

**EDUARDO DA SILVA PINTO**

**SOLO-CIMENTO COMPACTADO: PROPOSTA DE  
MÉTODOS DE ENSAIO PARA DOSAGEM E  
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA**

Bauru  
2016



EDUARDO DA SILVA PINTO

# SOLO-CIMENTO COMPACTADO: PROPOSTA DE MÉTODOS DE ENSAIO PARA DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", câmpus de Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Obede Borges Faria.

Bauru  
2016

Pinto, Eduardo da Silva.

Solo-cimento compactado: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica / Eduardo da Silva Pinto, 2016

207 p.

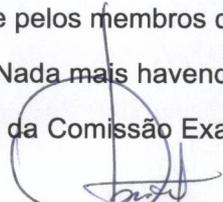
Orientador: Obede Borges Faria

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Bauru, 2016

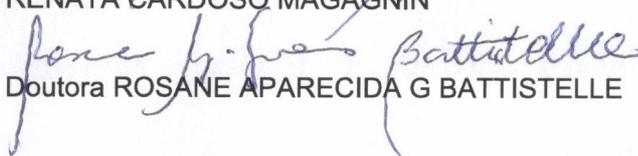
1. Arquitetura e construção com terra. 2. Solo-cimento. 3. Caracterização física e mecânica. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE EDUARDO DA SILVA PINTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, DA FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES E COMUNICAÇÃO.**

Aos 16 dias do mês de setembro do ano de 2016, às 10:00 horas, no(a) Auditório da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura Artes e Comunicação, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. OBEDE BORGES FARIA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru, Profa. Dra. RENATA CARDOSO MAGAGNIN do(a) Departamento de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo / Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação de Bauru - UNESP, Professora Doutora ROSANE APARECIDA G BATTISTELLE do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru/UNESP - Campus Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de EDUARDO DA SILVA PINTO, intitulada **SOLO-CIMENTO COMPACTADO: PROPOSTA DE MÉTODOS DE ENSAIO PARA DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. OBEDE BORGES FARIA

  
Profa. Dra. RENATA CARDOSO MAGAGNIN

  
Professora Doutora ROSANE APARECIDA G BATTISTELLE



## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais, familiares e amigos, que me deram força e apoio incondicional, tornando possível a sua realização.



## Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, pela ótima educação que me deram, sempre fazendo o máximo que podiam, culminando na realização dessa pós-graduação.

Ao meu orientador, *Professor Doutor Obede Borges Faria*, pela atenção e carinho, tanto nas aulas como nas orientações e por estar sempre presente em todas as etapas do trabalho, inclusive na realização de ensaios nos feriados de natal e ano novo.

A minha amiga e grande incentivadora, *Professora Doutora Paula Valéria Coiado Chamma*, por me orientar tanto na iniciação científica quanto no trabalho final de graduação, e também por sempre me apoiar a seguir em frente, motivando meu início no mestrado.

A todos os outros docentes do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, que contribuíram para minha formação acadêmica e que, indiretamente, tornaram possível a realização deste trabalho.

Aos técnicos dos Laboratórios de Construção Civil e de Mecânica dos Solos do DEC/FEB/UNESP *Israel Luiz P. dos Santos* e *Gustavo Pinheiro*, pelo apoio com os ensaios de laboratório.

Ao técnico do Laboratório de Usinagem do DEM/FEB/UNESP *Helio Aparecido de Souza*, pelo apoio na produção dos moldes para desenvolvimento dos moldes metálicos.

Ao *Professor Doutor Roger Augusto Rodrigues*, pela orientação e auxílio na interpretação dos resultados dos ensaios com o solo, sempre muito atencioso.

A minha namorada e amigos, pelo companheirismo e compreensão durante esta jornada. Entre várias outras pessoas que, de alguma forma, fizeram parte deste trabalho. Agradeço a todos.



## RESUMO

PINTO, E. da S. **Solo-cimento compactado: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica**. 2016, 207 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2016.

No presente trabalho são propostos métodos de ensaio para caracterização física e mecânica de solo-cimento compactado. Para que esse objetivo seja alcançado, é proposto um novo modelo de molde, para produção de corpos de prova, tornando os ensaios mais práticos e confiáveis, com intuito de incentivar o uso de técnicas de construção civil que gerem menos impactos ambientais negativos. Além disso, através dos resultados obtidos, pretendeu-se produzir subsídios para futuras discussões com outros pesquisadores, com intuito de que seja feita uma revisão das normas brasileiras de solo-cimento, junto a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os resultados obtidos através dos ensaios realizados com o novo molde são promissores no que diz respeito a facilitar o processo de caracterização física e mecânica do material, mantendo um nível de confiabilidade compatível com o obtido através da metodologia atual.

**Palavras-chave:** Arquitetura e construção com terra, taipa, solo-cimento, caracterização física e mecânica



## ABSTRACT

PINTO, E. da S. **Compacted soil-cement: proposal of test methods for dosage and physical and mechanical characterization.** 2016, 207 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2016.

In this research we propose a new methodology for testing physical and mechanical characterization of rammed earth stabilized with cement. For this objective to be achieved, it proposes a new mold for the production of test specimens, making it more practical and reliable, aiming to encourage the use of construction techniques that generate less negative environmental impacts. In addition, through the results obtained, we intend to generate a basis for future discussions with other researchers, with an objective to a revision of Brazilian soil-cement standards, with the Brazilian Association of Technical Standards - ABNT. Results obtained from the tests performed with the new mold are promising with regard to facilitate the process of physical and mechanical characterization of the material while maintaining a reliability level consistent with that obtained over the current methodology.

**Palavras-chave:** Earthen architecture and construction, rammed earth, soil-cement, physical and mechanical characterization



# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| Capitulo 1 <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>19</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA .....  | 22        |
| 1.2 OBJETIVOS .....  | 25        |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....   | 26        |
| <br>   |           |
| Capitulo 2 <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | <b>27</b> |
| 2.1 O SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO .....   | 29        |
| 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS .....  | 31        |
| 2.3 BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA .....   | 38        |
| 2.4 TAIPA, OU TAIPA DE PILÃO .....   | 41        |
| 2.5 SOLO-CIMENTO .....   | 46        |
| 2.6 NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS SOBRE SOLO CIMENTO .....   | 47        |
| 2.6.1 ABNT NBR 8491:2012 - Tijolo de solo-cimento - Requisitos<br>(ABNT, 2012) .....   | 48        |
| 2.6.2 ABNT NBR 8492:2012 - Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional,<br>determinação da resistência à compressão e da absorção de água -<br>Método de ensaio (ABNT, 2012) .....                          | 48        |
| 2.6.3 ABNT NBR 10833:2012 - Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento<br>com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento (ABNT,<br>2012) .....   | 49        |
| 2.6.4 ABNT NBR 10834:2012 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural<br>- Requisitos (ABNT, 2012) .....   | 49        |
| 2.6.5 ABNT NBR 10836:2013 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural<br>- Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da<br>absorção de água - Método de ensaio<br>(ABNT, 2013) ..... | 50        |
| 2.6.6 ABNT NBR 11798:2012 - Materiais para base de solo-cimento -<br>Requisitos (ABNT, 2012) .....   | 50        |
| 2.6.7 ABNT NBR 12023:2012 - Solo-cimento - Ensaio de compactação<br>(ABNT, 2012) .....   | 50        |
| 2.6.8 ABNT NBR 12024:2012 - Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos<br>de prova cilíndricos - Procedimento (ABNT, 2012) .....   | 51        |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 2.6.9   | ABNT NBR 12025:2012 - Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio (ABNT, 2012) .....  | 52        |
| 2.6.10  | ABNT NBR 12253:2012 - Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento (ABNT, 2012) .....                    | 53        |
| 2.6.11  | ABNT NBR 13553:2012 - Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos (ABNT, 2012) ..... | 53        |
| 2.6.12  | ABNT NBR 13554:2012 - Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método de ensaio (ABNT, 2012) .....                | 54        |
| 2.6.13  | ABNT NBR 13555:2012 - Solo-cimento - Determinação da absorção de água- Método de ensaio (ABNT, 2012) .....                              | 55        |
| 2.6.14  | ABNT NBR 16096:2012 - Solo-cimento - Determinação do grau de pulverização- Método de ensaio (ABNT, 2012) .....                          | 55        |
| <b>Capitulo 3 ESTRATÉGIA METODOLÓGICA .....</b> |   | <b>57</b> |
| 3.1   | <b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CIMENTO .....</b>  | <b>59</b> |
| 3.1.1   | Determinação da massa específica do cimento ( $\gamma_c$ ) .....  | 59        |
| 3.1.2   | Massa unitária do cimento solto ( $\rho_{c,s}$ ) .....  | 60        |
| 3.1.3   | Determinação da pasta de consistência normal, do fator água-cimento (A/C) e do tempo de início de pega do cimento .....                 | 60        |
| 3.1.4   | Determinação da resistência à compressão do cimento ( $f_c$ ) .....   | 62        |
| 3.2   | <b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO .....</b>  | <b>63</b> |
| 3.2.1   | Determinação da curva de distribuição granulométrica .....  | 64        |
| 3.2.2   | Determinação dos índices de consistência (LL, LP e IP) .....  | 64        |
| 3.2.3   | Determinação de impurezas orgânicas .....   | 64        |
| 3.2.4   | Análise mineralógica .....  | 65        |
| 3.2.5   | Ensaio de determinação da massa unitária do solo solto e seco ao ar ( $\rho_{ssU}$ ) .....  | 65        |
| 3.2.6   | Ensaio de determinação da umidade higroscópica do solo seco ao ar ( $W_h$ ) .....   | 66        |
| 3.2.7   | Ensaio de compactação - umidade ótima ( $W_{ót}$ ) e massa específica seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ) .....                              | 67        |
| 3.2.8   | Proposta de alteração do ensaio de compactação (novo CP) .....  | 69        |
| 3.2.9   | Avaliação da variação de massa específica entre as camadas do corpo de prova de compactação .....                                       | 70        |
| 3.3   | <b>PROJETO E PRODUÇÃO DO MOLDE METÁLICO PARA OS CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO .....</b>   | <b>72</b> |
| 3.4   | <b>PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO .....</b>   | <b>73</b> |
| 3.4.1   | Planejamento dos experimentos .....   | 73        |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| 3.4.2   | Preparação do material .....   | 75         |
| 3.4.3   | Moldagem dos corpos de prova .....   | 75         |
| 3.4.4   | Cura dos corpos de prova .....   | 77         |
| 3.5   | <b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO SOLO-CIMENTO .....</b>  | <b>77</b>  |
| 3.5.1   | Ensaio de determinação da absorção de água (AA) e do índice de vazios (esc) do solo-cimento .....        | 78         |
| 3.5.2   | Ensaio de determinação da resistência à compressão axial do solo-cimento (fc,sc) .....                   | 80         |
| 3.5.3   | Ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do solo-cimento (Ecsc) .....      | 80         |
| 3.5.4   | Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral (ft,D sc) do solo-cimento .....  | 84         |
| 3.6   | <b>FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>   | <b>86</b>  |
| <br><b>Capitulo 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b> |  | <b>89</b>  |
| 4.1   | <b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CIMENTO .....</b>   | <b>91</b>  |
| 4.1.1   | Massa específica do cimento ( $\gamma_c$ ) .....   | 91         |
| 4.1.2   | Massa unitária do cimento solto ( $\rho_{c,s}$ ) .....   | 92         |
| 4.1.3   | Pasta de consistência normal, fator água-cimento (A/C) e tempo de início de pega do cimento .....        | 92         |
| 4.1.4   | Resistência à compressão do cimento (fc) .....   | 92         |
| 4.2   | <b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO .....</b>   | <b>93</b>  |
| 4.2.1   | Curva de distribuição granulométrica .....   | 93         |
| 4.2.2   | Índices de consistência (LL, LP e IP) .....  | 95         |
| 4.2.3   | Impurezas orgânicas .....  | 96         |
| 4.2.4   | Análise mineralógica .....   | 98         |
| 4.2.5   | Massa unitária do solo solto e seco ao ar ( $\rho_{ssU}$ ) .....   | 98         |
| 4.2.6   | Umidade higroscópica do solo seco ao ar (Wh) .....   | 100        |
| 4.2.7   | Umidade ótima (Wót) e massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ) .....                     | 100        |
| 4.2.8   | Proposta de alteração do ensaio de compactação (novo CP) .....   | 101        |
| 4.2.9   | Avaliação da variação de massa específica entre as camadas do corpo de prova de compactação .....        | 103        |
| 4.2.10  | Avaliação geral das características do solo, de acordo com as normas brasileiras para solo-cimento ..... | 104        |
| 4.3   | <b>PROJETO E PRODUÇÃO DO MOLDE METÁLICO PARA OS CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO .....</b>                | <b>106</b> |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 4.3.1  | Projeto e produção de novo molde metálico para produção dos CP 5x10 .....   | 106        |
| 4.3.2  | Projeto e produção de dispositivo para ensaio de tração por compressão diametral de CP 5x10 e CP 10x12,7 .....                                | 108        |
| 4.4  | <b>PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO</b> .....   | 109        |
| 4.4.1  | Planejamento dos experimentos e preparação dos materiais .....  | 109        |
| 4.4.2  | Moldagem dos corpos de prova e avaliação de W e GC .....  | 109        |
| 4.4.3  | Cura dos corpos de prova .....  | 110        |
| 4.5  | <b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO SOLO-CIMENTO</b> .....   | 110        |
| 4.5.1  | Estudo de dosagem do solo-cimento .....   | 111        |
| 4.5.2  | Ensaio de determinação da absorção de água (AA) e do índice de vazios ( $e_{sc}$ ) do solo-cimento .....                                      | 113        |
| 4.5.3  | Ensaio de determinação da resistência à compressão axial do solo-cimento ( $f_{c,sc}$ ) .....   | 116        |
| 4.5.4  | Ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do solo-cimento ( $E_{csc}$ ) .....                                    | 118        |
| 4.5.5  | Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral ( $f_{t,Dsc}$ ) do solo-cimento .....                                 | 122        |
| <b>Capitulo 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> ..... |   | <b>129</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....      |   | <b>133</b> |
| <b>APÊNDICES</b> .....                       |   | <b>141</b> |
| APÊNDICE 1                                   | Script do ensaio de compressão axial dos corpos de prova de argamassa normal 5x10 (para caracterização do cimento) .....                      | 143        |
| APÊNDICE 2                                   | Planejamento dos experimentos .....   | 144        |
| APÊNDICE 3                                   | Script do ensaio de compressão axial dos corpos de prova de solo-cimento 5x10 .....   | 145        |
| APÊNDICE 4                                   | Script do ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão ( $E_{csc}$ ) dos corpos de prova de solo-cimento 5x10 ..... | 146        |
| APÊNDICE 5                                   | Requisitos do solo-cimento para atendimento de normas técnicas para solo-cimento e para elementos cerâmicos .....                             | 148        |
| APÊNDICE 6                                   | Script do ensaio de compressão axial dos corpos de prova de solo-cimento 10x12,7 .....  | 149        |
| APÊNDICE 7                                   | Script do ensaio de tração por compressão diametral dos corpos de prova de solo-cimento 5x10 .....  | 150        |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| APÊNDICE 8  | Script do ensaio de tração por compressão diametral dos corpos de prova de solo-cimento 10x12,7 .....                         | 151 |
| APÊNDICE 9  | Agenda de realização dos ensaios de dosagem do solo-cimento .....   | 152 |
| APÊNDICE 10 | Agenda de realização dos ensaios com o traço escolhido .....  | 153 |
| APÊNDICE 11 | Resultados dos ensaios de caracterização física do cimento .....  | 154 |
| APÊNDICE 12 | Relatório de ensaio de determinação da resistência à compressão do cimento .....  | 155 |
| APÊNDICE 13 | Resultados dos ensaios de determinação da curva de distribuição granulométrica do solo .....                                  | 156 |
| APÊNDICE 14 | Resultados dos ensaios de determinação da curva de distribuição granulométrica do solo .....                                  | 163 |
| APÊNDICE 15 | Resultados dos ensaios de determinação das massas unitárias, do cimento e do solo .....                                       | 165 |
| APÊNDICE 16 | Resultados dos ensaios de determinação da umidade higroscópica dos três lotes de solo .....                                   | 166 |
| APÊNDICE 17 | Resultados do ensaio de compactação do solo, de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986) .....                                | 167 |
| APÊNDICE 18 | Resultados do ensaio de compactação do solo, 6, 8 e 10 golpes .....   | 170 |
| APÊNDICE 19 | Projeto do molde para o corpo de prova CP5x10 .....   | 173 |
| APÊNDICE 20 | Classificação do solo, de acordo com Neves et al. (2010) e Lepsch (2011) .....  | 174 |
| APÊNDICE 21 | Sistema de classificação do solo H. R. B., de acordo com Caputo e Caputo (2015) e adaptado da norma D 3282 (ASTM, 2004) ..... | 175 |
| APÊNDICE 22 | Avaliação do teor de umidade dos CP do estudo de dosagem .....  | 176 |
| APÊNDICE 23 | Avaliação do grau de compactação (GC) dos CP do estudo de dosagem (1% a 6% de cimento) .....                                  | 178 |
| APÊNDICE 24 | Resultados dos ensaios de resistência à compressão, para o estudo de dosagem (1%, 3%, 6%, 10% e 15% de cimento) .....         | 182 |
| APÊNDICE 25 | Resultados dos ensaios de absorção de água e de determinação do índice de vazios e da porosidade .....                        | 187 |
| APÊNDICE 26 | Resultados do ensaio de determinação de $f_{c,est}$ , para 6% de cimento, com corpos de prova CP5x10 .....                    | 188 |
| APÊNDICE 27 | Resultados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade, com o gráfico de força x tempo .....                          | 190 |
| APÊNDICE 28 | Resultados do ensaio de determinação de $f_{tD,sc}$ , para 6% de cimento, com corpos de prova CP5x10 e CP10x12,7 .....        | 192 |

|                     |  |            |
|---------------------|--|------------|
| APÊNDICE 29         | Resultados do ensaio de avaliação da variação da massa específica aparente seca ao longo das camadas, com corpos de prova <b>CP 5x10</b> .....                                 | 194        |
| APÊNDICE 30         | Projeto da nova camisa para moldagem dos corpos de prova <b>CP 5x10</b> .....  | 195        |
| APÊNDICE 31         | Projeto do dispositivo para ensaio de compressão diametral .....   | 196        |
| APÊNDICE 32         | Resultados do ensaio de determinação de $f_{c,est}$ , para 6% de cimento, com corpos de prova <b>CP5x10</b> , produzidos com o <b>molde novo (inteiriço)</b> .....             | 198        |
| APÊNDICE 33         | Resultados dos ensaios na <b>2ª determinação</b> do módulo estático de elasticidade na compressão do solo cimento, para CP 5x10, com os gráficos de <b>força x tempo</b> ..... | 200        |
| APÊNDICE 34         | Resultados do ensaio da <b>2ª determinação</b> de $f_{TD,sc}$ , para 6% de cimento, com corpos de prova <b>CP 5x10</b> , produzidos com o <b>molde bipartido</b> .....         | 202        |
| <b>ANÉXOS</b> ..... |  | <b>205</b> |
| ANEXO A .....       |  | 207        |

---

**NOTA:** Toda informação, seja na forma de texto, ilustração ou tabela, à qual não foi dado crédito de autoria, é de autoria do próprio autor desta dissertação.

capítulo **1**

# INTRODUÇÃO



---

**A**o longo da história, a construção civil tem evoluído, e com ela, uma série de novas técnicas e materiais de construção vem surgindo. Entretanto, a partir do final do século XX, resultado da crise ambiental e energética pela qual o planeta começou a passar, parte população passou a se mostrar mais sensibilizada para as questões ambientais. Rogers e Gumuchdjan (2001) citam a crise global como estopim para uma constatação mundial de que o meio ambiente é um patrimônio frágil e limitado, e por isso, deve ser tratado com absoluto cuidado e responsabilidade.

Segundo Neves (2011), problemas ambientais causados pela ação do homem no processo de produção de bens de consumo, como também da produção do espaço urbano, tornam-se evidentes ao final do século XX, resultando na sensibilização da sociedade quanto a urgente necessidade de reverter este quadro. Na arquitetura e construção, os modelos e técnicas estabelecidas são colocados em cheque, fomentando discussões sobre materiais e técnicas alternativas, mais sustentáveis.

Nesse contexto de preocupação global com as consequências ambientais das ações humanas, antigas técnicas de construção menos impactantes, como o uso da terra crua (designação genérica dada aos materiais de construção produzidos com solo, porém, sem passar pelo processo de cozimento), vem ganhando força como alternativa ambiental e economicamente viável para a construção civil. Atualmente, o termo "terra crua" tem sido simplificado para apenas "terra" (NEVES, 2011, p.9).

Gomes, Brito e Lopes (2008) destacam que desde que o homem constrói cidades, há mais de dez mil anos, a terra tem sido uma das principais matérias-primas para produção de materiais de construção e que as técnicas de construção com terra vêm sendo conservadas, principalmente no meio rural, resultado de um conhecimento empírico passado de geração em geração. Por isso, enfatizam a necessidade de atualizar essas técnicas construtivas milenares aos dias de hoje, para que atendam aos mesmos parâmetros de qualidade atualmente exigidos a outras técnicas de construção.

Com base nesse objetivo, muitos estudos científicos foram e vem sendo desenvolvidos sobre as mais variadas técnicas de construção com terra. Por exemplo, consultando-se as informações, disponíveis em bases de dados brasileiras de dissertações de mestrado

e teses de doutorado, como a "Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações: conhecimento e reconhecimento – Pesquisa científica no Brasil" (IBICT, 2015), encontram-se mais de 100 publicações. Ampliando-se a pesquisa para bases de dados de periódicos indexados, também se encontram uma quantidade considerável de artigos científicos sobre o tema.

Dentre as características das técnicas de construção com terra, que as tornam de baixíssimo impacto ambiental negativo, podem ser citadas (FARIA, 2002):

- a) Produção local e em pequena escala, reduzindo gasto energético com transporte;
- b) Utilização de matéria prima local e abundante (grande variedade de tipos de solo);
- c) Reduzido consumo de energia para produção (por exemplo, o material não passa por processo de queima);
- d) Baixo nível de geração de resíduos da construção e demolição (o pouco resíduo gerado é fácil e rapidamente incorporado pela natureza);
- e) Elevado potencial de reciclagem.

Assim sendo, estes materiais atendem às principais premissas do desenvolvimento sustentável, uma das grandes preocupações da atualidade.

Em decorrência destes aspectos, aliados à facilidade da transferência de tecnologia e de programas de capacitação para a produção, estes materiais se tornam muito adequados à produção de habitações de interesse social, principalmente em regime de ajuda mútua.

Como apresentado, a utilização da terra como alternativa para a construção civil visa a atenuação dos problemas ambientais oriundos da construção de edificações, bem como proporcionar o acesso da população de baixa renda a moradias mais dignas.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

De acordo com Ciancio e Gibbings (2012), geralmente o controle de qualidade nas construções com solo-cimento compactado é insuficiente e inadequado. Neste trabalho, realizado com solo tipicamente utilizado na Austrália, os autores comprovaram esta afirmativa apresentando resultados de resistência à compressão obtidos em corpos de prova cilíndricos (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura) moldados em laboratório,

comparados com os obtidos em CP recortados de paredes existentes. Também estudaram a influência do tamanho do CP nos resultados, variando-se o diâmetro entre 50 e 150 mm, mantendo-se a relação entre altura (h) e diâmetro da seção transversal (d),  $h/d = 2,0$ . Não determinaram o módulo de elasticidade.

Lombillo et al. (2014) particularizam a ausência de literatura sobre ensaios minimamente destrutivos para construções com terra, muito importantes para o estudo de edifícios do patrimônio arquitetônico.

Existem normas brasileiras para estudo de solo-cimento compactado que, pela semelhança do material com a taipa, poderiam ser adotadas no presente trabalho. Estas normas estabelecem que sejam moldados corpos de prova (CP) cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 127,3 mm (resultando em volume de 1 litro), para os seguintes ensaios:

- a) Determinação da umidade ótima ( $W_{ót}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ), dados pela norma NBR 12023 (ABNT, 2012);
- b) Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos, pela norma NBR 12024 (ABNT, 2012);
- c) Compressão simples de corpos de prova cilíndricos, pela norma NBR 12025 (ABNT, 2012);
- d) Dosagem de solo-cimento, pela norma NBR 12253 (ABNT, 2012);
- e) Determinação da absorção de água, pela norma NBR 13555 (ABNT, 2012).

No entanto, estes CP se mostram inadequados por vários motivos; o primeiro deles é quanto à geometria. A relação entre a altura e o diâmetro da seção transversal,  $h/d$ , é de aproximadamente 1,27 e, de acordo com Beer e Johnston Jr. (2006) e Hamassaki e Santos (2013), não poderia ser inferior a 2, para que haja uma região central ao longo do CP na qual ocorra distribuição uniforme de tensões, já que quanto mais próximo das extremidades (regiões de aplicação da carga), menos uniformes são as tensões. Este princípio é obedecido pela norma brasileira para concreto, NBR 8522 (ABNT, 2008), que estabelece  $1,98 \leq h/d \leq 2,02$ .

Outro inconveniente da geometria destes corpos de prova é a grande quantidade de solo (cerca de 2 kg por CP) e de tempo, necessários para sua moldagem. Como é necessário

um grande volume de solo na moldagem de 6 CP, durante sua manipulação<sup>1</sup> é muito difícil o controle e manutenção da umidade ótima de compactação ( $W_{ót}$ ), porque pode haver grande perda de umidade, dependendo das condições do clima local. Com isso, raramente se atinge o grau de compactação (GC) exigido por norma ( $98\% \leq GC \leq 102\%$ ), como constatado por Faria et al. (2012), Faria et al. (2014) Faria et al. (2016).

As normas NBR 12024 (ABNT, 2012) e NBR 12025 (ABNT, 2012) não citam o número de CP que devem compor as amostras. A norma NBR 12253 (ABNT, 2012) recomenda um mínimo de 3 CP para determinação da resistência à compressão e a norma NBR 13555 (ABNT, 2012), mínimo de 2 CP para determinação da absorção de água. Do ponto de vista da estatística, estas amostras com número muito reduzido de CP não são significativas. Seria necessária uma amostra com pelo menos 7 CP, para o ensaio de determinação da resistência à compressão como, por exemplo, recomenda a norma NBR 8492 (ABNT, 2012) para tijolos de solo-cimento.

Além dessas deficiências, as normas brasileiras para solo-cimento não prevêem a determinação da resistência à tração, parâmetro importante para avaliação de desempenho estrutural do material.

Para contornar estes problemas, na presente dissertação foram propostos ensaios com corpos de prova de 50 mm de diâmetro e altura de 100 mm. Dessa forma, buscaram-se as seguintes vantagens:

- a)** Consumir menos solo para moldagem de cada CP;
- b)** Produzir um número maior de CP por amostra;
- c)** Obter um CP com geometria mais adequada, do ponto de vista da teoria da resistência dos materiais, com  $h/d = 2,00$ ;
- d)** Propor um método para determinação do módulo de elasticidade do material, adaptado da norma NBR 8522 (ABNT, 2008).

Buscar uma estratégia metodológica mais adequada para caracterização física e mecânica de taipa estabilizada com cimento, que também possa ser adotada para os blocos de terra comprimida (BTC), é uma forma de contribuição com a atualização

---

<sup>1</sup> Operação de mistura e homogeneização do solo (seco ao ar) com o cimento e, em seguida, acréscimo e mistura de água em quantidade suficiente para atingir a umidade ótima de compactação.

---

tecnológica de técnicas de construção com terra, que estrategicamente difundidas podem incentivar a adoção de práticas construtivas mais sustentáveis e ambientalmente menos impactantes.

## 1.2 OBJETIVOS

Tendo em vista o panorama apresentado anteriormente, o objetivo geral do presente trabalho é a busca de uma estratégia metodológica mais adequada para dosagem e caracterização física e mecânica de solo-cimento compactado, visando:

- a) Determinar a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade do material; e,
- b) Subsidiar futuras discussões para proposta de revisão das normas brasileiras para solo-cimento, junto à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Para que fosse atingido este objetivo, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Projeto e execução de molde metálico para produção dos corpos de prova e de dispositivo metálico para ensaio de tração por compressão diametral;
- b) Coleta e caracterização do solo e do cimento utilizados;
- c) Realização do ensaio de compactação do solo-cimento;
- d) Realização do estudo de dosagem do solo-cimento;
- e) Realização dos ensaios para determinação da resistência à compressão estimada;
- f) Proposta de método e realização dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade;
- g) Proposta de método e realização dos ensaios para determinação da resistência à tração, por compressão diametral;
- h) Realização dos ensaios para determinação da absorção de água.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório, a dissertação é composta pelos capítulos descritos a seguir.

Capítulo 2 - **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.** Apresentação e discussão de publicações relacionadas ao tema central do trabalho, organizado de acordo com os seguintes sub-temas: o solo como material de construção; blocos de terra comprimida (BTC); taipa (ou taipa de pilão); solo-cimento; e, normas técnicas brasileiras sobre solo-cimento

Capítulo 3 - **ESTRATÉGIA METODOLÓGICA.** Apresentação dos principais procedimentos adotados na realização da etapa experimental do trabalho, incluindo propostas inovadoras de métodos de ensaios, para suprir lacunas existentes nas normas técnicas da área. São apresentados os seguintes grupos de ensaios de laboratório: caracterização física e mecânica dos materiais (cimento e solo); projeto e execução de molde para produção de corpos de prova de solo-cimento; produção de corpos de prova; caracterização física e mecânica do solo-cimento; e, forma de análise dos resultados.

Capítulo 4 - **RESULTADOS E DISCUSSÕES.** Apresentação e discussão dos resultados médios de todos os ensaios realizados, assim como os demais parâmetros estatísticos (desvio padrão e coeficiente de variação). O capítulo está organizado de acordo com a mesma estrutura do capítulo "3. ESTRATÉGIA METODOLÓGICA", com as discussões inseridas logo após cada resultado apresentado.

Capítulo 5 - **CONSIDERAÇÕES FINAIS.** Apresentação de possíveis conclusões do trabalho, assim como considerações sobre eventuais dificuldades enfrentadas durante sua realização e sugestões para aplicação dos resultados e para trabalhos futuros.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.** Rol de todos os trabalhos e documentos citados no corpo do trabalho, apresentado de acordo com as normas pertinentes, da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

**APÊNDICES.** Como o trabalho é experimental, fundamentado essencialmente em ensaios de laboratório, optou-se por apresentar todos os relatórios de ensaios (com os resultados completos) na forma de apêndices, para dar aos leitores a possibilidade de consultá-los, facilitando a repetição dos experimentos, para comparações em trabalhos futuros.

capítulo **2**

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



**N**este capítulo é apresentada a síntese de um levantamento de trabalhos acadêmicos relacionados ao tema da dissertação, disponíveis em bases de dados brasileiras de dissertações de mestrado e teses de doutorado (IBICT, 2015), além de artigos publicados em periódicos internacionais, disponíveis no *Portal de Periódicos CAPES/MEC* (BRASIL, 2015).

O conteúdo está organizado segundo os seguintes temas: o solo como material de construção; classificação dos solos; blocos de terra comprimida (BTC); taipa (ou taipa de pilão); solo-cimento; e, normas técnicas brasileiras sobre solo-cimento.

## 2.1 O SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Desde a pré-história o homem tem uma estreita relação com o solo, não apenas no que tange a construção. Faria (2011) destaca a dependência do solo pelo ser humano, desde a produção de alimentos até o abrigo contra intempéries e predadores. Quanto ao abrigo, foi um dos primeiros materiais utilizados pelo homem, ao lado da madeira e da pedra, nas suas formas brutas, para a construção de seus abrigos.

Dessa forma, desde os primórdios da humanidade, a terra tem sido uma das principais matérias-primas para produção de materiais de construção. Sua importância é destacada por Neves (2011), citando sua utilização tanto em construções de caráter popular como em edifícios representativos e monumentos. Porém, a partir do século XIX o uso da terra é deixado de lado nas grandes obras, dando-se prioridade a materiais industrializados, mas sendo mantido como alternativa para a população de baixa renda, principalmente nos países em desenvolvimento. Observa-se nas figuras 2.01 e 2.02, exemplos distintos de construção com terra. Ainda segundo a autora, diferentes técnicas de construção com terra foram desenvolvidas em quase todas as civilizações e difundidas mundo afora, através dos processos de migração e colonização. Ao longo do tempo, técnicas nativas uniram-se a técnicas trazidas pelos estrangeiros, formando as mais variadas combinações. Com isso, existem semelhanças entre as técnicas encontradas em diferentes locais, porém sempre mantendo as particularidades regionais e culturais.



**Figura 2.01** - Casas de pau a pique, na zona rural de Itaoca-SP, sem e com revestimento (Fotos de Obede B. Faria, 2005)



**Figura 2.02** – Grande construção em adobe, situada no Novo México, de acordo com Picorelli (2011)

De acordo com Faria (2002), dentre as inúmeras técnicas de construção com terra, encontradas ao redor do mundo, destacam-se três que foram introduzidas no Brasil pelos colonizadores portugueses, no século XVI:

- **Taipa** (ou *taipa de pilão*): solo predominantemente arenoso, com umidade próxima ao teor de *umidade ótima de compactação*, compactado em camadas no interior de formas móveis (*taipa*), conformando paredes consideradas monolíticas;
- **Adobe**: solo areno-argiloso, em estado plástico firme (barro), moldado em formas, desmoldado logo em seguida e colocados a secar naturalmente, para produção de elementos de alvenaria (blocos ou tijolos); e,
- **Pau a pique** (ou *taipa de mão*, ou *taipa de sopapo*): solo argiloso, em estado plástico mole, preenchendo os espaços formados por um entramado de madeira de

pequena seção (fixado em uma estrutura de pilares e vigas de madeira), aplicado em várias camadas, intercaladas por processo de secagem. Também pode ser considerada uma **técnica mista**, já que ambos, solo e madeira, têm o mesmo grau de importância.

Posteriormente, notadamente nos anos 70-80 do século XX, e com a popularização do uso do cimento na construção civil, outra técnica de construção com terra foi incentivada no Brasil. Trata-se dos **blocos de terra comprimida** (BTC), estabilizados com cimento. Para este material, encontram-se normas ABNT, elaboradas nos anos 80, com apoio da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), dentre outras instituições, e revisadas em 2012. No entanto, não existem normas técnicas brasileiras para as três técnicas anteriores, quer seja para os materiais, ou para sua aplicação na elevação de paredes.

Em outros países, existem algumas normas para construção com adobes, ou com taipa, porém de difícil adaptação à realidade brasileira, porque se tratam de países com considerável vulnerabilidade sísmica.

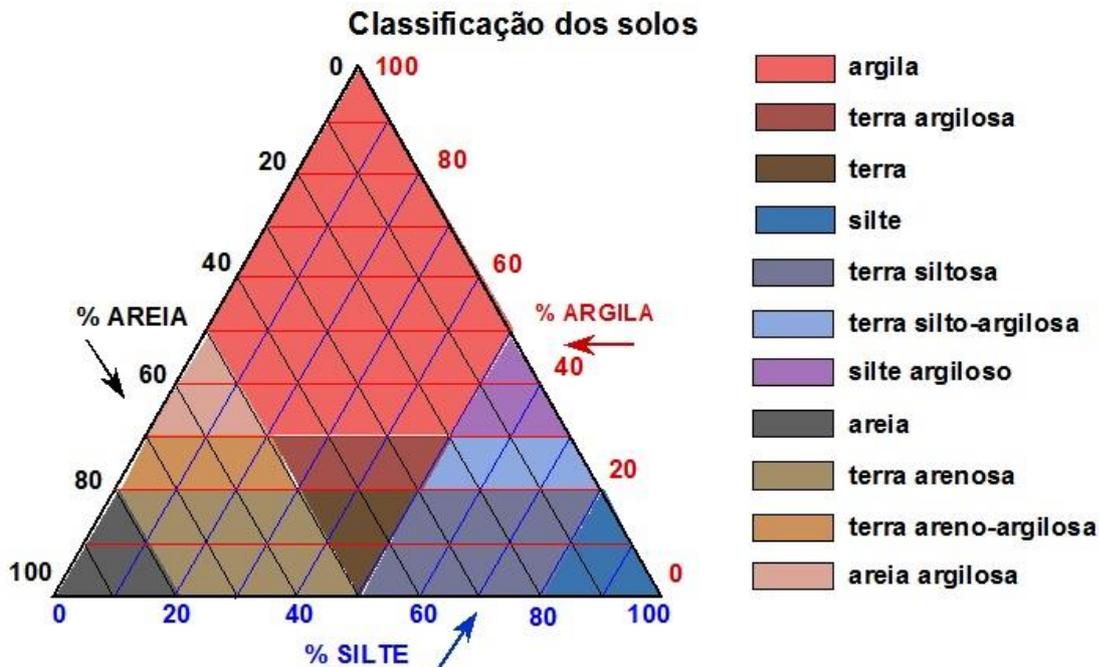
A variedade de tipos de solos e suas diversas características implica na necessidade de um rigoroso processo de classificação, antes que possam ser empregados em suas mais diversas funções, como mostrado a seguir. Alguns tipos de solos não são adequados para utilização como material de construção. Àqueles adequados, dá-se a denominação genérica de **terra** (NEVES et al., 2010).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

De acordo com Lepsch (2010), o homem passou a se interessar mais pelo conhecimento do solo há cerca de 10 mil anos, com sua fixação em determinados territórios e o início da agricultura. Um dos povos pioneiros na classificação dos solos foram os chineses, que há cerca de 6.600 anos já contavam com nove classes de solos, para a agricultura.

A classificação dos diferentes tipos de solo é de extrema importância para determinar sua empregabilidade, desde a agricultura até as diferentes técnicas de construção que o utilizam como material. Neves et al. (2010) propõe a classificação do solo com base em sua análise granulométrica, obtida através de um teste prático, o "teste do vidro", para determinar as quantidades de areia, silte e argila da amostra. Os dados obtidos através

desse teste são lançados no diagrama de classificação dos solos (figura 2.03), definindo a categoria do solo testado.



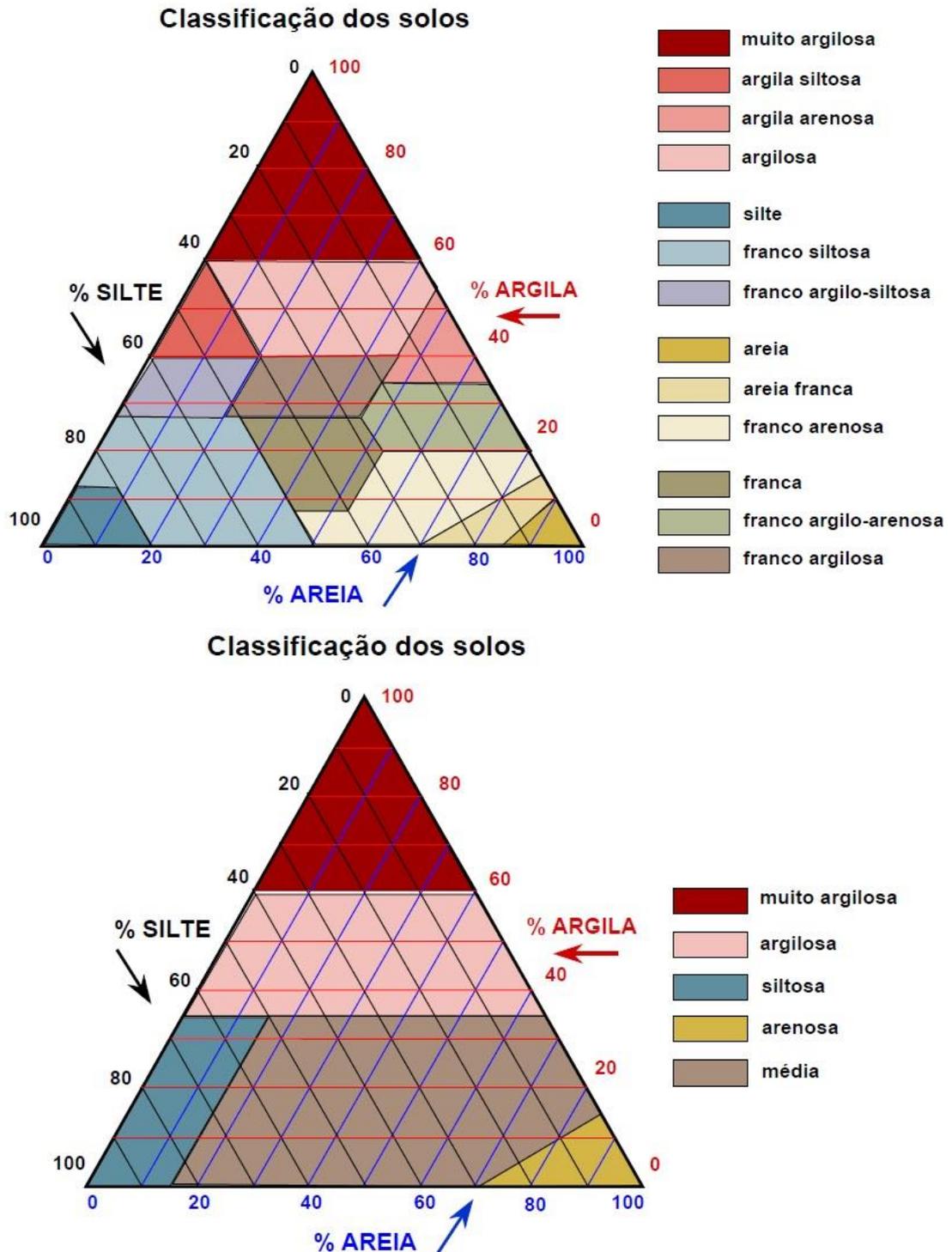
**Figura 2.03** - Classificação dos solos (ou terra), de acordo com Neves et al. (2010)

Areia, silte e argila são denominações dadas às partículas do solo, em função de suas dimensões ( $d$ ). De acordo com a norma NBR 6502 (ABNT, 1995), as partículas têm as seguintes dimensões: **areia**,  $0,06 \text{ mm} \leq d < 2,00 \text{ mm}$ ; **silte**,  $0,002 \text{ mm} \leq d < 0,06 \text{ mm}$ ; **argila**,  $d < 0,002 \text{ mm}$ .

Lepsch (2013) propõe uma metodologia similar, porém utilizando um ensaio de laboratório, mais preciso, para definição da composição granulométrica da amostra. O autor propõe dois diagramas triangulares de classificação (figura 2.04). Ambos os métodos apresentam categorias similares para a classificação do solo, porém com nomenclaturas diferentes.

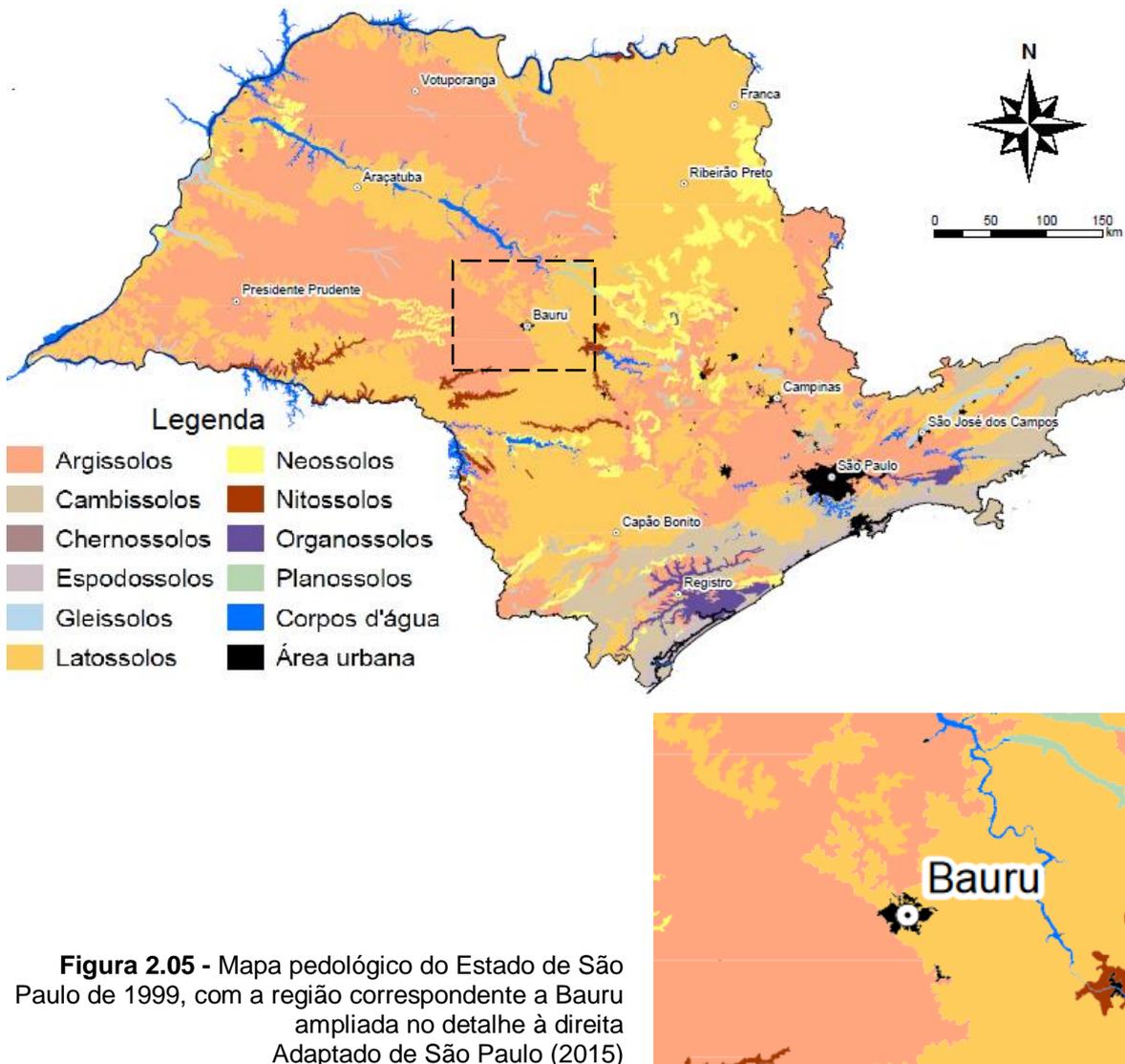
Com base no Mapa Pedológico de São Paulo (figura 2.05), disponibilizado pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2015), pode-se observar que o solo de Bauru, utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho, é classificado como **latossolo**, muito próximo da mancha relativa aos **argissolos**.

De acordo com Oliveira (1999)<sup>1</sup>, apud Alves et al. (2008), os latossolos cobrem boa parte do território brasileiro e cerca de 40% do território do Estado de São Paulo.



**Figura 2.04** - Classificação detalhada (superior) e simplificada (inferior) dos solos. Adaptado de Lepsch (2011)

<sup>1</sup> OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: IAC, 1999. 108p.



**Figura 2.05** - Mapa pedológico do Estado de São Paulo de 1999, com a região correspondente a Bauru ampliada no detalhe à direita. Adaptado de São Paulo (2015)

Agnelli (1997) estudou exaustivamente o solo de Bauru, apresentando os seguintes resultados: em relação a gênese, é um **solo residual de arenito**; de acordo com a pedologia, é um **latossolo vermelho-amarelo escuro**; de acordo com a textura, é classificado como **areia fina e argilosa** e, de acordo com a *Highway Research Board* (HBR), um **solo arenoso do grupo A-2-4**. Uma análise mineralógica realizada por este autor, por difração de raios-X (DRX), apontou que há predominância do argilo-mineral **caulinita**  $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ .

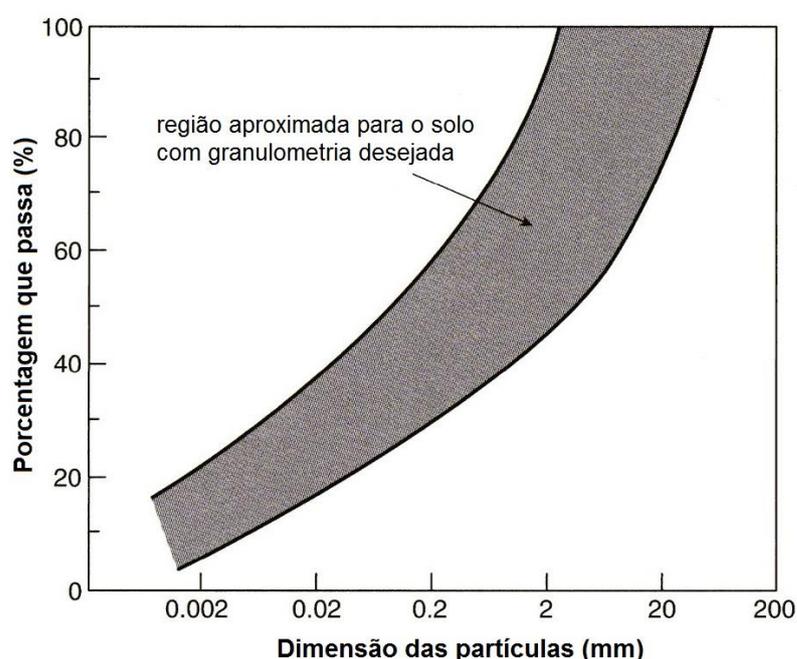
Além da **caulinita**, de acordo com Alves et al. (2008), na fração argila deste latossolo também são encontrados os seguintes argilominerais, em teores variáveis: **gibbsita**  $[Al(OH)_3]$ , **hematita**  $[Fe_2O_3]$  e **goethita**  $[FeO(OH)]$ . Outros argilominerais, tais como **vermiculita**, **ilita**, **anatásio** e **rutilo**, são encontrados em menores proporções. Estes

autores discutem a variação de resultados, na quantificação de caulinita e gibbsita, em função dos procedimentos adotados.

Segundo São Paulo (2015), **latossolos** são solos minerais, homogêneos, com pouca diferenciação entre os horizontes ou camadas, reconhecido facilmente pela cor quase homogênea do solo com a profundidade. Os Latossolos são profundos, bem drenados e com baixa capacidade de troca de cátions, com textura média ou mais fina (argilosa, muito argilosa) e, com mais frequência, são pouco férteis.

A caracterização e classificação dos solos indica alguns aspectos de seu comportamento, auxiliando na escolha da técnica de construção com terra mais adequada para sua utilização. Considerando-se que há grande variedade de recomendações de uso, a seguir são apresentadas algumas, a título de exemplo.

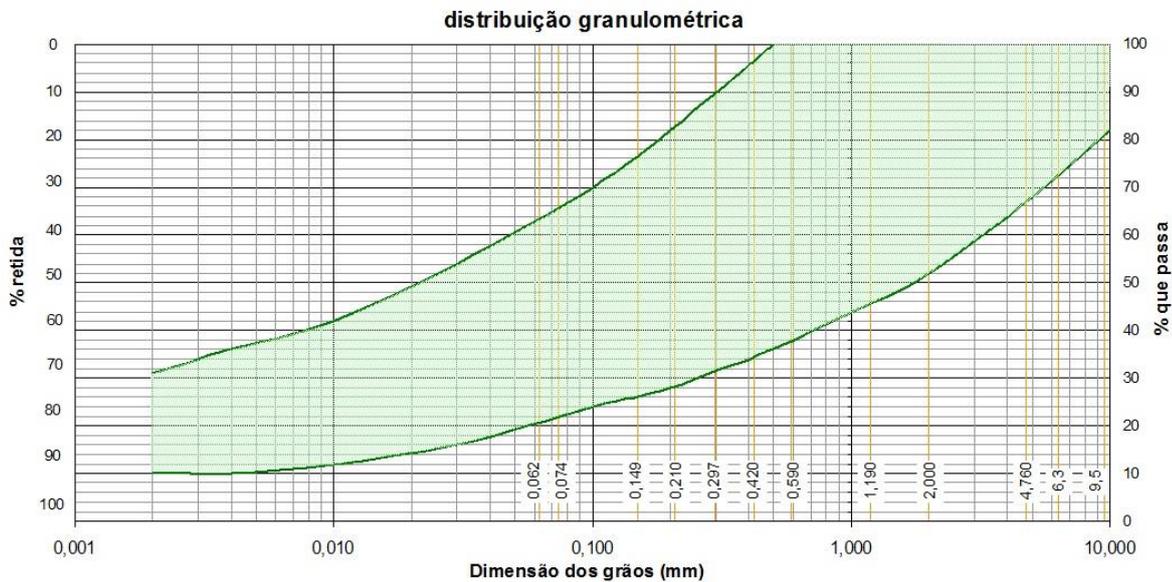
Walker et al. (2005), recomendam a faixa granulométrica indicada na figura 2.06, para emprego do solo na produção de taipa (ou *rammed earth*, em inglês).



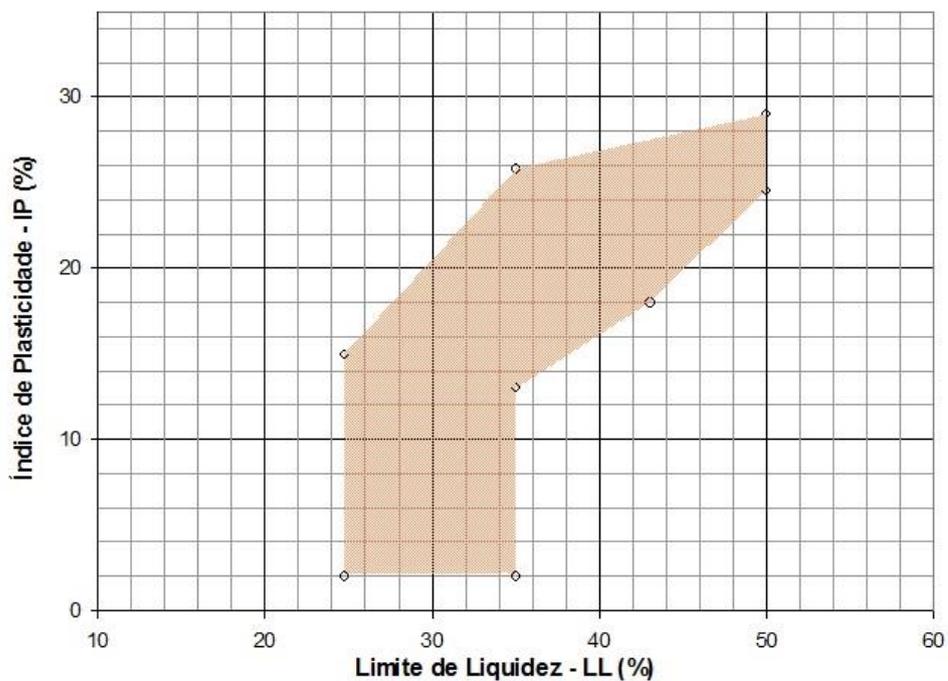
**Figura 2.06** - Faixa granulométrica desejada para produção de taipa  
Adaptado de Walker et al. (2005)

A norma espanhola UNE 41410 (AENOR, 2008) recomenda que a curva de distribuição granulométrica do solo esteja contida na faixa sombreada com a cor verde clara na

figura 2.07, com índices físicos que se enquadrem na região sombreada a cor rosa na figura 2.8, para que seja usado na produção de blocos de terra comprimida.

