confecção de painéis, em arenas de equitação, ou na indústria de papel, caso o material seja proveniente de madeira não tratada. Outro tipo de utilização

recomendado é na cobertura de solos ou no processo de compostagem de matérias orgânicas. Caso a madeira tenha sofrido tratamento químico, ela poderá ser reciclada apenas para produção de energia.

Com vista à reutilização, os elementos devem ser desmontados cuidadosamente durante o desmanche da obra. Esse cuidado também deve ser tomado quando o objetivo for a reciclagem, onde a madeira deve ser separada em três divisões: não contaminada, contaminada e impura. Sendo que apenas a madeira não contaminada pode ser reciclada como matéria-prima. Quando esta estiver misturada com madeira contaminada (quimicamente tratada ou coberta) terá de ser incinerada. Após a separação, a madeira deve ser preparada para o processo de reciclagem, que normalmente é feito em cinco etapas:

- redução da madeira para dimensões manobráveis;
- remoção dos metais;
- crivagem da matéria mineral de pequenas dimensões;
- seleção manual de materiais estranhos (papel, pedras, plástico, etc);
- redução da madeira em fragmentos de acordo com o uso pretendido.

Nos estudos realizados pelo Projeto WAMBUCO (União Européia, 2002), criou-se uma classificação para cada tipo de material de acordo com sua potencialidade para prevenção e minimização de resíduos. No caso da madeira, os dados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Potencialidade da madeira para prevenção e minimização de resíduos**

<b>Potencial de redução de resíduos</b>											
Baixo										<b>x</b>	Alto
<b>Potencial de reutilização</b>											
Baixo										<b>x</b>	Alto
<b>Potencial de reciclagem</b>											
Baixo										<b>x</b>	Alto
<b>Custos/ Valorização</b>											
Alto Custo										<b>x</b>	Alto Valor

Fonte: Projeto WAMBUCO (União Européia, 2002)

Segundo HORVATH (2004), os usos em potencial para reciclagem dos resíduos de madeira da construção civil nos Estados Unidos são a reutilização, cavacos para combustível, leito para animais, mistura para adubo e novos produtos manufaturados para construção.

O SINDUSCON-SP, Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (PINTO, 2005), indica como possíveis soluções de utilização dos resíduos de madeira da construção civil, a destinação para atividades econômicas que possibilitem a reciclagem desses resíduos, a reutilização de peças ou o uso como material combustível em fornos e caldeiras. No caso do uso em caldeiras é recomendado a separação da serragem dos demais resíduos de madeira.

O SINDUSCON-MG (2006) indica como destinação do resíduo de madeira, empresas receptoras que, em quase sua totalidade, dão como destino a queima para fins energéticos. Nesse montante, além da destinação para queima, algumas empresas reutilizam o resíduo como fôrmas e uma empresa faz o tratamento físico, químico e térmico para disposição final em aterro específico.

A madeira tem se revelado um material promissor para construção civil seja pela sua relevância no contexto ambiental quanto pela sua qualidade como material de construção. Nesse contexto, o Brasil aparece como o país que tem a maior área mundial de reflorestamento, mas com uma pequena participação desse material na construção civil, comparado a outros materiais como tijolo e concreto.

Nos países industrializados, o uso da madeira como elemento construtivo é elevado, o que, em contra partida, gera o aumento no volume de resíduos desse material. Isso faz com que nesses países os programas de destinação de resíduos de construção e demolição se preocupem com o destino dos resíduos de madeira.

No Brasil, as poucas publicações sobre gerenciamento de resíduos de construção e demolição que apresentam dados sobre os resíduos de madeira provenientes desse setor são provenientes dos sindicatos das indústrias da construção civil. Ainda que o volume de edificações construídas em madeira seja pequeno, o volume de madeira utilizado em fôrmas para construção de estruturas de concreto armado é significativo, tornando necessário o estudo sobre a destinação desse resíduo.

Pesquisas relativas a resíduos de madeira proveniente de construção civil no Brasil são incipientes. Este fato estimula a investigação sobre esse tema e contribui para a formação de uma cultura relacionada a soluções para os problemas ambientais e de novas alternativas para o setor da construção civil.

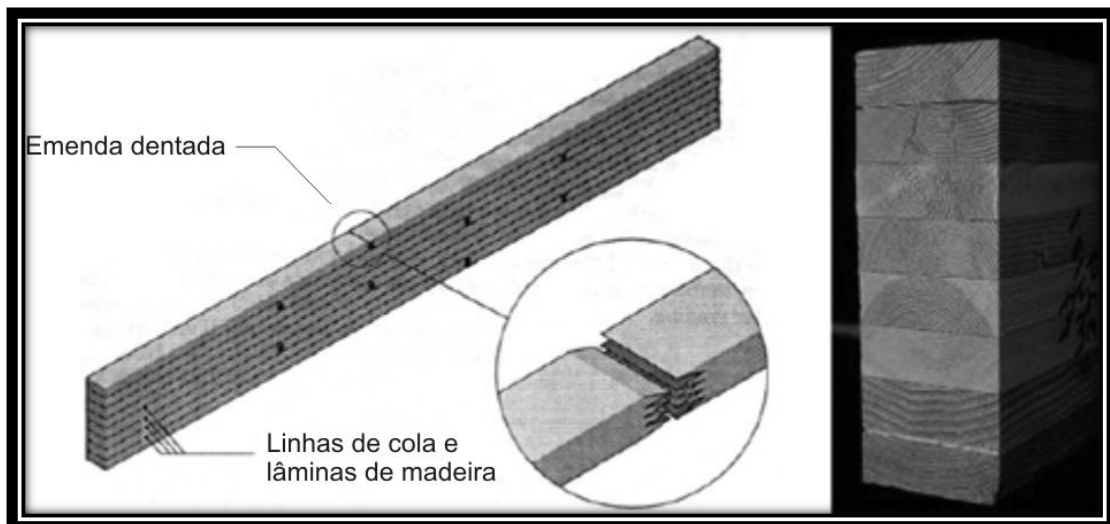
Não obstante a falta de pesquisas com relação aos resíduos de madeira provenientes da construção civil, serão apresentadas soluções que utilizam o resíduo de madeira, proveniente de fontes diversas, como elementos construtivos. Tendo em vista o potencial construtivo de que a madeira oferece, torna-se importante o estudo sobre que destinação deve ser dada aos seus resíduos. A seguir serão apresentados exemplos do uso de resíduos de madeira na construção civil. No item 3.2.2, serão apresentados dois materiais industrializados e com larga escala de uso em âmbito internacional e, no item 3.2.3, a utilização dos resíduos com a matriz cimento.

### **3.2.2 Reaproveitamento dos resíduos em escala industrial**

O desenvolvimento de tecnologia dos materiais e sistemas construtivos, associados à demanda ambiental, tem apresentado soluções diversas para a construção civil. Nesse sentido, a seguir, serão apresentadas as duas soluções mais usuais que são aplicadas em larga escala, que utilizam o resíduo de madeira ou o resíduo de madeira em potencial, como parte de sua constituição.

#### **A) Estrutura em madeira laminada colada**

A madeira laminada colada (MLC), ou glulam, é um material amplamente utilizado como elemento construtivo em países industrializados. A MLC é utilizada desde o século XIX, mas teve seu uso alavancado nos últimos 50 anos em função da tecnologia dos adesivos, que antes, por serem menos eficientes em relação à colagem das peças de madeira, tornavam seu uso limitado. A MLC é um elemento obtido a partir da colagem de topo e de face de pequenas peças de madeira (10mm a 50mm) e sob pressão em toda sua extensão, podendo ser na forma reta ou curva, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao eixo da peça (Figura 1). O fato de ser constituída por lâminas com espessuras, comprimentos e larguras variáveis, possibilita a construção de elementos estruturais com geometria variável podendo alcançar vãos livres com mais de 100 metros (FIORELLI, 2005; PAOLIELLO e CARRASCO, 1999).



**Figura 1 – Esquema geral e seção transversal de uma peça de MLC.**

Fonte: FIORELLI, 2005

Do ponto de vista ambiental, a MLC reduz a necessidade do uso de peças grandes de madeira. Sendo sua constituição baseada na união de várias peças pequenas, pedaços de madeira que normalmente seriam resíduos, passam a ser utilizados como material de alto desempenho. Segundo o CIMWB (1996), vigas feitas em MLC consomem 50% menos madeira que uma viga sólida de madeira, e suportam o mesmo carregamento.

Um dos fatores que levou ao desenvolvimento da MLC foi o fato de peças maciças de madeira terem sua resistência afetada devido ao enfraquecimento da seção ocasionado pela presença de defeitos como nós e medula, que reduzem significativamente a resistência e elasticidade das peças, comparadas com peças inteiras. Como a MLC é composta por pequenos pedaços de madeira elimina-se os principais defeitos que existem em peças de grandes dimensões (FIORELLI, 2005). Isso faz com que a MLC seja hoje um dos sistemas estruturais de madeira mais avançados, porém, ainda pouco utilizado no Brasil (SZÜKS, 2003).

Outro fator que, de certa forma, fundamentou a técnica da MLC, foi a necessidade de se utilizar o pínus, madeira de reflorestamento abundante no hemisfério norte, que devido a sua fácil trabalhabilidade e abundância, tornou-se apto ao uso. A MLC pode ser aplicada nas mais variadas formas estruturais, sendo utilizada desde pequenas passarelas até grandes estruturas (Figura 2), como o Palais d'Exposition d'Avignon, na França, com vão livre de mais de 100 metros (SZÜKS, 2003).



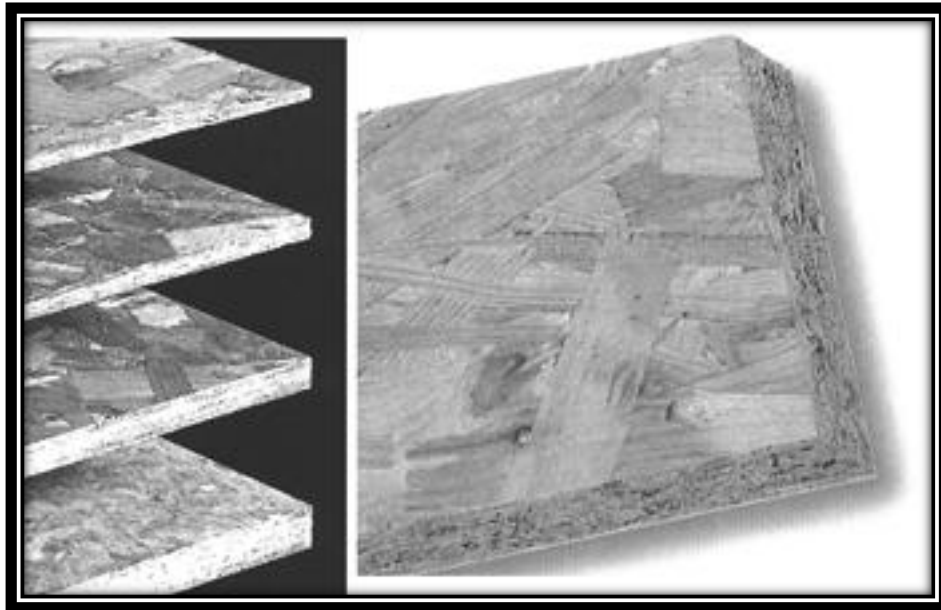
**Figura 2 – Ginásio olímpico com estrutura em MLC na Noruega**

Fonte: STUNGO, 2001

Para se ter uma idéia do mercado de estruturas em MLC, apenas na França existem cerca de 40 indústrias trabalhando na fabricação desse tipo de estrutura, atendendo ao mercado Francês e outros países como Bélgica, Argélia e China. No Brasil, apenas 3 empresas trabalham com a madeira laminada colada (SZÜCS, 2003).

### **B) Painéis OSB**

Os painéis de partículas orientadas, OSB (Oriented Strand Board) (Figura 3), foram desenvolvidos para suprir uma demanda não encontrada em painéis compensados comuns, a resistência mecânica para fins estruturais. Sua estrutura é composta por camadas de partículas ou feixes de fibras com resina fenólica, que lhe confere resistência à umidade, dispostas em uma mesma direção e prensadas para sua consolidação. Cada painel é composto de três a cinco camadas, orientadas em ângulo de 90 graus umas com as outras. Por ser produzido com madeira proveniente de toras de menor qualidade, o OSB tem custo mais baixo que outros tipos de painéis compensados estruturais. No entanto, o fato de usar matéria prima menos nobre não faz com que sua qualidade seja inferior, pois o que determina seu desempenho é a tecnologia de produção (FERREIRA, 2003).



**Figura 3 – Painel OSB (Oriented Strand Board)**

Fonte: ALBUQUERQUE *et al.*, 2003.

Os painéis OSB possuem alta resistência à flexão estática, não tanto quanto a madeira sólida, mas tão alta quanto a de compensados estruturais, aos quais substituem perfeitamente. Eles possuem a elasticidade da madeira aglomerada convencional, mas são mais resistentes mecanicamente (GOUVEIA, 2001).

Na construção civil, os painéis OSB são usados na produção de paredes, divisórias estruturais, pisos, vigas e forro (Figura 4). Devido às suas propriedades mecânicas e custo, ele está sendo usado também em outros setores como o de mobiliário industrial, embalagens, contêineres e vagões.

Na América do Norte, 51% das aplicações do OSB correspondem à construção de habitações, sendo seu uso aprovado por normas estabelecidas no Japão, Estados Unidos e Europa. Para se ter uma idéia da força econômica do OSB, em 2000 ele correspondia a 50% do mercado de painéis estruturais dos Estados Unidos (ALBUQUERQUE *et al.*, 2003). Outro motivo que impulsiona do uso dos painéis OSB na América do Norte é a questão ambiental. No “Green Building Guidelines” (ALAMEDA COUNTY, 2003), Guia para Construções Verdes, o painel OSB é recomendado pelo fato de na sua composição não ser necessário o uso de troncos de madeira de grande diâmetro, pelo fato de ser mais forte que as chapas de madeira tradicionais e por ser mais barato. Do ponto de vista ambiental, isso faz com que se preservem árvores mais velhas e reduza o desperdício de material durante o desdobro dos troncos (ALAMEDA COUNTY, 2003).



**Figura 4 – Aplicação do OSB em painéis pré-moldados para utilização na construção civil. Utilização do OSB na alma de vigas de madeira**

Fonte: ALBUQUERQUE *et al*, 2003

No mercado brasileiro, o OSB ainda é um painel relativamente desconhecido, faltando melhor divulgação de suas características e utilização, principalmente na construção civil. Apesar de tímida, sua aplicação já pode ser vista em pisos e divisórias, coberturas e obras temporárias como tapumes e alojamentos. Os painéis que estão sendo produzidos no Brasil estão certificados de acordo com a norma americana, o que permite os usos citados (FERREIRA, 2003).

### **3.2.3 Reaproveitamento dos resíduos com a matriz cimento**

Segundo ALBUQUERQUE *et al* (2003), em todo o mundo, o cimento é comumente usado na construção civil desde 1845, e há muito vem sendo objeto de estudo, inclusive pela indústria madeireira.

Segundo CARVALHO (2000), várias pesquisas sobre produtos a base de cimento Portland com uso de fibras de aço, de vidro, de carbono e de amianto, como reforço da matriz, têm sido desenvolvidas e apresentado características mecânicas adequadas. No entanto, esses produtos despertam polêmicas, seja pelo seu alto custo de produção ou pelos comprovados danos causados ao meio-ambiente. Nesse contexto, as fibras vegetais, no reforço de matrizes à base de cimento, tem se



mostrado bastante adequadas, despertando interesse no desenvolvimento de novos compósitos. O autor apresenta como potencial para as fibras vegetais as seguintes características:

- disponibilidade de matéria-prima renovável e aproveitamento de uma grande gama de resíduos;
- massa específica reduzida;
- boa resistência a agentes degradadores;
- facilidade de moldagem, transporte, corte e ligações;
- resistência a impactos;
- bom isolamento termo-acústico.

De acordo com CARVALHO (2000), as misturas madeira-cimento podem ser moldadas em fôrma sem sofrer pressão ou através da prensagem, podendo ser combinada ou não com a extrusão. Com relação à umidade, o autor cita o fato de que as partículas vegetais são altamente higroscópicas, sendo necessário molhá-las para que não absorvam a água do amassamento do cimento. Por outro lado, com relação à cura, não são necessários maiores cuidados com relação à perda d' água, uma vez que as partículas vegetais funcionam como reservatório, que libera a água na medida em que a matriz vai secando.

Sobre a compatibilidade da madeira com o cimento, MATOSKI (2005) diz que a madeira, dependendo da espécie, possui maior ou menor quantidade de carboidratos, glucosídeos, e componentes fenólicos que retardam a pega do cimento, podendo inclusive inibi-la. Outro aspecto a ser levado em consideração, segundo o autor, é a alta alcalinidade do cimento dissolvido na água diminuir a resistência da madeira, uma vez que essa é pouco resistente a meios alcalinos.

Segundo SILVA et al (2005), um dos maiores problemas na confecção de compósitos a base de cimento-madeira é a adesão entre os compostos, pois esse depende do material vegetal que se está usando. Segundo os autores, normalmente, as madeiras provenientes de coníferas são as mais adequadas por apresentarem propriedades compatíveis com o cimento, não causando a inibição de pega e endurecimento e, que estudos apontam também o uso de folhosas, como o eucalipto como sendo apto a esse uso.

A seguir, serão apresentados três exemplos sobre aplicações diferenciadas do uso de resíduos de madeira na matriz cimento na construção civil.

#### **A) Painéis de cimento-madeira**

Os painéis de cimento-madeira foram desenvolvidos na Alemanha em 1914, e produzidos em larga escala pela indústria europeia e japonesa, desde o início da década de 60. A produção brasileira de painel cimento-madeira é feita por empresas pequenas e em escala reduzida, além de serem painéis de baixa qualidade. Estudos mais avançados estão sendo realizados em universidades que poderão dar subsídios a uma produção nacional, desse tipo de painel, de alta qualidade (ALBUQUERQUE et al, 2003).

As características apresentadas por este produto permitem uma aplicação diversificada, colocando-o em posição superior aos outros tipos de painel (ALBUQUERQUE et al, 2003). A razão para sua boa aceitação se deve, entre outros fatores, às propriedades apresentadas, tais como: resistência ao ataque de fungos e cupins, bom isolante térmico e acústico, ser virtualmente incombustível e de fácil trabalhabilidade (REVISTA DA MADEIRA, 2003).

Sua aplicação é destacada para paredes de casas pré-fabricadas, bancadas (para-peito), pisos, revestimento de túneis, paredes divisórias, paredes isolante térmico e acústico, portas corta fogo, forros de casas, etc. Além da aplicação em residências, o painel cimento-madeira é utilizado em pavilhões, estádios e edifícios públicos, estando presentes em banheiros, lavanderias, cozinhas, etc. (REVISTA DA MADEIRA, 2003).

A composição dos painéis de cimento-madeira é relativamente simples, ela é formada basicamente de partículas ou fibras de madeira (Agregado), cimento Portland (Aglomerante) e água, numa proporção de 1:3:1,5 (com base no peso). Aditivos químicos têm sido empregados com o propósito de reduzir o tempo de endurecimento do cimento, acelerando o desenvolvimento da resistência. Sua tecnologia de produção é parecida com o processo de produção de aglomerados com resina sintética (REVISTA DA MADEIRA, 2003).

#### **B) Telhas onduladas a base de cimento Portland e resíduos de *Pinus caribaea***

O resíduo de madeira utilizado para o desenvolvimento das telhas onduladas veio do processo de fabricação de lápis. O trabalho teve como objetivo desenvolver dosagem

adequada de compósito madeira-cimento utilizando o resíduo citado visando a produção de telhas moldadas por vibração (PIMENTEL, 2000).

Segundo PIMENTEL (2000), a incompatibilidade química entre o resíduo *Pinus caribaea* e cimento foi avaliada através de curva de hidratação, que evidenciaram o efeito inibitório deste material. O material Serragem apresentou-se menos inibitório do que o material Parafinado. Isso mostra que produtos químicos utilizados na impregnação da madeira, no processo de fabricação do lápis, provocaram efeito adverso na hidratação do cimento.

De acordo com PIMENTEL (2000), as telhas produzidas apresentaram resistência mecânica compatíveis com as normas específicas para a produção desse tipo de material, apesar dos resultados obtidos serem inferiores (resistência mecânica e permeabilidade) àqueles correspondentes às telhas produzidas com micro-concreto (traço referência). As características de ductilidade, o desempenho térmico e a baixa massa específica apresentam características vantajosas que podem possibilitar a utilização desse material futuramente.

### **C) Elementos de concreto não estrutural com adição de pó de serra da madeira**

DANTAS Filho (2004), em sua dissertação de mestrado, trabalhou no desenvolvimento de blocos de concreto não estrutural, onde acrescentou até 50% em volume de pó de serra. A adição da madeira aumentou a resistência térmica do material, ao mesmo tempo em que seu peso foi reduzido. Embora a resistência à compressão tenha sido inferior ao bloco de concreto de referência, o produto final atendeu às normas para alvenaria de vedação.

O trabalho demonstra que o pó de serra como agregado miúdo pode substituir de forma total ou parcial o agregado miúdo mineral na produção de blocos de concreto para vedação e/ou enchimento em lajes pré-moldadas. Tendo ainda como vantagens seu peso reduzido e melhor desempenho térmico devido à baixa condutividade térmica da madeira.

## **3.3 Arquitetura de terra**

Neste item será feita uma abordagem histórica acerca da arquitetura de terra e, em seguida, serão apresentadas as principais técnicas construtivas que têm o solo como principal constituinte.

### **3.3.1 A terra como elemento construtivo**

A denominação “arquitetura de terra” é dada à produção arquitetônica que utiliza a terra crua (solo que não passou pelo processo de queima) como o principal material empregado durante a construção (OLIVEIRA, 2005).

Segundo BARDOU e ARZOUMANIAN (1979), arquitetura de terra se refere aos edifícios construídos em terra sem queimar, excluindo os tijolos e as cavidades abertas em terrenos, onde vivem tribos de determinados oásis no norte do Saara e mais de 10 milhões chineses no Cinturão de Loess.

A terra crua tem sido usada pelo homem como material de construção desde o antigo Egito, a 4.400 A.C., onde era empregada na fabricação de tijolos para construção de casas e palácios (CARVALHO, 1968). Segundo Carvalho, a terra crua era usada na Mesopotâmia, Pérsia, Índia, China, Japão e pelas civilizações Astecas, Maias e Incas.

De acordo com ALVARENGA (1990), não obstante as diversas condições climáticas e culturas das mais específicas, as tecnologias que empregam terra crua como material de construção têm sido utilizadas em vários países. Segundo CRATERRE-EAG (1991), a terra tem sido usada por 10 mil anos como material de construção e atualmente, um terço da população mundial vive em um edifício construído com terra.

Em função da particularidade cultural, condição ambiental, tipos de solos disponíveis e em função de sua necessidade, cada povo desenvolveu sua técnica construtiva e, embora tenham alguma semelhança, cada local possui uma nomenclatura própria para técnica (OLIVEIRA, 2005).

Mesmo nos dias de hoje, países industrializados têm reavivado o interesse pela arquitetura de terra por dois motivos. O primeiro surgiu no oeste dos Estados Unidos, em resposta ao desejo de se criar ambientes mais humanizados em alternativa aos materiais frios e “sem alma”, simbolizados pelo concreto e pelo plástico. O segundo motivo é a aceleração do custo da energia, que tem grande impacto em produtos como o cimento e tijolos queimados. Além do mais, na maioria das vezes, edificações a base de terra crua são construídas pelos próprios usuários ou comunidades, o que acaba reduzindo seu custo (DOT *et al*, 1991).

Houben e Boubekeur (1998) confirmam que embora tenha sido deixada de lado há algum tempo em função do advento dos materiais de construção industrializados, principalmente o concreto e o aço, atualmente a terra crua tem sido objeto de interesse em países em desenvolvimento e países industrializados. Seu uso abarca

uma produção que vai desde o mais rudimentar processo manual, ao mais sofisticado sistema industrial mecanizado, sendo o sistema mais desenvolvido o bloco de terra prensado.

WEIMER (2005) exemplifica a arquitetura de terra através de monumentos históricos, como a maior pirâmide do mundo, a do Sol, em Teotihuacan e a muralha da China, maior construção realizada pela humanidade.

Os motivos pelos quais a arquitetura de terra vem sendo resgatada, mesmo em países industrializados, corroboram com a necessidade de se encontrar soluções para o uso da nossa nova fonte de matéria-prima, que são os diversos tipos de resíduos. Esse fato se intensifica se for considerado que o futuro é construído olhando para o passado e tendo plena consciência da situação em que nos encontramos no presente.

### **3.3.2 Técnicas construtivas em terra**

De acordo com CRATERRE-EAG (1991), as construções em terra crua podem ser divididas em 12 principais grupos: cavada, cortada, enchida, coberta, comprimida, moldada a mão, empilhada, moldada em fôrma, extrudada, armada, conformada e despejada.

Segundo WEIMER (2005), durante quatro quintos da história brasileira, a terra foi um dos materiais de construção mais importantes. Sua inserção se deu com a chegada dos portugueses, que há séculos dominavam essa tecnologia.

Os meios de construção com terra mais utilizados no Brasil são o abobe e a taipa, que é dividida em diferentes técnicas como taipa-de-pilão, taipa-de-sebe, taipa-de-sopapo e taipa-de-mão.

#### **A) Adobe**

Segundo ALVARENGA (2004), o adobe, “adobo”, ou tijolo cru, talvez seja a tecnologia de terra crua de maior utilização, e que ainda continua sendo aplicada praticamente da mesma forma, em diversas regiões, devido a sua simplicidade de execução. Sua conformação se dá através da mistura de terra e água até se obter uma mistura plástica que permita sua moldagem. A técnica consiste em misturar a terra com água até se obter uma mistura plástica, capaz de ser moldável. As fôrmas variam de tamanho de acordo com o local, no Brasil os blocos são menores e

possuem uma grande variação de tamanho, podendo ser citada as dimensões: 8x12x25 e 7x15x31 cm.



**Figura 5 – Tijolos de adobe em processo de secagem**

Fonte: ECOCENTRO IPEC

WEIMER (2005) cita o Adobe como uma técnica que já era conhecida na Antiguidade mesopotâmica e no Egito pré-faraônico. Heródoto, Plínio, e Vitruvius atestam seu amplo uso na Antiguidade clássica. Seu designativo português vem do árabe *al Tob* e foi amplamente utilizado em Portugal durante o domínio berbere.

Segundo WEIMER (2005), ele pode ser descrito como tijolo cru, feito de argila compactada, quase sempre secado ao vento e/ou ao sol para adquirir maior resistência e permitir que seja assentado com argamassa de barro. Em sua forma mais simples, conhecido como técnica “bolo de barro”, é como um cilindro alongado que, pelo peso próprio, durante a secagem adquire uma secção elíptica. Pode ser assentado sem cura, o que garante a rapidez da construção e dispensa o uso de argamassa, pois a ligação dos blocos é feita através do barro ainda úmido. O problema desse sistema é a presença de fissuras que são causadas durante a retração. Todavia, esse problema pode ser atenuado mediante a colocação de ramos e galhos nas juntas do adobe. A forma mais usual é a compactação do barro em uma armação de madeira, fazendo com que adquira uma forma prismática, cujas arestas

possuem a proporção de 1:2:4. Essas fôrmas podem ser unitárias ou múltiplas, o que promove o aumento da produção em canteiro.

### **B) Taipa de pilão**

Segundo WEIMER (2005), essa técnica constitui num patrimônio universal, uma vez que é encontrada em todos os continentes e nas mais diversas culturas.

De acordo com EIJK (2005), a taipa de pilão é uma técnica que constrói uma estrutura auto-portante, utilizando-se principalmente a terra como material e que tem sua resistência e solidez adquirida pelo método de apiloamento do material, conformando-se em um conjunto monolítico.



