



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

VICTOR ANTONIO CANCIAN

**A INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES, DA POROSIDADE E  
DO TEMPO PARA A COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO-  
CIMENTO NO DESEMPENHO MECÂNICO PARA BASE DE  
PAVIMENTO**

---

Londrina  
2017

VICTOR ANTONIO CANCIAN

**A INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES, DA POROSIDADE E  
DO TEMPO PARA A COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO-  
CIMENTO NO DESEMPENHO MECÂNICO PARA BASE DE  
PAVIMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação, em Engenharia de Edificações e Saneamento, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Raquel Souza Teixeira

Londrina  
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Cancian, Victor Antonio.

A influência dos componentes, da porosidade e do tempo para a compactação da mistura solo-cimento no desempenho mecânico para base de pavimento / Victor Antonio Cancian. - Londrina, 2017.  
172 f. : il.

Orientador: Raquel Souza Teixeira.

Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2017.

Inclui bibliografia.

1. Teor de cimento - Tese. 2. Teor de umidade - Tese. 3. Energia de compactação - Tese. 4. Tempo para a compactação - Tese. I. Teixeira, Raquel Souza. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

VICTOR ANTONIO CANCIAN

**A INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES, DA POROSIDADE E DO  
TEMPO PARA A COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO NO  
DESEMPENHO MECÂNICO PARA BASE DE PAVIMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação, em Engenharia de Edificações e Saneamento, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Profa. Dra. Raquel Souza Teixeira  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Profa. Dra. Berenice Martins Toralles  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Profa. Dra. Heliana Barbosa Fontenele  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Profa. Dra. Prepredigna Delmiro Elga Almeida  
da Silva  
Fundação Educacional Souza Marques - FESM

Londrina, 13 de Janeiro de 2017.

*Dedico este trabalho a DEUS, por tudo e pela família maravilhosa que tenho. Dedico este trabalho aos meus pais, Solange e Maximiano Cancian, aos meus irmãos Max e Thiago, aos meus sobrinhos Conrado e Alice, e a minha namorada Lorena, pelo incentivo e principalmente, pelas oportunidades a mim proporcionadas.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Deus pela minha vida e por mais esta jornada.

A minha orientadora e amiga, Profa. Dra. Raquel Souza Teixeira, pela sua dedicação, paciência e por seus esforços para a realização deste trabalho.

A todos os professores que de alguma forma contribuíram para esse trabalho e para minha formação pós-acadêmica. E aos membros participantes da banca de defesa desta dissertação.

Aos amigos de laboratório Vitor Hugo, Tamires, Lucas Rossato, Renan Zanin, André Alves, Bianca Lima e Vinicius Budny.

A todos os familiares e amigos que sempre torceram por mim e me ajudaram na pesquisa.

A Todos o Meu Muito Obrigado.

*“A tarefa não é tanto naquilo que ninguém viu,  
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre  
aquilo que todo mundo vê”.*

*Arthur Schopenhauer*

CANCIAN, Victor Antonio. **A influência dos componentes, da porosidade e do tempo para a compactação da mistura solo-cimento no desempenho mecânico para base de pavimento.** 2017. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

## RESUMO

A falta de conhecimento sobre a influência dos componentes, da porosidade e do tempo para a compactação da mistura solo-cimento no desempenho mecânico, pode resultar em defeitos nos pavimentos rodoviários. Este trabalho tem o intuito de agregar conhecimento para projetos e execuções com solo-cimento, em pavimentação, e auxiliar na preparação de normas, através da avaliação: da influência do teor de cimento, do teor de umidade, da porosidade, da energia e do tempo para a compactação da mistura solo-cimento sobre a resistência à compressão simples (RCS). O solo arenoso utilizado é proveniente da cidade de Tuneiras do Oeste no estado do Paraná. Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização física, compactação e Índice de Suporte Califórnia. Para as misturas solo-cimento com teores de 8, 9 e 10 % de cimento em relação à massa de solo seca, foram obtidas as curvas de compactação. Foram realizadas para cada mistura de solo-cimento 3 baterias. Na primeira bateria (A) foi utilizada a umidade ótima ( $\omega_{ótima}$ ) e energia Normal, na segunda (B) usou-se  $\omega_{ótima} + 1\%$  e energia Normal e na terceira (C) foi utilizada a  $\omega_{ótima} + 1\%$  e energia de compactação alterada, a fim de verificar a influência da  $\omega$  e da energia de compactação. Para cada bateria as compactações ocorreram em 10 intervalos de tempo, entre a homogeneização e sua compactação, variando de 0 min a 6 hs, com o intuito de verificar a influência do tempo para a compactação na RCS das misturas. Os resultados obtidos para o solo arenoso (A-2-4) e estabilizado com 8, 9 e 10 % de cimento mostraram que o aumento no teor de cimento acarreta no aumento da  $\omega_{ótima}$  e da massa específica seca máxima ( $\gamma_{dmax}$ ) das misturas. Verificou-se que o aumento no teor de cimento provoca o aumento da RCS e acarreta no aumento do tempo máximo para a compactação da mistura. Quando utilizado o valor da  $\omega_{ótima} + 1\%$ , observou-se aumento da RCS e do tempo máximo para a compactação em relação à utilização da  $\omega_{ótima}$ . A energia de compactação ao ser elevada, reduziu a porosidade, aumentou a RCS e o tempo máximo para a compactação da mistura. Em todas as baterias independente do teor de cimento utilizado, o aumento do tempo para a compactação da mistura acarretou na diminuição da RCS. O maior tempo para a compactação de 2 hs e 45 min, que atendeu a RCS mínima de 21 kg/cm<sup>2</sup> foi para a mistura de 10 % de cimento, compactada na  $\omega_{ótima} + 1\%$ , usando a energia de compactação alterada. Conclui-se deste trabalho que a RCS eleva-se com: o aumento do teor de cimento, diminuição da porosidade e aumento da energia de compactação e a RCS diminui com decréscimo da umidade e o aumento do tempo para a compactação da mistura. O tempo máximo para a compactação da mistura é limitado, variando conforme o teor de cimento, teor de umidade e energia de compactação.

**Palavras-chave:** Teor de cimento. Teor de umidade. Porosidade. Energia de compactação. Tempo para a compactação. Base de pavimento rodoviário.

CANCIAN, Victor Antonio. **The influence of the components, the porosity and the time for the compaction of the soil-cement mixture in the mechanical performance for base of pavement.** 2017. 179 f. Dissertation (Master in Buildings and Sanitation Engineering) – State University of Londrina, Londrina, 2017.

## ABSTRACT

The low knowledge about the influence of the components, the porosity and the time to compaction of the soil-cement mixture on mechanical performance can result in road pavement defects. This work aims to add knowledge to projects and projects with soil-cement, in paving, and to help in the preparation of norms, through the evaluation of: the influence of cement content, moisture content, porosity, energy and time for compaction of the soil-cement blend on the simple compression strength (SCS) in soil-cement mixtures. The sandy soil used comes from the city of Tuneiras do Oeste in the state of Paraná. Initially, physical characterization, compaction and California Support Index tests were performed. For soil-cement mixtures with 8, 9 and 10 % cement content in relation to the dry soil mass, the compaction curves were obtained. For each soil-cement mix 3 batches were made. In the first battery (A) was used the optimal humidity ( $\omega_{optimum}$ ) and Normal energy, in the second (B) was used  $\omega_{optimum} + 1\%$  and Normal energy and in the third (C) was used the  $\omega_{optimum} + 1\%$  and altered compaction energy in order to verify the influence of  $\omega$  and compaction energy. For each battery the compacts occurred in 10 time intervals, between the homogenization and its compaction, varying from 0 min to 6 hours, in order to verify the influence of the time for the compaction in the SCS of the mixtures. The results obtained for sandy soil and stabilized with 8, 9 and 10 % of cement showed that the increase in cement content leads to increase of the optimum and the maximum specific dry mass ( $\gamma_{dmax}$ ) of the mixtures. It was verified that the increase in the cement content causes the increase of the SCS and causes increase in the maximum time for the compaction of the mixture. When the value of  $\omega_{optimum} + 1\%$  was used, it was observed an increase in SCS and the maximum time for compaction in relation to the use of  $\omega_{optimum}$ . The compaction energy on being high reduced the porosity, increased the SCS and the maximum time for compaction of the mixture. In all the batteries, regardless of the cement content used, the increase in the time for compaction of the mixture led to a decrease in SCS. The longest time for compaction of 2 hs and 45 min, which met SCS minimum of 21 kg/cm<sup>2</sup> was for the mixture of 10% cement, compacted at  $\omega_{optimum} + 1\%$ , using the altered compaction energy. It is concluded from this work that the SCS increases with: the increase of the cement content, decrease of the porosity and increase of the compaction energy and the SCS decreases with decreasing of the humidity and the increase of the time for the compaction of the mixture. The maximum time for compaction of the mixture is limited, varying according to the cement content, moisture content and compaction energy.

**Key Words:** Cement content. Moisture content. Porosity. Compaction energy. Time for compaction. Base of road pavement.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> -	Ábaco da classificação MCT .....	35
<b>Figura 2</b> -	Compactação de solo.....	39
<b>Figura 3</b> -	Usina de solos e mistura em pista .....	51
<b>Figura 4</b> -	Teor de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento .....	55
<b>Figura 5</b> -	Teor de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento .....	56
<b>Figura 6</b> -	Curvas de compactação para diferentes teores de cimento .....	57
<b>Figura 7</b> -	Teor de umidade <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento .....	59
<b>Figura 8</b> -	Teor de umidade <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento .....	60
<b>Figura 9</b> -	Porosidade <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento .....	61
<b>Figura 10</b> -	Porosidade <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento .....	62
<b>Figura 11</b> -	Absorção de água <i>versus</i> resistência à compressão simples mistura solo-cimento .....	62
<b>Figura 12</b> -	Porosidade/Consumo de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento.....	63
<b>Figura 13</b> -	Massa específica seca e umidade para diferentes energias da compactação aplicadas na mistura solo-cimento.....	65
<b>Figura 14</b> -	Tempo de cura <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento compactada.....	66
<b>Figura 15</b> -	Tempo para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples da mistura solo-cimento .....	68
<b>Figura 16</b> -	Mapa geológico do Estado do Paraná .....	73
<b>Figura 17</b> -	Local de coleta do solo.....	75
<b>Figura 18</b> -	Provetas graduadas com amostras.....	77
<b>Figura 19</b> -	Corpo de prova no interior do tanque com água .....	78
<b>Figura 20</b> -	Materiais utilizados e homogeneização da mistura.....	79

<b>Figura 21</b> - Corpo de prova de solo-cimento após a compactação, massa mensurada e equipamento de extrusão .....	80
<b>Figura 22</b> - Corpos de prova imersos em tanque com água.....	86
<b>Figura 23</b> - Determinação das dimensões do corpo de prova de solo-cimento após 4 horas de imersão em água .....	86
<b>Figura 24</b> - Prensa de compressão simples .....	87
<b>Figura 25</b> - Corpos de prova de solo-cimento rompidos aos sete dias de cura.....	105