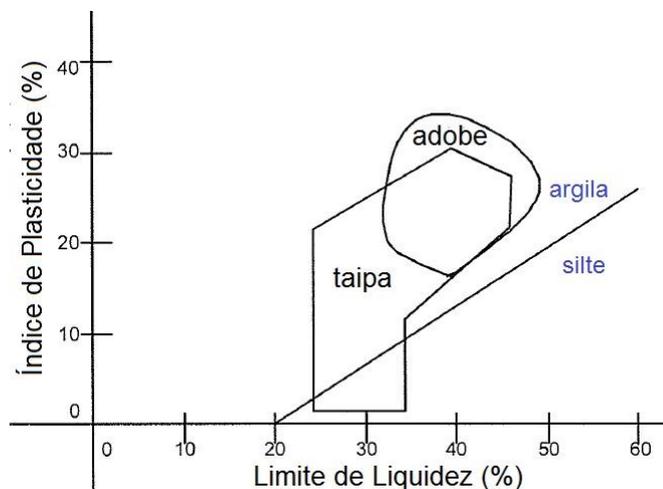


**Figura 2.07** - Faixa granulométrica desejada para produção de blocos de terra comprimida  
Adaptado da norma espanhola NE 41410 (AENOR, 2008)



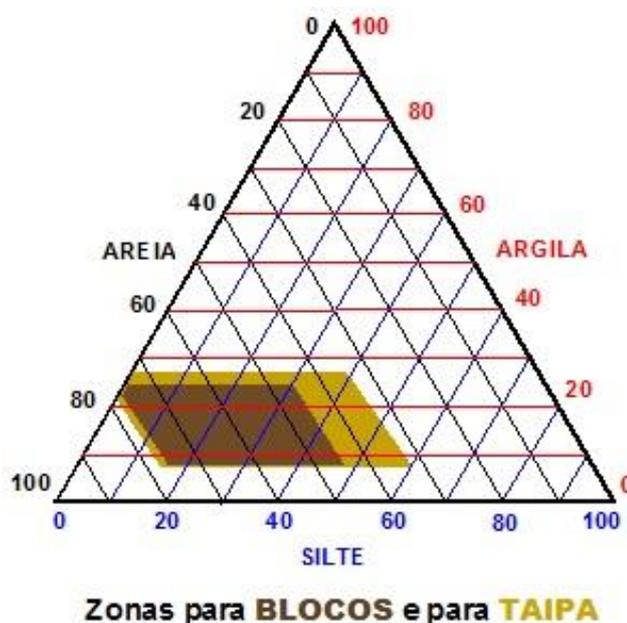
**Figura 2.08** - Diagrama de plasticidade com a zona recomendada para produção de blocos de terra comprimida. Adaptado da norma espanhola NE 41410 (AENOR, 2008)

De acordo com o regulamento suíço para construção com terra D 0111 (SIA, 1994), são recomendadas as zonas assinaladas no diagrama de plasticidade apresentado na figura 2.09, para produção de taipa e de adobe.



**Figura 2.09** - Diagrama de plasticidade com as zonas recomendadas para produção de taipa e adobe. Adaptado do regulamento suíço D 0111 (SIA, 1994)

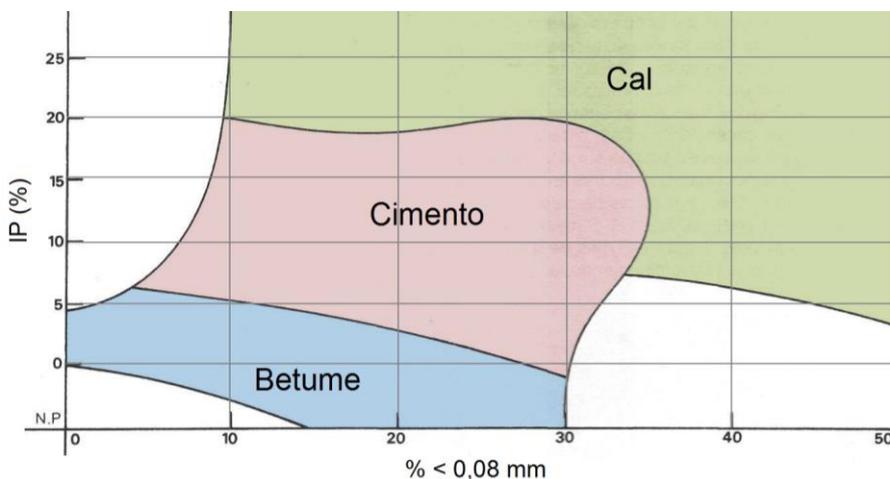
Neves et al. (2010) recomendam as regiões indicadas no diagrama triangular apresentado na figura 2.10, para produção de **blocos de terra comprimida (BTC)** e **taipa**.



**Figura 2.10** - Regiões de composição granulométrica indicadas para produção de blocos de terra comprimida e taipa (NEVES et al., 2010)

Quando o solo, da forma como se apresenta, não é adequado granulometricamente para produção de nenhuma das técnicas de construção com terra, recomenda-se sua *correção granulométrica* (mistura com outro solo, de textura diferente) ou a utilização de algum agente estabilizante.

Houben e Guillaud (1995), por exemplo, recomendam a escolha entre os estabilizantes *betume*, *cimento* e *cal*, de acordo com o diagrama apresentado na figura 2.11, baseado na porcentagem de partículas menores que 0,08 mm e no índice de plasticidade (IP) do solo.



**Figura 2.11** - Diagrama para escolha do estabilizante, adaptado de Houben e Guillaud (1995)

### 2.3 BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA

Os blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com cimento correspondem a uma das principais técnicas de construção com terra presentes no Brasil, principalmente a partir das décadas de 70-80, com a popularização do uso do cimento na construção civil.

Neves e Milani (2011) definem o BTC como componente da alvenaria, fabricado com terra (solo) adensada em molde por compressão ou prensagem, seguido do desmolde imediato. Além disso, destacam que para obter melhorias nas características físico-mecânicas do BTC, como resistência à compressão e à ação abrasiva de ventos, impermeabilização ou durabilidade, pode-se realizar a correção granulométrica e/ou a estabilização química, ou seja, incorporação de um aditivo químico à terra, geralmente aglomerante tipo cimento ou cal.

Os blocos de terra comprimida, também denominados por alguns autores como "tijolos ecológicos", podem ser produzidos nas mais diversas formas e medidas, dependendo das necessidades do projeto, conforme figura 2.12. Além disso, podem ser usados nos mais diversos tipos de construção, como substituto dos tijolos cerâmicos convencionais, conforme figura 2.13, desde paredes simples de fechamento, até em alvenarias estruturais (figura 2.14), contanto que atendam as especificações do projeto.



**Figura 2.12** – Diferentes formatos de BTC Ecoblocos (2012)



**Figura 2.13** – Construção utilizando BTC, no Brasil Ecoblocos (2012)



**Figura 2.14** – Construção de BTC com dois pisos, paredes estruturais (1 1/2 tijolo) com entrepisos de madeira, em Aljezur - Portugal (fotos de Obede B. Faria, 2005)



A utilização dos BTC traz uma série de vantagens. Melo et al. (2011) destacam que os benefícios vão desde a fabricação até sua utilização no canteiro de obras, pois em geral, os equipamentos utilizados em sua produção são simples e de baixo custo (figura 2.15), possibilitando a fabricação dos blocos no próprio canteiro. Além disso, a técnica de produção e aplicação dos blocos é de fácil transferência, não necessitando mão de obra

especializada. No entanto, Hoepfner (2013) constatou que o processo de produção não é tão simples assim, em estudo realizado junto a um produtor comercial de BTC estabilizado com cimento na região de Bauru-SP. A grande dificuldade encontra-se no controle tecnológico da matéria prima (propriedades do solo e do cimento) e do processo, principalmente da umidade ótima de compactação e resistência à compressão.



**Figura 2.15** – Prensa manual utilizada na produção de BTC Ecovila da montanha (2015)

Melo et al. (2011) testaram o desempenho estrutural de um protótipo de alvenaria construído com blocos de terra crua estabilizada. Os blocos para confecção do protótipo foram estabilizados com 5% de cimento *Portland*, em relação ao volume de terra no estado solto e seca ao ar. A determinação da umidade foi baseada em análise táctil visual. Aqui cabem duas observações: 1) os materiais (solo e cimento) deveriam ser medidos em massa; 2) deveria ser realizado o ensaio de compactação do solo, para garantir a produção com o teor de umidade ótimo de compactação. Assim, melhoraria as condições de controle tecnológico do processo e do produto.

Os blocos foram produzidos em prensa manual, com dimensões de 14cm x 10cm x 28cm. Para avaliar as cargas, solicitações e impactos nas paredes do protótipo construído com os blocos de terra crua estabilizada, foram realizados ensaios de cargas provenientes de peças suspensas em paredes, ensaios de solicitações em paredes por fechamento brusco de portas e ensaios de impactos de corpo duro e corpo mole em paredes, todos baseados na norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Os autores concluem que, a partir do bom desempenho apresentado pelas paredes durante os ensaios, pode-se assegurar que o uso do BTC proposto pode ser uma

---

alternativa válida a ser difundida para aplicação na produção de habitações em geral e de construções rurais.

Com base nas vantagens apresentadas para o uso dos blocos de terra comprimida, principalmente as ambientais, inerentes a essa e as outras técnicas de construção com terra, conclui-se que o BTC é uma alternativa válida para a construção civil. No entanto, deve ser cada vez mais estudado no âmbito acadêmico, para que sua utilização seja incentivada, com a formação técnica dos profissionais de engenharia civil e de arquitetura, garantindo melhor e maior controle tecnológico do processo e do produto que, certamente, resultará em ganho de qualidade do BTC.

## 2.4 TAIPA, OU TAIPA DE PILÃO

A taipa, ou taipa de pilão, é uma das principais técnicas de construção com terra utilizadas no Brasil. Consiste em compactar a terra em várias camadas dentro de formas, denominadas taipais, até atingir a altura desejada da parede. A taipa foi incluída nesta revisão bibliográfica porque seu princípio de produção é o mesmo do solo-cimento compactado, objeto da presente dissertação.

Além das vantagens ambientais do uso de uma técnica de construção com terra, paredes de taipa podem conferir grande resistência e beleza a edificação, conforme ilustrado na figura 2.16, na qual é apresentada uma residência construída na Colômbia pela arquiteta *Lucia E. Garzón*, entre os anos de 2011 e 2012, na região de Subachoque. Nesta edificação, por força da legislação colombiana para regiões com sismicidade, a estrutura foi construída com concreto armado, mas as paredes de vedação são de taipa (com solos de colorações diversas e naturais) e de BTC estabilizado com cimento.

Deve-se atentar para as diferenças entre a taipa e outra técnica de construção com terra, muito utilizada na arquitetura paulista do início do século XX, denominada taipa de mão. Canteiro e Pisani (2006) destacam que a taipa de mão também é conhecida como taipa de sebe, pau a pique, taipa de pescoção, sopapo, entre outras. Para execução das paredes de taipa de mão, é desenvolvido uma trama de madeira, formada pelos paus a pique (peças verticais) e varas (peças horizontais, de madeira ou bambu), fixadas entre si utilizando os mais variados materiais (cipós, fibra de cisal, arame, prego, etc). Após a finalização da trama, são jogadas porções de barro, previamente preparado, para preencher os vazios e formar a parede, conforme Figura 2.17. De acordo com Neves e Faria (2011), no âmbito da Rede Ibero-Americana de Arquitetura e Construção com Terra

- PROTERRA, esta técnica é denominada genericamente por **técnica mista**, porque tanto a terra quanto a madeira têm o mesmo grau de importância na produção da parede.



**Figura 2.16** – Produção de paredes de taipa, vista interior e exterior da edificação em fase de acabamento (fotos cedidas pela Arq<sup>a</sup> Lucia E. Garzón, 2011-2012)



**Figura 2.17** – **Esq.:** Fabricação de parede em taipa de mão (Tramontano e Requena, 2000). **Acima:** Habitações de interesse social de "quincha" (taipa de mão com bambu), na Colômbia (foto de Luzia E. Garzón, 2005)

Ainda segundo Canteiro e Pisani (2006), na arquitetura colonial paulista, a utilização da taipa de mão era associada ao uso da taipa de pilão, sendo a primeira utilizada em divisórias internas e a segunda utilizada nas paredes externas. Lopes (1998) destaca o uso da taipa de mão também na arquitetura colonial mineira, sendo empregada apenas em paredes internas, ou em toda a construção. Alguns exemplares resistem até hoje, fazendo parte do casario urbano de muitas cidades do Estado de Minas Gerais.

Segundo Fernandes (2013), a taipa no Brasil, uma técnica abandonada há anos foi recuperada e está emergindo em diversos estados brasileiros na arquitetura contemporânea, reflexo da influência colonial portuguesa. Com base nesse contexto, as técnicas para produção de edificações utilizando a técnica da taipa de pilão tiveram que evoluir, de modo a satisfazer as exigências modernas da construção civil.

As formas (*taipais*) são parte fundamental para produção de paredes com qualidade. Heise (2004) destaca que as formas devem ser rígidas, o suficiente para não deformarem durante a compactação do painel, e leves o suficiente para serem transportadas pelo canteiro de obras. Elas devem ter dimensões que proporcionem rapidez e eficiência na montagem e desmontagem das mesmas, além de possibilitarem diversas modulações. Por fim, elas devem ser reaproveitadas no maior número de obras possível, garantindo qualidade e economia. Com base nessas exigências, vão surgindo modelos cada vez mais avançados, promovendo produtividade e eficiência nas construções, conforme Figura 2.18.



**Figura 2.18** – Taipais em estrutura metálica (Adaptado de Taipal, 2015)

Outro aspecto importante para que seja desenvolvida uma parede homogênea em toda sua extensão é a compactação. Na busca de maior eficiência e confiabilidade nas obras,

os compactadores manuais (Figuras 2.19 e 2.21) têm cedido espaço aos equipamentos mecânicos ou pneumáticos (Figura 2.20).



**Figura 2.19** – Compactador manual (GUÉGUEN, 2014)



**Figura 2.20** – Compactador pneumático (GUÉGUEN, 2014)



**Figura 2.21** – Variedade de compactadores manuais tradicionais, utilizados na consolidação das ruínas do Castelo de Paderne (sec. XII) com paredes de taipa militar (2,10 m de espessura), em Albufeira - Portugal (fotos de Obede B. Faria, 2005)

Bui et al. (2009) estudaram a durabilidade de paredes de taipa expostas por vinte anos às intempéries. As paredes foram construídas em 1985, próximas a região de Grenoble, nos alpes franceses. Foram erguidas sobre uma fundação de concreto, com 250mm sobre o solo. Além disso, sobre a base foi passada uma camada de pintura betuminosa, para prevenir a entrada de umidade por capilaridade. A umidade do solo utilizado era de

aproximadamente 10% e a medida das paredes era de 1000mm x 400mm x 1100mm. Todas as paredes eram protegidas da entrada de chuva pelo topo, através da instalação de uma cobertura, conforme Figura 2.22.



**Figura 2.22** – Paredes cobertas por telhados (BUI et al., 2009)

Foram construídos três tipos de paredes distintas, as duas primeiras não estabilizadas com nenhum agente químico, diferentes entre si pelo tipo de solo usado em sua composição, e o último, no qual o solo foi estabilizado com 5% de cal hidratada. O desgaste das paredes foi medido através do método estéreo fotogramétrico.

A erosão nas paredes estabilizadas foi de aproximadamente 2 mm (0,5% da espessura das paredes), enquanto nas não estabilizadas a erosão foi de aproximadamente 6,4 mm (1,6% da espessura das paredes). Os resultados confirmam a durabilidade da taipa tradicional, não estabilizada. Os autores concluem que em condições similares as estudadas, a estabilização é inadequada, pois ela impede a reciclagem do material (o que é negativo do ponto de vista da sustentabilidade), além disso, a utilização de cal ou cimento encontra também o problema econômico e de disponibilidade de tais materiais em determinadas regiões.

Conforme apresentado, a técnica da taipa de pilão, como outras técnicas de construção com terra tem uma série de vantagens, principalmente no que tange aos aspectos ambientais. Com o passar do tempo elas vêm evoluindo de modo a atender as novas exigências da construção civil. Assim, cada vez mais estudos científicos no sentido de padronizar e incentivar a criação de novas normas técnicas são necessários, com o intuito de difundir essas técnicas, tornando-as confiáveis e uma alternativa viável para a criação de novas edificações.

## 2.5 SOLO-CIMENTO

Segundo a ABCP (1986), solo-cimento é o produto resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. É um material com boa resistência a compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade.

O solo-cimento tem uma vasta gama de utilização, podendo ser utilizado na produção de blocos e tijolos, como base para pavimento asfáltico, na produção de paredes monolíticas e em elementos de fundações (compactado ou plástico). Por ser muito utilizado, existem uma série de normas técnicas norteando a padronização de seu uso, que são apresentadas no item 2.6 e utilizadas no decorrer do trabalho.

Com o objetivo de obter materiais cada vez mais sustentáveis e diminuir o impacto ambiental da construção civil, novas composições vêm sendo estudadas por muito pesquisadores. Alguns exemplos são solo-cimento com casca de arroz, solo-cimento com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, dentre inúmeras outras testadas. O resultado do levantamento bibliográfico registrado na "Introdução" desta dissertação (p. 22) apontou que 54% das 102 teses e dissertações encontradas são relativas ao **solo-cimento**. As demais técnicas apresentaram a seguinte ocorrência: **adobe** 13%; **taipa** 10%; **técnica mista** (pau a pique) 5%; e, **várias** (outras técnicas ou várias no mesmo trabalho) 18%.

No grupo de solo-cimento, seu uso se distribui da seguinte forma: BTC 44%; fundações 21%; obras de terra 17%; pavimento 12%; e, paredes monolíticas (como a taipa) 6%. Portanto, o volume de estudos relativos aos BTC estabilizados com cimento pode ser considerado expressivo. Alguns destes trabalhos são citados nesta dissertação.

Um dos estudos mais promissores, tem por objetivo dar melhor destinação aos resíduos da construção civil, como restos de argamassa e concreto, materiais cerâmicos, etc. Souza et al. (2008) estudaram o comportamento de corpos de prova cilíndricos e de tijolos de solo-cimento, com adição de até 60% de resíduos em relação a massa de solo e concluíram que tal adição trouxe uma série de vantagens, além de dar uma destinação nobre aos resíduos da construção civil, que na maioria das vezes são descartados no meio ambiente, resultando em graves problemas ambientais. Dentre essas vantagens destacam-se:

- A adição dos resíduos de concreto promoveu condições favoráveis para a utilização do solo em estudo reduzindo, de forma substancial, a sua retração na secagem, tornando-o plenamente indicado para a confecção dos tijolos;
- Todos os traços com adição de resíduos atenderam plenamente às especificações das normas brasileiras, mostrando haver possibilidade de se utilizar dosagens com menos de 6% de cimento na confecção dos tijolos;
- Todas as propriedades estudadas do solo e do solo-cimento apresentaram melhorias sensíveis com a adição dos resíduos de concreto constituindo-se, portanto, em excelente alternativa para melhorar as características dos solos, visando à sua aplicação na produção do solo-cimento.

Como observado, o solo-cimento é uma ótima alternativa na construção civil, tanto em sua composição mais comum (solo, cimento e água) quanto nas mais diversas composições estudadas, que visam dar uma destinação correta para diferentes tipos de resíduos, inclusive da própria construção civil. Tal panorama reforça a importância de novos estudos sobre esse material, difundindo-o cada vez mais, e assim, atenuando o grande número de problemas ambientais oriundos da construção civil convencional.

Faria et al. (2015) apresentaram proposta de método de ensaio para determinação do módulo de deformação de **adobes**, em corpos de prova prismáticos com seção quadrada de 7,5 cm de lado e altura de 15 cm, baseada em adaptações da norma NBR 8522 (ABNT, 2008) e em trabalhos anteriores dos autores, alguns já validados por outros pesquisadores. Como não há norma brasileira para determinação deste parâmetro em solo-cimento, os procedimentos propostos no presente trabalho são, em síntese, uma adaptação do método proposto por estes autores.

Outros trabalhos publicados em periódicos são citados na discussão dos resultados obtidos com o presente trabalho.

## 2.6 NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS SOBRE SOLO CIMENTO

No Brasil existe uma vasta gama de normas técnicas para solo-cimento, tanto para uso na forma de tijolos e blocos, como em base para pavimentos e em paredes monolíticas. A primeira edição destas normas foi elaborada e aprovada na década de 1980, com participação muito ativa da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland e do

CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia, atualmente vinculado à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do governo do Estado da Bahia.

Cerca de 30 anos depois, em 2012, a ABNT concluiu o processo de revisão destas normas, publicando sua segunda edição. A seguir são apresentadas as principais informações destas normas, tais como, escopo, data de entrada em vigência e número de páginas. Também são comentadas as vantagens e desvantagens destas normas.

### **2.6.1 ABNT NBR 8491:2012 - Tijolo de solo-cimento - Requisitos (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece os requisitos para o recebimento de tijolos de solo-cimento e se aplica aos tijolos destinados à execução de alvenaria sem função estrutural em obras de construção civil. É muito importante no âmbito nacional, amplamente conhecida e tem servido como base para aplicação também em outros materiais não convencionais (compósitos com resíduos de construção e demolição, por exemplo).

Não há dificuldades na sua aplicação, mas atualmente é desnecessária a definição de dimensões nominais padronizadas. Bastaria recomendar proporções entre altura, largura e comprimento dos tijolos.

A resistência mínima média à compressão de 2,0 MPa encontra-se abaixo dos requisitos exigidos para blocos cerâmicos, ou seja: média de no mínimo 3,0 MPa, para blocos de vedação com furos na vertical, de acordo com a norma NBR 15270-1 (ABNT, 2005); valor característico mínimo de 3,0 MPa, para blocos estruturais, de acordo com a norma NBR 15270-2 (ABNT, 2005). Portanto, para solo estabilizado com cimento poderia ser exigida uma resistência maior.

### **2.6.2 ABNT NBR 8492:2012 - Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece o método para análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água em tijolos de solo-cimento para alvenaria sem função estrutural. Assim como a norma NBR 8491 (ABNT, 2012), tem servido como base para aplicação também em outros materiais não convencionais (adobes e compósitos com resíduos de construção e demolição, por exemplo).

---

Não há dificuldades na sua aplicação. De acordo com a norma NBR 8491 (ABNT, 2012a), sugere-se que a largura do tijolo (L) seja igual ao dobro de sua altura (H). Como o corpo de prova é obtido juntando-se duas metades do tijolo, a altura do corpo de prova (2H) resulta igual à sua largura, produzindo um corpo de prova muito robusto (relação L/h  $\cong$  1,0).

### **2.6.3 ABNT NBR 10833:2012 - Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece os requisitos para fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento em prensa manual ou hidráulica. É muito importante no âmbito nacional, porém, raramente os pequenos fabricantes adotam suas orientações.

Apesar de bastante reduzida, esta norma estabelece requisitos muito claros para a escolha do solo adequado. A dificuldade de aplicação, para o pequeno produtor, consiste na variedade de ensaios de laboratório, necessários para a adequada caracterização do solo e outros componentes do solo-cimento. Por exemplo, é exigida a realização do ensaio de avaliação do teor de matéria orgânica presente no solo, realizado de acordo com a norma NBR NM 49 (ABNT, 2001).

Portanto, como estes ensaios são de extrema importância para a boa qualidade do produto final, seria interessante que os pequenos produtores contassem com algum apoio institucional (de universidades, ou do próprio governo), inclusive na capacitação de mão de obra.

### **2.6.4 ABNT NBR 10834:2012 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece os requisitos para o recebimento de blocos de solo-cimento, destinados à execução de alvenaria sem função estrutural. É muito importante no âmbito nacional, porém, raramente os pequenos fabricantes adotam suas orientações. Apesar de bastante reduzida, estabelece requisitos muito claros para a avaliação e decisão sobre a aceitação ou não de um lote de blocos.

Mesmo considerando-se que os blocos são destinados a alvenaria não estrutural, a resistência média exigida é muito baixa (2,0 MPa), para solo estabilizado com cimento. Esta resistência pode ser obtida até com adobes.

### **2.6.5 ABNT NBR 10836:2013 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio (ABNT, 2013)**

Esta norma estabelece o método para análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água em blocos de solo-cimento para alvenaria sem função estrutural. É muito importante no âmbito nacional, porém, raramente os pequenos fabricantes adotam suas orientações.

Apesar de bastante reduzida, estabelece requisitos muito claros para os ensaios de determinação das principais propriedades dos blocos de solo-cimento.

A dificuldade, para os pequenos produtores, está no acesso a uma máquina de ensaios para determinação da resistência à compressão.

### **2.6.6 ABNT NBR 11798:2012 - Materiais para base de solo-cimento - Requisitos (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece os requisitos para os materiais a serem utilizados na execução de camadas de base de pavimento de solo-cimento.

Tem sido pouco utilizada porque o uso de solo-cimento em pavimentos está em desuso. No entanto, o tema deveria ser incluído na pauta da Rede PROTERRA, porque a arquitetura de construção com terra não deve estar restrita apenas a componentes para edificação. Não haveria dificuldades na aplicação desta norma.

### **2.6.7 ABNT NBR 12023:2012 - Solo-cimento - Ensaio de compactação (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece os métodos para determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de misturas de solo e cimento, sem reuso do material, quando compactadas com energia normal.

Contém dois métodos, aplicáveis de acordo com a granulometria do solo:

- Método A, para solos com 100% de partículas com dimensão menor do que 4,75 mm.
- Método B, para solos com até 30% de partículas com dimensão maior do que 19 mm.

Esta norma é muito importante no âmbito nacional, porém, raramente os pequenos fabricantes adotam suas orientações, porque não realizam controle rigoroso da umidade ótima de compactação. Estabelece procedimentos muito claros para a realização dos ensaios e é de fácil compreensão, por aqueles que estão acostumados a realizar o ensaio de compactação de solos, porque adota os mesmos equipamentos e procedimentos da norma NBR 7182 (ABNT, 1986), que trata do ensaio de compactação de solos em geral.

Os pequenos produtores precisariam investir em equipamentos básicos de laboratório de mecânica dos solos, ou contratar os serviços de um laboratório especializado. Isto poderia constituir uma dificuldade. Outro inconveniente desta norma é o tamanho do corpo de prova, com 100 mm de diâmetro e 127,3 mm de altura que, além de consumir muito solo para execução, dificulta o controle do teor de umidade da mistura solo e cimento, devido ao grande volume de solo manuseado.

#### **2.6.8 ABNT NBR 12024:2012 - Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece os métodos para moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento.

Contém dois métodos, aplicáveis de acordo com a granulometria do solo:

- Método A, para solos com 100% de partículas com diâmetro menor do que 4,75 mm.
- Método B, para solos com até 30% de partículas com diâmetro maior do que 19 mm.

Esta norma é muito importante no âmbito nacional, porém, raramente os pequenos fabricantes adotam suas orientações, porque não têm condições de realizar o rigoroso controle tecnológico das variáveis envolvidas (teor de umidade da mistura, energia de compactação, grau de compactação, etc). Estabelece procedimentos muito claros para a moldagem dos corpos de prova e o controle de umidade. No entanto, apresenta algumas desvantagens e dificuldades:

- Os corpos de prova são muito grandes, produzidos no mesmo molde do ensaio de compactação estabelecido pela norma NBR 12023 (ABNT, 2012), com 1 litro de volume, consumindo cerca de 2 kg de solo seco, cada um;

- É muito difícil obedecer aos limites de tolerância, tanto para a umidade (variação máxima de 0,5% em relação a umidade ótima de compactação), quanto para o grau de compactação (que deve ser de 98% a 102% da densidade obtida no ensaio de compactação);
- Caso o corpo de prova não obedeça a estes limites, deve ser descartado, acarretando imensa perda de tempo e de material.

Um dos objetivos do presente trabalho é propor uma alternativa mais viável para esta norma.

#### **2.6.9 ABNT NBR 12025:2012 - Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece o método de ensaio de resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. Este método aplica-se tanto à determinação em laboratório do teor de cimento para a estabilização do solo quanto ao controle da qualidade do solo-cimento na obra.

Esta norma é muito importante no âmbito nacional, para uma correta dosagem de solo-cimento utilizado na produção de tijolos e blocos. Estabelece procedimentos muito claros para a realização do ensaio de determinação da resistência à compressão.

A desvantagem é que raramente os pequenos fabricantes de blocos de solo-cimento adotam suas orientações, porque não têm condições de contratar os serviços de laboratório para os ensaios.

Outro problema é que esta norma não define a quantidade de corpos de prova que devem ser moldados, para compor uma amostra. Então, adota-se a quantidade estabelecida pela norma NBR 12253 (ABNT, 2012), que é de 3 corpos de prova, mas muito pequena para efeitos de análise estatística dos resultados.

Com a proposta apresentada no presente trabalho, é possível trabalhar com uma amostra mais significativa, com 10 corpos de prova.

### **2.6.10 ABNT NBR 12253:2012 - Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece os requisitos para a determinação da quantidade de cimento Portland capaz de estabilizar solos, para emprego como camada de pavimento de solo-cimento, pela medida da resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos.

Se aplica aos solos que atendem aos requisitos da norma NBR 11798 (ABNT, 2012) e é muito importante no âmbito nacional, para uma correta dosagem de solo-cimento utilizado também na produção de tijolos e blocos, além de pavimento.

De fato, esta norma estabelece apenas o tamanho da amostra (quantidade de corpos de prova que devem ser ensaiados) e os requisitos de resistência a compressão. A moldagem dos corpos de prova e o ensaio de compressão são realizados de acordo com as normas NBR 12024 (ABNT, 2012) e NBR 12025 (ABNT, 2012), respectivamente.

Com relação ao tamanho da amostra, os 3 corpos de prova estabelecidos por esta norma não são suficientes para uma análise estatística mais criteriosa. Um dos objetivos do presente trabalho é apresentar uma alternativa para resolver este problema.

### **2.6.11 ABNT NBR 13553:2012 - Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece os requisitos para os materiais a serem empregados na construção de paredes monolíticas de solo-cimento sem função estrutural, que poderiam ser classificadas como *taipa*. Seria muito importante no âmbito nacional, porém, os produtores de solo-cimento geralmente não realizam o adequado controle tecnológico da matéria prima.

Não haveria dificuldades em adotar os requisitos estabelecidos por esta norma. No entanto, poderiam ser apontadas algumas falhas:

- Os requisitos gerais para o solo são muito vagos. Diz que não deve ter teor de matéria orgânica que prejudique as características exigidas pela norma, mas não estabelece limites claros, como na norma NBR 10833 (ABNT, 2012), que recomenda a realização de ensaio para avaliação deste teor;

- Trata de "parede monolítica sem função estrutural", mas não há uma norma para parede monolítica estrutural. Parede monolítica é muito semelhante a taipa, que geralmente é estrutural;
- Mesmo considerando-se que a parede não é estrutural, mas leva cimento, a resistência mínima exigida (1 MPa) é muito baixa e poderia ser maior;
- É exigida a realização do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, de acordo com a norma NBR 13554 (ABNT, 2012), com limites muito baixos, considerando-se a baixa resistência exigida e o número de 6 ciclos. Este é um ensaio aparentemente simples, mas de difícil realização.

O aspecto positivo é que, nos requisitos específicos, estão muito bem definidas as características granulométricas e o IP (índice de plasticidade) para o solo adequado.

#### **2.6.12 ABNT NBR 13554:2012 - Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método de ensaio (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece o método para a determinação de perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem de corpo de prova de solo-cimento. Seria muito importante no âmbito nacional, porém, os produtores de solo-cimento geralmente não realizam o adequado controle tecnológico da matéria prima.

Este ensaio é aparentemente simples, mas com muitos detalhes que dificultam sua execução, por exemplo:

- Estabelece intervalos de tempo entre operações que resultam em horários inadequados para realização de algumas etapas do ensaio, mesmo com um bom planejamento;
- Em algumas etapas há grande influência do operador, que pode produzir resultados não muito confiáveis, porque se trabalha com apenas dois corpos de prova;
- A escova metálica definida pela norma é difícil de ser encontrada no mercado.

---

### **2.6.13 ABNT NBR 13555:2012 - Solo-cimento - Determinação da absorção de água - Método de ensaio (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece o método para a determinação da absorção de água de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. Seria muito importante no âmbito nacional, porém, os produtores de solo-cimento geralmente não realizam o adequado controle tecnológico da matéria prima.

Este ensaio é muito simples e fácil de ser realizado. No entanto, o tamanho mínimo da amostra (pelo menos 2 corpos de prova) é insuficiente para a realização de análise estatística dos resultados.

### **2.6.14 ABNT NBR 16096:2012 - Solo-cimento - Determinação do grau de pulverização - Método de ensaio (ABNT, 2012)**

Esta norma estabelece o método para a determinação do grau de pulverização do solo para execução de base de solo-cimento. É importante apenas para o controle tecnológico de solo-cimento para aplicação em base de pavimento.

O ensaio padronizado por esta norma não se aplicaria ao uso de solo-cimento na produção de taipa ou de BTC, em geral, porque é exclusivo para material com quantidade considerável de partículas maiores que 4,75 mm.

No entanto, se localmente só há disponibilidade de material pedregulhoso (partículas maiores que 4,75 mm) para produção de taipa e BTC, poderia ser realizado o ensaio previsto nesta norma.



capítulo **3**

# ESTRATÉGIA METODOLÓGICA





estratégia metodológica iniciou-se com o levantamento bibliográfico apresentado no capítulo 2, etapa que se prolongou ao longo de todo o trabalho, até o final da redação da dissertação.

Neste capítulo são apresentados os principais procedimentos adotados na realização da etapa experimental do trabalho. Alguns destes procedimentos obedecem a normas técnicas já consagradas, outros são adaptações de normas técnicas às características particulares do material estudado e outros, são propostas inovadoras, para suprir lacunas existentes nesta área.

Em linhas gerais, são apresentados os seguintes grupos de ensaios de laboratório: caracterização física e mecânica dos materiais (cimento e solo); projeto e execução do molde para produção de corpos de prova de solo-cimento; produção dos corpos de prova; caracterização física e mecânica do solo-cimento; e, forma de análise dos resultados.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CIMENTO

Optou-se por usar um cimento *Portland* de alta resistência inicial (**CP V-ARI**), porque este tipo de cimento atinge praticamente sua resistência máxima já aos 7 dias de idade. As especificações deste cimento são dadas pela norma NBR 5733 (ABNT, 1991) e foi feita a caracterização mínima, com determinação da *massa específica*, da *pasta de consistência normal*, do *tempo de início de pega* e a *resistência à compressão*.

#### 3.1.1 Determinação da massa específica do cimento ( $\gamma_c$ )

A massa específica do cimento ( $\gamma_c$ ) foi determinada de acordo com a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001), por meio do frasco volumétrico de "Le Chatelier", com uma amostra de  $(60 \pm 0,01)$  g de cimento e utilizando xileno ( $C_8H_{10}$ ) como líquido de medição (figura 3.01). A massa específica foi calculada pela equação 1.

$$\gamma_c = \frac{m}{V_f - V_i} \quad (1)$$

onde:  $\gamma_c$  - massa específica do cimento (em g/cm<sup>3</sup>)  
m - massa da amostra de cimento (em g)  
 $V_f$  - volume final (leitura final do frasco de *Le Chatelier*) (em cm<sup>3</sup>)  
 $V_i$  - volume inicial (leitura inicial do frasco de *Le Chatelier*) (em cm<sup>3</sup>)



**Figura 3.01** - Ensaio de determinação da massa específica do cimento. Esquerda: frasco Le Chatelier; água para banho termorregulador e amostra de cimento. Direita: resultado final

### 3.1.2 Massa unitária do cimento solto ( $\rho_{c,s}$ )

A massa unitária do cimento solto ( $\rho_{c,s}$ ) não é um parâmetro previsto em norma, mas é importante para a conversão do traço em massa (adotado em laboratório) para o traço em volume (praticado no canteiro). Foi proposta a adoção dos mesmos procedimentos propostos para a determinação da massa unitária do solo solto e seco ao ar ( $\rho_{ssU}$ ), conforme detalhado no item 3.2.5.

### 3.1.3 Determinação da pasta de consistência normal, do fator água-cimento ( $A/C$ ) e do tempo de início de pega do cimento

A pasta de consistência normal foi determinada de acordo com a norma NBR NM 43 (ABNT, 2003), cujo ensaio também permite calcular o fator água-cimento ( $A/C$ ), ou seja, volume de água (em litro) para 1 kg de cimento, para que seja atingida uma consistência padronizada pela norma. O conhecimento do fator água-cimento é de extrema importância no uso do cimento porque este parâmetro é decisivo na resistência final da pasta de cimento endurecida (Neville; Brooks, 2013).

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR NM 65 (ABNT, 2003), usando o *aparelho de Vicat*. A pasta de consistência normal é obtida, por tentativas, misturando-se  $(500 \pm 0,5)$  g de cimento com a quantidade de água necessária e suficiente para produzir uma pasta na qual a *sonda de Vicat* estacione a  $(6 \pm 1)$  mm do fundo do molde, em 30 s (figura 3.02). Com esta quantidade de água, calcula-se o fator água-cimento pela equação 2. O fator água-cimento também pode ser expresso em litros de água por kg de cimento.

$$A/C = \frac{m_a}{m_c} \times 100\% \quad (2)$$

onde: A/C - fator água-cimento (em %)  
m<sub>a</sub> - massa de água para obtenção da consistência normal (em g)  
m<sub>c</sub> - massa de cimento (500 g)



**Figura 3.02** - Aparelho de Vicat, com a sonda em penetração, para determinação da pasta de consistência normal

Para determinar o tempo de início de pega, prepara-se uma pasta de consistência normal, anotando-se o horário em que o cimento foi colocado em contato com a água. Em seguida, experimenta-se periodicamente a penetração da *agulha de Vicat* nesta pasta. Anota-se o horário em que a agulha parar a  $(4 \pm 1)$  mm do fundo do molde. O intervalo de tempo entre estes dois horários será o tempo de início de pega. Este tempo define o momento a partir do qual a pasta de cimento não pode mais ser manipulada e o concreto, ou a argamassa, deve ser mantido em repouso, até completo endurecimento.

De acordo com a especificação da norma NBR 5733 (ABNT, 1991), o tempo de início de pega do cimento CPV ARI deve ser de pelo menos 1 h.

### 3.1.4 Determinação da resistência à compressão do cimento ( $f_c$ )

A resistência à compressão do cimento foi determinada de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 1996), em 4 corpos de prova cilíndricos ( $\phi = 5$  cm e  $h = 10$  cm) de argamassa normal, ou seja, produzida com  $(624 \pm 0,4)$  g de cimento,  $(300 \pm 0,2)$  g de água e  $(468 \pm 0,3)$  g de cada uma das 4 frações (grossa, média-grossa, média-fina e fina) que formam a areia normal. Nesta proporção, o fator água/cimento (**AC**) resulta em 0,48. Alguns aspectos deste ensaio são mostrados na figura 3.03 e os corpos de prova foram ensaiados de acordo com o script apresentado no **Apêndice 1**.

De acordo com o *Ítem 3.6* da norma NBR 7215 (ABNT, 1996), devem ser calculadas as resistências individuais, a resistência média e os desvios relativos dos 4 corpos de prova, de acordo com as equações 3.

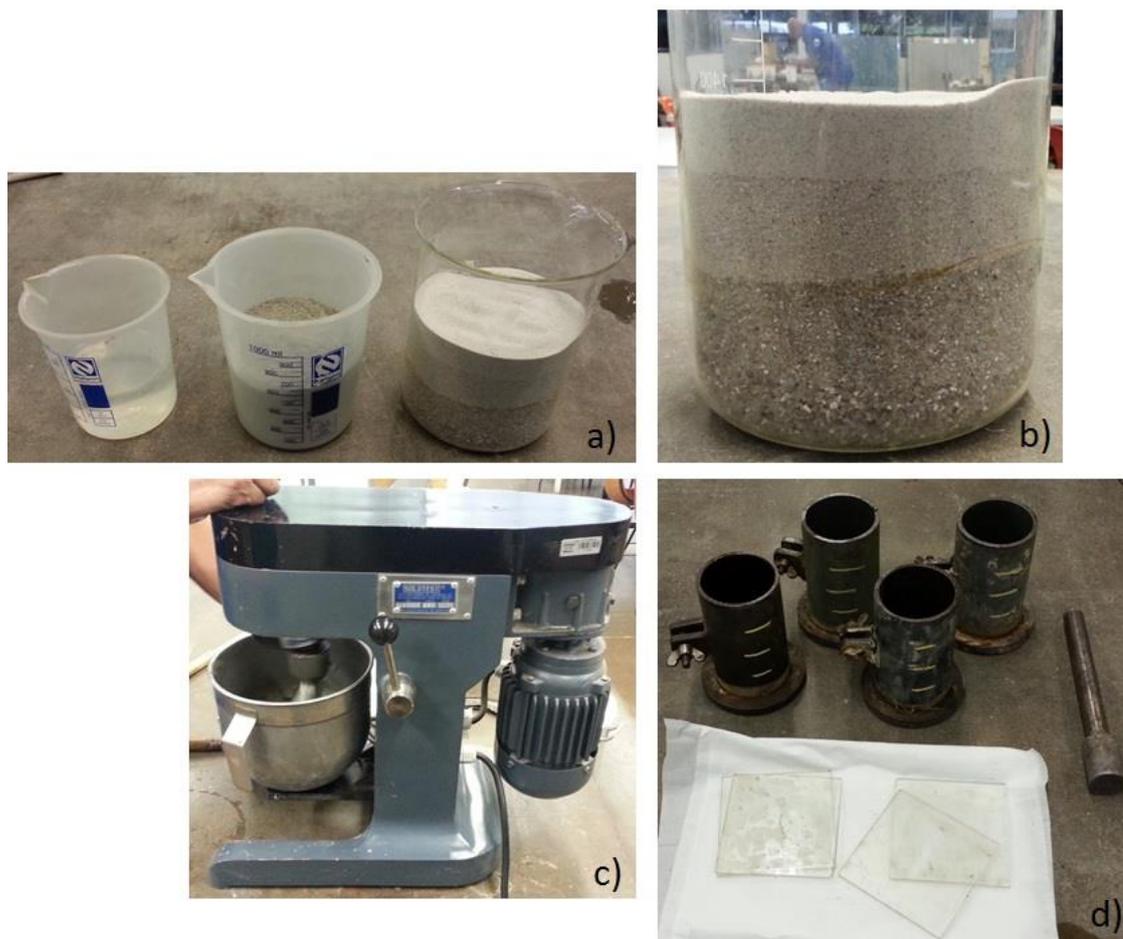
$$\bar{f}_{c1} = \frac{\sum_{i=1}^4 f_{c,i}}{4} \quad DR_i = \frac{|\bar{f}_{c1} - f_{c,i}|}{\bar{f}_{c1}} \times 100\% \quad (3)$$

onde:  $\bar{f}_{c1}$  - resistência à compressão média 1, dos 4 corpos de prova (em MPa)  
 $f_{c,i}$  - resistência à compressão individual do corpo de prova i (em MPa)  
 $DR_i$  - desvio relativo do corpo de prova i (em %)

As seguir, faz-se a seguinte verificação:

- Caso todos os  $DR_i < 6\%$ , o **ensaio será validado**;
- Caso haja mais que um  $DR_i > 6\%$ , o **ensaio será invalidado**;
- Caso haja apenas um  $DR_i > 6\%$ , eliminar o corpo de prova correspondente, calcular nova média com os 3 CPs restantes ( $\bar{f}_{c2}$ ) e os respectivos novos  $DR_i$ ;
- Caso ocorra novamente algum  $DR_i > 6\%$ , o **ensaio será invalidado**.

De acordo com a especificação da norma NBR 5733 (ABNT, 1991), a resistência à compressão do cimento CPV ARI deve ser de pelo menos 34 MPa, aos 7 dias de idade.



**Figura 3.03** - Produção dos corpos de prova de argamassa normal: a) materiais (água, cimento e areia normal); b) detalhe do fracionamento da areia normal; c) argamassadeira para a mistura; e, d) moldes metálicos, placas de vidro para acabamento e soquete para compactação

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO

O solo utilizado no presente trabalho foi adquirido de uma empresa de terraplenagem da cidade de Bauru-SP, extraído de profundidades compreendidas entre 4 e 6 m, isento de matéria orgânica e outras impurezas, tais como brita e cacos de vidro. Os ensaios de sua caracterização foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia, da UNESP-Campus de Bauru.

As amostras de solo foram preparadas de acordo com a norma NBR 6457 (ABNT, 1986).

### 3.2.1 Determinação da curva de distribuição granulométrica

A curva de distribuição granulométrica do solo foi determinada de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1988), pelos ensaios de peneiramento e sedimentação (ou "granulometria conjunta"). Com os resultados deste ensaio é possível classificar o solo, de acordo com Neves et al. (2010) e Lepsch (2011), como mostrado no **Apêndice 20**.

Para a realização deste ensaio é necessário conhecer a massa específica dos grãos de solo ( $\rho_s$ ), que foi determinada de acordo com a norma NBR 6508 (ABNT, 1984). Esta norma foi cancelada pela ABNT, mas não há substituta e continua em utilização.

### 3.2.2 Determinação dos índices de consistência (LL, LP e IP)

Os índices de consistência, ou *limites de Atterberg*, são dados pelo **limite de liquidez** (LL) e pelo **limite de plasticidade** (LP) que, por sua vez, fornecem o **índice de plasticidade** do solo (IP).

O limite de liquidez foi determinado de acordo com a norma NBR 6459 (ABNT, 1984), o limite de plasticidade foi determinado de acordo com a norma NBR 7180 (ABNT, 1984) e o índice de plasticidade calculado de acordo com a equação 4.

$$IP = LL - LP \quad (4)$$

onde: IP - índice de plasticidade (em %)  
LL - limite de liquidez (em %)  
LP - limite de plasticidade (em %)

### 3.2.3 Determinação de impurezas orgânicas

O ensaio de avaliação do nível de material orgânico presente no solo foi realizado de acordo com a norma de agregados para concreto NBR NM 49 (ABNT, 2001), conforme exigência da norma NBR 10833 (ABNT, 2012). Este ensaio consiste, resumidamente, nas seguintes etapas:

- Colocar 200 g de solo em contato com 100 ml de uma solução reagente de hidróxido de sódio, ou "soda cáustica" (NaOH), a 3%;
- Deixar a mistura em repouso, por 24 h em ambiente escuro;

- Coar em papel filtro e comparar a coloração do filtrado com a coloração de uma solução padrão.

A solução padrão é produzida com 97 ml da mesma solução reagente de NaOH e uma quantidade padrão de matéria orgânica, ou seja, 3 ml de ácido tânico a 2%. Esta solução deve permanecer em repouso também por 24 h, no mesmo ambiente da mistura de solo.

O ácido tânico ( $C_{76}H_{52}O_{46}$ ) é um ácido orgânico que, ao reagir com a solução de hidróxido de sódio, altera a coloração desta. A matéria orgânica eventualmente presente no solo também reagirá com o hidróxido de sódio, alterando sua coloração.

Ao final do experimento, deverão ser comparadas as colorações dos dois filtrados e a norma recomenda que a coloração do filtrado de solo seja mais clara que a da solução padrão.

### 3.2.4 Análise mineralógica

O conhecimento do tipo de argilominerais presentes no solo é importante para avaliação do seu comportamento físico-químico e a consequente indicação da técnica de construção com terra mais adequada para cada tipo de solo.

Geralmente, a análise mineralógica do solo, para determinação da presença e classificação de argilominerais, é baseada no método do IAC (Instituto Agronômico de Campinas), descrito por Camargo et al. (2009), podendo ser adaptada conforme realizado por Santos (2015). A difratogrametria por raios x (DRX) é o principal ensaio para esta análise. Como tem custo elevado e não seria possível realizá-la no campus de Bauru da UNESP, optou-se por adotar os resultados obtidos por Agnelli (1997) para o solo típico de Bauru, com a mesma composição granulométrica e índices físicos do solo utilizado no presente trabalho.

### 3.2.5 Ensaio de determinação da massa unitária do solo solto e seco ao ar ( $\rho_{ssU}$ )

As recomendações de dosagem de solo-cimento, encontradas em material de divulgação de fabricantes de máquinas para produção de tijolos e blocos, geralmente referem-se à proporção entre solo e cimento dada em volume. No entanto, em laboratório recomenda-se trabalhar com a medida dos materiais em massa, para que se tenha um controle mais

rigoroso das quantidades de materiais empregados. Portanto, se faz necessário determinar a *massa unitária do solo solto úmido* ( $\rho_{ssU}$ ).

Como não existe norma brasileira para determinação de  $\rho_{ssU}$ , foi adotada uma adaptação da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), conforme proposto por Faria (2002).

Este ensaio consiste em medir a massa de solo seco contida em um recipiente de volume conhecido. Foi utilizado um recipiente paralelepípedo de 5 dm<sup>3</sup> de volume e o solo foi deixado cair, por gravidade, de uma distância constante de 10 cm acima de sua borda, até transbordar. Em seguida, foi rasado cuidadosamente com uma régua metálica biselada (figura 3.04) e determinada a massa. Foram realizadas três determinações, cuja média é  $\rho_{ssU}$ .



**Figura 3.04** - Ensaio de determinação da massa unitária do solo solto e seco ao ar

Como a variação de umidade pode provocar a variação de volume do solo em estado solto, sobretudo dos solos arenosos, também é necessário conhecer seu teor de umidade higroscópica, ou natural ( $W_h$ ), para cálculo da massa unitária do solo solto e seco em estufa (a 0% de umidade),  $\rho_{ss0}$ . Este parâmetro também é necessário para a realização do ensaio de compactação do solo.

### **3.2.6 Ensaio de determinação da umidade higroscópica do solo seco ao ar ( $W_h$ )**

O solo a ser utilizado foi deixado a secar ao ar, em ambiente ventilado, mas protegido de intempéries, por pelo menos duas semanas. Após este período, foi destorroado, passando-o pelas peneiras com aberturas (#) 4,75 mm e 2,00 mm. A peneira # 2,00 mm foi utilizada porque já se sabia que o solo não continha partículas maiores que esta dimensão (figura 3.05).

Foram coletadas três cápsulas de alumínio do solo destorroado, para determinação do teor de umidade higroscópica médio ( $W_h$ ), calculado de acordo com a equação 5. Esta informação é necessária para o ensaio de compactação.

$$W_h = \frac{M_u - M_o}{M_o - T} \times 100\% \quad (5)$$

onde:  $W_h$  - teor de umidade higroscópica (em %)  
 $M_u$  - massa do solo úmido mais a massa da cápsula (em g)  
 $M_o$  - massa do solo seco mais a massa da cápsula (em g)  
 $T$  - massa da cápsula, ou tara (em g)



**Figura 3.05** - a) Destorroamento do solo seco ao ar: passagem pela peneira # 4,8 mm;  
b) destorroamento com um taco de madeira e  
c) passagem pela peneira # 2,0 mm

O solo destorroado foi armazenado em sacos plásticos e lacrados, para evitar alterações de umidade.

### 3.2.7 Ensaio de compactação - umidade ótima ( $W_{ót}$ ) e massa específica seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ )

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986), com energia de compactação normal, ou seja: molde cilíndrico pequeno ( $\phi$  100 mm e altura de 127,3 mm), soquete pequeno - massa de (2.500,00  $\pm$  10) g, altura de queda de (305  $\pm$

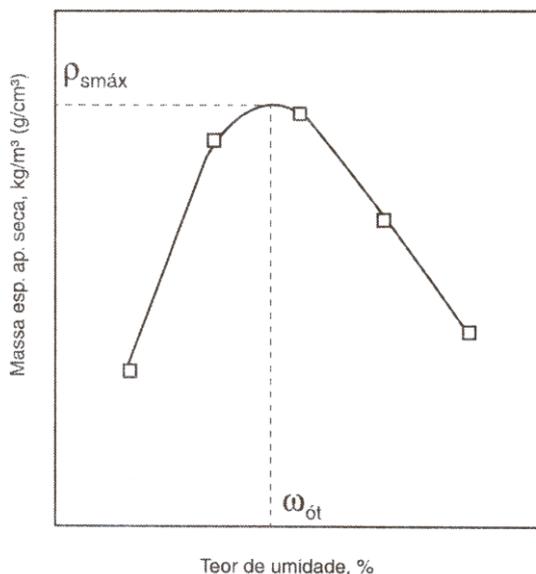
2) cm, preenchido em 3 camadas, com aplicação de 26 golpes por camada. O ensaio foi realizado sem reuso do material.

De acordo com Yamasaki (2012), a energia de compactação (EC) é dada pela equação 6.

$$EC = \frac{M \times g \times N \times n \times H}{V} \quad (6)$$

onde: EC - energia de compactação (em J/m<sup>3</sup>)  
M - massa do soquete (em kg)  
g - aceleração da gravidade (em m/s<sup>2</sup>)  
n - número de camadas  
N - número de golpes por camada  
H - altura de queda (em m)  
V - volume do molde (em m<sup>3</sup>)

Portanto, como o volume do cilindro é de 1 litro, para a configuração de norma, a energia de compactação foi de 583 kJ/ m<sup>3</sup>. Este ensaio consiste, resumidamente, em determinar a massa específica aparente seca do CP cilíndrico ( $\rho_d$ ), variando-se o teor de umidade do solo (**W**), construir a curva de compactação ( $\rho_d \times \mathbf{W}$ ) e determinar o ponto de máximos, ou seja, massa específica seca máxima do CP cilíndrico ( $\rho_{d,máx}$ ) e o teor de umidade correspondente, denominado teor de umidade ótimo de compactação (**W<sub>ót</sub>**), conforme ilustrado na figura 3.06.



**Figura 3.06** - Exemplo de curva de compactação, de acordo com a norma NBR 12023 (ABNT, 2012)

### 3.2.8 Proposta de alteração do ensaio de compactação (novo CP)

As normas NBR 12023 (ABNT, 2012f) e NBR 12024 (ABNT, 2012g), para solo-cimento, adotam o mesmo molde e procedimentos da norma NBR 7182 (ABNT, 1986). Como já comentado no capítulo "Revisão Bibliográfica", os corpos de prova assim produzidos apresentam três inconvenientes:

- Cada corpo de prova consome muito solo (cerca de 2 kg);
- As dimensões do molde levam a produção de um corpo de prova muito robusto (diâmetro de 100 mm e altura de 127,3 mm, denominado **CP 10x12,7**), com relação entre altura e diâmetro  $h/d < 2$ ; e,
- O ensaio de apenas 3 corpos de prova dificulta a análise estatística dos resultados.

Para contornar estes problemas, no presente trabalho é proposta a utilização de um cilindro (molde) com  $\phi = 50$  mm e altura de 100 mm (denominado **CP 5x10**), semelhante ao dos corpos de prova de argamassa normal definidos pela norma NBR 7215 (ABNT, 1996).

Com este corpo de prova menor (CP 5x10), a relação  $h/d = 2$  é melhor do ponto de vista da resistência dos materiais e o consumo de solo é de menos de 400 g, agilizando muito o processo e possibilitando o ensaio de um número maior de indivíduos, para o estudo de solo-cimento.

No entanto, com a alteração do tamanho do molde, foi necessário ajustar o ensaio de compactação estabelecido pela norma NBR 12023 (ABNT, 2012f). Para tanto, havia duas possibilidades: 1) manter a energia de compactação ou 2) manter a massa específica seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ).

Para o corpo de prova CP 5x10 (volume  $V = 196,35 \text{ cm}^3$ ), adotou-se o soquete de 2,285 kg, com altura de queda de 0,30 m. Para manter a energia de compactação ( $583 \text{ kJ/m}^3$ ), com 3 camadas, o número de golpes por camada, calculado de acordo com a equação 3, seria  $N = 5,67$  (que poderia ser aproximado para 6).