**Figura 6 – Fabricação de parede em taipa de pilão**

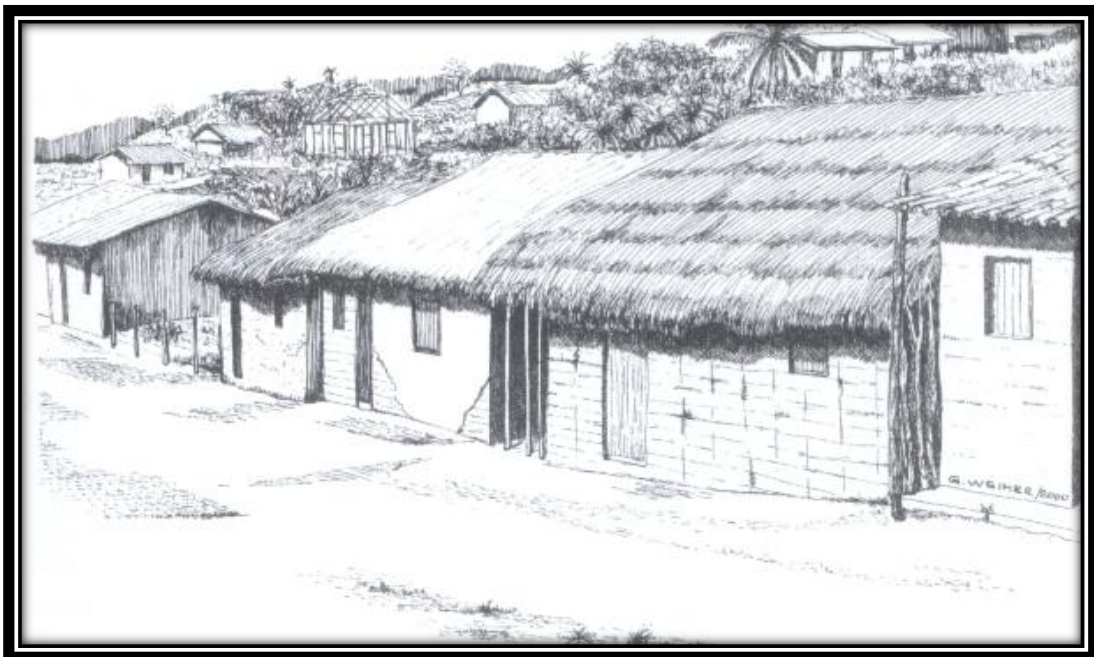
Fonte: ECOCENTRO IPEC

A técnica consiste em socar com um pilão o solo “levemente” umedecido entre dois tabuados laterais, chamados de taipais, que são amarrados entre si na parte superior e inferior, com peças chamadas de canga ou agulhas. Para garantir a uniformidade da compactação, a terra é despejada em camadas que são apiloadas uma a uma. Na

medida em que se alcança a altura da fôrma, as tábuas são elevadas e o procedimento de apiloamento continua até que seja alcançada a altura da parede a ser construída. Uma das características da taipa-de-pilão é o fato de que, ao ser concluída, a parede pode imediatamente receber cargas. Uma das formas de minimizar o aparecimento de fissuras durante o processo de cura é a inserção de fibras vegetais, ou animais (WEIMER, 2005).

### **C) Taipa de mão**

Segundo (WEIMER, 2005), as taipas de mão, de sebe e de sopapo são referenciadas, na prática, como sinônimos, mas na verdade, são técnicas diferenciadas. A taipa de mão está diretamente associada ao uso em construções de pau-a-pique, onde é usada para fechar as frestas formadas entre os galhos verticais. Sua execução se dá através do amassamento do barro molhado com os pés, as mãos ou outro meio, até adquirir uma plasticidade que permita pressionar o barro com as mãos para dentro das frestas. Durante o preenchimento, o barro é alisado com um pedaço de madeira. O fechamento pode ser feito tanto do lado externo quanto do interno, mas o mais comum é usar nas duas faces da parede.



**Figura 7 – Casas de taipa de mão nos arredores de Alcântara, MA**

Fonte: WEIMER, 2005

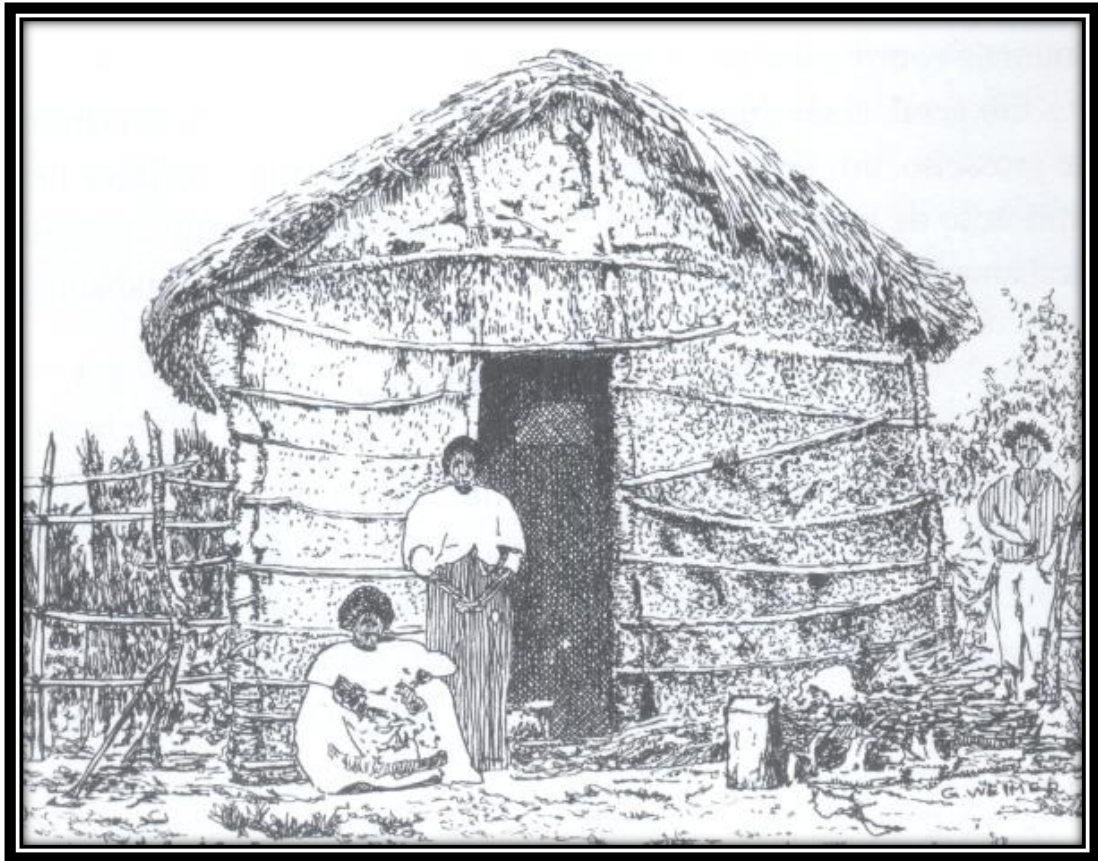


#### **D) Taipa de sebe**

Esse sistema é originado de uma técnica de construir cercas chamado sebe. Constitui no entrelaçamento de arbustos e ramos que são sustentados por estacas fincadas ao chão. Quando se utiliza essa mesma técnica para construir paredes de barro, elas passam a ser denominadas taipa de sebe. A maneira mais comum de construir com esse sistema é a partir de um requadro de galhos, onde os verticais são fincados ao chão, onde se amarram ou se entrelaçam os horizontais. Depois de concluído esse tramo, são aplicadas ao mesmo tempo duas camadas de barro, uma interna e outra externa de tal modo que se faça uma ligação por entre os vazios da trama de galhos. Para que o barro atinja a plasticidade adequada, é necessário que esteja bem úmido, o que ocasiona o surgimento de fissuras. Para minimizar esse problema, costuma-se misturar ao barro palha de fibras longas ou fibras animais como lã de ovelha ou crina de cavalo (WEIMER, 2005).

#### **E) Taipa de sopapo**

A taipa de sopapo é na verdade uma variação da maneira de como o barro é aplicado na estrutura. Ao invés de ser amassado ao mesmo tempo pelos dois lados da trama de ramos, ele é arremessado em forma de bolas, que vão sendo moldadas manualmente. Ao atirar o barro, a ligação entre as duas camadas acontece de forma mais consistente. Esse método requer maior destreza e perfeito sincronismo entre os trabalhadores, pois o barro arremessado de cada lado da trama deve atingir exatamente o mesmo local para que a coesão dos materiais aconteça de forma correta. Como nos outros tipos de taipa, a inserção de fibras vegetais ou animais é desejável, a fim de se evitar a fissuração do material durante a retração (WEIMER, 2005).



**Figura 8 – Casa construída em taipa de sopapo, fins do século XIX – região de Porto Alegre, RS**

Fonte: WEIMER, 2005

Dentre os aspectos levantados nas técnicas apresentadas, um dos maiores problemas apresentados é a formação de fissuras, que são provocadas durante a cura do material em função da quantidade de água misturada à terra, o que provoca uma maior retração. Em todos os casos, o método mais comum para minimizar a fissuração é inserção de fibras vegetais ou animais na mistura. Levando-se em consideração que o resíduo de madeira proveniente da construção civil é uma fibra vegetal, a investigação sobre sua inserção em uma mistura caracterizada pela utilização de um grande volume de terra pode dar um novo olhar a essa matéria-prima, comumente usada como combustível. Dessa forma, ao invés provocar a queima do material e retornar para atmosfera o gás carbônico capturado pelas árvores ao longo de anos, o mesmo será estocado como elemento construtivo, fechando também o ciclo de aproveitamento de um resíduo diretamente em sua fonte produtora.

A terra também se destaca por estar presente e disponível na maioria dos canteiros de obras, em ambientes rurais e urbanos, onde muitas vezes chega a ser um problema devido a falta de lugar para depositá-la. Dessa forma, a possibilidade de trabalhar com um material que associe matérias-primas de fácil acesso corrobora não apenas com a questão ambiental mas também com a questão social, podendo inclusive ser uma alternativa para construções que requerem um baixo custo.

### **3.4 Solo-cimento**

A seguir será apresentada uma visão geral sobre o solo-cimento, as vantagens e desvantagens sobre sua utilização e os principais critérios que envolvem a escolha do solo para sua utilização.

#### **3.4.1 O solo-cimento como material de construção**

O solo-cimento nada mais é que a terra compactada à qual se introduziu uma pequena quantidade de cimento Portland para estabilizá-la. O efeito do cimento em uma mistura de terra serve para reduzir sua contração e, ao mesmo tempo, aumentar sua resistência (MERRIL, 1949).

De acordo com a ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (1985), solo-cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas ao tipo de uso. O material resultante dessa mistura possui boa resistência à compressão, boa durabilidade, bom índice de impermeabilidade e baixo índice de retração volumétrica.

O componente principal da mistura é o solo. O cimento representa uma quantidade que varia entre 5 e 10% do peso do solo, sendo suficiente para promover a estabilização e conferir as propriedades de resistência desejadas (ABCP, 1985).

Segundo a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), solo-cimento é um produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem executada conforme a NBR 12253 (1992).

A adição de cimento ao solo tem como principal função sua estabilização, fazendo com que sua coesão aumente. Uma das vantagens de se usar esse aglutinante é que a maioria dos solos pode ser estabilizada de maneira eficiente e econômica com o seu emprego (CAPUTO, 1988).

Segundo EIJK (2005), a adição de cal ou cimento é feita para melhorar a resistência à intempéries, mas que também existe um ganho na resistência à compressão. Em solos com presença de caolinas, o cimento é o estabilizante mais adequado, enquanto que em solos com montmorilonita, a cal é mais eficiente.

A propriedade que tem sido usada como índice tecnológico para descrever as misturas de solo-cimento é a resistência à compressão. Sendo ela o indicador da relação da mistura solo-cimento-água, pega relativa e a velocidade de endurecimento (LOPES, 2002).

A Tabela 3 apresenta os valores de resistência à compressão simples para o solo-cimento obtidos por LOPES (2002), para um solo com as seguintes características: Teor de areia: 45 a 90%; Teor de silte + argila: 10 a 35%; Teor de argila: < 20%; Limite de liquidez < 45%. Foi utilizado cimento CII-E-32.

**Tabela 3 – Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cimento moldados com teores de cimento de 6, 8, 10, 12 e 14%, aos 7 e 28 dias de idade**

Teor de cimento	Resistência à compressão (MPa)	
	CP 7 dias	CP 28 dias
SC 6%	0,51 ± 0,03 <sup>eB</sup>	0,89 ± 0,08 <sup>eA</sup>
SC 8%	0,97 ± 0,06 <sup>dB</sup>	1,56 ± 0,23 <sup>dA</sup>
SC 10%	1,73 ± 0,14 <sup>cB</sup>	4,07 ± 0,07 <sup>cA</sup>
SC 12%	2,73 ± 0,33 <sup>bB</sup>	4,63 ± 0,40 <sup>bA</sup>
SC 14%	3,19 ± 0,20 <sup>aB</sup>	6,62 ± 0,26 <sup>aA</sup>

*Médias na mesma coluna, seguidas da mesma letra minúscula, não diferem entre si pelo teste t de Student (P>0,05) – Médias na mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste t de Student (P>0,05).*

Fonte: LOPES, 2002

MIRANDA et al (2006), com a utilização de um solo arenoso fino de Ilha Solteira, estabilizado com 10% cimento CP-V-ARI em relação à massa de solo e 2% de aditivo hiperplastificante em relação à massa de cimento, obteve para resistência à compressão simples os resultados apresentados na Tabela 4. Para o módulo de elasticidade, obtido pelo método estático, foi considerada a tensão de trabalho equivalente a 40% da tensão de ruptura (MIRANDA et al, 2006). Os resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 4 – Resistência à compressão simples**

Teor de cimento	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	56 dias	120 dias
10%	1,5	2,4	3,0	3,5
15%	2,4	3,8	5,0	6,4
20%	6,5	8,2	9,9	12,6

**Tabela 5 – Módulo de elasticidade estático**

Teor de cimento	Módulo de elasticidade (GPa)			
	7 dias	28 dias	56 dias	120 dias
10%	2,2	3,2	4,0	4,8
15%	3,5	4,5	5,3	6,2
20%	5,9	7,2	8,1	8,8

### 3.4.2 Vantagens na utilização de solo-cimento

Segundo FUNTAC (1999), os tijolos de solo-cimento são uma alternativa para construções, pois após um curto período de cura apresentam resistência à compressão simples parecida à dos tijolos maciços e blocos cerâmicos, com um custo de produção reduzido.

Dentre as já mencionadas, pode-se listar outras vantagens citadas por SILVA (2005):

- disponibilidade do solo no local ou próximo da obra, evitando e/ou reduzindo gastos com transporte. Caso o solo não seja apropriado é possível fazer correções granulométricas;
- tecnologia simples e de fácil assimilação, não necessitando de mão de obra especializada. Esse fato contribui também para que os trabalhos possam ser desenvolvidos em sistemas comunitários;
- sua condição termo-acústica é compatível com a alvenaria de tijolo cerâmico, principalmente pelo fato da terra crua ser má condutora de calor.
- durabilidade elevada e manutenção reduzida por apresentar elevada resistência e impermeabilidade;

- revestimentos como chapisco, emboço e reboco são dispensáveis devido ao acabamento liso das paredes monolíticas ou da perfeição das faces prensadas. Nesse caso é necessário apenas uma pintura simples para aumentar a impermeabilidade das paredes;
- redução no consumo de energia seja na obtenção do material ou na construção. Neste caso não há necessidade de queima do material e a prensa a ser utilizada na produção de tijolos pode ser manual.

A desvantagem é apresentada na grande variedade de solos existente, isso implica na caracterização do solo a ser utilizado sempre que se muda de local. São necessários para avaliação do solo os ensaios de granulometria, compactação e compressão simples. Esses ensaios são simples e podem ser feitos em um grande número de laboratórios (SILVA, 2005).

### 3.4.3 Critérios para escolha do solo

Segundo POÇO (1984) e NBR 10832 (1989), os solos recomendados para utilização em solo-cimento devem atender às características apresentadas a seguir:

- passante na peneira ABNT 4,8 mm: 100%
- passante na peneira ABNT 0,075 mm: 10% a 50%
- limite de liquidez: < ou = a 45%
- índice de plasticidade: < ou = a 18%

De acordo com CEPED-THABA (1984), critérios baseados no teor de areia simplificam os procedimentos de escolha dos solos mais adequados. Nesse sentido, recomendam que a especificação do solo, com fração passante na peneira de 4,8 mm da ABNT, para utilização com o cimento Portland deve seguir os seguintes critérios:

- 45% a 90% de teor de areia;
- 10% a 55% de teor de silte + argila;
- <20% de teor de argila;
- <45% de limite de liquidez.

Caso os solos disponíveis não atendam os critérios exigidos para ser feita a estabilização com o cimento Portland, é possível fazer sua correção granulométrica adicionando areia ou outro solo (CEPED-THABA, 1984; POÇO, 1984).

A seguir são apresentados ensaios expeditos e testes qualitativos para seleção de solos que, segundo CEPED-THABA (1984), podem ser usados em situações que não existe a possibilidade de ser feita uma caracterização do solo em laboratório.

**Ensaio da caixa:** tomar uma porção de terra destorroada e acrescentar água até a mistura aderir a uma superfície metálica, como a colher de pedreiro. Colocar a mistura em uma caixa com dimensões internas de 60x8,5x3,5 cm, previamente lubrificada com um desmoldante, como óleo diesel.

Deixar a caixa moldada com a mistura na sombra e depois de sete dias medir a retração no sentido do comprimento. O solo será aprovado para utilização com o cimento se o total da retração não for superior a 2 cm e se não aparecer trincas.

**Ensaio do cordão:** tomar uma porção de terra seca e acrescentar água até que os cordões rolados comecem a se quebrar com um diâmetro de 3 mm. Formar uma bola com a umidade utilizada e verificar a força necessária para esmagá-la entre o polegar e indicador:

- cordão duro – a bola é quebrada com muito esforço;
- cordão mole – a bola se fissa ou esmigalha com pouco esforço;
- cordão frágil – não é possível reconstituir a bola sem que ela se fissure ou esmigalhe.

**Ensaio da fita:** tomar uma porção de terra com a mesma umidade do ensaio do cordão e fazer um cilindro do tamanho de um cigarro. Amassar o cilindro de modo que uma fita seja formada com espessura de 3 a 6 mm e com o maior comprimento possível:

- fita longa – 25 a 30 cm sem dificuldade;
- fita curta – 5 a 10 cm com dificuldade.

**Ensaio do bolo:** tomar uma porção de terra bastante úmida e colocá-la no oco da mão. Golpear essa mão com a outra até que a água saia para superfície da amostra, fazendo com que fique com um aspecto liso e brilhante. Pressionar o bolo com os dedos:

- reação rápida – após 5 a 10 golpes a água aflora à superfície do bolo e a pressão dos dedos faz a água desaparecer imediatamente. Uma pressão mais forte faz o bolo esmigalhar;
- reação lenta – são necessários 20 a 30 golpes o afloramento da água. A pressão dos dedos faz com que o bolo se deforme como uma bola de borracha.

**Ensaio da resistência seca:** fazer duas ou três pastilhas de terra bem úmida com cerca de 1 cm de espessura e 2 a 3 cm de diâmetro. Secar as pastilhas ao solo por 2 ou mais dias e, após esse período, tentar esmagá-las entre os dedos indicador e polegar.

Grande resistência seca – é muito difícil esmagar a pastilha e, quando se consegue, ela se quebra como um biscoito.

Média resistência seca – não é muito difícil esmagar a pastilha e com algum esforço consegue-se reduzir os pedaços a pó.

Fraca resistência seca – é muito fácil partir a pastilha e, ao partir-se, reduz-se a pó.

A Tabela 6 é um complemento dos métodos qualitativos citados anteriormente.

**Tabela 6 – Métodos qualitativos de escolha do solo**

<b>Ensaio do cordão</b>	<b>Ensaio da fita</b>	<b>Ensaio do bolo</b>	<b>Resistência seca</b>	<b>Tipo de solo</b>	<b>Possibilidades de utilização</b>
Cordão frágil ou resistência nula	Fita curta ou não se consegue fazer a fita	Reação rápida a lenta, mas jamais muito lenta	Fraca a nula geralmente nula	Areias finas, areias finas siltosas, areias finas argilosas, siltes argilosos	Solo prensado para tijolos, terra compactada com ou sem cimento; quando muito arenosos, juntar solos finos, siltes e argilas siltosas
Cordão frágil a semi-duro	Fita curta	Reação lenta a muito lenta	Fraca a média	Siltes	Utilização mais difícil que os solos anteriores, mas possível com o uso de cimento
Cordão semi-duro	Fitas curtas e longas	Reação muito lenta ou não tem reação	Média a grande	Argilas com pedregulhos, argilas com areia e argilas siltosas	Possível de usar apenas para terra compactada ou tijolo prensado, com cimento
Cordão duro	Fitas longas	Não tem reação	Grande	Argilosas	Não deve ser usado

CEPED-THABA (1984)



### 3.5 Solo-cimento e o resíduo de madeira

Para esse item da pesquisa foi encontrado apenas um trabalho que explora o uso do resíduo de madeira associado ao solo-cimento. Mesmo assim, o trabalho em questão não aborda o resíduo de madeira proveniente da construção civil (RMCC).

SILVA (2005) desenvolveu, em sua dissertação de mestrado, tijolos de solo-cimento com a adição de serragem de madeira como reforço. Foram trabalhados dois tipos de solos, aos quais foram adicionados o agrofilito e a areia, com a finalidade de correção granulométrica, resultando em amostras de um solo mais arenoso (Homog. 01) e outro mais argiloso (Homog. 03). O resíduo de madeira utilizado foi extraído de peças de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*, utilizados nas proporções de 0,5%, 1%, 2% e 3% da massa total de solo-cimento. O objetivo do trabalho foi determinar a resistência do tijolo em função das características do solo e da dosagem de resíduo. Segundo a autora, a inclusão de 0,5% de resíduo no solo mais arenoso mostrou ser a melhor dosagem por aumentar a resistência dos tijolos e prismas, por diminuir o módulo de elasticidade e aumentar a ductilidade do composto.

Os procedimentos apresentados por SILVA (2005) seguiram os adotados na confecção de materiais a base de solo-cimento, pois como foi dito no início desse item, trabalhos que contemplem a adição do resíduo de madeira a esse composto não estão disponíveis até o momento.

Além dos materiais citados, SILVA (2005) utilizou o cimento Portland de alto forno tipo CPIII-32-RS, por ser, segundo o autor, o disponível na região. Utilizou-se água destilada para os ensaios de laboratório.

A caracterização do resíduo de madeira foi feita através do peneiramento da serragem, utilizando-se o resíduo retido entre as peneiras # 4 (4,75 mm) e # 10 (2,0 mm). Com vista à impermeabilização do material, o resíduo foi imerso por 20 minutos em uma solução de Sulfato de alumínio  $[Al_2(SO_4)_3]$  e água (1% de Sulfato em relação à água utilizada), tendo o material, após esse banho, passado por um processo de secagem em estufa a 60° C (SILVA, 2005).

SILVA (2005) utilizou para confecção dos corpos-de-prova, molde com dimensões de 50x100 mm. Segundo o autor, foram feitos testes com moldes com dimensões de 35x87,5 mm, segundo a norma americana ASTM D 2166-91, e com as dimensões 100x127 mm, segundo a NBR 12024-92. De acordo com o autor, a relação de dimensões do molde de 100x127 mm era diferente das dimensões dos outros dois moldes utilizados, não sendo possível estabelecer uma relação comparativa entre os moldes. Dessa forma, em uma segunda análise, a comparação entre os corpos-de-

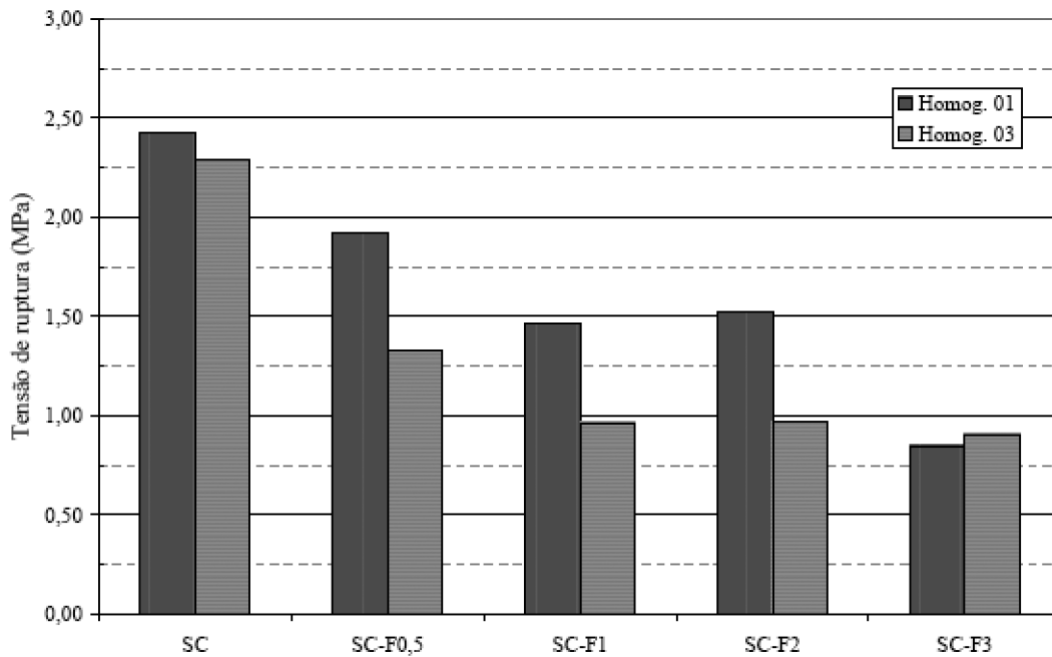
prova com dimensões de 50x100 mm e 35x87,5 mm, através dos ensaios de compressão realizados, mostraram-se compatíveis, optando-se então pelos moldes de 50x100 mm.

A quantidade de água acrescentada à mistura solo-cimento-resíduos foi obtida no ensaio de compactação Proctor Normal para mistura solo-cimento, onde o teor de umidade ótimo foi o parâmetro de dosagem. A percentagem de cimento utilizada foi a de valores utilizados na prática, tendo sido usado 10% de cimento em relação à massa de solo seco para o solo-cimento, e em relação à soma do solo seco e da massa de resíduo para o solo-cimento-resíduo de madeira. A percentagem de resíduo foi determinada em relação à massa de solo seco.

A homogeneização dos materiais, para moldagem dos corpos-de-prova, foi feita na seqüência: solo, cimento, resíduo de madeira e por último a água. Segundo o autor, essa seqüência facilita o processo de mistura, pois se a água for colocada antes da madeira (como é feito com misturas que usam fibras vegetais), as partículas finas do solo fazem com que ele fique mais plástico e dificulta a posterior homogeneização com o resíduo de madeira.

Os corpos-de-prova foram moldados seguindo os parâmetros obtidos na compactação Proctor Normal para solo-cimento, massa específica aparente seca e teor de umidade ótimo, mantendo-se as dosagens definidas, alterando-se apenas a quantidade de solo que reduziu proporcionalmente ao acréscimo de resíduo de solo. Segundo SILVA (2005), esse procedimento garante que a relação em peso entre o cimento e o solo mais resíduos sejam sempre a mesma para uma dada porcentagem de cimento. De acordo com o autor, não houve necessidade de fazer o capeamento dos corpos-de-prova devido à qualidade do acabamento obtido.

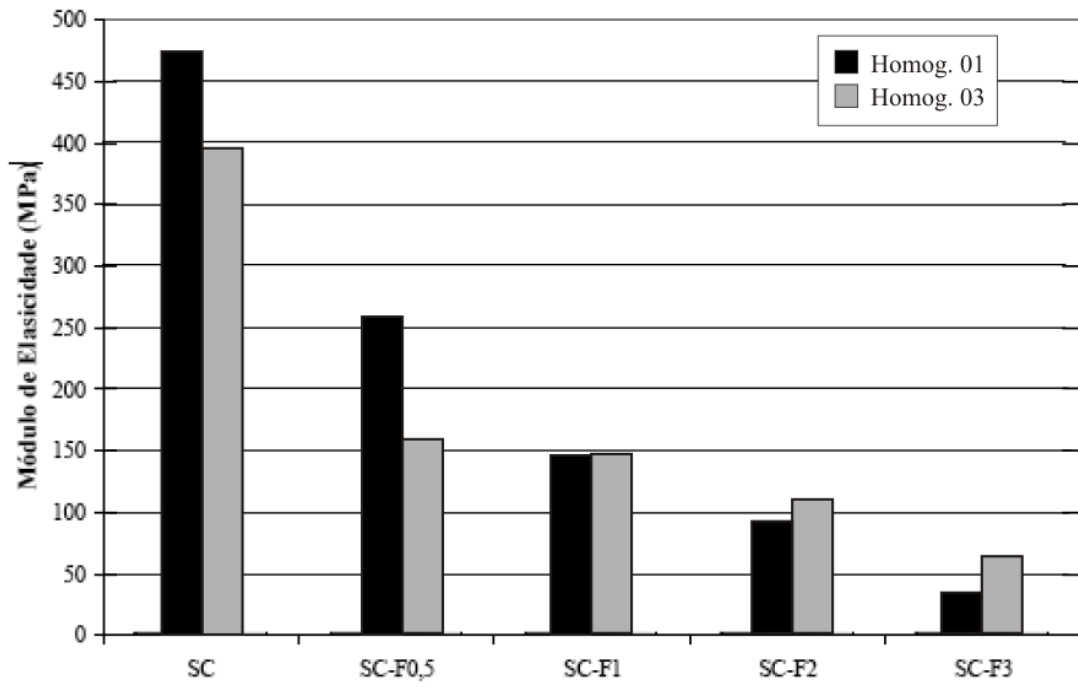
No ensaio de compressão simples, os valores obtidos por SILVA (2005), apresentados na Figura 9, mostram que os valores médios alcançados para as misturas com resíduo de madeira estão abaixo de 2 MPa, onde a mistura que alcançou o melhor desempenho foi a com teor de 0,5% de resíduo. Os teores com 1,5% e 2% ficaram próximos a 1,5 MPa e a mistura com maior teor de resíduo, 3%, abaixo de 1 MPa.