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Curvas granulométricas do solo - com e sem defloculante .....	89
<b>Gráfico 2</b> - Curvas de compactação do solo .....	92
<b>Gráfico 3</b> - Curvas de compactação da mistura solo-cimento - 8 % de cimento.....	95
<b>Gráfico 4</b> - Curvas de compactação da mistura solo-cimento - 9 % de cimento.....	95
<b>Gráfico 5</b> - Curvas de compactação da mistura solo-cimento - 10 % de cimento.....	96
<b>Gráfico 6</b> - Teor de umidade <i>versus</i> resistência à compressão simples aos 7 dias de cura dos corpos de prova das curvas de compactação - 8 % de cimento .....	97
<b>Gráfico 7</b> - Teor de umidade <i>versus</i> resistência à compressão simples aos 7 dias de cura dos corpos de prova das curvas de compactação - 9 % de cimento .....	98
<b>Gráfico 8</b> - Teor de umidade <i>versus</i> resistência à compressão simples aos 7 dias de cura dos corpos de prova das curvas de compactação - 10 % de cimento .....	98
<b>Gráfico 9</b> - Tempo médio para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples média das misturas solo-cimento com teores de 8, 9 e 10 % de cimento com umidade ótima e energia normal .....	104
<b>Gráfico 10</b> - Tempo médio para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples média das misturas solo-cimento com teores de 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal. ....	110
<b>Gráfico 11</b> - Tempo médio para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples média das misturas solo-cimento com teores de 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada .....	116
<b>Gráfico 12</b> - Teor de umidade ótima média <i>versus</i> massa específica seca máxima média das misturas solo-cimento .....	118

<b>Gráfico 13</b> - Teor de cimento <i>versus</i> massa específica seca máxima média das misturas solo-cimento.....	118
<b>Gráfico 14</b> - Teor de cimento <i>versus</i> teor de umidade ótima média das misturas solo-cimento .....	119
<b>Gráfico 15</b> - Teor de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples média do solo-cimento, quando utilizado teor de umidade ótima e energia normal .....	121
<b>Gráfico 16</b> - Teor de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples média do solo-cimento, quando utilizado teor de umidade ótima + 1 % e energia normal .....	122
<b>Gráfico 17</b> - Teor de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples média do solo-cimento, quando utilizado teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada .....	123
<b>Gráfico 18</b> - Teor de umidade média <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada .....	126
<b>Gráfico 19</b> - Porosidade média <i>versus</i> absorção de água média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação .....	129
<b>Gráfico 20</b> - Absorção de água média após 4 horas de imersão <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação.....	130
<b>Gráfico 21</b> - Porosidade média <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação.....	131
<b>Gráfico 22</b> - Porosidade média <i>versus</i> absorção de água média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação .....	132

<b>Gráfico 23</b> - Absorção de água média após 4 horas de imersão <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação .....	133
<b>Gráfico 24</b> - Porosidade média <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação.....	134
<b>Gráfico 25</b> - Porosidade média <i>versus</i> absorção de água média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação.....	136
<b>Gráfico 26</b> - Absorção de água média após 4 horas de imersão <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação .....	137
<b>Gráfico 27</b> - Porosidade média <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação.....	138
<b>Gráfico 28</b> - Tempo médio para a compactação da mistura <i>versus</i> porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal na compactação.....	139
<b>Gráfico 29</b> - Tempo médio para a compactação da mistura <i>versus</i> porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação .....	140
<b>Gráfico 30</b> - Tempo médio para a compactação da mistura <i>versus</i> porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação .....	141
<b>Gráfico 31</b> - Resistência à compressão simples <i>versus</i> teor de cimento <i>versus</i> massa específica seca máxima dos corpos de prova das misturas solo-cimento das curvas de compactação.....	142

<b>Gráfico 32</b> - Fator $V_v/V_{cim}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima e energia normal .....	144
<b>Gráfico 33</b> - Fator $V_v/V_{cim}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal .....	145
<b>Gráfico 34</b> - Fator $V_v/V_{cim}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada .....	147
<b>Gráfico 35</b> - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 6 % e teor de umidade ótima + 1 % .....	149
<b>Gráfico 36</b> - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 7 % e teor de umidade ótima + 1 % .....	149
<b>Gráfico 37</b> - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 8 % e teor de umidade ótima + 1 % .....	150
<b>Gráfico 38</b> - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 9 % e teor de umidade ótima + 1 % .....	150
<b>Gráfico 39</b> - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 10 % e teor de umidade ótima + 1 % .....	151
<b>Gráfico 40</b> - Tempo máximo para a compactação da mistura solo-cimento .....	153
<b>Gráfico 41</b> - Tempo médio para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das 3 baterias realizadas com teor de cimento de 8 % .....	155
<b>Gráfico 42</b> - Tempo médio para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das 3 baterias realizadas com teor de cimento de 9 % .....	156

**Gráfico 43** - Tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das 3 baterias realizadas com teor de cimento de 10 % ..... 157

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Nomenclatura das frações granulométricas dos solos segundo a NBR 6502/1995 e manual de pavimentação DNIT (2006) .....	32
<b>Quadro 2</b> - Classificação de solo em relação ao índice de plasticidade.....	33
<b>Quadro 3</b> - Classificação AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials.....	34
<b>Quadro 4</b> - Faixas granulométricas utilizadas na compactação para pavimentação.....	40
<b>Quadro 5</b> - Teor de cimento sugerido para ensaio de compactação de solo-cimento (NBR 12253/2012).....	46
<b>Quadro 6</b> - Granulometria do solo a ser utilizado na mistura solo-cimento - DNIT-ES 143/2010.....	50
<b>Quadro 7</b> - Resistência à compressão simples em função da energia de compactação da mistura .....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> -	Especificações técnicas do cimento utilizado (NBR 5736/1991).....	72
<b>Tabela 2</b> -	Ensaio de caracterização física do solo .....	76
<b>Tabela 3</b> -	Ensaio complementares e classificação do solo .....	77
<b>Tabela 4</b> -	Ensaio de compactação das misturas solo-cimento.....	79
<b>Tabela 5</b> -	Baterias de ensaios e compactações.....	83
<b>Tabela 6</b> -	Limites de consistência, índice de plasticidade médios do solo, e limites da DNIT-ES 143/2010.....	89
<b>Tabela 7</b> -	Composição granulométrica segundo a NBR 6502/1995 para classificação textual geotécnica .....	90
<b>Tabela 8</b> -	Composição granulométrica do solo e especificação do DNIT- ES 143/2010 .....	91
<b>Tabela 9</b> -	Massa específica seca máxima e teor de umidade ótima do solo.....	92
<b>Tabela 10</b> -	Resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia e expansão.....	93
<b>Tabela 11</b> -	Valores para a classificação do solo pela AASHTO.....	93
<b>Tabela 12</b> -	Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização física do solo, compactação, Índice de Suporte Califórnia e classificação segundo a AASHTO.....	94
<b>Tabela 13</b> -	Massa específica seca máxima e teor de umidade ótima das misturas solo-cimento e estudo estatístico dos resultados .....	96
<b>Tabela 14</b> -	Resultados do teor de umidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico .....	100
<b>Tabela 15</b> -	Resultados de massa específica seca dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico .....	101

<b>Tabela 16</b> - Resultados de porosidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico .....	102
<b>Tabela 17</b> - Resultados de absorção de água após 4 horas de imersão dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico.....	102
<b>Tabela 18</b> - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico .....	103
<b>Tabela 19</b> - Resultados do teor de umidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico .....	106
<b>Tabela 20</b> - Resultados de massa específica seca dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico .....	107
<b>Tabela 21</b> - Resultados de porosidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico .....	108
<b>Tabela 22</b> - Resultados de absorção de água após 4 horas de imersão dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico .....	108
<b>Tabela 23</b> - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico .....	109

<b>Tabela 24</b> - Resultados do teor de umidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico .....	111
<b>Tabela 25</b> - Resultados de massa específica seca dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico .....	112
<b>Tabela 26</b> - Resultados de porosidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico .....	113
<b>Tabela 27</b> - Resultados de absorção de água após 4 horas de imersão dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico .....	114
<b>Tabela 28</b> - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico.....	115
<b>Tabela 29</b> - Massa específica seca máxima média e teor de umidade ótima média obtidas das curvas de compactação das misturas de solo-cimento e solo natural .....	117
<b>Tabela 30</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do teor de cimento <i>versus</i> a resistência à compressão simples média de cada tempo para a compactação das misturas solo-cimento com teor de umidade ótima e energia normal .....	122
<b>Tabela 31</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do teor de cimento <i>versus</i> a resistência à compressão simples média de cada tempo para a compactação das misturas solo-cimento com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal.....	123

<b>Tabela 32</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do teor de cimento <i>versus</i> a resistência à compressão simples média de cada tempo para a compactação das misturas solo-cimento com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada.....	124
<b>Tabela 33</b> - Diferença de resistência à compressão simples média dos tempos de 0 e 180 minutos .....	124
<b>Tabela 34</b> - Equações das linhas de tendência e correlações para o teor de umidade média <i>versus</i> a resistência à compressão simples média aos 7 dias de cura dos ensaios com 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento.....	126
<b>Tabela 35</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade média <i>versus</i> a absorção média após 4 horas de imersão dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação .....	129
<b>Tabela 36</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da absorção média após 4 horas de imersão <i>versus</i> a resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação .....	130
<b>Tabela 37</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade média <i>versus</i> a resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação .....	131
<b>Tabela 38</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade <i>versus</i> a absorção média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação.....	133
<b>Tabela 39</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da absorção média após 4 horas de imersão <i>versus</i> a resistência à compressão simples dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação .....	134

<b>Tabela 40</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade média <i>versus</i> a resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação .....	135
<b>Tabela 41</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade média <i>versus</i> a absorção de água média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação .....	136
<b>Tabela 42</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da absorção média após 4 horas de imersão <i>versus</i> a resistência à compressão simples dos corpos de prova dos ensaios de laboratório com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação .....	137
<b>Tabela 43</b> - Equações das linhas de tendência e correlações da absorção média após 4 horas de imersão <i>versus</i> a resistência à compressão simples dos corpos de prova dos ensaios de laboratório com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação .....	138
<b>Tabela 44</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo para a compactação <i>versus</i> a porosidade dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação .....	140
<b>Tabela 45</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo para a compactação <i>versus</i> a porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação .....	140
<b>Tabela 46</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo para a compactação <i>versus</i> a porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação .....	141

<b>Tabela 47</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do $V_v/V_{cim}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima e energia normal.....	145
<b>Tabela 48</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do $V_v/V_{cim}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal.....	146
<b>Tabela 49</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do $V_v/V_{cim}$ <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada.....	147
<b>Tabela 50</b> - Ganho de tempo devido ao aumento da energia para a compactação.....	151
<b>Tabela 51</b> - Ganho de tempo devido ao aumento de 1 % na umidade e aumento da energia para a compactação.....	153
<b>Tabela 52</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo médio para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das 3 baterias com 8 % de cimento .....	156
<b>Tabela 53</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo médio para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das 3 baterias com 9 % de cimento .....	157
<b>Tabela 54</b> - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo médio para a compactação <i>versus</i> resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das 3 baterias com 10 % de cimento .....	157

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highways and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Teor de Cimento
C.B.R.	Califórnia Bearing Ratio
CP II-Z	Cimento Portland Composto com Pozolana
COPPE	Coordenadoria de Programas de Pós-Graduação em Engenharia
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ES	Especificação de Serviço
EUA	Estados Unidos da América
IP	Índice de Plasticidade
I.S.C.	Índice de Suporte Califórnia
LA`	Areia Laterítica
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MCT	Miniatura Compactada Tropical
ME	Método de Ensaio
NBR	Norma Brasileira
PCA	Portland Cement Association
PNV	Plano Nacional de Viação
RCS	Resistência à Compressão Simples
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Estado do Paraná
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Vv/Vcim	Volume de vazios/Volume de cimento (fator)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta\omega$	Desvio do teor de umidade
$\gamma$	Massa ou densidade específica natural
$\gamma_d$	Massa ou densidade específica seca
$\gamma_{dmax}$	Massa ou densidade específica seca máxima
abs	Absorção de água média após 4 horas de imersão
e	Índice de Vazios
GC	Grau de compactação
g	Gramas
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
K	Constante do anel
kg	Quilograma
kg/cm <sup>2</sup>	Quilograma por centímetro quadrado
km	Quilômetro
min	Minutos
MPa	Mega Pascal
n	Porosidade
$\omega$	Teor de umidade
$\omega_{ótima}$	Teor de umidade ótima ou umidade ótima