Como as condições de contorno são diversas nas duas situações (CP 5x10 e CP 10x12,7), optou-se por manter  $\rho_{d,máx}$ , porque este é um parâmetro que tem influência direta na resistência e durabilidade do material, já que quanto maior  $\rho_{d,máx}$ , menor a

porosidade. Assim sendo, realizou-se um ensaio de compactação com 6 golpes por camada, além de outros ensaios, variando-se o número de golpes, para escolher aquele que produzisse o mesmo  $\rho_{d,máx}$  do ensaio da norma NBR 12023 (ABNT, 2012f).

### 3.2.9 Avaliação da variação de massa específica entre as camadas do corpo de prova de compactação

Considerando-se a anisotropia do solo e do solo-cimento compactado, comprovadas por Santos (2015) e Milani (2008), respectivamente, no presente trabalho também se notou uma variação de coloração entre as camadas dos corpos de prova CP 5x10, como mostrado na figura 3.07, e é proposto um método simplificado para avaliar a possível variação de massa específica aparente do solo-cimento ( $\rho_{d,sc}$ ) entre as camadas de compactação.

Para um estudo mais aprofundado, pode ser adotada a estratégia metodológica proposta, e detalhadamente descrita, por Santos (2015).



**Figura 3.07** - Variação de coloração entre as 3 camadas de compactação do CP 5x10 recém-compactado, supostamente decorrente da variação de massa específica

Considerando-se que para o solo-cimento, diferentemente do solo puro, o corpo de prova pode ser seco em estufa, a proposta de ensaio (com alguns aspectos mostrados na figura 3.08) resume-se em:

- Aguardar o processo de cura do corpo de prova, por pelo menos 7 dias;
- Secar o CP ao ar;

- Cortar o CP em três partes, separando-se as três camadas de compactação;
- Secar as partes do CP em estufa a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , por 24 h ou até constância de massa;
- Medir a massa seca de cada parte ( $M_0$ );
- Medir as dimensões de cada parte, sendo: dois diâmetros ortogonais e na posição média da altura do CP; e quatro alturas em posições equidistantes;
- Com as dimensões médias, calcular o volume de cada parte seca ( $V_0$ ); e,
- Calcular a massa específica aparente seca ( $\rho_{d,sc}$ ) de cada parte pela equação 7.

$$\rho_{d,sc} = \frac{M_0}{V_0} \quad (7)$$

onde:  $M_0$  - massa da parte de corpo de prova seco (em g)  
 $V_0$  - volume aparente da parte do corpo de prova de solo-cimento seco (em  $\text{cm}^3$ )  
 $\rho_{d,sc}$  - massa específica aparente da parte de corpo de prova de solo-cimento (em  $\text{g}/\text{cm}^3$ )

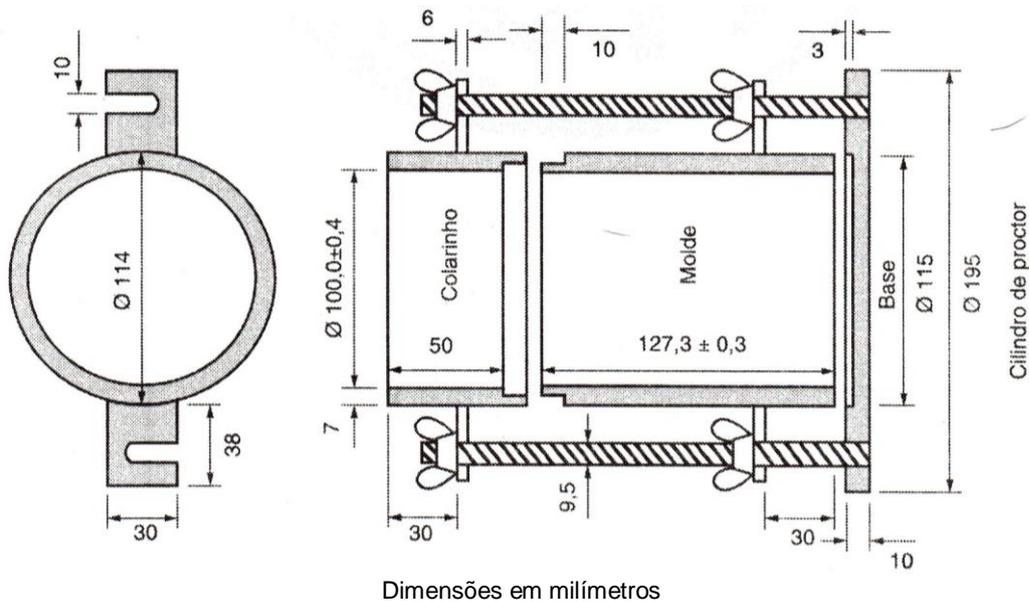
Alguns aspectos destas etapas são mostrados na figura 3.08.



**Figura 3.08** – a) Dispositivo para corte dos corpos de prova; b) identificação das partes e c) partes preparadas para irem a estufa

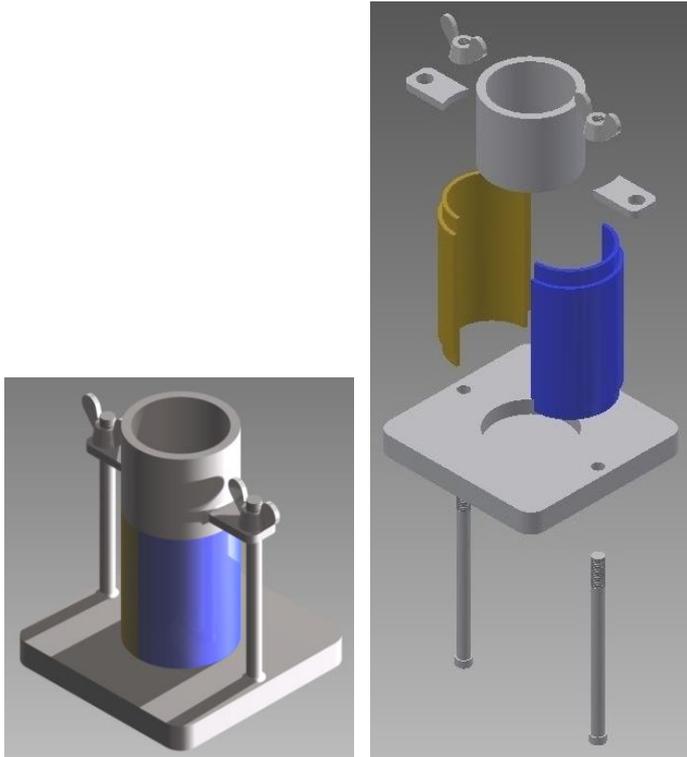
### 3.3 PROJETO E PRODUÇÃO DO MOLDE METÁLICO PARA OS CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO

Em substituição ao molde adotado pelas normas NBR 7182 (ABNT, 1986), NBR 12023 (ABNT, 2012f) e NBR 12024 (ABNT, 2012g), apresentado na figura 3.09, foi projetado o molde apresentado na figura 3.10, para a produção dos CP 5x10. O molde foi produzido no Laboratório de Usinagem, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia, da UNESP - Campus de Bauru.



**Figura 3.09** - Molde cilíndrico, para o CP 10x12,7, da norma NBR 12024 (ABNT, 2012)

O corpo do molde proposto foi projetado bipartido para facilitar a desmoldagem, em substituição ao extrator hidráulico manual (figura 3.11), tradicionalmente utilizado mas que demanda muito tempo para operação. O desempenho desse molde foi avaliado durante a realização dos ensaios, quando concluiu-se que não foi satisfatório. O projeto e execução de um novo molde foi considerado como parte dos resultados do trabalho e é apresentado no capítulo correspondente.



**Figura 3.10** - Ante-projeto do molde proposto, para produção de CP 5x10



**Figura 3.11** - Extrator hidráulico manual, para o CP 10x12,7 adotado pela norma NBR 7182 (ABNT, 1986)

### 3.4 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO

Os corpos de prova foram produzidos por compactação, em três camadas e com o número de golpes de acordo com os resultados obtidos no item 3.3.8. Para esta produção, os experimentos foram planejados, preparados os materiais, moldados os corpos de prova e realizada sua cura.

#### 3.4.1 Planejamento dos experimentos

De acordo com a norma NBR 12253 (ABNT, 2012j), para a dosagem do solo-cimento, devem ser ensaiados pelo menos três corpos de prova, com no mínimo três teores de cimento (traços), pelo ensaio de determinação da resistência à compressão ( $f_{c,sc}$ ). De acordo com a norma NBR 13555 (ABNT, 2012L), devem ser ensaiados pelo menos dois corpos de prova, para determinação da absorção de água (**AA**).

Portanto, para o estudo de dosagem, optou-se por moldar 6 corpos de prova de cada traço, sendo 3 para determinação de  $f_{c,sc}$  e 3 para determinação de AA. Estes corpos de prova já foram moldados no formato CP 5x10.

Como os requisitos de resistência à compressão mínima variam desde 1,0 MPa (NBR 13553, ABNT, 2012j) até 3,0 MPa (NBR 15270-2, ABNT, 2005b), optou-se por estudar 5 traços, com os seguintes teores de cimento: 1%, 3%, 6%, 10% e 15%. O teor de cimento é a relação, em porcentagem, entre a massa de cimento e a massa de solo seco.

Em função da massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{s,máx}$ ), da umidade higroscópica do solo ( $W_h$ ) e do volume do molde ( $V$ ), calculou-se a quantidade total de solo úmido necessária para moldagem de 6 corpos de prova, de cada traço.

Com  $W_h$  calculou-se a massa de solo seco e a quantidade de água contida no total de solo úmido. Com a massa de solo seco calculou-se a massa de cimento correspondente a cada traço. Com a quantidade de água contida, calculou-se a massa de água que seria necessária acrescentar para atingir a umidade ótima de compactação ( $W_{ót}$ ). Estes cálculos são detalhados no **Apêndice 2**.

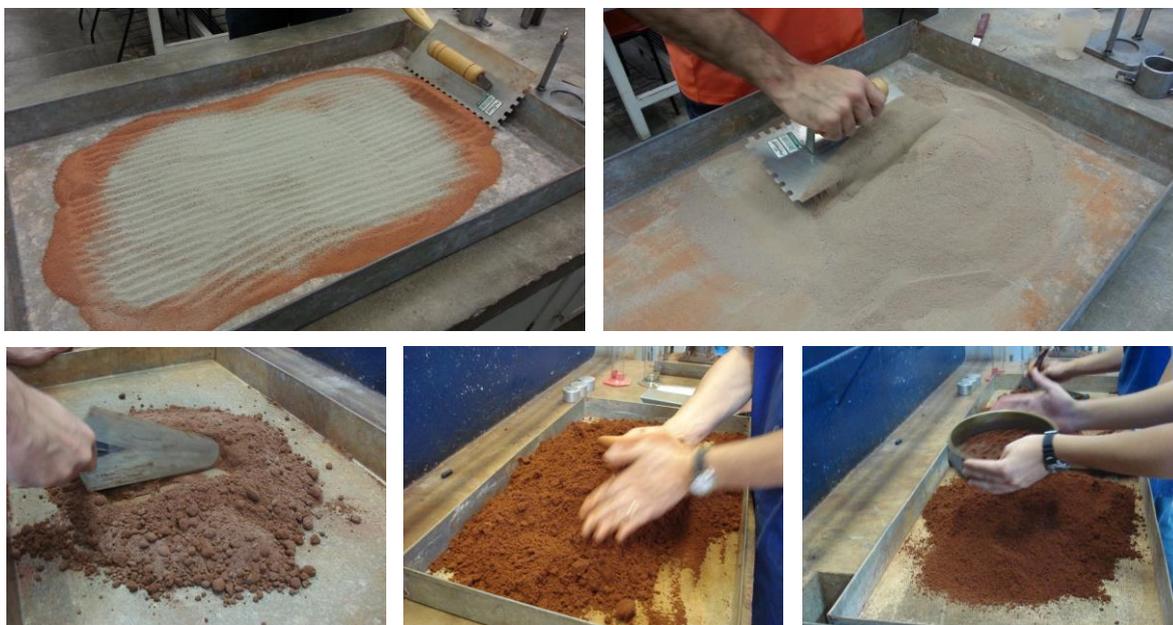
Após a conclusão do estudo de dosagem, foi escolhido o traço mais adequado ao atendimento dos requisitos de resistência das normas brasileiras de solo-cimento. Com este traço foram produzidos os seguintes corpos de prova, para avaliação da metodologia proposta:

- 10 CP 5x10 para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade. Destes, 3 CP foram ensaiados sem medidor de deformação, para determinar a resistência à compressão estimada, necessária ao planejamento da retirada dos medidores instalados nos demais 7 CP;
- 3 CP 10x12,7 (convencional de norma), para determinar  $f_c$  e comparar com os resultados do grupo anterior;
- 10 CP 5x10 para o ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral; e,
- 3 CP 10x12,7 (convencional de norma), para determinar resistência à tração por compressão diametral e comparar com os resultados do grupo anterior.

### 3.4.2 Preparação do material

O solo a ser utilizado na produção dos corpos de prova foi seco ao ar e destorroado, de acordo com os procedimentos descritos no item 3.2.7.

A quantidade de solo calculada de acordo com o item anterior foi espalhada em uma bandeja metálica, em seguida foi adicionada a quantidade de cimento correspondente ao traço em elaboração e este material seco foi misturado até completa homogeneização. Em seguida, foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir  $W_{ót}$  e a mistura foi homogeneizada e destorroada, conforme mostrado na figura 3.12.



**Figura 3.12** - Mistura seca de solo e cimento (linha superior). Adição de água, homogeneização e destorroamento da mistura úmida (linha inferior)

### 3.4.3 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos CP 5x10 foram moldados por compactação, conforme procedimento descrito no item 3.2.8, ou seja, em três camadas de iguais alturas, compactadas com o número de golpes necessário para obtenção da massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ).

O solo preparado no item anterior foi colocado no molde com o auxílio de um funil (encaixado na gola do molde), em quantidade suficiente para produzir uma camada compactada de altura igual a  $1/3 h$ ; acomodado com uma haste própria para esta

operação e compactado com o número de golpes definido. Em seguida, a superfície da camada compactada foi escarificada (com uma faca pontiaguda de mesa), para receber a segunda camada, produzida como a primeira. Sua superfície também foi escarificada, para receber a terceira camada. Ao realizar a segunda camada, foi coletada uma amostra do solo em cápsula de alumínio, para determinação do teor de umidade do CP (**W**).

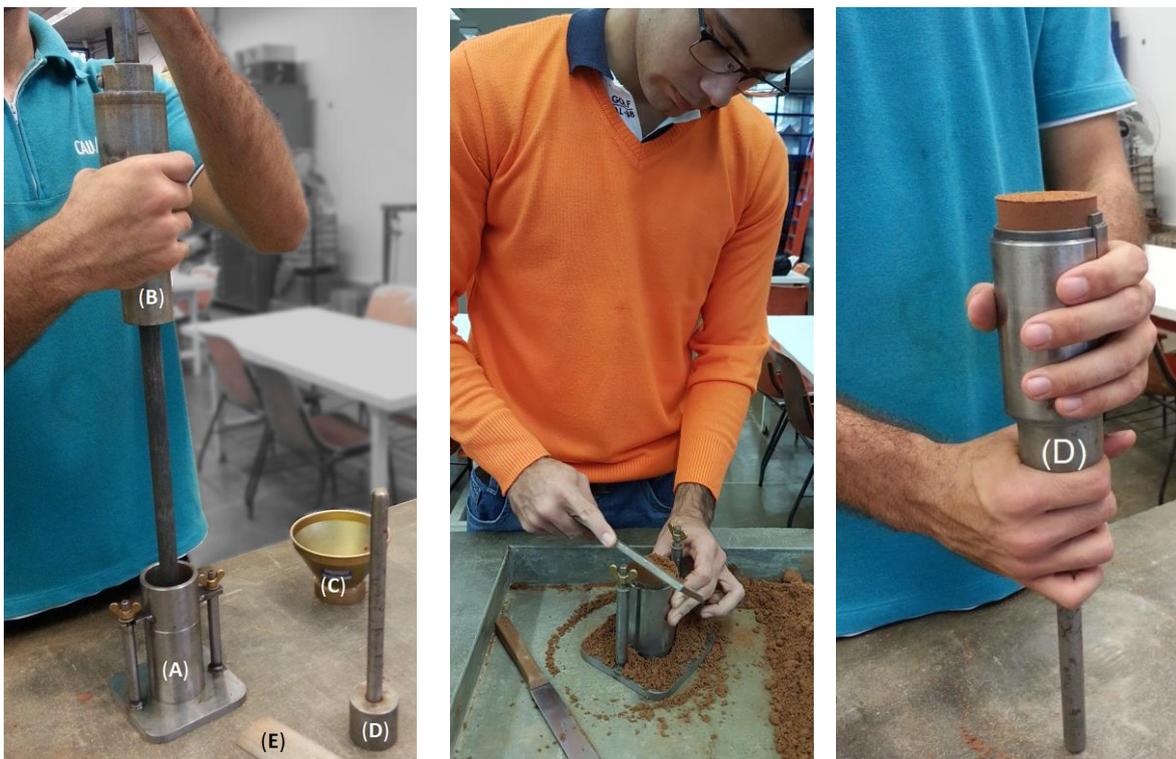
Após a terceira camada, foi retirada cuidadosamente a gola e o excesso de solo foi removido com régua biselada (figura 3.13), para medir a massa do conjunto CP e molde, para o cálculo da massa específica aparente seca do solo-cimento ( $\rho_{d,sc}$ ) e de seu grau de compactação (**GC**), que é calculado pela equação 8.

$$GC = \frac{\rho_{d,sc}}{\rho_{d,m\acute{a}x}} \times 100\% \quad (8)$$

onde: GC - grau de compactação (em %)

$\rho_{d,sc}$  - massa específica aparente seca do solo-cimento (em g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_{d,m\acute{a}x}$  - massa específica aparente seca máxima, do ensaio de compactação (em g/cm<sup>3</sup>)



**Figura 3.13** - Moldagem dos corpos de prova. Esquerda: (A) molde, (B) soquete, (C) funil para colocar o solo no molde, (D) haste para acomodar o solo no molde, (E) régua biselada para rasar o corpo de prova. Direita: extração do corpo de prova com auxílio da haste (D)

De acordo com a norma NBR 12024 (ABNT, 2012), há uma tolerância de 2% em GC, ou seja:  $98\% \leq GC \leq 102\%$ . A tolerância para o teor de umidade dos corpos de prova ( $W$ ) é de 0,5%, ou seja:  $W_{ót} - 0,5\% \leq W \leq W_{ót} + 0,5\%$ , onde  $W_{ót}$  é a umidade ótima de compactação. Caso não satisfaça uma destas condições, o CP deve ser descartado.

#### 3.4.4 Cura dos corpos de prova

Após a moldagem, os corpos de prova devidamente identificados foram mantidos em câmara úmida, à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95%, para o processo de cura do cimento, durante 7 dias. Os corpos de prova foram cobertos com um tecido de algodão, umedecido, para evitar a incidência direta de possíveis jatos de água decorrentes do sistema automático de aspersão, conforme mostrado na (figura 3.14).



**Figura 3.14** - Aspecto externo da câmara úmida (com controles automáticos de temperatura e umidade) e corpos de prova durante a cura em seu interior

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO SOLO-CIMENTO

A caracterização física do solo-cimento consistiu na determinação do *índice de absorção de água* e do *índice de vazios*. A *massa específica aparente*, também uma característica física, foi determinada durante a compactação dos corpos de prova. A caracterização mecânica se deu pelos seguintes ensaios: determinação da *resistência à compressão axial*; determinação do *módulo de elasticidade estático à compressão* e determinação da *resistência à tração por compressão diametral*.

### 3.5.1 Ensaio de determinação da absorção de água (AA), do índice de vazios ( $e_{sc}$ ) e da porosidade ( $n_{sc}$ ) do solo-cimento

A absorção de água foi determinada de acordo com a norma NBR 13555 (ABNT, 2012), com 3 corpos de prova de cada traço. Após 7 dias de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, retirado o excesso de água superficial com um pano úmido e medida a massa úmida ( $M_w$ ).

Em seguida, foram colocados em estufa, a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , por 24 h. Após este período, mediu-se a massa seca em estufa ( $M_0$ ). Após o resfriamento à temperatura ambiente, os corpos de prova foram colocados imersos em água (temperatura ambiente), por 24 h. Em seguida, foram retirados da água, tiveram a superfície enxugada com um pano úmido (para retirar o excesso de água superficial) e mediu-se a massa saturada ( $M_{sat}$ ). O índice de absorção de água (AA) foi calculado pela equação 9.

$$AA = \frac{M_{sat} - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (9)$$

onde: AA - índice de absorção de água (em %)  
 $M_0$  - massa do corpo de prova seco em estufa (em g)  
 $M_{sat}$  - massa do corpo de prova saturado, por imersão em água por 24 h (em g)

De acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), para calcular o índice de vazios ( $I_v$ ) de concretos e argamassas, relação entre o volume de vazios e o volume aparente, o volume do material sólido (descontados os vazios) é determinado com auxílio de balança hidrostática e o cálculo feito pela equação 10.

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_0}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100\% \quad (10)$$

onde:  $I_v$  - índice de vazios (em %)  
 $M_0$  - massa do corpo de prova seco em estufa (em g)  
 $M_{sat}$  - massa do corpo de prova saturado, por imersão em água por 72 h (em g)  
 $M_{sub}$  - massa do corpo de prova saturado imerso em água (em g)

De acordo com esta norma, para obtenção de  $M_{sat}$  é necessário deixar o corpo de prova imerso em água por 72 h, sendo que nas primeiras 4 h a água deve chegar até 1/3 da altura do CP; em seguida, aumenta-se este nível para 2/3; espera-se mais 4 h, então,

cobre-se totalmente o CP com água pelas 64 h seguintes. Ao final do período, retira-se o CP da água, enxuga-se sua superfície com pano úmido e mede-se  $M_{\text{sat}}$ .

Após a saturação do CP em água, mede-se  $M_{\text{sub}}$  com auxílio de uma balança hidrostática.

O índice de vazios ( $I_v$ ) estabelecido pela norma de concreto difere do adotado na área de mecânica dos solos. De acordo com Caputo e Caputo (2015), para os solos, o índice de vazios é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos e é designado por "e". A relação, em porcentagem, entre o volume de vazios e o volume total (sólidos mais vazios) é denominada porosidade, designada por "n", conforme apresentado nas equações 11.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad n = \frac{V_v}{V_T} \times 100\% \qquad (11)$$

onde: e - índice de vazios  
 $V_v$  - volume de vazios  
 $V_s$  - volume de solo (sem vazios)

n - porosidade (em %)  
 $V_T$  - volume total (solo + vazios)

Como não há previsão de cálculo do índice de vazios e da porosidade nas normas de solo-cimento, no presente trabalho também é apresentada uma proposta de determinação deste parâmetro. Como a massa específica dos grãos de solo e dos grãos de cimento já foram determinadas em outros ensaios, alternativamente o índice de vazios pode ser determinado sem necessidade da balança hidrostática, conforme demonstrado nas equações 12 a 16.

$$e_{sc} = \frac{V_v}{V_{sc}} \qquad n_{sc} = \frac{V_v}{V_T} \times 100\% \qquad (12)$$

onde:  $e_{sc}$  - índice de vazios do solo-cimento  
 $V_v$  - volume de vazios  
 $V_{sc}$  - volume de solo-cimento (sem vazios)

n - porosidade do solo-cimento (em %)  
 $V_T$  - volume total (solo + cimento + vazios)

$$M_T = M_s + M_c \qquad M_c = p \cdot M_s \qquad (13)$$

onde:  $M_T$  - massa total  
 $M_s$  - massa de solo  
 $M_c$  - massa de cimento

p - proporção de cimento em relação ao solo seco (%/100)  
 $M_s$  - massa de solo  
 $M_c$  - massa de cimento

$$\rho_{d,sc} = \frac{M_T}{V_T} \qquad \rho_s = \frac{M_s}{V_s} \qquad \gamma_c = \frac{M_c}{V_c} \qquad (14)$$

onde:  $\rho_{d,sc}$  - massa específica aparente do solo-cimento seco

---

|  |                        |                           |
|--|------------------------|---------------------------|
| $\rho_s$ - massa específica dos grãos de solo      |                        |                           |
| $\gamma_c$ - massa específica dos grãos de cimento |                        |                           |
| $M_T$ - massa total                                | $M_s$ - massa de solo  | $M_c$ - massa de cimento  |
| $V_T$ - volume total                               | $V_s$ - volume de solo | $V_c$ - volume de cimento |

$$e_{sc} = \frac{(1+p)}{\rho_{d,sc} \left( \frac{1}{\rho_s} + \frac{p}{\gamma_c} \right)} - 1 \quad (15)$$

$$n_{sc} = \left[ 1 - \frac{\rho_{d,sc} \left( \frac{1}{\rho_s} + \frac{p}{\gamma_c} \right)}{(1+p)} \right] \times 100\% \quad (16)$$

Foram ensaiados 3 corpos de prova CP 5x10, de acordo com o método da norma NBR 9778 (ABNT, 2005), e os resultados foram comparados com os calculados pela equação 15.

### 3.5.2 Ensaio de determinação da resistência à compressão axial do solo-cimento ( $f_{c,sc}$ )

O ensaio de determinação da resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a norma NBR 12025 (ABNT, 2012h), substituindo-se o CP 10x12,7 pelo CP 5x10, proposto no presente trabalho. Foram ensaiados 3 corpos de prova de cada traço, utilizando-se uma máquina universal de ensaios informatizada, marca EMIC, modelo DL30000 (capacidade de carga de 30.000 kgf), com avanço do prato de aplicação da carga na razão de 1 mm/min.

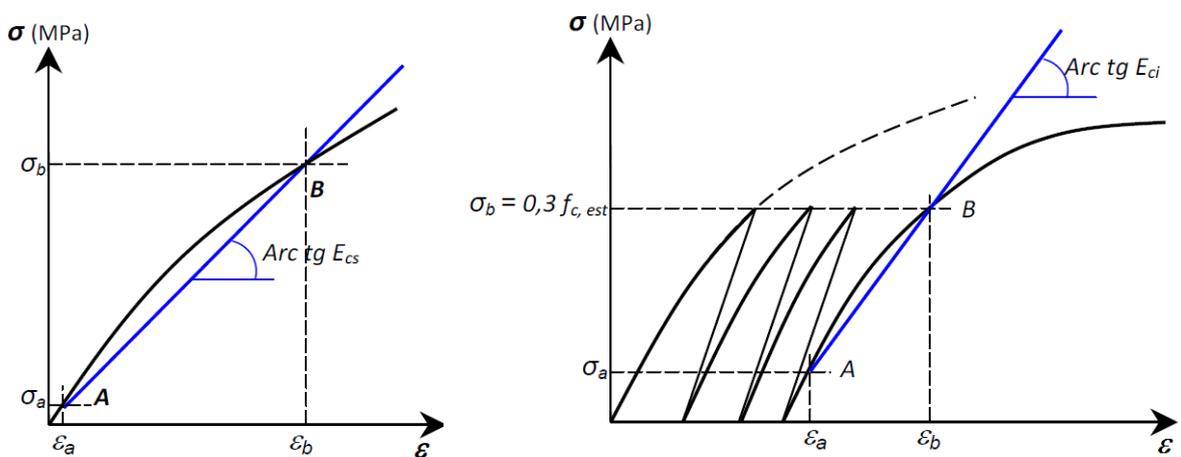
O script completo para realização do ensaio está apresentado no **Apêndice 3** e a proposta é que este ensaio seja utilizado para estudo de dosagem de solo-cimento.

### 3.5.3 Ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do solo-cimento ( $E_{csc}$ )

Não existe norma técnica brasileira para determinação do módulo de elasticidade de solo-cimento, porém, este é um parâmetro de rigidez do material, muito importante para o estudo do desempenho estrutural de paredes. Apesar do solo-cimento compactado ser

considerado um material anisotrópico (MILANI, 2008), assim como o solo compactado (SANTOS, 2015), no presente trabalho são propostos procedimentos para sua determinação baseados em adaptações da norma NBR 8522 (ABNT, 2008), uma norma de concreto, material considerado isotrópico.

De acordo com esta norma, são considerados dois módulos de deformação do concreto: *módulo de deformação secante* ( $E_{cs}$ ) e *módulo de elasticidade ou de deformação tangente inicial* ( $E_{ci}$ ), conforme representado esquematicamente na figura 3.15.

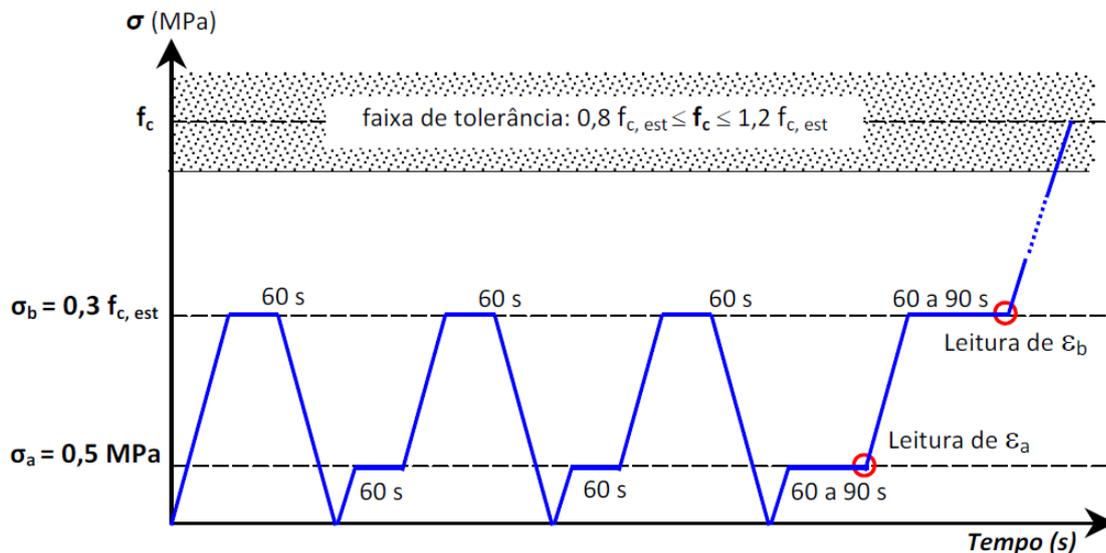


**Figura 3.15** - Módulo de deformação secante (esquerda) e módulo de deformação tangente inicial (direita), de acordo com a norma NBR 8522 (ABNT, 2008)

A norma NBR 8522 (ABNT, 2008) apresenta duas opções para determinação de  $E_{ci}$ : "Metodologia A - Tensão  $\sigma_a$  fixa" e "Metodologia B - Deformação específica  $\varepsilon_a$  fixa". Para a "Metodologia A", a norma recomenda a realização do ensaio de determinação da resistência à compressão de 2 corpos de prova, para estimar a resistência ( $f_{c, est}$ ) dos 3 corpos de prova que serão ensaiados na determinação de  $E_{ci}$ . Portanto, para o ensaio completo são necessários 5 corpos de prova. A velocidade para os carregamentos e descarregamentos deve ser de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s e o plano de carga é o apresentado na figura 3.16.

Como para o solo-cimento uma resistência à compressão de 5,0 MPa é considerada razoável, o limite inferior de 0,5 MPa (ponto A, na figura 3.15) corresponderia a 10% desta resistência e resultaria em um intervalo muito pequeno com os 30% de  $f_{c, est}$  (ponto B, na figura 3.15) caso a resistência estimada seja menor que 5,0 MPa, diferentemente

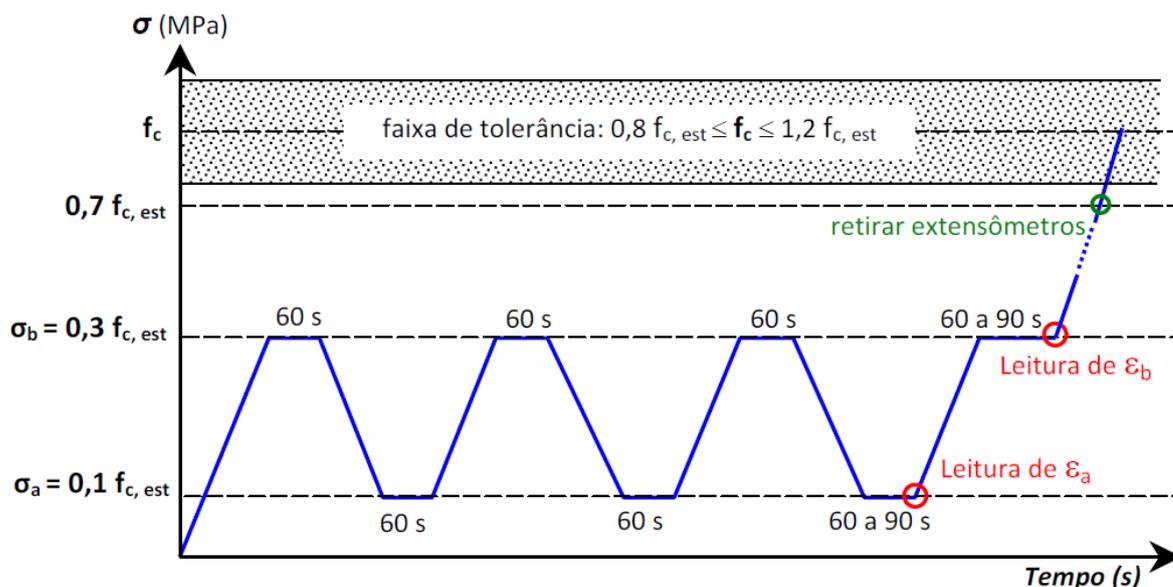
do concreto que, para uma resistência comum de 30 MPa, resultaria em 9,0 MPa (ponto B) e 0,5 MPa (ponto A).



**Figura 3.16** - Representação esquemática do plano de carga e pontos de leitura, para determinação do módulo de elasticidade - "Metodologia A", de acordo com a norma NBR 8522 (ABNT, 2008)

Portanto, no presente trabalho, propõe-se vincular o limite inferior também a  $f_{c, est}$ , fixando-o em  $0,1 f_{c, est}$ . Como a velocidade de carregamento fixada pela norma NBR 8522 (ABNT, 2008) também foi considerada muito alta para o solo-cimento, propõe-se reduzi-la para  $(1,0 \pm 0,3) \text{ MPa/min}$ , o que corresponde a incremento de carga entre 137,41 kgf/min e 259,19 kgf/min (considerando-se o diâmetro do CP de 5 cm). Também foi proposto o uso de *extensômetro eletrônico de configuração dupla* (marca EMIC), instrumento de medida de deformações mais moderno e prático que o recomendado pela norma de concreto.

Foi proposta uma simplificação no plano de carga, não realizando o descarregamento até a tensão zero e, como foram utilizados os extensômetros eletrônicos, foi prevista uma parada a  $0,7 f_{c, est}$  no último estágio do carregamento, para a retirada dos instrumentos. O plano de carga proposto é apresentado na figura 3.17.



**Figura 3.17** - Representação esquemática do plano de carga e pontos de leitura e de retirada dos extensômetros, proposto no presente trabalho

Ao final do ensaio, a resistência à compressão efetiva ( $f_c$ ) não pode diferir em mais que 20% de  $f_{c, est}$ , caso contrário, o ensaio deve ser invalidado. O script completo para este ensaio é apresentado no **Apêndice 4** e o módulo estático de elasticidade à compressão do solo-cimento ( $E_{csc}$ ) é calculado pela equação 17.

$$E_{csc} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (17)$$

onde:  $E_{csc}$  - módulo estático de elasticidade à compressão do solo-cimento (em MPa)  
 $\sigma_a$  - tensão correspondente a  $0,1 f_{c, est}$  (em MPa)  
 $\sigma_b$  - tensão correspondente a  $0,3 f_{c, est}$  (em MPa)  
 $\varepsilon_a$  - deformação correspondente a  $0,1 f_{c, est}$  (adimensional)  
 $\varepsilon_b$  - deformação correspondente a  $0,3 f_{c, est}$  (adimensional)

Propõe-se moldar 10 corpos de prova para estes ensaios, sendo 3 para determinação de  $f_{c, est}$  e 7 para determinação de  $E_{csc}$  e da resistência média à compressão ( $f_c$ ). Dessa forma, aumentando-se o número de corpos de prova, é possível realizar uma análise estatística mais significativa.

Como seria desnecessário realizar estes ensaios com todos os traços, os mesmos foram realizados apenas com o traço mais significativo deles, ou seja, após a realização dos ensaios de dosagem propostos no item 3.5.2, aquele traço que possibilitou o atendimento simultâneo dos requisitos de resistência à compressão estabelecidos pelas normas de solo-cimento e de materiais cerâmicos, conforme apresentado no **Apêndice 5**.

Para efeito de comparação entre os resultados de resistência à compressão obtidos nos dois tipos de corpos de prova, CP 5x10 e CP 10x12,7, com este mesmo traço também foram moldados e ensaiados 3 corpos de prova CP 10x12,7, cujo script de ensaio encontra-se no **Apêndice 6**.

### 3.5.4 Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral ( $f_{t,D,sc}$ ) do solo-cimento

Apesar de no Brasil não ser usual a consideração da resistência à tração de elementos de alvenaria no cálculo e dimensionamento de paredes, por não ser considerada uma região de vulnerabilidade sísmica, no presente trabalho também foi proposto um método de determinação deste parâmetro. O conhecimento da resistência à tração pode ser útil na avaliação do desempenho estrutural de paredes construídas com terra (taipa, por exemplo) em trabalhos de intervenção no patrimônio arquitetônico, em locais sujeitos a vibrações decorrentes do tráfego de veículos, como acontece por exemplo nas cidades de Ouro Preto - MG e de Salvador - BA (Muñoz et al., 2014).

De acordo com a da norma NBR 7222 (ABNT, 2011), para concretos e argamassas, a resistência à tração é determinada através do ensaio de compressão diametral e denominada *resistência à tração por compressão diametral do concreto* ( $f_{ct,sp}$ ). Foi proposta uma adaptação desta norma, adotando-se o CP 5x10.

Produziu-se uma série de 10 corpos de prova CP 5x10, sendo 7 deles ensaiados para determinação da resistência à tração por compressão diametral do solo-cimento ( $f_{tD,sc}$ ) e 3 para o ensaio de determinação de **AA** e **I<sub>v</sub>**. Para efeito de comparação, também foram ensaiados 3 corpos de prova CP 10x12,7. Adotou-se taxa de incremento de tensão de  $(0,30 \pm 0,12)$  MPa/min e a resistência à tração é calculada pela equação 18.

$$f_{tD,sc} = \frac{2 F}{\pi d h} \quad (18)$$

onde:  $f_{tD,sc}$  - resistência à tração por compressão diametral do solo-cimento (em MPa)  
F - força máxima (ou força de ruptura) (em N)  
d - diâmetro do CP, média de duas medidas ortogonais na região central (em mm)  
h - altura do CP, medida no seu eixo (em mm)

Como o *software* da máquina universal (utilizada para realização dos ensaios) apenas consegue calcular tensão como o quociente de uma força por uma área, foi necessário

calcular a área equivalente (de acordo com a equação 19), que é uma variável de entrada, conforme apresentado no script do ensaio (**Apêndices 7 e 8**).

$$A_{eq} = \frac{\pi d h}{2} \quad (19)$$

Dessa forma, a equação 18 passa a ser substituída pela equação 20.

$$f_{tD,sc} = \frac{F}{A_{eq}} \quad (20)$$

onde:  $f_{tD,sc}$  - resistência à tração por compressão diametral do solo-cimento (em MPa)  
F - força máxima (ou força de ruptura) (em N)  
 $A_{eq}$  - área equivalente, calculada pela equação 19 (em mm<sup>2</sup>)

Para realização do ensaio, foi utilizado o dispositivo da máquina universal de ensaio próprio para corpos de prova de concreto 10x20 (diâmetro 10 cm, altura 20 cm). Para o correto posicionamento do CP 5x10, centrado sobre a régua de madeira do dispositivo, foi adotado um par de gabaritos de madeira, conforme mostrado na figura 3.18.

Também foram ensaiados 3 corpos de prova CP 10x12,6, para comparação dos resultados.



**Figura 3.18** - Posicionamento de um CP 5x10, com auxílio do gabarito de madeira (esquerda) e ensaio de um CP 10x12,6, notando-se a ruptura no plano diametral (direita)

### 3.6 FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados foram analisados de acordo com os parâmetros estatísticos básicos, ou seja, valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação das amostras.

Como os parâmetros de resistência mecânica são utilizados para dimensionamento e avaliação estrutural de elementos construtivos, os valores médios isoladamente não são suficientes, nem seguros. Há que se levar em consideração a dispersão dos valores individuais em torno da média, representada, por exemplo, pelo desvio padrão ( $S_d$ ), para adotar um valor de resistência que atenda a determinado nível de confiança, denominado "valor característico", dado pelos critérios da estatística. Na engenharia estrutural, adota-se o "valor de cálculo", aplicando-se um coeficiente de segurança sobre o valor característico.

A norma brasileira NBR 15812-2 (ABNT, 2010) estabelece o método descrito em seu item "8.2 Resistência característica" (reproduzido no **Anexo A**) para cálculo de valores característicos de resistência à compressão. Este método é considerado de difícil aplicação e no presente trabalho é proposta a simplificação apresentada a seguir, baseada no mesmo princípio estatístico.

Admitindo-se que os resultados de resistência do solo-cimento, seja à compressão ou à tração por compressão diametral, se ajustam a uma distribuição normal (DN), define-se a resistência característica ( $f_k$ ) como sendo *o valor acima do qual existe a probabilidade de se encontrarem 95% dos resultados individuais da população*, calculado pela equação 21, baseados nos resultados de média e desvio padrão da amostra.

$$f_k = f_m - 1,645 \times S_d \quad (21)$$

onde:  $f_k$  é a resistência característica do material;  
 $f_m$  é a resistência média da amostra ( $n$  corpos de prova);  
 $S_d$  é o desvio padrão da amostra.

O valor 1,645 é obtido da tabela "z" da distribuição normal padronizada (DNP), correspondente a probabilidade de 95%, de acordo com Correa (2003).

Nos casos de propostas de alteração nos métodos de ensaio, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos pelos métodos normalizados e os propostos no

presente trabalho. Quando haviam resultados obtidos por outros autores, também realizaram-se comparações e discussões com estes.

Dentre os resultados obtidos, também foi considerado e discutido o desempenho do molde proposto para produção dos corpos de prova de solo-cimento.



capítulo **4**

# RESULTADOS E DISCUSSÕES



**N**este capítulo são apresentados e discutidos os resultados médios de todos os ensaios realizados, assim como os demais parâmetros estatísticos (desvio padrão e coeficiente de variação). Os resultados individuais são apresentados nos respectivos apêndices.

A apresentação destes resultados obedece a mesma ordem que os ensaios foram apresentados no capítulo "3. ESTRATÉGIA METODOLÓGICA" e sua discussão é apresentada logo após cada um deles. A agenda de planejamento e realização dos ensaios é apresentada nos **Apêndices 9 e 10**.

#### **4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CIMENTO**

A determinação das características físicas e mecânicas do cimento é importante e indispensável, para verificação do atendimento das especificações da norma NBR 5733 (ABNT, 1991), o que será decisivo na aceitação ou rejeição do material. A seguir, são apresentados os resultados obtidos e as conclusões sobre o atendimento da norma.

##### **4.1.1 Massa específica do cimento ( $\gamma_c$ )**

Considerando-se a massa da amostra de cimento de 60 g, feitas as leituras do volume inicial ( $V_i = 0,3 \text{ cm}^3$ ) e do volume final do frasco de Le Chatelier ( $V_f = 20,0 \text{ cm}^3$ ), e calculando-se pela equação 1, obteve-se o seguinte resultado para a massa específica dos grãos de cimento:

$$\gamma_c = 3,05 \text{ g/cm}^3$$

Como  $\gamma_c$  pode variar de um cimento para outro, a norma NBR 5733 (ABNT, 1991) não especifica um valor padrão para o cimento CPV ARI. Portanto, o cimento pode ser aceito, no que diz respeito a  $\gamma_c$ . O conhecimento deste parâmetro é importante para a determinação do índice de vazios do solo-cimento.

#### 4.1.2 Massa unitária do cimento solto ( $\rho_{c,s}$ )

O ensaio de determinação da massa unitária do cimento solto ( $\rho_{c,s}$ ) apresentou o seguinte resultado, cujos cálculos são apresentados no **Apêndice 15**:

$$\rho_{c,s} = 1,16 \text{ kg/dm}^3$$

#### 4.1.3 Pasta de consistência normal, fator água-cimento (A/C) e tempo de início de pega do cimento

Após 3 tentativas, na quarta a sonda de *Vicat* estacionou a 7 mm do fundo do molde, para a adição de 143,5 g de água. Portanto, o fator água-cimento (A/C), calculado de acordo com a equação 2, foi:

$$A/C = 28,7\%$$

O fator água cimento também pode ser expresso como **A/C = 0,287** litro de água para cada kg de cimento. A norma NBR 5733 (ABNT, 1991) não estabelece especificação para este parâmetro. O resultado encontrado indica qual o fator A/C adequado para obtenção da máxima resistência da pasta de cimento endurecida.

O **tempo de início de pega** obtido foi de **2 h e 36 min**. A norma NBR 5733 (ABNT, 1991) especifica mínimo de 1 h para este parâmetro. Portanto, o cimento utilizado atende a especificação, no que diz respeito ao tempo de início de pega. Os resultados dos ensaios dos itens 4.1.1 e 4.1.2 são apresentados no **Apêndice 11**.

#### 4.1.4 Resistência à compressão do cimento ( $f_c$ )

Os resultados do ensaio de determinação da resistência à compressão do cimento são apresentados na tabela 4.01 e o relatório de ensaios da máquina universal de ensaios é apresentado no **Apêndice 12**.

**Tabela 4.01** - Resultados do ensaio de determinação da resistência à compressão do cimento, aos 7 dias de idade ( $f_{c,7}$ )

| CP nº          | 1ª análise      |     |
|----------------|-----------------|-----|
|                | $f_{c,7}$ (MPa) | DR1 |
| 1              | 34,2            | 0,1 |
| 2              | 34,7            | 1,5 |
| 3              | 34,2            | 0,1 |
| 4              | 33,6            | 1,7 |
| <b>média 1</b> | <b>34,2</b>     |     |

Como não houve desvio relativo maior que 6,0%, o ensaio foi considerado válido já na primeira análise, sem necessidade da segunda, e a resistência média à compressão do cimento foi:

$$f_c = 34,2 \text{ MPa}$$

De acordo com a especificação da norma NBR 5733 (ABNT, 1991), a resistência à compressão do cimento CPV ARI deve ser de pelo menos 34 MPa, aos 7 dias de idade. Como os ensaios apontaram resistência média à compressão superior a este valor, o cimento atende a especificação.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO

Existe uma grande diversidade de ensaios de caracterização física, química e mecânica dos solos, voltados para áreas específicas de interesse, por exemplo, para a agricultura ou para a mecânica dos solos e fundações.

O solo utilizado foi caracterizado física e quimicamente, de acordo com as necessidades específicas do tema abordado no presente trabalho, ou seja, o solo como matéria prima para produção de material de construção. Neste item são apresentados os resultados dos ensaios realizados para esta caracterização.

### 4.2.1 Curva de distribuição granulométrica

A curva de distribuição granulométrica do solo é apresentada na figura 4.01 e os resultados completos dos ensaios (incluindo a determinação da massa específica dos sólidos) são apresentados no **Apêndice 13**. O ensaio de determinação da massa específica dos sólidos, ou dos grãos de solo ( $\rho_s$ ) apresentou o seguinte resultado:

$$\rho_s = 2,668 \text{ g/cm}^3$$

Este é um parâmetro característico do solo, não há uma especificação padrão de norma e é utilizado em vários outros ensaios de caracterização do solo; um deles é a determinação da curva de distribuição granulométrica, que apontou um solo com 72,5% de areia (45% fina e 32,5% média), 8% de silte e 14,5% de argila, como mostrado na tabela 4.02.

**Tabela 4.02** - Resultado da composição granulométrica do solo, em função da dimensão das partículas (d) componentes de cada fração, classificadas de acordo com a norma NBR 6502 (ABNT, 1995)

| Fração  | Quantidade (%) |
|---|----------------|
| <b>Areia grossa</b> (0,600 mm < d < 2,000 mm) | 0              |
| <b>Areia média</b> (0,200 mm < d < 0,600 mm)  | 32,5           |
| <b>Areia fina</b> (0,060 mm < d < 0,200 mm)   | 45,0           |
| <b>Silte</b> (0,002 mm < d < 0,060 mm)        | 8,0            |
| <b>Argila</b> (d < 0,002 mm)                  | 14,5           |

De acordo com os métodos da mecânica dos solos e fundações, do ponto de vista da composição granulométrica, este solo pode ser classificado como **areia fina a média, pouco argilosa, marrom claro**.

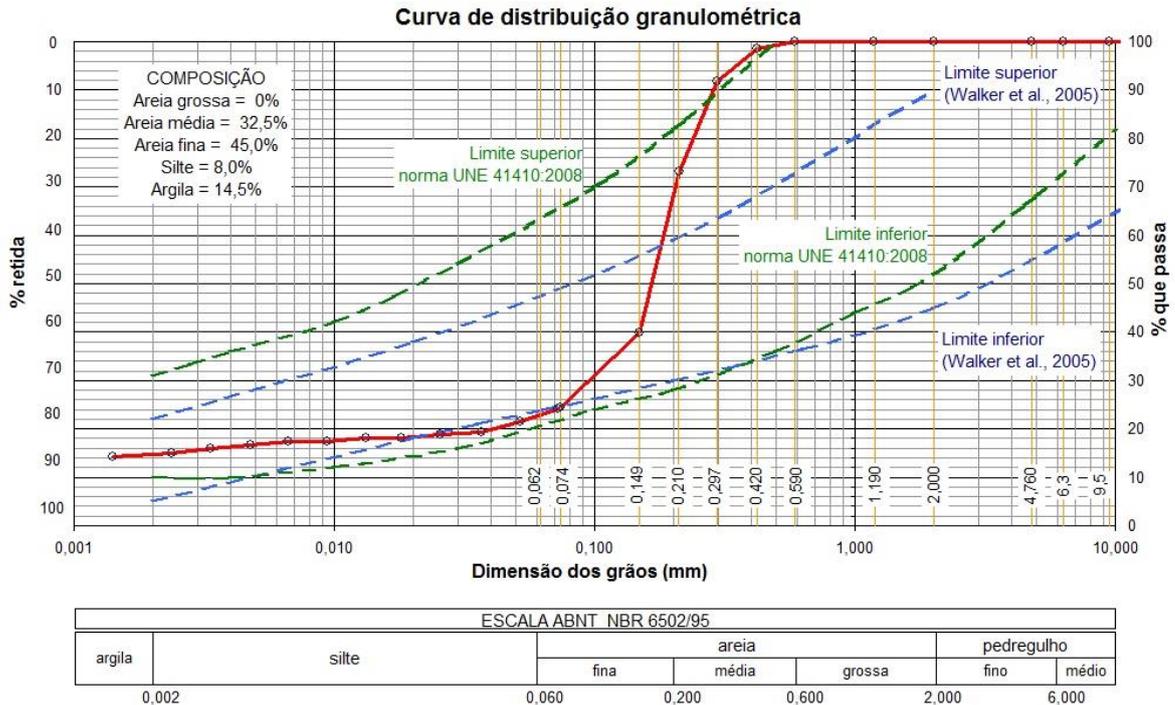
De acordo com Neves et al. (2010), figura 2.03, na área da arquitetura e construção com terra, este solo pode ser classificado como **terra areno-argilosa**.

Na área da pedologia, de acordo com Lepsch (2011), pode ser classificado simplifadamente como **terra de textura média** e, detalhadamente como **terra franco arenosa**, conforme apresentado na figura 2.04.

De acordo com a figura 4.01, nota-se que 100% deste solo passa na peneira de abertura 0,59 mm. Porém, de acordo com os limites granulométricos propostos por Walker et al. (2005), aproximadamente inseridos na figura 4.01, esta porcentagem deveria ser de, no máximo, 72%. Portanto, para o uso deste solo na produção de taipa (*rammed earth*), o mesmo deveria ser misturado com outro solo (com predominância de partículas maiores que 0,59 mm), para a incorporação de pelo menos 28% de partículas entre 0,59 mm e 10 mm. Este procedimento é muito comum na área da arquitetura e construção com terra, sendo denominado por **correção granulométrica**.

De acordo com a norma espanhola UNE 41410 (AENOR, 2008), cujos limites granulométricos para uso na produção de BTC estão apresentados na figura 2.07 e inseridos na figura 4.02, este solo seria totalmente adequado para este fim.

Ainda de acordo com Neves et al. (2010, p. 25), o solo estudado seria adequado para a utilização na produção de BTC (bloco de terra comprimida), eventualmente necessitando de correção granulométrica e estabilização com cimento ou cal, conforme apresentado na figura 2.10.



**Figura 4.01** - Curva de distribuição granulométrica do solo utilizado, observando-se os limites granulométricos propostos por Walker et al. (2005), os limites estabelecidos pela norma espanhola UNE 41410 (AENOR, 2008) e a escala granulométrica estabelecida pela norma NBR 6502 (ABNT, 1995)

#### 4.2.2 Índices de consistência (LL, LP e IP)

Os ensaios de determinação dos índices de consistência, ou *limites de Atterberg*, **limite de liquidez** (LL) e **limite de plasticidade** (LP), apresentaram os seguintes resultados, que são apresentados no **Apêndice 14**:

$$\text{LL} = 22\% \text{ e } \text{LP} = 15\%$$

Portanto, o **índice de plasticidade** ( $\text{IP} = \text{LL} - \text{LP}$ ) do solo é **IP = 7%**.

O ensaio de determinação de LP, em decorrência dos procedimentos estabelecidos por norma, sofre muita influência do operador e, por consequência, seus resultados podem variar muito. Para os solos arenosos, como o do presente trabalho, o operador precisa ser muito experiente, caso contrário, não consegue determinar LP.

O índice de plasticidade é frequentemente citado na literatura como um dos indicadores para a escolha da técnica adequada, assim como do tipo de estabilizante indicado. Houben e Guillaud (1995), por exemplo, recomendam o uso de cimento como

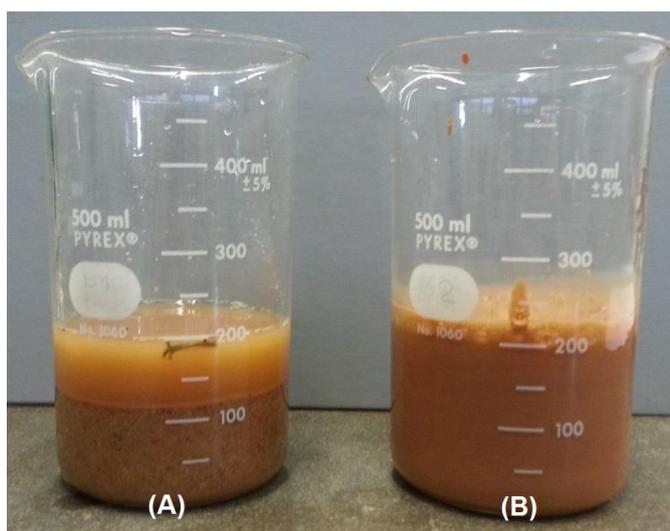
estabilizante, para este solo com IP = 7% e 17% de partículas menores que 0,08 mm (valor obtido da figura 4.01), conforme diagrama apresentado na figura 2.11.