**Figura 9 - Comparação entre a resistência à compressão simples média nos corpos-de-prova para os solos Homog. 01 e 03**

Fonte: SILVA (2005)

SILVA (2005) determinou o módulo de elasticidade a partir dos ensaios de compressão simples. A Figura 10 apresenta os resultados obtidos para os dois tipos de solo estudados. Em ambos os casos ocorreu um decréscimo no módulo de elasticidade com a inclusão de resíduos, mantendo-se o solo mais arenoso (Homog. 01) um módulo mais elevado com a adição de 0,5% de resíduo. Quando é atingido o teor de 1% de resíduo os dois solos apresentam módulo semelhante e, a partir desse ponto, na medida em que é acrescentado mais resíduo, o solo mais argiloso (Homog. 03) apresenta o módulo mais elevado.



**Figura 10 – Módulo de elasticidade determinado a partir de corpos-de-prova para os solos Homog. 01 e 03**

Fonte: SILVA (2005) / modificado

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

As informações apresentadas nesse capítulo abarcam a procedência dos materiais utilizados, no caso o solo, o cimento, a água e o RMCC – resíduo de madeira proveniente da construção civil, a maneira como eles foram preparados, caracterizados e os ensaios preliminares de compactação. Também são apresentados os ensaios realizados nos corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-RMCC, sendo esses: variação dimensional, absorção de água, compressão simples, flexo-tração e módulo de elasticidade.

### **4.1 Caracterização dos materiais**

Nesse trabalho foi feita a caracterização física e mecânica do solo, do RMCC e dos corpos-de-prova de solo-cimento, aos quais se adicionou diferentes teores de resíduo de madeira da construção civil. O cimento e a água não foram analisados, tendo sido utilizado o cimento do mesmo saco para todas as amostras e a água proveniente do mesmo fornecedor. A seguir são apresentadas as etapas do trabalho realizado: procedência e caracterização física do resíduo de madeira e, a procedência e caracterização física e mecânica do solo.

#### **4.1.1 Procedência do resíduo de madeira**

O resíduo de madeira proveniente da construção civil (RMCC) utilizado foi coletado na unidade de RMCC da Multilix, empresa paulista que atua na área de transbordo, triagem, processamento e comercialização de resíduos da construção civil. Foram coletados aproximadamente 70 kg de amostra, proveniente de lote que havia sido triturado no mesmo dia. Como a coleta foi feita no período de estiagem, o material estava seco. Durante o período de estocagem no laboratório, o RMCC permaneceu acondicionado em sacos plásticos e, após o peneiramento, em uma caixa plástica de armazenagem com tampa.

#### **4.1.2 Caracterização física do resíduo de madeira**

O RMCC utilizado nesse estudo foi caracterizado quanto ao teor de umidade, análise dimensional e granulométrica.

O teor de umidade do RMCC foi determinado adaptando-se o procedimento para solo descrito na norma DNER-ME 213/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994). Cerca de 50 g de madeira foi colocada em um recipiente

metálico, que foi tampado e pesado. Após a remoção da tampa o recipiente foi colocado em uma estufa a 105 °C por um período de 24 horas. O recipiente foi então retirado da estufa, a tampa foi recolocada e foi resfriado naturalmente. Após atingir a temperatura ambiente, o recipiente com a tampa foi pesado novamente.

O teor de umidade foi então calculado através da equação abaixo:

$$h = \frac{m_{bu} - m_{bs}}{m_{bs} - m} \cdot 100 \quad (4.1)$$

sendo:

h = teor de umidade (em %)

$m_{bu}$  = massa bruta úmida + recipiente (com tampa)

$m_{bs}$  = massa bruta seca + recipiente (com tampa)

m = massa do recipiente (com tampa)

A análise dimensional foi realizada utilizando-se uma folha quadriculada com uma malha de 20x20mm, onde o material foi espalhado para que se pudesse avaliar qualitativamente o tamanho dos cavacos, pois o RMCC é um material bastante heterogêneo.

A classificação granulométrica do RMCC foi baseada em peneiramento, utilizando-se peneiras para ensaio padronizadas pela ABNT. Por falta de normas peneiramento de cavacos de madeira, optou-se por seguir o caminho utilizado por TEIXEIRA (2005), que trabalhou com as seguintes malhas (em mm): 25,4; 19,10; 9,52; 4,76; 2,00; 0,84; 0,6; <0,6 (fundo). No entanto, para este trabalho, foram feitas algumas alterações referentes às dimensões da abertura da malha, assim foram utilizadas as aberturas (em mm): 12,7; 9,52; 4,76; 2,4; 1,2; 0,6; <0,6 (fundo). Foram utilizados 3.918,8 g de resíduos, colocados na primeira peneira de modo que o volume não ultrapassasse 2/3 de sua altura. O sistema das peneiras foi montado e o conjunto agitado por 2 minutos. Após este período de agitação, o material foi colocado em sacos plásticos numerados, relativos à amostra retida em cada peneira mais o fundo e cada fração retida foi pesada separadamente.

### **4.1.3 Procedência do solo**

A seleção dos solos estudados foi feita de forma expedita, utilizando métodos de identificação segundo a cor, o odor e o tato (OLARTE; GUZMAN, 1993). Foram descartados solos cuja coloração escura e odor forte os identificava como contendo

alto teor de matéria orgânica, além de solos que, após sua compressão na mão, se esfarelassem ou apresentassem plasticidade elevada, caracterizando um alto teor de areia, no primeiro caso, e de argila, no segundo.

Após essa análise, foram selecionados solos provenientes de dois locais distintos com a finalidade de escolher o mais adequado ao trabalho. O primeiro, denominado solo UFMG, foi coletado durante a terraplenagem de uma obra do Parque Tecnológico da UFMG localizado em Belo Horizonte, MG. O segundo, denominado solo OP, foi coletado durante a escavação de um terreno para construção de um edifício residencial localizado no bairro Ouro Preto, Belo Horizonte, MG. Foram coletados aproximadamente 180 kg do solo UFMG e 160 kg do solo OP, em novembro de 2008.

#### **4.1.4 Caracterização física e mecânica do solo**

A caracterização do solo foi inicialmente realizada para os dois tipos de solo coletados, UFMG e OP, tendo sido feito para esses o ensaio de teor de umidade, difratometria de raios-X e análise granulométrica por peneiramento. Após esses ensaios, para o solo UFMG foram feitos os seguintes ensaios: análise granulométrica conjunta, limite de plasticidade, limite de liquidez, massa específica e ensaio de compactação.

##### **A) Teor de umidade**

Esse ensaio seguiu as diretrizes da norma DNER-ME 213/94. Uma fração de solo com peso entre 100 e 200 g foi colocada em um recipiente metálico, que foi tampado e pesado. A tampa foi removida e o recipiente foi colocado em uma estufa a 105 °C por um período de 24 horas. O recipiente foi então retirado da estufa, a tampa foi recolocada e aguardado o resfriamento do material. Após atingir a temperatura ambiente, o recipiente com a tampa foi pesado novamente. O teor de umidade foi determinado através da equação descrita no item 4.1.2 para o teor de umidade do RMCC.

##### **B) Difratometria de raios-X**

Foi preparada uma amostra com aproximadamente 200 g de cada solo, passantes em peneira # 200, as quais foram analisadas por difratometria de raios-X, realizada

no Laboratório de Difração de Raios-X, EC4 do Serviço de Tecnologia Mineral do CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear.

A técnica de análise utilizada foi a difratometria de raios-X pelo método do pó, utilizando-se de um difratômetro de raios-X de fabricação Rigaku, modelo DMAX ÚLTIMA automático, com goniômetro  $\theta$ - $\theta$  e tubo de raios-X de cobre. A identificação das fases minerais foi obtida por comparação dos difratogramas de raios-X das amostras com o banco de dados da ICDD – International Center for Diffraction Data / Joint Committee on Powder Diffraction Standards – JCPDS (Sets 01 – 50; 2008). A análise das fases minerais levou em consideração as intensidades das principais reflexões e as comparações entre as mesmas, avaliando-se as quantidades relativas de seus teores.

### **C) Análise granulométrica**

Os dois solos avaliados, UFMG e OP, foram submetidos inicialmente à análise granulométrica realizada por peneiramento, segundo a norma NBR 7181 (1984), realizada nos laboratórios da Engesolo Engenharia (APÊNDICE D). Os resultados obtidos nesse ensaio, juntamente com os resultados da difratometria de raios-X, foram utilizados para determinar qual o solo utilizado para realização do trabalho. Posteriormente para esse solo foi realizada, pelo Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG, a análise granulométrica conjunta (APÊNDICE E) de acordo com a norma NBR 7181 (1984).

Na análise granulométrica por peneiramento foram utilizadas peneiras de 4,75; 2,0; 1,18; 0,6; 0,425; 0,3; 0,15 e 0,075 mm, utilizando uma massa inicial de 1000 g de cada tipo de solo. Para a análise granulométrica conjunta foi utilizada uma massa inicial de 1000 g de solo. No peneiramento grosso foram utilizadas peneiras de 50; 38; 25; 19; 9,5; 4,8 e 2 mm, no peneiramento fino utilizaram-se as peneiras 1,2; 0,6; 0,42; 0,3; 0,15 e 0,075 mm. Para a sedimentação foi utilizado o densímetro, atingindo uma faixa de tamanhos de partícula entre 0,0711 e 0,0014 mm.

### **D) Limite de plasticidade**

O limite de plasticidade corresponde ao valor de umidade em que o solo começa a se fraturar ao se tentar moldar com ele um cilindro com dimensões pré-determinadas, e equivale ao ponto de passagem de um comportamento semi-sólido para plástico. Esse parâmetro foi obtido para o solo escolhido (ver item 0) segundo a norma NBR



7180 (1984), tendo sido executado no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG. O ensaio consiste em moldar manualmente cilindros de solo com o auxílio de um gabarito de 3 mm de diâmetro. O limite de plasticidade é calculado pela média dos valores de umidade das amostras que estejam compreendidos numa faixa de mais ou menos 5% de desvio em relação à média.

#### **E) Limite de liquidez**

O limite de liquidez indica o valor de umidade para o qual o solo passa de um comportamento plástico para líquido, devendo ser, portanto, um valor superior ao limite de plasticidade. Esse parâmetro foi obtido para o solo escolhido a partir dos ensaios anteriores (ver item 0) através do aparelho Casagrande, conforme a norma NBR 6459 (1984), tendo sido executado no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG. Nesse método, o limite de liquidez é tomado como a umidade correspondente a 25 golpes, lido em um gráfico de umidade versus o número de golpes necessário para fechar o sulco do aparelho em 1 cm.

#### **F) Massa específica do solo**

Corresponde ao valor médio da massa específica de cada tipo de grão mineral que compõe uma amostra de solo. É também denominado de massa específica dos grãos. A sua obtenção é necessária para o cálculo do ensaio de sedimentação, presente na análise granulométrica conjunta. Esse parâmetro foi determinado através do método do picnômetro (NBR 6508, 1984) para cinco amostras, tendo sido executada no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG.

#### **G) Ensaio de compactação**

A compactação é um processo no qual se visa melhorar as propriedades do solo através do aumento de sua densidade mantendo certa homogeneidade e com menor índice de vazios. Isso faz com que o solo apresente maior resistência, menor compressibilidade e permeabilidade. Nesse trabalho foram realizados dois tipos de ensaio de compactação, o Proctor Normal e a reprodução desse último em uma máquina universal de ensaios. Foram elaboradas curvas de compactação para o solo UFMG, para o solo-cimento e para a mistura solo-cimento-RMCC para cada uma das percentagens de resíduo estudadas.

O método de compactação Proctor Normal tem como objetivo verificar a influência do teor de umidade na qualidade final de um solo compactado. O ensaio foi feito segundo a norma brasileira NBR 7182 (1986), pelo método normal e executado no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG. Para esse ensaio, foi utilizado um cilindro de Proctor, que compreende o molde cilíndrico com dimensões de 100 mm de diâmetro x 127mm de altura, o colarinho do cilindro e a base de fixação do cilindro. Além desse conjunto, é utilizado um soquete metálico com massa de 2500 g, dotado de um dispositivo de controle que queda.

O ensaio foi realizado pelo método “A” da norma e sem a reutilização de material. Foram separados aproximadamente 16 kg do solo. O material foi seco à sombra, posteriormente destorroado, passado em peneira # 4 e determinado o seu teor de umidade (item 4.1.4).

Inicialmente, a umidade ótima foi estimada através do ensaio expedito do “bolo de solo”(ANEXO A) conforme descrito por CEPED (1985). O mesmo foi repetido acrescentando água à amostra, em diferentes percentuais, até a mistura chegar à consistência desejada. O ponto inicial da curva de compactação foi determinado por esse valor de teor de umidade ótimo estimado, reduzido de 5%.

Seis frações de solo de 2000 g foram utilizadas para aquisição dos pontos da curva de compactação. Seguindo as determinações da NBR 7182 (1986), o cilindro a ser utilizado foi caracterizado quanto ao peso e volume. A cada uma das amostras separadas foi acrescentado uma por vez o percentual de água necessário para se atingir a umidade nominal. Após a homogeneização da amostra, aproximadamente 1/3 de sua massa foi despejada no cilindro e golpeada 26 vezes com o soquete, tendo-se o cuidado da distribuição dos golpes em toda área compactada e de modo que o volume resultante fosse equivalente a 1/3 da altura do cilindro.

Após a compactação de cada camada, a superfície compactada é escarificada para que a camada seguinte possa aderir à camada anterior. Na terceira e última camada do processo de compactação, teve-se o cuidado para que o excesso de material no colarinho não ultrapassasse 10 mm, conforme prescrito na norma. O excesso de material foi cuidadosamente raspado com uma régua biselada, afim de que o material compactado ficasse nivelado com a borda do cilindro utilizado. Após essa etapa, o conjunto molde-solo foi pesado e procedeu-se com a retirada da amostra do molde utilizando-se um extrator de amostras. A amostra foi cortada ao meio no sentido vertical e foi removido material de toda superfície para que fosse determinado o teor de umidade.

Esse processo foi repetido para cada um dos pontos da curva, resultando em dois pontos de umidades inferiores, um ponto de umidade próximo do teor de umidade ótima estimada e dois pontos de umidades superiores. Caso não seja possível encontrar os pontos dentro desses parâmetros, é necessário acrescentar um ou mais pontos, no início ou no final da curva, acrescentando ou diminuindo a quantidade de água, dependendo da situação.

A relação entre a massa de solo compactado e seu volume fornece a massa específica úmida. Após a leitura do teor de umidade da amostra, determina-se a umidade aparente seca. Com esses dados, é feito o desenho da curva de compactação do solo, da qual se extrai o teor de umidade ótimo relacionado à massa específica aparente seca máxima, que é ponto máximo da curva.

O segundo método, que reproduziu o Proctor Normal, foi utilizado para se obter a curva de compactação para as misturas de solo-cimento e solo-cimento-RMCC para cada teor de resíduo utilizado. O processo adotado utilizou a máquina universal de ensaios, Instron 5582, do Laboratório de Ensaios Especiais da Escola de Engenharia da UFMG. Tendo os valores do teor de umidade ótimo e densidade aparente seca máxima, obtidos pelo método Proctor Normal para o solo-cimento, foram realizados testes de compactação em corpos-de-prova com dimensões de 50x100mm, com a finalidade de se obter o mesmo resultado do ensaio Proctor Normal.

Em SILVA (2005), corpos-de-prova de 50x100mm foram moldados com um moldador instrumentado com célula de carga e transdutor de deslocamentos, aplicando uma pressão de 2MPa que, segundo o autor, é a pressão normalmente utilizada em máquinas para prensagem de solo-cimento disponíveis no mercado e, com a qual, foi possível obter a densidade desejada durante a moldagem dos CPs. Tendo em vista que a máquina de ensaio universal utilizada dispunha desses mesmos recursos, e que os ensaios de compressão simples e de flexo-tração seriam realizados nela, optou-se por utilizar esse mesmo equipamento para o ensaio de compactação e para moldagem dos corpos-de-prova. Dessa forma, as curvas de compactação, a moldagem e os ensaios seriam realizadas nas mesmas condições.

Para reprodução dos resultados obtidos no ensaio Proctor Normal, a máquina universal de ensaios foi configurada para aplicar uma carga constante de 4,05KN (equivalente a pressão de 2MPa para as dimensões do molde utilizado), a uma velocidade de 5mm/minuto, de modo que o processo de compactação fosse interrompido ao atingir a carga estipulada. Da mesma forma que no ensaio Proctor Normal, os CPs foram moldados em 3 camadas e a superfície de cada camada foi

escarificada antes da prensagem da camada posterior para garantir a melhor ligação entre elas. Os demais passos referentes à desmoldagem do CP, pesagem e separação do material para obtenção do teor de umidade da amostra, seguiram o mesmo procedimento para o ensaio de compactação Proctor Normal e foram repetidos para cada ponto das curvas de compactação.

Por ter sido possível reproduzir, na máquina universal de ensaios, os resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal para o solo e solo-cimento, a curva de compactação para as misturas de solo-cimento-RMCC, para cada percentual de resíduo adicionado, foi feita apenas na máquina universal de ensaios.

## **4.2 Confeção dos corpos-de-prova**

Para confecção dos corpos-de-prova foi utilizado o cimento CII E 32, da marca Holcim, comumente encontrado em lojas de material de construção em Belo Horizonte, o solo denominado UFMG, o RMCC (quando necessário), e a água proveniente do sistema de abastecimento de Belo Horizonte. A seguir, será apresentado o processo desde a escolha do molde até a finalização dos corpos-de-prova.

### **4.2.1 Molde utilizado**

Com relação à dimensão do molde, SILVA (2005) realizou testes comparativos utilizando moldes com dimensões de 100 x 127 mm, 35 x 87,5 mm e 50 x 100 mm. Segundo o autor, as diferenças obtidas nos ensaios não foram significativas, tendo o mesmo optado pelo molde com dimensão de 50 x 100 mm. Com a intenção de comparar alguns dos resultados desse trabalho com os obtidos por SILVA (2005), foi utilizado o molde com a mesma dimensão nominal utilizada pelo autor, sendo nesse caso, 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura.

O molde empregado, baseado no sistema para ensaio Proctor Normal, utiliza um tubo de PVC rígido de 60 mm, com diâmetro interno de 50,2 mm e espessura da parede de 5 mm, seccionado em partes com comprimento de 100 mm. O dispositivo de fixação do molde de PVC foi feito utilizando a base dos moldes para argamassa e concreto, onde foram soldadas duas barras rosqueadas. Para travar o molde, usou-se um tubo de aço galvanizado com diâmetro nominal de 60 mm no qual foram soldados dois suportes laterais que, com auxílio de duas porcas do tipo “borboleta”, fazem o travamento do tubo de PVC ao conjunto (Figura 11).



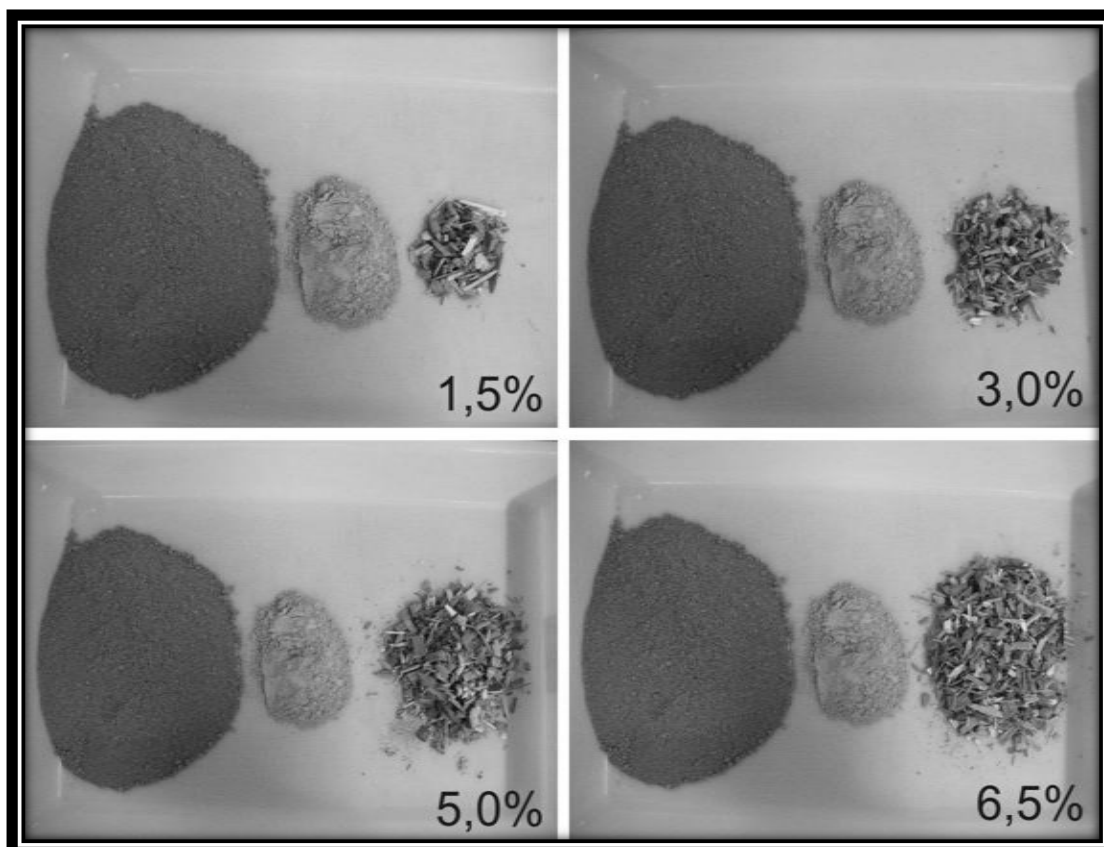
**Figura 11 – Molde utilizado para confecção dos corpos-de-prova**

#### **4.2.2 Dosagem das misturas**

Para moldagem dos CPs, após a pesagem de cada material utilizado, a homogeneização da mistura foi feita obedecendo a seqüência: solo, cimento e água. E, quando acrescido o resíduo: solo, cimento, RMCC e água.

A quantidade de cimento utilizada foi de 10% em relação à massa aparente seca do solo. E, quando acrescido o RMCC, a quantidade foi de 10% em relação à massa aparente seca do solo somada à massa de RMCC utilizada. O teor de cimento foi fixado em 10% por esse valor ser considerado em grande parte da bibliografia consultada como sendo o limite economicamente viável para se trabalhar com solo-cimento.

Foram utilizados quatro teores de RMCC: 1,5%, 3%, 5% e 6,5%, medidos em relação à massa aparente seca do solo. A relação de quantidade entre o solo, o cimento e o RMCC, na proporção para 1kg de solo, pode ser visualizada na Figura 12.



**Figura 12 – Relação entre a quantidade de RMCC, solo e cimento**

A homogeneização foi feita em três etapas. Inicialmente, apenas o solo e o cimento foram misturados em uma caixa plástica para confecção de argamassa, com o auxílio de uma colher de pedreiro e uma desempenadeira metálica com um dos lados ranhurado. Após a mistura desses dois materiais, foi acrescentado o RMCC (no caso dos CPs de solo-cimento-RMCC) e feita nova homogeneização, adicionando-se por último a água.

A terceira etapa do processo de mistura é realizada com o auxílio da aresta ranhurada da desempenadeira, pois ao proceder a mistura, os pedaços de madeira passam por entre as ranhuras. Isso facilita o trabalho e garante uma melhor homogeneização.

### **4.2.3 Moldagem**

A moldagem dos CPs foi realizada no Laboratório de Ensaios Especiais da Escola de Engenharia da UFMG, em uma máquina universal de ensaio de materiais, Instron 5582 (Figura 13). A opção pelo uso desse equipamento se deu pelo fato da máquina possuir célula de carga e permitir de forma automatizada a interrupção da moldagem

quando a carga desejada fosse atingida. O controle obtido com esse sistema garantiu que todos os CPs fossem confeccionados sob as mesmas condições de carga.



**Figura 13 – Moldagem do corpo-de-prova**

A pressão empregada na compactação dos materiais durante a confecção dos CPs foi de 2 MPa, a uma velocidade de 5 mm/minuto, mesmas condições do ensaio de compactação citado no item 4.1.4G. Com a determinação da pressão de moldagem, a máquina foi configurada para interromper a prensagem do material ao atingir 2 MPa, pressão normalmente utilizada em máquinas para prensagem de solo-cimento disponíveis no mercado.

Os CPs foram moldados em 3 camadas. Para garantir a ligação entre elas, como no ensaio Proctor Normal, cada camada compactada teve sua superfície previamente escarificada antes da prensagem da camada posterior.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram acondicionados em câmara úmida pelo período de sete dias. A desmoldagem dos CPs foi feita 24 horas após sua confecção (período em que já se encontravam na câmara úmida), utilizando um desmoldador de acionamento mecânico (Figura 14).



**Figura 14 – Desmoldagem do corpo-de-prova**

### **4.3 Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova de solo-cimento com e sem adição de RMCC**

Nessa etapa do trabalho foi realizada a coleta de dados que permitiu avaliar a variação dimensional dos corpos-de-prova, a absorção de água, a resistência à compressão simples e à flexo-tração e o módulo de elasticidade em relação à adição de diferentes percentagens de resíduo de madeira. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Especiais da Escola de Engenharia da UFMG.

#### **4.3.1 Variação dimensional e absorção de água**

A variação dimensional dos corpos-de-prova foi obtida através da medição do diâmetro e comprimento após 4 horas de imersão em água, tendo sido usado um total de sete CPs, dos quais quatro destinados aos ensaios de compressão simples e três aos ensaios de flexo-tração. Foi utilizado um paquímetro capaz de medir 200 mm com precisão de 0,02 mm. A variação dimensional (VD) para as duas dimensões foi calculada em termos de percentagem tomando como referência as dimensões do corpo-de-prova obtidas após o período de cura, através da equação:



$$VD = \frac{L2 - L1}{L1} \times 100 \quad (4.2)$$

onde, L1 é a dimensão (comprimento e diâmetro) após a cura e L2 é a dimensão correspondente após a imersão em água.

O ensaio de absorção de água foi realizado segundo a norma brasileira NBR 13555 (1996). Foram utilizados 3 CPs que, após sete dias de cura em câmara úmida, foram secados em estufa a uma temperatura constante de 105°C até a estabilização da massa. Após o esfriamento dos CPs, eles foram pesados e imersos em um recipiente com água pelo período de 24 horas. Após esse período, eles foram enxugados superficialmente e pesados novamente. Foi utilizada uma balança com capacidade de 32000 g e precisão de 0,1 g. Para determinação da absorção de água (A), foi utilizada equação:

$$A = \frac{m2 - m1}{m1} \times 100 \quad (4.3)$$

onde, m1 é a massa seca e m2 é a massa úmida do corpo-de-prova.

### **4.3.2 Ensaio de compressão simples**

Os ensaios de compressão simples foram feitos de acordo com as condições da norma brasileira NBR 12025 (1990), com exceção das dimensões dos corpos-de-prova. Quatro CPs foram moldados nas mesmas condições dos corpos-de-prova utilizados para os ensaios de compactação, descritos nos itens 4.2.2 e 4.2.3.