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>31</b>
2.1	CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS .....	31
2.1.1	Granulometria.....	31
2.1.2	Limites de Consistência ou Limites de Atterberg.....	32
2.2	SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO .....	33
2.3	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....	36
2.3.1	Definição e Tipos de Estabilização de Solos.....	36
2.3.1.1	Estabilização granulométrica.....	37
2.3.1.2	Estabilização química.....	37
2.3.1.3	Estabilização mecânica .....	39
2.4	SOLO-CIMENTO.....	41
2.4.1	Breve Histórico do Solo-cimento .....	41
2.4.2	Utilização do Solo-cimento .....	42
2.4.3	Solo-cimento Para Emprego em Pavimentos .....	43
2.4.3.1	Definição .....	43
2.4.4	Tipo de Solo Usado na Mistura Solo-cimento .....	44
2.4.5	Dosagem da Mistura Solo-cimento.....	45
2.4.5.1	Método da ABNT .....	46
2.4.5.2	Diretrizes do DNIT (método simplificado da ABCP) .....	47
2.4.5.3	Método de dosagem físico-química da mistura solo-cimento.....	48
2.4.6	Requisitos para Base de Solo-cimento de Pavimento Rodoviário.....	50
2.4.7	Materiais.....	50
2.4.8	Execução de Base de Solo-cimento.....	51
2.4.9	Desempenho da Mistura Solo-cimento.....	52
2.4.10	Comportamento da Base de Solo-cimento em Pavimentos .....	53
2.4.10.1	Influência do teor de cimento .....	53
2.4.10.2	Influência do teor de umidade .....	58
2.4.10.3	Influência da porosidade .....	60
2.4.10.4	Influência da energia de compactação .....	64
2.4.10.5	Influência do tempo de cura .....	65

2.4.10.6	Influência do tempo para a compactação.....	67
2.4.10.7	Resistência à compressão simples .....	69
2.4.10.8	Reações químicas da mistura solo-cimento .....	70
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>72</b>
3.1	MATERIAIS .....	72
3.1.1	Água .....	72
3.1.2	Cimento .....	72
3.1.3	Solo .....	73
3.1.3.1	Características regionais .....	73
3.1.3.2	Jazida de solo .....	74
3.2	MÉTODOS .....	74
3.2.1	Plano Experimental da Pesquisa.....	74
3.2.2	Coleta de Solo.....	75
3.2.3	Preparação da Amostra para os Ensaios de Caracterização Física do Solo .....	76
3.2.4	Ensaios de Caracterização Física do Solo .....	77
3.2.5	Teores de Cimento e Curvas de Compactação das Misturas Solo- cimento.....	78
3.2.5.1	Definição dos teores de cimento .....	78
3.2.5.1.1	<i>Curvas de compactação das misturas solo-cimento</i> .....	79
3.2.6	Compactação dos Corpos de Prova de Solo-cimento para Ensaio de Compressão Simples .....	81
3.2.6.1	Definição dos tempos para a compactação da mistura solo- cimento.....	81
3.2.6.2	Baterias e compactações dos corpos de prova de solo-cimento.....	82
3.2.6.3	Homogeneização da mistura solo-cimento.....	83
3.2.6.4	Compactação dos corpos de prova de solo-cimento.....	84
3.2.6.5	Cura dos corpos de prova de solo-cimento .....	84
3.2.6.6	Ensaio de absorção de água e compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento .....	85

<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>88</b>
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO, COMPACTAÇÃO, ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E CLASSIFICAÇÃO PELA AASHTO.....	88
4.1.1	Massa Específica dos Sólidos.....	88
4.1.2	Limites de Atterberg (Limites de plasticidade e liquidez).....	88
4.1.3	Análise Granulométrica do Solo.....	89
4.1.4	Compactação do Solo.....	91
4.1.5	Índice de Suporte Califórnia.....	92
4.1.6	Classificação do Solo Usando a AASHTO.....	93
4.1.7	Resumo dos Ensaios de Caracterização Física, Compactação, Índice de Suporte Califórnia e Classificação do Solo.....	94
4.2	COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO.....	94
4.2.1	Curva de Compactação do Solo-cimento.....	94
4.2.2	Compactação dos Corpos de Prova de Solo-cimento para Ensaio de Compressão Simples.....	99
4.2.3	Bateria de Ensaios com Utilização do Teor de Umidade Ótima e Energia Normal na Compactação.....	99
4.2.4	Bateria de Ensaios com Utilização do Teor de Umidade Ótima + 1 % e Energia Normal na Compactação.....	105
4.2.5	Bateria de Ensaios com Utilização do Teor de Umidade Ótima + 1 % e Energia Alterada na Compactação.....	110
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>117</b>
5.1	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CIMENTO NA CURVA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO.....	117
5.2	INFLUÊNCIA DO TEOR DE CIMENTO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA SOLO-CIMENTO.....	121
5.3	INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA SOLO-CIMENTO.....	125
5.4	INFLUÊNCIA DA POROSIDADE E ABSORÇÃO DE ÁGUA SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA SOLO-CIMENTO.....	128
5.5	COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SOLO-CIMENTO: FATOR $V_v/V_{CIM}$ .....	143
5.6	INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA SOLO-CIMENTO.....	148

5.7	INFLUÊNCIA DO TEMPO PARA A COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	152
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	160
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	165

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil desde o ano de 1939 a mistura solo-cimento é utilizada para infraestrutura de pavimentos rodoviários. Apresentando na atualidade mais de 25.000 km de rodovias utilizando esta solução em bases ou sub-bases (ABCP, 2013).

A mistura solo-cimento pode ser realizada em central (usina) de solos ou realizada *in loco* (pista), utilizando solo de jazida próxima à usina ou do próprio subleito.

Porém nos dois métodos de execução, tanto *in loco* quanto em usina, tem-se notado o surgimento de anomalias nas bases de solo-cimento como trincas e fissuras em blocos regulares devidas a retração da mistura, que refletem no revestimento do pavimento asfáltico, devido ao tempo de cura, tempo para a compactação e ao alto teor de cimento da mistura.

Essas anomalias são devidas ao desconhecimento das alterações provocadas pelos componentes da mistura, ou execução inadequada da base de solo-cimento, gerando paralisações, obras inacabadas e gastos desnecessários.

Tecnicamente a falta de conhecimento sobre a proporção dos componentes da mistura solo-cimento, principalmente as informações sobre as alterações sofridas no desempenho mecânico devido à porosidade, os componentes da mistura em relação ao teor de cimento, teor de umidade, da energia e também do tempo entre a homogeneização e a compactação, geram contradições no desempenho mecânico determinado em projeto e o real obtido em campo, acarretando problemas de durabilidade e segurança nas rodovias.

Assim a análise aprofundada sobre as alterações provocadas na mistura solo-cimento pela variação dos seus componentes, pela porosidade e pelo tempo para a compactação se torna indispensável para verificar como estes influenciam no desempenho mecânico da mistura.

Na prática nota-se a falta de ensaios para avaliar o desempenho da mistura solo-cimento a ser empregada em pavimentos, como a determinação do tempo máximo possível para a utilização da mistura para o atendimento da resistência à compressão simples mínima, e verificação das alterações provocadas nas características físicas, pelos componentes e devido ao tempo para a compactação da mistura.

Muitos profissionais justificam a não realização de ensaios devido ao tempo e ao custo na execução destes. Por este motivo frequentemente, são observadas discrepâncias entre os projetos e as execuções de bases de solo-cimento, acarretando problemas de desempenho mecânico e durabilidade dos pavimentos.

A maioria dos estudos tem focado na determinação da influência do teor de cimento no desempenho mecânico da mistura e na tentativa da adoção de uma composição para estimar a resistência à compressão simples relacionando a porosidade, volume de vazios (porosidade) com o volume de cimento da mistura, sempre sendo verificada a alteração da mistura após a compactação imediata à homogeneização, mas não tem verificado o estudo em relação ao tempo para a compactação da mistura e sua influência na resistência à compressão simples.

Sendo assim, a avaliação das alterações acarretadas na mistura devido à estabilização de um solo arenoso (classificado geotecnicaamente como uma Areia Média a Fina Argilosa e pela AASHTO como um solo A-2-4) com 8, 9 e 10 % de cimento, pelo teor de umidade, porosidade, energia e do tempo para a compactação se fazem de suma importância, visando o melhor conhecimento sobre o assunto, uma vez que a literatura sobre solo-cimento para pavimentação é escassa no Brasil, da técnica construtiva, gerando estruturas economicamente viáveis e duráveis, e também auxiliando na realização de normas, projetos e nas execuções da mistura solo-cimento.

Este trabalho tem como objetivo a verificação direta da influência do teor de cimento, teor de umidade, porosidade, energia e tempo para a compactação da mistura solo-cimento sobre a resistência à compressão simples, para emprego como base de pavimento rodoviário.

Esta dissertação de mestrado está estruturada em capítulos:

**CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:** Será constituído por uma revisão bibliográfica expositiva das publicações existentes sobre solo e solo-cimento.

**CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS:** Serão apresentados os materiais e os métodos utilizados neste trabalho.

**CAPÍTULO 4 - RESULTADOS:** Apresentação dos resultados obtidos.

**CAPÍTULO 5 - DISCUSSÕES:** Discussão sobre os resultados.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO: Serão apresentadas as conclusões do trabalho.

REFERÊNCIAS: Apresentará a bibliografia pesquisada para a realização da dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS

A grande diversidade de solos existentes devido a sua origem, propriedades e características físicas, acarretaram na separação dos solos em grupos, classificando-os em relação ao seu bom ou mau desempenho para um determinado objeto de execução da engenharia.

O interesse da engenharia levou a esta classificação natural dos solos com propriedades e características em comum. Assim com a experiência acumulada dos pesquisadores surgiram os sistemas de classificação de solos.

O objetivo da classificação de solos, sob o ponto de vista da engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo, ou pelo menos, orientar os pesquisadores para permitir a adequada análise de um problema envolvendo determinado tipo de solo.

Para fins rodoviários, os solos são classificados em relação à American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Para a engenharia de barragens é utilizado o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Vale ressaltar também a existência da classificação MCT - Miniatura, Compactado, Tropical, utilizada para solos tropicais.

Em geral as classificações levam em consideração a granulometria e os limites de consistência do solo.

#### 2.1.1 Granulometria

As frações granulométricas do solo são determinadas a partir de ensaios padronizados, resultando na construção da curva granulométrica do solo, representado a distribuição dos grãos do material.

A grande diversidade entre os solos levou alguns pesquisadores a separar solos em finos e grossos, conforme a passagem do material na peneira # 200 (peneira de abertura de 0,075 mm). O solo passante nesta peneira é denominado fino e o retido é considerado solo grosso.

A análise granulométrica consiste na determinação das porcentagens, em massa, das diferentes frações de grãos constituintes do solo.

Utilizando-se peneiramento grosso ou fino para partículas maiores de 0,075 mm e sedimentação para determinação das frações menores a este valor.

Para efeito de nomenclatura é utilizada a norma da ABNT - NBR 6502/1995, para fins geotécnicos, mas é possível utilizar também os manuais do DNIT, para fins rodoviários. Determinando os intervalos das dimensões dos grãos do solo, para determinar sua textura.

Para efeito de classificação do solo, devem ser analisadas as porcentagens retidas ou passantes nas peneiras de ensaios. Principalmente referente à peneira de número # 10 (2,00 mm), # 40 (0,42 mm) e # 200 (0,075 mm).