De acordo com a norma espanhola UNE 41410 (AENOR, 2008), do ponto de vista dos índices de consistência, este solo não seria totalmente adequado para a produção de BTC, porque não se enquadra na zona assinalada na figura 2.08. O mesmo ocorre com relação ao regulamento suíço D 0111 (SIA, 1994), para a produção de taipa (figura 2.09). Interessante observar que as zonas recomendadas por estas duas publicações são quase coincidentes, o que confirma as similaridades entre o BTC e a taipa.

#### 4.2.3 Impurezas orgânicas

O ensaio de avaliação do nível de material orgânico, exigido pela norma NBR 10833 (ABNT, 2012) para ser realizado de acordo com a norma NBR NM 49 (ABNT, 2001), não levou a resultados passíveis de avaliação. Como o solo estudado é muito fino, ao misturar 100 ml da solução reagente com 200 g deste solo, após 24 h não foi possível obter a separação entre líquido e sólidos em quantidade suficiente para realização da filtragem, como ocorreria com uma areia média (agregado miúdo para concreto).

Este comportamento provavelmente também pode ser decorrente do tipo de argila presente no solo. Na figura 4.02 é mostrada uma comparação entre estas duas situações.

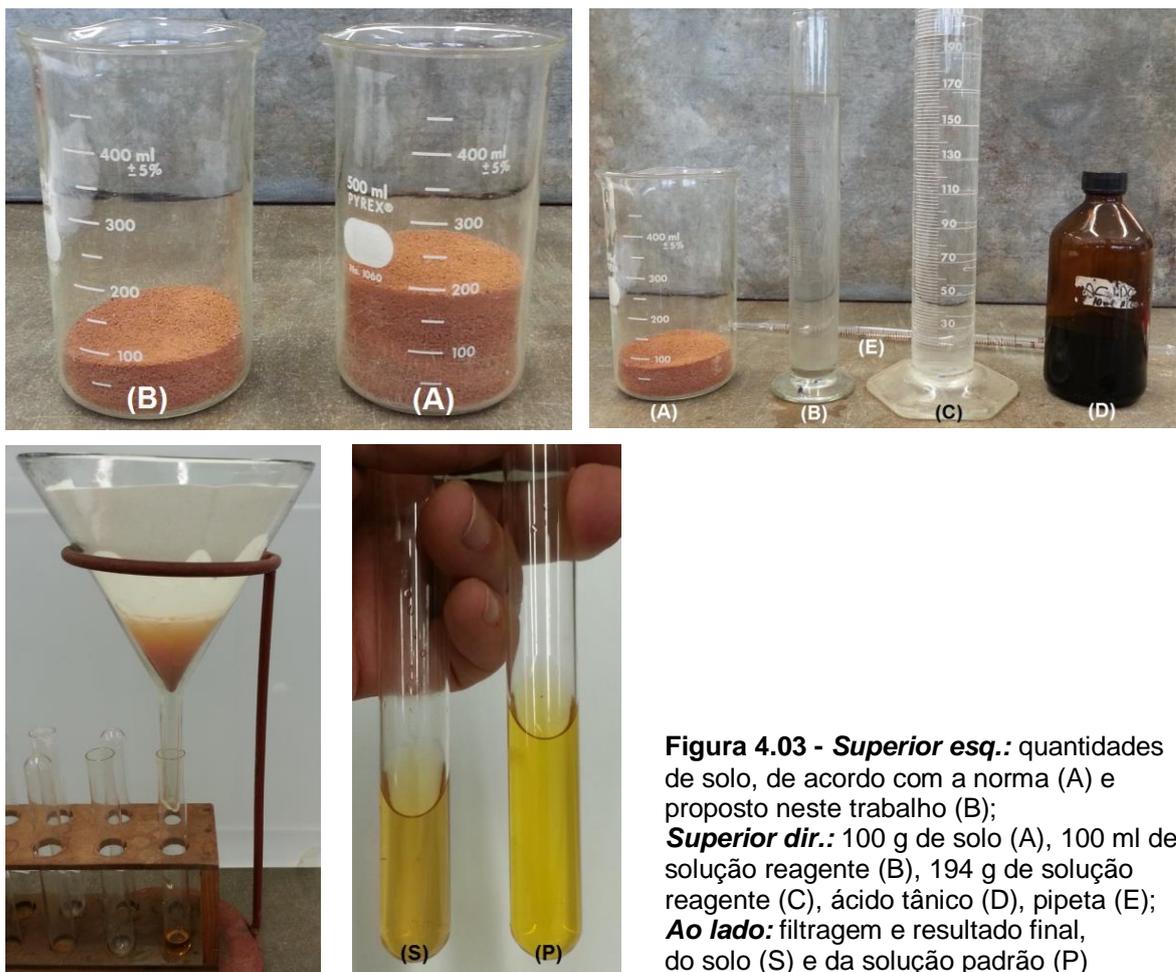


**Figura 4.02** - Diferença de comportamento entre 200 g de areia média (A) e 200 g do solo estudado (B), colocados em contato com 100 ml de solução reagente, após 24 h

Para solucionar este problema, foi proposta e experimentada uma adaptação dos procedimentos, conforme descrito a seguir e ilustrado na figura 4.03.

Considerando-se que em 200 g de solo pode haver uma quantidade "x" de matéria orgânica, que produzirá uma certa coloração ao entrar em contato com 100 ml de solução reagente, para ser comparada com a coloração da solução padrão (obtida pelo contato de 3 ml de ácido tânico com 97 ml da mesma solução reagente), propõe-se o seguinte:

- Reduzir a quantidade de solo pela metade, ou seja, 100 g, para a mesma quantidade de solução reagente (100 ml). Com isso, reduziu-se também a quantidade possível de matéria orgânica para "x/2";
- Reduzir, na mesma proporção, a quantidade de matéria orgânica (ácido tânico) na solução padrão, dobrando-se a quantidade de solução reagente, ou seja, 194 ml, para não ter que medir apenas 1,5 ml de ácido tânico;
- Concluir os procedimentos normatizados, ou seja, deixar as misturas em repouso por 24 h (em ambiente escuro); filtrar os líquidos em papel filtro; e, comparar as colorações.



Conforme apresentado na figura 4.03, a coloração do filtrado de solo é aproximadamente igual à da solução padrão. Portanto, o solo contém matéria orgânica compatível com o nível permitido pela norma NBR 10833 (ABNT, 2012).

#### 4.2.4 Análise mineralógica

Conforme já justificado no item 3.2.4, optou-se por adotar os resultados obtidos por Agnelli (1997) apresentados no item 2.2, ou seja, há predominância do argilo-mineral **caulinita**  $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ .

A título de exemplo, na figura 4.04 é apresentado um resultado de difratografia de raio-X obtido por Santos (2015), para um solo da região de São Carlos - SP com a seguinte distribuição granulométrica de 32% argila, 9% silte e 59% areia. Este solo é bem diferente do utilizado no presente trabalho, mas também se nota o predomínio da caulinita.

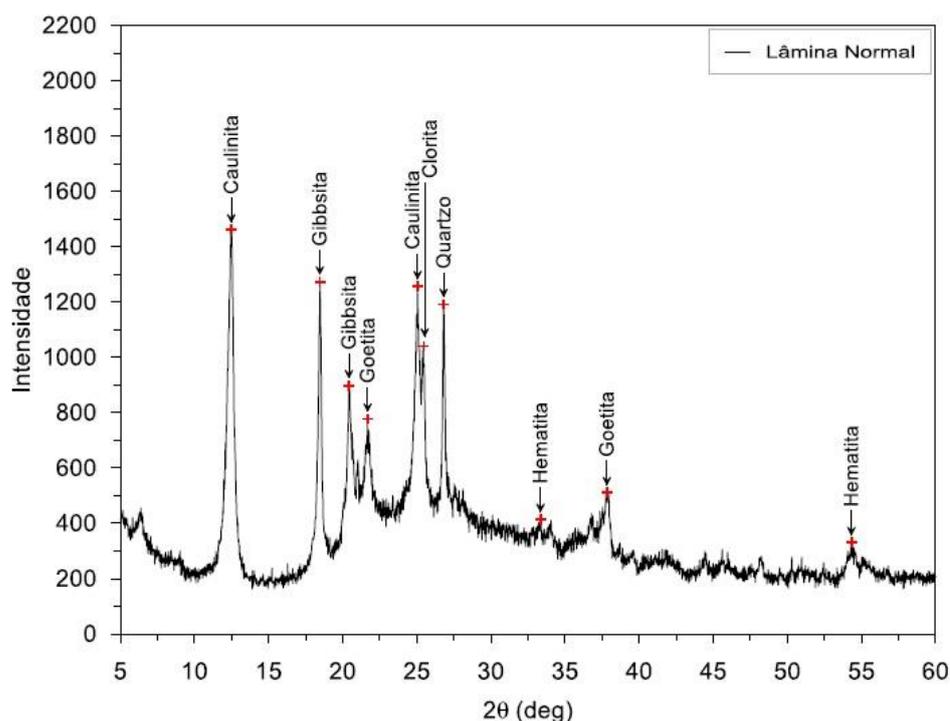


Figura 4.04 - Exemplo de difratograma de raios-X obtido por Santos (2015)

#### 4.2.5 Massa unitária do solo solto e seco ao ar ( $\rho_{ssu}$ )

O ensaio de determinação da massa unitária do solo solto e seco ao ar apresentou o seguinte resultado, para umidade higroscópica,  $W_h = 1,16\%$ :

$$\rho_{ssu} = 1,19 \text{ kg/dm}^3$$

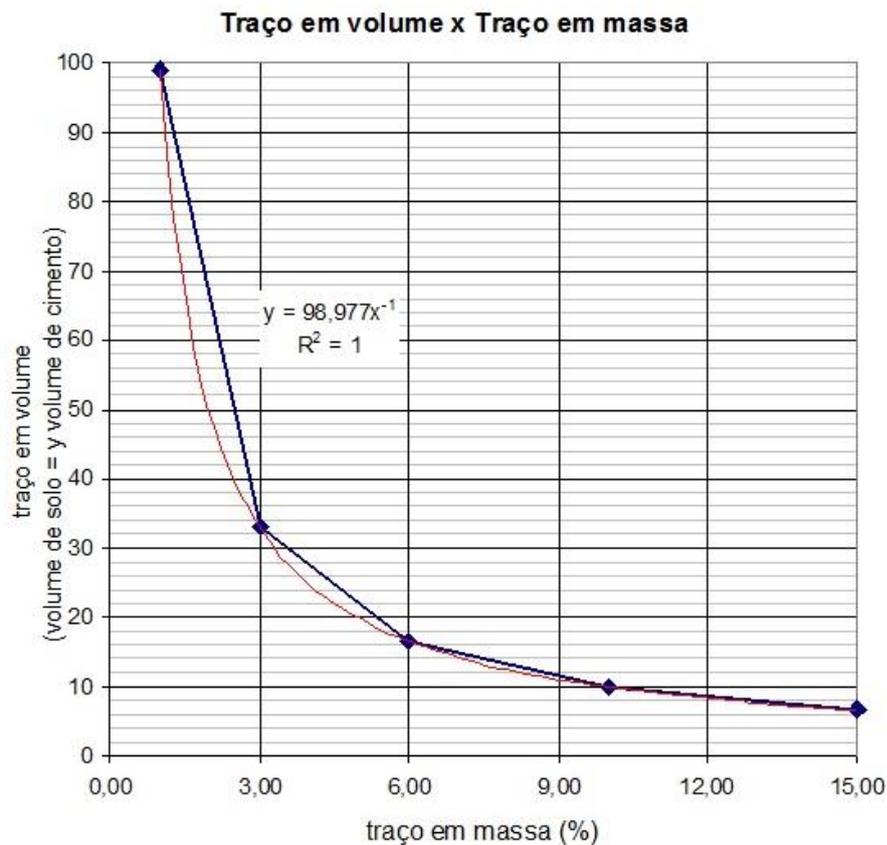
Considerando-se esta umidade higroscópica, a massa unitária do solo solto e seco será:

$$\rho_{ss0} = 1,18 \text{ kg/dm}^3$$

Com as massas unitárias do solo solto seco ( $\rho_{ss0}$ ) e do cimento solto ( $\rho_{cs}$ ), é possível fazer a conversão do traço em massa, para o traço em volume, cujos resultados são apresentados na tabela 4.03 e graficamente na figura 4.05 (com curva de tendência exponencial), sendo o **traço em massa** correspondente a massa de cimento em porcentagem da massa de solo e o **traço em volume**, a quantidade de volumes de solo para um volume de cimento.

**Tabela 4.03** - Correspondência entre os traços em massa e os traços em volume

| traço em massa (%)                               | 15,00 | 10,00 | 6,00 | 3,00 | 1,00 |
|--|-------|-------|------|------|------|
| traço em volume de solo para 1 volume de cimento | 6,6   | 9,9   | 16,5 | 33   | 99   |



**Figura 4.05** - Correspondência entre traço em massa e traço em volume

A curva de tendência exponencial apresenta a equação 22 e os resultados completos destes ensaios são apresentados no **Apêndice 15**.

$$y = 96,977 x^{-1} \quad (22)$$

onde:  $y$  - número de volumes de solo, para um volume de cimento  
 $x$  - traço em massa (em %)  
 $R^2 = 1$  (coeficiente de correlação igual a 1 significa que os pontos se ajustaram perfeitamente à curva)

#### 4.2.6 Umidade higroscópica do solo seco ao ar ( $W_h$ )

Do total de solo seco ao ar, à medida em que surgiam as necessidades se destorroava um lote, do qual era determinada a umidade higroscópica. Em seguida o solo era lacrado em saco plástico. No total, trabalhou-se com três lotes, cujos resultados de umidade higroscópica ( $W_h$ ) estão apresentados na tabela 4.04 e os detalhes de cálculo constam do **Apêndice 16**.

**Tabela 4.04** - Resultados médios da umidade higroscópica do solo ( $W_h$ )

| Lote           | 1          | 2          | 3          |
|----------------|------------|------------|------------|
| Data de ensaio | 26/10/2015 | 30/12/2015 | 01/01/2016 |
| $W_h$ (%)      | 1,16       | 1,97       | 2,24       |

#### 4.2.7 Umidade ótima ( $W_{ót}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ )

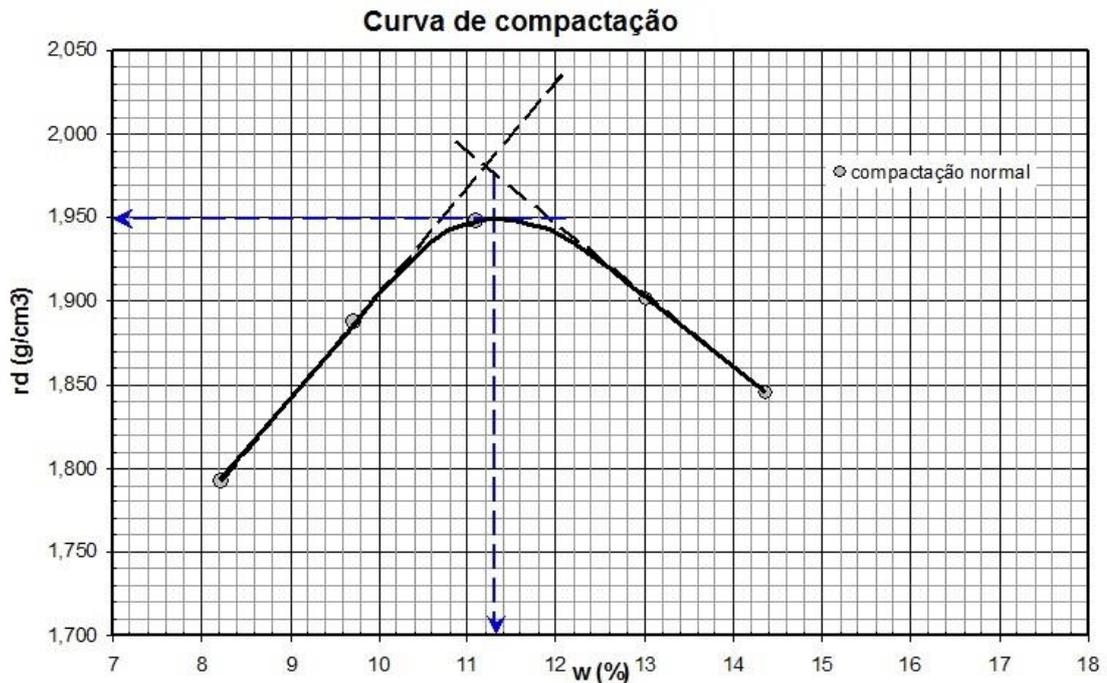
O ensaio de compactação, realizado de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986), com solo do lote 1, apresentou os seguintes resultados para umidade ótima de compactação ( $W_{ót}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ):

$$W_{ót} = 11,3\%$$

$$\rho_{d,máx} = 1,950 \text{ g/cm}^3$$

Os resultados completos deste ensaio são apresentados no **Apêndice 17** e a curva de compactação do solo é apresentada na figura 4.06.

Estes resultados são típicos do solo predominante no município de Bauru-SP e muito semelhantes aos encontrados por Agnelli (1997), Yamasaki (2012) e Fagundes (2014).



**Figura 4.06** - Curva de compactação do solo, com energia do proctor normal, obtida de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986)

#### 4.2.8 Proposta de alteração do ensaio de compactação (novo CP)

Utilizando-se o molde proposto, com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, cujo projeto e produção é apresentado no item 4.3, realizou-se o ensaio de compactação, adotando-se os parâmetros propostos no item 3.2.8 e mantendo-se a energia de compactação (EC) do proctor normal (item 4.2.7) de 583 kJ/m<sup>3</sup>.

Dessa forma, foi utilizado o soquete com massa de 2,285 kg, altura de queda de 0,30 m e corpo de prova compactado em 3 camadas, com aplicação de **6 golpes** por camada. Os resultados de umidade ótima de compactação e massa específica aparente seca máxima, para 6 golpes, foram:

$$W_{ót,6} = 12,9\%$$

$$\rho_{d,máx,6} = 1,910 \text{ g/cm}^3$$

Como  $\rho_{d,máx,6}$  obtido foi inferior ao do ensaio do proctor normal ( $\rho_{d,máx} = 1,950 \text{ g/cm}^3$ ) e considerando-se que mais importante que manter a energia de compactação seria manter  $\rho_{d,máx}$ , optou-se por realizar ensaios de compactação, variando-se o número de golpes (N) por camada, de forma a satisfazer a seguinte condição:

$$\rho_{d,m\acute{a}x,N} \geq \rho_{d,m\acute{a}x}$$

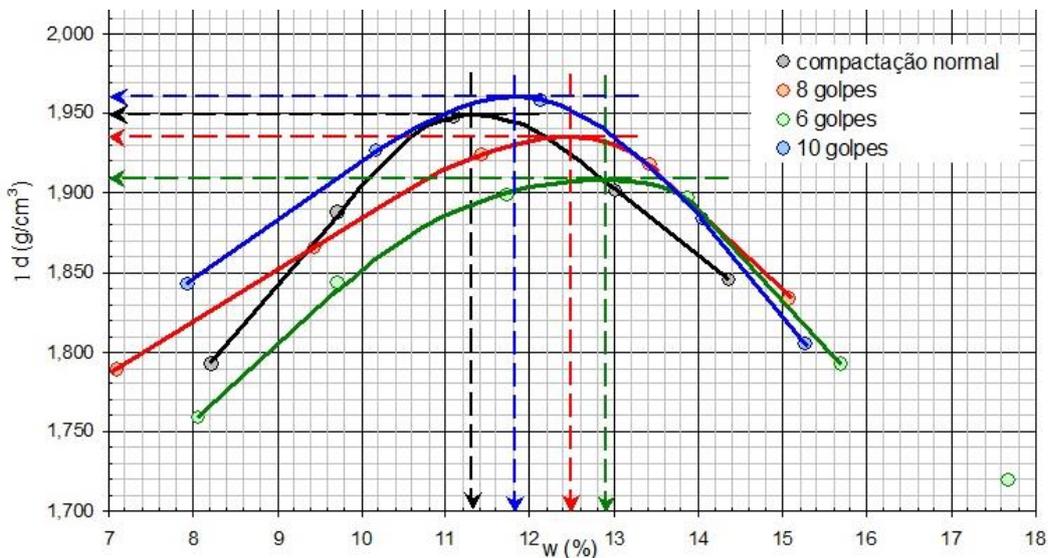
Foram realizados ensaios com 8 e 10 golpes, cujos resultados resumidos são apresentados na tabela 4.05 e figura 4.07, juntamente com de 6 golpes (resultados completos no **Apêndice 18**).

**Tabela 4.05** - Resultados médios dos ensaios de compactação do solo, variando-se o número de golpes por camada (N)

| Número de golpes/camada - N                   | Ensaio proposto |       |       | Proctor normal |
|---|-----------------|-------|-------|----------------|
|   | 6               | 8     | 10    | 26             |
| Energia compactação - EC (kJ/m <sup>3</sup> ) | 616             | 822   | 1.027 | 583            |
| Umidade ótima - W <sub>ót</sub> (%)           | 12,9            | 12,5  | 11,8  | 11,3           |
| $\rho_{d,m\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )   | 1,910           | 1,935 | 1,960 | 1,950          |

No uso do solo compactado para produção de materiais de construção, a minimização da porosidade e do índice de vazios está relacionada com o aumento da durabilidade e da resistência mecânica do material. Como estes parâmetros estão intimamente relacionados com a massa específica aparente, torna-se mais interessante maximizá-la, do que manter a energia de compactação do proctor normal.

Portanto, optou-se por adotar a aplicação de 10 golpes por camada, para produção dos corpos de prova de solo-cimento compactado, principal objeto do presente trabalho.



**Figura 4.07** - Curvas de compactação do solo, com energia do proctor normal e para 6, 8 e 10 golpes por camada, de acordo com a metodologia proposta no presente trabalho

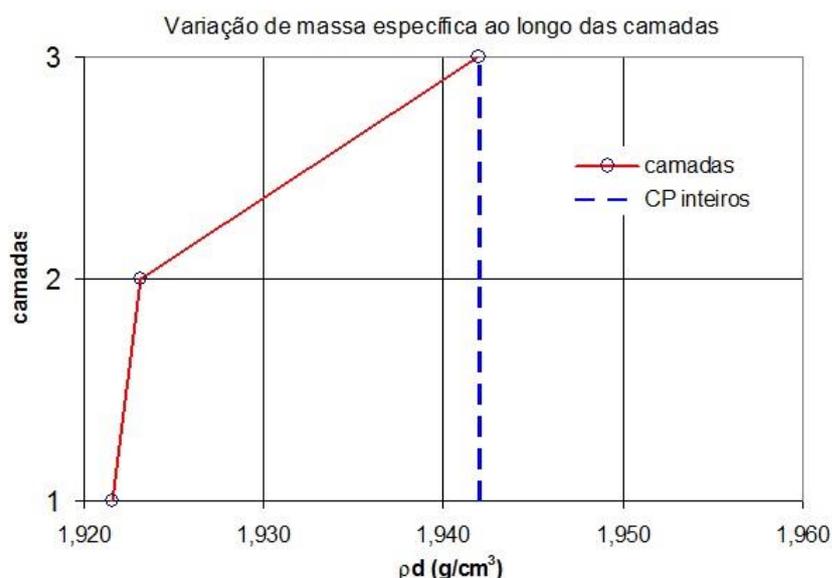
#### 4.2.9 Avaliação da variação de massa específica entre as camadas do corpo de prova de compactação

Foram produzidos 4 CP 5X10 especialmente para a realização deste ensaio, cujos resultados individuais são apresentados na tabela 4.06 e os médios na figura 4.08. Os resultados completos deste ensaio são apresentados no **Apêndice 29**.

**Tabela 4.06** - Resultados de massa específica aparente seca por camada ( $\rho_{d, \text{cam}}$ ) e dos corpos de prova inteiros

| camada                          | $\rho_{d, \text{cam}}$ (g/cm <sup>3</sup> ) |              |              |              | médias       |
|---------------------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                 | CP1   | CP2          | CP3          | CP4          |              |
| 1                               | 1,938                                       | 1,921        | 1,906        | 1,921        | 1,922        |
| 2                               | 1,928                                       | 1,934        | 1,922        | 1,908        | 1,923        |
| 3                               | 1,945                                       | 1,951        | 1,947        | 1,925        | 1,942        |
| <b>CP inteiro<sup>(a)</sup></b> | <b>1,957</b>                                | <b>1,949</b> | <b>1,935</b> | <b>1,927</b> | <b>1,942</b> |

<sup>(a)</sup> Resultados obtidos no ensaio de compactação, do corpo de prova como um todo

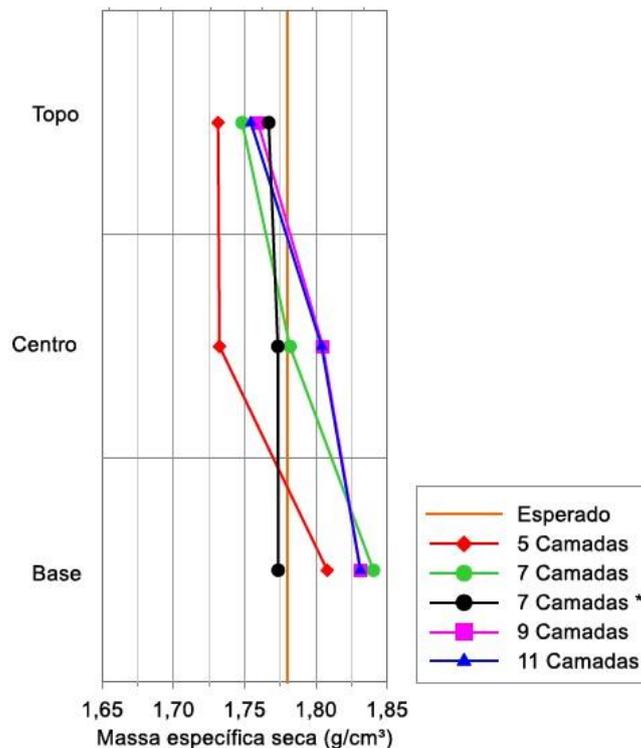


**Figura 4.08** - Massa específica aparente seca média por camada e dos corpos de prova inteiros

Observando-se a figura 4.08, se nota que houve um pequeno aumento (1,04%) na massa específica aparente seca ao longo da altura do CP. No entanto, tanto a quantidade de corpos de prova, como a variação, podem ser considerados pequenos para formulação de uma conclusão mais consistente.

Santos (2015), cujo objetivo central do trabalho é o estudo da anisotropia de um solo compactado, realizou ensaios mais completos e detalhados. Por exemplo, moldou CP 10x12,7 convencionais, variando-se o número de camadas de compactação entre 5 e

11 e estudou vários outros parâmetros, em corpos de prova aproximadamente CP 5x10, talhados na horizontal e na vertical, a partir do corpo de prova maior. Na figura 4.09 são apresentados seus resultados médios de massa específica seca.



**Figura 4.09** - Variação da massa específica aparente seca média, entre a base e o topo dos corpos de prova (adaptado de Santos, 2015)

Observando-se os resultados apresentados na figura 4.09, se nota que também houve pequena variação de massa específica seca entre a base e o topo do corpos de prova, porém, inversa àquela encontrada no presente trabalho, ou seja, diminuiu entre a base e o topo.

Portanto a conclusão possível é que, para avaliar a validade da simplificação proposta no presente trabalho, seria necessário realizar o ensaio de uma quantidade muito maior de corpos de prova e com várias repetições.

#### 4.2.10 Avaliação geral das características do solo, de acordo com as normas brasileiras para solo-cimento

Na tabela 4.07 é apresentada uma síntese dos requisitos do solo para uso em solo-cimento, estabelecidos por normas brasileiras, assim como os resultados obtidos para o solo em estudo.

**Tabela 4.07** - Requisitos de norma e resultados obtidos com o solo em estudo

| Parâmetros   | requisitos     | result obtidos | conclusão |
|--|----------------|----------------|-----------|
| <b>ABNT NBR 10833:2012 (para fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento)</b> |                |                |           |
| material que passa na peneira de 4,75 mm                                       | 100%           | 100%           | atende    |
| material que passa na peneira de 0,075 mm                                      | 10% a 50%      | 25%            | atende    |
| limite de liquidez (LL)  | <= 45%         | 22%            | atende    |
| índice de plasticidade (IP)  | <= 18%         | 7%             | atende    |
| quantidade de matéria orgânica (solução padrão NBR NM 49)                      | mais clara     | mais clara     | atende    |
| <b>ABNT NBR 11798:2012 (para base de solo-cimento)</b>                         |                |                |           |
| classificação de acordo com ASTM D 3282  | A1 ou A2 ou A4 | A1(?)          |           |
| material que passa na peneira de 75 mm   | 100%           | 100%           | atende    |
| material retido na peneira de 19 mm  | <= 30%         | 0%             | atende    |
| material retido na peneira de 4,75 mm  | <= 40%         | 0%             | atende    |
| <b>ABNT NBR 13553:2012 (para parede monolítica de solo-cimento)</b>            |                |                |           |
| material que passa na peneira de 4,75 mm                                       | 100%           | 100%           | atende    |
| material que passa na peneira de 0,075 mm                                      | 15% a 50%      | 25%            | atende    |
| limite de liquidez (LL)  | <= 45%         | 22%            | atende    |
| índice de plasticidade (IP)  | <= 18%         | 7%             | atende    |
| quantidade de matéria orgânica (solução padrão NBR NM 49)                      | não cita       | -              | -         |

De acordo com o apresentado na tabela 4.07, o solo em estudo atende a quase totalidade dos requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras sobre solo-cimento, nas quais são estabelecidos requisitos de características do solo.

O único requisito para o qual paira alguma dúvida, é quanto à classificação do solo de acordo com a norma D 3282 (ASTM, 2004), que trata do sistema de classificação americano, para fins de construção de estradas, baseado no *índice de grupo (IG)*. Este índice define a capacidade de suporte do solo, para base de pavimento.

De acordo com a análise apresentada no **Apêndice 21**, não é possível classificar o solo por este sistema porque é exigido um mínimo de 50% de material passando na peneira nº 10 (2,00 mm) e o solo em estudo apresenta 100% passando nesta peneira. Portanto, assim como já indicado no item 4.2.1 para os limites granulométricos propostos por Walker et al. (2005), haveria a necessidade de misturar este solo a outro, com predominância de partículas maiores que 2,00 mm, para sua correção granulométrica e emprego na produção de taipa. Porém, há que destacar que solos com textura mais fina produzem BTC com melhor acabamento superficial.

### **4.3 PROJETO E PRODUÇÃO DO MOLDE METÁLICO PARA OS CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO**

O projeto completo do molde para o CP 5x10 é apresentado no **Apêndice 19**. Na figura 4.08 são apresentados o molde definido pela norma NBR 12024 (ABNT, 2012g) e os moldes propostos no presente trabalho.

Cabe registrar que o funil (b4, na figura 4.08) não foi desenvolvido no presente trabalho, já existia e era utilizado nos laboratórios de mecânica dos solos, para produção de outros corpos de prova.

O molde proposto apresentou as seguintes vantagens, com relação ao estabelecido pela norma pertinente:

- Menor consumo de material e de tempo para compactação, por corpo de prova;
- O corpo bipartido, encaixado na base e travado no topo pelo colarinho, dispensou o uso de duas porcas borboleta, reduzindo o tempo de operação;
- O corpo bipartido facilitou a extração manual do corpo de prova, dispensando o uso do extrator hidráulico, já mostrado na figura 3.11 (capítulo anterior).

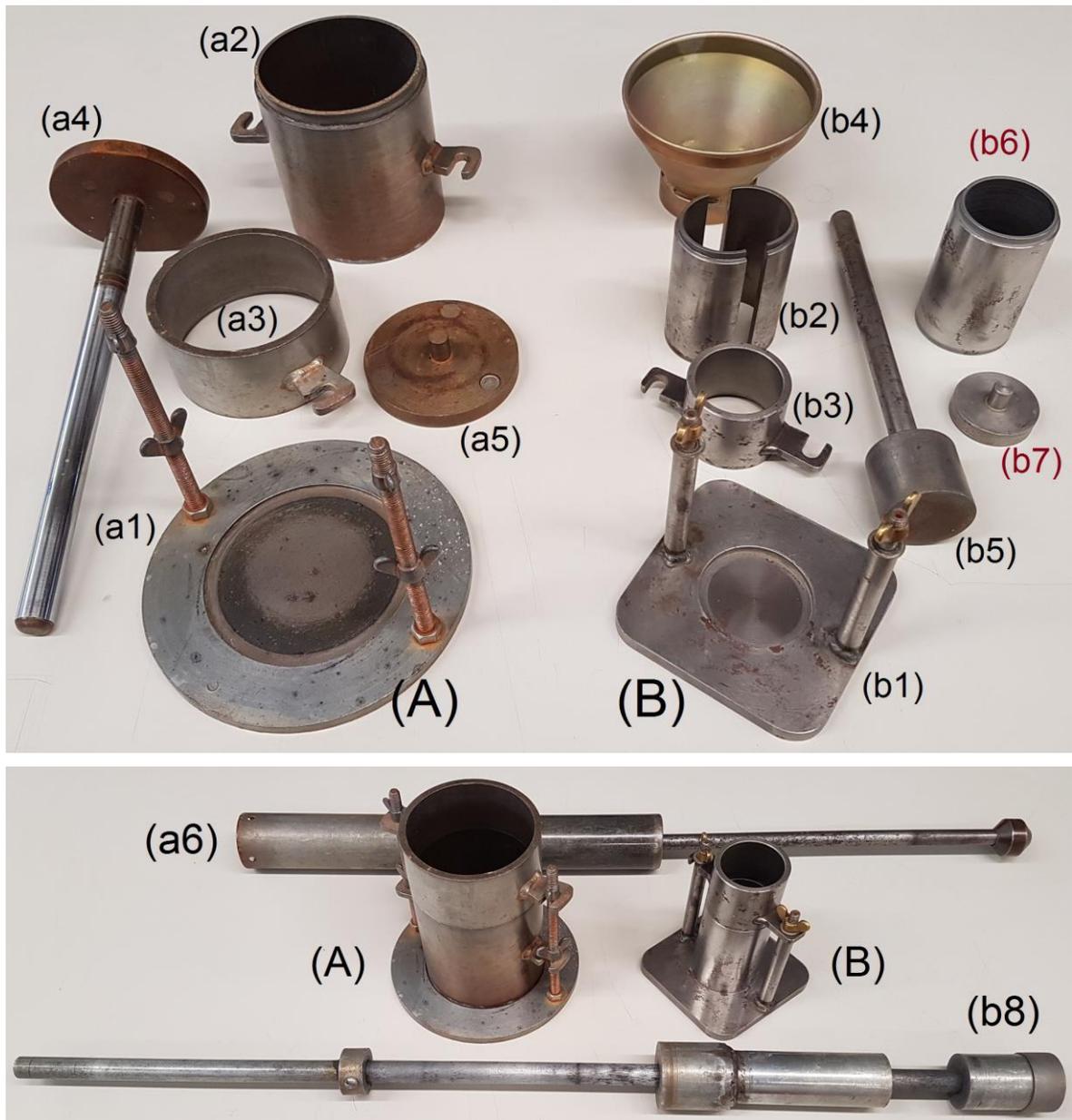
No entanto, ao longo do uso, apresentou os seguintes problemas:

- O pouco espaço entre os parafusos verticais de fixação dificultou a remoção do colarinho, para extração do corpo de prova;
- O corpo bipartido frequentemente provocou a ruptura diametral dos corpos de prova, ao tentar extraí-los do molde;
- Nem sempre a ruptura citada no item anterior era completa e perceptível, sendo notada principalmente no momento do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral. Supõe-se que este problema não afetou os resultados dos ensaios de resistência à compressão no estudo de dosagem, considerando-se que os coeficientes de variação (CV) dos valores médios foram baixos.

#### **4.3.1 Projeto e produção de novo molde metálico para produção dos CP 5x10**

Para solucionar os problemas apontados em 4.3, foram projetadas e executadas uma nova camisa (corpo do molde) metálica inteiriça, ou seja, não mais bipartida, além de um

disco para posicionamento no extrator. Com isso, foi necessária a utilização do extrator hidráulico (figura 3.11) para retirada dos corpos de prova compactados. Esta camisa é apresentada (já executada) na figura 4.08, juntamente com os moldes anteriores, para comparação. O projeto completo é apresentado no **Apêndice 30**.

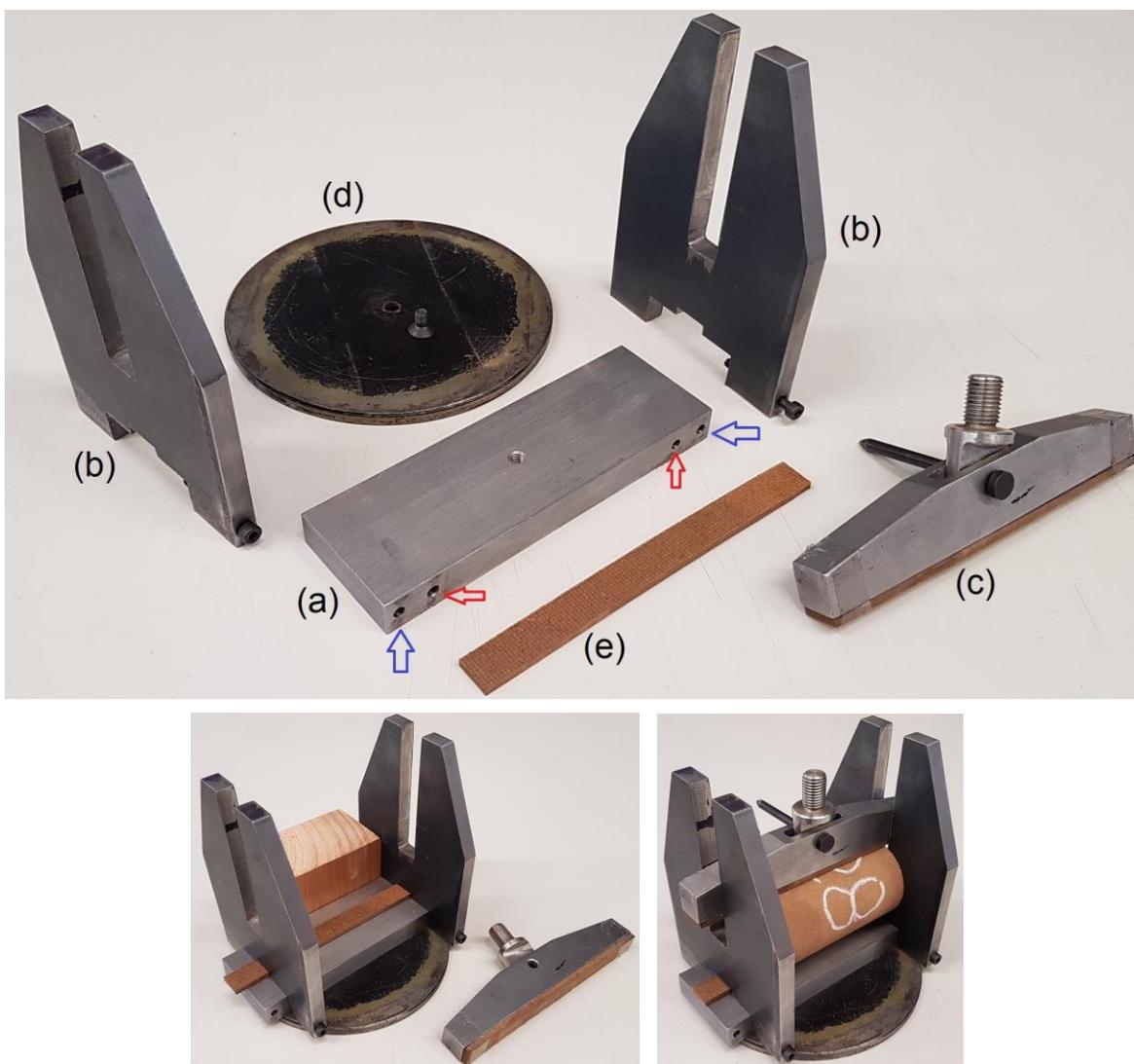


**Figura 4.08** - (A) Molde adotado pela norma NBR 12024 (ABNT, 2012g), constituído por: base (a1), corpo (a2), colarinho (a3), haste de acomodação do solo solto (a4) e disco de conexão ao extrator hidráulico (a5);  
 (B) Moldes propostos no presente trabalho, constituídos por: base (b1), corpo bipartido, ou camisa (b2), colarinho (b3), funil para colocação do solo solto no molde (b4), haste de acomodação do solo solto (b5), molde novo inteiriço (b6) e disco de conexão ao extrator hidráulico (b7);  
 Soquetes de compactação convencionais: para o CP 10x12,7 (a6) e para o CP 5x10 (b8)

#### 4.3.2 Projeto e produção de dispositivo para ensaio de tração por compressão diametral de CP 5x10 e CP 10x12,7

Para solucionar os problemas apontados no item 4.5.5, foi projetado e executado um novo dispositivo para realização do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, em substituição ao dispositivo padrão para ensaios de CP de concreto 10x20, utilizado inicialmente.

Este novo dispositivo (figura 4.09) permite o ensaio tanto dos CP 5x10 como os CP 10x12,7 e seu projeto completo é apresentado no **Apêndice 31**.



**Figura 4.09** - Dispositivo proposto para o ensaio de compressão diametral, constituído por: base (a), laterais (b), mandíbula móvel, ou cutelo (c), disco para conexão centralizada do dispositivo na máquina de ensaios (d), régua de madeira para apoio e aplicação da carga no CP. Furos para fixar as laterais: setas azuis, CP 10x12,7; setas vermelhas, CP 5x10  
Abaixo: dispositivo montado e já com um CP 5x10 instalado

## 4.4 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO

De acordo com os resultados obtidos no item 4.2.8, os corpos de prova foram produzidos por compactação, em três camadas e com aplicação de 10 golpes por camada. Para esta produção, os experimentos foram planejados, preparados os materiais, moldados os corpos de prova e realizada sua cura em câmara úmida até completar 7 dias de idade.

### 4.4.1 Planejamento dos experimentos e preparação dos materiais

Os experimentos foram planejados de acordo com a estratégia metodológica apresentada no item 3.4.1 destacando-se que, de acordo com a norma NBR 12024 (ABNT, 2012), deve ser acrescentado de 0,5 a 1,0% em  $W_{ót}$  para o cálculo da quantidade de água a acrescentar, para compensar perdas de umidade durante o processo de compactação dos corpos de prova. Portanto, optou-se por aumentar  $W_{ót}$  em 0,5%, conforme pode ser observado no **Apêndice 2**. O material foi preparado de acordo com os procedimentos descritos no item 3.4.2.

### 4.4.2 Moldagem dos corpos de prova e avaliação de W e GC

Os corpos de prova foram moldados de acordo com os procedimentos descritos no item 3.4.3, nas quantidades definidas no item 3.4.1.

Durante a moldagem, foi coletado material em uma cápsula de alumínio, de toda 2ª camada de compactação, de todos os corpos de prova de cada série, para avaliação da umidade efetiva dos corpos de prova (**W**), comparando-a com a umidade ótima de compactação (**W<sub>ót</sub>**).

De acordo com a norma NBR 12024 (ABNT, 2012), a tolerância para o teor de umidade efetivo dos corpos de prova é de 0,5%, com relação a umidade ótima de compactação, ou seja, considerando-se  $W_{ót} = 11,8\%$ :

$$11,3\% \leq W \leq 12,3\%$$

Conforme resultados apresentados no **Apêndice 22**, todos os corpos de prova moldados atenderam ao requisito de umidade efetiva de compactação. No entanto, esta condição nem sempre é atingida, porque depende das condições do clima no momento da compactação (umidade relativa do ar e temperatura), motivo pelo qual a própria norma recomenda iniciar com umidade mais elevada, conforme comentado em 4.4.1. Portanto,

seria interessante revisar a norma no que diz respeito a tolerância da umidade de compactação.

Após a moldagem de cada corpo de prova, imediatamente antes de sua retirada do molde, foi medida a massa do CP úmido mais o corpo do molde,  $M$  (CP+cil), para o cálculo da massa específica aparente seca do CP ( $\rho_{d, sc}$ ) e de seu grau de compactação (**GC**), que foi calculado pela equação 9. De acordo com a norma NBR 12024 (ABNT, 2012), há uma tolerância de 2% em GC, ou seja:

$$98\% \leq \text{GC} \leq 102\%$$

Conforme resultados completos apresentados no **Apêndice 23**, dos 56 corpos de prova moldados, 27 (48%) deveriam ser rejeitados porque atingiram  $\text{GC} < 98\%$ . No entanto, isto inviabilizaria a realização destes ensaios. A maioria dos corpos de prova que não atenderam esta especificação foi moldada em um dia com temperatura muito elevada e umidade relativa do ar baixa. Pela natureza das atividades, é muito difícil trabalhar em um ambiente climatizado (com umidade relativa do ar e temperatura constantes).

Como a maioria dos corpos de prova atingiu  $\text{GC} \geq 95\%$  e poucos tiveram  $100\% < \text{GC} \leq 101\%$ , supõe-se que tenha sido pela perda de umidade ao longo da compactação e a tolerância da norma poderia ser aumentada para, por exemplo, 5%.

#### 4.4.3 Cura dos corpos de prova

O processo de cura dos corpos de prova transcorreu sem problemas, em câmara úmida à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95%, não havendo ocorrências que mereçam registro.

### 4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO SOLO-CIMENTO

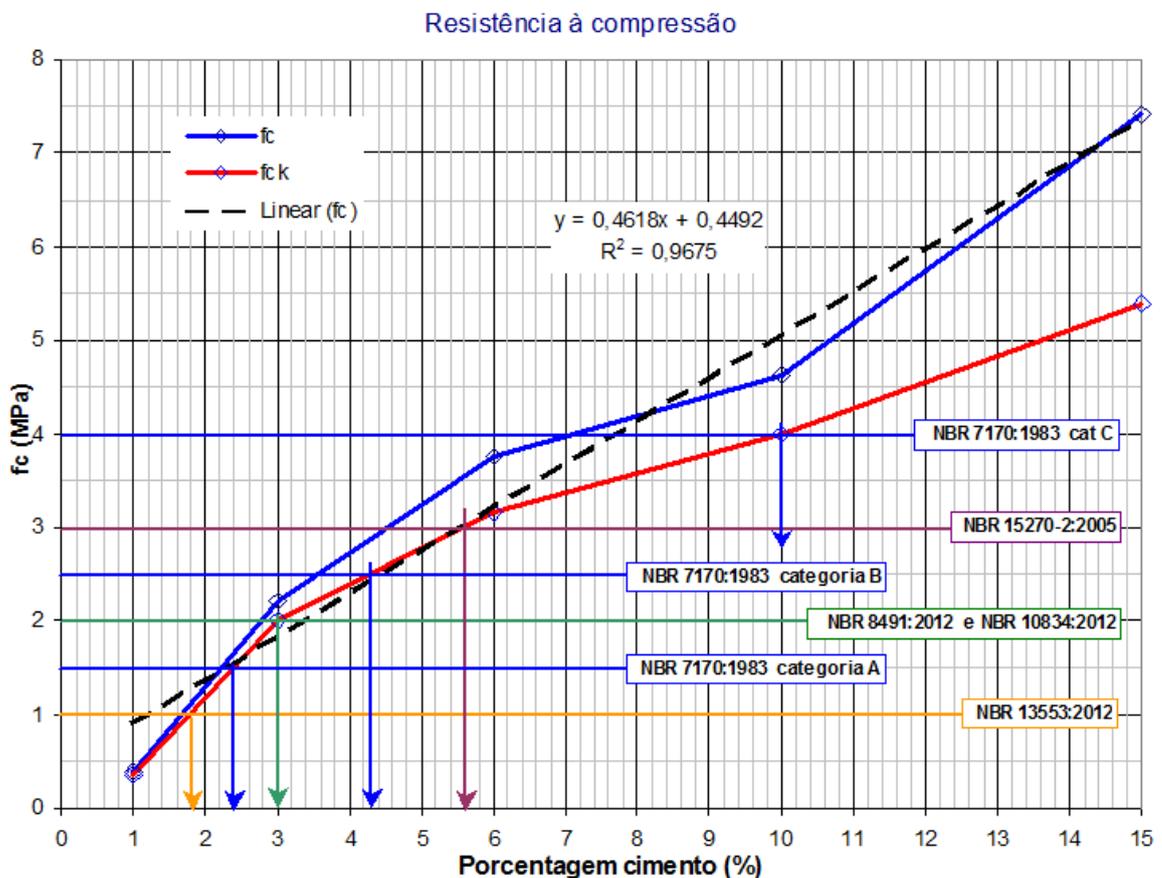
Neste item são apresentados e discutidos os resultados da principal etapa do presente trabalho, ou seja, a verificação das propostas de ensaios para determinação dos seguintes parâmetros do solo-cimento: *estudo de dosagem*; *resistência à compressão axial*; *módulo de elasticidade estático à compressão*; e, *resistência à tração, por compressão diametral*.

#### 4.5.1 Estudo de dosagem do solo-cimento

Na tabela 4.08 são apresentados os resultados médios dos seguintes parâmetros dos 6 traços de cimento: massa específica aparente seca ( $\rho_{d,sc}$ ); resistência à compressão ( $f_c$ ); desvio padrão de  $f_c$  ( $sd$ ); coeficiente de variação de  $f_c$  ( $CV$ ) e resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ). Os resultados de resistência à compressão são apresentados graficamente na figura 4.10, juntamente com os requisitos estabelecidos por diversas normas.

**Tabela 4.08** - Resultados médios de resistência à compressão ( $f_c$ ), com desvio padrão ( $sd$ ), coeficiente de variação ( $CV$ ) e valores característicos ( $f_{ck}$ ), para dosagem do solo-cimento

| cimento (%)                        | 1     | 3     | 6     | 10    | 15    |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,935 | 1,923 | 1,943 | 1,938 | 1,924 |
| $f_c$ (MPa)                        | 0,39  | 2,22  | 3,76  | 4,63  | 7,41  |
| $sd$ (MPa)                         | 0,02  | 0,13  | 0,37  | 0,39  | 1,23  |
| $CV$ (%)                           | 4,4   | 5,67  | 9,95  | 8,38  | 16,55 |
| $f_{ck}$ (MPa)                     | 0,36  | 2,01  | 3,15  | 3,99  | 5,39  |



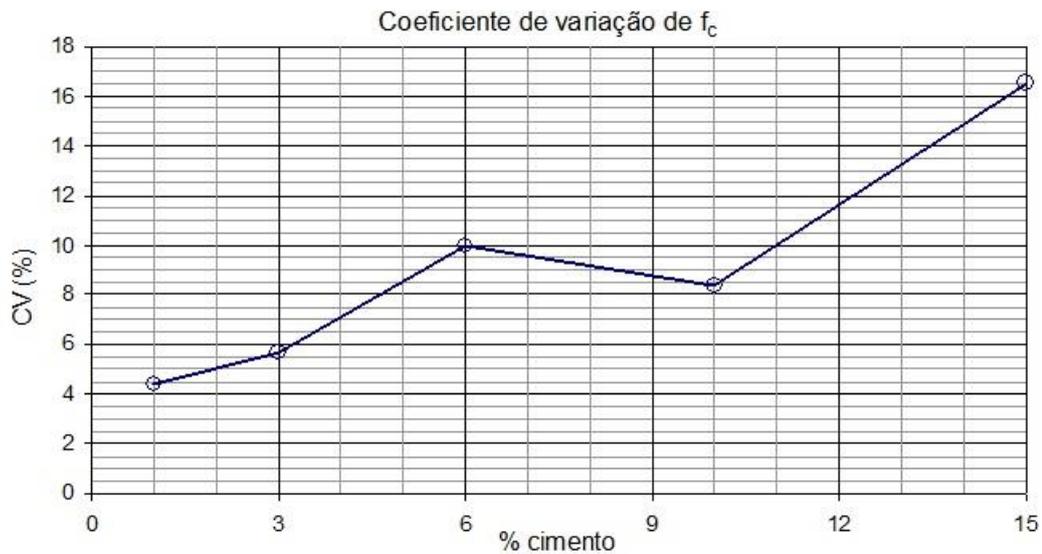
**Figura 4.10** - Resultados médios de resistência à compressão para os 6 traços e requisitos de normas diversas

Conforme pode-se observar pelo gráfico apresentado na figura 4.10, como esperado, houve aumento de resistência, com o aumento da quantidade de cimento. No entanto, esta relação não se ajusta suficientemente a uma reta, já que o coeficiente de correlação seria  $R^2 = 0,9675$ .

Considerando-se a possibilidade de produção de tijolos e blocos de solo-cimento estrutural (não previstos em normas), adotou-se o teor de 6% de cimento para o estudo dos métodos propostos para determinação de *módulo de elasticidade* e de *resistência à tração por compressão diametral*. A resistência característica à compressão correspondente a este teor de cimento seria equivalente à dos blocos cerâmicos para alvenaria estrutural, de acordo com a norma NBR 15270 (ABNT, 2005), conforme apontado na figura 4.10.

Os resultados individuais destes ensaios são apresentados no **Apêndice 24**, pela reprodução dos relatórios da máquina universal de ensaios. Nestes relatórios, pode-se observar que, apesar de amostras com apenas 3 corpos de prova de cada traço serem consideradas pouco confiáveis do ponto de vista estatístico, os resultados apresentam baixa dispersão, exceto para 15% de cimento, com  $CV = 16,55\%$ . O coeficiente de variação (CV) dos resultados médios de resistência à compressão ( $f_c$ ) foi crescente, com o aumento da resistência à compressão (decorrente da elevação do teor de cimento), no entanto os resultados para até 10% de cimento podem ser considerados de "baixa dispersão" ( $CV \leq 15\%$ ), de acordo com Correa (2003, p.60), como mostrado na figura 4.11. Mesmo para 15% de cimento, pode-se considerar como de "média dispersão" ( $15\% < CV < 30\%$ ), de acordo com a mesma autora.