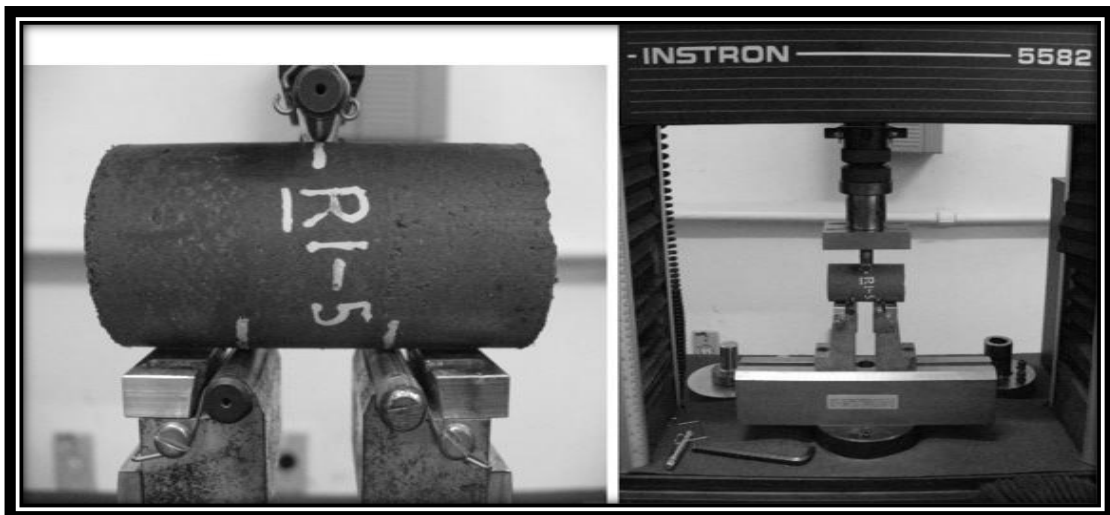
Após a moldagem, os corpos-de-prova passaram por um período de cura de sete dias em câmara úmida. Os CPs foram imersos em água pelo período de quatro horas antes do ensaio e passaram pelo processo de capeamento para regularização da superfície que entra em contato com os pratos da máquina de ensaio. Assim que foram retirados da água, os CPs foram pesados e suas dimensões anotadas. A exemplo da moldagem, os ensaios foram feitos utilizando a máquina universal de ensaios Instron 5582, com aplicação de carga constante à velocidade de 1mm/minuto, conforme os procedimentos de ensaio do Laboratório de Ensaio Especiais.

### 4.3.3 Ensaio de flexo-tração

Para o ensaio de flexo-tração, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos. Tal procedimento não é usual, no entanto, em função da dificuldade de se ter o mesmo nível de compactação em todas as amostras, optou-se pela utilização do mesmo tipo de corpo-de-prova empregado nos demais ensaios. Nesse sentido, na análise dos resultados, tomou-se o cuidado de se saber que os dados obtidos só podem ser comparados entre eles.

Os três corpos-de-prova utilizados foram moldados nas mesmas condições dos CPs utilizados para os ensaios de compressão simples. Após a moldagem, os CPs passaram por um período de sete dias em câmara úmida e, antes do ensaio, foram imersos em água por quatro horas, não tendo sido necessário o capeamento da superfície diametral. Assim que foram retirados da água, os CPs foram pesados e suas dimensões anotadas.

Para realização dos ensaios, os CPs foram demarcados com divisões de 1/3 da sua altura, para seu posicionamento na base da máquina, e com uma divisão central, destinada ao posicionamento do eixo de aplicação de carga (Figura 15). Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios, Instron 5582, com aplicação de carga constante à velocidade de 1mm/minuto, conforme os procedimentos de ensaio do Laboratório de Ensaos Especiais.

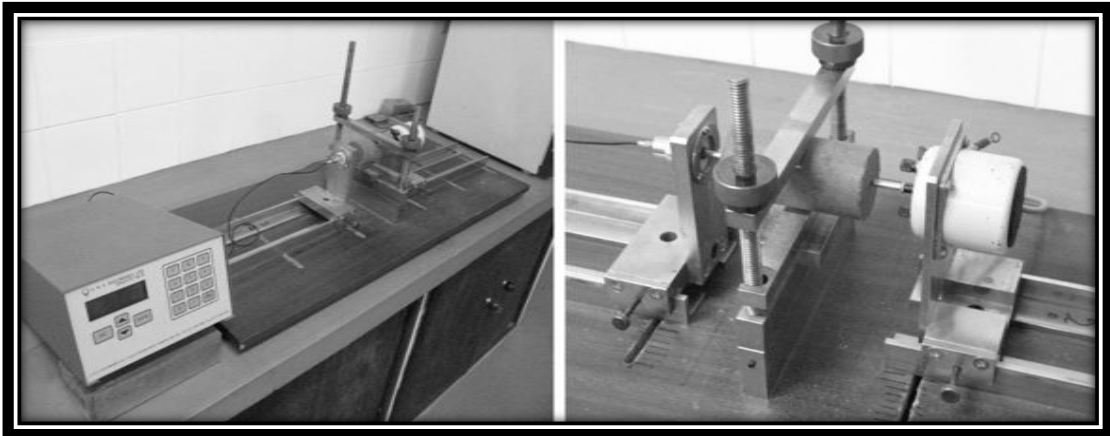


**Figura 15 – Marcação e posicionamento do corpo-de-prova para o ensaio de flexo-tração**

#### 4.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi medido por ensaios de frequência ressonante forçada no modo longitudinal em um aparelho da marca C.N.S. Electronics LTD, modelo Erudite Mk II, apresentado na Figura 16.

Foi moldado um corpo-de-prova cilíndrico com dimensões de  $\varnothing 50 \times 100$  mm, para cada percentual de resíduo utilizado. Após a moldagem, O CP foi desformado 24 horas após sua moldagem e, decorridos os sete dias de cura em câmara úmida, sua secagem foi feita em temperatura ambiente. A secagem é necessária para que não haja influência da água nos resultados do ensaio.



**Figura 16 – Aparelho para o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico**

Nesse ensaio, o módulo é calculado a partir da frequência fundamental de vibração, da massa, das dimensões e da geometria do corpo-de-prova. Para a determinação do campo de frequência a ser utilizado foi feita uma varredura iniciada em frequências baixas até que fosse estabelecido o intervalo a ser utilizado que, no caso, foi entre 10 Hz e 15 KHz.

Baseado na frequência ressonante longitudinal aproximada, foram definidos valores de frequências para os extremos do campo de variação da frequência, frequência de início ( $F_s$ ) e frequência de término ( $F_e$ ). Determinada a frequência de vibração natural do material, o módulo de elasticidade dinâmico para o módulo longitudinal, segundo o manual de operação do equipamento, é calculado com auxílio da equação:

$$E_D = 4n^2 l^2 \rho \times 10^{-12} \quad (4.4)$$

onde,

$E_D$  = módulo de elasticidade dinâmico (MN/m<sup>2</sup>)

$l$  = comprimento do corpo-de-prova em mm;

$n$  = frequência do modo fundamental da vibração longitudinal em Hz;

$\rho$  = densidade em Kg/m<sup>3</sup>.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são apresentados a seguir e englobam os dados referentes à caracterização dos materiais, moldagem dos corpos-de-prova e caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova.

### 5.1 Caracterização dos materiais

#### 5.1.1 Caracterização do resíduo de madeira

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), o resíduo de madeira, se estiver livre de materiais tóxicos, pode ser classificado como Classe II A – Não inertes.

No caso do RMCC, essa classificação não se aplica devido à diversidade da origem do resíduo. A observação dos cavacos mostrou a presença de cola e tintas. Além disso, pequenas quantidades do material podem conter substâncias tóxicas utilizadas na construção civil como o cupinícida ou algum outro material comumente utilizado no tratamento ou no acabamento da madeira.

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos para o teor de umidade médio do RMCC, que foi estimado em 14,3%. O resultado obtido está próximo ao encontrado para o solo, algo desejável, pois dessa forma é reduzida a possibilidade de perda de água do solo para o RMCC durante a confecção dos corpos de prova.

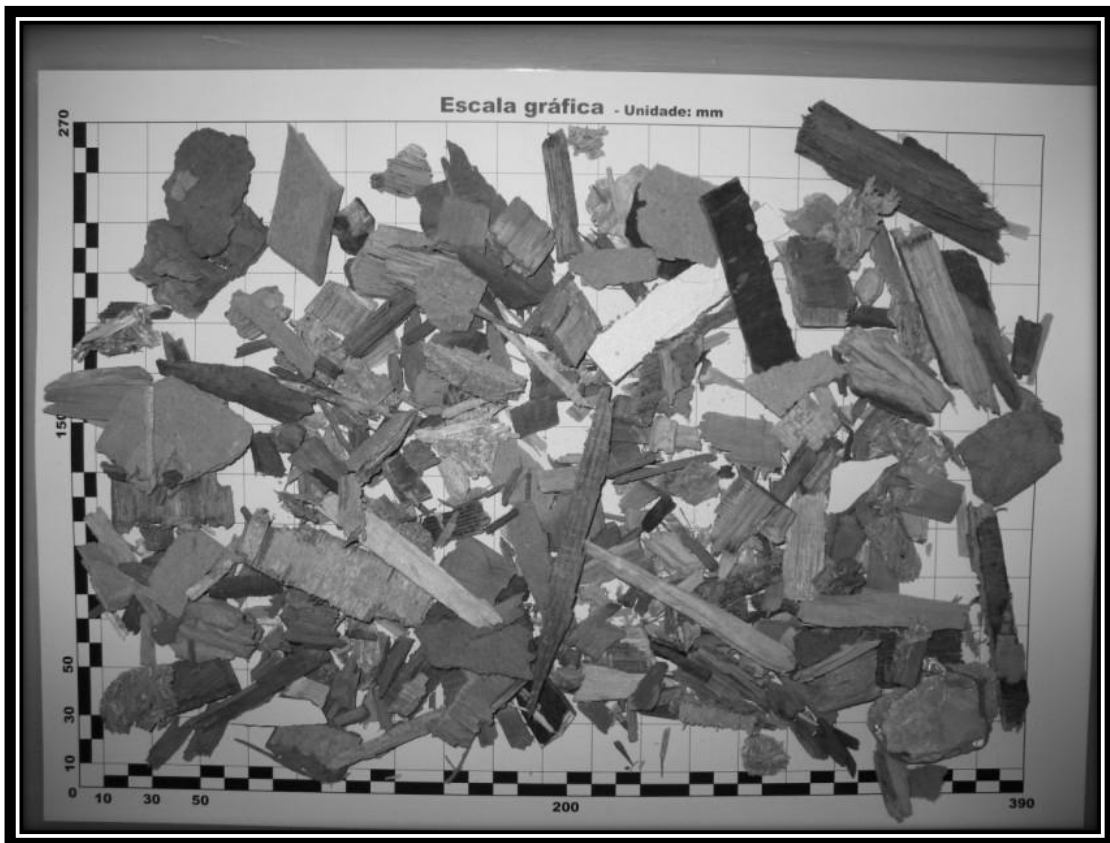
**Tabela 7 – Teor de umidade do RMCC**

Amostra	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Diferença (g)	Teor de umidade (%)
01	43,4	38,6	4,8	14,4
02	49,6	44,1	5,5	14,2
03	45,0	40,0	5,0	14,4
Peso do recipiente: 5,3 g		<b>Média</b>		<b>14,3</b>

O RMCC utilizado apresenta dimensões e formas bem variadas. Na Figura 17 é apresentada uma amostra do RMCC coletado sobre uma escala gráfica cuja malha tem dimensão de 20 mm. Nota-se uma grande presença peças laminares, muito delas provenientes de chapas do tipo aglomerado ou compensado. Os materiais com essa característica chegam a ter dimensão de até 100 mm de comprimento, largura

média de 15 mm e espessura de 5 mm. Quando mais fragmentado, esse tipo de material se apresenta como blocos com dimensões que podem chegar a 40 x 40 mm. As madeiras maciças também são encontradas em formas alongadas, com comprimento que chegam próximos dos 100 mm, mas com espessura e largura um pouco maiores que as chapas, chegando 25 mm de largura e espessura de aproximadamente 20 mm.

Resíduos do tipo “cavaco de serraria” não foram encontrados na amostra coletada, algo já esperado, pois o resíduo coletado é proveniente da construção civil. A ausência do “cavaco de serraria” pode também ser entendida pelo fato desse material ser considerado limpo e pronto para o uso, fazendo com que seja levado diretamente para o consumidor final sem passar pela mesma área de triagem e processamento dos resíduos de construção.



**Figura 17 – Amostra do RMCC coletado**

A avaliação qualitativa da granulometria do RMCC é apresentada na Tabela 8. Na Figura 18 são apresentadas imagens das frações retidas em cada malha da peneira. Observa-se que 57% do material apresentam dimensão igual ou superior a 12,7 mm. No entanto, em função da dimensão dos corpos-de-prova, optou-se por utilizar no

trabalho apenas os resíduos passados na peneira de 12,7 mm. Abaixo dessa peneira, a maior fração do material ficou retida entre as peneiras de 9,52 e 4,76mm, com percentual de 20%.

**Tabela 8 – Frações do resíduo de madeira retidas por peneiramento**

<b>Peneira (mm)</b>	<b>12,7</b>	<b>9,52</b>	<b>4,76</b>	<b>2,4</b>	<b>1,2</b>	<b>0,6</b>	<b>&lt;0,6</b>	<b>Total</b>
Massa de RMCC retido (g)	2239,1	495	805	251,2	70,4	24,7	19,4	3904,8
Percentual retido (%)	57,3	12,7	20,6	6,4	1,8	0,6	0,5	100,0
Percentual retido acumulado (%)	57,3	70,0	90,6	97,1	98,9	99,5	100,0	

A classificação do resíduo segundo a escala granulométrica, baseada em TEIXEIRA (2005), é apresentada na Tabela 9. As amostras foram divididas em 4 níveis: reprocessável, grosso, médio e fino. Como 57% do resíduo ficaram retidos pela peneira de 12,7 mm, essa fração pode ser aproveitada no processo desde que seja previamente triturada, dessa forma ela foi classificada como reprocessável. O restante do material, composto de frações grossa (33,3%), média (8,2%) e fina (1,1%), pode ser utilizado diretamente.

**Tabela 9 – Classificação granulométrica do RMCC**

<b>Classificação</b>	<b>Peneira (mm)</b>	<b>% (em peso)</b>	<b>% TOTAL</b>
Reprocessável	> 12,7	57,3	57,3
Grosso	9,52	12,7	33,3
	4,76	20,6	
Médio	2,4	6,4	8,2
	1,2	1,8	
Fino	0,6	0,6	1,1
	<0,6 (fundo)	0,5	

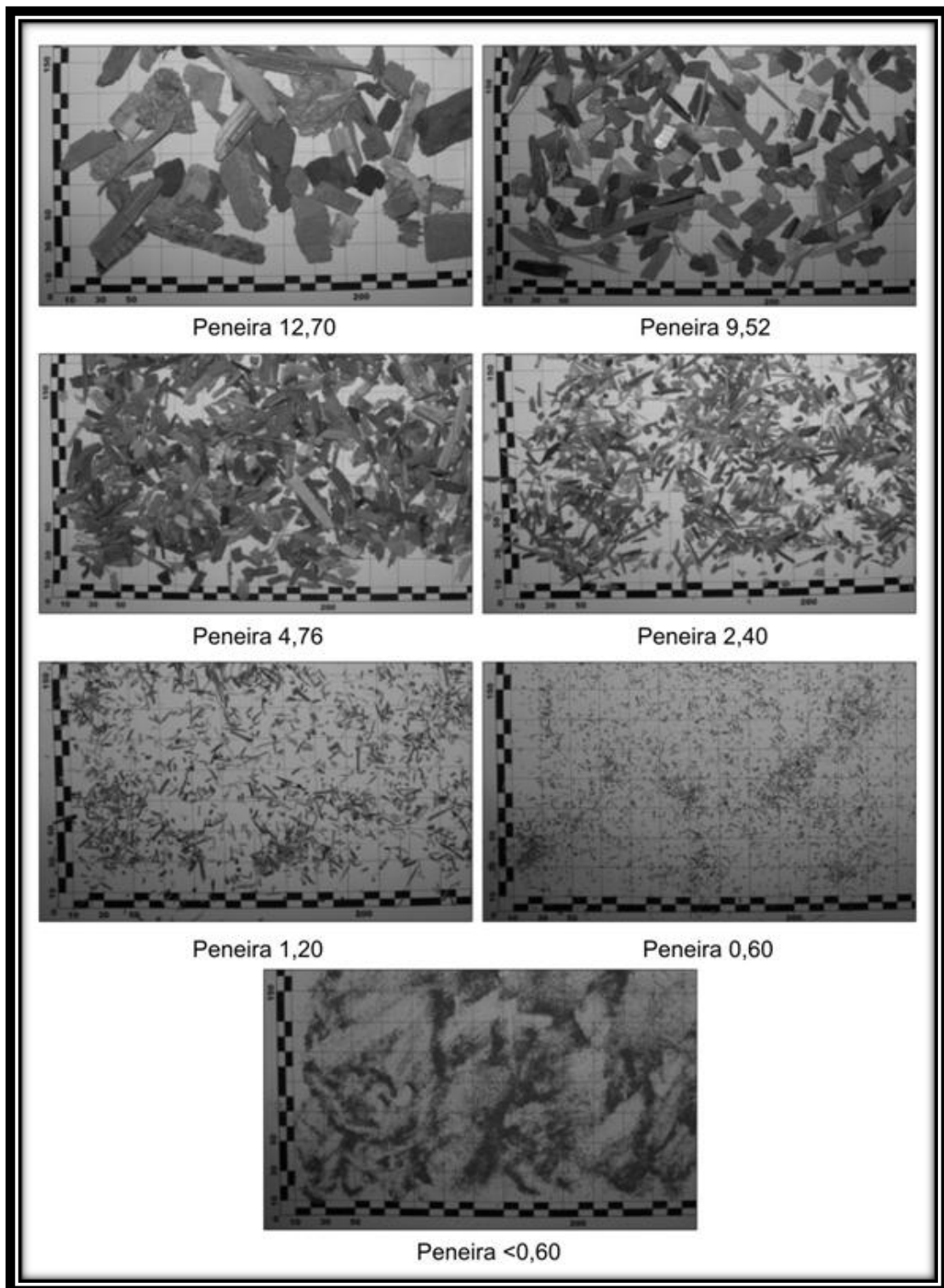


Figura 18 – Imagens do RMCC após a análise granulométrica (abertura das peneiras em milímetros)



### 5.1.2 Teor de umidade do solo

Os teores de umidade dos solos UFMG e OP, determinados logo após a coleta, apresentados na Tabela 10, foram de 13,8 e 22,5%, respectivamente. Entretanto, observou-se que, após um tempo de armazenagem em sacos plásticos, a umidade dos solos teve um ligeiro decréscimo e se estabilizou em torno de 12,5% para o solo UFMG e 20% para o solo OP. Esses valores fornecem uma idéia do teor de água presente no solo, no entanto antes da execução dos ensaios e da confecção dos CPs foram executadas novas medidas para garantir o melhor controle da umidade real da amostra.

**Tabela 10 – Teor de umidade do solo**

Amostra		Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Diferença (g)	Teor de umidade (%)
UFMG	01	182,8	161,0	21,8	14,0
	02	171,3	151,2	20,1	13,8
	03	173,5	153,5	20,0	13,5
Peso do recipiente: 5,3 g		<b>Média</b>			<b>13,8</b>
OP	01	192,1	157,7	34,3	22,5
	02	159,9	132,0	27,9	22,0
	03	177,8	145,4	32,4	23,1
Peso do recipiente: 5,3 g		<b>Média</b>			<b>22,5</b>

### 5.1.3 Difractometria de raios-X

Os resultados da difratometria são apresentados na Tabela 11. Os difratogramas de raios-X das amostras analisadas, assim como o certificado de análise emitido pelo laboratório encontram-se no APÊNDICE A, APÊNDICE B e APÊNDICE C.

Em ambos os solos é observada a predominância de caulinita, maior que 50%, seguida pelo quartzo, menor que 20%. Em percentuais menores que 10% e 3%, os minerais variaram em quantidade maior ou menor para cada solo, notando-se a presença de hematita apenas no solo OP. O alto teor de caulinita no solo indica que o cimento é o estabilizante mais adequado para ser usado na mistura com o solo estudado (MINKE, 1995 *apud* EIJK, 2005).

**Tabela 11 – Resultados da Difratometria de raios-X**

Amostra	Mineral Identificado			
	Predominante (>50%)	Maior (<20%)	Menor (<10%)	Minoritária (<3%)
Solo – 01 UFMG	Caulinita	Quartzo	Microclina Moscovita	Albita Gibbsita Goethita
Solo – 02 OP	Caulinita	Quartzo	Albita Gibbsita Microclina Moscovita	Goethita Hematita

#### 5.1.4 Análise granulométrica dos solos

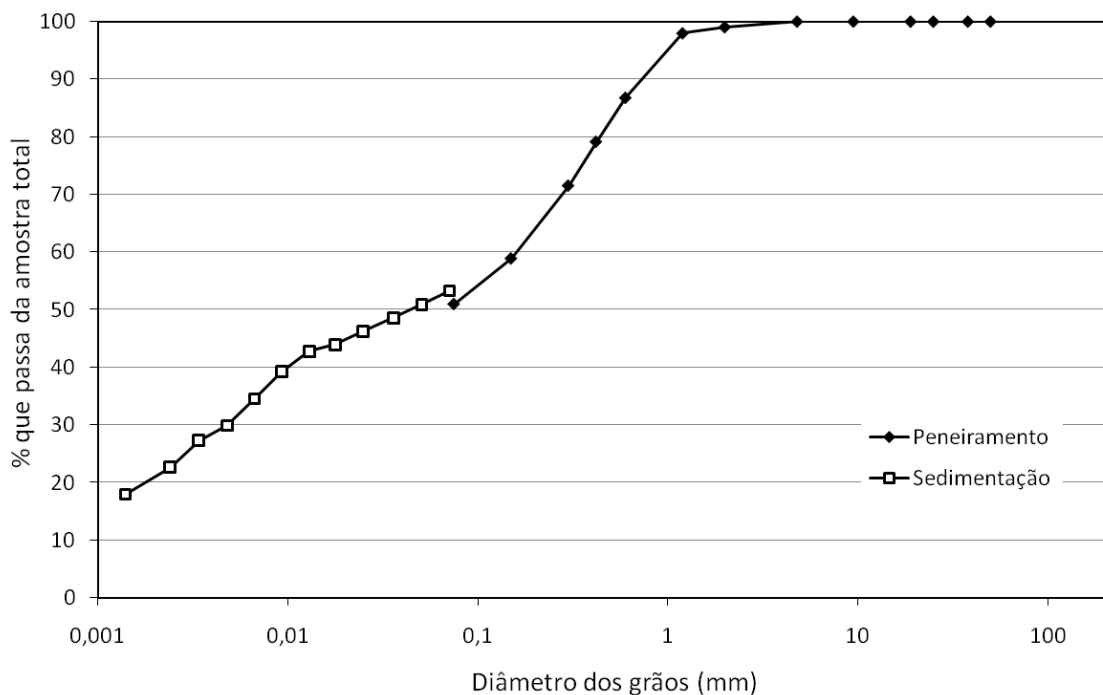
A análise granulométrica preliminar (por peneiramento) para os solos UFMG e OP apresentaram resultados semelhantes, conforme pode ser visto na Tabela 12.

**Tabela 12 – Granulometria por peneiramento para os solos UFMG e OP**

Peneira (#)	4	10	16	30	40	50	100	200
Peneira (mm)	4,75	2	1,18	0,6	0,425	0,3	0,15	0,075
Granulometria - % de solo que passa								
UFMG	100	99	97	83	74	67	55	48
OP	100	99	97	84	75	68	56	49

Dada a semelhança dos solos analisados, seja pela granulometria que pela difratometria de raios-X, optou-se pela utilização do solo denominado UFMG. A escolha desse solo se deu pelo fato do seu teor de umidade estar mais baixo, em termos práticos, isso reduz o tempo de secagem do solo caso seja necessário e facilita o controle da adição de água durante o processo de confecção dos corpos-de-prova. Dessa forma, a análise granulométrica conjunta e os demais ensaios de caracterização de solo, foram feitos apenas para essa amostra.

O resultado da análise granulométrica conjunta da amostra de solo UFMG é apresentado na Figura 19. Na Tabela 13 são apresentadas as percentagens da amostra analisada em cada classe de tamanho de partículas, segundo a ABNT, sendo a amostra classificada como areia siltosa. Segundo os critérios apresentados por CEPED-THABA (1984) e de acordo com a classificação da NBR 10832 (1989), com relação à granulometria, o solo em questão é adequado para utilização em solo-cimento.



**Figura 19 – Curva granulométrica do solo UFMG obtida por peneiramento e sedimentação**

**Tabela 13 – Classificação do solo UFMG segundo a ABNT**

Pedregulho ( $d > 2,0$ mm)	2,0%
Areia ( $0,06 < d < 2,0$ mm)	46,0%
Silte ( $0,002 < d < 0,06$ mm)	31,0%
Argila ( $d < 0,002$ mm)	21,0%

### 5.1.5 Limite de plasticidade do solo

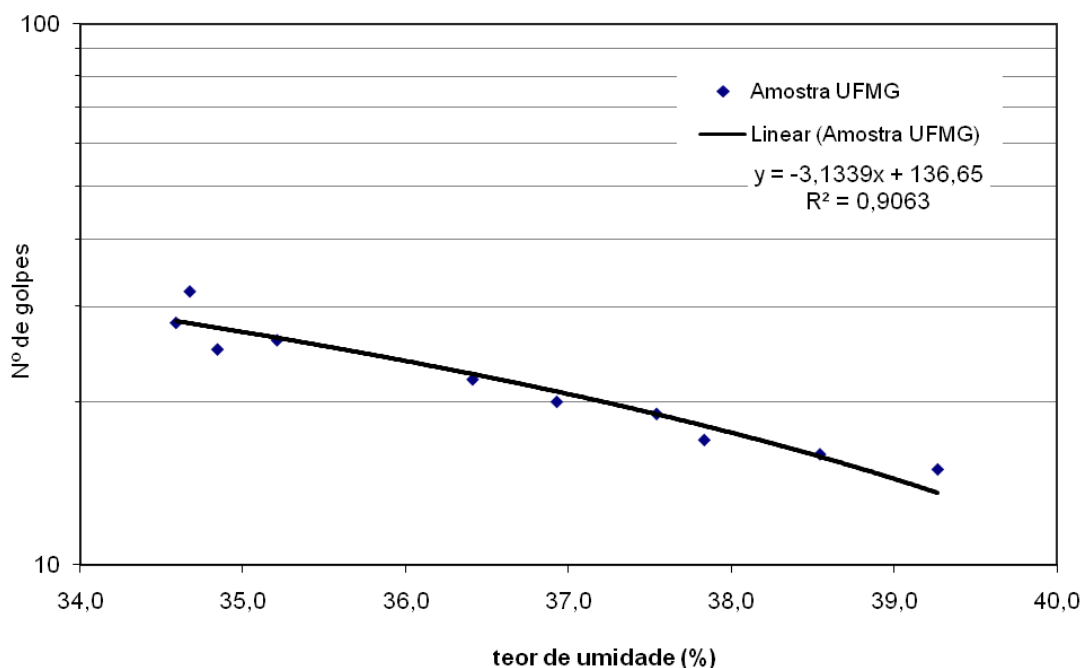
Os dados obtidos para determinação do limite de plasticidade (LP) são apresentados na Tabela 14. O limite de plasticidade, calculado pela média da umidade de quatro dessas amostras foi de 24,0%. O resultado dessa análise foi utilizado juntamente com os dados do ensaio de limite de liquidez do solo para determinação do índice de plasticidade do solo.

**Tabela 14 – Limite de plasticidade**

Determinação	1	2	3	4	5	6
Cápsula nº	526	514	545	89	82	3
M <sub>c</sub> (g)	5,35	4,8	5,02	4,54	4,84	4,74
M <sub>c+s+w</sub> (g)	6,88	5,63	6,37	5,64	6,43	6,5
M <sub>c+s</sub> (g)	6,57	5,47	6,12	5,42	6,13	6,16
M <sub>w</sub> (g)	0,31	0,16	0,25	0,22	0,3	0,34
M <sub>s</sub> (g)	1,22	0,67	1,1	0,88	1,29	1,42
w %	25,41	23,88	22,73	25,00	23,26	23,94
w médio (%)	24,04					
compor LP?	não	sim	não	sim	sim	sim
LP (%)	24					

### 5.1.6 Limite de liquidez do solo

Na Figura 20 encontram-se plotados os dados obtidos no ensaio de limite de liquidez (LL) para o solo UFMG. Foram realizadas 10 determinações e a linha de tendência linear, gerada a partir dos dados experimentais, apresentou um ajuste de 90%. O valor de limite de liquidez obtido foi de 36%, estimado como sendo o teor de umidade, lido na linha de tendência, relativo a 25 golpes. O resultado obtido está dentro dos critérios apresentados por CEPED-THABA (1984) e de acordo com a classificação da NBR 10832 (1989), que estabelecem um limite de liquidez igual ou inferior a 45%.