Assim deve-se ter bem claro qual norma utilizar no ensaio para a realização da nomenclatura do solo. O Quadro 1 apresenta os intervalos para determinação das frações do solo, conforme a NBR 6502/1995 para a classificação geotécnica e o DNIT para uma classificação rodoviária.

**Quadro 1 - Nomenclatura das frações granulométricas dos solos segundo a NBR 6502/1995 e manual de pavimentação DNIT (2006)**

Nomenclatura	Tamanho dos grãos NBR 6502/1995	MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DNIT (2006)
Pedregulho	60,0 a 2,00 mm	76,2 a 2,00 mm
Areia grossa	2,00 a 0,60 mm	2,00 a 0,42 mm
Areia média	0,60 a 0,20 mm	Não contempla
Areia fina	0,20 a 0,06 mm	0,42 a 0,075 mm
Silte	0,06 a 0,002 mm	0,075 a 0,005 mm
Argila	Inferior a 0,002 mm	Inferior a 0,005 mm
Argila coloidal	-	Inferior a 0,001 mm

**Fonte:** NBR 6502/1995 e MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DNIT (2006)

### 2.1.2 Limites de Consistência ou Limites de Atterberg

Um solo quando está com excesso de água e é capaz de fluir encontra-se no seu estado líquido, com a evaporação da água o mesmo pode ser moldado à mão denominando este de estado plástico, ainda com a continuação de perda de água, o solo não pode mais ser moldado se apresentado no estado sólido.

O pesquisador sueco Atterberg definiu os limites de consistência e assim, pode estudar diferentes estados de solo. Apenas são determinados os limites

de consistência para a fração de solo passante na peneira de abertura de 0,42 mm ou peneira # 40, referenciadas nas normas de ensaio.

Os limites de consistência baseiam-se nos pontos da passagem gradual de um solo entre os três estados: líquido, plástico e sólido. O pesquisador Casagrande no ano de 1932 formulou ensaios para a obtenção de dois limites, o limite de liquidez e o limite de plasticidade, definidos como:

- Limite de liquidez (LL): é a transição do estado de consistência plástica para o estado de consistência líquida do solo ou vice-versa.
- Limite de plasticidade (LP): é determinado pelo cálculo da porcentagem de umidade para o qual o solo inicia sua fissuração. É a transição de estado de consistência semi-sólida para o estado de consistência plástica do solo ou vice-versa.

Para classificação do solo é também levada em consideração a diferença entre os dois limites supracitados, resultando no Índice de Plasticidade (IP), possibilitando classificar o solo quanto a sua plasticidade conforme o Quadro 2.

**Quadro 2** - Classificação de solo em relação ao índice de plasticidade

Índice de plasticidade (IP)	Classificação
0	Não plástico
0 - 5	Ligeiramente plástico
5 - 10	Plasticidade baixa
10 - 20	Plasticidade média
20 - 40	Plasticidade alta
Maior que 40	Plasticidade muito alta

**Fonte:** Souza Pinto (2006)

## 2.2 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

Muito utilizada no meio rodoviário, foi originalmente proposto nos Estados Unidos da América - EUA. Na classificação segundo a AASHTO, os solos são classificados em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência (LL e LP) e índice de grupo (IG).

Nesse sistema se inicia a classificação de acordo com a porcentagem passante na peneira # 200. Assim são considerados solos granulares, cuja granulometria apresenta menos de 35 % passante nesta peneira e finos (materiais silto-argilosos) aqueles com porcentagem passante maior.

Os solos são divididos em 7 grupos: A-1, A-2, A-3 (solos granulares) e A-4, A-5, A-6 e A-7 (solos finos), e ainda são subdivididos conforme o Quadro 3.

**Quadro 3 - Classificação AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials**

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAS GRANULARES 35 % (OU MENOS) PASANDO NA PENEIRA Nº 200							MATERIAIS SILTOSOS - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira Nº 10 Nº 40 Nº 200	50 máx.		51 min.								
	30 máx.	30 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mal			

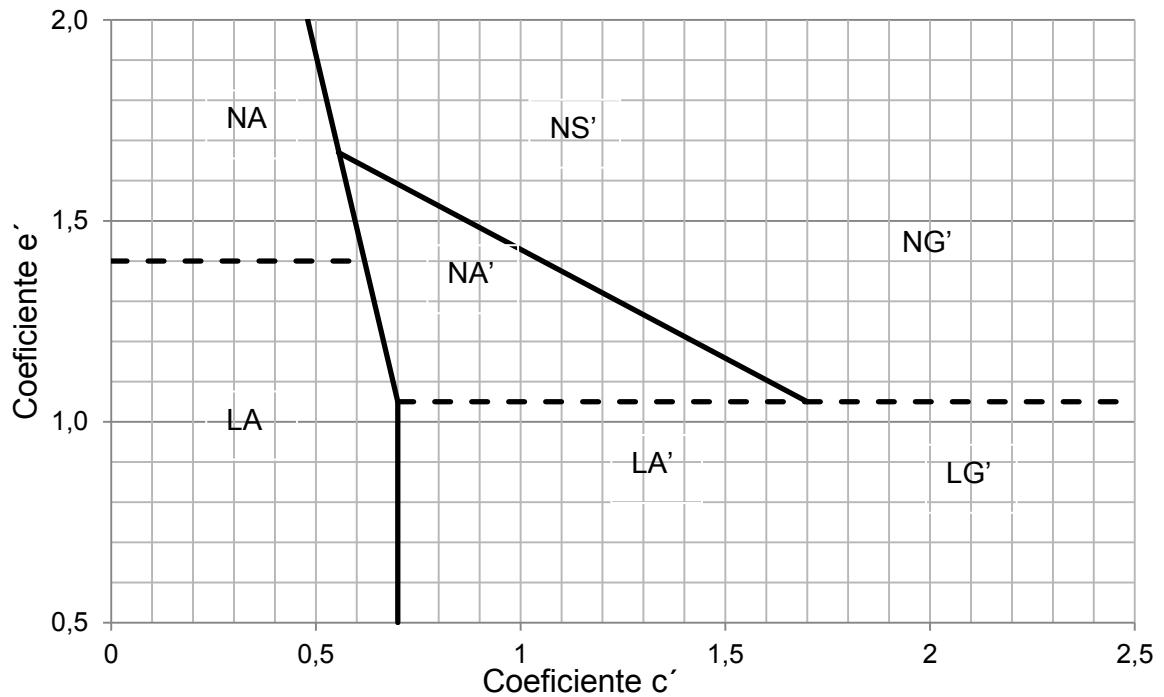
\* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

**Fonte:** Manual de Pavimentação DNIT (2006)

Conforme o Quadro 3, para a pavimentação é desejável a obtenção de solos com comportamento de excelente a bom, com os grupos A-1, A-2 e A-3, com suas respectivas subdivisões, todos apresentando índice de grupo no valor de zero ou no máximo 4 %.

Outra classificação utilizada é a classificação MCT. Este sistema de classificação foi desenvolvido pelos pesquisadores Nogami e Villibor, com a intenção de caracterizar os solos tropicais, a partir de suas propriedades hidráulicas (expansão e coeficiente de penetração de água) e mecânicas (coesão, capacidade de suporte e famílias de curva de compactação). A Figura 1 apresenta o ábaco para determinação da classificação do solo em relação as suas características físicas.

**Figura 1 - Ábaco da classificação MCT**



Fonte: Manual de pavimentação DNIT (2006)

Como pode ser verificado na Figura 1, o ábaco divide os solos em dois grandes grupos, solos lateríticos denominado com a letra L e não lateríticos mencionados com a letra N. Possibilitando as denominações:

- LA': areias argilosas e argilas arenosas lateríticas;
- LA: areias com pouca argila lateríticas;
- LG': argilas e argilas arenosas lateríticas;
- NA: areais, areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não-lateríticos;
- NA': areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas;
- NG': argilas, argilas siltosas e argilas arenosas não-lateríticas;
- NS': siltes caulínícos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos.

## 2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

### 2.3.1 Definição e Tipos de Estabilização de Solos

O solo natural, ou do próprio subleito de obras de engenharia, podem não conter características adequadas para as definições de projeto. Uma alternativa utilizada pelos engenheiros para realização da obra é remover completamente o solo e substituí-lo por outro com características adequadas (CARBELON, 2008).

Porém na maioria das vezes, a jazida de solo pode estar situada a grandes distâncias, inviabilizando a construção devido à demasiada utilização de combustível fóssil, encarecendo em muito a obra (VITALI; RIOS; FONSECA, 2012).

Assim a fim de obter determinado material com características desejadas, sem a extração de materiais de outros locais, muitas vezes causando danos irreversíveis ao meio ambiente, adotam-se técnicas ou métodos para a conformação das características do solo (KOLLING et al., 2012). Modificando as propriedades deste solo com a utilização de algum método de estabilização, de modo a criar um novo material com características satisfatórias.

A necessidade de estabilização de solos surgiu a partir do momento em que esses materiais em seu estado natural já não ofereciam características suficientes para o bom desempenho à sua finalidade.

Estabilização de solos é a aplicação de técnicas nas quais o objetivo maior é melhorar as propriedades de determinado tipo de solo, especialmente as propriedades relacionadas à resistência, durabilidade e permeabilidade (INGLES; METCALF, 1972). A estabilização consiste nos seguintes objetivos (SPECHT, 2000):

- Melhorar propriedades mecânicas e hidráulicas tais como: aumentar à resistência de ruptura à compressão; diminuir as deformações elásticas e permanentes; aumentar ou reduzir a permeabilidade; diminuir a expansão e reduzir a contração; e
- Garantir a permanência das propriedades citadas anteriormente, no decorrer do tempo (durabilidade) mesmo sob a ação de cargas dinâmicas.

A estabilização consiste em adequar ao solo uma maior resistência, seja por meio de compactação, correção granulométrica e de sua plasticidade ou de

adição de substâncias, conferindo-lhe uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos (JOHANN, 2013).

Observa-se, então, que a estabilização de solos nada mais é do que a alteração das características iniciais do solo, de maneira adequada, para cumprir com as exigências em sua utilização. Usando de um processo de natureza física, química ou mecânica.

A escolha do tipo de estabilização não é tão simples, variando desde as propriedades dos solos e dos ligantes, até as condições climáticas, de tráfego, de drenagem e também as questões econômicas (SANBONSUGE, 2013).

### 2.3.1.1 Estabilização granulométrica

Neste método de estabilização o princípio está na correção da curva granulométrica do solo, fornecendo a ele uma maior variedade de dimensões de partículas, obtendo como resultado final um material com um volume de vazios reduzido, melhorando assim suas propriedades para aplicação rodoviária (CAVALCANTE; BARROSO, 2009).

Na prática se faz a estabilização granulométrica com uso de um ou mais solos misturando ao solo original com a finalidade de obter um material mais compacto e menos deformável (PEREIRA, 2012). Podendo estes ser naturais ou artificiais, para que o produto final se enquadre em uma determinada granulometria.

A mistura final resulta em um material com maior capacidade de resistência, devido ao maior contato entre as partículas do solo. Os vazios deixados pelas maiores partículas são preenchimentos pelas partículas menores, de maneira a proporcionar maior densidade e menor permeabilidade.

### 2.3.1.2 Estabilização química

A estabilização química pode ser definida como a adição de uma ou mais substâncias químicas ao solo, com objetivo de gerar uma mudança no seu comportamento quanto ao ganho de resistência e estabilidade, tais mudanças podem influenciar também na permeabilidade e deformabilidade (PEREIRA, 2012).

Este método de estabilização é uma alternativa utilizada quando a mecânica não é suficiente para atender os parâmetros solicitados no projeto

(SAMPAIO, 2008). Tais estabilizantes compreendem: a cal, cimento Portland, asfalto, produtos químicos industrializados, cimento asfáltico de petróleo, cloretos, ácido fosfórico, entre outros. Em geral eles podem conferir resistência ao solo, por meio da cimentação dos grãos entre si.