Conforme já observado no item 4.3, uma provável causa para este problema foi a ocorrência de defeitos nos corpos de prova, por eventual tração diametral no momento da desmoldagem. Esta hipótese foi confirmada com a realização de novos ensaios, em corpos de prova produzidos com o novo molde inteiriço (não bipartido), para verificação da proposta de método de ensaio para determinação do módulo de deformação, cujos resultados são apresentados nos itens 4.5.3 e 4.5.4



**Figura 4.11** - Variação do coeficiente de variação da resistência média à compressão, com a variação do teor de cimento

#### 4.5.2 Ensaio de determinação da absorção de água (AA), do índice de vazios ( $e_{sc}$ ) e da porosidade ( $n_{sc}$ ) do solo-cimento

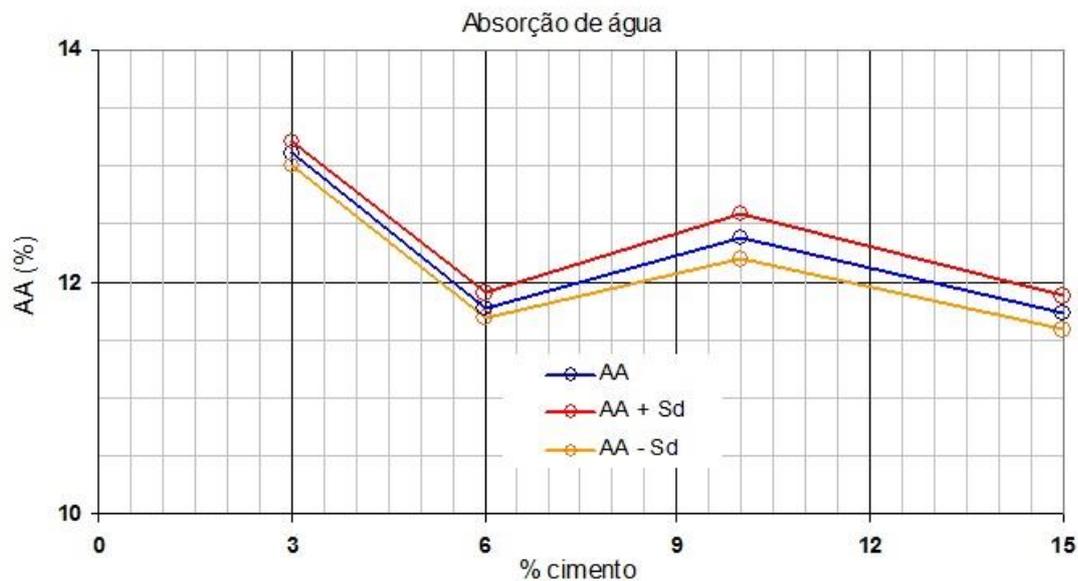
Os ensaios de determinação da absorção de água foram realizados de acordo com a norma NBR 13555 (ABNT, 2012) apenas com os corpos de prova do estudo de dosagem, porque seus resultados foram muito satisfatórios, não deixando dúvidas relativas ao cumprimento dos requisitos de norma para este parâmetro (apresentados no **Apêndice 5**).

Os resultados médios de AA, assim como os respectivos desvios padrão, são apresentados na tabela 4.09 e graficamente na figura 4.12. Não foi possível determinar AA para 1% de cimento, porque os corpos de prova se desfizeram ao serem mantidos submersos em água (figura 4.13). Os resultados completos destes ensaios são apresentados no **Apêndice 25**.

**Tabela 4.09** - Resultados médios de absorção de água, com os respectivos desvios padrão

| traço<br>(% cimento) | AA<br>(%) | Sd<br>(%) | (AA + Sd)<br>(%) | (AA - Sd)<br>(%) |
|----------------------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| 1                    | nd        | nd        | nd               | nd               |
| 3                    | 13,10     | 0,10      | 13,20            | 13,01            |
| 6                    | 11,78     | 0,12      | 11,90            | 11,68            |
| 10                   | 12,39     | 0,19      | 12,58            | 12,20            |
| 15                   | 11,73     | 0,14      | 11,87            | 11,59            |

nd: não determinado - os CPs se desfizeram em água



**Figura 4.12** - Variação da absorção de água, com a variação do teor de cimento

Para os três corpos de prova (nº 11, 12 e 13 na figura 4.14) produzidos com o traço escolhido (6% de cimento), AA foi determinada de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), ou seja, aumento progressivo do nível da água e permanência dos corpos de prova submersos por 72 h, conforme descrito no item 3.5.1. Os resultados são apresentados na tabela 4.10.

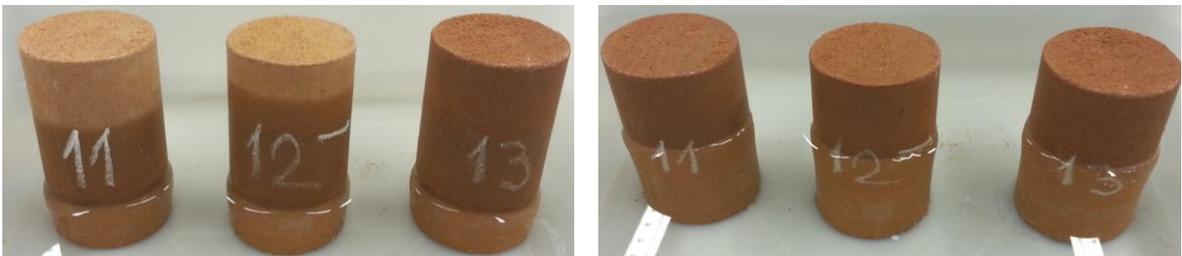
**Tabela 4.10** - Resultados médios de absorção de água e massa específica aparente seca, com os respectivos desvios padrão, dos corpos de prova com o traço escolhido (6% de cimento)

|   | CP nº |       |       | média | desvio padrão |
|---|-------|-------|-------|-------|---------------|
|   | 11    | 12    | 13    |       |               |
| <b>AA (%)</b>                                       | 12,75 | 12,97 | 13,96 | 13,23 | 0,64          |
| <b><math>\rho_{d, sc}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b> | 1,92  | 1,92  | 1,86  | 1,90  | 0,03          |

Dessa forma, a absorção de água (para 6% de cimento) passou de 11,78% ( $\pm 0,12\%$ ) para 13,23% ( $\pm 0,64\%$ ). Supõe-se que este aumento em AA se deve a maior eficiência na saturação dos corpos de prova, quando o nível de água aumenta progressivamente e o tempo de submersão é prolongado. De acordo com a norma NBR 13555 (ABNT, 2012), o corpo de prova seco em estufa é submerso totalmente em água, onde permanece por 24 h. Com isso, há uma certa dificuldade do ar contido nos vazios ser substituído totalmente por água (figura 4.13). Já de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), ao submergir apenas 1/3 da altura do corpo de prova por 4 h, sua parte exposta facilita a saída do ar e subida da água por capilaridade (figura 4.14).



**Figura 4.13** - Ensaio de absorção de água, de acordo com a norma NBR 13555 (ABNT, 2012), notando-se a saída de ar através da água e situação dos corpos de prova de 1% de cimento



**Figura 4.14** - Ensaio de absorção de água, de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), após 4 h (esquerda) e 24 h (direita) em contato com a água

Como esperado, na medida em que a massa específica aparente seca diminuiu (maior porosidade), a subida de água por capilaridade foi mais rápida, como pode ser comprovado pelos dados apresentados na tabela 4.10 e ilustrados na figura 4.14 (esquerda).

Considerando-se os resultados e discussões apresentados, sugere-se que a norma NBR 13555 (ABNT, 2012) incorpore os procedimentos da norma NBR 9778 (ABNT, 2005), para saturação do corpo de prova e determinação de AA.

Para os três corpos de prova (nº 11, 12 e 13 na figura 4.14) produzidos com o traço escolhido (6% de cimento), o índice de vazios do solo-cimento ( $e_{sc}$ ) foi determinado de duas formas: **a)** de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005); **b)** de acordo com a equação (15), proposta no presente trabalho. Como esta norma não prevê o cálculo da porosidade ( $n_{sc}$ ), foi calculada de acordo com a equação (16), proposta no item 3.5.1. Os resultados médios são apresentados na tabela 4.11 (detalhes no **Apêndice 25**).

**Tabela 4.11** - Resultados médios ( $\pm$  Sd) de índice de vazios ( $e_{sc}$ ) e porosidade ( $n_{sc}$ ), para o traço escolhido (6% de cimento), de acordo com a norma NBR 9778:2005 e do presente trabalho

|                          | $e_{sc}$            | $n_{sc}$ <sup>(1)</sup> |
|--------------------------|---------------------|-------------------------|
| <b>NBR 8778:2005</b>     | (24,90 $\pm$ 0,79)% | não prevê               |
| <b>Presente trabalho</b> | 0,41 $\pm$ 0,02     | (29,72 $\pm$ 1,21)%     |

(1) nomenclatura dada por Caputo e Caputo (2015)

Como ficou evidenciado pelos resultados apresentados na tabela 4.11, o que a norma NBR 9778 (ABNT, 2005) denomina por *índice de vazios* é, de fato, a *porosidade* adotada na área de mecânica dos solos e definida por Caputo e Caputo (2015). Assim sendo, não houve diferença expressiva entre os resultados de *porosidade* calculados pelo método proposto (29,72%) e pela norma (24,90%). Cabe destacar que, de acordo com Caputo e Caputo (2015), o índice de vazios não é expresso em porcentagem.

#### 4.5.3 Ensaio de determinação da resistência à compressão axial estimada do solo-cimento ( $f_{c,est}$ )

Conforme proposto nos itens 3.4.1 e 3.5.3, dos 10 corpos de prova CP 5x10 moldados com o traço escolhido (6% de cimento), 3 foram ensaiados na compressão axial, para determinar a resistência à compressão estimada ( $f_{c,est}$ ), para o planejamento da retirada dos extensômetros no ensaio de determinação do módulo de elasticidade. Também foram ensaiados os 3 corpos de prova CP 10x12,7 (da norma NBR 12025:2012), para comparação de resultados.

Como já comentado, os CP 5x10 moldados com o molde bipartido (em jan/2016) foram considerados suspeitos e foram produzidas novas séries de CP com o molde novo, para repetição dos ensaios (em jul/2016). Também foram produzidas novas séries de CP 10x12,7.

Os relatórios completos de ensaio, da primeira etapa, são apresentados no **Apêndice 26**; os da segunda etapa (repetição com o molde novo) são apresentados no **Apêndice 32** cujos resultados médios são apresentados na tabela 4.12.

**Tabela 4.12** - Resultados médios de resistência à compressão ( $f_c$ ), desvio padrão (sd) e coeficiente de variação (CV) dos corpos de prova ensaiados em jan/2016 (1ª determinação) e jul/2016 (2ª determinação)

| Tipo de CP | 1ª determinação<br>$f_c \pm sd$ (CV%)<br>MPa | 2ª determinação<br>$f_c \pm sd$ (CV%)<br>MPa |
|------------|--|--|
| CP 5x10    | $3,69 \pm 0,38$ (10,32%) <sup>(1)</sup>      | $4,67 \pm 0,63$ (13,47%) <sup>(2)</sup>      |
| CP 10x12,7 | $3,75 \pm 0,35$ (9,24%)                      | $3,03 \pm 0,20$ (6,68%)                      |

<sup>(1)</sup> corpos de prova produzidos com o molde bipartido

<sup>(2)</sup> corpos de prova produzidos com o molde novo (inteiriço)

Comparando-se os resultados da 1ª determinação, aparentemente a redução no tamanho do corpo de prova não causou alteração significativa no resultado da resistência à compressão, já que a diferença entre as médias foi de apenas 1,6%, para desvios padrão praticamente equivalentes. Esta hipótese continuaria válida, ao comparar este resultado com o apresentado na tabela 4.08 (para 6% de cimento), ou seja,  $f_c = (3,76 \pm 0,37)$  MPa (CV = 9,95%).

No entanto, comparando-se os resultados da 1ª e 2ª determinações do CP 5x10, observa-se que houve um aumento de 27% da resistência à compressão, com a substituição do molde bipartido pelo inteiriço, com aumento equivalente no CV. Já, comparando-se os dois tamanhos de CP na 2ª determinação, observa-se um acréscimo de 54% da resistência, com a diminuição do tamanho do CP.

Portanto, a hipótese levantada dois parágrafos atrás não se confirmou, surgindo duas novas hipóteses: 1) o molde bipartido realmente provoca defeitos nos CP e o novo molde produz CP com maior qualidade; 2) o CP com maior esbeltez (CP 5x10) apresenta maior resistência que o de menor esbeltez (CP 10x12,7), contrariando os princípios da resistência dos materiais.

Estas hipóteses precisariam ser avaliadas realizando-se muitas outras repetições dos ensaios. Como isto não seria possível no presente trabalho, optou-se por considerar os valores de  $f_c$ , obtidos com os CP 5x10 como sendo a resistência estimada, para realização dos ensaios de módulo de elasticidade.

#### 4.5.4 Ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do solo-cimento ( $E_{csc}$ )

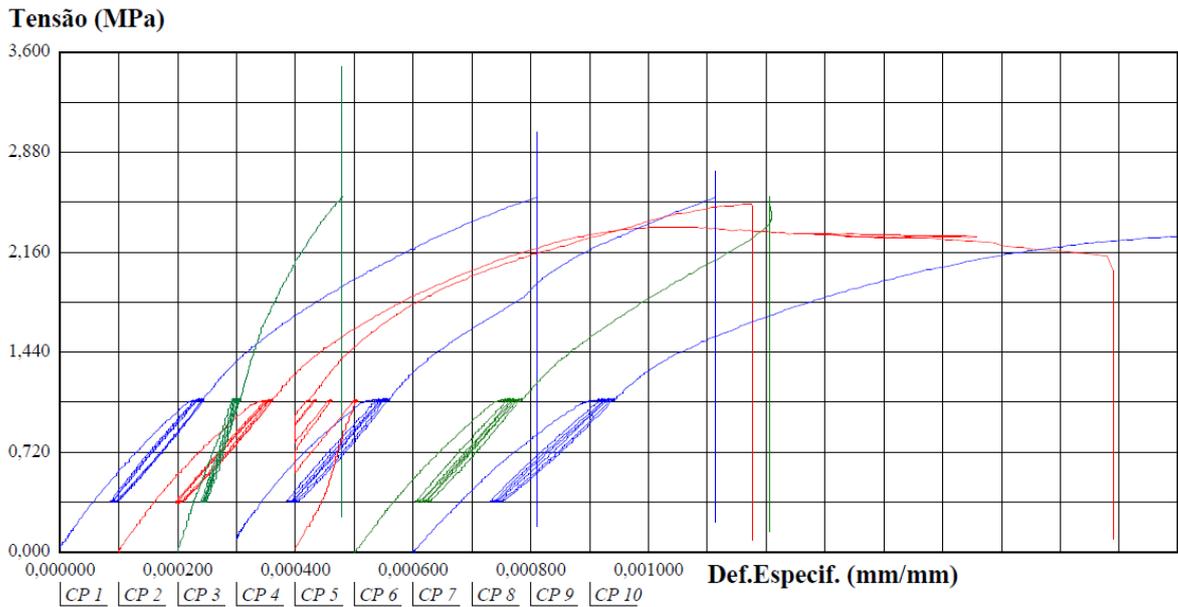
Conforme proposto nos itens 3.4.1 e 3.5.3, dos 10 corpos de prova CP 5x10 moldados com o traço escolhido (6% de cimento), 7 foram ensaiados de acordo com os procedimentos propostos no item 3.5.3, para determinar o módulo estático de elasticidade na compressão do solo cimento ( $E_{csc}$ ), considerando-se as resistências estimadas obtidas no item 4.5.3, ou seja,  $f_{c,est} = 3,69 \text{ MPa}$  (correspondente a força estimada  $F_{est} = 748 \text{ kgf}$ ) para a 1ª determinação e  $f_{c,est} = 4,67 \text{ MPa}$  (correspondente a força estimada  $F_{est} = 950 \text{ kgf}$ ), para a 2ª determinação.

Na figura 4.15 são apresentados alguns aspectos da realização do ensaio, notando-se o padrão de ruptura dos corpos de prova com a nítida formação do cone de tensões. Os relatórios completos de ensaio da 1ª determinação são apresentados no **Apêndice 27**, com duas formas de apresentação gráfica, (*força x tempo*) e (*tensão x deformação específica*), esta última mostrada na figura 4.16.

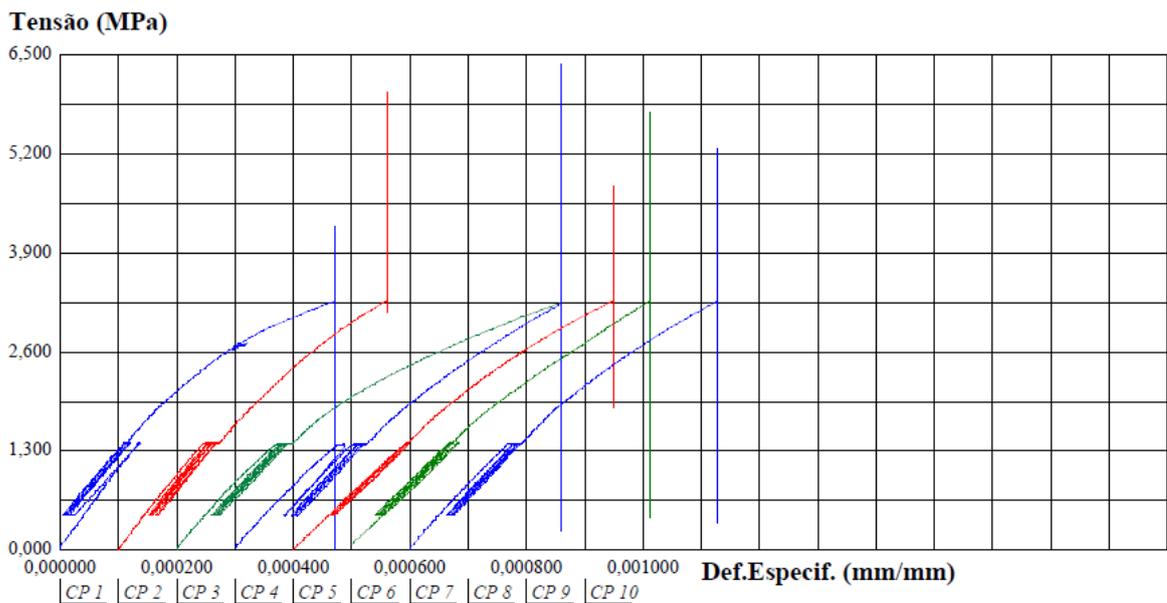
Os resultados completos da 2ª determinação são apresentados no **Apêndice 33**, cujos gráficos de (*tensão x deformação específica*) são mostrados na figura 4.17.



**Figura 4.15** - Aspectos do ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade na compressão do solo cimento, notando-se: instalação dos extensômetros, padrão de ruptura dos corpos de prova e tela de interface do *software* de comando da máquina de ensaios



**Figura 4.16** - Gráficos de tensão x deformação específica, para os 7 corpos de prova ensaiados na **1ª determinação** do módulo estático de elasticidade na compressão do solo cimento



**Figura 4.17** - Gráficos de tensão x deformação específica, para os 7 corpos de prova ensaiados na **2ª determinação** do módulo estático de elasticidade na compressão do solo cimento

Observando-se os gráficos da 1ª determinação, apresentados na figura 4.16, nota-se que os corpos de prova de números 1, 2, 4, 6 e 7 (71% do total) apresentam aproximadamente a mesma inclinação no trecho entre 10% e 30% da carga estimada, significando mesmo módulo de elasticidade. Apenas os corpos de prova 3 e 5 (29% do total) apresentaram comportamento distinto. Portanto, aparentemente os ensaios foram

satisfatórios. Porém, se houvesse sido ensaiado um número menor de corpos de prova, o ensaio poderia apresentar resultados não conclusivos.

O corpo de prova 3 foi o que apresentou comportamento mais discrepante dos demais, tanto na força de ruptura, quanto no módulo de elasticidade, como pode ser observado na tabela 4.13. Portanto, supondo-se que este corpo de prova era defeituoso, poderia ser excluído e os novos resultados seriam os apresentados na tabela 4.14, com valores médios menores, mas dispersão em nível mais aceitável.

**Tabela 4.13** - Resultados individuais e parâmetros estatísticos da força de ruptura ( $F_{rup}$ ), resistência à compressão ( $f_c$ ) e módulo elástico de deformação na compressão ( $E_{csc}$ ), para 6% de cimento, na 1ª determinação

| CP nº                 | $F_{est}$<br>(kgf) | $F_{rup}$<br>(kgf) | $f_c$<br>(MPa) | $E_{csc}$<br>(MPa) |
|-----------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 1                     | 748                | 614                | 3,02           | 4.836              |
| 2                     | 748                | 479                | 2,34           | 4.529              |
| 3                     | 748                | 712                | 3,50           | 12.767             |
| 4                     | 748                | 559                | 2,75           | 4.584              |
| 5                     | 748                | 511                | 2,51           | 5.713              |
| 6                     | 748                | 521                | 2,56           | 4.546              |
| 7                     | 748                | 471                | 2,32           | 3.675              |
| <b>Médias</b>         |                    | <b>553</b>         | <b>2,71</b>    | <b>5.807</b>       |
| <b>Desv. Padrão</b>   |                    | 86                 | 0,42           | 3.127              |
| <b>Coef. Variação</b> |                    | 15,48%             | 15,59%         | 53,84%             |

**Tabela 4.14** - Resultados individuais e parâmetros estatísticos da resistência à compressão ( $f_c$ ) e do módulo elástico de deformação na compressão do solo-cimento ( $E_{csc}$ ), a 6%, excluindo-se o corpo de prova nº 3, na 1ª determinação

| CP nº                 | $F_{est}$<br>(kgf) | $F_{rup}$<br>(kgf) | $f_c$<br>(MPa) | $E_{csc}$<br>(MPa) |
|-----------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 1                     | 748                | 614                | 3,02           | 4.836              |
| 2                     | 748                | 479                | 2,34           | 4.529              |
| 4                     | 748                | 559                | 2,75           | 4.584              |
| 5                     | 748                | 511                | 2,51           | 5.713              |
| 6                     | 748                | 521                | 2,56           | 4.546              |
| 7                     | 748                | 471                | 2,32           | 3.675              |
| <b>Médias</b>         |                    | <b>526</b>         | <b>2,58</b>    | <b>4.647</b>       |
| <b>Desv. Padrão</b>   |                    | 54                 | 0,27           | 655                |
| <b>Coef. Variação</b> |                    | 10,18%             | 10,28%         | 14,09%             |

De acordo com a tolerância de 20% proposta no item 3.5.3 (ilustrada na figura 3.17) e considerando-se  $f_{c,est} = 3,69$  MPa, a resistência à compressão efetiva individual ( $f_c$ ) deveria satisfazer a seguinte condição:  $2,95$  MPa  $\leq f_c \leq 4,43$  MPa.

Dessa forma, apenas o corpo de prova nº 1 (tabela 4.14) atenderia a condição, o que invalidaria os ensaios. No entanto, como já apontado no item 4.3, existe a possibilidade

de ocorrência de defeitos visualmente imperceptíveis durante a moldagem dos corpos de prova.

Comparando-se os gráficos da 1ª determinação (figura 4.16) com os da 2ª determinação (figura 4.17), nota-se que os CP produzidos com o novo molde apresentaram maior uniformidade no módulo de elasticidade (representado pela inclinação da curva entre 10% e 30% da carga estimada). Na tabela 4.15 são apresentados os resultados individuais da 2ª determinação.

**Tabela 4.15** - Resultados individuais e parâmetros estatísticos da força de ruptura ( $F_{rup}$ ), resistência à compressão ( $f_c$ ) e módulo elástico de deformação na compressão ( $E_{csc}$ ), para 6% de cimento, na 2ª determinação

| CP nº                 | $F_{est}$<br>(kgf) | $F_{rup}$<br>(kgf) | $f_c$<br>(MPa) | $E_{csc}$<br>(MPa) |
|-----------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 1                     | 950                | 860                | 4,25           | 8.835              |
| 2                     | 950                | 1.215              | 6,01           | 8.842              |
| 3                     | 950                | 1.035              | 5,07           | 7.241              |
| 4                     | 950                | 1.309              | 6,38           | 7.796              |
| 5                     | 950                | 965                | 4,77           | 7.087              |
| 6                     | 950                | 1.166              | 5,75           | 7.180              |
| 7                     | 950                | 1.072              | 5,28           | 7.834              |
| <b>Médias</b>         |                    | 1.089              | 5,36           | 7.831              |
| <b>Desv. Padrão</b>   |                    | 153                | 0,74           | 748                |
| <b>Coef. Variação</b> |                    | 14,09%             | 13,81%         | 9,55%              |

De acordo com a tolerância de 20% proposta no item 3.5.3 (ilustrada na figura 3.17) e considerando-se  $f_{c,est} = 4,67$  MPa, a resistência à compressão efetiva individual ( $f_c$ ) deveria satisfazer a seguinte condição:  $3,76$  MPa  $\leq f_c \leq 5,60$  MPa.

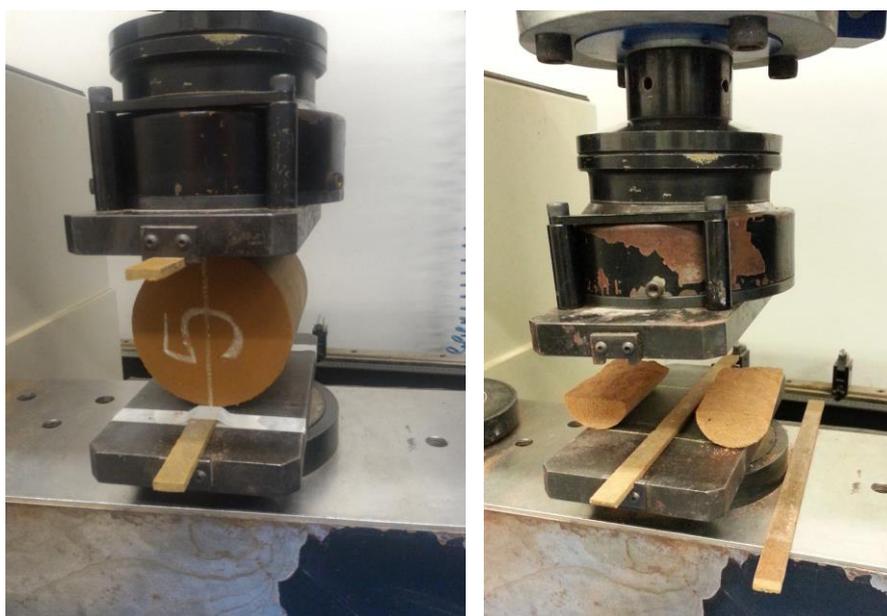
Dessa forma, na 2ª determinação (tabela 4.15), apenas 3 corpos de prova seriam rejeitados os de números 2, 4 e 6, sendo que o nº 6 está muito próximo do limite superior.

Comparando-se os CV das tabelas 4.13 e 4.15, também é evidenciada a menor dispersão dos resultados obtidos com o novo molde. Portanto, há fortes indícios de confirmação da hipótese de defeitos provocados pelo molde bipartido. No entanto, vale reforçar que para uma avaliação mais conclusiva seriam necessárias mais repetições dos ensaios.

#### 4.5.5 Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral ( $f_{t,D,sc}$ ) do solo-cimento

Conforme proposto no item 3.5.4, sete dos dez corpos de prova CP 5x10 foram ensaiados para determinação da resistência à tração por compressão diametral do solo-cimento ( $f_{t,D,sc}$ ). Também foram ensaiados três corpos de prova CP 10x12,7, para efeito de comparação. Pelos motivos já expostos no item 4.5.3, também foram realizadas duas determinações nos ensaios de compressão diametral.

Na figura 4.18 são apresentados alguns aspectos da realização do ensaio, na 1ª determinação, na qual foi utilizado o dispositivo de ensaio próprio para corpos de prova de concreto de 10x20, acoplado à célula de carga com capacidade para 30.000 kgf. Os relatórios completos da 1ª determinação são apresentados no **Apêndice 28**.

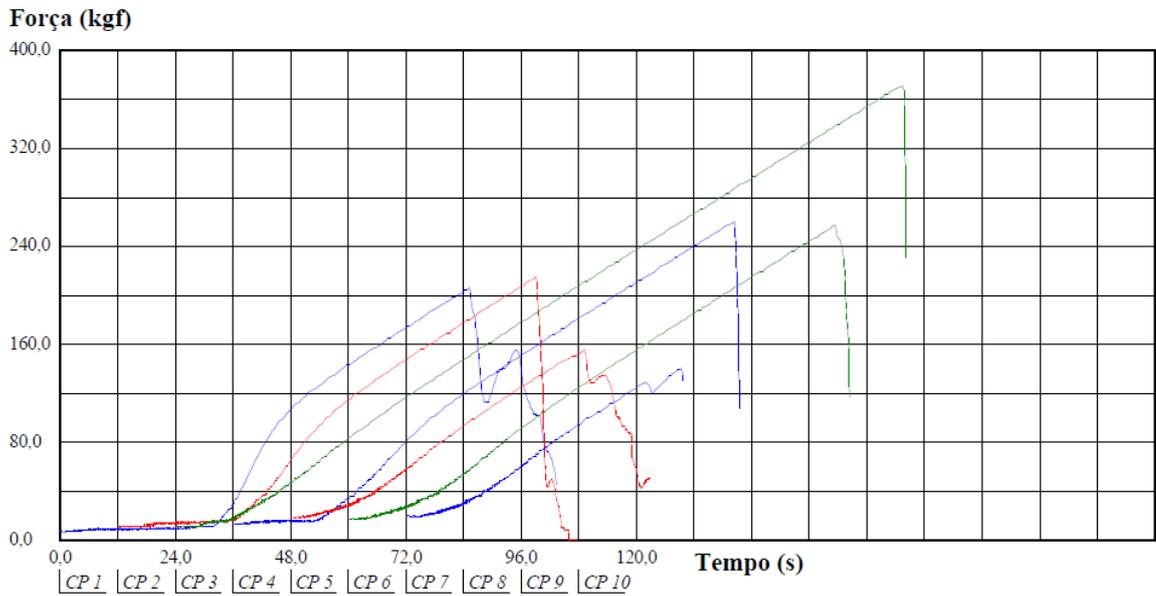


**Figura 4.18** - Corpo de prova em ensaio e rompido, na 1ª determinação da resistência à tração por compressão diametral do solo cimento

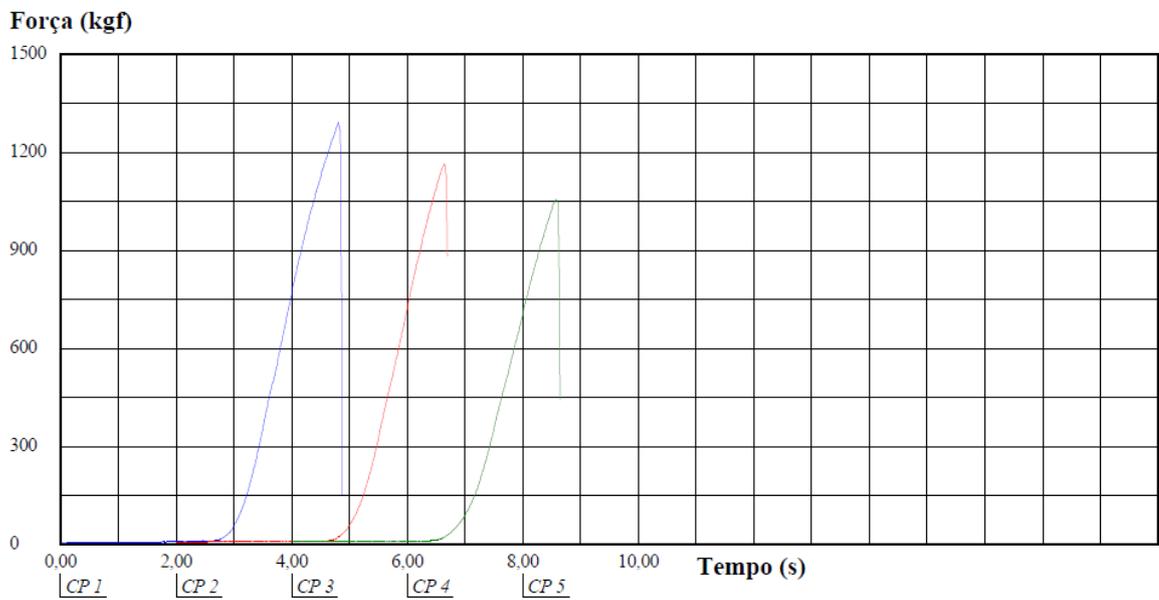
Nas tabelas 4.16 e 4.17 são apresentados os resultados de todos os corpos de prova da 1ª determinação, representados nas figuras 4.19 e 4.20, cujos resultados médios são:

CP5x10:  $f_{t,D,sc} = (0,29 \pm 0,04)$  MPa e CV = 11,97%

CP10x12,7:  $f_{t,D,sc} = (0,57 \pm 0,06)$  MPa e CV = 9,78%



**Figura 4.19** - Gráficos do ensaio da 1ª determinação da resistência à tração, por compressão diametral, dos corpos de prova CP5x10



**Figura 4.20** - Gráficos do ensaio da 1ª determinação da resistência à tração, por compressão diametral, dos corpos de prova CP10x12,7

**Tabela 4.16** - Resultados do ensaio da 1ª determinação da resistência à tração, por compressão diametral dos CP 5X10 ( $f_{tD}$ ), com as respectivas cargas de ruptura ( $F_{tD,max}$ ), para 6% de cimento, valores médios, desvio padrão (Sd) e coeficiente de variação (CV)

| CP nº                                   | $F_{tD,max}$ (kgf)     | $f_{tD}$ (MPa)      |
|---|------------------------|---------------------|
| 1                                       | 206,70                 | 0,26                |
| 2                                       | 215,86                 | 0,27                |
| 3 (R)                                   | 371,65                 | 0,46                |
| 4                                       | 260,66                 | 0,32                |
| 5 (R)                                   | 155,79                 | 0,19                |
| 6                                       | 257,61                 | 0,32                |
| 7 (R)                                   | 140,51                 | 0,18                |
| <b>Média ± Sd (CV %)</b> <sup>(1)</sup> | 235,20 ± 27,91 (11,87) | 0,29 ± 0,04 (11,97) |
| <b>Média ± Sd (CV %)</b> <sup>(2)</sup> | 229,83 ± 77,49 (33,72) | 0,29 ± 0,09 (33,20) |

<sup>(1)</sup> Excluindo-se os CP rejeitados e marcados com (R)

<sup>(2)</sup> Considerando-se todos os sete CP

Os CP 3, 5 e 7 foram rejeitados porque apresentaram resultados muito discrepantes dos demais, estratégia válida quando se trabalha com resultados experimentais. Os CP 5 e 7 apresentaram resultados muito baixos, além de aparentarem indícios de ruptura prévia (durante a desmoldagem). O CP 3 apresentou resultado muito alto. Estas discrepâncias ficam evidenciadas quando se calculam os parâmetros estatísticos sem rejeição, considerando-se todos os corpos de prova, conforme apresentado na tabela 4.16. A média da resistência à tração, com e sem rejeição, se manteve inalterada (0,29 MPa), porém, o coeficiente de variação aumentou de 11,97% (com rejeição) para 33,20% (sem rejeição), o que seria classificado por Correa (2003, p.60) como "alta dispersão". De acordo com esta autora, uma distribuição estatística precisa apresentar coeficiente de variação de, no máximo, 15% para ser considerada de "baixa dispersão", o que aconteceu quando se rejeitaram os valores discrepantes.

**Tabela 4.17** - Resultados do ensaio da 1ª determinação da resistência à tração por compressão diametral dos CP 10X12,7 ( $f_{tD}$ ), com as cargas de ruptura ( $F_{tD,max}$ ), para 6% de cimento, valores médios, desvio padrão (Sd) e coeficiente de variação (CV)

| CP nº                    | $F_{tD,max}$ (kgf)        | $f_{tD}$ (MPa)     |
|--------------------------|---------------------------|--------------------|
| 1                        | 1.293,14                  | 0,62               |
| 2                        | 1.164,84                  | 0,56               |
| 3                        | 1.057,93                  | 0,51               |
| <b>Média ± Sd (CV %)</b> | 1.171,97 ± 117,77 (10,05) | 0,56 ± 0,06 (9,78) |

Comparando-se os resultados dos ensaios dos dois tamanhos de corpos de prova, nota-se que:

- O resultado médio de  $f_{ID,sc}$  do CP 5x10 foi praticamente a metade do CP 10x12,7, mesmo tendo sido excluídos os 3 corpos de prova mais discrepantes dos CP 5x10 (CP números 3, 5 e 7);
- O coeficiente de variação dos resultados do CP 10x12,7 (9,78%) foi ligeiramente inferior ao do CP 5x10 (11,97%), mesmo considerando-se praticamente o mesmo número de corpos de prova, ou seja, 3 CP 10x12,7 e 4 CP 5x10; e,
- Caso se considerem todos os 7 CP 5x10, a dispersão de seus resultados seria muito maior que a dos CP 10x12,7 (coeficiente de variação CV de 33,20% contra 9,78%).

Mesmo para o concreto, supostamente um material mais homogêneo e sobre o qual se tem maior domínio do processo de produção, a realização deste ensaio é bastante delicada, apresentando dificuldades no perfeito posicionamento dos corpos de prova no dispositivo de ensaio, de modo que a aplicação da carga seja exatamente diametral. Com isso, também ocorrem dispersões de resultados<sup>1</sup>.

No caso do presente trabalho, estas dificuldades foram ampliadas e os resultados podem ser considerados pouco confiáveis pelos seguintes motivos:

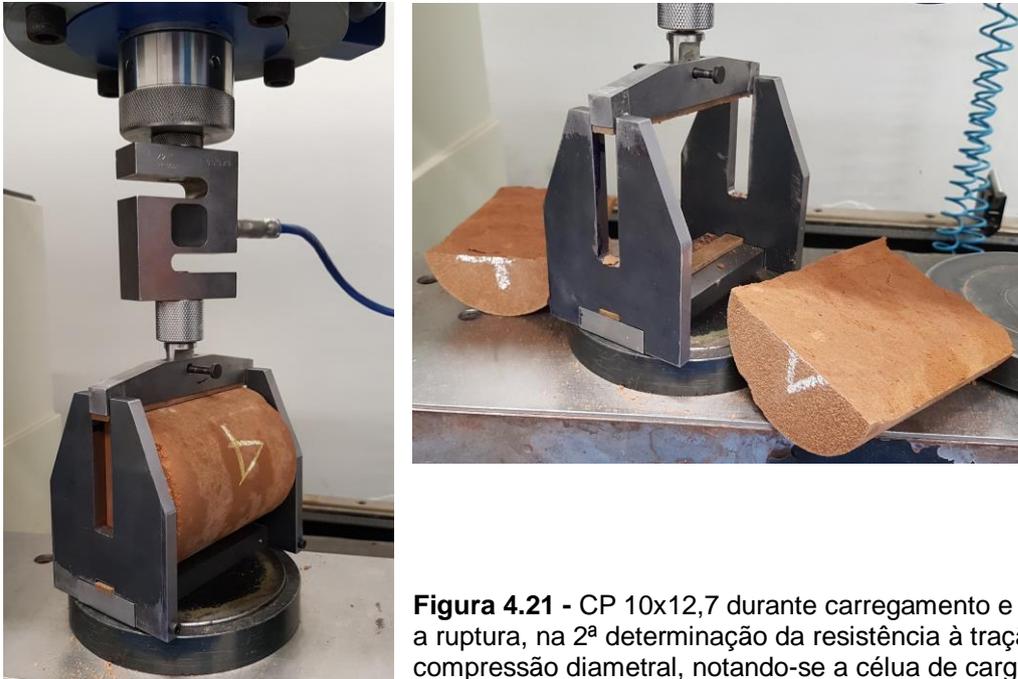
- Há evidência de defeitos causados pelos moldes aos corpos de prova, como já apontado;
- Foi utilizada a célula de carga com capacidade para 30.000 kgf (padrão da máquina de ensaios), que apresenta pouca precisão para o baixo nível das cargas deste ensaio (da ordem de 300 kgf), porque não seria possível acoplar o dispositivo de aplicação de carga padrão da norma NBR 7222 (ABNT, 2011); e,
- Mesmo tendo sido utilizado um gabarito (para posicionamento dos CP 5X10), por estes serem de dimensões reduzidas, pequenos desvios já afetam os resultados.

Para tentar minimizar estes problemas, foram produzidos novos corpos de prova, para a 2ª determinação, utilizando-se o dispositivo apresentado no item 4.3.2 (para os dois tamanhos de CP), cujo cutelo de aplicação de carga pode ser acoplado em uma célula de carga do tipo "Z", com capacidade de carga de 2.000 kgf, que oferece mais precisão para os níveis de carga deste ensaio.

---

<sup>1</sup> Conforme atesta o prof. Obede B. Faria, que realiza estes ensaios semestralmente há 14 anos (de acordo com a norma NBR 7222:2011), em suas aulas de Laboratório de Materiais de Construção Civil I, para o Curso de Graduação em Engenharia Civil, na FEB/UNESP-Bauru. No entanto, seus resultados não estão compilados e publicados.

Nas figuras 4.21 e 4.22 são apresentados alguns aspectos da realização do ensaio, na 2ª determinação. Os relatórios completos desta determinação são apresentados no **Apêndice 34**.



Para facilitar a comparação e discussão dos resultados, na tabela 4.18 são reunidos os resultados médios das duas determinações.

**Tabela 4.18** - Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral ( $f_c$ ), desvio padrão (sd) e coeficiente de variação (CV) dos corpos de prova ensaiados em jan/2016 (1ª determinação) e jul/2016 (2ª determinação)

| Tipo de CP | 1ª determinação<br>$f_{tD} \pm sd$ (CV%)<br>MPa | 2ª determinação<br>$f_c \pm sd$ (CV%)<br>MPa |
|------------|---|--|
| CP 5x10    | 0,29 ± 0,09 (33,20%) <sup>(1)</sup>             | 0,94 ± 0,08 (8,87%) <sup>(2)</sup>           |
| CP 10x12,7 | 0,56 ± 0,06 (9,78%)                             | 0,51 ± 0,04 (7,60%)                          |

<sup>(1)</sup> corpos de prova produzidos com o molde bipartido e ensaiados com célula de carga 30.000 kgf (dispositivo adaptado), valores sem rejeição

<sup>(2)</sup> corpos de prova produzidos com o molde novo (inteiriço) e ensaiados com célula de carga de 2.000 kgf e o dispositivo desenvolvido para esta finalidade

Observando-se os resultados do CP 5x10, é inegável a superioridade da qualidade da 2ª determinação, cuja resistência média apresentou acréscimo de 224% com relação à 1ª determinação e coeficiente de variação muito menor. Seguramente, estes ganhos podem ser atribuídos às três condições mais favoráveis: 1) molde mais adequado dos CP; 2) dispositivo de ensaio apropriado; e, 3) célula de carga com precisão mais compatível com os níveis de carregamento.

Comparando-se a variação de resultados entre os dois tamanhos de CP, na 2ª determinação, na qual as condições favoráveis foram as mesmas, há que se investigar mais os possíveis motivos para o acréscimo de 84% na resistência média, com a redução do tamanho do CP, para dispersões equivalentes (CV similares para os dois tamanhos de CP).

A comparação com resultados obtidos por outros autores fica prejudicada, porque são poucos os trabalhos encontrados na literatura, que tratam da resistência à tração por compressão diametral de solo-cimento compactado.

Milani e Freire (2006) utilizaram solo com 9% de argila, 19% de silte e 72% de areia (semelhante ao do presente trabalho), moldaram CP 10x12,7 com 8% de cimento e obtiveram  $f_{tD,sc} = (0,33 \pm 0,09)$  MPa e CV = 26,7% aos 7 dias de idade; portanto, inferior ao do presente trabalho (0,94 MPa) e com grande dispersão. No entanto, estes autores utilizaram cimento CP-III-40 RS e não explicitaram as possíveis adaptações realizadas no método adotado, o da norma NBR 7222 (ABNT, 2011).

Parente et al. (2002) utilizaram solo com 18% de argila, 12% de silte e 70% de areia (semelhante ao do presente trabalho); moldaram corpos de prova com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura (diferente dos dois CP do presente trabalho) e, para 7% cimento, aos 7 dias de idade obtiveram  $f_{tD,sc} = 0,37$  MPa. No entanto, utilizaram cimento CP-II E32, não apresentaram parâmetros de dispersão (desvio padrão e CV) e não explicitaram o método de ensaio adotado. Portanto, não são possíveis comparações.

Falcão e Soares (2015) utilizaram um solo laterítico (composição granulométrica não declarada), moldaram corpos de prova com 10,16 cm de diâmetro e 6,3 cm de altura e, para 7% de cimento, obtiveram  $f_{tD,sc} = 0,18$  MPa. No entanto, não especificaram o tipo de cimento, não informaram o método de compactação, a idade do CP e os parâmetros de dispersão dos resultados, além de terem adotado um método de ensaio não detalhado (citado apenas como "ME 138, DNER, 1994"). Portanto, também não é possível realizar comparações, mas os autores apresentam revisão bibliográfica e fundamentação teóricas muito consistentes e comentam sobre as dificuldades e incertezas dos resultados.

capítulo **5**

# CONSIDERAÇÕES FINAIS





presente trabalho apresenta inovações na metodologia de ensaio para caracterização física e mecânica do solo-cimento compactado, uma das principais técnicas de construção com terra utilizadas no Brasil na atualidade, trazendo mais agilidade e confiabilidade ao processo. Uma nova metodologia é importante para estimular o uso dessa técnica e conseqüentemente o de outras técnicas de construção com terra, atenuando os impactos negativos gerados pela construção civil.

O novo molde proposto para confecção dos corpos de prova se mostrou eficiente no sentido de facilitar a realização dos ensaios previstos nas normas de solo-cimento, diminuindo o tempo de compactação e a quantidade de material utilizado, possibilitando a produção de maior número corpos de prova em cada amostra, tornando os resultados mais confiáveis. Algumas dificuldades também foram encontradas durante a utilização do novo molde, como a ruptura diametral dos corpos de prova, ocasionada pelo corpo bipartido do molde. Porém, com as alterações realizadas, os problemas encontrados foram sanados satisfatoriamente, mantendo as vantagens obtidas no processo.

Do ponto de vista de aplicação prática dos resultados obtidos, a principal utilidade das curvas de dosagem apresentadas na figura 4.10 é orientar na escolha do teor mínimo de cimento, para atingir uma determinada resistência à compressão desejada ou estabelecida por norma. Mesmo quando não exigido, é prudente escolher o teor de cimento baseando-se na curva de valor característico.

A título de exemplo, na figura 4.10 são registrados graficamente os requisitos de resistência à compressão estabelecidos pelas diversas normas para solo-cimento e pela norma de tijolos cerâmicos, detalhados no **Apêndice 5**. Dessa forma, seriam necessários os seguintes teores mínimos de cimento:

- Para paredes monolíticas não estruturais de solo-cimento: 1,8% de cimento, considerando-se  $f_c \geq 1,0$  MPa;
- Para tijolos e blocos de solo-cimento, de vedação: 3,0% de cimento, considerando-se  $f_c \geq 2,0$  MPa;

- Para material equivalente a blocos cerâmicos para alvenaria estrutural: 5,6% de cimento, considerando-se exigência de  $f_{ck} \geq 3,0$  MPa;
- Para material equivalente a tijolo maciço cerâmico, "categoria C": 10,0% de cimento, considerando-se exigência de  $f_{ck} \geq 4,0$  MPa.

Para verificação das hipóteses levantadas ao final dos itens 4.5.3, 4.5.4 e 4.5.5 é indispensável a continuação do presente trabalho, com a produção de um número maior de amostras, para realizar mais repetições dos ensaios, inclusive com outros tipos de solos.

Outro ponto que merece destaque são as dificuldades encontradas quando se tenta comparar os resultados obtidos no presente trabalho com os encontrados por outros autores porque, na maioria dos trabalhos disponíveis as estratégias metodológicas não são suficientemente claras. Portanto se faz necessário que os procedimentos sejam muito bem explicados, de preferência com ilustrações esclarecedoras, para que se possa entender o que e como cada ensaio foi realizado. Por este motivo é que se optou por apresentar todos os resultados de ensaios na forma de apêndices.

Os resultados obtidos são promissores, no sentido de alcançar os objetivos propostos para o trabalho, fornecendo subsídios para futuras discussões entre outros pesquisadores e laboratórios. Dessa forma, espera-se que em um futuro próximo seja possível reunir dados mais consistentes, para que sejam propostas revisões nas atuais normas brasileiras para solo-cimento, ou mesmo a proposta de novas normas para outras técnicas de construção com terra, junto a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



AGNELLI, N. **Comportamento de um solo colapsível inundado com líquidos de diferentes composições químicas**. 1997. 205 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

ALVES, M. E.; MASCARENHAS, Y. P.; VAZ, C. M. P. Comparação de procedimentos de quantificação de caulinita e gibbsita na fração argila desferrificada de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 569-577, mar/abr 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200012>. Acesso em: 10 jan. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3282**: Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. West Conshohocken (USA), 2004. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das Misturas de Solo-Cimento: Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio**. Estudo Técnico 35. 54p. São Paulo - SP: ABCP, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica: procedimento. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10834**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11798**: Materiais para base de solo-cimento: requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12023**: Solo-cimento: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012. 7 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12024**: Solo-cimento: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos: procedimento. Rio de Janeiro, 2012. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12025**: Solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12253**: Solo-cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento: procedimento. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13553**: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13554**: Solo-cimento: ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2012k. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13555**: Solo-cimento: determinação da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 1 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos Parte 1: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação: terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270-2:** Componentes cerâmicos Parte 2: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural: terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-4:** Edificações habitacionais: desempenho. Parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE . Rio de Janeiro, 2013. 63 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15812-2:** Alvenaria estrutural - blocos cerâmicos Parte 2: execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010. 28 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16096:** Solo-cimento: determinação do grau de pulverização: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457:** Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459:** Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508:** Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984 (Esta norma foi cancelada mas não possui substituta). 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180:** Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984 (Versão corrigida: 1988). 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181:** Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984 (Versão corrigida: 1988). 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182:** Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986 (Versão corrigida: 1988). 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215:** Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996 (Versão corrigida: 1997). 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222:** Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8491:** Tijolo de solo-cimento: requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8492:** Tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522:** Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005 (Versão corrigida em 2009). 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 43**: Cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001 (Versão corrigida: 2001). 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65**: Cimento Portland: determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 41410**: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques - Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid, 2008. 26 p.

BRASIL. Ministério da Educação. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (2015). **Portal de periódicos CAPES/MEC**. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 03 jan. 2015.

BUI, Q. B. et al. Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. **Building and Environment**, Elsevier, v. 44, n. 5, p. 912-919, maio 2009.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: IAC, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Ed. revista e atualizada).

CANTEIRO, F.; PISANI, M. A. J. Taipa de mão: História e Contemporaneidade. **ae ensaios**, v. 1, n. 2, p. 2-21, out 2006.

CAPUTO, H.P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. v. 1. 256 p. ISBN 9788521618850

CIANCIO, D.; GIBBINGS, J. Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 294-304, mar. 2012.

CORREA, S. M. B. B.. **Probabilidade e estatística**. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2.ed., 2003, 116 p. Disponível em: [http://www.sema.edu.br/editor/fama/livros/educacao/ESTADISTICA/livro\\_probabilidade\\_estadistica\\_2a\\_ed.pdf](http://www.sema.edu.br/editor/fama/livros/educacao/ESTADISTICA/livro_probabilidade_estadistica_2a_ed.pdf) Acesso em: 05 fev. 2016

CRIA arquitetura. Portifólio. **Terracompacta**, 2010. Disponível em: <http://www.terracompacta.com.br/portifolio>. Acesso em: 6 jan 2016.

FAGUNDES, L. S. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado**. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. **Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais para pavimentação**. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267254059> Acesso em: 06 ago. 2016.

FARIA, O. B. **Utilização de macrófitas aquáticas na produção de adobe: um estudo de caso no Reservatório de Salto Grande (Americana-SP)**. 2002, 200 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-10022003-103821/>. Acesso em: 15 dez. 2015.

FARIA, O. B. Identificação e seleção de solos. In: NEVES, C.; FARIA, O. B. (Org.). **Técnicas de construção com terra**. Bauru: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. p. 12-15. Disponível em: <http://www.redproterra.org>. Acesso em: 03 jan. 2016.

FARIA, O. B.; BATTISTELLE, R. A. G.; NEVES, C. Influence of the addition of “synthetic termite saliva” in the compressive strength and water absorption of compacted soil-cement. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 127-136, jul./set. 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300096>>. Acesso em 10 jul. 2016.

FARIA, O. B.; NEVES, C.; PINTO, E. da S. Proposta de método de ensaio para determinação do módulo de deformação de adobes. In: LATIN AMERICAN AND EUROPEAN CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDINGS AND COMMUNITIES, 2015, Guimarães Pt. **Proceedings of EURO ELECS 2015**. Guimarães: ANTAC, Universidade do Minho, 2015. v. 2, p. 747-756. ISBN 978-989-96543-8-9.

FERNANDES, M. A taipa no mundo. **digitAR – Revista Digital de Arqueologia, Arquitectura e Artes**, Portugal, v. 1, n. 1, p. 14-21, 2013.

GOMES, M. I.; BRITO, J.; LOPES, M. Construção de uma edificação em terra crua reforçada com pórticos em betão armado. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil**, 2008. Disponível em: <[http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art4\\_N12.pdf](http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art4_N12.pdf)>. Acesso em: 06 jan. 2014.

GUÉGEUN, A. Pisé à la base des murs. **Maison Suindara, 2014**. Disponível em: <<https://maisonsuindara.wordpress.com/02-pise-a-la-base-des-murs/>>. Acesso em 7 jan. 2016

HAMASSAKI, L. T.; SANTOS, R. F. dos. Corpos de prova. **Revista Notícias da Construção**, São Paulo, p. 48-49, nov. 2013.

HEISE, A. F. **Desenho do processo e qualidade na construção do painel monolítico de solo-cimento em taipa de pilão**. 2004, 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2004.

HOEPPNER, C. A. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de tijolos e blocos de solo-cimento**. Bauru: FEB/UNESP, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil (orientador: Prof. Dr. Obede Borges Faria).

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Traité de construction en terre**. 2.ed. Marseille: Editions Parenthèses / CRATerre, 1995. 355 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO E TECNOLOGIA. **Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações**: conhecimento e reconhecimento - Pesquisa científica no Brasil. Disponível em: <http://bdtd.ibict.br/>. Acesso em: 15 dez. 2015.

- LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.
- LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 2. ed.
- LOMBILLO, I. et al. In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 51, n. 1, p. 451-460, jan. 2014.
- LOPES, W. G. R. **Taipa de mão no Brasil: Levantamento e análise de construções**. 1998, 232 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 1998.
- MELO, B. M. et al. Desempenho estrutural de protótipo de alvenaria construída com blocos de terra estabilizada. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 111-124, abr/jun 2011.
- MILANI, A. P. S. **Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica**. 2008, 164 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000435409>. Acesso em 15 dez. 2015.
- MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. **Revista Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.1-10, jan./abr. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30090.pdf> Acesso em: 06 ago. 2016.
- MUÑOZ, R.; MAGALHÃES, A. C.; CAFEZEIRO, Y. G.; OLIVEIRA, M. M. de. O carnaval de salvador e seus efeitos no forte de Santo Antônio da Barra. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO SOBRE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN, TECNOLOGÍA DE LA REHABILITACIÓN Y GESTIÓN DEL PATRIMONIO, 2014, Santander - Es. **REHABEND 2014**. Santander: Universidad de Cantabria, 2014. p. 853-860.
- NEVES, C. Introdução. In: NEVES, C.; FARIA, O. B. (Org.). **Técnicas de construção com terra**. Bauru: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. p. 12-15. Disponível em: <http://www.redproterra.org>. Acesso em: 03 jan. 2016.
- NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; CEVALLOS, P. S.; HOFFMANN, M. V. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra: práticas de campo**. PROTERRA, 2010. 33 p. Disponível em: <http://www.redproterra.org>. Acesso em: 03 jan. 2016.
- NEVES, C.; MILANI, A. P. Bloco de terra comprimida - BTC. In: NEVES, C.; FARIA, O. B. (Org.). **Técnicas de construção com terra**. Bauru: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. p. 12-15. Disponível em: <http://www.redproterra.org>. Acesso em: 03 jan. 2016.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 472 p.

PARENTE, E. B.; PARREIRA, A. B.; SOARES, J. B. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e de outro não laterítico estabilizados com cimento**. 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/242243712> Acesso em: 06 ago. 2016

PICORELLI, L. C. Construção de terra: Parte 2.7 - Cidades e monumentos de Adobe: Novo México. **Bioarquitetura e Bioconstrução**, 2011. Disponível em: <<http://lecycorelli-bioarquitetura.blogspot.com.br/2011/08/construcao-de-terraparte-27-cidades-e.html#axzz3xXnO1wBs>>. Acesso em: 10 jan 2016.