**Figura 20 – Gráfico do ensaio de limite de liquidez**

Com os resultados obtidos para os limites de plasticidade e liquidez do solo chega-se ao índice de plasticidade do solo (IP) através da diferença numérica entre o LL e o LP, ou seja:  $IP = LL - LP$

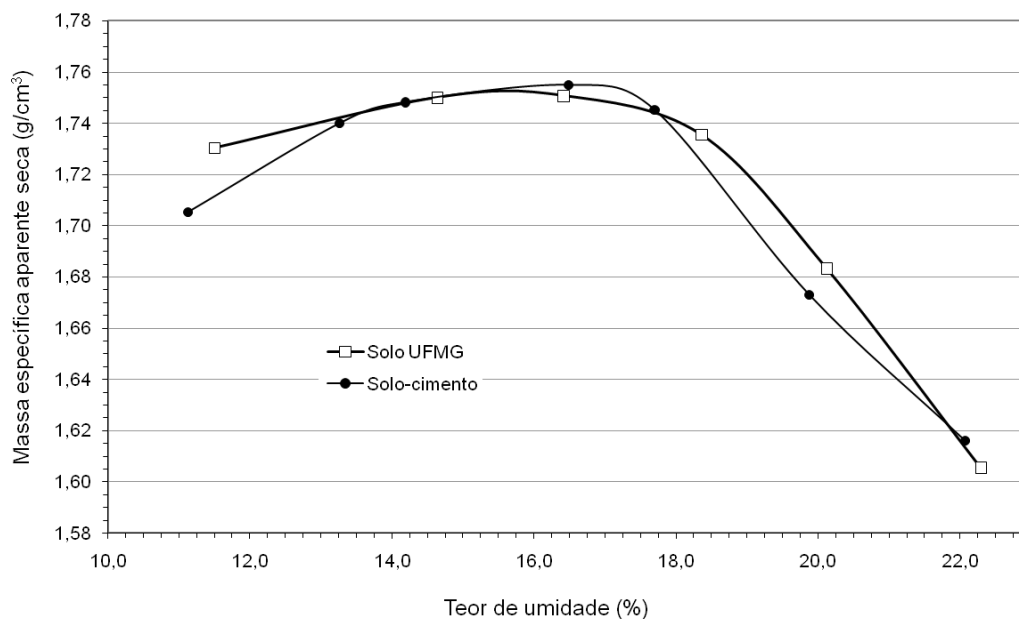
O índice de plasticidade para o solo estudado é de 12%, estando assim, de acordo com os critérios para escolha do solo para o uso com cimento apresentados por CEPED-THABA (1984) e de acordo com a classificação da NBR 10832 (1989), que estabelecem um índice de plasticidade igual ou inferior a 18%.

### **5.1.7 Massa específica do solo**

O método do picnômetro foi aplicado para cinco amostras do solo UFMG e apresentou média de  $2,70 \text{ g/cm}^3$ , com desvio padrão de 0,4% (APÊNDICE F). O valor obtido está dentro da faixa de ocorrência da maioria dos solos que varia entre  $2,65 \text{ g/cm}^3$  e  $2,85 \text{ g/cm}^3$  (CAPUTO, 1977).

### **5.1.8 Ensaios de compactação**

O ensaio de compactação pelo método Proctor Normal foi realizado para o solo UFMG e sua mistura com cimento (denominada solo-cimento), cujas curvas resultantes são apresentadas na Figura 21. Os valores obtidos para ambas as situações foram semelhantes, conforme mostra a Tabela 15.



**Figura 21 – Curvas de compactação do solo UFMG e do solo-cimento realizadas pelo método Proctor Normal**

**Tabela 15 – Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal para o solo UFMG e solo-cimento**

Material	Solo UFMG	Solo-cimento
Teor de umidade ótimo (%)	16,4	16,5
Massa específica aparente seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,750	1,755

O formato achatado das curvas de compactação da Figura 23 permite inferir que valores de massa específica aparente seca variando entre 1,750 e 1,755 g/cm<sup>3</sup> podem ser obtidos com uma faixa de valores de umidade que varia de 14,5 e 16,5% para o solo UFMG. Para o solo cimento, essa faixa está compreendida entre 14,5 e 17,5%. Essa característica indica uma baixa sensibilidade da curva de compactação nas proximidades do ponto ótimo, com relação ao teor de umidade. O mesmo não ocorre com solos mais arenosos, cuja curva de compactação é mais pontiaguda, e pequenas diferenças no teor de umidade resultam em uma maior variação na massa específica seca do material.

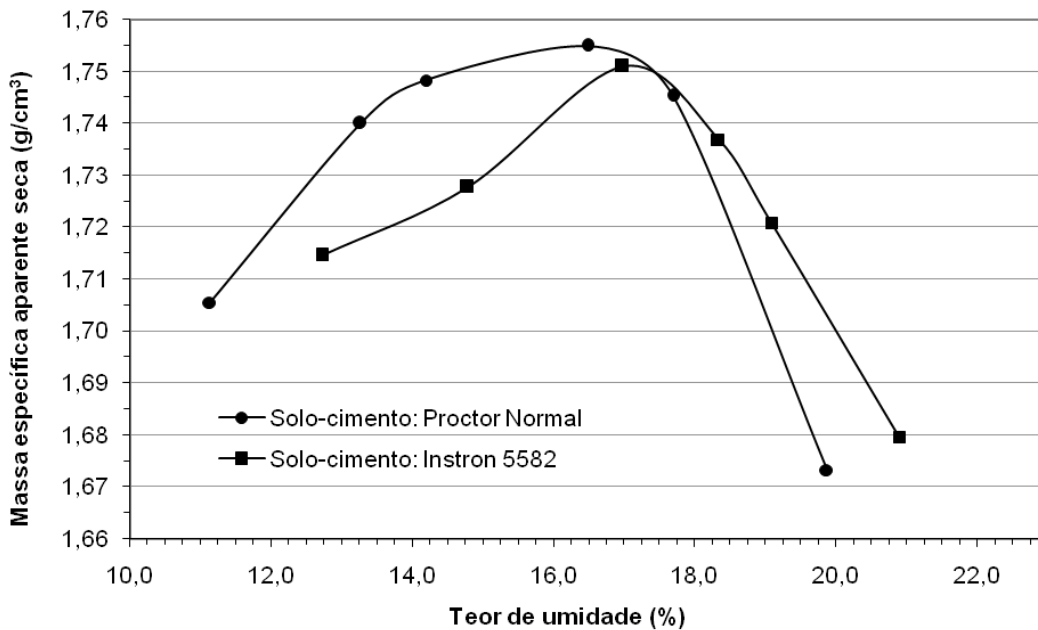
Os resultados dos ensaios de compactação para mistura solo-cimento realizados pelo método Proctor Normal e na máquina universal de ensaios Instron 5582 são apresentados na Tabela 16 e na Figura 22. Os valores obtidos referentes ao teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima são semelhantes, tendo sido observado um pequeno acréscimo no teor de umidade no ensaio realizado na máquina universal de ensaios. Naturalmente, a baixa sensibilidade da curva de compactação verificada para esse material em torno do ponto ótimo da curva permite dizer que os resultados são equivalentes.

As diferenças observadas no formato das curvas de compactação apresentadas na Figura 22 podem estar relacionadas à diferença nos métodos de compactação utilizados. Enquanto a compactação no método Proctor Normal é feita de forma dinâmica – onde são aplicados golpes no material para que ele seja compactado, na máquina universal de ensaios a compactação é realizada de forma estática – o material é compactado por compressão através de carga contínua.

Dada a semelhança obtida nos pontos máximos para o teor de umidade e massa específica aparente seca do material, optou-se por confeccionar os corpos-de-prova na Instron 5582. A escolha foi feita pelo fato do equipamento oferecer controle preciso na aplicação de carga durante a moldagem dos CPs, pela praticidade oferecida pelo equipamento e também pelo fato dos ensaios mecânicos serem realizados na mesma máquina.

**Tabela 16 – Resultados dos ensaios de compactação para solo-cimento**

Método de ensaio	Proctor Normal	Reprodução Instron 5582 (molde 50x100mm)
Teor de umidade ótimo (%)	16,5	17,1
Massa específica aparente seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,755	1,751



**Figura 22 – Curvas de compactação para solo-cimento, obtidas pelo método Proctor Normal e na máquina universal de ensaios mecânicos Instron 5582**

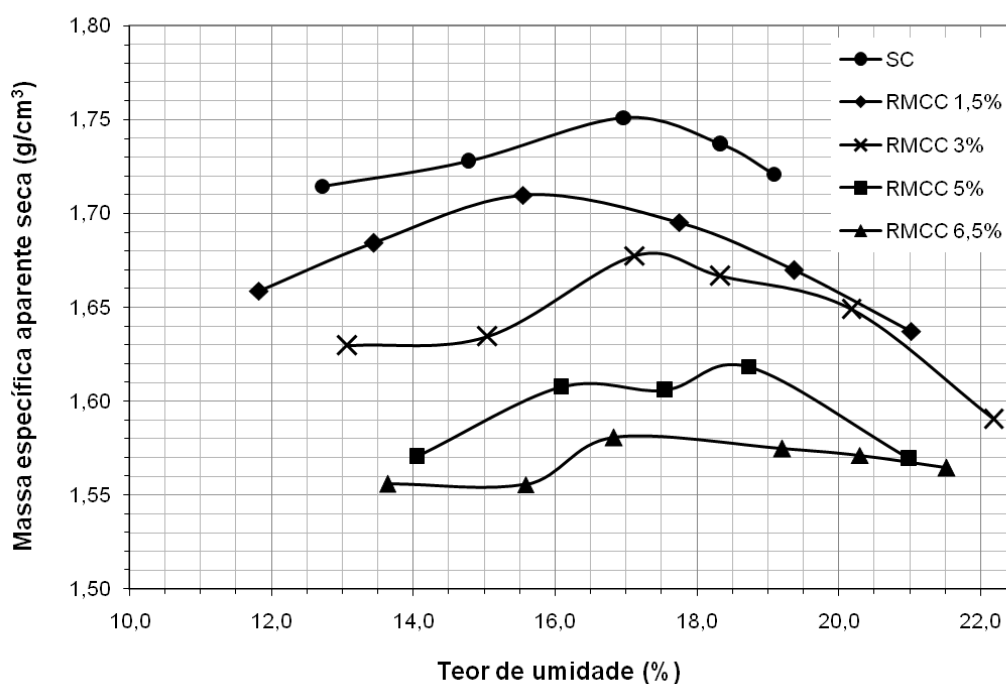
Na Tabela 17 e na Figura 23 são apresentados os dados dos ensaios de compactação realizados na Instron 5582 para o solo-cimento e para o solo-cimento com adição de RMCC nos teores de 1,5%, 3,0%, 5,0% e 6,5%. As curvas de compactação para as misturas de solo-cimento e solo-cimento-RMCC produziram resultados diversos, algo já esperado devido à heterogeneidade e menor densidade do material acrescentado. Os valores obtidos para o teor de umidade nos revelam que nas amostras onde foram adicionados 3% e 6,5% de RMCC, os teores de umidade ótimos foram os que mais se aproximaram ao da mistura solo-cimento (SC). A mistura com 1,5% de RMCC se apresentou com o menor valor em relação à de SC e a mistura com 5% de RMCC, como sendo a que atingiu o maior teor de umidade ótimo.

Com relação à massa específica aparente seca máxima, os resultados apresentaram o padrão esperado. Na medida em que se aumentou o teor de RMCC na mistura, a densidade diminuiu gradativamente em razão do acréscimo da madeira, material mais leve que o solo. Dessa forma, a mistura SC atingiu a maior densidade de compactação e a mistura com 6,5% de RMCC a densidade mais baixa.



**Tabela 17 – Valores máximos obtidos nos ensaios de compactação para o solo-cimento e solo-cimento-RMCC**

Mistura	SC	RMCC 1,5%	RMCC 3,0%	RMCC 5,0%	RMCC 6,5%
Teor de umidade ótimo (%)	17,0	15,5	17,1	18,7	16,8
Massa específica aparente seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,75	1,71	1,68	1,62	1,58



**Figura 23 – Curvas de compactação para solo-cimento (SC) e solo-cimento-RMCC entre 1,5 e 6,5% de RMCC**

As curvas de compactação não mostram uma tendência de comportamento quando se relaciona o teor de umidade ótimo com a massa específica aparente seca máxima. Comparadas à mistura SC, as curvas com RMCC apresentaram comportamentos diversos. As misturas com 6,5% de resíduo destoaram das demais por terem apresentado o teor de umidade mais retraído, enquanto as curvas de 3% e 5% tiveram a tendência de aumento no teor de umidade.

Analisando apenas as curvas das misturas com RMCC, vislumbra-se uma relação onde, na medida em que se aumenta o teor de RMCC, a densidade diminui e o teor

de umidade aumenta. Essa tendência era esperada, pois a adição de madeira ao solo-cimento aumenta a plasticidade do material, sendo equivalente ao uso de um solo mais argiloso. No entanto, o resultado obtido com a mistura de 6,5% não segue a tendência, pois se nota uma redução no teor de umidade máximo, podendo ser resultado da variabilidade esperada por se utilizar um material heterogêneo como o RMCC.

Os resultados indicam a importância do estabelecimento dos parâmetros de compactação para cada teor de RMCC avaliado e confirmam que não é possível usar os dados obtidos da curva de solo-cimento quando são acrescentados novos materiais à mistura.

## 5.2 Moldagem dos corpos-de-prova

Para moldagem dos corpos-de-prova foi inicialmente testado o molde de 50x100mm, com abertura lateral (Figura 24 a), utilizado para argamassa e concreto, e uma prensa manual. Os moldes não suportaram a pressão aplicada e abriram nas laterais, deformando os CPs e inviabilizando seu uso (Figura 24 b). Posteriormente, a abertura dos moldes foi fechada com solda, mas a deformação causada durante o processo de soldagem e do próprio corte pré-existente no tubo metálico foram reproduzidas nos CPs, não permitindo que os mesmos fossem utilizados.

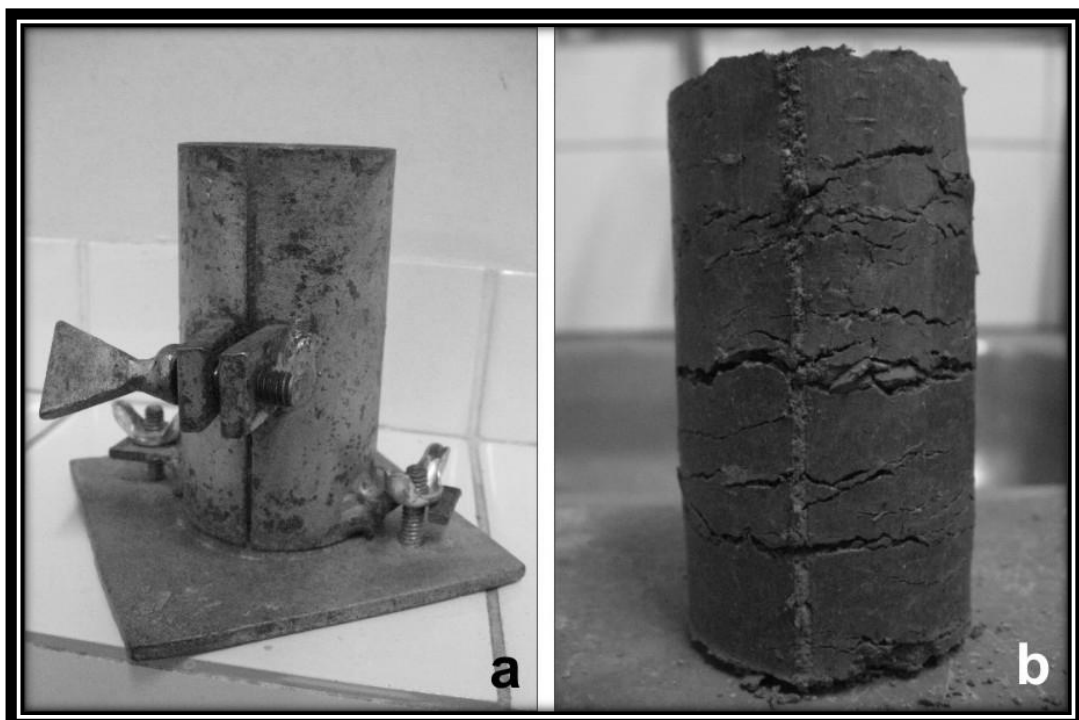
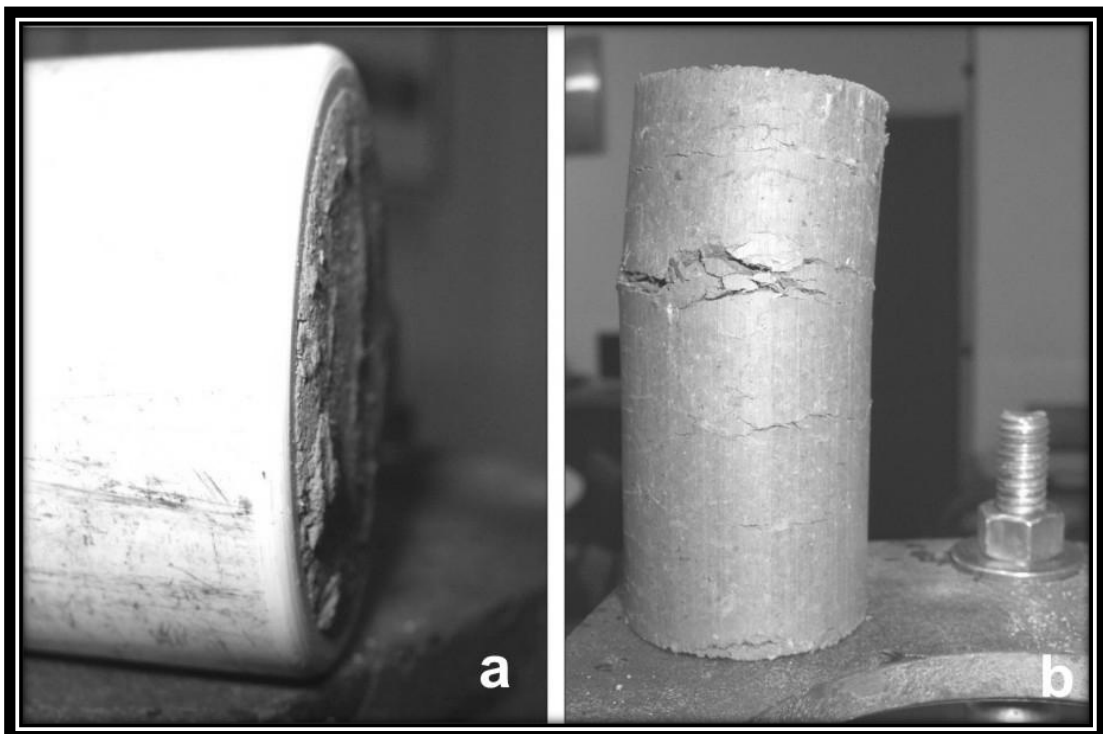


Figura 24 – CP deformado devido à abertura do molde

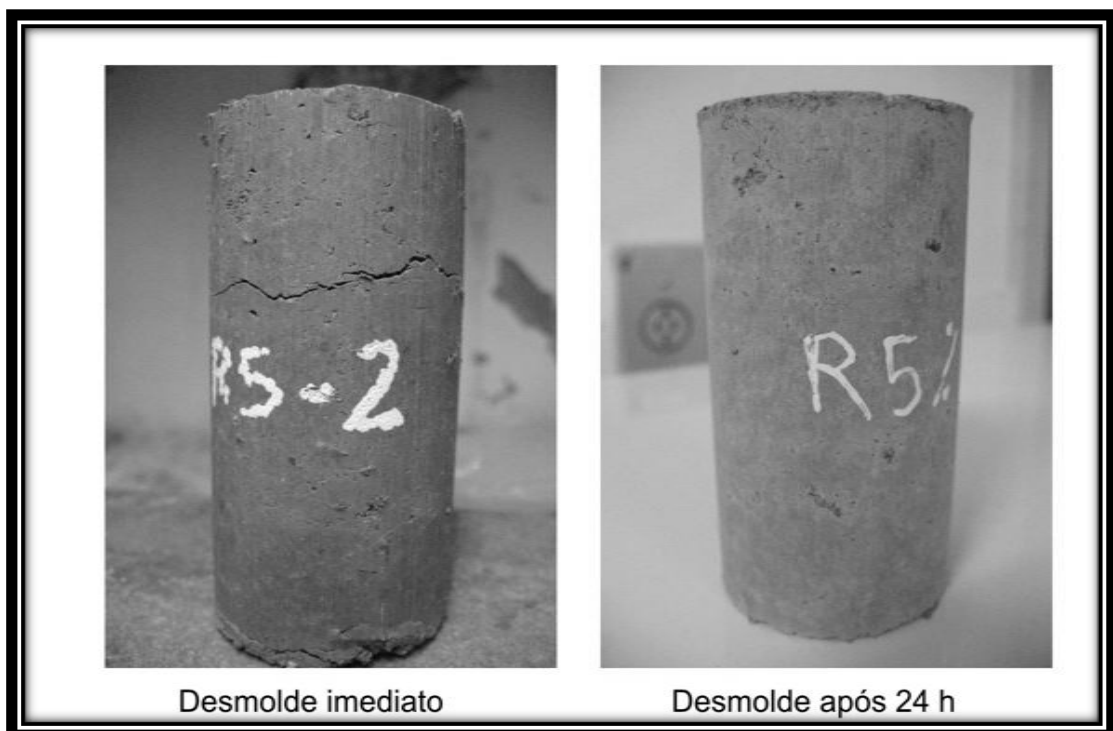
A utilização de tubos de PVC rígido para a moldagem dos CPs resolveu o problema de reprodução das imperfeições do molde para os corpos-de-prova. A parede lisa do tubo e o fato de não possuir costura, torna a desmoldagem mais fácil e assegura um melhor acabamento e qualidade ao corpo-de-prova. Além disso, essa solução se mostrou bastante versátil devido à facilidade do tubo ser encontrado para compra, seu baixo custo e a simplicidade com que pode ser seccionado.

O processo de moldagem dos CPs foi o fator que regulou a quantidade de resíduo a ser acrescentado na mistura solo-cimento. O limite máximo atingido durante a moldagem foi o de 6,5 % de RMCC para a massa aparente seca de solo. Foram feitos testes com percentuais maiores, até o limite de 8%. Nesse caso, o resíduo atua como uma “mola” dentro do CP, ou seja, na medida em que ele é desmoldado, a madeira, ao ser aliviada da pressão aplicada, volta ao seu estado natural, criando instantaneamente fissuras no corpo-de-prova. Na Figura 25a é possível notar a expansão do CP com 8% de RMCC ainda dentro do molde e, na Figura 25b, a fissuração logo após a desmoldagem. Com a intenção de eliminar o “efeito mola” exercido pelo RMCC foram feitos alguns experimentos diminuindo a granulometria do resíduo, mas o resultado apresentado foi o mesmo. Isso mostrou que o problema estava relacionado inicialmente ao teor de resíduo e não ao seu tamanho.



**Figura 25 – Efeito de expansão do CP em mistura com 8% de RMCC**

A solução encontrada para evitar essa deformação durante o processo de desmoldagem foi a extração dos CPs do molde depois de decorridas 24 horas do processo de moldagem. Nesse período os CPs foram mantidos em câmara úmida com o molde e, após a desforma, foram novamente acondicionados no ambiente com controle da umidade. Esse procedimento permitiu que as reações químicas do cimento pudessem acontecer enquanto a mistura se encontrava comprimida no molde, garantindo a coesão dos materiais utilizados. Corpos-de-prova com até 6,5% de RMCC não apresentaram fissuras ao serem desmoldados após 24 horas e até os 7 dias de cura, quando ocorreram os ensaios. Na Figura 26 são apresentados dois CPs com o mesmo percentual de resíduo, no caso 5%, onde o da esquerda foi desmoldado logo após sua confecção e o da direita, desformado após 24 horas no molde. Essa fissuração proveniente da desforma imediata após a moldagem ocorreu apenas nos corpos-de-prova aos quais foi acrescentado o resíduo. Os CPs de solo-cimento sem resíduos foram desmoldados ao final da sua confecção conforme preconiza a norma brasileira NBR 12024 (1992), para moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos em solo-cimento.



**Figura 26 – Influencia do tempo de desforma na qualidade do CP de solo-cimento-RMCC a 5%**

### **5.3 Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova de solo-cimento com e sem adição de RMCC**

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de variação dimensional, absorção de água, resistência à compressão simples, resistência à flexo-tração e o módulo de elasticidade dinâmico. Nos gráficos são apresentadas a média dos valores obtidos nos ensaios e uma barra de erro que aponta os valores máximos e mínimos obtidos nas amostras.

Além desses ensaios, em razão dos testes realizados para desmoldagem dos CPs, será apresentado um estudo comparativo entre corpos-de-prova com 1,5% de RMCC que aborda o efeito da desmoldagem em sua qualidade.

Embora os resultados apresentem dispersões de diferentes ordens de grandeza, deve ser ressaltado que esse comportamento é usual no caso de ensaios mecânicos de materiais cimentícios, sendo ainda considerado um problema no controle do concreto produzido (FORSTIE e SCHNORMEIER, 1981; BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983; SACANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986; CARINO, GUTHRIE e LAGERGREN, 1994; LIMA e BARBOSA, 2002; PATNAIK e PATNAIKUNI, 2002; BEZERRA, 2007; BEZERRA, AGUILAR e CETLIN, 2008; SALES, 2008). Tendo em vista o cuidado prestado durante os procedimentos realizados neste trabalho nota-se que esse tipo de dispersão pode ocorrer também com o solo-cimento-RMCC. Dessa forma na análise desses dados considerou-se o intervalo de variabilidade apresentado.

#### **5.3.1 Efeito da desmoldagem na qualidade dos corpos-de-prova**

Devido aos testes de desmoldagem realizados, foram preparadas duas séries de amostras com 1,5% de RMCC. Uma dessas séries foi desmoldada logo após sua confecção, “1,5 imediato”, conforme preconiza a norma brasileira NBR 12024 (1992), a outra série foi desmoldada 24 horas após ter sido confeccionada, “1,5 - 24h”. Foram realizados os ensaios de variação dimensional (VD), absorção de água, resistência à compressão simples, resistência à flexo-tração e o módulo de elasticidade dinâmico, que tiveram como referência as amostras de solo-cimento (SC).

A Tabela 18 denota que a amostra “1,5 imediato” apresentou a maior variabilidade nas duas dimensões, onde o aumento médio no diâmetro foi de 0,2% e no comprimento de 0,38%. A amostra “1,5 - 24h” não apresentou variação em seu diâmetro e um pequeno acréscimo em seu comprimento, enquanto a amostra de

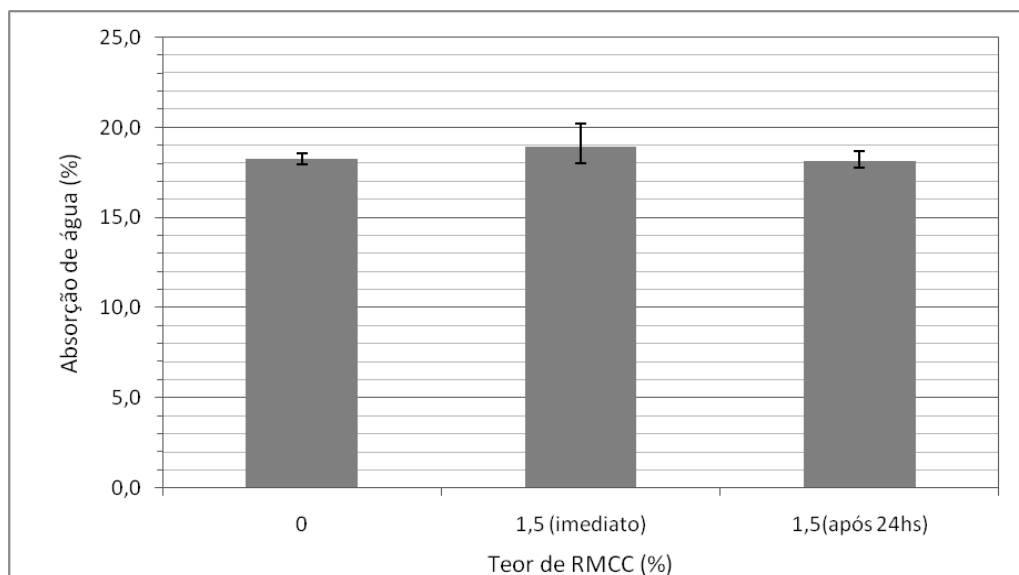
solo-cimento teve uma retração ínfima no comprimento e um pequeno aumento em seu diâmetro.