O processo de estabilização é realizado através da aglutinação das partículas, onde os grãos do solo são unidos por meio de reações químicas (CRISTELO, 2001). Acarretando na modificação da estrutura do solo estabilizado devido a certa quantidade de estabilizante, que seja suficientemente adequando para melhorar as propriedades físicas e mecânicas. O grau da modificação da estrutura da mistura solo-cimento depende do tipo e da quantidade de cimento utilizado (VITALI, 2008).

Na estabilização química ocorrem reações entre o cimento os minerais do solo (fração coloidal) e ou com a água presente nos poros da massa do produto. As reações solo-cimento são caracterizadas por um processo físico-químico, o qual os cátions de cálcio são liberados na hidratação do aglomerante reagindo com os argilo-minerais modificando o pH da mistura (MEDINA, 1997).

Nos concretos utilizados, a mistura de água e aglomerante, denominada pasta, é suficiente para preencher os poros existentes e cobrir toda a superfície dos agregados. Na mistura do solo-cimento, a pasta é insuficiente para preencher totalmente os vazios e revestir todas as partículas, tendo por resultado uma estrutura interna de cimento na mistura compactada (SAMPAIO, 2008).

Contudo, os principais objetivos da utilização do cimento Portland na estabilização de solos são a melhoria das características mecânicas e maior estabilidade em relação à variação do teor em água (CRISTELO, 2001).

O cimento da estabilização química, embora seja mais utilizado para solos arenosos, pode também ser utilizado em qualquer tipo de solo, inclusive nos mais siltosos e argilosos. Quando empregados na mistura solos predominantemente finos acarretam na utilização de maiores teores de cimento, tornando a mistura inviável economicamente. Isso pode ser verificado no trabalho de Teixeira (2014), que utilizou um solo silto arenoso (20 % de areia, 75 % de silte e 5 % de argila) verificando que a mistura solo-cimento atingiu a resistência mínima à compressão quando utilizado 15 % de cimento.

### 2.3.1.3 Estabilização mecânica

O estudo da compactação dos solos se deve ao engenheiro estadunidense Ralph R. Proctor, que em 1933 na Califórnia, divulgou suas observações sobre a compactação de aterros com diversos tipos de solo. Mostrando que, ao ser aplicado um determinado número de golpes (ou passadas de um determinado equipamento) a massa específica é função da umidade em que o solo se encontrar no momento da compactação.

Segundo a norma DNIT-ES 141/2010, compactação pode ser entendida como a melhoria da capacidade resistente de materiais “in natura” ou mistura de materiais, mediante emprego de energia de compactação adequada, de forma a se obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade. A Figura 2 mostra a compactação de solo com equipamento mecânico.

**Figura 2 - Compactação de solo**



**Fonte:** O próprio autor

Compactação é a operação da qual resulta o aumento da massa específica aparente de um solo (e de outros materiais, como misturas betuminosas), pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, fazendo as partículas constitutivas do material entrar em contato mais íntimo. Os solos bem graduados, geralmente apresentam curvas de compactação com um máximo pronunciado, ao contrário dos solos de graduação uniforme, que se caracterizam por curvas achatadas (MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DNIT, 2006).

O fenômeno da compactação consiste na redução de seu índice de vazios, com a diminuição do volume de um solo sem variação no seu teor de umidade, desejável porque diversas propriedades do solo melhoram com isto.

Todo solo pode ser compactado, mas solos bem graduados são os mais aconselháveis para a realização da compactação, por permitirem o melhor intertravamento das partículas.

É possível verificar na norma DNIT-ES 141/2010, a presença de determinadas faixas granulométricas para compactação do solo ou mistura de solos, para utilização em pavimentação. O Quadro 4 apresenta as faixas granulométricas de solos utilizadas para a compactação.

**Quadro 4 - Faixas granulométricas utilizadas na compactação para pavimentação**

Faixas de Projeto	A	B	C	D	E	F
Peneiras						
2"	100	100				
1"		75 - 90	100	100		
3/4"	30 - 65	40 - 75	50 - 85	60 - 100	100	100
Nº 4	25 - 55	30 - 60	35 - 65	55 - 85	55 - 100	70 - 100
Nº 10	15 - 40	25 - 45	25 - 50	40 - 70	40 - 100	55 - 100
Nº 40	8 - 20	15 - 30	15 - 30	25 - 45	20 - 50	30 - 70
Nº 200	2 - 8	5 - 15	5 - 15	10 - 25	6 - 20	8 - 25

Fonte: DNIT-ES 141/2010

As faixas A, B, C e D são utilizadas para um N (número equivalente ao eixo padrão) superior a  $5 \times 10^6$ , mas aconselhado pelo DNIT a utilização das faixas A e B. As faixas E e F, são utilizadas para N inferior a  $5 \times 10^6$ . Ou seja, quanto maior a solicitação do pavimento, mais bem graduado deve ser o solo estabilizado mecanicamente.

Além disso, a norma DNIT-ES 143/2010 prescreve a determinação de algumas frações em relação às demais como exemplo, pode-se citar: a porcentagem do material passante na peneira # 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira # 40. Para que seja possível o melhor arranjo das partículas, melhorando a resistência do solo compactado (SUZUKI, 2005).

A energia a ser aplicada, varia conforme o peso, altura, número de golpes, passadas do equipamento ou espessura da camada. Ao alterar-se qualquer um destes, altera-se o resultado da compactação.

Em laboratório, os métodos de compactação mais utilizados são: compactação dinâmica ou por impacto; compactação estática ou por pressão; compactação por pisoteamento ou por amassamento, e compactação por vibração (SOUZA JUNIOR, 2005).

O equipamento e a energia a serem utilizados em campo para realizar a compactação serão definidos conforme as características do solo a ser estabilizado. Objetivando a redução de futuros recalques, aumento da rigidez, aumento da resistência e decréscimo da permeabilidade.

Dentre os equipamentos utilizados em obras, o rolo com patas ou pé de carneiro tem um bom comportamento na compactação de solos finos (argilas e siltes). Já o rolo liso, e utilizado para a selagem da compactação realizada com o rolo pé-de-carneiro, protegendo o aterro a ação da água de um dia para o outro e na compactação de solos arenosos e pedregulhos (SAMPAIO, 2008).

## 2.4 SOLO-CIMENTO

### 2.4.1 Breve Histórico do Solo-cimento

A construção com terra foi à primeira solução encontrada pelo homem primitivo para a realização de abrigos eficientes contra o meio ambiente hostil, em locais que apresentavam dificuldades de manuseio de pedras e madeira (CASTRO, 2008).

Um das primeiras tentativas de pavimentação utilizando a mistura de solo com cimento Portland foi em Sarasota, Flórida (EUA). Onde um construtor em 1915, experimentou pavimentar uma rua da cidade empregando um composto de conchas marinhas, areia de praia e cimento Portland, mas pela falta de tecnologia na época, essas e outras experiências se tornaram inválidas (PITTA, 1985).

A partir de 1935, a Portland Cement Association (PCA) e o Departamento de Rodagem da Carolina do Sul (EUA) construíram uma pista experimental de 2,5 km em Johnsonville. Desde então, foram criados os requisitos mecânicos para utilização como camada de pavimento e passou-se a adotar o solo-cimento nos EUA (LIMA, 2006).

Os pavimentos com base ou sub-base de solo-cimento são empregados no Brasil desde 1939, quando foi construída a estrada Caxambu-Areias, em empreendimento no qual a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) juntou-se ao Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) na construção (ALMEIDA, 2008).

Experiências desenvolvidas pela ABCP, que regulamentou, fomentou e pesquisou a sua aplicação em pavimento rodoviário levando em 1941, à pavimentação do aeroporto de Petrolina no Estado de Pernambuco - PE (ABCP, 2016). No período entre os anos de 1942 a 1954, a utilização da estabilização de solo com adição de cimento Portland não progrediu muito no Brasil e no mundo. Apesar do sucesso desta solução nos anos iniciais da década de 1940, o período da Segunda Guerra Mundial causou problemas econômicos no mundo todo e houve diminuição da disponibilidade de cimento Portland no mercado (CARBELON, 2008). Mas a partir de 1954 recomeçaram as construções em maior escala (OLIVEIRA, 2011).

Em 1956, deu-se início um vasto plano de pavimentação das rodovias paulistas, mostrando-se inovador no Brasil, por ser o estado com maior quilometragem de base utilizando solo-cimento. Desde então, solo-cimento passou a ser a base e a sub-base mais construída no estado de São Paulo, representando cerca de 50 % da extensão de toda a rede pavimentada.

No Brasil, a partir do ano de 1960, o solo-cimento começou a ser pesquisado por meio de inúmeros estudos científicos e tecnológicos. As principais instituições responsáveis por este avanço foram o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT e a ABCP (FOPPA, 2005). Desde então, foram executados no país mais de 25.000 km com essa solução no país (ABCP, 2013).

#### 2.4.2 Utilização do Solo-cimento

A procura por materiais apropriados para base, economicamente viáveis em função da distância média de transporte e com baixo impacto ambiental levou muitos pesquisadores e construtores a começarem a pensar na utilização do solo-cimento. Tendo como resultado um material de baixo custo e elevada qualidade. O solo quando estabilizado com cimento apresenta um desempenho em relação à resistência e rigidez maior em relação ao solo natural de origem, podendo assim ser utilizada de diversas maneiras na engenharia (ALMEIDA, 2008).

Em habitação, o solo-cimento pode ser utilizado segundo dois processos construtivos: paredes monolíticas e produção de tijolos ou blocos prensados. A escolha da técnica a ser utilizada depende das características de cada obra em particular e da disponibilização de equipamentos (SANTOS, 2009).

Este material para ser produzido não necessita de grande gasto energético utilizado pelas máquinas, confeccionados apenas com a utilização de uma prensa manual, pois a matéria prima, o solo, que é encontrado em abundância na natureza (GRANDE, 2003).

Além da utilização do solo-cimento em residências, este pode ser utilizado empregado na construção de fundações superficiais ou profundas, pisos, passeios, muros de contenções, barragens, paisagismo e na pavimentação (GRANDE, 2003).

Nos dias atuais a sua principal utilização é como base ou sub-base de pavimento rodoviário. Neste último caso o solo-cimento pode substituir a necessidade de empréstimo de material de outras jazidas e ser economicamente vantajoso na utilização da técnica construtiva (STRACKE et al., 2012).

### 2.4.3 Solo-cimento Para Emprego em Pavimentos

#### 2.4.3.1 Definição

O solo-cimento é material composto por água, cimento Portland e solo, utilizado em base de um pavimento compactada obedecendo a alguns aspectos referentes a parâmetros de compactação. Além disso, deve atender exigências em relação ao seu comportamento mecânico determinado por norma. Existem duas classificações para o solo estabilizado com cimento: solo melhorado com cimento e solo-cimento.

A primeira, na qual se adiciona aproximadamente teor de cimento de 2 a 4 % em massa, visando principalmente à modificação do solo no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade a água, sem cimentação acentuada (MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DNIT, 2006). A segunda de acordo com as normas vigentes, solo-cimento é o produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento Portland e água, em proporções previamente determinadas por processo próprio de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade (DNIT-ES 143/2010).

No solo melhorado com cimento, a sensibilidade a água é reduzida, devido ao envolvimento dos grãos por uma quantidade mínima de cristais

resultantes da hidratação do cimento. Geralmente empregadas como reforço de subleito e poucas vezes como sub-base (ALMEIDA, 2008). O solo-cimento deve satisfazer a certos requisitos de densidade, durabilidade e resistência, dando como resultado um material duro, cimentado de elevada rigidez a flexão. O teor de cimento adotado usualmente é da ordem de 6 a 10 % (MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DNIT, 2006). A mistura é utilizada na infraestrutura de pavimentos (DNER-ME 201/1994).