ROGERS, R.; GUMUCHDJIAN, P. **Cidades para um pequeno planeta**. Barcelona: Editoria Gustavo Gili, 2001.

SANTOS, R. A. **Comportamento anisotrópico de um solo laterítico compactado**. 2015. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Instituto Agrônômico (IAC) de Campinas. **Solos do Estado de São Paulo**. Disponível em: [http://www.iac.sp.gov.br/solosp/solos\\_sao\\_paulo.html](http://www.iac.sp.gov.br/solosp/solos_sao_paulo.html). Acesso em 15/01/2015.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Instituto Agrônômico (IAC) de Campinas. **Latossolos**. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp/pdf/Latossolos.pdf>. Acesso em 01/02/2015.

SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES - SIA. **D 0111: Regeln zum bauen mit lehm**. Zurique, 1994. 82 p.

SOUZA, M. I. b.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 205-212, 2008.

TAIPAL construções em terra. **Taipal**, 2015. Disponível em: < <http://www.taipal.com.br/>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

TIJOLO ecológico. **Ecoviladamontanha**, 2015. Disponível em: <<http://ecoviladamontanha.org/tijolo-ecologico/>>. Acesso em: 18 dez 2015.

TIJOLOS ecológicos em solo cimento. **Ecoblocos**, 2012. Disponível em: <<http://ecoblocos.no.comunidades.net/tijolos-ecologicos-em-solo-cimento>>. Acesso em: 7 jan 2016.

TRAMONTANO, M., REQUENA, C. A. **Unidades experimentais de habitação 001 e 002**. In: *revista Técnica*, n. 49, p. 56-59. São Paulo: Pini, 2000.

WALKER, P.; KEABLE, R.; MARTIN, J.; MANIATIDIS, V. **Rammed earth: design and construction guidelines**. Watford (UK): BRE Bookshop, 2005. 146 p.

YAMASAKI, M. T. **Influência da salinidade do fluido na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos**. 2012, 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012.

# APÊNDICES



---

## APÊNDICE 1 - Script do ensaio de compressão axial dos corpos de prova de argamassa normal 5x10 (para caracterização do cimento)

**Programa Tesc - Esboço de Script**  
**Método Argamassa Compressao Simples\_Obede**  
**Data: 13/07/04**  
**Obede Borges Faria**

### 1 \*\*\*Variáveis de entrada

2 Diâmetro -> "Diâmetro ->do CP", 50.00 mm, Ent, Res, Edi

3

### 4 \*\*\*Variáveis atribuíveis

5 S -> "Seção ->do CP", cm2, Res, Rel

6 Fmax -> "Força Máxima", kgf, Res, Rel

7 Tensmax -> "Resistência->Obtida", MPa, Res, Rel

8

### 9\*\*\*Eventos

10 @FM -> "", Vis

11

### 12 \*\*\*Atribuições

13 SIS\_ÁREA = ÁREA\_CIRC( Diâmetro )

14 S = CÓPIA( SIS\_ÁREA )

15 @FM = @FORÇA\_MAX( )

16 Fmax = FORÇA( @FM )

17 Tensmax = TENSÃO( @FM )

18

### 19 \*\*\*Mensagens

20 M1 -> INÍCIO DO ENSAIO

21 M2 -> FIM DE ENSAIO

22 M3 -> LIMITE DE CARGA ATINGIDO ENSAIO ABORT...

23

### 24 \*\*\*Comandos

25 SALVAR\_POSIÇÃO\_INICIAL( )

26 ATIVAR\_LIMITE\_DEFORM( 6.000 mm )

27 ATIVAR\_LIMITE\_FORÇA( 15000 kgf )

28 AGUARDAR\_CHEGADA( )

29 ATIVAR\_DET\_RUPTURA( 0.0000 )

30 MOV\_ATÉ\_\_\_\_\_A\_\_\_\_\_ ( 15000 kgf; 50.00 kgf/s )

31 AGUARDAR\_CHEGADA( )

32

33 EM\_RUPTURA/COLAPSO( )

34 PARAR\_SUAVERMENTE( )

35 BIP( 1.000 )

36 DISPARAR\_MENSAGEM( M2; 5.000 s )

37 RETORNAR\_POSIÇÃO\_INICIAL( 15.00 mm/min )

38 FINALIZAR\_ENSAIO( )

39

40 EM\_LIMITE\_FORÇA( )

41 PARAR\_ABRUPTAMENTE( )

42 BIP( -2.000 )

43 DISPARAR\_MENSAGEM( M3; 5.000 s )

44 RETORNAR\_POSIÇÃO\_INICIAL( 15.00 mm/min )

45 FINALIZAR\_ENSAIO( )

46

47 EM\_LIMITE\_DEFORM( )

48 PARAR\_SUAVERMENTE( )

49 FINALIZAR\_ENSAIO( )

## APÊNDICE 2 - Planejamento dos experimentos

### Planejamento produção CPs para ensaio para determinação da resistência à compressão do solo-cimento

| próctor normal (10x12,7) 11,30    |                               |          |          |          |          | 11,80                                     |          |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|---|----------|
| W <sub>ú</sub> (%) = 11,80        |                               |          |          |          |          | W <sub>ú</sub> <sup>(1)</sup> (%) = 12,30 |          |
|                                   | acréscimo para perda (%)= 0,5 |          |          |          |          | 2º lote                                   | 3º lote  |
|                                   |                               |          |          |          |          | CP  | CP       |
|                                   |                               |          |          |          |          | 5x10                                      | 10x12,7  |
| % cimento                         | 1                             | 3        | 6        | 10       | 15       | 6   | 6        |
| nº de CPs                         | 6                             | 6        | 6        | 6        | 6        | 10  | 3        |
| M solo seco (g)                   | 3.000,00                      | 3.000,00 | 3.000,00 | 3.000,00 | 3.000,00 | 4.500,00                                  | 6.000,00 |
| W <sub>higr</sub> (%)             | 1,16                          | 1,16     | 1,16     | 1,16     | 1,16     | 1,97                                      | 2,24     |
| M solo W <sub>higr</sub> (g)      | 3.034,80                      | 3.034,80 | 3.034,80 | 3.034,80 | 3.034,80 | 4.588,77                                  | 6.134,46 |
| M água W <sub>higr</sub> (g)      | 34,80                         | 34,80    | 34,80    | 34,80    | 34,80    | 88,77                                     | 134,46   |
| M cimento (g)                     | 30,00                         | 90,00    | 180,00   | 300,00   | 450,00   | 270,00                                    | 360,00   |
| W <sub>ú</sub> <sup>(1)</sup> (%) | 12,30                         | 12,30    | 12,30    | 12,30    | 12,30    | 12,30                                     | 11,80    |
| M água total (g)                  | 372,69                        | 380,07   | 391,14   | 405,90   | 424,35   | 586,71                                    | 750,48   |
| M água a adicionar (g)            | 337,89                        | 345,27   | 356,34   | 371,10   | 389,55   | 497,94                                    | 616,02   |
| M solo W <sub>higr</sub> (g)      | 1.517,40                      | 1.517,40 | 1.517,40 | 1.517,40 | 1.517,40 | 2.294,38                                  | 3.067,23 |
| M cimento (g)                     | 15,00                         | 45,00    | 90,00    | 150,00   | 225,00   | 135,00                                    | 180,00   |
| M água a adicionar (g)            | 168,95                        | 172,64   | 178,17   | 185,55   | 194,78   | 248,97                                    | 308,01   |

meia "receita" para 3 CPs

**Observações:** <sup>(1)</sup> A NBR 12024:2012 (item 5.1.3) recomenda aumentar a U<sub>ót</sub> em 0,5 a 1,0%, para compensar perdas por evaporação durante o processo de moldagem

| Consumo de solo                                   |         |                          |         |
|---|---------|--------------------------|---------|
|   | 1º lote | 2º lote                  | 3º lote |
| umidade higroscópica do solo (%)                  | 1,16    | 1,97                     | 2,24    |
| nº golpes ensaio compactação solo                 | 10      |                          |         |
| umidade ótima compactação - w <sub>ú</sub> (%)    | 11,8    | do ensaio de compactação |         |
| massa esp. Apar. Seca máxima (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,96    |                          |         |
| volume CP 5 x 10 (cm <sup>3</sup> )               | 196,35  |                          |         |
| massa solo seco para 1 CP (g)                     | 385     |                          |         |

### APÊNDICE 3 - Script do ensaio de compressão axial dos corpos de prova de solo-cimento 5x10

```
>>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>>> Método Solo-cimento CP cilíndr 50 mm
>>>>> Data: 25/12/15
1 ***Variáveis de entrada
2 Diâmetro -> "Diâmetro ->do CP", 50,00 mm, Ent, Res, Rel, Edi
3 Altura -> "Altura->do CP", 100,0 mm, Ent, Rel, Edi
4
5***Variáveis atribuíveis
6 S -> "Seção ->do CP", cm2, Res, Rel
7 Fmax -> "Força ->Máxima", kgf, Res, Rel
8 Tensmax -> "Resistência->Compressão", MPa, Res, Rel
9
10 ***Eventos
11 @FM -> "", Vis
12
13 ***Atribuições
14 SIS_ÁREA = ÁREA_CIRC( Diâmetro )
15 S = CÓPIA( SIS_ÁREA )
16 @FM = @FORÇA_MAX( )
17 Fmax = FORÇA( @FM )
18 Tensmax = TENSÃO( @FM )
19
20 ***Mensagens
21 M1 -> INÍCIO DO ENSAIO
22 M2 -> FIM DE ENSAIO
23 M3 -> LIMITE DE CARGA ATINGIDO ENSAIO ABORT...
24
25 ***Comandos
26 SALVAR_POSIÇÃO_INICIAL( )
27 ATIVAR_LIMITE_DEFORM( 40,00 mm )
28 ATIVAR_LIMITE_FORÇA( 20000 kgf )
29 AGUARDAR_CHEGADA( )
30 ATIVAR_DET_RUPTURA( -1,000 )
31 MOV_ATÉ___A___( 30,00 mm; 1,000 mm/min )
32 AGUARDAR_CHEGADA( )
33
34 EM_RUPTURA/COLAPSO( )
35 PARAR_SUAVEMENTE( )
36 BIP( 1,000 )
37 DISPARAR_MENSAGEM( M2; 5,000 s )
38 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 15,00 mm/min )
39 FINALIZAR_ENSAIO( )
40
41 EM_LIMITE_FORÇA( )
42 PARAR_ABRUPTAMENTE( )
43 BIP( -2,000 )
44 DISPARAR_MENSAGEM( M3; 5,000 s )
45 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 15,00 mm/min )
46 FINALIZAR_ENSAIO( )
47
48 EM_LIMITE_DEFORM( )
49 PARAR_SUAVEMENTE( )
50 FINALIZAR_ENSAIO( )
```

## APÊNDICE 4 - Script do ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão ( $E_{csc}$ ) dos corpos de prova de solo-cimento 5x10

```

>>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>>> Método solo-cimento módulo elast 5x10
>>>>> Data: 06/01/16
1 ***Variáveis de entrada
2 Diâmetro -> "Diâmetro->do CP", 50,00 mm, Ent, Res, Rel, Edi
3 CB -> "Compr.->Base", 50 mm, Res, Rel
4 Incremento -> "Incremento ->de Força", 190,00 kgf/min, Ent, Edi
5 Força Prevista -> "Força->Prevista", 0 kgf, Ent, Res, Rel, Edi
6
7***Variáveis atribuíveis
8 S -> "Seção->do CP", cm2, Res
9 Fmax -> "Força-> Ruptura", kgf, Res, Rel
10 Tensmax -> "Resist.->Obtida", MPa, Res, Rel
11 T1 -> "Tensão", MPa
12 T2 -> "Tensão", MPa
13 L1 -> "Def", mm/mm
14 L2 -> "Def", mm/mm
15 DT -> "Delta T", MPa
16 DL -> "Delta L", mm/mm
17 DT Adim -> "Delta T Adim",
18 DL Adim -> "Delta L Adim",
19 Secante Adim -> "Secante Adim",
20 Secante -> "Módulo->def.->Secante", MPa, Res, Rel
21 30% Força prevista -> "30% Força prevista", kgf
22 10% Força prevista -> "10% Força prevista", kgf
23 70% Força prevista -> "70% Força prevista", kgf
24
25 ***Eventos
26 @FM -> "", Vis
27 @T0 -> "", Vis
28 @T0,3 -> "", Vis
29
30 ***Atribuições
31 SIS_ÁREA = ÁREA_CIRC( Diâmetro )
32 S = CÓPIA( SIS_ÁREA )
33 SIS_COMPR_BASE = CÓPIA( CB )
34 30% Força prevista = AX+B( Força Prevista; 30,00 %; *** )
35 10% Força prevista = AX+B( Força Prevista; 10,00 %; *** )
36 70% Força prevista = AX+B( Força Prevista; 70,00 %; *** )
37 @FM = @FORÇA_MAX( )
38 @T0 = @MARCA( 1,000 )
39 @T0,3 = @MARCA( 2,000 )
40 Fmax = FORÇA( @FM )
41 Tensmax = TENSÃO( @FM )
42 T1 = TENSÃO( @T0 )
43 T2 = TENSÃO( @T0,3 )
44 L1 = DEF_ESPEC( @T0 )
45 L2 = DEF_ESPEC( @T0,3 )
46 DT = SUBTR( T2; T1 )
47 DL = SUBTR( L2; L1 )
48 DT Adim = CÓPIA_ADIMENSIONAL( DT )
49 DL Adim = CÓPIA_ADIMENSIONAL( DL )
50 Secante Adim = DIV( DT Adim; DL Adim )
51 Secante = CÓPIA_ADIMENSIONAL( Secante Adim )
(... continuação do Apêndice D)
52
53
54 ***Mensagens
55 M1 -> Após o bip, você terá 2 minutos para a ...
56

```

(continua...)

---

## APÊNDICE 4 - continuação

57

**58 \*\*\*Comandos**

59 SALVAR\_POSIÇÃO\_INICIAL( )  
60 ATIVAR\_LIMITE\_FORÇA( 8000 kgf )  
61 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 30% Força prevista; Incremento )  
62 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
63 AGUARDAR( 60,00 s )  
64 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 10% Força prevista; Incremento )  
65 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
66 AGUARDAR( 60,00 s )  
67 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 30% Força prevista; Incremento )  
68 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
69 AGUARDAR( 60,00 s )  
70 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 10% Força prevista; Incremento )  
71 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
72 AGUARDAR( 60,00 s )  
73 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 30% Força prevista; Incremento )  
74 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
75 AGUARDAR( 60,00 s )  
76 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 10% Força prevista; Incremento )  
77 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
78 AGUARDAR( 60,00 s )  
79 MARCAR( 1,000 )  
80 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 30% Força prevista; Incremento )  
81 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
82 AGUARDAR( 60,00 s )  
83 MARCAR( 2,000 )  
84 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 70% Força prevista; Incremento )  
85 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
86 ATIVAR\_DET\_RUPTURA( 0,0000 )  
87 INTERROMPER\_AQUISIÇÃO( )  
88 CONGELAR\_DEFORM( -1,000 mm )  
89 BIP( 2,000 )  
90 DISPARAR\_MENSAGEM( M1; 60,00 s )  
91 EM\_TECLA\_F( 1,000 )  
92 RETOMAR\_AQUISIÇÃO( )  
93 MOV\_ATE\_\_\_A\_\_\_( 8000 kgf; Incremento )  
94 AGUARDAR\_CHEGADA( )  
95  
96 EM\_RUPTURA/COLAPSO( )  
97 PARAR\_SUAVEMENTE( )  
98 RETORNAR\_POSIÇÃO\_INICIAL( 15,00 mm/min )  
99 FINALIZAR\_ENSAIO( )  
100  
101 EM\_LIMITE\_FORÇA( )  
102 PARAR\_ABRUPTAMENTE( )  
103 RETORNAR\_POSIÇÃO\_INICIAL( 15,00 mm/min )  
104 FINALIZAR\_ENSAIO( )

## APÊNDICE 5 - Requisitos do solo-cimento para atendimento de normas técnicas para solo-cimento e para elementos cerâmicos

| SOLO-CIMENTO - Requisitos   |             |                |           |
|---|-------------|----------------|-----------|
| Parâmetros  | requisitos  | result obtidos | conclusão |
| <b>ABNT NBR 8491:2012 (tijolo de solo-cimento)</b>                      |             |                |           |
| resist. média à compressão 7 dias ( $f_{c7}$ ), em Mpa                  | $\geq 2,0$  |                |           |
| resist. individual à compres 7 dias ( $f_{c7}$ ), em Mpa                | $\geq 1,7$  |                |           |
| absorção de água 7 dias (AA) média                                      | $\leq 20\%$ |                |           |
| absorção de água 7 dias (AA) individual                                 | $\leq 22\%$ |                |           |
| <b>ABNT NBR 10834:2012 bloco de solo-cimento sem função estrutural)</b> |             |                |           |
| resist. média à compressão 7 dias ( $f_{c7}$ ), em Mpa                  | $\geq 2,0$  |                |           |
| resist. individual à compres 7 dias ( $f_{c7}$ ), em Mpa                | $\geq 1,7$  |                |           |
| absorção de água 7 dias (AA) média                                      | $\leq 20\%$ |                |           |
| absorção de água 7 dias (AA) individual                                 | $\leq 22\%$ |                |           |
| <b>ABNT NBR 11798:2012 (para base de solo-cimento)</b>                  |             |                |           |
| resistência à compressão 7 dias ( $f_{c7}$ ), em Mpa                    | $\geq 2,1$  |                |           |
| <b>ABNT NBR 13553:2012 (para parede monolítica de solo-cimento)</b>     |             |                |           |
| resistência à compressão 7 dias ( $f_{c7}$ ), em Mpa                    | $\geq 1,0$  |                |           |
| absorção de água 7 dias (AA)  | $\leq 20\%$ |                |           |
| variação de volume (NBR 13554)  | $\leq 1\%$  |                |           |
| perda de massa (NBR 13554)  |             |                |           |
| solos A1-b; A-2-4; A-2-5  | $\leq 14\%$ |                |           |
| solos A-2-6; A-2-7; A4; A5  | $\leq 10\%$ |                |           |
| solos A6; A7  | $\leq 7\%$  |                |           |
| <b>MATERIAIS CERÂMICOS - Requisitos</b>                                 |             |                |           |
| Parâmetros  | requisitos  | result obtidos | conclusão |
| <b>ABNT NBR 15270-1:2005 (bloco cerâmico - alvenaria VEDAÇÃO)</b>       |             |                |           |
| resist. média à compres. furos horiz. ( $f_t$ ), em Mpa                 | $\geq 1,5$  |                |           |
| resist. média à compres. furos vert. ( $f_b$ ), em Mpa                  | $\geq 3,0$  |                |           |
| absorção de água (AA), em %   | 8 a 22      |                |           |
| <b>ABNT NBR 15270-1:2005 (bloco cerâmico - alvenaria ESTRUTURAL)</b>    |             |                |           |
| resist. característica à compres. ( $f_{bk}$ ), em Mpa                  | $\geq 3,0$  |                |           |
| absorção de água (AA), em %   | 8 a 22      |                |           |
| <b>ABNT NBR 7170:1983 (tijolo maciço cerâmico)</b>                      |             |                |           |
| resist à compressão ( $f_{c7}$ ), em Mpa - Categoria A                  | $\geq 1,5$  |                |           |
| Categoria B   | $\geq 2,5$  |                |           |
| Categoria C   | $\geq 4,0$  |                |           |

## APÊNDICE 6 - Script do ensaio de compressão axial dos corpos de prova de solo-cimento 10x12,7

```
>>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>>> Método Solo-cimento CP cilíndrico 100mm
>>>>> Data: 13/10/10
1 ***Variáveis de entrada
2 Diâmetro -> "Diâmetro ->do CP", 100,00 mm, Ent, Res, Edi
3 Altura -> "Altura->do CP", 127,3 mm, Ent, Rel, Edi
4
5***Variáveis atribuíveis
6 S -> "Seção ->do CP", cm2, Res, Rel
7 Fmax -> "Força Máxima", kgf, Res, Rel
8 Tensmax -> "Resistência->Compressão", MPa, Res, Rel
9
10 ***Eventos
11 @FM -> "", Vis
12
13 ***Atribuições
14 SIS_ÁREA = ÁREA_CIRC( Diâmetro )
15 S = CÓPIA( SIS_ÁREA )
16 @FM = @FORÇA_MAX( )
17 Fmax = FORÇA( @FM )
18 Tensmax = TENSÃO( @FM )
19
20 ***Mensagens
21 M1 -> INÍCIO DO ENSAIO
22 M2 -> FIM DE ENSAIO
23 M3 -> LIMITE DE CARGA ATINGIDO ENSAIO ABORT...
24
25 ***Comandos
26 SALVAR_POSIÇÃO_INICIAL( )
27 ATIVAR_LIMITE_DEFORM( 20,00 mm )
28 ATIVAR_LIMITE_FORÇA( 20000 kgf )
29 AGUARDAR_CHEGADA( )
30 ATIVAR_DET_RUPTURA( -1,000 )
31 MOV_ATÉ_____A____( 30,00 mm; 1,000 mm/min )
32 AGUARDAR_CHEGADA( )
33
34 EM_RUPTURA/COLAPSO( )
35 PARAR_SUAVEMENTE( )
36 BIP( 1,000 )
37 DISPARAR_MENSAGEM( M2; 5,000 s )
38 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 15,00 mm/min )
39 FINALIZAR_ENSAIO( )
40
41 EM_LIMITE_FORÇA( )
42 PARAR_ABRUPTAMENTE( )
43 BIP( -2,000 )
44 DISPARAR_MENSAGEM( M3; 5,000 s )
45 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 15,00 mm/min )
46 FINALIZAR_ENSAIO( )
47
48 EM_LIMITE_DEFORM( )
49 PARAR_SUAVEMENTE( )
50 FINALIZAR_ENSAIO( )
```

## APÊNDICE 7 - Script do ensaio de tração por compressão diametral dos corpos de prova de solo-cimento 5x10

```

>>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>>> Método solo-cimento tração compressão diam 5x10
>>>>> Data: 13/01/16
1 *** VARIÁVEIS DE ENTRADA ****
2
3 Aeq -> "Área equivalente", 78,54 cm2, Ent, Rel, Edi
4 Incremento -> "Incremento->de força", 145 kgf/min, Ent, Edi
5
6*** VARIÁVEIS ATRIBUÍVEIS ***
7
8 As -> "área equivalente", cm2
9 Fmax -> "FtD,max", kgf, Res, Rel
10 Tensao -> "ftD", MPa, Res, Rel
11
12 *** EVENTOS ***
13
14 @Fr -> "", Vis
15
16
17 *** ATRIBUIÇÕES ***
18
19 SIS_ÁREA = CÓPIA( Aeq )
20 As = CÓPIA( SIS_ÁREA )
21 @Fr = @FORÇA_MAX( )
22 Tensao = TENSÃO( @Fr )
23 Fmax = FORÇA( @Fr )
24
25 *** COMANDOS ***
26
27 SALVAR_POSIÇÃO_INICIAL( )
28 ATIVAR_LIMITE_DEFORM( 20,00 mm )
29 ATIVAR_LIMITE_FORÇA( 1800 kgf )
30 ATIVAR_DET_RUPTURA( 0,0000 )
31 MOV_ATÉ_____A_____ ( 1800 kgf; Incremento )
32 AGUARDAR_CHEGADA( )
33
34 EM_RUPTURA/COLAPSO( )
35 PARAR_SUAVEMENTE( )
36 FINALIZAR_ENSAIO( )
37 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 5,000 mm/s )
38
39 EM_LIMITE_FORÇA( )
40 PARAR_ABRUPTAMENTE( )
41 FINALIZAR_ENSAIO( )
42 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 5,000 mm/s )
43
44 EM_LIMITE_DEFORM( )
45 PARAR_SUAVEMENTE( )
46 FINALIZAR_ENSAIO( )
47 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 5,000 mm/s )
48

```

---

## APÊNDICE 8 - Script do ensaio de tração por compressão diametral dos corpos de prova de solo-cimento 10x12,7

```
>>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>>> Método solo-cimento tração compressão diam 10x12,7
>>>>> Data: 13/01/16
1 *** VARIÁVEIS DE ENTRADA ****
2
3 Aeq -> "Área equivalente", 199,96 cm2, Ent, Rel, Edi
4 Incremento -> "Incremento->de força", 360 kgf/min, Ent, Edi
5
6*** VARIÁVEIS ATRIBUÍVEIS ***
7
8 As -> "área equivalente", cm2
9 Fmax -> "FtD,max", kgf, Res, Rel
10 Tensao -> "ftD", MPa, Res, Rel
11
12 *** EVENTOS ***
13
14 @Fr -> "", Vis
15
16
17 *** ATRIBUIÇÕES ***
18
19 SIS_ÁREA = CÓPIA( Aeq )
20 As = CÓPIA( SIS_ÁREA )
21 @Fr = @FORÇA_MAX( )
22 Tensao = TENSÃO( @Fr )
23 Fmax = FORÇA( @Fr )
24
25 *** COMANDOS ***
26
27 SALVAR_POSIÇÃO_INICIAL( )
28 ATIVAR_LIMITE_DEFORM( 20,00 mm )
29 ATIVAR_LIMITE_FORÇA( 1800 kgf )
30 ATIVAR_DET_RUPTURA( 0,0000 )
31 MOV_ATÉ___A___( 1800 kgf; Incremento )
32 AGUARDAR_CHEGADA( )
33
34 EM_RUPTURA/COLAPSO( )
35 PARAR_SUAVEMENTE( )
36 FINALIZAR_ENSAIO( )
37 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 5,000 mm/s )
38
39 EM_LIMITE_FORÇA( )
40 PARAR_ABRUPTAMENTE( )
41 FINALIZAR_ENSAIO( )
42 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 5,000 mm/s )
43
44 EM_LIMITE_DEFORM( )
45 PARAR_SUAVEMENTE( )
46 FINALIZAR_ENSAIO( )
47 RETORNAR_POSIÇÃO_INICIAL( 5,000 mm/s )
48
```

## APÊNDICE 9 - Agenda de realização dos ensaios de dosagem do solo-cimento

### CALENDÁRIO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS PARA DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO

| nº CP | % cimento | data moldagem | ensaio                            | data ensaio | etapas   |
|-------|-----------|---------------|-----------------------------------|-------------|--|
| 1     | 1         | 23/12/2015    | resistência à compressão (7 dias) | 30/12/2015  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água                             |
| 2     |           |               |                                   |             | 14:00 h medir diâmetros antes de romper                              |
| 3     |           |               |                                   |             |  |
| 4     |           |               | absorção de água (7 dias)         | 30/12/2015  | retirar todos da câmara úmida, medir massa úmida e colocar na estufa |
| 5     |           |               |                                   |             | retirar da estufa, medir massa seca e colocar na água                |
| 6     |           |               |                                   |             | retirar da água, medir massa saturada                                |
| 7     | 3         | 23/12/2015    | resistência à compressão (7 dias) | 30/12/2015  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água                             |
| 8     |           |               |                                   |             | 14:00 h medir diâmetros antes de romper                              |
| 9     |           |               |                                   |             |  |
| 10    |           |               | absorção de água (7 dias)         | 30/12/2015  | retirar todos da câmara úmida, medir massa úmida e colocar na estufa |
| 11    |           |               |                                   |             | retirar da estufa, medir massa seca e colocar na água                |
| 12    |           |               |                                   |             | retirar da água, medir massa saturada                                |
| 13    | 6         | 24/12/2015    | resistência à compressão (7 dias) | 31/12/2015  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água                             |
| 14    |           |               |                                   |             | 14:00 h medir diâmetros antes de romper                              |
| 15    |           |               |                                   |             |  |
| 16    |           |               | absorção de água (7 dias)         | 31/12/2015  | retirar todos da câmara úmida, medir massa úmida e colocar na estufa |
| 17    |           |               |                                   |             | retirar da estufa, medir massa seca e colocar na água                |
| 18    |           |               |                                   |             | retirar da água, medir massa saturada                                |
| 19    | 10        | 24/12/2015    | resistência à compressão (7 dias) | 31/12/2015  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água                             |
| 20    |           |               |                                   |             | 14:00 h medir diâmetros antes de romper                              |
| 21    |           |               |                                   |             |  |
| 22    |           |               | absorção de água (7 dias)         | 31/12/2015  | retirar todos da câmara úmida, medir massa úmida e colocar na estufa |
| 23    |           |               |                                   |             | retirar da estufa, medir massa seca e colocar na água                |
| 24    |           |               |                                   |             | retirar da água, medir massa saturada                                |
| 25    | 15        | 24/12/2015    | resistência à compressão (7 dias) | 31/12/2015  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água                             |
| 26    |           |               |                                   |             | 14:00 h medir diâmetros antes de romper                              |
| 27    |           |               |                                   |             |  |
| 28    |           |               | absorção de água (7 dias)         | 31/12/2015  | retirar todos da câmara úmida, medir massa úmida e colocar na estufa |
| 29    |           |               |                                   |             | retirar da estufa, medir massa seca e colocar na água                |
| 30    |           |               |                                   |             | retirar da água, medir massa saturada                                |

## APÊNDICE 10 - Agenda de realização dos ensaios com o traço escolhido

### CALENDÁRIO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS COM O TRAÇO ESCOLHIDO

| nº CP | % cimento                | data moldagem | ensaio                                   | data ensaio | etapas   |
|-------|--------------------------|---------------|--|-------------|--|
| 1     | 6<br>CP 5x10             | 04/01/2016    | resistência à compressão (7 dias)        | 11/01/2016  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água<br>14:00 h medir diâmetros antes de romper          |
| 2     |                          |               |  |             |  |
| 3     |                          |               |  |             |  |
| 4     |                          |               | módulo elasticidade (7 dias)             | 11/01/2016  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água<br>14:00 h medir diâmetros antes de romper          |
| 5     |                          |               |  |             |  |
| 6     |                          |               |  |             |  |
| 7     |                          |               |  |             |  |
| 8     |                          |               |  |             |  |
| 9     |                          |               |  |             |  |
| 10    |                          |               | 6<br>CP 10x12,7                          | 04/01/2016  | resistência à compressão (7 dias)  |
| 1     |                          |               |  |             |  |
| 2     |                          |               |  |             |  |
| 3     | 6<br>CP 5x10             | 06/01/2016    | Abs. Água e Índice Vazios                | 13/01/2016  | medir massa e colocar estufa   |
| 11    |                          |               |  | 14/01/2016  | retirar estufa medir massa seca colocar n'água   |
| 12    |                          |               |  | 15/01/2016  | medir massa saturada e massa submersa  |
| 13    |                          |               | tração por compressão diametral (7 dias) | 13/01/2016  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água<br>14:00 h medir diâmetros e altura antes de romper |
| 14    |                          |               |  |             |  |
| 15    |                          |               |  |             |  |
| 16    |                          |               |  |             |  |
| 17    |                          |               |  |             |  |
| 18    |                          |               |  |             |  |
| 19    |                          |               |  |             |  |
| 20    |                          |               | 6<br>CP 10x12,7                          | 06/01/2016  | tração comp diametral (7 dias)   |
| 4     |                          |               |  |             |  |
| 5     |                          |               |  |             |  |
| 6     | 15<br>CP 5x10<br>RÉPLICA | 06/01/2016    | resistência à compressão (7 dias)        | 13/01/2016  | 10:00 h - colocar os CPs imersos em água<br>14:00 h medir diâmetros antes de romper          |
| 21    |                          |               |  |             |  |
| 22    |                          |               |  |             |  |
| 23    |                          |               |  |             |  |
| 24    |                          |               |  |             |  |

**APÊNDICE 11 - Resultados dos ensaios de caracterização física do cimento****Massa específica do cimento ( $\gamma_c$ )**

volumi inicial ( $V_i$ ) = 0,3 cm<sup>3</sup>  
 volumi final ( $V_f$ ) = 20,0 cm<sup>3</sup>  
 massa amostra (m) = 60 g

|   |                              |
|---|------------------------------|
| <b>Massa específica (<math>\gamma_c</math>)</b> | <b>3,05 g/cm<sup>3</sup></b> |
|---|------------------------------|

**Tempo de início de pega**

horário lançamento da água: 11:00 h  
 horário início pega: 13:36 h  
**tempo de início de pega: 2 h 36 min**

modagem CPs: 14/01/2016  
 ensaiar em: 21/01/2016

**Fator água-cimento (A/C)**

masa de cimento (g) 500  
 massa de água (g) 143,5  
**Fator água-cimento - A/C (%) 28,70**  
**A/C em litro de água / 1 kg de cimento: 0,287**



## APÊNDICE 13 - Resultados dos ensaios de determinação da curva de distribuição granulométrica do solo



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

### DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS - NBR 6508 (OUT/1984)

|                |  |            |                |
|----------------|--|------------|----------------|
| LOCAL:         | Bauru/SP   |            |                |
| AMOSTRA:       | AM-1a (mestrado Eduardo da Silva Pinto - Prof. Obede B. Faria) | PROF. (m): | 6,00           |
| CLASSIFICAÇÃO: |  |            |                |
| OPERADOR:      | Gustavo  | DATA:      | 26 junho, 2015 |

#### TEOR DE UMIDADE

| Determinação            |                    |   | 1     | 2     | 3     | BALANÇA UTILIZADA NO ENSAIO |   |   |
|-------------------------|--------------------|---|-------|-------|-------|-----------------------------|---|---|
| Cápsula n°              | Cáps. n°           |   | P51   | P143  | P518  | Quimis                      | X | X |
| Massa(Solo+Água+Tara)   | (S+A+T)            | g | 32,39 | 31,92 | 28,88 | Mettler Toledo              | Y |   |
| Massa(Solo+Tara)        | (S+T)              | g | 32,22 | 31,75 | 28,67 |                             |   |   |
| Massa da cápsula (Tara) | (T)                | g | 14,79 | 13,21 | 7,45  | FÓRMULAS                    |   |   |
| Massa de água           | (A)                | g | 0,17  | 0,17  | 0,21  | A=(S+A+T)-(S+T)             |   |   |
| Massa de sólidos        | (S)                | g | 17,43 | 18,54 | 21,22 | S=(S+T)-(T)                 |   |   |
| Teor de umidade         | w                  | % | 0,98  | 0,92  | 0,99  | w=((A)/(S)).100             |   |   |
| Teor de umidade médio   | W <sub>MÉDIO</sub> | % | 1,0   |       |       |                             |   |   |

#### MASSA DE SÓLIDOS

| Recipiente n°    | Recp. n°       |   | AM-1a | FÓRMULAS                |
|------------------|----------------|---|-------|-------------------------|
| Massa de Solo    | M              | g | 60,02 |                         |
| Massa de Sólidos | M <sub>s</sub> | g | 59,45 | M <sub>s</sub> =M/(1+w) |

#### AMOSTRA

Com secagem prévia ao ar

**X**

Sem secagem prévia ao ar

#### MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

| Determinação                                     |                     |       | 1         |      |      | 2         |      |      | 3         |      |      | 4         |      |      | 5         |      |      |
|--|---------------------|-------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| Data   |                     |       | 29-jun-15 |      |      | 29-jun-15 |      |      | 29-jun-15 |      |      | 29-jun-15 |      |      | 29-jun-15 |      |      |
| Picnômetro                                       | Pic. n°             |       | 1         |      |      | 1         |      |      | 1         |      |      | 1         |      |      | 1         |      |      |
| Temperatura de ensaio                            | T                   | °C    | Base      | Meio | Topo | Base      | Meio | Toto |
|  |                     |       | 38,7      | 38,7 | 38,4 | 33,1      | 33,2 | 32,8 | 24,1      | 24,2 | 24,1 | 16,3      | 16,3 | 16,3 | 9,3       | 9,5  | 9,6  |
| Temperatura média de ensaio                      | T <sub>MÉDIO</sub>  | °C    | 38,6      |      |      | 33,0      |      |      | 24,1      |      |      | 16,3      |      |      | 9,5       |      |      |
| Massa específica da água                         | ρ <sub>w</sub> (T)  | g/cm³ | 0,9928    |      |      | 0,9947    |      |      | 0,9973    |      |      | 0,9989    |      |      | 0,9997    |      |      |
| Picnômetro + Sólidos + Água <sup>1</sup>         | M <sub>1</sub>      | g     | 714,41    |      |      | 715,29    |      |      | 716,42    |      |      | 717,12    |      |      | 717,52    |      |      |
| Picnômetro + Água                                | M <sub>2</sub>      | g     | 676,98    |      |      | 677,93    |      |      | 679,17    |      |      | 679,95    |      |      | 680,41    |      |      |
| Massa esp. dos sólidos                           | ρ <sub>s</sub>      | g/cm³ | 2,681     |      |      | 2,677     |      |      | 2,671     |      |      | 2,665     |      |      | 2,661     |      |      |
| Fator K = ρ <sub>w</sub> (T)/ρ <sub>w</sub> (20) | K                   | g/cm³ | 0,9946    |      |      | 0,9965    |      |      | 0,9991    |      |      | 1,0007    |      |      | 1,0015    |      |      |
| Massa específica dos sólidos: 20°C               | ρ <sub>s</sub> (20) | g/cm³ | 2,666     |      |      | 2,677     |      |      | 2,671     |      |      | 2,665     |      |      | 2,661     |      |      |

#### CRITÉRIO DE REJEIÇÃO DE VALORES

| Número de determinação | Massa Específica dos Sólidos Médio - ρ <sub>s</sub> (g/cm³) | Intervalo de Variação - ρ <sub>s</sub> (g/cm³) |
|------------------------|---|--|
| 5                      | 2,668   | 2,688 ..... 2,648                              |

|                                     |                     |       |       |          |  |
|-------------------------------------|---------------------|-------|-------|----------|--|
| Massa Específica dos Sólidos a 20°C | ρ <sub>s</sub> (20) | 2,668 | g/cm³ | FÓRMULAS | ρ <sub>s</sub> =[M <sub>1</sub> /(M <sub>2</sub> -M <sub>1</sub> +M <sub>2</sub> )] . ρ <sub>w</sub> |
|-------------------------------------|---------------------|-------|-------|----------|--|

|   |   |
|---|---|
| EQUAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO - M <sub>2</sub> | y = - 0,0023 . x <sup>2</sup> - 0,0072 . x + 680,68   |
| EQUAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO - ρ <sub>w</sub> (T)        | y = -2,34019E-09.T <sup>4</sup> + 2,51389E-07.T <sup>3</sup> - 1,44037E-05.T <sup>2</sup> + 1,41667E-04.T + 9,99490E-01 |

## APÊNDICE 13 - continuação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

## ANEXO "A"

## UMIDADE MÉDIA

## CRITÉRIO DE REJEIÇÃO

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 0,98    | 1 |
| 1     | 0,92    | 1 |
| 1     | 0,99    | 1 |
| 3     | 2,88    | 3 |

## INTERVALO DE VARIAÇÃO

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 0,96    | 0,05             | 1,01             | 0,91             |
| FALSO   | 0,00             | 0,00             | 0,00             |

**OBSERVAÇÃO:** O TEOR DE UMIDADE SERÁ A MÉDIA ARITMÉTICA DOS VALORES QUE NÃO SE AFASTEM MAIS DO QUE 5% DO VALOR MÉDIO CALCULADO.

## ANEXO "B"

## CRITÉRIO DE REJEIÇÃO

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 2,666   | 1 |
| 1     | 2,677   | 1 |
| 1     | 2,671   | 1 |
| 1     | 2,665   | 1 |
| 1     | 2,661   | 1 |
| 5     | 13,341  | 5 |

**OBSERVAÇÃO:** TODOS OS VALORES TRANSFORMADOS QUE SE AFASTAREM DA MÉDIA MAIS DO QUE 0,020g/cm³ DEVERÃO SER REJEITADOS.

## APÊNDICE 13 - continuação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



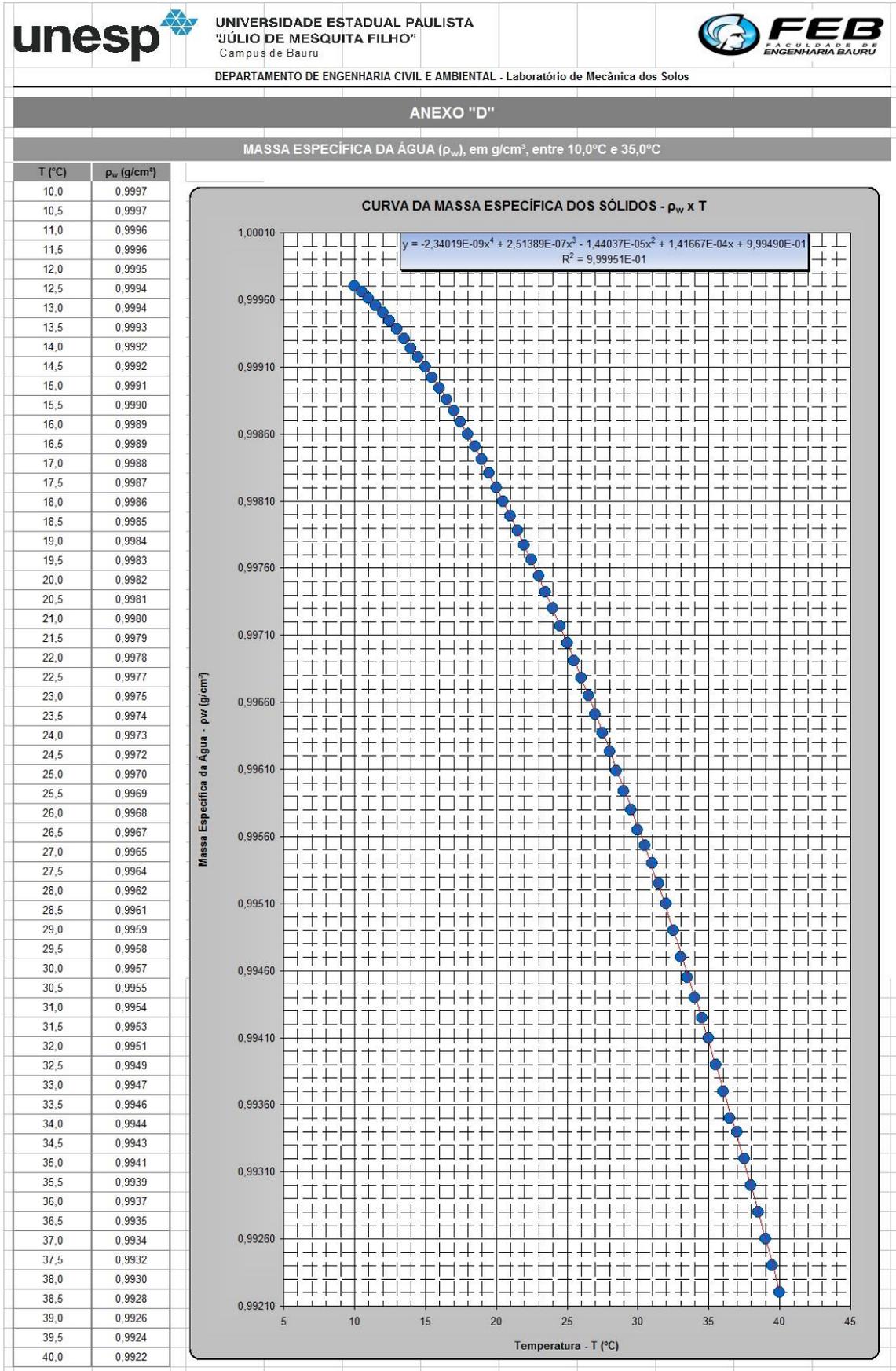
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

## ANEXO "C"

| EQUAÇÕES   |   |              |        |        |        |        |
|------------|---|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Picnômetro | Balança Quimis                                    | Determinação |        |        |        |        |
|            |   | 1            | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1          | $y = -0,0023 \cdot x^2 - 0,0072 \cdot x + 680,68$ | 676,98       | 677,93 | 679,17 | 679,95 | 680,41 |
|            |   |              |        |        |        |        |
| 4          | $y = -0,0022 \cdot x^2 - 0,0111 \cdot x + 628,51$ | 624,80       | 625,74 | 626,96 | 627,74 | 628,21 |
|            |   |              |        |        |        |        |
| 6          | $y = -0,0022 \cdot x^2 - 0,0081 \cdot x + 643,57$ | 639,98       | 640,90 | 642,09 | 642,85 | 643,30 |

| EQUAÇÕES   |   |              |        |        |        |        |
|------------|---|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Picnômetro | Balança Mettler Toledo                            | Determinação |        |        |        |        |
|            |   | 1            | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1          | $y = -0,0024 \cdot x^2 - 0,0007 \cdot x + 680,45$ | 676,85       | 677,81 | 679,04 | 679,80 | 680,23 |
|            |   |              |        |        |        |        |
| 4          | $y = -0,0023 \cdot x^2 - 0,0090 \cdot x + 628,30$ | 624,53       | 625,49 | 626,74 | 627,54 | 628,01 |
|            |   |              |        |        |        |        |
| 6          | $y = -0,0023 \cdot x^2 - 0,0030 \cdot x + 643,34$ | 639,80       | 640,73 | 641,93 | 642,68 | 643,11 |

APÊNDICE 13 - continuação



## APÊNDICE 13 - continuação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

## ANÁLISE GRANULOMÉTRIA CONJUNTA - NBR 7181 (DEZ/1984)

|   |                      |
|---|----------------------|
| LOCAL: Bauru/SP   |                      |
| AMOSTRA: AM-1a (mestrado Eduardo da Silva Pinto - Prof. Obede Borges Faria) | PROF. (m): 6,00      |
| CLASSIFICAÇÃO: Areia fina a média pouco argilosa marrom claro               |                      |
| OPERADOR: Gustavo   | DATA: 22 junho, 2015 |

| TEOR DE UMIDADE    |   |        |   | PENEIRAMENTO |           |               |                                      |   |   |  |  |
|--------------------|---|--------|---|--------------|-----------|---------------|--------------------------------------|---|---|--|--|
| Determinação       |   | 1      | 2   | 3            | Peneira # | Diâmetro (mm) | Massa retida (g) M <sub>s</sub> (#i) | Massa retida acumulada (g) ΣM <sub>s</sub> (#i) | % retida P <sub>p</sub> (# <sub>i</sub> ) | % retida acum. ΣP <sub>p</sub> (# <sub>i</sub> ) | % que passa P <sub>p</sub> (# <sub>i</sub> ) |
| Cáps. n°           |   | M57    | M71   | M73          |           |               |                                      |   |   |  |  |
| (S+A+T)            | g   | 128,35 | 113,01  | 122,92       |           |               |                                      |   |   |  |  |
| (S+T)              | g   | 127,19 | 111,97  | 121,87       |           |               |                                      |   |   |  |  |
| (T)                | g   | 24,20  | 18,62   | 28,92        |           |               |                                      |   |   |  |  |
| (A)                | g   | 1,16   | 1,04  | 1,05         |           |               |                                      |   |   |  |  |
| (S)                | g   | 102,99 | 93,35   | 92,95        |           |               |                                      |   |   |  |  |
| w                  | %   | 1,13   | 1,11  | 1,13         |           |               |                                      |   |   |  |  |
| W <sub>MÉDIO</sub> | %   | 1,1    |   |              |           |               |                                      |   |   |  |  |
| AMOSTRAS EM ESTUDO |   |        |   |              |           |               |                                      |   |   |  |  |
| AMOSTRA            | Com secagem prévia ao ar  |        |   | X            |           |               |                                      |   |   |  |  |
|                    | Sem secagem prévia ao ar  |        |   |              |           |               |                                      |   |   |  |  |
| GROSSA E FINA      | Massa total de solo   |        | M <sub>t</sub>  | g            | 1.004,45  |               |                                      |   |   |  |  |
|                    | Massa de sólido retido na # 10  |        |   | g            | 0,00      |               |                                      |   |   |  |  |
| FINA               | Massa total de sólidos  |        | M <sub>s</sub>  | g            | 993,29    |               |                                      |   |   |  |  |
|                    | Massa de solo   |        | M   | g            | 121,32    |               |                                      |   |   |  |  |
| FINA               | Massa de sólidos  |        | M <sub>s</sub>  | g            | 119,97    |               |                                      |   |   |  |  |
|                    | A=(S+A+T)-(S+T)   |        | Amostra fina: M <sub>s</sub> =M/(1+w)   |              |           |               |                                      |   |   |  |  |
| FÓRMULAS           | S=(S+T)-(T)   |        | M <sub>s</sub> =(M <sub>t</sub> -M <sub>s</sub> (#10))/(1+w)+M <sub>s</sub> (#10) |              |           |               |                                      |   |   |  |  |
|                    | w=((A)/(S)).100   |        | P <sub>p</sub> (#i)=(M <sub>s</sub> (#i)/M <sub>s</sub> ).100                     |              |           |               |                                      |   |   |  |  |
|                    | Peneiramento grosso: P <sub>p</sub> (#i)=[(M <sub>s</sub> -ΣM <sub>s</sub> (#i))/M <sub>s</sub> ].100               |        |   |              |           |               |                                      |   |   |  |  |
|                    | Peneiramento fino: P <sub>p</sub> (#i)=[P <sub>p</sub> (#10).(M <sub>s</sub> -ΣM <sub>s</sub> (#i))]/M <sub>s</sub> |        |   |              |           |               |                                      |   |   |  |  |

| DADOS DE ENSAIO              |                |                   |       | DEFLOCULANTE          |                                       |
|------------------------------|----------------|-------------------|-------|-----------------------|---------------------------------------|
| Densímetro n°                | 225-91         |                   |       | Tipo                  | Hexametáfosfato de sódio              |
| Proveta n°                   | AM-1a          |                   |       | Puro / Água destilada | (g) / (cm <sup>3</sup> ) 45,7 / 1.000 |
| Massa específica dos sólidos | ρ <sub>s</sub> | g/cm <sup>3</sup> | 2,668 | Volume da solução     | cm <sup>3</sup> 125                   |

| SEDIMENTAÇÃO            |                 |                    |        |  |                         |                                    |                                    |                        |                             |                               |
|-------------------------|-----------------|--------------------|--------|--|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Tempo de ensaio t (min) | Data da Leitura | Horário da Leitura | T (°C) | Viscosidade da água - μ (desprezando-se 10 <sup>-4</sup> Pa.s) | Leitura do densímetro r | Leitura de correção r <sub>w</sub> | Leitura corrigida r-r <sub>w</sub> | Altura de queda z (cm) | Diâmetro equivalente D (mm) | % de partículas com Ø < que D |
| 30s = 0,5min            | 23-jun-15       | 8:35:30            | 22,3   | 9,54   | 1,0205                  | 1,0024                             | 0,0181                             | 14,84                  | 0,0720                      | 24,1                          |
| 1min                    | 23-jun-15       | 8:36:00            | 22,3   | 9,54   | 1,0185                  | 1,0024                             | 0,0161                             | 15,26                  | 0,0517                      | 21,4                          |
| 2min                    | 23-jun-15       | 8:37:00            | 22,3   | 9,54   | 1,0170                  | 1,0024                             | 0,0146                             | 15,58                  | 0,0369                      | 19,4                          |
| 4min                    | 23-jun-15       | 8:39:00            | 22,2   | 9,56   | 1,0165                  | 1,0024                             | 0,0141                             | 14,97                  | 0,0256                      | 18,7                          |
| 8min                    | 23-jun-15       | 8:43:00            | 22,2   | 9,56   | 1,0160                  | 1,0024                             | 0,0136                             | 15,07                  | 0,0182                      | 18,1                          |
| 15min                   | 23-jun-15       | 8:50:00            | 22,1   | 9,58   | 1,0160                  | 1,0025                             | 0,0135                             | 15,07                  | 0,0133                      | 18,1                          |
| 30min                   | 23-jun-15       | 9:05:00            | 22,0   | 9,61   | 1,0155                  | 1,0025                             | 0,0130                             | 15,18                  | 0,0094                      | 17,4                          |
| 1h = 60min              | 23-jun-15       | 9:35:00            | 21,8   | 9,65   | 1,0155                  | 1,0025                             | 0,0130                             | 15,18                  | 0,0067                      | 17,3                          |
| 2h = 120min             | 23-jun-15       | 10:35:00           | 21,7   | 9,67   | 1,0150                  | 1,0025                             | 0,0125                             | 15,29                  | 0,0048                      | 16,6                          |
| 4h = 240min             | 23-jun-15       | 12:35:00           | 21,9   | 9,63   | 1,0145                  | 1,0025                             | 0,0120                             | 15,39                  | 0,0034                      | 16,0                          |
| 8h = 480min             | 23-jun-15       | 16:35:00           | 23,1   | 9,36   | 1,0135                  | 1,0023                             | 0,0112                             | 15,60                  | 0,0024                      | 15,0                          |
| 24h=1440min             | 24-jun-15       | 8:35:00            | 20,0   | 10,07  | 1,0135                  | 1,0028                             | 0,0107                             | 15,60                  | 0,0014                      | 14,2                          |

|          |  |  |  |  |   |  |
|----------|--|--|--|--|---|--|
| FÓRMULAS | $\mu = 17,756 \cdot 10^{-4} / (1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2)$ |  | $D = 0,005530 \cdot \{[\mu / (\rho_s - \rho_w)] \cdot (z/t)\}^{1/2}$ |  | $P(<D) = [(1000/M_s) \cdot (\rho_s / (\rho_s - \rho_w)) \cdot (r - r_w)] \cdot P_p(\#10)$ |  |
| EQUAÇÕES | r <sub>w</sub>   | y = -0,000000249193.x <sup>2</sup> - 0,000165548405.x + 1,006240377302 |  |  | z (três 1° leituras) y = -210,71.x + 229,87   |  |
|          |  |  |  |  | z (demais leituras) y = -211,65.x + 230,11  |  |

## APÊNDICE 13 - continuação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - Laboratório de Mecânica dos Solos

## ANEXO "A"

## UMIDADE MÉDIA

## CRITÉRIO DE REJEIÇÃO

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 1,13    | 1 |
| 1     | 1,11    | 1 |
| 1     | 1,13    | 1 |
| 3     | 3,37    | 3 |

## INTERVALO DE VARIAÇÃO

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 1,12    | 0,06             | 1,18             | 1,07             |
| FALSO   | 0,00             | 0,00             | 0,00             |

OBSERVAÇÃO: O TEOR DE UMIDADE SERÁ A MÉDIA ARITMÉTICA DOS VALORES QUE NÃO SE AFASTEM MAIS DO QUE 5% DO VALOR MÉDIO CALCULADO.