**Tabela 18 – Influência do tempo de desmoldagem na variação dimensional do corpo-de-prova**

Teor de RMCC na mistura (%)	0 (SC)	1,5 (imediate)	1,5 (após 24 h)
VD Ø (%)	0,03	0,20	0,00
VD Comprimento (%)	-0,01	0,38	0,03

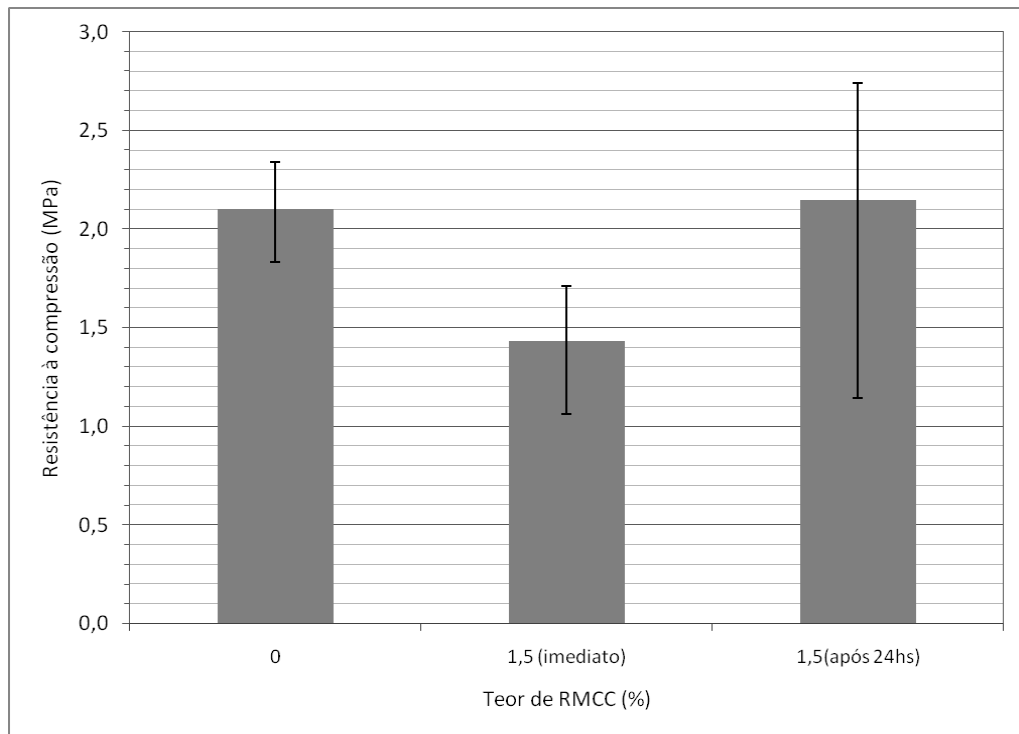
Na Figura 27, referente à absorção de água, é possível ver que a amostra “1,5 imediato” absorve aproximadamente 5% a mais de água em relação à amostra “1,5 - 24h” e a amostra de solo-cimento. Visto que a diferença no tempo de desmoldagem pode induzir a propagação de fissuras no corpo-de-prova, analogamente a série que obteve maior variação em sua dimensão, foi a que absorveu a maior quantidade de água durante o experimento.

Embora as diferenças apresentadas nos ensaios de variação dimensional e absorção de água sejam pequenas, os ensaios físicos e mecânicos revelaram uma diferença mais acentuada no comportamento do material.



**Figura 27 – Influência do tempo de desmoldagem na capacidade de absorção de água do corpo-de-prova**

Os resultados apresentados na Figura 28 nos mostram que na média, quando desmoldado logo após sua confecção, a resistência à compressão simples das amostras “1,5 imediato” tem uma queda de aproximadamente 33% em relação às amostras de solo-cimento e às amostras com desmoldagem após 24 horas.



**Figura 28 – Compressão simples: influência do tempo de desmoldagem na resistência do corpo-de-prova**

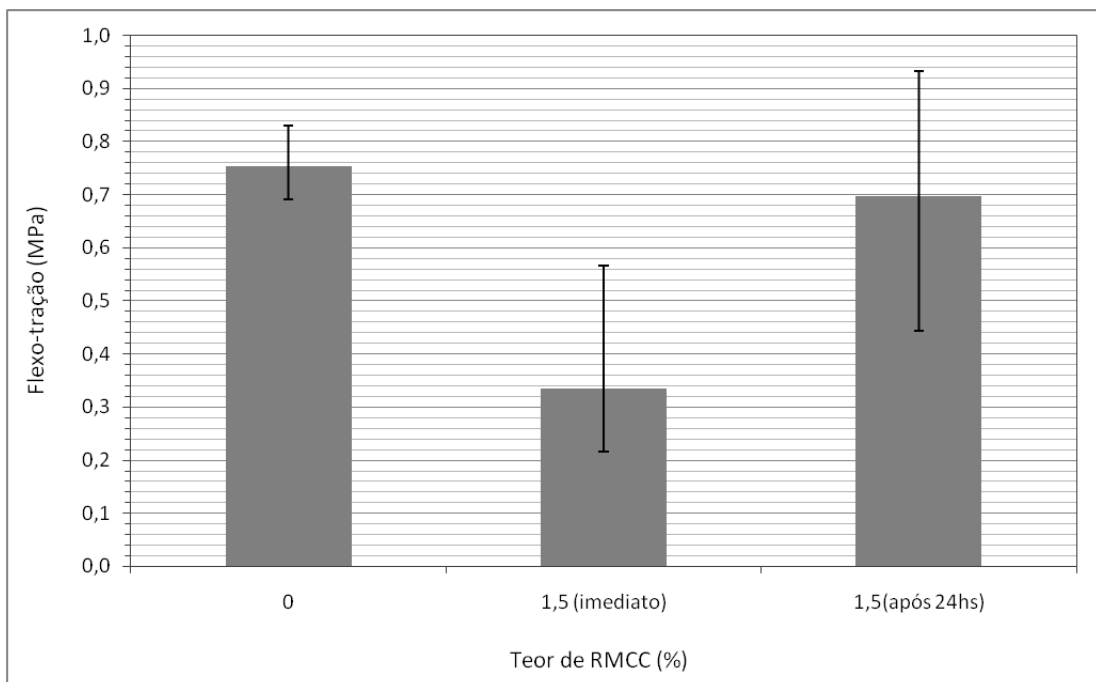
Essa diferença na resistência pode ser atribuída à fissuração que ocorre no material devido à tendência da madeira de voltar ao seu estado normal após ser comprimida. Nas amostras com teor de madeira reduzido, como as amostras com 1,5% de RMCC, a fissuração não pode ser visualizada de forma clara como nas amostras com teores um pouco mais elevados, conforme nos mostra a Figura 29 onde são apresentados dois CPs com 3% de RMCC desmoldados logo após sua confecção.

Os resultados obtidos para os ensaios de flexo-tração, conforme mostra a Figura 30, são consonantes aos ensaios anteriores, que denunciam uma queda na qualidade dos corpos-de-prova com RMCC desmoldados logo após serem confeccionados.

Neste caso, os valores médios apontam uma queda de aproximadamente 54% da resistência da amostra “1,5 imediato” em relação à amostra “1,5 - 24h” e da amostra referencia de solo-cimento.



**Figura 29 – Fissuração em CPs com 3% de RMCC desmoldados imediatamente após sua confecção**



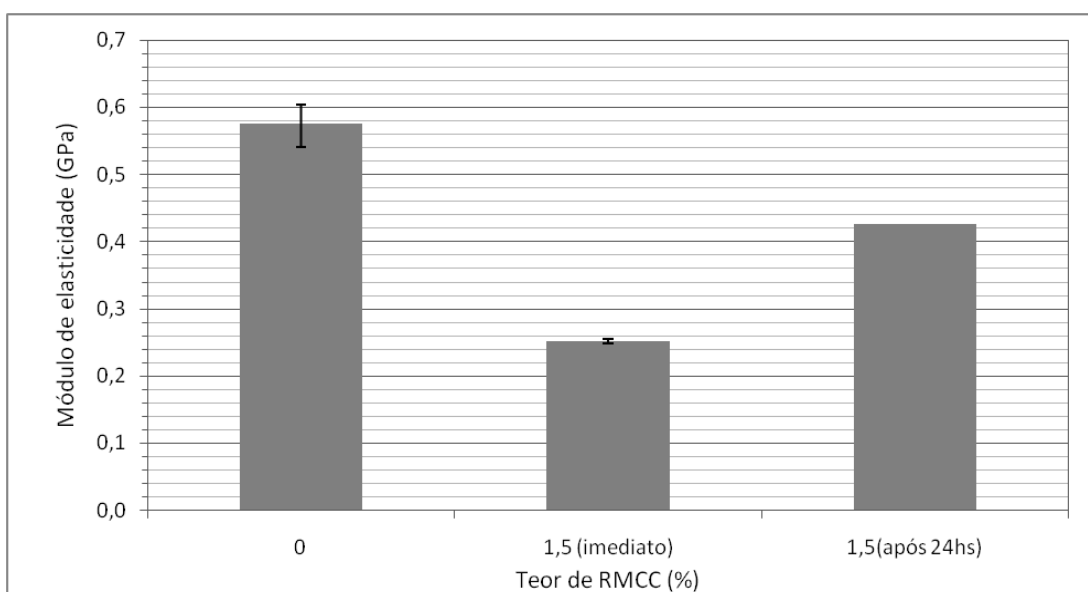
**Figura 30 – Flexo-tração: influência do tempo de desmoldagem na resistência do corpo-de-prova**

O módulo de elasticidade dinâmico (Figura 31) dos CPs estudados acompanhou a tendência dos resultados obtidos nos ensaios anteriores, onde a amostra “1,5



imediatos” apresentou uma queda na qualidade em relação às demais amostras. Nesse caso, com uma margem de erro bem inferior aos demais ensaios, os resultados obtidos confirmam a propensão de queda na qualidade dos CPs com RMCC removidos da fôrma logo após a sua moldagem.

O percentual de queda na qualidade da amostra “1,5 imediato” para os ensaios de compressão simples, flexo-tração e módulo de elasticidade, em comparação às demais amostras utilizadas nesse item pode ser visto na Tabela 19.



**Figura 31 – Influência do tempo de desmoldagem no módulo de elasticidade**

**Tabela 19 – Percentual de queda na qualidade da amostra “1,5 imediato” para os ensaios de compressão simples, flexo-tração e módulo de elasticidade**

Ensaio	Compressão simples		Flexo-tração		Módulo de elasticidade dinâmico	
	SC	1,5 - 24h	SC	1,5 - 24h	SC	1,5 - 24h
Amostras	Percentual de queda em relação às demais amostras					
1,5% imediato	32 %	34%	55%	53%	53%	42%

Embora o desvio padrão para alguns dos ensaios sejam relativamente elevados (Tabela 20), os resultados obtidos nesse comparativo mostram que o tempo de permanência das amostras com RMCC no molde, entre sua confecção e a

desmoldagem, pode influenciar na qualidade dos corpos-de-prova. Sendo a fissuração do corpo-de-prova o fator a ser combatido para que a tendência da madeira em voltar ao seu estado natural após ser comprimida seja contida.

**Tabela 20 – Calculo do desvio padrão para os ensaios entre os CPs desmoldados após a confecção e 24 h após a moldagem**

Amostra		Ensaio			
		Absorção de água	Compressão simples	Flexo-tração	Módulo de elasticidade
Solo-cimento 0%	Desvio padrão	0,32	0,23	0,07	0,03
RMCC 1,5% imediado		1,13	0,32	0,04	0,00
RMCC 1,5% Após 24 h		0,48	0,70	0,20	0,00

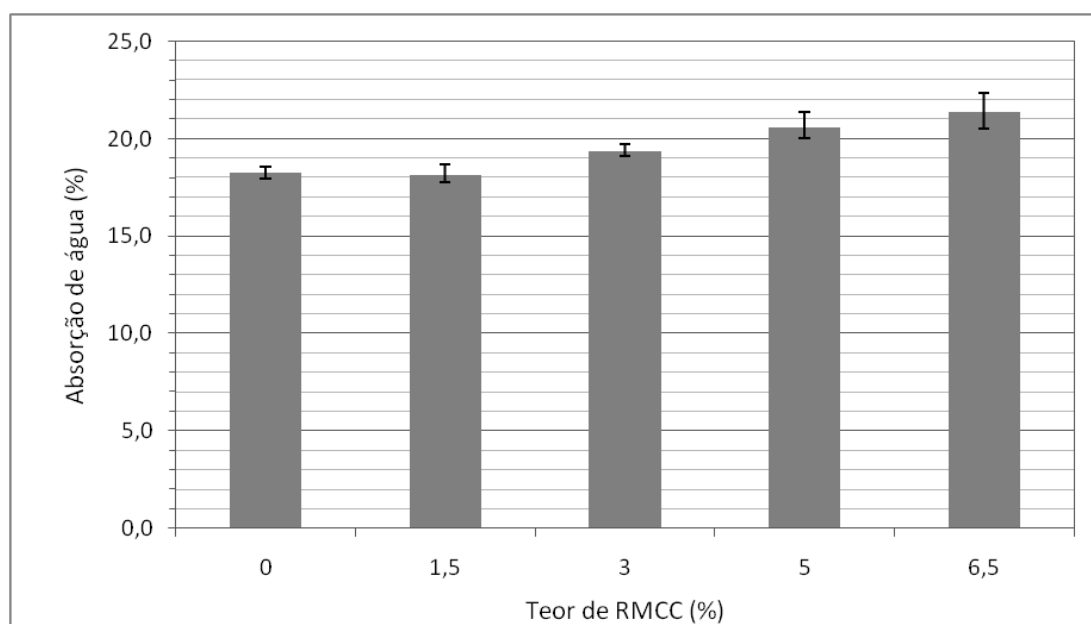
### 5.3.2 Variação dimensional e absorção de água

A variação dimensional (VD) dos corpos-de-prova oscilou de uma forma geral, considerando diâmetro e comprimento, entre 0 e 0,2% (Tabela 21). Interessante notar que não é possível estabelecer um padrão para variação dimensional relacionado ao teor de RMCC. A mistura de solo-cimento apresentou uma retração mínima no comprimento do CP. Embora essa redução média no comprimento das amostras de solo-cimento seja ínfima, vale notar que o mesmo não ocorreu nas amostras onde o RMCC foi adicionado. Nas misturas com teores de 1,5% e 5% a variabilidade média foi a mesma. Nas amostras com 3% de resíduo a variabilidade dimensional apresentada foi a maior de todas as amostras, enquanto que a mistura com 6,5% foi a que teve a mesma variação para o diâmetro e comprimento. A variação apresentada, embora pequena, pode ter provocado fissuras que auxiliaram na introdução de água nos corpos-de-prova.

**Tabela 21 – Variação dimensional dos corpos-de-prova**

Teor de RMCC na mistura (%)	0	1,5	3,0	5,0	6,5
VD Ø (%)	0,03	0,00	0,09	0,00	0,06
VD Comprimento (%)	-0,01	0,03	0,17	0,03	0,06

Na Figura 32 é apresentada a variação da absorção de água no CP em relação ao teor de RMCC na amostra. Os resultados nos mostram que na medida em que se aumenta o teor de RMCC ocorre uma ascendência na absorção de água. A diferença apresentada entre o solo-cimento e o teor mais elevado de RMCC, 6,5%, foi de aproximadamente 15%. Na medida em que se acrescentou o resíduo na mistura, o aumento gradativo na absorção de água foi em média 1% para cada teor de RMCC.



**Figura 32 – Gráfico de absorção de água após 24h de imersão**

Ao inserir a fibra vegetal na mistura solo-cimento, esperava-se uma menor fissuração e a conseqüente diminuição da absorção de água, algo que não ocorreu, exceção à mistura com 1,5% de RMCC, que apresentou um desempenho similar ao da mistura com solo-cimento puro.

Um fato que deve ser levado em consideração para os resultados obtidos nos ensaios de variação dimensional e absorção de água é o volume de resíduos na amostra. Pois na medida em que se aumenta o teor de RMCC na mistura de solo-

cimento, pedaços de madeira tendem a ficar expostos na face do corpo-de-prova, podendo ser um ponto de entrada para água no CP (Figura 33).



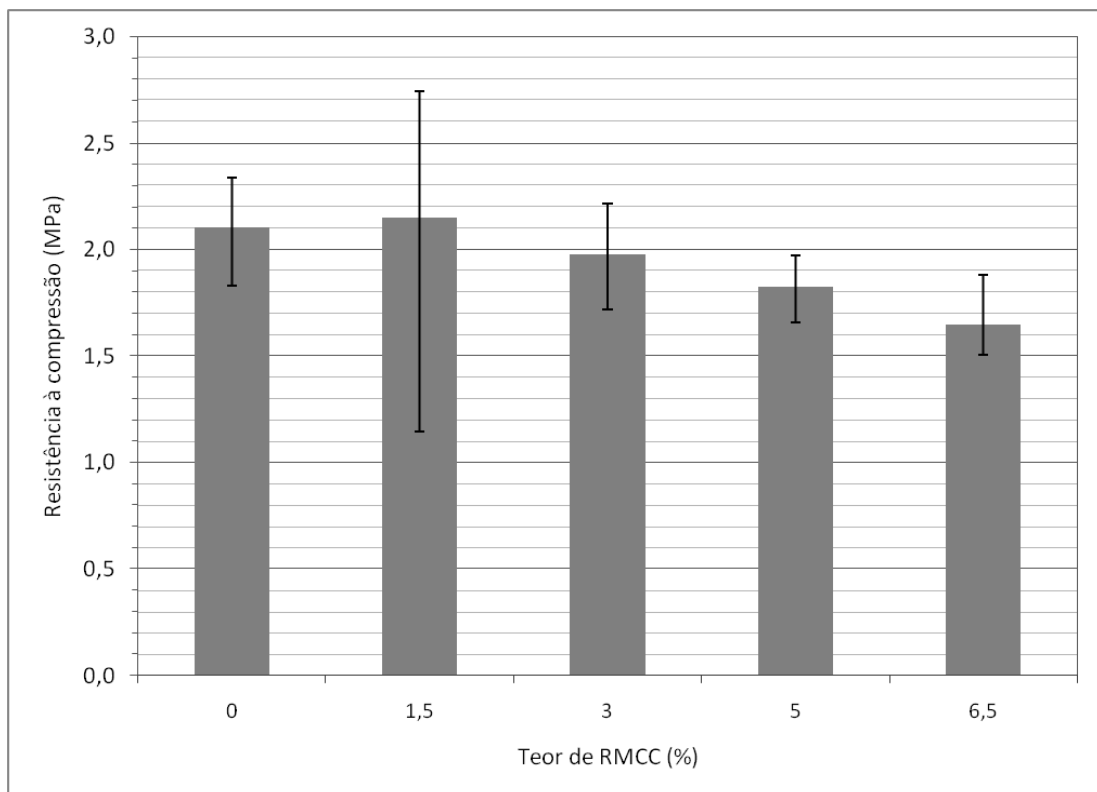
**Figura 33 – Resíduos aparentes na face do corpo-de-prova**

Na pesquisa de SILVA (2005) não foi avaliada a absorção de água do composto solo-cimento-resíduo de madeira. As normas brasileiras NBR 8491 (1984) e NBR 10834 (1994), para tijolos e blocos vazados de solo cimento respectivamente, estabelecem que a média dos valores para absorção de água não deve ser superior a 20%. Dos teores de adição experimentados, as misturas com 1,5% e 3% de RMCC foram as que atenderam o valor estipulado pelas normas.

Há de ser levado em consideração que o resíduo utilizado nesse estudo não recebeu nenhum tipo de tratamento que favorecesse a impermeabilidade do material. Além disso, observando-se o detalhe de que o RMCC na face dos CPs (Figura 33) pode ter induzido a entrada de água nas amostras, os resultados obtidos são razoáveis. Os teores de 5% e 6,5% de RMCC ficaram respectivamente apenas 0,6% e 1,4% acima do valor máximo, para absorção de água, estipulado pelas normas brasileiras para tijolos e blocos vazados de solo-cimento sem função estrutural.

### 5.3.3 Ensaios de compressão simples

Os resultados obtidos nesse ensaio mostram de uma forma geral que na medida em que se adiciona o RMCC à mistura de solo-cimento sua resistência à compressão simples é gradativamente reduzida. A Figura 34 mostra a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova com seus respectivos teores de RMCC. Nela é apresentado o valor médio, máximo e mínimo obtido para cada mistura. O Cálculo do desvio padrão é apresentado na Tabela 22.



**Figura 34 – Comparação entre a média da resistência à compressão simples para os corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-RMCC**

As séries com 1,5% e 3% de RMCC apresentaram desempenho semelhante ao da mistura solo-cimento (teor de resíduo igual a 0%), sendo a primeira um pouco acima e a segunda um pouco a baixo. As séries com 5% e 6,5%, comparadas ao solo-cimento, apresentaram respectivamente uma queda na resistência de 13,3% e 21,4% na resistência à compressão.

**Tabela 22 – Cálculo do desvio padrão para ensaio de compressão simples**

Amostra		Tipo de mistura e teor de resíduo utilizado				
		SC 0%	RMCC 1,5%	RMCC 3,0%	RMCC 5,0%	RMCC 6,5%
1	Resistência à compressão simples (MPa)	2,34	2,74	2,13	1,97	1,88
2		1,99	2,46	2,22	1,94	1,66
3		2,25	1,15	1,72	1,72	1,51
4		1,83	2,24	1,85	1,66	1,54
<b>Média</b>		<b>2,10</b>	<b>2,15</b>	<b>1,98</b>	<b>1,82</b>	<b>1,65</b>
Desvio-padrão		0,23	0,70	0,23	0,16	0,17

Os resultados obtidos nos mostram uma tendência de queda da resistência em 0,17 MPa na medida em que o teor de RMCC é aumentado gradativamente entre 1,5% e 2,0%. Salvo exceção na primeira adição de 1,5%, cuja resistência se manteve, na média, no mesmo patamar da mistura solo-cimento.

As norma brasileira para tijolo maciço de solo-cimento, NBR 8491 (1984) relata que a resistência à compressão simples dos tijolos não deve ser inferior a 2 MPa após sete dias de cura. A norma para bloco vazado de solo-cimento não estrutural, NBR 10834 (1994), também apresenta como resistência mínima o valor de 2 MPa, mas a ser atingida após 28 dias de cura. Embora não seja possível comparar os resultados obtidos com os valores apresentados pelas normas, pois nesse trabalho não foram ensaiados blocos e tijolos, os valores obtidos para os corpos-de-prova com 1,5% atendem a resistência estipulada e os valores para 3% de RMCC se aproximam do mesmo. No caso da mistura com 3% de RMCC, levando em consideração a norma para blocos não estruturais, há uma tendência de se atingir o valor exigido uma vez que os mesmo deve ser apresentado aos 28 dias de cura.

Em relação à SILVA (2005), é interessante notar que os acréscimos de RMCC feitos à mistura solo-cimento, mesmo em teores maiores, quando comparados aos acréscimos feitos pelo autor, tiveram uma menor influencia na queda da resistência à compressão simples em relação às amostras de referência com solo-cimento. A mistura com 6,5% de RMCC apresentou uma queda de aproximadamente 21% na resistência à compressão simples quando comparado à amostra referência de solo-cimento. Em SILVA (2005), a diferença entre a mistura com maior teor de resíduo de madeira, 3%, comparada à sua amostra referência de solo-cimento, foi de aproximadamente 65%.

Vale ressaltar que embora os CPs desse trabalho tenham sido moldados em condições semelhantes aos de SILVA (2005), as características dos solos e dos resíduos de madeira utilizados e a metodologia, não são exatamente as mesmas. Sendo assim, a comparação feita entre os resultados tem apenas um caráter referencial.

Embora as amostras com teores de 5% e 6,5% de RMCC tenham apresentado resultados um pouco abaixo do estabelecido pelas normas utilizadas como referência, esses teores, inclusive outros mais elevados, devem ser considerados em novos estudos para aplicações diferenciadas que contemplem o uso do solo-cimento-RMCC.

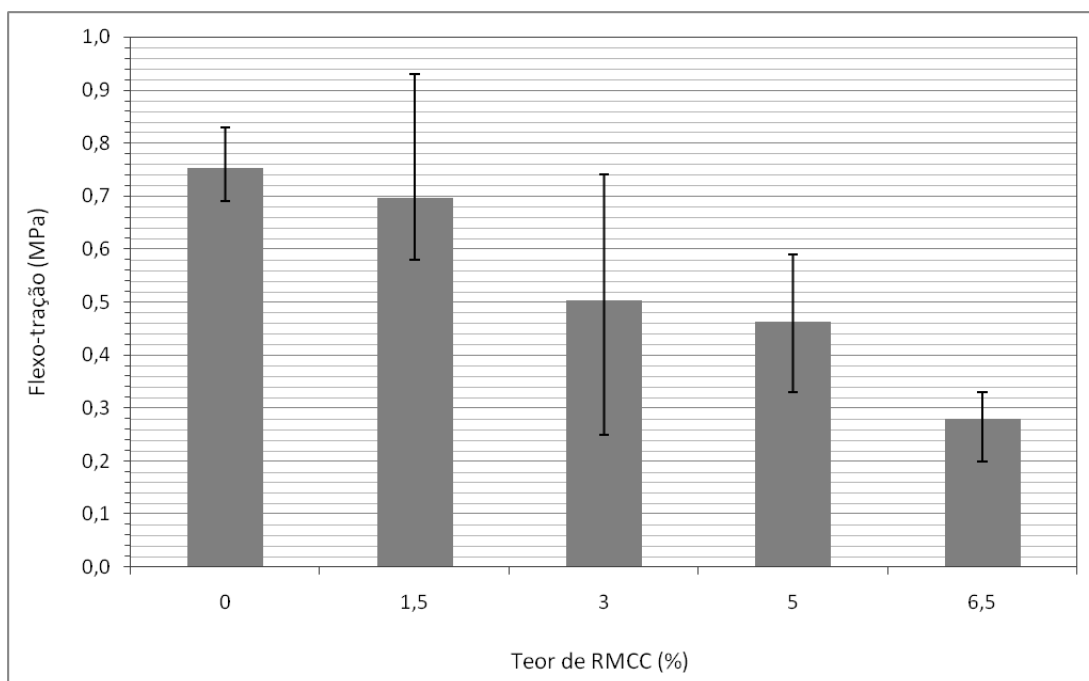
Em uma primeira análise, levando em consideração o ensaio de compressão simples e a semelhança dos resultados obtidos aos valores preconizados pelas normas brasileiras para tijolos e blocos de solo-cimento e os resultados apresentados por SILVA (2005), pode-se dizer que o composto solo-cimento-RMCC da maneira como foi estudado apresenta potencial para ser utilizado na confecção de tijolos maciços sem função estrutural.

#### **5.3.4 Ensaio de flexo-tração**

Os resultados obtidos no ensaio de flexo-tração são apresentados na Figura 35 e na Tabela 23, onde se apresenta o cálculo para o desvio padrão. À exemplo do ensaio à compressão simples, os resultados mantêm a mesma tendência de queda na resistência conforme o teor de RMCC é aumentado.

Existe, porém uma diferença na forma de como a resistência é reduzida. Enquanto na compressão simples a queda é gradativa na medida em que se aumenta o teor de RMCC, na flexo-tração é apresentada uma queda mais acentuada a cada 3% de acréscimo no teor de resíduo.

A queda na resistência entre as amostra de solo-cimento e as mostras com 1,5% de RMCC é de aproximadamente 5%. Ao comparar a amostra com 3% de RMCC à de 1,5%, observa-se uma queda de 28%, enquanto a diferença entre as amostras com 3% e 5% de RMCC é de aproximadamente 8%. Comparado a mistura com 6,5% de RMCC à amostra antecessora, a diferença sobe novamente e chega a aproximadamente 40%.



**Figura 35 – Comparação entre a média da resistência à flexo-tração para os corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-RMCC**

Dessa forma observa-se uma paridade nos resultados para as amostras com 0% e 1,5% de RMCC, seguida de uma queda para o patamar onde se encontram com uma aproximação nos resultados os teores de 3% e 5% de RMCC, tendo na seqüência uma nova redução significativa onde se encontra a amostra com 6,5% de RMCC.

Como o desvio padrão para esse parâmetro pode ser considerado elevado, em média 28%, essa tendência dos patamares não pode ser confirmada, haja vista a possível influência causada pela a dispersão dos resultados, algo que pode estar relacionado à heterogeneidade desse material.