O solo é o componente com a maior presença na obtenção da mistura solo-cimento, variando de 90 a 95 % da massa total. O cimento entra em uma quantidade que varia de 5 a 10 % em relação à massa de solo, o suficiente para estabilizar e conferir as propriedades de resistência desejadas para mistura (CASTRO, 2008). A porcentagem de cimento deve ser suficiente para conferir melhorias das propriedades mecânicas e de durabilidade às misturas, depois de compactadas com um determinado teor de água que garanta a hidratação do cimento (OLIVEIRA, 2011).

#### 2.4.4 Tipo de Solo Usado na Mistura Solo-cimento

O solo a ser utilizado na mistura pode ser extraído do próprio local da obra. Isto constitui-se numa das grandes vantagens do solo-cimento, em que o solo é o elemento que entra em maior proporção (MEDERO, 2005)

Muitos solos podem ser utilizados, entretanto, os solos mais apropriados são os que possuem teor de areia entre 45 e 50 %. Somente os solos que contêm matéria orgânica em sua composição (solo de cor preta) não podem ser utilizados (ABCP, 2016). Os solos arenosos são desejáveis para a realização da mistura solo-cimento, mas existem estudos com a realização da mistura com solos muito finos (TEIXEIRA, 2014). Este autor analisou um solo silto arenoso (laterítico), e mostra sua aplicação na pavimentação com a utilização de teores de 5, 10 e 15 % de cimento, mas atingindo a resistência mínima quando utilizado o maior teor de cimento.

Os solos economicamente empregáveis se restrinjam àqueles que necessitem de teores de cimento relativamente baixos, para que a execução em grande escala seja facilitada (LOPES, 2002). Neste aspecto, os solos granulares têm se mostrado mais eficientes que os argilosos, atingindo resistências mais elevadas, com menores teores de cimento (BASSO et al., 2003; LIMA, 2010)

Solos arenosos bem graduados e com quantidade baixa de finos são os mais indicados, por exigirem um baixo teor de cimento. Quando não se dispõe de um solo com as características indicadas, deve-se considerar a possibilidade de realizar a mistura de dois ou mais solos, de modo que o resultado seja favorável em termos técnicos e econômicos (SOUZA et al., 2008). O solo ou misturas de solos devem apresentar determinadas características para serem utilizados na mistura, levando a realização de ensaios de caracterização física como: granulometria e limites de consistência (limite de liquidez e plasticidade) (CARBELON, 2008).

Solos bem graduados ou granulometria extensa, apresentando baixos valores de plasticidade, são características apreciáveis para o tratamento com cimento. Existindo maior número de pontos de contato entre as partículas, favorecendo a cimentação, e uma baixa plasticidade representa uma baixa sensibilidade às variações de água (PEREIRA, 2009). Segatini (2000) menciona que os solos devem ter, no entanto, uma quantidade mínima de fração fina, pois a resistência inicial do solo-cimento deve-se ao contato desta fração com o cimento.

#### 2.4.5 Dosagem da Mistura Solo-cimento

O objetivo de qualquer dosagem é identificar uma determinada combinação adequada e econômica dos constituintes da mistura, possibilitando a utilização em primeira estância em misturas experimentais e depois de comprovados os requisitos, ser utilizada com os menores custos possíveis.

A metodologia para a realização da mistura solo-cimento ainda carece de uma dosagem racional permitindo através de parâmetros obter correlações para o dimensionamento da mistura em campo (CARBELON, 2008; FOPPA, 2005; VITALI; RIOS; FONSECA, 2012).

A dosagem do solo-cimento limita-se a determinar o teor mínimo de cimento que promova na mistura o comportamento mecânico desejado para o projeto (STRACKE et al., 2012).

O provável motivo da dificuldade da dosagem racional do solo-cimento é o complexo comportamento mecânico apresentado pelo material, influenciado por vários fatores (VITALI, 2008).

No Brasil, sua dosagem ou moldagem é realizada de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pela Associação

Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo método físico-químico. Este método utilizado pelo DNIT é a simplificação do método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e o método físico-químico foi desenvolvido na COPPE (Coordenadoria de Programas de Pós-Graduação em Engenharia) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), elaborado pelo pesquisador Casanova, mas não é normalizada no país (CERATTI; CASANOVA, 1988).

#### 2.4.5.1 Método da ABNT

Para a ABNT o teor de cimento sugerido para a mistura está descrito na NBR 12253/2012, de acordo com o Quadro 5, conforme a classificação do solo em relação à AASHTO.

**Quadro 5** - Teor de cimento sugerido para ensaio de compactação de solo-cimento (NBR 12253/2012)

Classificação do solo, segundo a ASTM D	Teor de cimento sugerido, em massa (%)
A-1-a	4
A-1-b	
A-2	5
A-3	7
A-4	

Fonte: NBR 12253 (2012)

A classificação de solo apresentada no Quadro 5 é realizada a partir das frações granulométricas passantes nas peneiras normatizadas e os limites de Atterberg.

O resumo dos passos para a dosagem da mistura solo-cimento segundo a ABNT são:

- Caracterização do solo segundo a classificação da American Association of State Highway Officials - AASHTO. Os solos devem enquadrar-se preferencialmente nas classificações A-1, A-2 e A-4 podem ser utilizados para execução de solo-cimento segundo a NBR 11798/2012;
- Escolha do teor de cimento a ser empregado na mistura, baseado Quadro 5;
- Obtenção da umidade ótima e massa específica seca máxima em ensaio de compactação obtidos através da NBR 12023/2012. A

escolha do método de ensaio se dá de acordo com o ensaio de peneiramento 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 % das partículas com diâmetro maior que 19 mm;
- Preparação ou compactação dos corpos de prova com o teor sugerido e com a umidade ótima encontrada no ensaio de compactação de acordo com a NBR 12024/1992;
- Submissão dos corpos de prova ao ensaio de resistência à compressão simples após sete dias de cura de acordo com a NBR 12025/1990;
- Se os resultados obtidos forem satisfatórios o estudo encontra-se acabado. Caso não se consiga atingir a resistência à compressão simples mínima adequada, 21 kg/cm<sup>2</sup>, deve-se realizar novamente os ensaios com teores maiores de cimento. Podendo-se também adotar outras energias de compactações para obter o resultado desejado antes de alterar o teor de cimento da mistura.

#### 2.4.5.2 Diretrizes do DNIT (método simplificado da ABCP)

O DNIT, usando o método da ABCP, orienta para obras rodoviárias que o teor de cimento deve ser de 6 a 10 % em relação à massa de solo seca. Os passos necessários para a realização da dosagem de acordo com este método são:

- Primeiramente realiza-se a análise granulométrica do solo a ser utilizado de acordo com a DNER-ME 080/1994 - Análise granulométrica por peneiramento. A amostra deve apresentar-se dentro dos limites estabelecidos na DNIT-ES 143/2010;
- Realizar os ensaios de limites de plasticidade e liquidez, conforme apresentado nos métodos de ensaio DNER-ME 082/1994 - Limite de Plasticidade e DNER-ME 122/1994 - Limite de Liquidez. Amostra deve apresentar-se dentro dos limites estabelecidos na

DNIT-ES 143/2010, de no máximo 40 % para limite de liquidez e 18 % para o índice de plasticidade;

- Escolha do tipo de cimento para a estabilização, devendo obedecer às exigências da DNER-EM 036/1995 juntamente com as normas NBR 5732/1991 e NBR 5736/1991;
- Realização de ensaios de determinação de teor de umidade ótima e massa específica seca máxima da mistura, conforme DNER-ME 216/1994, podendo ser realizado de duas formas de acordo com a quantidade de solo retida na peneira com 4,8 mm de abertura. Escolha do método do ensaio A ou B, de acordo com o ensaio de peneiramento.
  - Método A - usando material que passa na peneira de 4,8 mm, para solos com 100 % de partículas de tamanho inferior a 4,8 mm;
  - Método B -- usando material que passa na peneira de 19 mm e quando parte da amostra fica retida na peneira de 4,8 mm;
- Moldagem e cura segundo método DNER-ME 202/1994, imersão e rompimento (compressão axial) dos corpos de prova conforme preconizado pelo método DNER-ME 201/1994;
- Verificação se a resistência de projeto foi obtida, bem como o valor mínimo conforme a DNIT-ES 143/2010, que é de 21 kg/cm<sup>2</sup> ou 2,1 MPa. Caso as amostras não apresentarem a resistência requerida é necessário aumentar o teor de cimento ou adotar energias diferentes e refazer os ensaios.

#### 2.4.5.3 Método de dosagem físico-química da mistura solo-cimento

Marcondes (1992) estudou a dosagem físico-química, e apresenta em seu trabalho os procedimentos para a realização da dosagem da mistura solo-cimento:

- Utilização de provetas de 250 ml sendo devidamente identificadas (a quantidade necessária é aquela que tenha uma para o solo natural e uma para cada teor de cimento analisado);

- Mensura-se 20 gramas de solo seco passante na peneira # 10 (abertura de 2,00 mm), colocando esta quantidade de solo em cada uma das provetas;
- Colocam-se no interior das provetas as quantidades de cimento desejadas para a pesquisa em relação à massa de solo seca. Misturando-as até que fique totalmente homogeneizada;
- É introduzida aproximadamente de 50 ml de água destilada, seguindo-se de agitação das provetas por 30 segundos, até que a mistura fique homogênea;
- Coloca-se mais 100 ml de água destilada no interior da proveta e deixa-a mistura em repouso absoluto por um período de 24 horas; e após este período a mistura é homogeneizada novamente com o auxílio de um bastão. Depois de no mínimo 2 horas da homogeneização da mistura, realiza-se a leitura do volume ocupado pela sedimentação da mistura;
- Observação: caso ocorra a dispersão do solo na água (proveta de 0 % de cimento), deverá ser colocadas algumas gotas de ácido clorídrico antes de colocar os 100 ml de água destilada, com o intuito de flocular a argila dispersa, assim permitindo melhor definição da leitura. Além disso, é necessário que não haja nenhum tipo de vibração na proveta;
- No dia seguinte realiza-se o mesmo procedimento, até se obter leituras constantes ou decrescentes;
- Com os dados realiza-se a tabela com as porcentagens de cimento e leituras de cada dia realizado. Calcula-se a variação volumétrica do sedimento solo-cimento em relação à do solo natural (sem adição de cimento) para cada um dos teores de cimento analisados, escolhendo o maior valor para o cálculo para cada teor de cimento.
- Realiza-se um gráfico de variação volumétrica *versus* porcentagem de cimento, sendo o ponto de variação máximo da curva correspondente ao teor de cimento mínimo requerido para a satisfação físico-química do solo.

#### 2.4.6 Requisitos para Base de Solo-cimento de Pavimento Rodoviário

Os requisitos exigidos para a utilização e realização de base de misturas de solo-cimento para pavimento rodoviário são expostos pelo DNIT, através da Especificação de Serviço número 143/2010 - Pavimentação - Base de solo-cimento. Nesta especificação constam as condições dos materiais e a execução propriamente dita da mistura solo-cimento.

#### 2.4.7 Materiais

Conforme DNIT-ES 143/2010, os materiais utilizados na mistura são: água, cimento Portland e solo. A água a ser utilizada deve ser potável e isenta de qualquer produto nocivo, como sais, ácidos, matéria orgânica, entre outras substâncias prejudiciais. O cimento deve atender a norma DNER-EM 036/1995 juntamente com as normas NBR 5732/1991 e 5736/1991.

Em relação ao solo, o mesmo deve ser submetido aos ensaios de caracterização física como granulometria por peneiramento e limites de consistência.

A granulometria deve ser realizada segundo a norma DNER-ME 080/1994, devendo suas frações granulométricas se apresentarem dentro dos limites estabelecidos pelo Quadro 6.