## ANEXO "B"

## EQUAÇÕES

| Densímetro | Equação da leitura de correção - $r_w$                                    |
|------------|---|
| 219-91     | $y = -0,000002817829 \cdot x^2 - 0,000067972854 \cdot x + 1,005813523021$ |
| 225-91     | $y = -0,000000249193 \cdot x^2 - 0,000165548405 \cdot x + 1,006240377302$ |
| 232-91     | $y = -0,000000204965 \cdot x^2 - 0,000181167895 \cdot x + 1,006528483858$ |
|            |   |
|            |   |
|            |   |
| Densímetro | Equação da altura de queda - z (cm)                                       |
|            | Três 1º leituras  |
| 219-91     | $y = -213,62 \cdot x + 232,99$  |
| 225-91     | $y = -210,71 \cdot x + 229,87$  |
| 232-91     | $y = -199,48 \cdot x + 217,63$  |
|            |   |
|            |   |
| Densímetro | Demais leituras   |
| 219-91     | $y = -214,11 \cdot x + 232,76$  |
| 225-91     | $y = -211,65 \cdot x + 230,11$  |
| 232-91     | $y = -198,51 \cdot x + 215,93$  |

APÊNDICE 13 - continuação



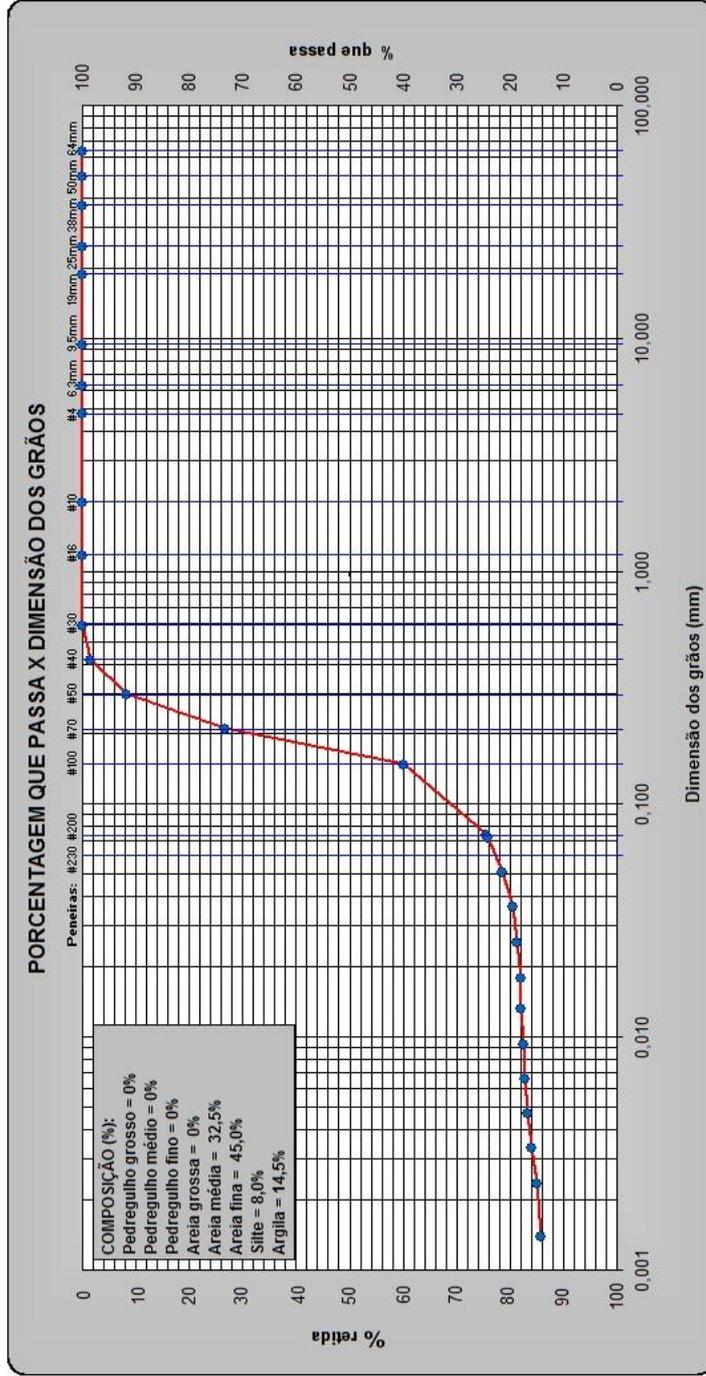
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

|   |                      |
|---|----------------------|
| LOCAL: Bauru/SP   | PROF. (m): 6,00      |
| AMOSTRA: AM-1a (mestrado Eduardo da Silva Pinto - Prof. Obede Borges Faria) |                      |
| CLASSIFICAÇÃO: Areia fina a média pouco argilosa marrom claro               |                      |
| OPERADOR: Gustavo   | DATA: 22 junho, 2015 |

CURVA GRANULOMÉTRICA



ESCALA ABNT NBR 6502/95

|        |       |       |       |       |       |       |            |        |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|--------|
| argila | silte |       | areia |       |       |       | pedregulho |        |
|        | 0,002 | 0,060 | 0,200 | 0,600 | 2,000 | 6,000 | 20,000     | 60,000 |
|        |       | 0,060 | 0,200 | 0,600 | 2,000 | 6,000 | 20,000     | 60,000 |
|        |       | 0,060 | 0,200 | 0,600 | 2,000 | 6,000 | 20,000     | 60,000 |

## APÊNDICE 14 - Resultados dos ensaios de determinação da curva de distribuição granulométrica do solo



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



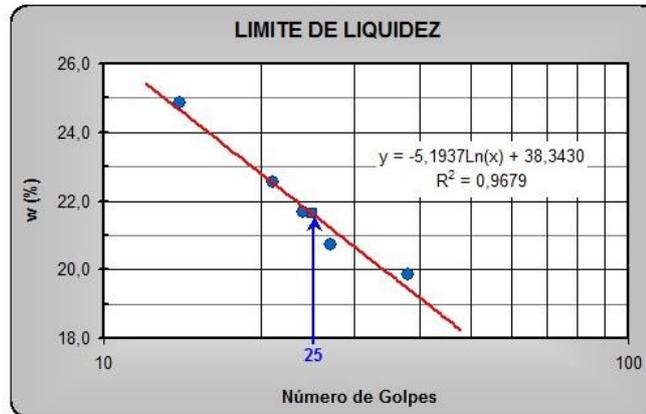
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

### DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA

|                |  |            |                |
|----------------|--|------------|----------------|
| LOCAL:         | Bauru/SP   |            |                |
| AMOSTRA:       | AM-1a (mestrado Eduardo S. Pinto - Prof. Obede B. Faria) | PROF. (m): | 6,00           |
| CLASSIFICAÇÃO: | Areia fina a média pouco argilosa marrom claro           |            |                |
| OPERADOR:      | Gustavo  | DATA:      | 30 junho, 2015 |
| AMOSTRA        | Com secagem prévia ao ar                                 | <b>X</b>   |                |
|                | Sem secagem prévia ao ar                                 |            |                |

### LIMITE DE LIQUIDEZ - NBR 6459 (OUT/1984)

| Determinação     |   | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           | 6 | 7 |
|------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|---|
| Cáps. nº         |   | P89         | P135        | P90         | P139        | P162        |   |   |
| (S+A+T)          | g | 18,31       | 19,02       | 19,18       | 18,66       | 20,22       |   |   |
| (S+T)            | g | 17,55       | 17,70       | 17,85       | 17,78       | 18,95       |   |   |
| (T)              | g | 13,72       | 11,33       | 11,72       | 13,88       | 13,84       |   |   |
| (A)              | g | 0,76        | 1,32        | 1,33        | 0,88        | 1,27        |   |   |
| (S)              | g | 3,83        | 6,37        | 6,13        | 3,90        | 5,11        |   |   |
| w                | % | <b>19,8</b> | <b>20,7</b> | <b>21,7</b> | <b>22,6</b> | <b>24,9</b> |   |   |
| Número de Golpes |   | 38          | 27          | 24          | 21          | 14          |   |   |



### LIMITE DE PLASTICIDADE - NBR 7180 (OUT/1984)

| Determinação |   | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           | 6 | 7 |
|--------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|---|
| Cáps. nº     |   | P157        | P163        | P34         | P104        | P41         |   |   |
| (S+A+T)      | g | 16,43       | 16,40       | 12,46       | 15,67       | 12,35       |   |   |
| (S+T)        | g | 16,14       | 16,18       | 12,15       | 15,44       | 12,04       |   |   |
| (T)          | g | 14,11       | 14,72       | 10,12       | 13,89       | 10,02       |   |   |
| (A)          | g | 0,29        | 0,22        | 0,31        | 0,23        | 0,31        |   |   |
| (S)          | g | 2,03        | 1,46        | 2,03        | 1,55        | 2,02        |   |   |
| w            | % | <b>14,3</b> | <b>15,1</b> | <b>15,3</b> | <b>14,8</b> | <b>15,3</b> |   |   |

| FÓRMULAS                                   | ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA |                    |    |           |
|--|-------------------------|--------------------|----|-----------|
|  |                         | Limite de Liquidez | LL | %         |
| $LP = w_{MÉDIO}$ DO LIMITE DE PLASTICIDADE | Limite de Plasticidade  | LP                 | %  | <b>15</b> |
| $IP = LL - LP$                             | Índice de Plasticidade  | IP                 | %  | <b>7</b>  |

## APÊNDICE 14 - Continuação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - Laboratório de Mecânica dos Solos

## ANEXO "A"

## UMIDADE MÉDIA

## CRITÉRIO DE REJEIÇÃO

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 14,29   | 1 |
| 1     | 15,07   | 1 |
| 1     | 15,27   | 1 |
| 1     | 14,84   | 1 |
| 1     | 15,35   | 1 |
|       |         |   |
| 5     | 74,81   | 5 |

## INTERVALO DE VARIAÇÃO

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 14,88   | 0,74             | 15,62            | 14,13            |
| FALSO   |                  |                  |                  |

**OBSERVAÇÃO:** O TEOR DE UMIDADE SERÁ A MÉDIA ARITMÉTICA DOS VALORES QUE NÃO SE AFASTEM MAIS DO QUE 5% DO VALOR MÉDIO CALCULADO.

**APÊNDICE 15** - Resultados dos ensaios de determinação das massas unitárias, do cimento e do solo

| <b>MASSAS UNITÁRIAS DOS MATERIAIS</b>                            |                         |               |               |       |      |
|--|-------------------------|---------------|---------------|-------|------|
| <b>Massa unitária do solo solto, úmido</b>                       |                         |               |               |       |      |
|  | <b>1ª det</b>           | <b>2ª det</b> | <b>3ª det</b> |       |      |
| <b>Volume recipiente (dm<sup>3</sup>)</b>                        | 5                       | 5             | 5             |       |      |
| <b>Massa recipiente (kg)</b>                                     | 1,070                   | 1,070         | 1,070         |       |      |
| <b>Massa recip. + solo úmido (kg)</b>                            | 6,985                   | 7,025         | 7,040         |       |      |
| <b>Massa solo úmido (kg)</b>                                     | 5,915                   | 5,955         | 5,970         | 5,947 |      |
| <b>solo úmido: <math>\rho_{s,s,u}</math> (kg/dm<sup>3</sup>)</b> | 1,18                    | 1,19          | 1,19          |       |      |
| <b>média</b>   | 1,19                    |               |               |       |      |
| <b>Umidade higroscópica solo (%)</b>                             | 1,16                    |               |               |       |      |
| <b>solo seco: <math>\rho_{s,s,0}</math> (kg/dm<sup>3</sup>)</b>  | 1,18                    |               |               |       |      |
| <b>Massa unitária do cimento</b>                                 |                         |               |               |       |      |
|  | <b>1ª det</b>           | <b>2ª det</b> | <b>3ª det</b> |       |      |
| <b>Volume recipiente (dm<sup>3</sup>)</b>                        | 5                       | 5             | 5             |       |      |
| <b>Massa recipiente (kg)</b>                                     | 1,070                   | 1,070         | 1,070         |       |      |
| <b>Massa recip. + cimento (kg)</b>                               | 6,945                   | 6,875         | 6,845         |       |      |
| <b>Massa cimento (kg)</b>  | 5,875                   | 5,805         | 5,775         |       |      |
| <b>cimento: <math>\rho_{s,c}</math> (kg/dm<sup>3</sup>)</b>      | 1,18                    | 1,16          | 1,16          |       |      |
| <b>média</b>   | 1,16                    |               |               |       |      |
| <b>Conversão de traços, de volume para massa</b>                 |                         |               |               |       |      |
|  | <b>traços em volume</b> |               |               |       |      |
| <b>cimento (volume V)</b>  | 1                       | 1             | 1             | 1     | 1    |
| <b>solo (volumes V)</b>  | 6,6                     | 9,9           | 16,5          | 33    | 99   |
|  | <b>traços em massa</b>  |               |               |       |      |
| <b>traço em massa <sup>(1)</sup> (%)</b>                         | 15,00                   | 10,00         | 6,00          | 3,00  | 1,00 |

<sup>(1)</sup> massa de cimento = p% massa de solo

**APÊNDICE 16** - Resultados dos ensaios de determinação da umidade higroscópica dos três lotes de solo

1º Lote

| umidade higroscópica<br>(26/10/2015) |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|
| M14                                  | M33   | M34   |
| 20,76                                | 26,56 | 18,31 |
| 64,97                                | 61,73 | 48,64 |
| 64,47                                | 61,30 | 48,31 |
| 1,14                                 | 1,24  | 1,10  |
| <b>1,16</b>                          |       |       |

2º Lote

| umidade higroscópica<br>(30/12/2015) |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|
| M3                                   | M11   | M18   |
| 27,70                                | 25,52 | 26,94 |
| 92,08                                | 73,45 | 74,26 |
| 90,79                                | 72,50 | 73,40 |
| 2,04                                 | 2,02  | 1,85  |
| <b>1,97</b>                          |       |       |

3º Lote

| umidade higroscópica<br>(01/01/2016) |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|
| M3                                   | M11   | M18   |
| 27,70                                | 25,52 | 26,92 |
| 63,63                                | 68,86 | 68,72 |
| 62,82                                | 67,91 | 67,83 |
| 2,31                                 | 2,24  | 2,18  |
| <b>2,24</b>                          |       |       |

## APÊNDICE 17 - Resultados do ensaio de compactação do solo, de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986)



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

### ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - NBR 7182:1988

|   |                           |
|---|---------------------------|
| LOCAL: Bauru - SP   | PROF. (m): 6              |
| AMOSTRA: 1 (mestrado Eduardo da Silva Pinto)                        | Professor: Obede B. Faria |
| CLASSIFICAÇÃO: Areia fina a média pouco argilosa marrom avermelhado | DATA: 26 outubro, 2015    |
| OPERADOR: Obede / Eduardo   |                           |

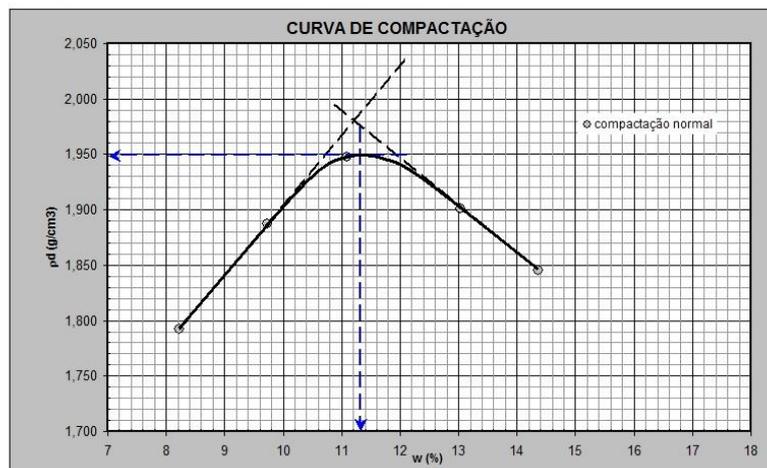
| TEOR DE UMIDADE DA AMOSTRA |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| Determinação               | 1     | 2     | 3     |
| Cáps. n°                   | M14   | M33   | M34   |
| (S+A+T) g                  | 64,97 | 61,73 | 48,64 |
| (S+T) g                    | 64,47 | 61,30 | 48,31 |
| (T) g                      | 20,76 | 26,56 | 18,31 |
| (A) g                      | 0,50  | 0,43  | 0,33  |
| (S) g                      | 43,71 | 34,74 | 30,00 |
| Whigr. %                   | 1,14  | 1,24  | 1,10  |
| WMÉDIO %                   | 1,16  |       |       |

| DADOS DO EQUIPAMENTO  |        |                        |               |                           |   |
|-----------------------|--------|------------------------|---------------|---------------------------|---|
| Cil. n° / Tamanho     | 3      | Massa solo inicial (g) | 3000          | umidade inicial W1 (%)    | 8 |
| Massa cilindro (Tara) | M(cil) | g                      | 1.825         | Soquete n° / Tam. / massa |   |
| Volume do cilindro    | V(cil) | cm³                    | 1.026         |                           |   |
| Energia               | X      | Normal                 | Intermediária | Modificado                |   |

| DADOS DO ENSAIO                            |                          |       |           |   |
|--|--------------------------|-------|-----------|---|
| Volume inicial de água a adicionar no solo | V <sub>w</sub>           | 203   | cm³       |   |
| Massa Específica dos Sólidos               | ρ <sub>s</sub>           | 2,668 | g/cm³     |   |
| AMOSTRA                                    | Com secagem prévia ao ar | X     | Com reuso | X |
|  | Sem secagem prévia ao ar |       | Sem reuso |   |

| COMPACTAÇÃO   |       |       |       |       |       |   |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| Determinação  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6 |
| (CP+M(cil)) g | 3.815 | 3.950 | 4.045 | 4.030 | 3.990 |   |
| M g           | 1.990 | 2.125 | 2.220 | 2.205 | 2.165 |   |
| ρ g/cm³       | 1,940 | 2,071 | 2,164 | 2,149 | 2,110 |   |

| TEOR DE UMIDADE      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cáps. n°             | M22   | M720  | M91   | M44   | M310  | M390  | M11   | M23   | M64   | M1    | M73   | M77   | M20   | M42   | M57   |
| (S+A+T) g            | 60,15 | 63,43 | 64,57 | 51,71 | 59,75 | 65,53 | 73,96 | 74,81 | 72,27 | 83,32 | 75,00 | 84,24 | 64,62 | 89,80 | 97,90 |
| (S+T) g              | 57,60 | 60,62 | 62,31 | 48,85 | 56,55 | 62,25 | 69,10 | 69,50 | 68,27 | 77,46 | 69,66 | 77,88 | 59,15 | 82,35 | 88,80 |
| (T) g                | 26,00 | 27,10 | 32,60 | 20,55 | 23,45 | 27,37 | 25,54 | 21,57 | 32,12 | 32,88 | 28,95 | 28,33 | 21,03 | 31,54 | 24,20 |
| (A) g                | 2,55  | 2,81  | 2,26  | 2,86  | 3,20  | 3,28  | 4,86  | 5,31  | 4,00  | 5,86  | 5,34  | 6,36  | 5,47  | 7,45  | 9,10  |
| (S) g                | 31,60 | 33,52 | 29,71 | 28,30 | 33,10 | 34,88 | 43,56 | 47,93 | 36,15 | 44,58 | 40,71 | 49,55 | 38,12 | 50,81 | 64,60 |
| w %                  | 8,07  | 8,38  | 7,61  | 10,11 | 9,67  | 9,40  | 11,16 | 11,08 | 11,07 | 13,14 | 13,12 | 12,84 | 14,35 | 14,66 | 14,09 |
| WMÉDIO %             | 8,2   |       |       | 9,7   |       |       | 11,1  |       |       | 13,0  |       |       | 14,4  |       |       |
| ρ <sub>d</sub> g/cm³ | 1,792 |       |       | 1,888 |       |       | 1,948 |       |       | 1,901 |       |       | 1,845 |       |       |



| Umidade Ótima (compactação de norma) |   |
|--------------------------------------|---|
| w <sub>ot</sub>                      |   |
| 11,3                                 | % |

| Massa Específica Seca Máxima (compactação de norma) |       |
|---|-------|
| ρ <sub>dmáx</sub>                                   |       |
| 1,950   | g/cm³ |

| FÓRMULAS | A=(S+A+T)-(S+T) | w=((A)/(S)).100  | M=(CP+M(cil))-M(cil) | ρ <sub>s</sub> =ρ/(1+w) |
|----------|-----------------|--|----------------------|-------------------------|
|          | S=(S+T)-(T)     | V <sub>w</sub> =[M/(1+Whigr.)].(W <sub>esp</sub> -Whigr.) P <sub>w</sub> | ρ=M/V(cil)           |                         |

## APÊNDICE 17 - continuação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

## ANEXO "A"

## UMIDADE MÉDIA

## CRITÉRIO DE REJEIÇÃO DA AMOSTRA

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 1,14    | 1 |
|       |         | 1 |
|       |         | 1 |
| 1     | 1,14    | 3 |

## INTERVALO DE VARIAÇÃO

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 1,16    | 0,06             | 1,22             | 1,10             |
| 1,14    | 0,06             | 1,20             | 1,09             |

## CRITÉRIO DE REJEIÇÃO DA COMPACTAÇÃO

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 8,07    | 1 |
| 1     | 8,38    | 1 |
|       |         | 1 |
| 2     | 16,45   | 3 |

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 10,11   | 1 |
| 1     | 9,67    | 1 |
| 1     | 9,40    | 1 |
| 3     | 29,18   | 3 |

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 11,16   | 1 |
| 1     | 11,08   | 1 |
| 1     | 11,07   | 1 |
| 3     | 33,30   | 3 |

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 13,14   | 1 |
| 1     | 13,12   | 1 |
| 1     | 12,84   | 1 |
| 3     | 39,10   | 3 |

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
| 1     | 14,35   | 1 |
| 1     | 14,66   | 1 |
| 1     | 14,09   | 1 |
| 3     | 43,10   | 3 |

| Nº AM | % MÉDIA |   |
|-------|---------|---|
|       |         |   |
|       |         |   |
|       |         |   |
| 0     | 0,00    | 0 |

## INTERVALO DE VARIAÇÃO

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 8,02    | 0,40             | 8,42             | 7,62             |
| 8,23    | 0,41             | 8,64             | 7,82             |

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 9,73    | 0,49             | 10,21            | 9,24             |
| FALSO   | 0,00             |                  |                  |

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 11,10   | 0,56             | 11,66            | 10,55            |
| FALSO   | 0,00             |                  |                  |

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 13,03   | 0,65             | 13,68            | 12,38            |
| FALSO   | 0,00             |                  |                  |

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| 14,37   | 0,72             | 15,08            | 13,65            |
| FALSO   | 0,00             |                  |                  |

| % MÉDIA | W <sub>Var</sub> | W <sub>Max</sub> | W <sub>Min</sub> |
|---------|------------------|------------------|------------------|
|         | #VALOR!          |                  |                  |
| FALSO   | 0,00             |                  |                  |

**OBSERVAÇÃO:** O TEOR DE UMIDADE SERÁ A MÉDIA ARITMÉTICA DOS VALORES QUE NÃO SE AFASTEM MAIS DO QUE 5% DO VALOR MÉDIO CALCULADO.

## APÊNDICE 17 - continuação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

## ANEXO "B"

## ÍNDICES FÍSICOS

|                              |             |                 | TEOR DE UMIDADE |       |       |       |       |
|------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
|                              |             |                 | 8,2             | 9,7   | 11,1  | 13,0  | 14,4  |
| Massa específica do solo     | $\rho$      | $\text{g/cm}^3$ | 1,940           | 2,071 | 2,164 | 2,149 | 2,110 |
| Teor de umidade              | w           | %               | 8,2             | 9,7   | 11,1  | 13,0  | 14,4  |
| Massa específica dos sólidos | $\rho_s$    | $\text{g/cm}^3$ | 2,668           |       |       |       |       |
| Massa específica seca        | $\rho_d$    | $\text{g/cm}^3$ | 1,792           | 1,888 | 1,948 | 1,901 | 1,845 |
| Massa específica da água     | $\rho_w(T)$ | $\text{g/cm}^3$ | 1,0000          |       |       |       |       |
| Índice de vazios             | e           |                 | 0,49            | 0,41  | 0,37  | 0,40  | 0,45  |
| Porosidade                   | n           | %               | 32,8            | 29,3  | 27,0  | 28,7  | 30,8  |
| Grau de saturação            | $S_r$       | %               | 44,9            | 62,8  | 80,1  | 86,2  | 85,9  |
| Grau de compactação          | GC          | %               | 91,9            | 96,8  | 99,9  | 97,5  | 94,6  |

## ÍNDICES FÍSICOS PARA UMIDADE ÓTIMA E MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA

|                              |                |                 |        |
|------------------------------|----------------|-----------------|--------|
| Umidade ótima                | $w_{ot}$       | %               | 11,3   |
| Massa específica seca máxima | $\rho_{d,máx}$ | $\text{g/cm}^3$ | 1,950  |
| Massa específica dos sólidos | $\rho_s$       | $\text{g/cm}^3$ | 2,668  |
| Índice de vazios             | e              |                 | 0,37   |
| Porosidade                   | n              | %               | 26,9   |
| Grau de saturação            | $S_r$          | %               | 81,9   |
| Massa específica da água     | $\rho_w(T)$    | $\text{g/cm}^3$ | 1,0000 |

## TABELA PARA TRAÇAR A CURVA DE SATURAÇÃO

| Grau de saturação | $S_r$ | %    | Teor de umidade | $w_{MÉDIO}$ | %     | Massa específica seca | $\rho_d$ | $\text{g/cm}^3$ |
|-------------------|-------|------|-----------------|-------------|-------|-----------------------|----------|-----------------|
| 105,0             |       |      | 8,2             |             |       | 2,207                 |          |                 |
|                   |       |      | 9,7             |             |       | 2,139                 |          |                 |
|                   |       |      | 11,1            |             |       | 2,081                 |          |                 |
|                   |       |      | 13,0            |             |       | 2,004                 |          |                 |
|                   |       |      | 14,4            |             |       | 1,955                 |          |                 |
| 95,0              |       |      | 8,2             |             |       | 2,167                 |          |                 |
|                   |       |      | 9,7             |             |       | 2,096                 |          |                 |
|                   |       |      | 11,1            |             |       | 2,034                 |          |                 |
|                   |       |      | 13,0            |             |       | 1,953                 |          |                 |
| 85,0              |       |      | 14,4            |             |       | 1,901                 |          |                 |
|                   |       |      | 8,2             |             |       | 2,120                 |          |                 |
|                   |       |      | 9,7             |             |       | 2,044                 |          |                 |
|                   |       |      | 11,1            |             |       | 1,979                 |          |                 |
|                   |       | 13,0 |                 |             | 1,893 |                       |          |                 |
|                   |       | 14,4 |                 |             | 1,839 |                       |          |                 |

## APÊNDICE 18 - Resultados do ensaio de compactação do solo, 6 golpes



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL- Laboratório de Mecânica dos Solos

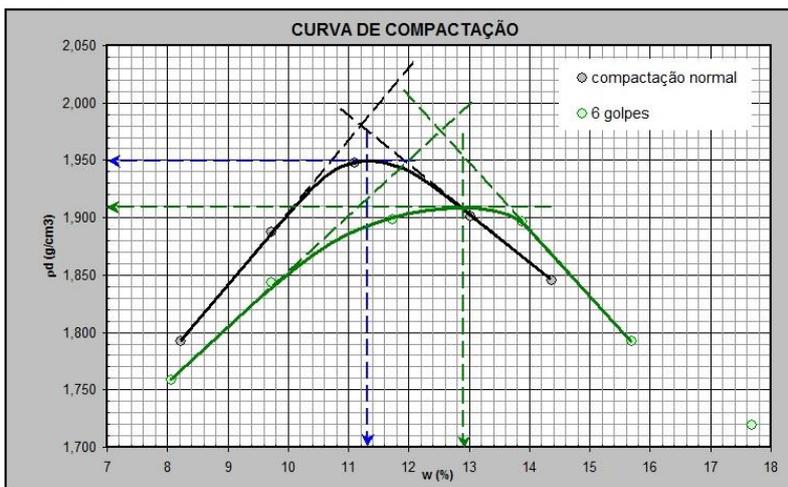
| ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - NBR 7182:1988 |  |            |            |                   |
|---------------------------------------|--|------------|------------|-------------------|
| LOCAL:                                | Bauru - SP   |            |            |                   |
| AMOSTRA:                              | 1 (mestrado Eduardo da Silva Pinto)                  | PROF. (m): | 6          |                   |
| CLASSIFICAÇÃO:                        | Areia fina a média pouco argilosa marrom avermelhado |            | Professor: | Obede B. Faria    |
| OPERADOR:                             | Obede / Eduardo                                      |            | DATA:      | 26 novembro, 2015 |

| TEOR DE UMIDADE DA AMOSTRA |         |       |       |
|----------------------------|---------|-------|-------|
| Determinação               | 1       | 2     | 3     |
| Cáps. n°                   | M14     | M33   | M34   |
| (S+A+T)                    | g 64,97 | 61,73 | 48,64 |
| (S+T)                      | g 64,47 | 61,30 | 48,31 |
| (T)                        | g 20,76 | 26,56 | 18,31 |
| (A)                        | g 0,50  | 0,43  | 0,33  |
| (S)                        | g 43,71 | 34,74 | 30,00 |
| Whigr.                     | % 1,14  | 1,24  | 1,10  |
| WmÉDIO                     | % 1,16  |       |       |

| DADOS DO EQUIPAMENTO                       |                          |                        |                           |                        |       |
|--|--------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|-------|
| Cil. n° / Tamanho                          | 5 x 10<br>6 golpes       | Massa solo inicial (g) | 500                       | umidade inicial W1 (%) | 8     |
| Massa cilindro (Tara)                      | M(cil) g                 | 649                    | Soquete n° / Tam. / massa |                        |       |
| Volume do cilindro                         | V(cil) cm³               | 196                    |                           |                        |       |
| Energia                                    | Normal                   | Intermediária          | Modificado                |                        |       |
| DADOS DO ENSAIO                            |                          |                        |                           |                        |       |
| Volume inicial de água a adicionar no solo |                          |                        | V <sub>w</sub>            | 34                     | cm³   |
| Massa Específica dos Sólidos               |                          |                        | ρ <sub>s</sub>            | 2,668                  | g/cm³ |
| AMOSTRA                                    | Com secagem prévia ao ar | X                      | Com reuso                 |                        |       |
|  | Sem secagem prévia ao ar |                        | Sem reuso                 | X                      |       |

| COMPACTAÇÃO  |             |       |       |       |       |       |
|--------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Determinação | 1           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| (CP+M(cil))  | g 1.022     | 1.046 | 1.066 | 1.073 | 1.056 | 1.046 |
| M            | g 373       | 397   | 417   | 424   | 407   | 397   |
| ρ            | g/cm³ 1,900 | 2,023 | 2,121 | 2,159 | 2,073 | 2,023 |

| TEOR DE UMIDADE |             |       |       |       |       |        |       |       |        |       |       |        |       |        |       |       |       |       |
|-----------------|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Cáps. n°        | M1          | M9    | M21   | M23   | M30   | M34    | M40   | M50   | M57    | M70   | M73   | M78    | M101  | M128   | M129  | M3    | M29   | M76   |
| (S+A+T)         | g 56,69     | 58,04 | 56,92 | 62,36 | 65,03 | 46,67  | 68,65 | 50,35 | 64,06  | 71,84 | 68,36 | 63,87  | 71,30 | 69,92  | 65,47 | 77,10 | 54,74 | 66,08 |
| (S+T)           | g 54,97     | 55,75 | 54,61 | 58,71 | 61,78 | 44,13  | 63,71 | 47,34 | 59,87  | 66,77 | 63,60 | 59,65  | 65,42 | 64,29  | 60,19 | 69,66 | 49,34 | 60,43 |
| (T)             | g 32,86     | 28,31 | 25,94 | 21,57 | 27,65 | 18,30  | 21,52 | 21,77 | 24,17  | 30,57 | 28,92 | 29,30  | 27,91 | 27,77  | 27,15 | 27,69 | 18,71 | 28,51 |
| (A)             | g 1,72      | 2,29  | 2,31  | 3,65  | 3,25  | 2,54   | 4,94  | 3,01  | 4,19   | 5,07  | 4,76  | 4,22   | 5,88  | 5,63   | 5,28  | 7,44  | 5,40  | 5,65  |
| (S)             | g 22,11     | 27,44 | 28,67 | 37,14 | 34,13 | 25,83  | 42,19 | 25,57 | 35,70  | 36,20 | 34,68 | 30,35  | 37,51 | 36,52  | 33,04 | 41,97 | 30,63 | 31,92 |
| w               | % 7,78      | 8,35  | 8,06  | 9,83  | 9,52  | 9,83   | 11,71 | 11,77 | 11,74  | 14,01 | 13,73 | 13,90  | 15,68 | 15,42  | 15,98 | 17,73 | 17,63 | 17,70 |
| WmÉDIO          | % 8,1       |       | % 9,7 |       |       | % 11,7 |       |       | % 13,9 |       |       | % 15,7 |       | % 17,7 |       |       |       |       |
| ρ <sub>d</sub>  | g/cm³ 1,758 |       | 1,843 |       |       | 1,898  |       |       | 1,896  |       |       | 1,792  |       | 1,719  |       |       |       |       |



| Umidade Ótima (compactação de norma)                |          |
|---|----------|
| W <sub>ot</sub>                                     |          |
| 11,3  | %        |
| 12,9  | 6 golpes |
| 1,91  | 6 golpes |
| Massa Específica Seca Máxima (compactação de norma) |          |
| ρ <sub>d</sub> máx                                  |          |
| 1,950   | g/cm³    |

| FÓRMULAS | A=(S+A+T)-(S+T) | w=((A)/(S)).100  | M=(CP+M(cil))-M(cil) | ρ <sub>s</sub> =p/(1+w) |
|----------|-----------------|--|----------------------|-------------------------|
|          | S=(S+T)-(T)     | V <sub>w</sub> =[M/(1+W <sub>higr.</sub> )] . (W <sub>esp</sub> ·W <sub>higr.</sub> ) . ρ <sub>w</sub> | ρ=M/V(cil)           |                         |

**APÊNDICE 18 - Resultados do ensaio de compactação do solo, 8 golpes**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - Laboratório de Mecânica dos Solos

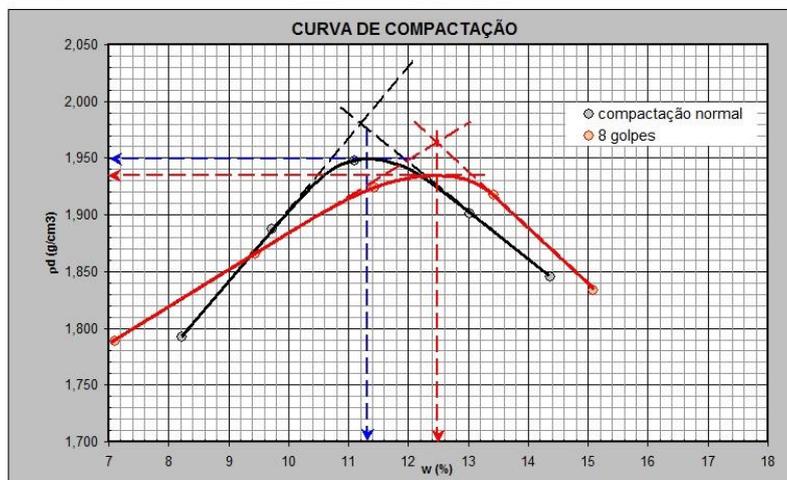
| ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - NBR 7182:1988 |  |            |                  |
|---------------------------------------|--|------------|------------------|
| LOCAL:                                | Bauru - SP   |            |                  |
| AMOSTRA:                              | 1 (mestrado Eduardo da Silva Pinto)                  | PROF. (m): | 6                |
| CLASSIFICAÇÃO:                        | Areia fina a média pouco argilosa marrom avermelhado | Professor: | Obede B. Faria   |
| OPERADOR:                             | Obede / Eduardo                                      | DATA:      | 28 outubro, 2015 |

| TEOR DE UMIDADE DA AMOSTRA |         |       |       |
|----------------------------|---------|-------|-------|
| Determinação               | 1       | 2     | 3     |
| Cáps. nº                   | M14     | M33   | M34   |
| (S+A+T)                    | g 64.97 | 61.73 | 48.64 |
| (S+T)                      | g 64.47 | 61.30 | 48.31 |
| (T)                        | g 20.76 | 26.56 | 18.31 |
| (A)                        | g 0,50  | 0,43  | 0,33  |
| (S)                        | g 43,71 | 34,74 | 30,00 |
| Whigr.                     | % 1,14  | 1,24  | 1,10  |
| WMÉDIO                     | % 1,16  |       |       |

| DADOS DO EQUIPAMENTO                       |                          |                           |                           |                           |       |
|--|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
| Cil. nº / Tamanho                          | 5 x 10<br>8 golpes       | Massa solo<br>inicial (g) | 500                       | umidade inicial<br>W1 (%) | 8     |
| Massa cilindro (Tara)                      | M(cil) g                 | 649                       | Soquete nº / Tam. / massa |                           |       |
| VOLUME do cilindro                         | V(cil) cm³               | 196                       |                           |                           |       |
| Energia                                    | Normal                   | Intermediária             | Modificado                |                           |       |
| DADOS DO ENSAIO                            |                          |                           |                           |                           |       |
| Volume inicial de água a adicionar no solo |                          |                           | V <sub>w</sub>            | 34                        | cm³   |
| Massa Específica dos Sólidos               |                          |                           | ρ <sub>s</sub>            | 2,668                     | g/cm³ |
| AMOSTRA                                    | Com secagem prévia ao ar | X                         | Com reuso                 |                           |       |
|  | Sem secagem prévia ao ar |                           | Sem reuso                 | X                         |       |

| COMPACTAÇÃO  |             |       |       |       |       |   |
|--------------|-------------|-------|-------|-------|-------|---|
| Determinação | 1           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6 |
| (CP+M(cil))  | g 1.025     | 1.050 | 1.070 | 1.076 | 1.063 |   |
| M            | g 376       | 401   | 421   | 427   | 414   |   |
| ρ            | g/cm³ 1,916 | 2,042 | 2,144 | 2,175 | 2,109 |   |

| TEOR DE UMIDADE |             |       |       |       |       |        |       |       |        |       |       |        |       |       |       |
|-----------------|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Cáps. nº        | M17         | M18   | M27   | M49   | M58   | M63    | M66   | M70   | M74    | M86   | M94   | M124   | M3    | M4    | M84   |
| (S+A+T)         | g 67.26     | 76.31 | 73.05 | 50.33 | 53.15 | 52.37  | 56.80 | 61.68 | 63.87  | 57.33 | 69.52 | 72.94  | 65.61 | 63.19 | 67.65 |
| (S+T)           | g 64.54     | 73.02 | 69.99 | 47.90 | 50.39 | 49.29  | 54.17 | 58.46 | 60.30  | 53.76 | 64.61 | 67.58  | 60.60 | 58.59 | 62.64 |
| (T)             | g 26.35     | 26.94 | 26.60 | 22.18 | 21.07 | 21.16  | 30.01 | 30.59 | 30.27  | 26.91 | 28.33 | 27.77  | 27.69 | 28.02 | 29.15 |
| (A)             | g 2,72      | 3,29  | 3,06  | 2,43  | 2,76  | 3,08   | 2,63  | 3,22  | 3,57   | 3,57  | 4,91  | 5,36   | 5,01  | 4,60  | 5,01  |
| (S)             | g 38,19     | 46,08 | 43,39 | 25,72 | 29,32 | 28,13  | 24,16 | 27,87 | 30,03  | 26,85 | 36,28 | 39,81  | 32,91 | 30,57 | 33,49 |
| w               | % 7,12      | 7,14  | 7,05  | 9,45  | 9,41  | 10,95  | 10,89 | 11,55 | 11,89  | 13,30 | 13,53 | 13,46  | 15,22 | 15,05 | 14,96 |
| WMÉDIO          | % 7,1       |       | % 9,4 |       |       | % 11,4 |       |       | % 13,4 |       |       | % 15,1 |       |       |       |
| ρ <sub>d</sub>  | g/cm³ 1,789 |       |       | 1,866 |       |        | 1,924 |       |        | 1,918 |       |        | 1,833 |       |       |



| Umidade Ótima<br>(compactação de norma)                |          |
|--|----------|
| W <sub>ot</sub>  |          |
| 11,3   | %        |
| 12,5   | 8 golpes |
| 1,935  | 8 golpes |
| Massa Específica Seca Máxima<br>(compactação de norma) |          |
| ρ <sub>d máx</sub>                                     |          |
| 1,950  | g/cm³    |

| FÓRMULAS | A=(S+A+T)-(S+T) | w=((A)/(S)).100   | M=(CP+M(cil))-M(cil) | ρ <sub>s</sub> =p/(1+w) |
|----------|-----------------|---|----------------------|-------------------------|
|          | S=(S+T)-(T)     | V <sub>w</sub> =[M/(1+Whigr)].(W <sub>esp</sub> *Whigr.).ρ <sub>w</sub> | ρ=M/V(cil)           |                         |

APÊNDICE 18 - Resultados do ensaio de compactação do solo, 6, 8 e 10 golpes



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL- Laboratório de Mecânica dos Solos

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - NBR 7182:1988

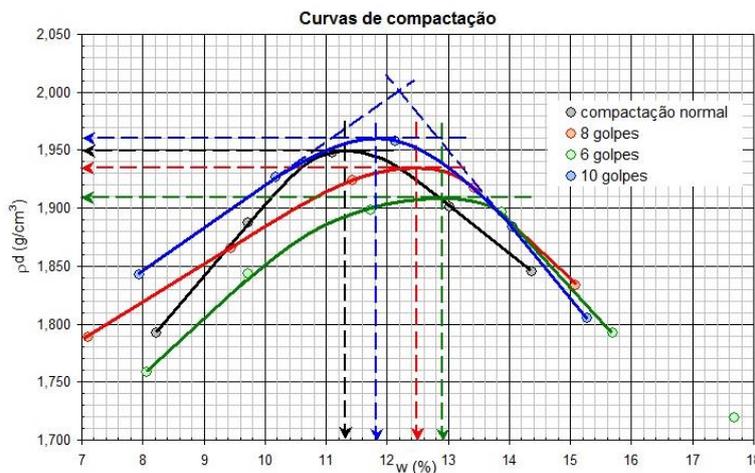
|                |  |            |                   |
|----------------|--|------------|-------------------|
| LOCAL:         | Bauru - SP   |            |                   |
| AMOSTRA:       | 1 (mestrado Eduardo da Silva Pinto)                  | PROF. (m): | 6                 |
| CLASSIFICAÇÃO: | Areia fina a média pouco argilosa marrom avermelhado | Professor: | Obede B. Faria    |
| OPERADOR:      | Obede / Eduardo                                      | DATA:      | 10 dezembro, 2015 |

| TEOR DE UMIDADE DA AMOSTRA |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| Determinação               | 1     | 2     | 3     |
| Cáps. nº                   | M14   | M33   | M34   |
| (S+A+T) g                  | 64,97 | 61,73 | 48,64 |
| (S+T) g                    | 64,47 | 61,30 | 48,31 |
| (T) g                      | 20,76 | 26,56 | 18,31 |
| (A) g                      | 0,50  | 0,43  | 0,33  |
| (S) g                      | 43,71 | 34,74 | 30,00 |
| W <sub>higr.</sub> %       | 1,14  | 1,24  | 1,10  |
| W <sub>MÉDIO</sub> %       | 1,16  |       |       |

| DADOS DO EQUIPAMENTO                       |                          |     |                        |                           |                        |   |
|--|--------------------------|-----|------------------------|---------------------------|------------------------|---|
| Cil. nº / Tamanho                          | 5 x 10<br>10 golpes      |     | Massa solo inicial (g) | 500                       | umidade inicial W1 (%) | 8 |
| Massa cilindro (Tara)                      | M(cil)                   | g   | 649                    | Soquete nº / Tam. / massa |                        |   |
| Volume do cilindro                         | V(cil)                   | cm³ | 196                    |                           |                        |   |
| Energia                                    | Normal                   |     | Intermediária          |                           | Modificado             |   |
| DADOS DO ENSAIO                            |                          |     |                        |                           |                        |   |
| Volume inicial de água a adicionar no solo |                          |     | V <sub>w</sub>         | 34                        | cm³                    |   |
| Massa Específica dos Sólidos               |                          |     | ρ <sub>s</sub>         | 2,668                     | g/cm³                  |   |
| AMOSTRA                                    | Com secagem prévia ao ar |     | X                      | Com reuso                 |                        |   |
|  | Sem secagem prévia ao ar |     |                        | Sem reuso                 |                        | X |

| COMPACTAÇÃO   |       |       |       |       |       |   |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| Determinação  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6 |
| (CP+M(cil)) g | 1.040 | 1.066 | 1.080 | 1.071 | 1.058 |   |
| M g           | 391   | 417   | 431   | 422   | 409   |   |
| ρ g/cm³       | 1,989 | 2,123 | 2,195 | 2,149 | 2,081 |   |

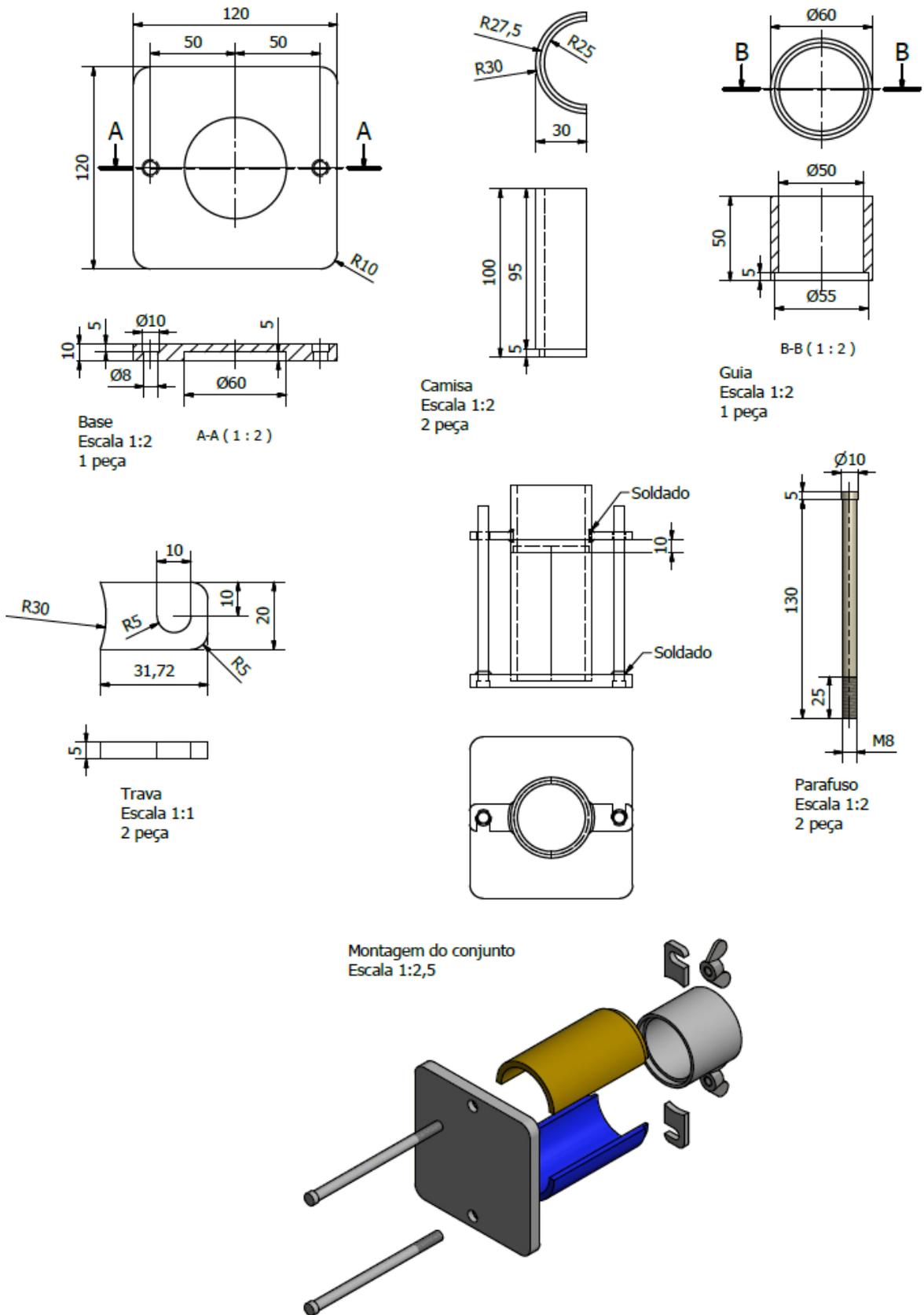
| TEOR DE UMIDADE      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cáps. nº             | M1    | M21   | M31   | M36   | M41   | M50   | M51   | M56   | M59   | M80   | M107  | M108  | M116  | M125  | M310  |
| (S+A+T) g            | 68,71 | 57,78 | 57,66 | 59,16 | 64,94 | 68,78 | 68,79 | 76,86 | 77,29 | 90,25 | 86,66 | 69,39 | 60,68 | 78,77 | 76,02 |
| (S+T) g              | 66,10 | 55,42 | 54,89 | 56,21 | 60,70 | 64,41 | 64,48 | 71,81 | 72,22 | 82,49 | 79,72 | 64,44 | 55,14 | 71,78 | 69,01 |
| (T) g                | 32,86 | 25,94 | 20,19 | 26,88 | 19,25 | 21,78 | 28,97 | 30,36 | 30,21 | 27,21 | 30,70 | 29,00 | 18,15 | 26,67 | 23,43 |
| (A) g                | 2,61  | 2,36  | 2,77  | 2,95  | 4,24  | 4,37  | 4,31  | 5,05  | 5,07  | 7,76  | 6,94  | 4,95  | 5,54  | 6,99  | 7,01  |
| (S) g                | 33,24 | 29,48 | 34,70 | 29,33 | 41,45 | 42,63 | 35,51 | 41,45 | 42,01 | 55,28 | 49,02 | 35,44 | 36,99 | 45,11 | 45,58 |
| w %                  | 7,85  | 8,01  | 7,98  | 10,06 | 10,23 | 10,25 | 12,14 | 12,18 | 12,07 | 14,04 | 14,16 | 13,97 | 14,98 | 15,50 | 15,38 |
| W <sub>MÉDIO</sub> % | 7,9   |       | 10,2  |       |       | 12,1  |       |       | 14,1  |       |       | 15,3  |       |       |       |
| ρ <sub>d</sub> g/cm³ | 1,843 |       | 1,927 |       |       | 1,957 |       |       | 1,884 |       |       | 1,805 |       |       |       |



| Umidade Ótima (compactação de norma)                |           |
|---|-----------|
| W <sub>ot</sub>                                     |           |
| 11,3  | %         |
| 12,5  | 8 golpes  |
| 12,9  | 6 golpes  |
| 11,8  | 10 golpes |
| 1,91  | 6 golpes  |
| 1,935   | 8 golpes  |
| 1,96  | 10 golpes |
| Massa Específica Seca Máxima (compactação de norma) |           |
| ρ <sub>dmáx</sub>                                   |           |
| 1,950   | g/cm³     |

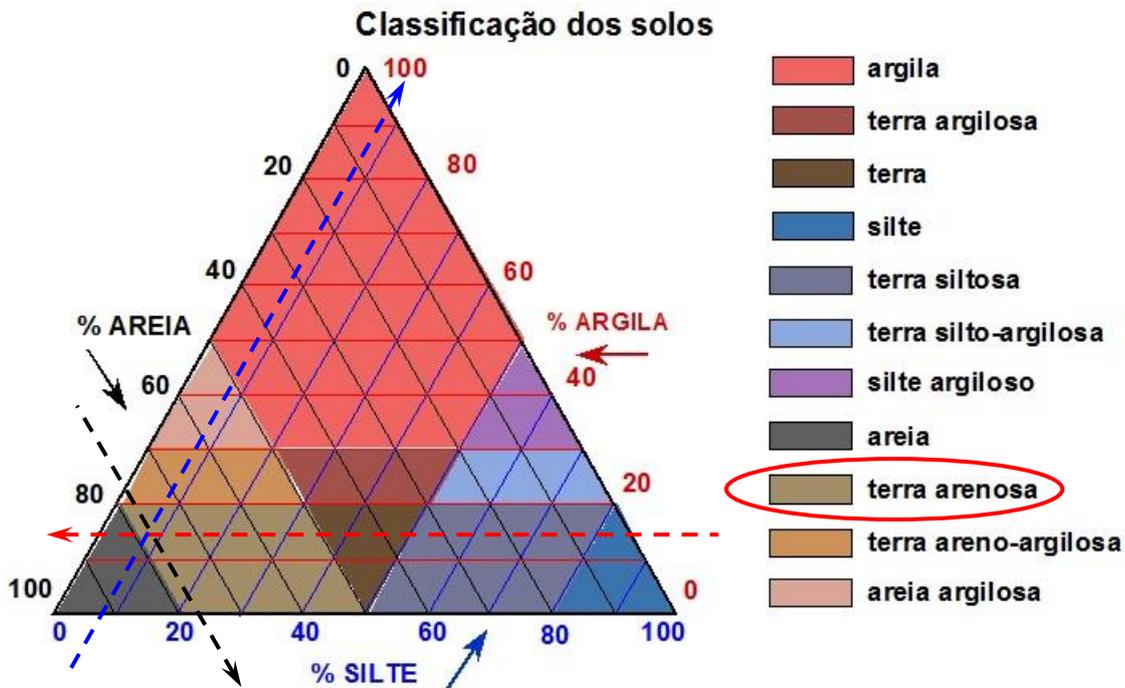
| FÓRMULAS | A=(S+A+T)-(S+T) | w=((A)/(S)).100  | M=(CP+M(cil))-M(cil) | ρ <sub>s</sub> =ρ/(1+w) |
|----------|-----------------|--|----------------------|-------------------------|
|          | S=(S+T)-(T)     | V <sub>w</sub> =[M/(1+W <sub>higr.</sub> )] . (W <sub>esp</sub> -W <sub>higr.</sub> ) . ρ <sub>w</sub> | ρ=M/V(cil)           |                         |

**APÊNDICE 19 - Projeto do molde para o corpo de prova CP5x10**

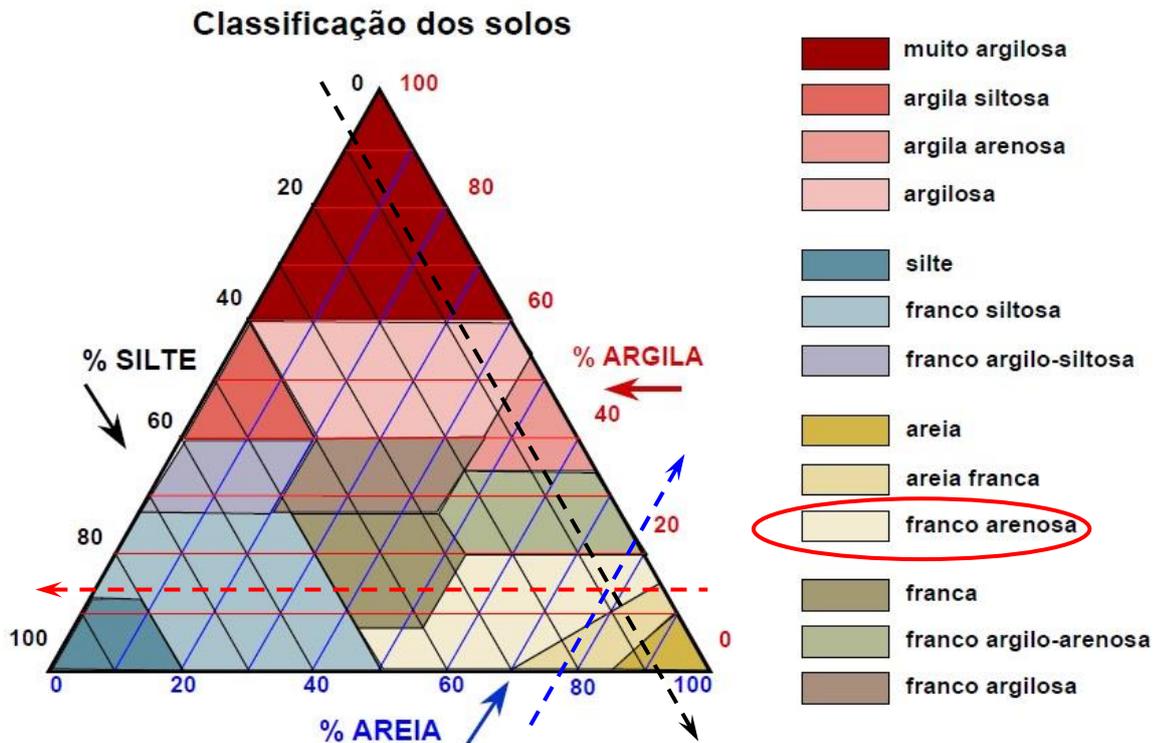


**APÊNDICE 20** - Classificação do solo, de acordo com Neves et al. (2010) e Lepsch (2011)

De acordo com Neves et al. (2010):



De acordo com Lepsch (2011):



**APÊNDICE 21** - Sistema de classificação do solo H. R. B., de acordo com Caputo e Caputo (2015) e adaptado da norma D 3282 (ASTM, 2004)

| Classificação geral         | Solos Granulares ( $P_{200} < 35\%$ )   |           |            |  |           |           |               | Solos Silto-Argilosos ( $P_{200} > 35\%$ ) |           |                 |           |
|-----------------------------|---|-----------|------------|--|-----------|-----------|---------------|--|-----------|-----------------|-----------|
|                             | A-1                                     |           | A-3        | A-2  |           |           |               | A-4  | A-5       | A-6             | A-7       |
|                             | A-1-a                                   | A-1-b     |            | A-2-4                                      | A-2-5     | A-2-6     | A-2-7         |  |           |                 |           |
| $P_{10}$                    | $\leq 50$                               | --        | --         | --   | --        | --        | --            | --   | --        | --              | -         |
| $P_{40}$                    | $\leq 30$                               | $\leq 50$ | $> 50$     | --   | --        | --        | --            | --   | --        | --              | --        |
| $P_{200}$                   | $\leq 15$                               | $\leq 25$ | $\leq 10$  | $\leq 35$                                  | $\leq 35$ | $\leq 35$ | $\leq 35$     | $> 35$                                     | $> 35$    | $> 35$          | $> 35$    |
| $LL$                        | --                                      | --        | --         | $\leq 40$                                  | $> 40$    | $\leq 40$ | $> 40$        | $\leq 40$                                  | $> 40$    | $\leq 40$       | $> 40$    |
| $IP$                        | $\leq 6$                                | $\leq 6$  | NP         | $\leq 10$                                  | $\leq 10$ | $> 10$    | $> 10$        | $\leq 10$                                  | $\leq 10$ | $> 10$          | $> 10$    |
| Índice de Grupo (IG)        | 0                                       | 0         | 0          | 0  | 0         | $\leq 4$  | $\leq 4$      | $\leq 8$                                   | $\leq 12$ | $\leq 16$       | $\leq 20$ |
| Tipos de material           | fragmentos de pedra, pedregulho e areia |           | areia fina | pedregulhos e areias siltosas ou argilosas |           |           |               | solos siltosos                             |           | solos argilosos |           |
| Classificação como subleito | excelente a bom                         |           |            |  |           |           | regular a mau |  |           |                 |           |

**NOTAS:**

- (1) –  $P_{10}$ ,  $P_{40}$  e  $P_{200}$  indicam, respectivamente, as porcentagens que passam nas peneiras nº 10 (2 mm), 40 (0,42 mm) e 200 (0,074 mm);
- (2) –  $LL$  e  $IP$  referem-se a fração passando na # 40;
- (3) – Para o subgrupo **A-7-5**:  $IP \leq LL - 30$  e para o **A-7-6**:  $IP > LL - 30$ ;
- (4) – A identificação é feita da esquerda para a direita, razão porque o A-3 é colocado antes do A-2, sem que isto signifique superioridade daquele sobre este;
- (5) -  $IG = a \cdot (0,2 + 0,005 \cdot b) + 0,01 \cdot c \cdot d$  onde:
 

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| $a = (P_{200} - 35)$ (com $0 < a < 40$ ) | $b = (LL - 40)$ (com $0 < b < 20$ ) |
| $c = (P_{200} - 15)$ (com $0 < c < 40$ ) | $d = (IP - 10)$ (com $0 < d < 20$ ) |

Cálculo de IG, para o solo em estudo (cujos parâmetros estão sombreados na cor azul no quadro):

$$P_{10} = 100\% \quad P_{40} = 98\% \quad P_{200} = 24\% \quad LL = 22\% \quad LP = 15\% \quad IP = 7\%$$

$$a = (24 - 35) = -15 \Rightarrow a = 0$$

$$b = (22 - 40) = -18 \Rightarrow b = 0$$

$$c = (24 - 15) = 9 \Rightarrow c = 9$$

$$d = (7 - 10) = -3 \Rightarrow d = 0$$

$$IG = 0 \times (0,2 + 0,005 \times 0) + 0,01 \times 9 \times 0 \Rightarrow \boxed{IG = 0}$$

No entanto, não é possível classificar o solo por este sistema, porque não é possível atender a condição para porcentagem de material que passa na peneira nº 10 (2 mm).