**Tabela 23 - Cálculo do desvio padrão para ensaio de flexo-tração**

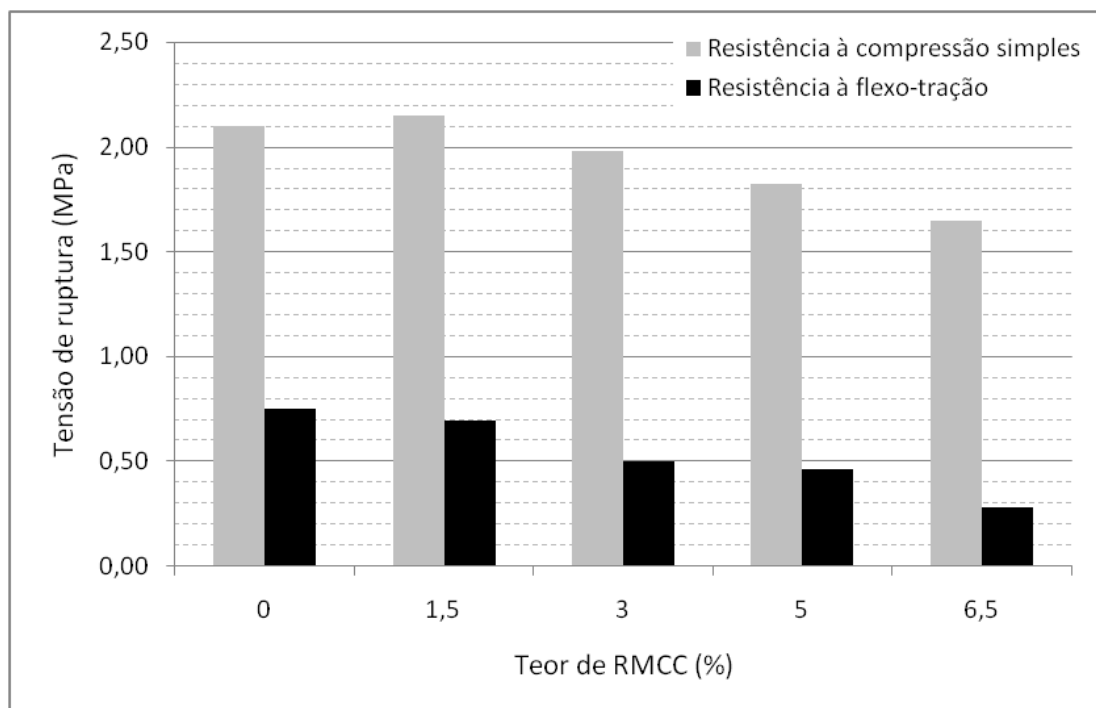
Amostra		Tipo de mistura e teor de resíduo utilizado				
		SC 0%	RMCC 1,5%	RMCC 3,0%	RMCC 5,0%	RMCC 6,5%
1	Resistência à flexo-tração (MPa)	0,83	0,58	0,25	0,33	0,20
2		0,74	0,93	0,52	0,47	0,33
3		0,69	0,58	0,74	0,59	0,31
<b>Média</b>		<b>0,75</b>	<b>0,70</b>	<b>0,50</b>	<b>0,46</b>	<b>0,28</b>
Desvio-padrão		0,07	0,20	0,25	0,13	0,07



Quando comparados os resultados médios obtidos para os ensaios de compressão simples e flexo-tração (Figura 36), observa-se que para o solo-cimento e a mistura com 1,5% de RMCC, na média, as amostras são até três vezes mais resistentes à compressão simples. No caso das amostras onde o teor de RMCC é de 3% e 5%, os valores obtidos para compressão simples são quatro vezes superiores aos obtidos para flexo-tração. Para as amostras com 6,5% de RMCC, os resultados apontam uma diferença de seis vezes a favor do ensaio de compressão simples.

Essa tendência de distanciamento entre a relação dos valores das resistências nos dois tipos de ensaio pode estar associada à diminuição da superfície de contato do solo-cimento, na medida em que se aumenta o teor de resíduo.

Devido às alterações feitas neste ensaio, não foi possível comparar os resultados obtidos com normas ou outros trabalhos. Desta forma, os valores obtidos para as misturas com RMCC foram comparadas apenas com a amostra referência de solo-cimento.

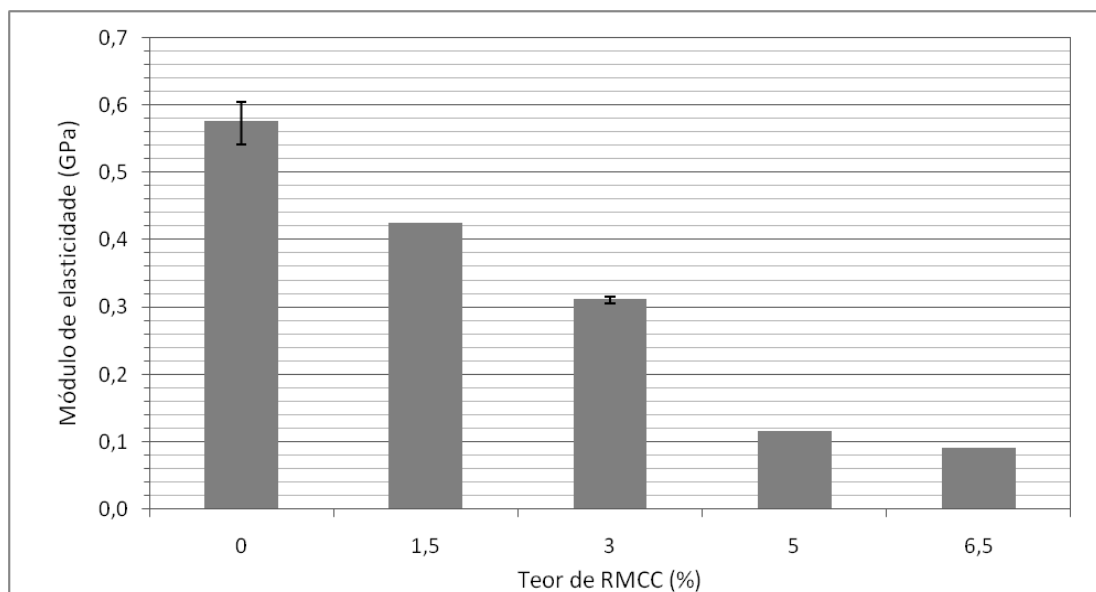


**Figura 36 – Relação entre as resistências médias à flexo-tração e à compressão simples**

### 5.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados obtidos para esse ensaio são apresentados na Figura 37. Na Tabela 24 são apresentados os valores obtidos nas leituras e o desvio padrão. A análise dos dados do módulo de elasticidade indica que o desvio-padrão das medidas é baixo se comparado aos obtidos nos ensaios de resistência mecânica.

Os valores obtidos para o solo-cimento, comparado aos resultados obtidos por SILVA (2005) para essa mesma mistura, apresentaram um acréscimo de aproximadamente 17% no módulo. Deve ser levado em consideração o fato do ensaio feito por SILVA (2005) ser do tipo estático e a diferença entre os solos utilizados. Segundo METHA e MONTEIRO (1994), é esperado que módulos obtidos pelo método dinâmico sejam maiores que os obtidos pelo método estático, uma vez que esse último se vale de equações empíricas para ser calculado. Embora essa comparação tenha um caráter referencial, a relativa proximidade dos resultados obtidos nos dois trabalhos indica certa coerência nas avaliações efetuadas.



**Figura 37 – Comparação entre a média do módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-RMCC**

**Tabela 24 – Cálculo do desvio padrão para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico**

Leitura	Amostra	Tipo de mistura e teor de resíduo utilizado				
		SC 0%	RMCC 1,5%	RMCC 3,0%	RMCC 5,0%	RMCC 6,5%
1	Valores obtidos (GPa)	0,54	0,43	0,31	0,12	0,09
2		0,54	0,43	0,31	0,12	0,09
3		0,54	0,43	0,31	0,12	0,09
4		0,54	0,43	0,31	0,12	0,09
5		0,60	0,43	0,31	0,12	0,09
6		0,60	0,43	0,31	0,12	0,09
7		0,60	0,43	0,31	0,12	0,09
8		0,60	0,43	0,31	0,12	0,09
9		0,60	0,43	0,32	0,12	0,09
10		0,60	0,43	0,32	0,12	0,09
<b>Média</b>		<b>0,57</b>	<b>0,43</b>	<b>0,31</b>	<b>0,12</b>	<b>0,09</b>
Desvio-padrão		0,029	0,00	0,003	0,00	0,00

Na análise do comportamento do solo-cimento frente às solicitações mecânicas é importante que se tenha um material com baixa tendência à ocorrência de fissuras. Essa tendência pode ser avaliada pelo quociente obtido da razão entre o módulo de elasticidade dinâmico ( $\epsilon$ ) e a resistência à compressão ou flexão ( $\sigma$ ), ou seja,  $\epsilon/\sigma$ . Em estudos para argamassas, a diminuição dessa relação demonstra uma redução do potencial de fissuração do material (GOMES, 1995). Nesse sentido, com base nos resultados obtidos e analogamente ao que ocorre com as argamassas, observa-se que para o solo-cimento-RMCC existe uma tendência de redução à fissuração na medida em que o teor de resíduo é aumentado.

Na Tabela 25 são apresentados os valores obtidos para razão entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão simples e à flexão para o solo-cimento e o solo-cimento-RMCC.

Os dados mostram que quando analisado frente à resistência à compressão, a mistura com adição de 6,5% de RMCC apresenta a menor susceptibilidade à fissuração. Em relação aos dados do ensaio de flexão, a mistura com melhor desempenho é a com adição de 5% de RMCC.

Com base nos dados obtidos nesse trabalho pode-se dizer que, de uma forma geral, à resistência à fissuração do solo-cimento e solo-cimento-RMCC é inversamente proporcional à sua resistência mecânica.

**Tabela 25 – Resistência à fissuração**

Amostra	$\epsilon$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)		$\epsilon/\sigma$		$\epsilon(\text{GPa})/\sigma(\text{MPa})$	
		Compres- são	Flexo- tração	Compres- são	Flexo- tração	Compres- são	Flexo- tração
SC	570	2,10	0,56	271,4	1017,9	0,27	1,02
RMCC 1,5%	430	2,15	0,53	200,0	811,3	0,20	0,81
RMCC 3,0%	310	1,98	0,38	156,6	815,8	0,16	0,82
RMCC 5,0%	120	1,82	0,35	65,9	342,9	0,07	0,34
RMCC 6,5%	90	1,65	0,21	54,5	428,6	0,05	0,43

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para os ensaios de compactação demonstram a importância do estabelecimento dos parâmetros deste ensaio para cada teor de RMCC avaliado e evidenciaram que não é possível usar os dados obtidos da curva de solo-cimento quando são acrescentados novos materiais à mistura.

A adição do resíduo de madeira ao solo-cimento resultou na redução da densidade aparente seca ótima, como consequência da substituição de um material mais pesado (solo) por um mais leve (madeira) e com comportamento mais plástico.

A desmoldagem dos corpos-de-prova com RMCC após 24 horas de cura aumenta a resistência física e mecânica, como consequência da diminuição de trincas e fissuras no material.

As amostras com teores de 1,5% e 3% de RMCC atendem aos critérios para absorção de água preconizados pelas normas brasileiras para tijolos e blocos vazados de solo-cimento sem função estrutural. Os teores de 5% e 6,5% de RMCC ficaram respectivamente apenas 0,6% e 1,4% acima do valor máximo, para absorção de água, estipulado pelas normas brasileiras para tijolos e blocos vazados de solo-cimento sem função estrutural.

O solo-cimento-RMCC (com teor de 1,5%) apresentou, na média, maior resistência à compressão simples do que o solo-cimento sem adição de RMCC. Os resultados do ensaio de compressão simples demonstram que o material solo-cimento-RMCC, até o teor de 3%, apresenta potencial para ser utilizado na confecção de tijolo maciço sem função estrutural, tendo como referência a norma NBR 8491 (1984).

A resistência à flexo-tração realizada em ensaio diferenciado variou de 17 a 33% do valor obtido para a resistência à compressão simples, sendo o menor percentual referente à mistura com 6,5% de RMCC.

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico decrescem na medida em que o teor de RMCC é aumentado e indicam uma tendência de menor susceptibilidade desse material frente à fissuração. De uma forma geral, a resistência à fissuração do solo-cimento e solo-cimento-RMCC é inversamente proporcional à sua resistência mecânica.

De modo geral, os ensaios realizados indicaram que a amostra de solo-cimento-RMCC com teor de 1,5% foi a que obteve o melhor desempenho nos ensaios realizados, seguida da amostra com teor de 3% de RMCC.

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que o material à base de solo-cimento-RMCC possui indicativos que o qualificam para o uso na construção civil.

## 7. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Os dados obtidos nesse trabalho encorajam o aprofundamento e a ampliação das investigações sobre o tema. É importante ressaltar que a adição de RMCC ao solo-cimento pode oferecer ganhos potenciais em outros parâmetros de qualidade diretamente relacionados ao uso da madeira. Além disso, o uso do solo-cimento-RMCC em outras aplicações pode levar a resultados bastante satisfatórios.

Nesse sentido, para a continuidade da linha de pesquisa, os seguintes estudos são sugeridos:

- A. confecção e ensaio de uma parede em taipa de pilão para que se possa avaliar o comportamento do solo-cimento-RMCC em situação real;
- B. confecção e ensaio de tijolos prensados para que se possa avaliar o comportamento do solo-cimento-RMCC em situação real;
- C. desenvolvimento de painel pré-moldado utilizando o solo-cimento-RMCC;
- D. avaliação sobre a utilização do RMCC em tijolos de adobe;
- E. avaliação da capacidade de isolamento acústico e térmico do solo-cimento-RMCC como enchimento de paredes em sistema de construção a seco;
- F. impermeabilização do RMCC para que seja observado seu comportamento quanto a absorção de água e caracterização física e mecânica quando adicionado ao solo-cimento;
- G. avaliação da performance do material utilizando o RMCC cortado em fibras mais finas e longas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, C. E. C., FERREIRA, R.O., MARTINS, B. C., FONSECA, C. C., GRIPP, D. O. **Painéis de OSB e cimento-madeira para construção civil. 2003.**

Fonte: [www.remade.com.br](http://www.remade.com.br). Acesso em: 05 jan. 2006.

ALVARENGA, M. A. **Parâmetros de Projetos para Edificações Bioclimáticas Utilizando Adobe na Região de Araxá: Avaliação da Inércia Térmica em Paredes de Adobe e Tijolo Maciço.** 1990. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.

ALVARENGA, M. A. **Curso de Arquitetura de Terra.** Apostila, Belo Horizonte: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Solo-cimento na habitação popular.** São Paulo: ABCP, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180:** Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 8491:** Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182:** Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 12024:** Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR-12025:** Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

\_\_\_\_\_. **NBR 12253:** Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834**: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 13555**: Solo-cimento - Determinação da absorção d'água. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BARDOU, P., ARZOUMANIAN, V. **Arquitecturas de adobe**. Barcelona: Gustavo Gili, 1979.

BEZERRA, A.C.S. **Influência das variáveis de ensaio nos resultados de resistência à compressão de concretos: uma análise experimental e computacional**. 2007. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Belo Horizonte: Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

BEZERRA, A. C. S., AGUILAR, M. T. P., CETLIN, P. R. Influência do capeamento nos resultados do ensaio de resistência à compressão em concretos. **Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON**. Salvador, 2008.

BUCHER, H. R. E., RODRIGUES FILHO, H. C. Argamassas de enxofre para capeamento de corpos-de-prova. **Seminário Controle de Resistência do Concreto, IBRACON**. São Paulo, 1983.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1977.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Mecânica das rochas – Fundações – Obras de Terra**. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CARINO, N. J., GUTHRIE, W. F., LAGERGREN, E. S. **Effects of Testing Variables on the Measured Compressive Strength of High-Strength (90 MPa) Concrete**. National Institute of Standards and Technology. NISTIR 5405, Gaithersburg, Md., Oct. 1994.

CARVALHO, B. **Arquitetura no Tempo e no Espaço**. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1968.

CARVALHO, J. V. **Aproveitamento de resíduos particulados da madeira de eucalipto *grandis* na fabricação de compósitos à base de cimento Portland**.

2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, 2000.

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, THABA – Programa Tecnologias da Habitação. **Manual de construção com solo-cimento**. São Paulo: ABCP, 1984.

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. **Cartilha para construção de paredes monolíticas de solo-cimento**. Rio de Janeiro: BNH/DEPEA, 1985.

CIWMB - California Integrated Waste Management Board. **Real goods trading corp. Builds a really good showroom for trend-setting eco-design**. California, 1996.

CIWMB - California Integrated Waste Management Board. **Urban wood waste**. California, 1998.

CIWMB - California Integrated Waste Management Board. **Wood waste: how to keep wood waste out of landfills**. California, 2002.

CRATERRE-EAG – International Centre for Earth Construction - School of Architecture of Grenoble. **The Basics of Compressed Earth Blocks**. Eschborn: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE in Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1991.

DANTAS Filho, F.P. **Contribuição ao estudo para aplicação do pó de serra da madeira em elementos de alvenaria de concreto não estrutural**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 213/94: Solos – Determinação do teor de umidade**. DNER, 1994.

DOT, P. et al. **Building with earth**. New Delhi: Rakmo Press, 1991.

ECOCENTRO IPEC – Instituto de Permacultura e Ecovilas do Cerrado. [Secagem de tijolos de adobe]. [200?]. 1 fotografia. Disponível em: <<http://www.ecocentro.org>>. Acesso em 01 jun. 2009.

ECOCENTRO IPEC – Instituto de Permacultura e Ecovilas do Cerrado. [Parede em taipa de pilão]. [200?]. 1 fotografia. Disponível em: <<http://www.ecocentro.org>>. Acesso em 01 jun. 2009.

EIJK, D. V. **Restauro de taipa de pilão – Aspectos de materiais, técnicas construtivas, patologias e restauração**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Niterói: Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal Fluminense, 2005.

EPA - United States Environmental Agency. **Building savings: Strategies for waste reduction of construction and demolition debris from buildings**. 2000.

FERREIRA, O. P. (coord.). **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA: SindusCon-SP, 2003.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2005.

FORSTIE, D. A., SCHNORMEIER, R. Development and use of 4 by 8 inch concrete cylinders in Arizona. **Concrete International**. v. 3, no. 7, July 1981.

GOMES, M. A. **Caracterização de argamassas tradicionais utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Lisboa: Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 1995.

GOUVEIA, F. N. **OSB – Alternativa para uso estrutural**. 2001. Fonte: [www.remade.com.br](http://www.remade.com.br). Acesso em: 15 dez. 2005.

FUNTAC – Fundação de Tecnologia do Estado do Acre. **Cartilha para Produção de Tijolo Solo-cimento**. Rio Branco: FUNTAC, 1999.

HORVATH, A. **Construction materials and the environmental. Annual Review of Environment and Resources**. California, 2004

Houben, H., Boubekeur, S. **Compressed Earth Blocks: Standards**. CRATerre-EAG – International Centre for Earth Construction - School of Architecture of Grenoble and CDI – Center for the Development of Industry, 1998.

LIMA, F. B., BARBOSA, A. H. Influência do tamanho e do tipo do corpo-de-prova na resistência à compressão do concreto. **Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON**. Belo Horizonte, 2002.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento Reforçado com Bambu: Características Físico-mecânicas**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, 2002.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Curitiba: Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, 2005.

MERRIL, A. F. **Casas de Tierra Apisonada y Suelo-cemento**. Buenos Aires: Editorial Windsor, 1949.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Editora Pini, 1994.

MIRANDA, D. E. O. et al. Confecção de Solo-Cimento Plástico com Resíduo de Construção para uso em Obras de Pequeno Porte. **2º Workshop Concreto: Durabilidade, Qualidade e Novas Tecnologias**. Ilha Solteira, 2006.

OLARTE, L. J., GUZMAN, E. **Manual de edificación con tierra armada. Diseño, cálculo y construcción con el sistema CET**. Madrid: Comunidad de Madrid, 1993.

OLIVEIRA, L. B. Introdução ao Estudo de Adobe: Construção de Alvenaria. **P@ranoá Periódico Eletrônico de Arquitetura e Urbanismo**: Revista da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UnB, Brasília, vol. 7, 2005. Disponível em: <<http://www.unb.br/fau/>>. Acesso em 18 jan. 2008.

PATNAIK A. K., PATNAIKUNI, I. Correlation of strength of 75 mm diameter and 100mm diameter cylinders for high strength concrete. **Cement and Concrete Research**. v.32, p.607–613, 2002.

PAOLIELLO, C., CARRASCO, E. V. M. **O potencial plástico da madeira laminada colada**. CDROM. Belo Horizonte: UFMG, 1999.

PIMENTEL, L.L. **Telhas onduladas à base de cimento portland e resíduos de *Pinus caribaea***. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000.

PINTO, T. P. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP**. São Paulo: SindusCon-SP, 2005.

POÇO, R. C. E. Solo-cimento na Habitação Popular Normatização Brasileira. **Workshop Arquitetura de Terra** (Anais). São Paulo, 1995.

SALES, R. B. C. **Estudo de Compostos de Cimento Portland Utilizando o Ensaio de Frequência Ressonante Forçada e Termografia**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Belo Horizonte: Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

SCANDIUZZI, L., ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**. São Paulo: Pini, 1986.

SINDUSCON-MG – Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais. **Alternativas para destinação de resíduos da Construção Civil**. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2006.

SILVA, G. C. et al. Produção do compósito madeira e casca de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake e cimento Portland. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, ago. 2005. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/>>. Acesso em 10 dez. 2008.

SILVA, S. R. **Tijolos de Solo-cimento Reforçado com Serragem de Madeira**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Belo Horizonte: Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

SPOSTO, R.M. Os resíduos da construção: Problema ou solução? **Revista Espaço Acadêmico**. No 61, ano VI, Junho de 2006.

STUNGO, N. **Wood: New directions in design and architecture**. San Francisco: Chronicle Books LLC, 2001. 240 p.

SZÜCS, C. A. Aplicação da Madeira Laminada Colada – MLC em elementos construtivos. **Revista da Madeira**. No 71, Maio de 2003. Fonte: [www.remade.com.br](http://www.remade.com.br). Acesso em: 05 jan. 2006.

SZÜCS, C. A. **UFSC investe na ampliação do uso da madeira de reflorestamento**. Agência de comunicação da UFSC. 2003. Fonte: <http://www.agecom.ufsc.br/index.php?secao=arq&id=1717>. Acesso em: 05 jan. 2006.

REVISTA DA MADEIRA, **Painéis de cimento-madeira: características e aplicações**. nº 71, ano 12, maio de 2003. Fonte: [www.remade.com.br](http://www.remade.com.br). Acesso em: 05 jan. 2006.

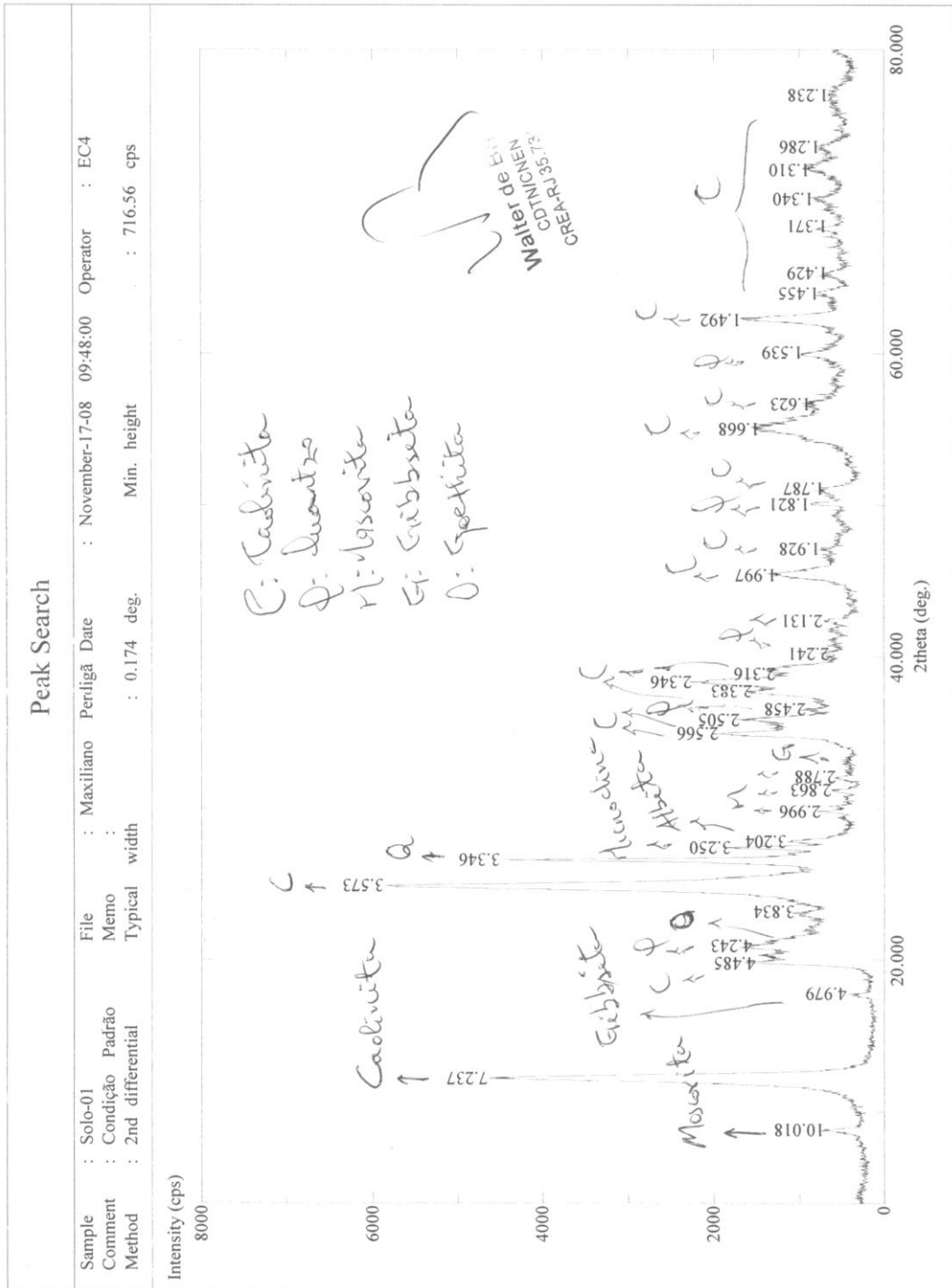
TEIXEIRA, M. G. **Aplicação dos Conceitos da Ecologia Industrial para a Produção de Materiais Ecológicos: O Exemplo do Resíduo de Madeira.** 2005. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo). Salvador: Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia, 2005.

UNIÃO EUROPÉIA. **Projecto WAMBUCO - Manual Europeu de Resíduos da Construção Civil.** V.3. 2002.

WEIMER, G. **Arquitetura Popular Brasileira.** São Paulo: Martins Fontes, 2005.