**Quadro 6** - Granulometria do solo a ser utilizado na mistura solo-cimento - DNIT-ES 143/2010

Solos		Faixa de uso (%) passante	Tolerância (%)
Peneira	Diâmetro (mm)		
2 1/2"	63,5	100	± 7
n° 4	4,8	50 - 100	± 5
n° 40	0,42	15 - 100	± 2
n° 200	0,075	5 - 35	± 2

Fonte: DNIT-ES 143/2010

Além das frações granulométricas mencionadas anteriormente, o DNIT restringe o uso de solos muito plásticos, com valor máximo para o índice de plasticidade de 18 %.

### 2.4.8 Execução de Base de Solo-cimento

A base do pavimento é definida pela DNIT-ES 141/2010 como a

Camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado.

Assim a base de solo-cimento é obtida mediante a utilização de uma mistura de solo, água e cimento devidamente compactado, e submetido a adequado processo de cura (DNIT-ES 143/2010).

Existem dois modos de preparação das misturas de solo-cimento: em usina misturadora de solos ou em pista. A norma DNIT-ES 143/2010 aborda as condições necessária para a realização de ambos os métodos construtivos. A Figura 3 apresenta a usina de solo e a realização da mistura na pista.

**Figura 3 - Usina de solos e mistura em pista**



(a)

(b)

**Fonte:** Cancian (2013) - (a) usina de solos - (b) mistura na própria pista

A norma prescreve que deve ser realizada preferencialmente misturas em usinas de solos, mas podendo ser adotada a mistura em pista apenas quando a quantidade ou o material a ser utilizado for da própria pista (ou subleito), não justificando a instalação de uma usina.

A preferência pela usina de solos para a execução da mistura se dá pelos seguintes motivos: precisão na quantificação de materiais e maior homogeneidade da mistura realizada. Existindo também no caso de mistura em pista o equipamento denominado recicladora ou pulvimisturadora de solo.

Uma recicladora escava o solo e internamente o homogeniza com cimento, devolvendo a mistura para a pista, mas ainda com a umidade do solo natural. Depois deve-se levar a mistura solo-cimento a umidade adequada. Vale ressaltar que a qualidade de qualquer camada de pavimento é influenciada pelos equipamentos utilizados e mão de obra envolvida no processo.

A usina de solos deve promover uma mistura homogênea e apresentar mecanismos para o rápido escoamento da mistura do interior da usina para os caminhões que realizarão o seu transporte até o local de execução. Estes caminhões devem ser basculantes ou outro meio apropriado, tomando as medidas necessárias para que não ocorra à perda ou ganho excessivo de umidade durante a carga, transporte e descarga da mistura.

O tempo entre a mistura pronta na usina de solo até o início da sua compactação deve ser inferior a 60 min (1 h), a menos que a critério de projeto, comprovado por ensaios laboratoriais, seja verificado a inexistência de inconveniente na adoção de tempo maior. Se a mistura for realizada na pista, o tempo para última adição de água não deve ser superior a 180 min (3 hs) (DNIT-ES 143/2010). Estes ensaios laboratoriais são determinação da resistência à compressão simples e do grau de compactação em relação ao tempo para compactação da mistura maior que o especificado na norma.

A execução da base de solo-cimento em pista ou usina de solos deve atender ao grau de compactação maior ou igual a 100 % e quando a mistura for submetida ao ensaio de resistência, as amostras devem apresentar resistência mínima aos 7 dias de cura de 21 kg/cm<sup>2</sup>.

Após a execução, a base de solo-cimento compactada deve ser protegida o mais rápido contra a perda de umidade. Essa camada poderá ser realizada com solo, capim ou outro material conforme mencionado em projeto e deve ser mantida no mínimo por 7 dias contra intempéries.

#### 2.4.9 Desempenho da Mistura Solo-cimento

A presença de agentes cimentantes no solo provocará mudanças substanciais em suas propriedades. Estas modificações dependerão das características específicas do solo, do teor de cimento, da quantidade de água, do tipo e grau de compactação, e do tipo e tempo de cura (ROJAS, 2012).

Segundo Morreti et al. (2013), o desempenho do solo-cimento está associado aos elementos adicionados (tipo e qualidade do estabilizante e água de mistura), características do solo (mineralógicas e de textura, concentrações de matéria orgânica e volume de água intersticial), condições da mistura (qualidade e tempos de mistura), condições de cura (temperatura, tempo e umidade de cura) e ao tipo de equipamento usado na homogeneização da mistura (LIMA, 2010; OLIVEIRA, 2011).

Lima (2010) menciona que a qualidade do solo-cimento está intimamente relacionada aos fatores já mencionados, além do tempo decorrido entre a mistura e a sua compactação.

Cancian (2013) e Cancian et al. (2016, no prelo) verificaram em seus trabalhos a interdependência dos fatores de influência no solo-cimento (uma interação entre os fatores significa uma interdependência entre os mesmos, como teor de cimento, teor de umidade, energia de compactação e tempo para a compactação da mistura).

#### 2.4.10 Comportamento da Base de Solo-cimento em Pavimentos

Tendo em vista que o solo-cimento é uma mistura compactada, é necessário conhecer a influência de cada componente, assim como o tempo de cura e o tempo para a compactação da mistura (tempo entre a homogeneização e a compactação da mistura) sobre o desempenho mecânico.

##### 2.4.10.1 Influência do teor de cimento

Carbelon (2008) analisou um solo arenoso (areia fina) muito uniforme, utilizando porcentagens de 1, 3, 5, 7, 9 e 12 % de cimento em relação à massa de solo seca. Este autor encontrou resultados que apresentam a elevação da resistência com o acréscimo de cimento de forma exponencial, afirmando que a maior quantidade de cimento acarreta na maior cimentação da mistura ocasionando maior resistência.

Vitali (2008) em seu trabalho verificou a influência do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples para uma areia siltosa, trabalhando com teores de 2, 3, 5 e 7 % de cimento em relação à massa de solo seca. E também

afirma que o aumento da quantidade de cimento promove a diminuição da porosidade, maior cimentação da mistura e assim maior resistência à compressão simples.

Lopes et al. (2009) analisou uma areia siltosa empregando teores de 2, 5 e 10 % de cimento em relação à massa de solo seca encontrou aumento da resistência à compressão simples com o aumento no teor de cimento da mistura.

Kolling et al. (2012) trabalhou com teor de cimento em relação à massa de solo seco em partes: 1/10, 1/11, 1/12, 1/13, 1/14 e 1/15, o solo determinado como argila siltosa (classificado como A-7-6 de acordo com a AASHTO) determinando o aumento de resistência com o aumento do teor de cimento da mistura. De acordo com Rojas (2012), o aumento no teor de cimento acarreta na diminuição da compressibilidade e da permeabilidade da mistura.

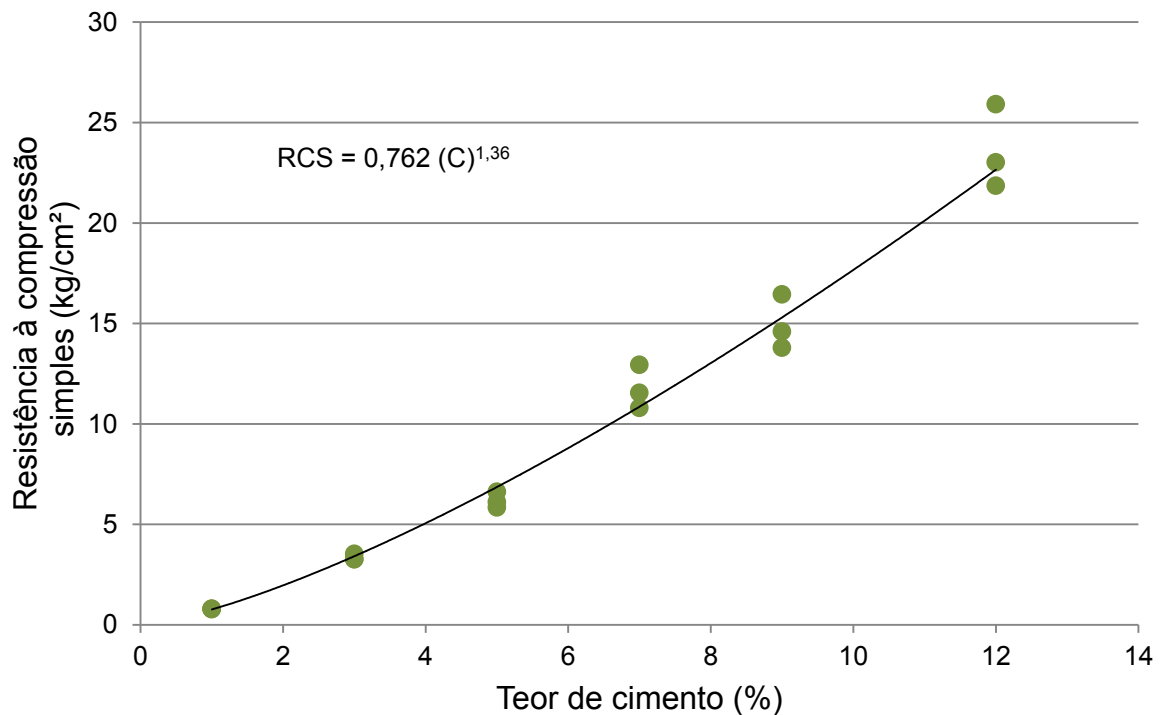
Pereira (2009) avaliou uma areia grossa estabilizada com cimento utilizando teores de cimento de 3, 5 e 7 % de cimento em relação à massa de solo seca, e encontrou variação linear da resistência com ao aumento do teor de cimento. Assim como Sanbonsuge (2013), que analisou uma areia fina argilosa e mostrou que a resistência à compressão simples apresenta uma variação linear com aumento de cimento, observando que pequenas quantidades de cimento incrementadas provocam ganho significativo de resistência mecânica, porém ambos os autores trabalharam apenas com a compactação imediata (tempo de 0 min entre homogeneização e compactação) da mistura solo-cimento.

Carneiro (2009) trabalhou com uma areia siltosa e Consoli et al. (2007) com uma areia argilosa, e ambos os autores analisaram a mistura solo-cimento com teores de 1, 2, 3, 5 e 7 %, mencionando que a adição pode ser realizada em pequenas percentagens, pois mesmo assim o ganho de resistência é significativo. À medida que se aumenta o teor de cimento, a resistência também aumenta, mas ao acrescentar em excesso o cimento, para além das quantidades necessárias, haverá inconvenientes, quer a nível econômico e ou a nível técnico.

Souza et al. (2008) avaliou uma areia fina siltosa com teores de cimento de 6, 8 e 10 % de cimento e Floss (2012) uma mistura solo-cimento utilizando um solo denominado de areia fina a média pedregulhosa com teores de 1, 2, 3, 5, 7 e 9 % de cimento. Estes autores mencionam que a adição de cimento acarreta a redução da porosidade, gerando acréscimo de resistência à compressão simples no solo-cimento.

A Figura 4 apresenta o teor de cimentos *versus* a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento analisada por Carbelon (2008) utilizando uma areia uniforme de Osório (Rio Grande do Sul), com compactação imediata (no tempo de 0 minuto) apresentando variação exponencial.