## APÊNDICE 22 - Avaliação do teor de umidade dos CP do estudo de dosagem

Wót (%) 11,80

| % cimento / data | 23/12/15  |       |       |       |       |       |
|------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CP nº            | 1         | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| Cápsula nº       | M3        | M4    | M11   | M18   | M20   | M26   |
| Tara (g)         | 27,69     | 30,70 | 25,53 | 26,94 | 21,02 | 25,28 |
| S+A+T (g)        | 59,25     | 69,01 | 53,25 | 70,60 | 67,92 | 66,78 |
| S+T (g)          | 55,84     | 64,93 | 50,39 | 66,01 | 63,02 | 62,49 |
| W (%)            | 12,11     | 11,92 | 11,50 | 11,75 | 11,67 | 11,53 |
| W média (%)      | 11,7      |       |       |       |       |       |
| tolerância de W  | aceitável |       |       |       |       |       |

| % cimento / data | 23/12/15  |       |       |       |       |       |
|------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CP nº            | 7         | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| Cápsula nº       | M29       | M36   | M41   | M54   | M61   | M62   |
| Tara (g)         | 18,70     | 26,89 | 19,24 | 20,84 | 21,99 | 19,13 |
| S+A+T (g)        | 60,23     | 61,96 | 74,74 | 70,73 | 70,14 | 73,31 |
| S+T (g)          | 55,94     | 58,24 | 68,96 | 65,52 | 65,14 | 67,75 |
| W (%)            | 11,52     | 11,87 | 11,63 | 11,66 | 11,59 | 11,44 |
| W média (%)      | 11,6      |       |       |       |       |       |
| tolerância de W  | aceitável |       |       |       |       |       |

| % cimento / data | 23/12/15  |       |       |       |       |       |
|------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CP nº            | 13        | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| Cápsula nº       | M64       | M78   | M80   | M81   | M82   | M98   |
| Tara (g)         | 32,10     | 29,29 | 27,21 | 29,79 | 28,93 | 29,55 |
| S+A+T (g)        | 72,25     | 66,05 | 65,29 | 72,27 | 69,99 | 71,50 |
| S+T (g)          | 68,08     | 62,24 | 61,32 | 67,80 | 65,65 | 67,07 |
| W (%)            | 11,59     | 11,56 | 11,64 | 11,76 | 11,82 | 11,81 |
| W média (%)      | 11,7      |       |       |       |       |       |
| tolerância de W  | aceitável |       |       |       |       |       |

| % cimento / data | 23/12/15  |       |       |       |       |       |
|------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CP nº            | 19        | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
| Cápsula nº       | M116      | M120  | M125  | M128  | M129  | M720  |
| Tara (g)         | 19,15     | 26,81 | 26,68 | 27,77 | 27,16 | 27,09 |
| S+A+T (g)        | 66,10     | 70,92 | 62,27 | 73,85 | 57,74 | 65,39 |
| S+T (g)          | 61,20     | 66,46 | 58,55 | 69,15 | 54,61 | 61,44 |
| W (%)            | 11,65     | 11,25 | 11,67 | 11,36 | 11,40 | 11,50 |
| W média (%)      | 11,5      |       |       |       |       |       |
| tolerância de W  | aceitável |       |       |       |       |       |

| % cimento / data | 23/12/15  |       |       |       |       |       |
|------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CP nº            | 25        | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    |
| Cápsula nº       | M22       | M31   | M44   | M47   | M58   | M126  |
| Tara (g)         | 25,99     | 20,19 | 20,53 | 29,39 | 21,06 | 27,07 |
| S+A+T (g)        | 64,51     | 61,42 | 64,78 | 68,58 | 56,46 | 72,78 |
| S+T (g)          | 60,46     | 57,16 | 60,25 | 64,46 | 52,80 | 67,99 |
| W (%)            | 11,75     | 11,52 | 11,40 | 11,75 | 11,53 | 11,71 |
| W média (%)      | 11,6      |       |       |       |       |       |
| tolerância de W  | aceitável |       |       |       |       |       |

## APÊNDICE 22 - continuação

## Avaliação do teor de umidade dos CP de caracterização mecânica

Wót (%) 11,80 5x10 11,30 10x12,7

## PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

| % cimento / data | 6         | 04/01/16 |       |       |       |           | 6     | 04/01/16 |       |       |  |
|------------------|-----------|----------|-------|-------|-------|-----------|-------|----------|-------|-------|--|
| CP nº            | 1         | 2        | 3     | 4     | 5     | 6         | 7     | 8        | 9     | 10    |  |
| Cápsula nº       | M3        | M11      | M18   | M20   | M22   | M26       | M29   | M36      | M31   | M41   |  |
| Tara (g)         | 27,69     | 25,52    | 26,94 | 21,03 | 25,99 | 25,28     | 18,69 | 26,87    | 20,19 | 19,25 |  |
| S+A+T (g)        | 54,82     | 60,45    | 63,65 | 48,20 | 59,92 | 56,20     | 60,24 | 51,13    | 54,22 | 50,39 |  |
| S+T (g)          | 52,05     | 56,87    | 59,96 | 45,47 | 56,48 | 52,95     | 55,81 | 48,63    | 50,72 | 47,28 |  |
| W (%)            | 11,37     | 11,42    | 11,18 | 11,17 | 11,28 | 11,75     | 11,93 | 11,49    | 11,46 | 11,10 |  |
| W média (%)      | 11,3      |          |       |       |       | 11,5      |       |          |       |       |  |
| tolerância de W  | aceitável |          |       |       |       | aceitável |       |          |       |       |  |

| % cimento / data | 6         | 04/01/16 |       | CP 10 x 12,7 |  |
|------------------|-----------|----------|-------|--------------|--|
| CP nº            | 1         | 2        | 3     |              |  |
| Cápsula nº       | M44       | M47      | M54   |              |  |
| Tara (g)         | 20,52     | 29,38    | 20,83 |              |  |
| S+A+T (g)        | 61,35     | 76,60    | 65,60 |              |  |
| S+T (g)          | 57,20     | 71,88    | 61,14 |              |  |
| W (%)            | 11,31     | 11,11    | 11,06 |              |  |
| W média (%)      | 11,2      |          |       |              |  |
| tolerância de W  | aceitável |          |       |              |  |

## PARA ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

| % cimento / data | 6         | /01/2016 |       |       |       |           | 6     | /01/2016 |       |       |  |
|------------------|-----------|----------|-------|-------|-------|-----------|-------|----------|-------|-------|--|
| CP nº            | 11        | 12       | 13    | 14    | 15    | 16        | 17    | 18       | 19    | 20    |  |
| Cápsula nº       | M3        | M11      | M18   | M20   | M22   | M26       | M29   | M36      | M31   | M41   |  |
| Tara (g)         | 27,69     | 25,52    | 26,94 | 21,03 | 25,99 | 25,28     | 18,69 | 26,87    | 20,19 | 19,25 |  |
| S+A+T (g)        | 62,78     | 56,82    | 57,13 | 53,86 | 62,04 | 57,63     | 53,82 | 59,52    | 54,62 | 61,71 |  |
| S+T (g)          | 59,20     | 53,55    | 54,03 | 50,56 | 58,46 | 54,34     | 50,29 | 56,27    | 51,09 | 57,30 |  |
| W (%)            | 11,36     | 11,67    | 11,44 | 11,18 | 11,03 | 11,32     | 11,17 | 11,05    | 11,42 | 11,59 |  |
| W média (%)      | 11,3      |          |       |       |       | 11,3      |       |          |       |       |  |
| tolerância de W  | aceitável |          |       |       |       | aceitável |       |          |       |       |  |

| % cimento / data | 6         | /01/2016 |       | CP 10 x 12,7 |  |
|------------------|-----------|----------|-------|--------------|--|
| CP nº            | 4         | 5        | 6     |              |  |
| Cápsula nº       | M44       | M47      | M54   |              |  |
| Tara (g)         | 20,52     | 29,38    | 20,83 |              |  |
| S+A+T (g)        | 59,89     | 72,55    | 58,54 |              |  |
| S+T (g)          | 55,92     | 68,28    | 54,93 |              |  |
| W (%)            | 11,21     | 10,98    | 10,59 |              |  |
| W média (%)      | 10,9      |          |       |              |  |
| tolerância de W  | aceitável |          |       |              |  |

### APÊNDICE 23 - Avaliação do grau de compactação (GC) dos CP do estudo de dosagem (1% a 6% de cimento)

| Traço cimento (%)                           | diâm. Molde (cm): 5,00      |              |              | h molde (cm): 10,00 |                       |              |              |
|---|-----------------------------|--------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| W média (%)                                 | 12,1                        | 11,92        | 11,50        |                     | 11,75                 | 11,67        | 11,53        |
| Data de moldagem:                           | 23/12/15                    |              |              |                     |                       |              |              |
|   | para compressão - romper em |              |              | 30/12/15            | para absorção de água |              |              |
| CP nº                                       | 1                           | 2            | 3            |                     | 4                     | 5            | 6            |
| M cil (g)                                   | 649,00                      | 649,00       | 649,00       | média               | 649,00                | 649,00       | 649,00       |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.076,49                    | 1.074,05     | 1.071,18     |                     | 1.066,45              | 1.067,69     | 1.063,93     |
| M CP (g)                                    | 427,49                      | 425,05       | 422,18       |                     | 417,45                | 418,69       | 414,93       |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,177                       | 2,165        | 2,150        |                     | 2,126                 | 2,132        | 2,113        |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | <b>1,942</b>                | <b>1,934</b> | <b>1,928</b> | 1,935               | <b>1,903</b>          | <b>1,910</b> | <b>1,895</b> |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                       | 1,960        | 1,960        |                     | 1,960                 | 1,960        | 1,960        |
| GC (grau compact %)                         | 99                          | 99           | 98           |                     | 97                    | 97           | 97           |
|   | aceitável                   | aceitável    | aceitável    |                     | rejeitado             | rejeitado    | rejeitado    |

| Traço cimento (%)                           | diâm. Molde (cm): 5,00      |              |              | h molde (cm): 10,00 |                       |              |              |
|---|-----------------------------|--------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| W média (%)                                 | 11,5                        | 11,87        | 11,63        |                     | 11,66                 | 11,59        | 11,44        |
| Data de moldagem:                           | 23/12/15                    |              |              |                     |                       |              |              |
|   | para compressão - romper em |              |              | 30/12/15            | para absorção de água |              |              |
| CP nº                                       | 7                           | 8            | 9            | média               | 10                    | 11           | 12           |
| M cil (g)                                   | 649,00                      | 649,00       | 649,00       |                     | 649,00                | 649,00       | 649,00       |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.073,13                    | 1.068,26     | 1.068,91     |                     | 1.060,23              | 1.063,93     | 1.058,56     |
| M CP (g)                                    | 424,13                      | 419,26       | 419,91       |                     | 411,23                | 414,93       | 409,56       |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,160                       | 2,135        | 2,139        |                     | 2,094                 | 2,113        | 2,086        |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | <b>1,937</b>                | <b>1,915</b> | <b>1,918</b> | 1,923               | <b>1,876</b>          | <b>1,893</b> | <b>1,868</b> |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                       | 1,960        | 1,960        |                     | 1,960                 | 1,960        | 1,960        |
| GC (grau compact %)                         | 99                          | 98           | 98           |                     | 96                    | 97           | 95           |
|   | aceitável                   | aceitável    | aceitável    |                     | rejeitado             | rejeitado    | rejeitado    |

| Traço cimento (%)                           | diâm. Molde (cm): 5,00      |              |              | h molde (cm): 10,00 |                       |              |              |
|---|-----------------------------|--------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| W média (%)                                 | 11,6                        | 11,56        | 11,64        |                     | 11,76                 | 11,82        | 11,81        |
| Data de moldagem:                           | 24/12/15                    |              |              |                     |                       |              |              |
|   | para compressão - romper em |              |              | 31/12/15            | para absorção de água |              |              |
| CP nº                                       | 13                          | 14           | 15           | média               | 16                    | 17           | 18           |
| M cil (g)                                   | 649,00                      | 649,00       | 649,00       |                     | 649,00                | 649,00       | 649,00       |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.074,61                    | 1.074,84     | 1.074,78     |                     | 1.071,79              | 1.071,22     | 1.069,15     |
| M CP (g)                                    | 425,61                      | 425,84       | 425,78       |                     | 422,79                | 422,22       | 420,15       |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,168                       | 2,169        | 2,168        |                     | 2,153                 | 2,150        | 2,140        |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | <b>1,942</b>                | <b>1,944</b> | <b>1,943</b> | 1,943               | <b>1,927</b>          | <b>1,924</b> | <b>1,915</b> |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                       | 1,960        | 1,960        |                     | 1,960                 | 1,960        | 1,960        |
| GC (grau compact %)                         | 99                          | 99           | 99           |                     | 98                    | 98           | 98           |
|   | aceitável                   | aceitável    | aceitável    |                     | aceitável             | aceitável    | aceitável    |

## APÊNDICE 23 - continuação

## Avaliação do grau de compactação (GC) dos CP do estudo de dosagem (10% e 15% de cimento)

| Traço cimento (%)                           | 10                          |           |           | diâm. Molde (cm): 5,00 |                       |           | h molde (cm): 10,00 |       |       |
|---|-----------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------------------|-----------|---------------------|-------|-------|
| W média (%)                                 | 11,7                        | 11,25     | 11,67     |                        |                       |           | 11,36               | 11,40 | 11,50 |
| Data de moldagem:                           | 24/12/15                    |           |           |                        |                       |           |                     |       |       |
|   | para compressão - romper em |           |           | 31/12/15               | para absorção de água |           |                     |       |       |
| CP nº                                       | 19                          | 20        | 21        | média                  | 22                    | 23        | 24                  |       |       |
| M cil (g)                                   | 649,00                      | 649,00    | 649,00    |                        | 649,00                | 649,00    | 649,00              |       |       |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.078,23                    | 1.075,58  | 1.073,34  |                        | 1.066,46              | 1.063,66  | 1.062,27            |       |       |
| M CP (g)                                    | 429,23                      | 426,58    | 424,34    |                        | 417,46                | 414,66    | 413,27              |       |       |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,186                       | 2,173     | 2,161     |                        | 2,126                 | 2,112     | 2,105               |       |       |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,950                       | 1,938     | 1,928     | 1,938                  | 1,902                 | 1,890     | 1,883               |       |       |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                       | 1,960     | 1,960     |                        | 1,960                 | 1,960     | 1,960               |       |       |
| GC (grau compact %)                         | 99                          | 99        | 98        |                        | 97                    | 96        | 96                  |       |       |
|   | aceitável                   | aceitável | aceitável |                        | rejeitado             | rejeitado | rejeitado           |       |       |

| Traço cimento (%)                           | 15                          |           |           | diâm. Molde (cm): 5,00 |                       |           | h molde (cm): 10,00 |       |       |
|---|-----------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------------------|-----------|---------------------|-------|-------|
| W média (%)                                 | 11,7                        | 11,52     | 11,40     |                        |                       |           | 11,75               | 11,53 | 11,71 |
| Data de moldagem:                           | 24/12/15                    |           |           |                        |                       |           |                     |       |       |
|   | para compressão - romper em |           |           | 31/12/15               | para absorção de água |           |                     |       |       |
| CP nº                                       | 25                          | 26        | 27        | média                  | 28                    | 29        | 30                  |       |       |
| M cil (g)                                   | 649,00                      | 649,00    | 649,00    |                        | 649,00                | 649,00    | 649,00              |       |       |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.072,91                    | 1.074,21  | 1.070,28  |                        | 1.069,53              | 1.069,27  | 1.064,84            |       |       |
| M CP (g)                                    | 423,91                      | 425,21    | 421,28    |                        | 420,53                | 420,27    | 415,84              |       |       |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,159                       | 2,166     | 2,146     |                        | 2,142                 | 2,140     | 2,118               |       |       |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,926                       | 1,932     | 1,914     | 1,924                  | 1,916                 | 1,915     | 1,895               |       |       |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                       | 1,960     | 1,960     |                        | 1,960                 | 1,960     | 1,960               |       |       |
| GC (grau compact %)                         | 98                          | 99        | 98        |                        | 98                    | 98        | 97                  |       |       |
|   | aceitável                   | aceitável | aceitável |                        | aceitável             | aceitável | rejeitado           |       |       |

## APÊNDICE 23 - continuação

## Avaliação do grau de compactação (GC) dos CP de módulo de elasticidade e resistência à compressão

| PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL             |  |                         |                 |       |                     |                 |                 |
|---|--|-------------------------|-----------------|-------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Traço cimento (%)                           | 6  | diâm. Molde (cm): 5,00  |                 |       | h molde (cm): 10,00 |                 |                 |
| W média (%)                                 | 11,4                                       | 11,42                   | 11,18           |       | 11,17               | 11,28           | 11,75           |
| Data de moldagem:                           | 04/01/16                                   |                         |                 |       |                     |                 |                 |
|   | para compressão AXIAL - romper em 11/01/16 |                         |                 |       |                     |                 |                 |
| CP nº                                       | 1  | 2                       | 3               |       | 4                   | 5               | 6               |
| M cil (g)                                   | 649,00                                     | 649,00                  | 649,00          | média | 649,00              | 649,00          | 649,00          |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.074,18                                   | 1.063,61                | 1.063,91        |       | 1.054,95            | 1.056,41        | 1.067,43        |
| M CP (g)                                    | 425,18                                     | 414,61                  | 414,91          |       | 405,95              | 407,41          | 418,43          |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,165                                      | 2,112                   | 2,113           |       | 2,067               | 2,075           | 2,131           |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,944                                      | 1,895                   | 1,901           | 1,913 | 1,860               | 1,865           | 1,907           |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                                      | 1,960                   | 1,960           |       | 1,960               | 1,960           | 1,960           |
| GC (grau compact %)                         | 99<br>aceitável                            | 97<br>rejeitado         | 97<br>rejeitado |       | 95<br>rejeitado     | 95<br>rejeitado | 97<br>rejeitado |
| Traço cimento (%)                           | 6  | diâm. Molde (cm): 5,00  |                 |       | h molde (cm): 10,00 |                 |                 |
| W média (%)                                 | 11,9                                       | 11,49                   | 11,46           |       | 11,10               |                 |                 |
| Data de moldagem:                           | 04/01/16                                   |                         |                 |       |                     |                 |                 |
|   | para compressão AXIAL - romper em 11/01/16 |                         |                 |       |                     |                 |                 |
| CP nº                                       | 7  | 8                       | 9               | média | 10                  |                 |                 |
| M cil (g)                                   | 649,00                                     | 649,00                  | 649,00          |       | 649,00              |                 |                 |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.059,76                                   | 1.054,72                | 1.048,89        |       | 1.042,89            |                 |                 |
| M CP (g)                                    | 410,76                                     | 405,72                  | 399,89          |       | 393,89              |                 |                 |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,092                                      | 2,066                   | 2,037           |       | 2,006               |                 |                 |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,869                                      | 1,853                   | 1,827           | 1,850 | 1,806               |                 |                 |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                                      | 1,960                   | 1,960           |       | 1,960               |                 |                 |
| GC (grau compact %)                         | 95<br>rejeitado                            | 95<br>rejeitado         | 93<br>rejeitado |       | 92<br>rejeitado     |                 |                 |
| Traço cimento (%)                           | 6  | diâm. Molde (cm): 10,00 |                 |       | h molde (cm): 12,73 |                 |                 |
| W média (%)                                 | 11,3                                       | 11,11                   | 11,06           |       |                     |                 |                 |
| Data de moldagem:                           | 04/01/16                                   |                         |                 |       |                     |                 |                 |
|   | para compressão AXIAL - romper em 11/01/16 |                         |                 |       |                     |                 |                 |
| CP nº                                       | 1  | 2                       | 3               | média |                     |                 |                 |
| M cil (g)                                   | 1.817,47                                   | 1.817,47                | 1.817,47        |       |                     |                 |                 |
| M (CP+cil) (g)                              | 4.000,85                                   | 3.974,80                | 3.949,33        |       |                     |                 |                 |
| M CP (g)                                    | 2.183,38                                   | 2.157,33                | 2.131,86        |       |                     |                 |                 |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,184                                      | 2,158                   | 2,132           |       |                     |                 |                 |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,962                                      | 1,942                   | 1,920           | 1,941 |                     |                 |                 |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,950                                      | 1,950                   | 1,950           |       |                     |                 |                 |
| GC (grau compact %)                         | 101<br>aceitável                           | 100<br>aceitável        | 98<br>aceitável |       |                     |                 |                 |

## APÊNDICE 23 - continuação

## Avaliação do grau de compactação (GC) dos CP de resistência à tração por compressão diametral

| PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL         |  |                         |              |       |                     |              |              |
|---|--|-------------------------|--------------|-------|---------------------|--------------|--------------|
| Traço cimento (%)                           | 6  | diâm. Molde (cm): 5,00  |              |       | h molde (cm): 10,00 |              |              |
| W média (%)                                 | 11,4                                       | 11,67                   | 11,44        |       | 11,18               | 11,03        | 11,32        |
| Data de moldagem:                           | 06/01/16                                   |                         |              |       |                     |              |              |
|   | compressão DIAMETRAL - romper em 13/01/16  |                         |              |       |                     |              |              |
| CP nº                                       | 11   | 12                      | 13           | média | 14                  | 15           | 16           |
| M cil (g)                                   | 649,00                                     | 649,00                  | 649,00       |       | 649,00              | 649,00       | 649,00       |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.069,11                                   | 1.066,92                | 1.055,68     |       | 1.055,06            | 1.047,65     | 1.065,82     |
| M CP (g)                                    | 420,11                                     | 417,92                  | 406,68       |       | 406,06              | 398,65       | 416,82       |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,140                                      | 2,128                   | 2,071        |       | 2,068               | 2,030        | 2,123        |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | <b>1,921</b>                               | <b>1,911</b>            | <b>1,860</b> | 1,898 | <b>1,860</b>        | <b>1,826</b> | <b>1,909</b> |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                                      | 1,960                   | 1,960        |       | 1,960               | 1,960        | 1,960        |
| GC (grau compact %)                         | 98   | 98                      | 95           |       | 95                  | 93           | 97           |
|   | aceitável                                  | aceitável               | rejeitado    |       | rejeitado           | rejeitado    | rejeitado    |
| Traço cimento (%)                           | 6  | diâm. Molde (cm): 5,00  |              |       | h molde (cm): 10,00 |              |              |
| W média (%)                                 | 11,2                                       | 11,05                   | 11,42        |       | 11,59               |              |              |
| Data de moldagem:                           | 06/01/16                                   |                         |              |       |                     |              |              |
|   | compressão DIAMETRAL - romper em 13/01/16  |                         |              |       |                     |              |              |
| CP nº                                       | 17   | 18                      | 19           | média | 20                  |              |              |
| M cil (g)                                   | 649,00                                     | 649,00                  | 649,00       |       | 649,00              |              |              |
| M (CP+cil) (g)                              | 1.060,27                                   | 1.055,55                | 1.052,47     |       | 1.043,99            |              |              |
| M CP (g)                                    | 411,27                                     | 406,55                  | 403,47       |       | 394,99              |              |              |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,095                                      | 2,071                   | 2,055        |       | 2,012               |              |              |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | <b>1,881</b>                               | <b>1,859</b>            | <b>1,845</b> | 1,862 | <b>1,809</b>        |              |              |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,960                                      | 1,960                   | 1,960        |       | 1,960               |              |              |
| GC (grau compact %)                         | 96   | 95                      | 94           |       | 92                  |              |              |
|   | rejeitado                                  | rejeitado               | rejeitado    |       | rejeitado           |              |              |
| Traço cimento (%)                           | 6  | diâm. Molde (cm): 10,00 |              |       | h molde (cm): 12,73 |              |              |
| W média (%)                                 | 11,2                                       | 10,98                   | 10,59        |       |                     |              |              |
| Data de moldagem:                           | 06/01/16                                   |                         |              |       |                     |              |              |
|   | para compressão AXIAL - romper em 13/01/16 |                         |              |       |                     |              |              |
| CP nº                                       | 4  | 5                       | 6            | média |                     |              |              |
| M cil (g)                                   | 1.817,47                                   | 1.817,47                | 1.817,47     |       |                     |              |              |
| M (CP+cil) (g)                              | 4.014,41                                   | 3.995,39                | 3.931,58     |       |                     |              |              |
| M CP (g)                                    | 2.196,94                                   | 2.177,92                | 2.114,11     |       |                     |              |              |
| $\rho_{ap,CP}$ (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,197                                      | 2,178                   | 2,115        |       |                     |              |              |
| $\rho_{d,sc}$ (g/cm <sup>3</sup> )          | <b>1,976</b>                               | <b>1,963</b>            | <b>1,912</b> | 1,950 |                     |              |              |
| $\rho_{d,máx}$ PROCTOR (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,950                                      | 1,950                   | 1,950        |       |                     |              |              |
| GC (grau compact %)                         | 101  | 101                     | 98           |       |                     |              |              |
|   | aceitável                                  | aceitável               | aceitável    |       |                     |              |              |











## APÊNDICE 25 - Resultados dos ensaios de absorção de água e de determinação do índice de vazios e da porosidade

| ABSORÇÃO DE ÁGUA SOLO-CIMENTO (7 dias) |       |                |                  |             |   |             |                    |                                 |  |                 |                     |
|--|-------|----------------|------------------|-------------|---|-------------|--------------------|---------------------------------|--|-----------------|---------------------|
|  |       | d = 5          |                  | h = 10      |   | V = 196,35  |                    | umidade ao sair da câmara úmida |  |                 |                     |
| Cimento (%)                            | CP nº | massas (g)     |                  |             | AA (%)  | observações | M <sub>w</sub> (g) | W (%)                           | P <sub>d,sc</sub> (g/cm <sup>3</sup> ) | e <sub>sc</sub> | n <sub>sc</sub> (%) |
|  |       | M <sub>0</sub> | M <sub>sat</sub> | AA (%)      |   |             |                    |                                 |  |                 |                     |
| 1                                      | 4     | 373,40         | ND               | #####       | ND (não determinado), porque os corpos de prova se desfizeram na água | 424,35      | 13,64              | 1,90                            | 0,40                                   | 28,81           |                     |
|  | 5     | 374,72         | ND               | #####       |   | 425,22      | 13,48              | 1,91                            | 0,40                                   | 28,47           |                     |
|  | 6     | 371,81         | ND               | #####       |   | 423,09      | 13,79              | 1,89                            | 0,41                                   | 29,03           |                     |
|  | média |                | #####            |             |   | média       |                    | <b>13,64</b>                    | <b>1,90</b>                            | <b>0,40</b>     | <b>28,77</b>        |
|  |       | Sd             |                  | #####       |   | Sd          |                    | <b>0,16</b>                     | <b>0,01</b>                            | <b>0,01</b>     | <b>0,28</b>         |
| 3                                      | 10    | 369,63         | 418,35           | 13,18       |   | 414,18      | 12,05              | 1,88                            | 0,42                                   | 29,70           |                     |
|  | 11    | 372,74         | 421,18           | 13,00       |   | 415,04      | 11,35              | 1,90                            | 0,41                                   | 28,85           |                     |
|  | 12    | 368,66         | 417,09           | 13,14       |   | 412,56      | 11,91              | 1,88                            | 0,42                                   | 29,63           |                     |
|  | média |                | <b>13,10</b>     |             |   | média       |                    | <b>11,77</b>                    | <b>1,89</b>                            | <b>0,42</b>     | <b>29,39</b>        |
|  |       | Sd             |                  | <b>0,10</b> |   | Sd          |                    | <b>0,37</b>                     | <b>0,01</b>                            | <b>0,01</b>     | <b>0,47</b>         |
| 6                                      | 16    | 380,99         | 425,34           | 11,64       |   | 425,27      | 11,62              | 1,94                            | 0,38                                   | 27,78           |                     |
|  | 17    | 380,65         | 425,76           | 11,85       |   | 426,49      | 12,04              | 1,94                            | 0,38                                   | 27,34           |                     |
|  | 18    | 378,70         | 423,57           | 11,85       |   | 427,36      | 12,85              | 1,93                            | 0,38                                   | 27,71           |                     |
|  | média |                | <b>11,78</b>     |             |   | média       |                    | <b>12,17</b>                    | <b>1,94</b>                            | <b>0,38</b>     | <b>27,61</b>        |
|  |       | Sd             |                  | <b>0,12</b> |   | Sd          |                    | <b>0,62</b>                     | <b>0,01</b>                            | <b>0,00</b>     | <b>0,24</b>         |
| 10                                     | 22    | 378,53         | 424,61           | 12,17       |   | 423,77      | 11,95              | 1,93                            | 0,40                                   | 28,56           |                     |
|  | 23    | 375,80         | 422,88           | 12,53       |   | 423,18      | 12,61              | 1,91                            | 0,39                                   | 28,26           |                     |
|  | 24    | 375,60         | 422,42           | 12,47       |   | 422,08      | 12,37              | 1,91                            | 0,39                                   | 28,30           |                     |
|  | média |                | <b>12,39</b>     |             |   | média       |                    | <b>12,31</b>                    | <b>1,92</b>                            | <b>0,40</b>     | <b>28,37</b>        |
|  |       | Sd             |                  | <b>0,19</b> |   | Sd          |                    | <b>0,33</b>                     | <b>0,01</b>                            | <b>0,00</b>     | <b>0,16</b>         |
| 15                                     | 28    | 382,52         | 427,09           | 11,65       |   | 420,04      | 9,81               | 1,95                            | 0,39                                   | 28,16           |                     |
|  | 29    | 382,96         | 427,57           | 11,65       |   | 420,99      | 9,93               | 1,95                            | 0,37                                   | 26,90           |                     |
|  | 30    | 379,21         | 424,32           | 11,90       |   | 416,38      | 9,80               | 1,93                            | 0,38                                   | 27,61           |                     |
|  | média |                | <b>11,73</b>     |             |   | média       |                    | <b>9,85</b>                     | <b>1,94</b>                            | <b>0,38</b>     | <b>27,56</b>        |
|  |       | Sd             |                  | <b>0,14</b> |   | Sd          |                    | <b>0,07</b>                     | <b>0,01</b>                            | <b>0,01</b>     | <b>0,63</b>         |
|  |       |                |                  |             |   | MÉDIA       |                    |                                 | <b>0,40</b>                            | <b>28,34</b>    |                     |
|  |       |                |                  |             |   | Sd          |                    |                                 | <b>0,02</b>                            | <b>0,78</b>     |                     |

| ENSAIO COM O TRAÇO ESCOLHIDO |       |                |                  |                      |         |        |              |             |              | e <sub>sc</sub> | n <sub>sc</sub> |      |
|------------------------------|-------|----------------|------------------|----------------------|---------|--------|--------------|-------------|--------------|-----------------|-----------------|------|
|                              |       | M <sub>0</sub> | M <sub>sat</sub> | M <sub>sub</sub> (g) | NBR9778 |        |              | proposta    | proposta     |                 |                 |      |
|                              |       |                |                  |                      |         |        |              |             |              |                 |                 |      |
| 6                            | 11    | 377,44         | 425,56           | 12,75                | 227,49  | 421,07 | 11,56        | 1,92        | 24,29        | 0,41            | 28,84           |      |
|                              | 12    | 375,84         | 424,59           | 12,97                | 226,59  | 418,89 | 11,45        | 1,91        | 24,62        | 0,41            | 29,21           |      |
|                              | 13    | 366,16         | 417,27           | 13,96                | 219,09  | 413,81 | 13,01        | 1,86        | 25,79        | 0,45            | 31,10           |      |
|                              | média |                | <b>13,23</b>     |                      | média   |        | <b>12,01</b> | <b>1,90</b> | <b>24,90</b> | 0,42            | 29,72           |      |
|                              |       | Sd             |                  | <b>0,64</b>          |         | Sd     |              | <b>0,87</b> | <b>0,03</b>  | <b>0,79</b>     | 0,02            | 1,21 |













## APÊNDICE 29

Resultados do ensaio de avaliação da variação da massa específica aparente seca ao longo das camadas, com corpos de prova **CP 5x10**

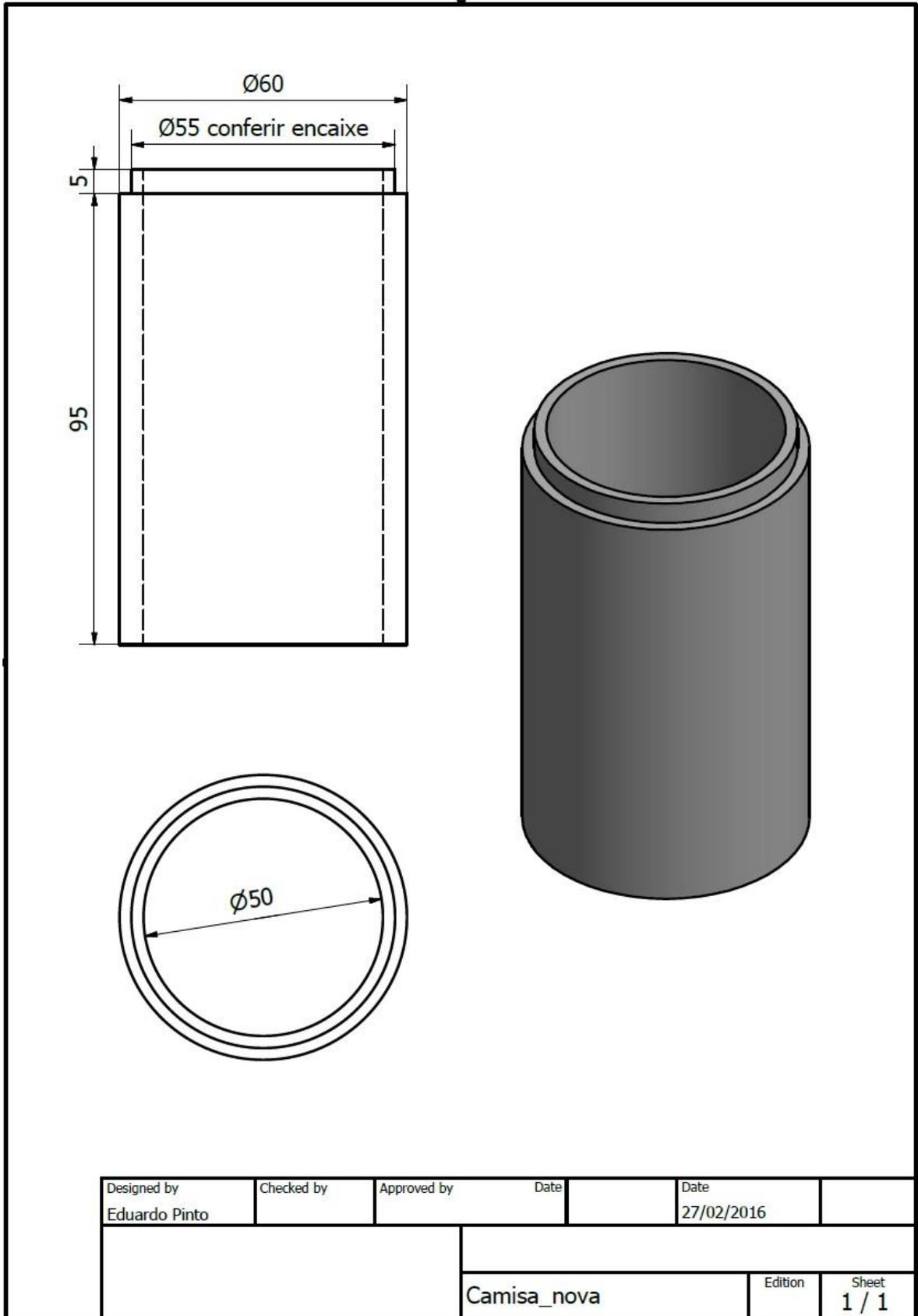
### Variação da massa específica aparente seca, ao longo da altura do CP

| CP n <sup>o</sup> | camadas        | d<br>(mm) | h<br>(mm) |       | V<br>(cm <sup>3</sup> ) | M <sub>0</sub><br>(g) | P <sub>d,cam</sub><br>(g/cm <sup>3</sup> ) | P <sub>d,sc</sub><br>(g/cm <sup>3</sup> )<br>(a) |    |
|-------------------|----------------|-----------|-----------|-------|-------------------------|-----------------------|--|--|----|
|                   |                |           | h1        | h2    |                         |                       |  |  |    |
|                   |                |           | d2        | h3    |                         |                       |  |  | h4 |
|                   |                |           | dm        | hm    |                         |                       |  |  |    |
| 1                 | 3 <sup>a</sup> | 50,18     | 34,06     | 33,83 | 67,574                  | 131,43                | 1,945                                      | 1,957  |    |
|                   |                | 50,27     | 34,17     | 34,37 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,23     | 34,11     |       |                         |                       |  |  |    |
|                   | 2 <sup>a</sup> | 50,14     | 33,03     | 32,49 | 64,515                  | 124,38                | 1,928                                      |  |    |
|                   |                | 50,30     | 32,05     | 32,71 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,22     | 32,57     |       |                         |                       |  |  |    |
|                   | 1 <sup>a</sup> | 50,04     | 29,55     | 29,22 | 58,034                  | 112,48                | 1,938                                      |  |    |
|                   |                | 50,32     | 29,22     | 29,39 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,18     | 29,35     |       |                         |                       |  |  |    |
| 1,937             |                |           |           |       |                         |                       |  |  |    |
| 2                 | 3 <sup>a</sup> | 50,19     | 30,01     | 30,39 | 59,643                  | 116,34                | 1,951                                      | 1,949  |    |
|                   |                | 50,13     | 30,11     | 30,22 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,16     | 30,18     |       |                         |                       |  |  |    |
|                   | 2 <sup>a</sup> | 50,17     | 32,96     | 32,77 | 65,476                  | 126,66                | 1,934                                      |  |    |
|                   |                | 50,16     | 33,26     | 33,52 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,17     | 33,13     |       |                         |                       |  |  |    |
|                   | 1 <sup>a</sup> | 50,05     | 31,75     | 31,95 | 62,142                  | 119,38                | 1,921                                      |  |    |
|                   |                | 50,09     | 31,44     | 31,10 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,07     | 31,56     |       |                         |                       |  |  |    |
| 1,935             |                |           |           |       |                         |                       |  |  |    |
| 3                 | 3 <sup>a</sup> | 50,08     | 33,42     | 33,60 | 65,723                  | 127,95                | 1,947                                      | 1,935  |    |
|                   |                | 50,10     | 33,37     | 33,02 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,09     | 33,35     |       |                         |                       |  |  |    |
|                   | 2 <sup>a</sup> | 50,05     | 30,58     | 30,11 | 60,158                  | 115,64                | 1,922                                      |  |    |
|                   |                | 50,09     | 30,47     | 31,05 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,07     | 30,55     |       |                         |                       |  |  |    |
|                   | 1 <sup>a</sup> | 50,04     | 31,22     | 30,95 | 62,001                  | 118,16                | 1,906                                      |  |    |
|                   |                | 50,09     | 32,26     | 31,55 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,07     | 31,50     |       |                         |                       |  |  |    |
| 1,925             |                |           |           |       |                         |                       |  |  |    |
| 4                 | 3 <sup>a</sup> | 50,12     | 32,10     | 31,36 | 62,951                  | 121,20                | 1,925                                      | 1,927  |    |
|                   |                | 50,12     | 31,67     | 32,50 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,12     | 31,91     |       |                         |                       |  |  |    |
|                   | 2 <sup>a</sup> | 50,16     | 30,56     | 30,48 | 60,869                  | 116,14                | 1,908                                      |  |    |
|                   |                | 50,10     | 31,12     | 31,20 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,13     | 30,84     |       |                         |                       |  |  |    |
|                   | 1 <sup>a</sup> | 50,04     | 30,34     | 30,04 | 59,595                  | 114,50                | 1,921                                      |  |    |
|                   |                | 50,09     | 30,14     | 30,57 |                         |                       |  |  |    |
|                   |                | 50,07     | 30,27     |       |                         |                       |  |  |    |
| 1,918             |                |           |           |       |                         |                       |  |  |    |

(a) Resultados obtidos no ensaio de compactação, do corpo de prova como um todo

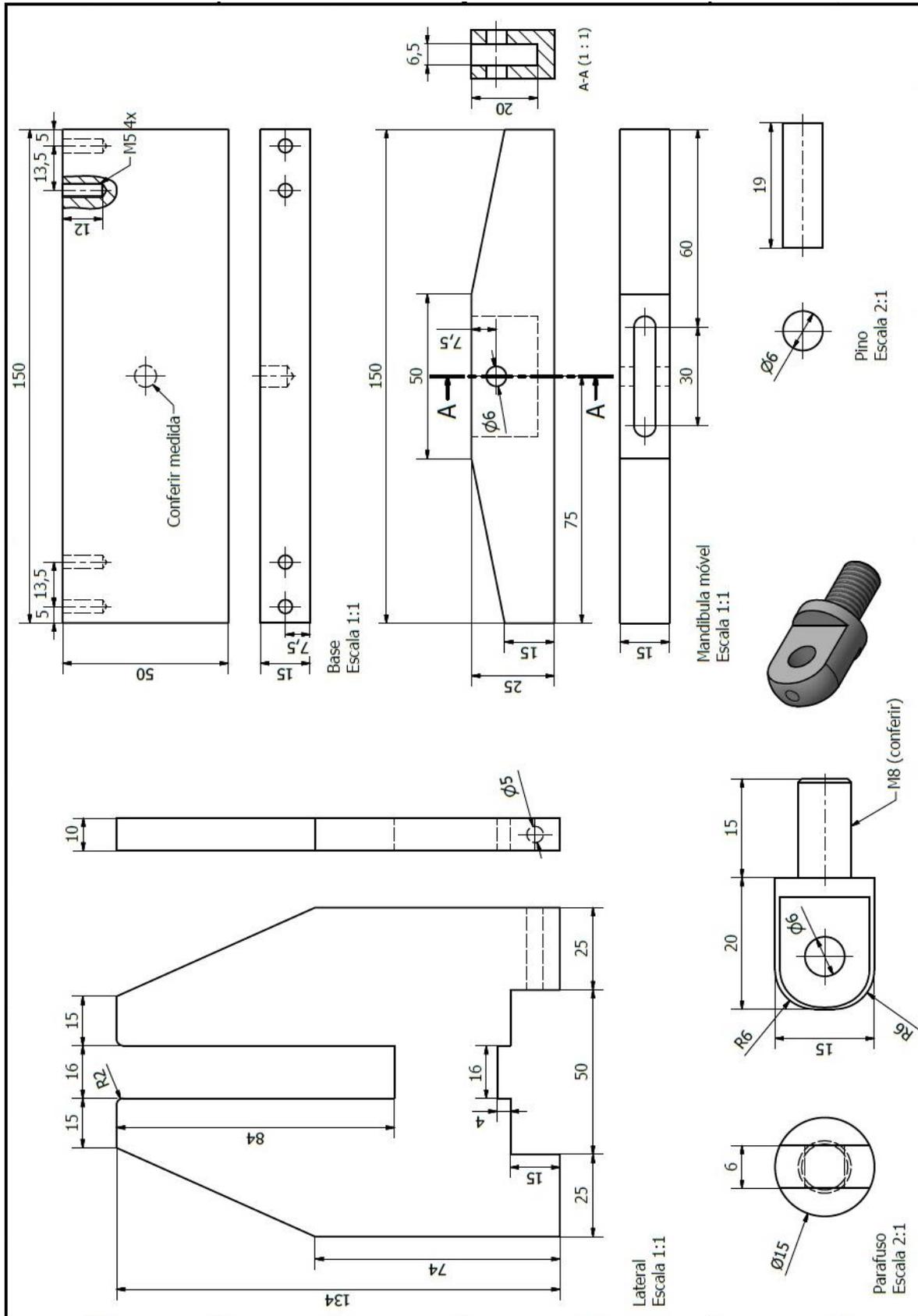
**APÊNDICE 30**

Projeto da nova camisa para moldagem dos corpos de prova **CP 5x10**



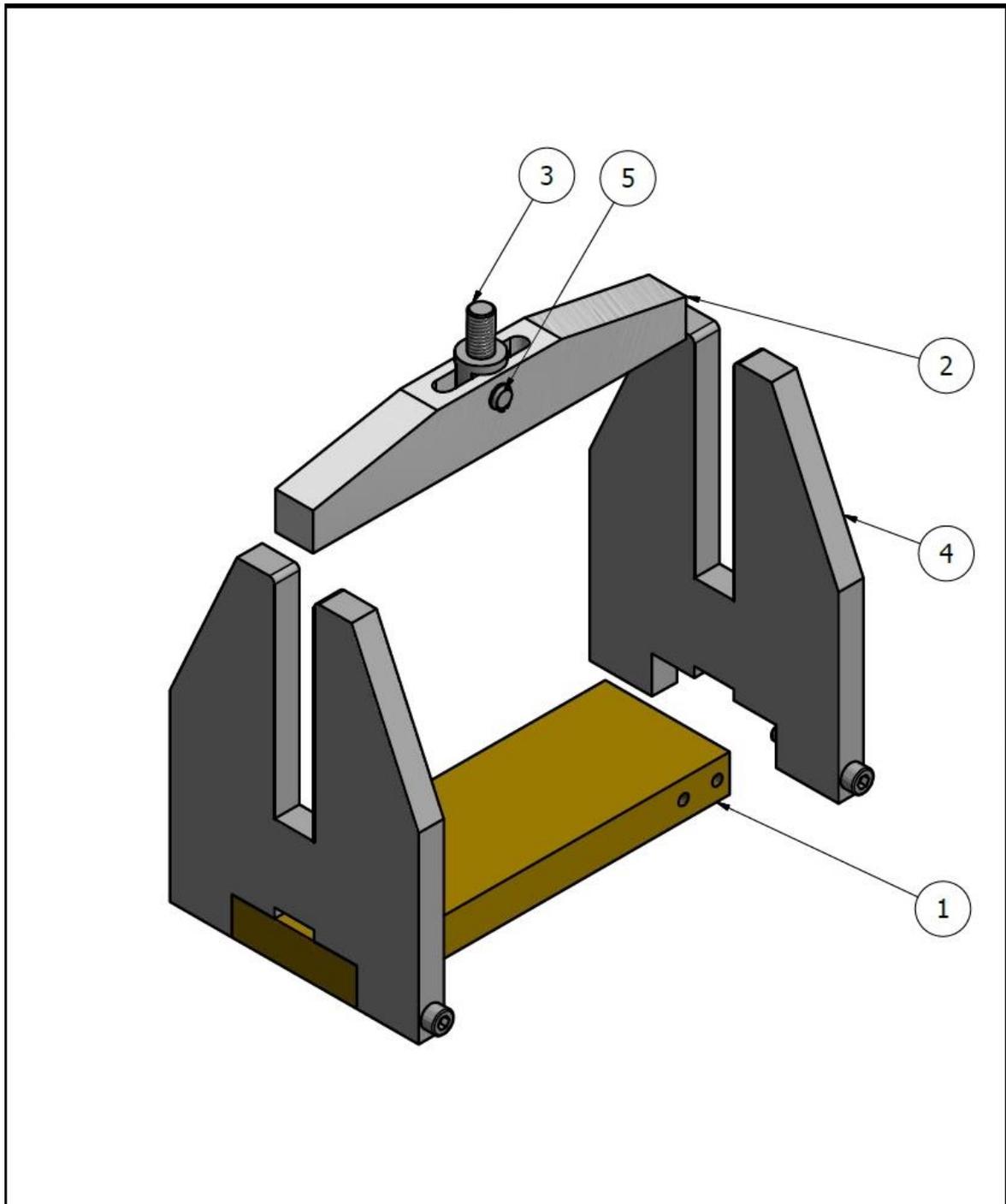
**APÊNDICE 31**

Projeto do dispositivo para ensaio de compressão diametral



## APÊNDICE 31 - continuação

Projeto do dispositivo para ensaio de compressão diametral - montagem



LISTA DE PEÇAS

| ITEM | QUANT. | NOME            | MATERIAL                 |
|------|--------|-----------------|--------------------------|
| 1    | 1      | Base            | 1010/20 - 155 x 55 x 16  |
| 2    | 1      | Mandibula movel | 1010/20 - 155 x 30 x 16  |
| 3    | 1      | parafuso        | 1010/20 - Ø3/4 x 40      |
| 4    | 2      | Lateral         | 1010/20 - 140 x 105 x 12 |
| 5    | 1      | Pino            | 1010/20 - Ø6,5 x 20      |















**ANEXOS**



## ANEXO A - Reprodução do item "8.2 Resistência característica", da norma NBR 15812-2 (ABNT, 2010)

### 8.2 Resistência característica

A resistência característica do elemento de alvenaria obtida nos ensaios deve ser igual ou superior à resistência característica especificada pelo projetista estrutural.

Para amostragem menor do que 20 e maior do que seis corpos-de-prova a resistência característica é o valor calculada da seguinte forma:

$$f_{ek,est} = 2 \left[ \frac{f_{e(1)} + f_{e(2)} + \dots + f_{e(i-1)}}{i-1} \right] - f_{ei}$$

Sendo:

$i = n/2$ , se  $n$  for par;

$i = (n-1)/2$ , se  $n$  for ímpar

O valor do  $f_{ek}$  não deve ser inferior a  $\emptyset \times f_{e(1)}$ , sendo o valor de  $\emptyset$  indicado na Tabela 2.

O valor do  $f_{ek}$  não deve ser superior a  $0,85 \times f_{em}$ .

Onde:

$f_{ek,est}$  é a resistência característica estimada da amostra, expressa em megapascals (MPa);

$f_{e(1)}, f_{e(2)}, \dots, f_{ei}$  são os valores de resistência à compressão individual dos corpos-de-prova da amostra, ordenados crescentemente;

$f_{em}$  a média de todos os resultados da amostra;

$n$  é o número de corpos-de-prova da amostra.

Tabela 2 — Valores de  $\emptyset$  em função da quantidade de elementos de alvenaria

| Nº de elementos | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16 e 17 | 18 e 19 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|---------|
| $\emptyset$     | 0,80 | 0,84 | 0,87 | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1,00 | 1,01 | 1,02    | 1,04    |

Para ensaios de parede com  $n$  menor do que 6, a resistência característica deve ser calculada por:

$$f_{pak} = \emptyset \cdot f_{pa(1)}$$

Para ensaios com  $n$  maior ou igual a 20, a resistência característica deve ser calculada por:

$$f_{ek} = f_{em} - 1,65 S_n$$

Onde:

$f_{em}$  é a resistência média dos exemplares;

$S_n$  é o desvio-padrão da amostra.