## **APÊNDICES**

APÊNDICE A – Difratomogramas de raios-X da amostra de solo UFMG





### Peak Search

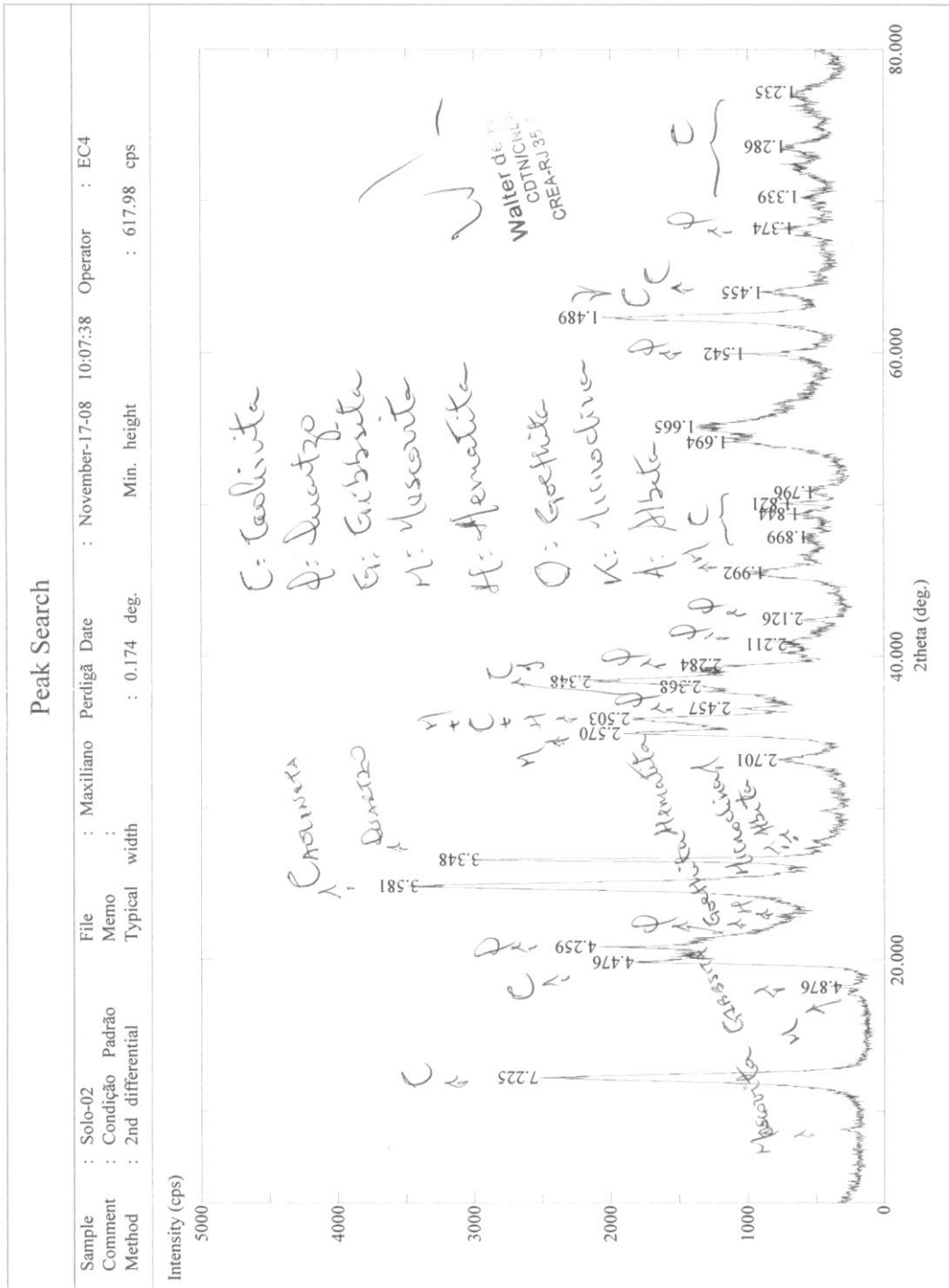
Sample : Solo-01 File : Maxiliano Pertigã Date : November-17-08 09:48:00 Operator : EC4

Comment : Condição Padrão Memo :  
Method : 2nd differential Typical width : 0.174 deg. Peak no. : 716.56 cps

Peak no.	2theta	Flex	Width	d-value	Intensity	I/Io	Peak no.	Min. height	Flex	Width	d-value	Intensity	I/Io
1	8.820	*****	*****	10.0176	690	12	31	65.260	*****	*****	1.4285	640	11
2	12.220	*****	*****	7.2369	4627	80	32	68.380	*****	*****	1.3708	643	11
3	17.800	*****	*****	4.9789	430	8	33	70.160	*****	*****	1.3403	807	14
4	19.780	*****	*****	4.4847	1500	26	34	72.060	*****	*****	1.3095	850	15
5	20.920	*****	*****	4.2428	1540	27	35	73.580	*****	*****	1.2862	730	13
6	23.180	*****	*****	3.8340	1040	18	36	76.980	*****	*****	1.2376	633	11
7	24.900	0.282	0.282	3.5729	5853	100							
8	26.620	0.188	0.188	3.3459	4487	77							
9	27.420	0.188	0.188	3.2500	1787	31							
10	27.820	0.212	0.212	3.2042	1137	20							
11	29.800	*****	*****	2.9957	737	13							
12	31.220	*****	*****	2.8626	607	11							
13	32.080	*****	*****	2.7878	553	10							
14	34.940	0.188	0.188	2.5658	1927	33							
15	35.820	0.118	0.118	2.5048	1680	29							
16	36.520	*****	*****	2.4584	907	16							
17	37.720	0.094	0.094	2.3829	1533	27							
18	38.340	0.094	0.094	2.3458	2237	39							
19	38.860	0.094	0.094	2.3156	1263	22							
20	40.200	*****	*****	2.2414	630	11							
21	42.380	*****	*****	2.1310	710	13							
22	45.380	0.094	0.094	1.9969	1250	22							
23	47.100	*****	*****	1.9279	737	13							
24	50.040	*****	*****	1.8213	857	15							
25	51.080	*****	*****	1.7866	687	12							
26	55.000	0.094	0.094	1.6682	1443	25							
27	56.660	*****	*****	1.6232	840	15							
28	60.060	*****	*****	1.5392	937	17							
29	62.180	0.094	0.094	1.4917	1657	29							
30	63.940	*****	*****	1.4548	743	13							

  
 Walter de  
 CDTN/CIN-  
 CREA-RJ 35

APÊNDICE B – Difratoformas de raios-X da amostra de solo OP



### Peak Search

Sample : Solo-02 File : Maxiliano Perdigã Date : November-17-08 10:07:38 Operator : EC4  
 Comment : Condição Padrão Memo :  
 Method : 2nd differential Typical width : 0.174 deg. Peak no. : 617.98 cps  
 Peak no. 2theta Flex Width d-value Intensity I/Io Min. height 2theta Flex Width d-value Intensity I/Io

Peak no.	2theta	Flex	Width	d-value	Intensity	I/Io	Peak no.	2theta	Flex	Width	d-value	Intensity	I/Io
1	12.240	*****		7.2251	2520	75							
2	18.180	*****		4.8756	303	9							
3	19.820	0.212		4.4757	1823	54							
4	20.840	0.118		4.2589	2097	62							
5	24.840	*****		3.5814	3397	100							
6	26.600	0.235		3.3483	2950	87							
7	33.140	*****		2.7010	777	23							
8	34.880	*****		2.5701	1917	57							
9	35.840	*****		2.5034	1850	55							
10	36.540	*****		2.4571	1117	33							
11	37.960	0.094		2.3684	1330	40							
12	38.300	0.094		2.3481	2130	63							
13	39.420	0.094		2.2839	1180	35							
14	40.780	*****		2.2109	707	21							
15	42.480	*****		2.1262	583	18							
16	45.500	*****		1.9919	867	26							
17	47.860	*****		1.8990	547	17							
18	49.380	*****		1.8441	610	18							
19	50.040	*****		1.8213	663	20							
20	50.800	*****		1.7958	497	15							
21	54.100	*****		1.6938	1133	34							
22	55.100	*****		1.6654	1367	41							
23	59.920	0.094		1.5424	1007	30							
24	62.300	0.118		1.4891	2067	61							
25	63.940	*****		1.4548	877	26							
26	68.180	*****		1.3743	650	20							
27	70.260	*****		1.3386	613	19							
28	73.580	*****		1.2862	710	21							
29	77.160	*****		1.2352	630	19							

  
 Walter de Brito  
 CDTN/ICNEN  
 CREA-RJ-35.731-J

## APÊNDICE C – Certificado de análise da difratometria de raios-X

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear  
CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CERTIFICADO DE ANÁLISE		NUMERO:	PÁGINA:
		EC4E0281 / 2008	1/2
CLIENTE / SOLICITANTE: Departamento de Engenharia dos Materiais e Construção Civil – DEMC / UFMG Maxiliano Perdigão Santos Telefones: (31)3498-4650 e (31)8834-4610 E-mail: maxperdigao@gmail.com		REFERÊNCIA / PROCEDÊNCIA: Carta de 10 de novembro de 2008 DEMC / UFMG	
MATERIAL RECEBIDO: 02 amostras de solo		SERVIÇO SOLICITADO: Identificação dos constituintes minerais	
MÉTODO ANALÍTICO: Difratometria de raios-X pelo método do pó			

### 1. RESULTADOS

Amostra	Mineral Identificado			
	Predominante (>50%)	Maior (<20%)	Menor (<10%)	Minoritária (<3%)
Solo – 01 Peso: 225 g	Caolinita	Quartzo	Microclina Moscovita	Albita Gibbsita Goethita
Solo – 02 Peso: 180 g	Caolinita	Quartzo	Albita Gibbsita Microclina Moscovita	Goethita Hematita

1.1. **Fórmulas químicas dos minerais identificados:** Albita:  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  – Caolinita:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  – Gibbsita:  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  – Goethita:  $\text{FeO} \cdot \text{OH}$  – Hematita:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – Microclina:  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  – Moscovita:  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$  – Quartzo:  $\text{SiO}_2$ .

1.2. **Difratogramas de raios-X das amostras analisadas:** anexados ao certificado de análise e devidamente interpretados.

### 2. OBSERVAÇÕES

2.1. **Especificação das amostras:** recebidas na condição de amostras analíticas, procedendo-se em nosso laboratório a preparação final e obtenção das respectivas alíquotas para análise. O peso de cada amostra encontra-se na tabela de resultados.

2.2. **Especificação da técnica e condições de análise:**

2.2.1. **Projeto:** estas análises fazem parte do projeto Aproveitamento de Resíduos de Madeira de Construção como Novo Material para Construção Civil. Dissertação de mestrado de Maxiliano Perdigão Santos – Departamento de Engenharia dos Materiais e Construção

#### EC4 – SERVIÇO DE TECNOLOGIA MINERAL – CDTN / CNEN

Rua Prof. Mário Wemeck, s/nº  
Cidade Universitária – Pampulha – C. Postal: 941  
30.123 – 970 – Belo Horizonte – MG – Brasil

Telefone: (31) 3069-3274  
Facsimile: (31) 3069-3399  
CNPJ: 00.402.552/0012-89 – Insc. Est.: Isento

E-mail: britow@cdtn.br  
E-mail: emorais@cdtn.br  
Site: www.cdtm.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE	NÚMERO	PÁGINA
	EC4E0281 / 2008	2/2

Civil ( DEMC / UFMG). Orientadora: Professora Dra. Maria Tereza Raulino Aquilar (DEMC / UFMG).

- 2.2.2. Técnica de análise utilizada:** difratometria de raios-X pelo método do pó, utilizando-se de um difratômetro de raios-X de fabricação Rigaku, modelo DMAX ÚLTIMA automático, com goniômetro  $\theta$ - $\theta$  e tudo de raios-X de cobre.
- 2.2.3. Condições de operação do difratômetro de raios-X:** fator de escala ( $8 \times 10^3$ ), constante de tempo (0,5 s), velocidade do registrador (40 mm/mim), velocidade do goniômetro ( $16^\circ 2\theta/\text{min}$ ), intensidade de corrente (30 mA) e tensão (40 KV).
- 2.2.4. Identificação das fases minerais:** obtida por comparação dos difratogramas de raios-X das amostras com o banco de dados da ICDD – International Center for Diffraction Data / Joint Committee on Powder Diffraction Standards – JCPDS (Sets 01 – 50; 2008).
- 2.2.5. Análises das fases minerais:** levaram em consideração as intensidades das principais reflexões e as comparações entre as mesmas, avaliando-se as quantidades relativas de seus teores.
- 2.3. Cláusulas de responsabilidade:**
- 2.3.1.** Os resultados obtidos referem-se somente às amostras submetidas à análise.
- 2.3.2.** Não se admite qualquer responsabilidade referente à exatidão da amostragem, a menos que esta tenha sido efetuada mediante nossa própria supervisão. Salvo menção expressa, as amostras foram livremente coletadas pelo solicitante.
- 2.3.3.** A reprodução deste certificado está autorizada em sua forma integral. A reprodução parcial só é permitida com autorização expressa do responsável técnico.
- 2.3.4.** As amostras deverão ser retiradas após 15 dias da data de emissão do certificado de análise. Após 30 dias da emissão do mesmo, o laboratório descartará as amostras não retiradas pelo cliente.
- 2.3.5.** No caso de publicações científicas, favor incluir o nome do executor e responsável técnico pelos serviços.

Belo Horizonte – MG, 20 de novembro de 2008.

Geólogo Walter de Brito  
CREA nº 12.585 / 1978  
Executor e Responsável Técnico

EC4 – SERVIÇO DE TECNOLOGIA MINERAL – CDTN / CNEN

Rua Prof. Mário Wemeck, s/nº  
Cidade Universitária – Pampulha – C. Postal: 941  
30.123 – 970 – Belo Horizonte – MG – Brasil

Telefone: (31) 3069-3274  
Facsimile: (31) 3069-3389  
CNPJ: 00.402.552/0012-89 – Insc. Est.: Isento

E-mail: britow@cdtn.br  
E-mail: emorais@cdtn.br  
Site: www.cdtm.br

## APÊNDICE D – Análise granulométrica por peneiramento dos solos UFMG e OP



### 1 - APRESENTAÇÃO

A Engesolo Engenharia Ltda, apresenta neste relatório LAB-LA003/69-RE-24-004/09-A os resultados dos ensaios geotécnicos de laboratório, executados com as amostras de solo coletadas e encaminhadas ao laboratório, conforme identificadas no quadro a seguir:

ESTUDO	ENSAIOS REALIZADOS
Solo UFMG	Granulometria por Peneiramento
Solo Ouro Preto	Granulometria por Peneiramento

### 2 - NATUREZA DOS SERVIÇOS SOLICITADOS

–Ensaio Geotécnicos:

- granulometria;

### 3 - SERVIÇOS EXECUTADOS

Os serviços ora apresentados totalizaram as seguintes quantidades:

- granulometria por peneiramento

02

### 4 - METODOLOGIA DOS ENSAIOS

A preparação das amostras e a execução dos ensaios foram efetuadas, de maneira geral, segundo os métodos da ABNT, a saber:

- ABNT – NBR 6457/86 Amostragem de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – método de ensaio;
- ABNT – NBR 7181/84 Solo – análise granulométrica – método de ensaio;

ENGESOLO ENGENHARIA LTDA.  
Rua Alcobaça, 1.210 - Bairro São Francisco - Tel. (31)2103-4300 - Fax (31)2103-4399  
E-mail: engesolo@engesolo.com.br - CEP: 31.255-210 Belo Horizonte-MG

## 5 - PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS

As sobras das amostras, ou seja, as partes das amostras que não foram utilizadas para a execução de ensaios, serão estocadas (guardadas) no laboratório, em local seguro e de fácil identificação, para eventuais necessidades de repetição de ensaios e mesmo execução de novos ensaios, até o 30º dia após a data da entrega do relatório/resultado e serão descartadas caso não haja manifestação do Cliente.

## 6 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Segue, em anexo:

– Quadro resumo contendo os resultados dos ensaios.

Belo Horizonte, 28 de janeiro de 2009



ENGESOLO ENGENHARIA LTDA  
Engº. Benjamin José da Silva

**QUADRO RESUMO  
CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO**

REG.: 0019 /0020

FURO/ AMOSTRA Nº	ESTACA Nº	PROFUNDIDADE DE .....ATÉ m	L.L %	I.P %	GRANULOMETRIA - % QUE PASSA										IG	T.R.B h nat %	COMPACTAÇÃO		EXP. %	I.S.C. %	δ g/cm³		
					# 2"	# 1 1/2"	# 1"	# 3/4"	# 3/8"	# 4	# 10	# 16	# 30	# 40			# 50	# 100				# 200	h
					Solo UFMG																		
Am. 01					100	99	97	83	74	67	55	48											
CLAS. CAMPO :		CLASSIF. LAB. :																		PROCTOR			

FURO/ AMOSTRA Nº	ESTACA Nº	PROFUNDIDADE DE .....ATÉ m	L.L %	I.P %	GRANULOMETRIA - % QUE PASSA										IG	T.R.B h nat %	COMPACTAÇÃO		EXP. %	I.S.C. %	δ g/cm³		
					# 2"	# 1 1/2"	# 1"	# 3/4"	# 3/8"	# 4	# 10	# 16	# 30	# 40			# 50	# 100				# 200	h
					Solo Ouro Preto																		
Am. 01					100	99	97	84	75	68	56	49											
CLAS. CAMPO :		CLASSIF. LAB. :																		PROCTOR			

PROJETO : Estudo para o Relatório do Curso de Mestrado

SUB-TRECHO : ESTUDO :

TRECHO :

DATA : 28/01/09

VISTO : 

FOLHA No. 01/01  
OBS.: \* hot. - γ smáx.



# APÊNDICE E – Análise granulométrica conjunta do solo UFMG

 <b>UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS</b> ESCOLA DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E GEOTECNIA		UFMG LABORATORIO DE GEOTECNIA ESCOLA DE ENGENHARIA
<b>Análise Granulométrica</b>		
IT - 008		Amostra nº: 1
		Início do Ensaio: 19/2/2009
		Término do Ensaio: 20/2/2009

Amostra Total		Teor de Umidade				
		1	2	3	4	5
M <sub>t</sub>	(g)					
M <sub>g</sub>	(g)	308	340	4	301	41
M <sub>is</sub>	(g)	69,50				
M <sub>cs+sw</sub> (g) 72,11 84,68 82,07 66,98 67,47						
M <sub>cs</sub> (g) 69,91 69,78 82,07 66,98 67,47						
M <sub>c</sub> (g) 16,56 11,30 18,90 11,91 19,17						
M <sub>s</sub> (g) 53,35 58,48 63,17 55,07 48,30						
M <sub>w</sub> (g) 2,20 2,41 2,61 2,33 2,03						
w (para compor a média) (%) 4,1% 4,1% 4,1% 4,2% 4,2%						
Utilizar valor na média (s/n) S S S S S						
w (para compor a média) (%) 4,1% 4,1% 4,1% 4,2% 4,2%						
w <sub>médio</sub> (%) 4,1%						

Dados p/ Sedimentação	
Densímetro Nº	
45	
Vol do densímetro	cm <sup>3</sup>
55,00	
Área proveta (A)	cm <sup>2</sup>
30,28	
V/(2xA)	(cm)
0,91	
P <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )
2,70	

Peneiramento Grosso			
# abertura (mm)	M <sub>si,ret</sub> (g)	M <sub>si,ret,acum</sub> (g)	Pg (%)
50,0	0,00	0,00	100,00%
38,0	0,00	0,00	100,00%
25,0	0,00	0,00	100,00%
19,0	0,00	0,00	100,00%
9,5	0,00	0,00	100,00%
4,8	0,00	0,00	100,00%
2,0	9,26	9,26	99,04%
Prato	1,04		

Peneiramento Fino			
# abertura (mm)	M <sub>si,ret</sub> (g)	M <sub>si,ret,acum</sub> (g)	Pf (%)
1,200	0,72	0,72	97,98%
0,600	7,60	8,32	86,79%
0,420	5,17	13,49	79,17%
0,300	5,17	18,66	71,56%
0,150	8,57	27,23	58,93%
Prato	0,20	32,60	51,02%

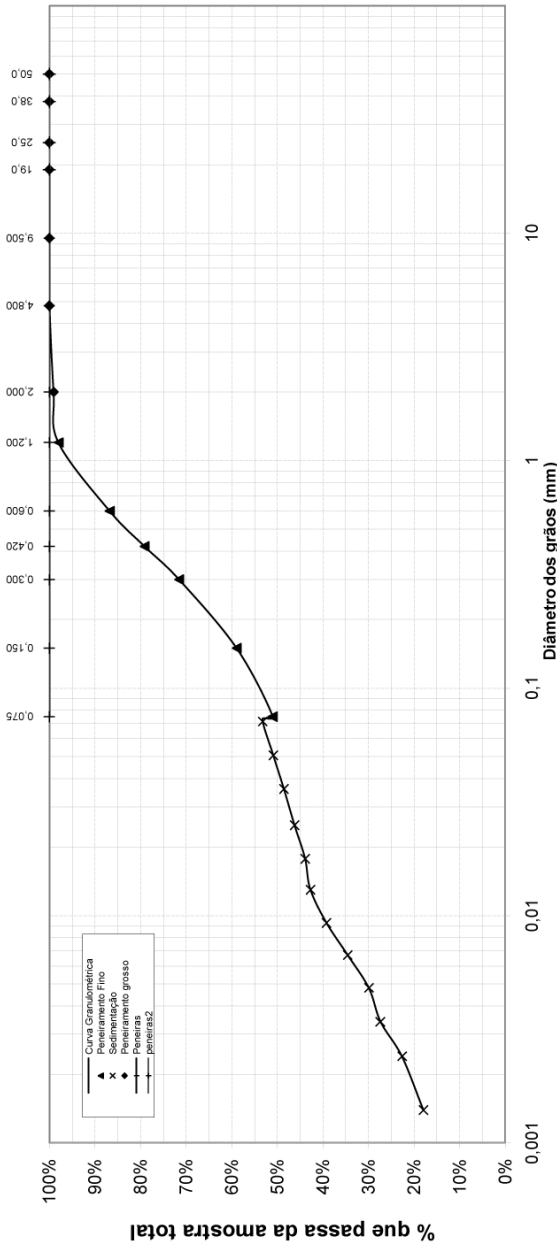
  

Sedimentação												
Data (dd/mm/aa)	Hora (hh:mm:ss)	Δt (s)	L <sub>i</sub> (cm)	Temperatura (°C)	R	L <sub>c</sub>	P <sub>w</sub> = P <sub>disp</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	μ <sub>w</sub> 10 <sup>-3</sup> (kg.s/cm <sup>2</sup> )	Z (cm)	Z <sub>c</sub> (cm)	d (mm)	P <sub>sed</sub> (%)
19/2/2009	8:52:30	30	25,0	25,5	-2,2	22,80	0,9969	9,03	15,9	15,9	0,0711	53,24%
19/2/2009	8:53:00	60	24,0	25,5	-2,2	21,80	0,9969	9,03	16,2	16,2	0,0508	50,90%
19/2/2009	8:54:00	120	23,0	25,5	-2,2	20,80	0,9969	9,03	16,4	16,4	0,0361	48,57%
19/2/2009	8:56:00	240	22,0	25,5	-2,2	19,80	0,9969	9,03	16,6	15,7	0,0250	46,23%
19/2/2009	9:00:00	480	21,0	25,5	-2,2	18,80	0,9969	9,03	16,8	15,9	0,0178	43,90%
19/2/2009	9:07:00	900	20,5	25,5	-2,2	18,30	0,9969	9,03	16,9	16,0	0,0130	42,73%
19/2/2009	9:22:00	1800	19,0	25,5	-2,2	16,80	0,9969	9,03	17,2	16,3	0,0093	39,23%
19/2/2009	9:52:00	3600	17,0	25,5	-2,2	14,80	0,9969	9,03	17,6	16,7	0,0067	34,56%
19/2/2009	10:52:00	7200	15,0	25,3	-2,2	12,80	0,9970	9,07	18,0	17,1	0,0048	29,89%
19/2/2009	12:52:00	14400	14,0	25,0	-2,3	11,70	0,9971	9,13	18,2	17,3	0,0034	27,32%
19/2/2009	16:52:00	28800	12,0	25,0	-2,3	9,70	0,9971	9,13	18,6	17,7	0,0024	22,65%
20/2/2009	8:52:00	86400	10,0	25,0	-2,3	7,70	0,9971	9,13	19,0	18,1	0,0014	17,98%

Método de secagem da amostra: ao ar		Defloculante: Hexametáflato	Operador: Ezequiel
-------------------------------------	--	-----------------------------	--------------------

Obs:



ABNT		ASTM		ASTM		Diametros Equivalentes (mm)	
Pedregulho (d > 2,0 mm):	2,0%	Pedregulho (d > 4,8 mm):				D <sub>10</sub> =	D <sub>90</sub> =
Areia (0,06 < d < 2,0 mm):	46,0%	Areia (0,075 < d < 4,8 mm):				D <sub>15</sub> =	D <sub>60</sub> =
Silte (0,002 < d < 0,06 mm):	31,0%	Silte (0,002 < d < 0,075 mm):				D <sub>30</sub> =	D <sub>85</sub> =
Argila (d < 0,002 mm):	21,0%	Argila (d < 0,002 mm):					
Classificação:	Areia silty	Classificação:					
Obs:		Armostra UFMG		Início do Ensaio: 19/2/2009		Operador: Ezequiel R. Dias	
				Término do Ensaio: 20/2/2009		Armostra n.º: 2	

## APÊNDICE F – Massa específica dos grãos



**UFMG**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA

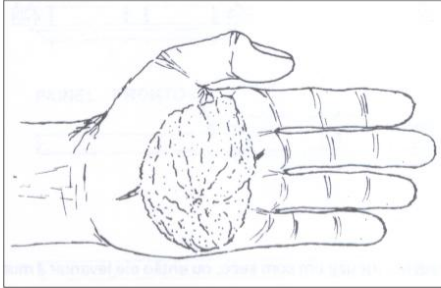
UFMG  
LABORATÓRIO DE GEOTECNIA  
ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E GEOTECNIA

<b>Massa Específica dos Grãos</b>			Amostra nº: UFMG		
<b>IT - 002</b>			Início do Ensaio: 26/2/09		
			Término do Ensaio: 27/2/09		
Determinação nº	1	2	3	4	5
Picnômetro nº	7	15	17	21	27
$M_{pic+s+w} = M_2$ (g)	726,98	700,69	721,78	684,30	694,54
Temperatura - T (°C)	29,5	29,5	30,0	30,0	29,6
$M_{pic+w}$ a T°C = $M_1$ (g)	695,53	669,10	690,30	652,78	663,17
$\rho_w$ a T°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,9958	0,9958	0,9957	0,9957	0,9958
$M_s$ (g)	49,85	49,85	49,85	49,85	49,85
w (%)	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
$M_w$ (g)	45,18	45,19	45,19	45,19	45,19
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	2,72	2,70	2,71	2,69
Utilizar valor na média (s/n)	s	s	s	s	s
$\rho_s$ (para compor a média) (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	2,72	2,70	2,71	2,69
$\rho_s$ (médio) (g/cm <sup>3</sup> )	2,70				
Teor de umidade do material					
Determinação N°	1	2	3	4	5
Cápsula N°	508	108	4	547	148
$M_{c+s+w}$ (g)	21,36	20,84	16,17	23,47	14,46
$M_{c+s}$ (g)	19,95	19,27	15,08	21,80	13,48
$M_c$ (g)	6,23	4,32	4,31	5,57	4,15
$M_s$ (g)	13,72	14,95	10,77	16,23	9,33
$M_w$ (g)	1,41	1,57	1,09	1,67	0,98
w (%)	10,3%	10,5%	10,1%	10,3%	10,5%
Utilizar valor na média (s/n)	s	s	s	s	s
w (para compor a média) (%)	10,3%	10,5%	10,1%	10,3%	10,5%
$w_{médio}$ (%)	10,3%				
Observações					
. Considerar os ensaios satisfatórios quando os seus resultados não diferirem mais que 0,02 g/cm <sup>3</sup> . . O resultado final é a média obtida de pelo menos dois ensaios considerados satisfatórios . Deve ser expresso com três algarismos significativos em g/cm <sup>3</sup> . . A massa de solo seco é obtida; - Antes Calculada com M e w, antes do ensaio. - Depois Obtida após a secagem do material do picnômetro no final do ensaio.			$\rho_s = \frac{M_s}{M_1 - M_2 + M_s} \times \rho_w$ $M_s = \frac{M_w \times 100}{(100 + w)}$		
			Operador:		

## **ANEXOS**

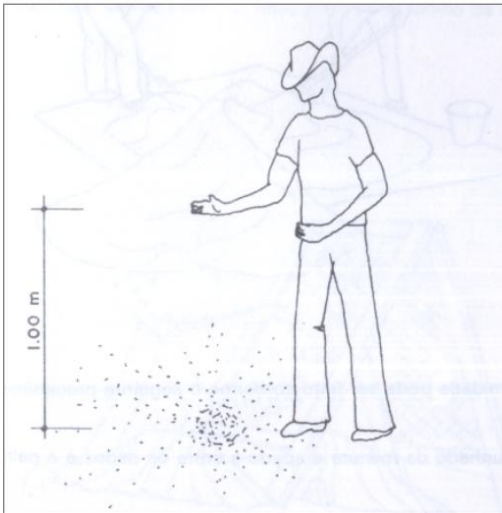
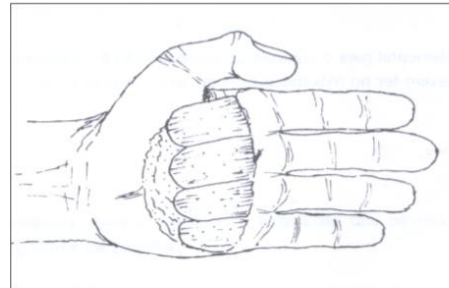
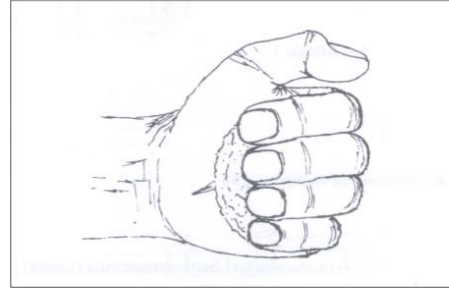
## ANEXO A – Ensaio expedito do bolo de solo



Tome um punhado de solo da mistura e aperte-a entre os dedos e a palma da mão.

Ao abrir a mão, o bolo deve ter a a marca deixada pelos dedos.

Se isso não ocorrer, é porque a mistura está muito seca. Neste caso, adicione água até que a marca deixada pelos dedos fique perfeita. Ao abrir a mão, o bolo deve ter a a marca deixada pelos



Em seguida, deixe o bolo cair de uma altura de mais ou menos 1 metro, sobre uma superfície dura. O bolo deve esfarelar-se ao chocar na superfície. Se isso não ocorrer, a mistura está muito úmida. Neste caso, espere secar, ou adicione mais solo e cimento nas mesmas proporções, e repita os testes até conseguir a umidade ideal.

Fonte: CEPED (1985) - modificado