**Figura 4** - Teor de cimento *versus* resistência à compressão simples da mistura solo-cimento

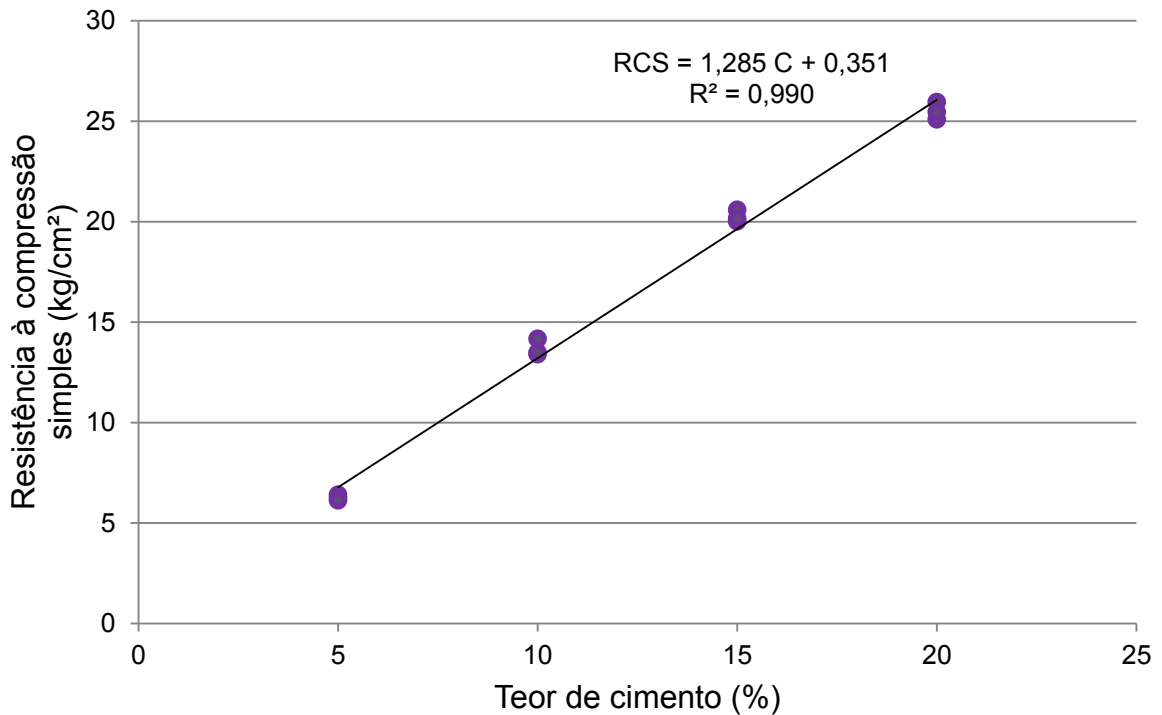


**Fonte:** Carbelon (2008) modificado pelo autor

Pereira (2009) relata que o cimento exerce a sua ação estabilizante conforme seu teor na mistura, que consiste no aumento da resistência do solo-cimento devido à ação aglutinante do cimento (cimentando as partículas de solo) e seu efeito é preponderante quando os teores em cimento são mais altos.

A Figura 5 apresenta a relação do teor de cimento *versus* a resistência à compressão simples para uma areia fina argilosa estudada por Sanbonsuge (2013), que trabalhou com um solo classificado como A-2-4 pela AASHTO (areia fina a média) com compactação imediata.

**Figura 5** - Teor de cimento *versus* resistência à compressão simples da mistura solo-cimento



**Fonte:** Sanbonsuge (2013) modificado pelo autor

Verifica-se que a granulometria do solo estabilizado com cimento acarreta na modificação das tendências das curvas apresentadas tanto por Carbelon (2008) quanto para por Sanbonsuge (2013), necessitando de verificação para cada tipo de solo.

Zortéa et al. (2001) afirma que independente da mistura utilizada o aumento no teor de cimento acarretará aumento da resistência à compressão simples da mistura solo-cimento. Castro (2008) verificou a influência do teor de cimento na resistência à compressão simples de um solo denominado de areia média a fina argilosa utilizando três partes de cimento/solo de 1/10, 1/12 e 1/15, afirmando que a escolha do teor de cimento mínimo, deve ser capaz de assegurar a estabilidade necessária e de garantir à mistura a permanência de suas características, que é uma imposição do critério de economia.

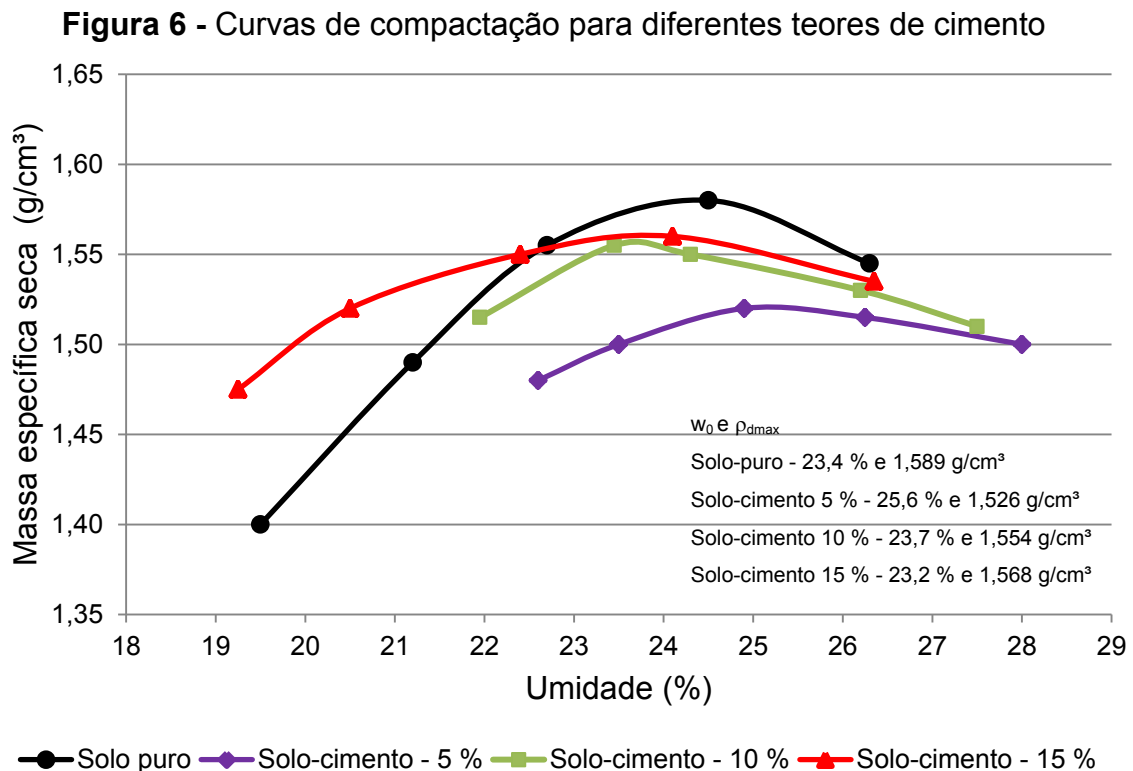
Conforme mencionado por Ingles e Metcalf (1972) as propriedades dos solos mudam quando estabilizados com cimentos: a capacidade de carga e a durabilidade aumentam, em geral a permeabilidade diminui e a aumenta a retração da mistura quando utilizado solos granulares. Estes autores ainda salientam que as

propriedades gerais da mistura solo-cimento dependem primeiramente da quantidade de cimento e em segundo da compactação da mistura.

O teor de cimento relaciona-se diretamente com a resistência à compressão simples, mas acarreta modificação em outras características da mistura compactada.

Pereira (2012) ao trabalhar com um solo silto argiloso com 3, 6 e 9 % de cimento em relação à massa de solo seca, verificou aumento da massa específica e diminuição no teor de umidade ótima quando o teor de cimento aumenta.

A Figura 6 apresenta curvas com diferentes teores de cimento analisadas por Teixeira (2014) quando estudou um solo silto arenoso.



Fonte: Teixeira (2014) modificado pelo autor

Cancian (2013) e Cancian et al. (2016, no prelo) avaliando um solo arenoso obtiveram aumento na massa específica seca máxima e aumento no teor de umidade ótima da mistura com o acréscimo no teor de cimento ao utilizar uma areia média a fina argilosa e empregados teores de 6 e 7 % de cimento em relação à massa de solo seca. Logo é possível verificar ao analisarmos os trabalhos que a

granulometria do solo interfere nas características da curva de compactação da mistura solo-cimento.

#### 2.4.10.2 Influência do teor de umidade

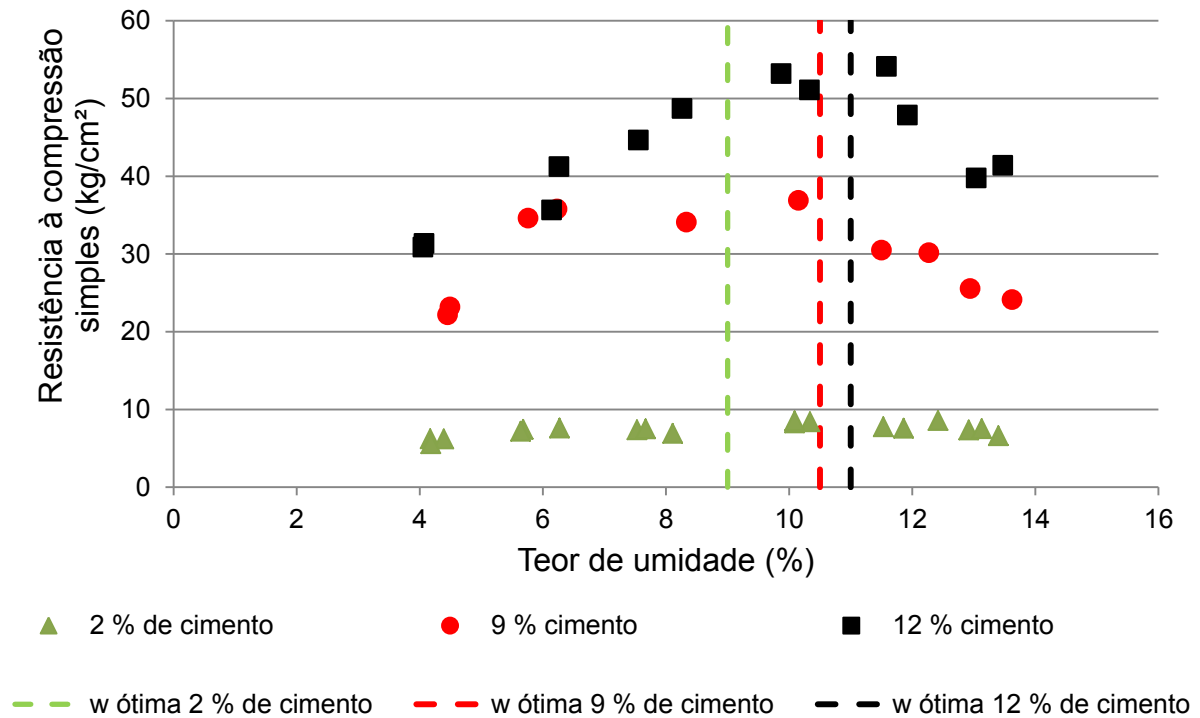
A presença de água é importante para hidratar o cimento, para melhorar a trabalhabilidade e facilitar a compactação da mistura solo-cimento (VITALI, 2008).

Stracke et al. (2012) avaliando teores de umidade de 6, 8, 12 e 14 % e teores de cimento de 3, 5, 7 e 9 % utilizando areia fina muito uniforme, e Sanbonsuge (2013) após realizar seus trabalhos concluíram que a maior resistência do solo-cimento acontece próximo ao ponto de umidade ótima das misturas estudadas.

Vitali (2008) ainda afirma que a resistência à compressão simples cresce até o ponto de umidade ótima e após isso começa a decrescer. Este autor trabalhou com teores de umidade de 5, 7, 9, 11, 13, 15 e 17 % e mencionou que a maior resistência aconteceu no ponto ótimo da mistura.

Consoli et al. (2007) e Foppa (2005) em seus trabalhos utilizaram misturas solo-cimento, com uma areia fina siltosa e teores de cimento 2, 9 e 12 %. Esses autores explicam que o mecanismo pelo qual a umidade afeta a resistência está relacionado com a estrutura conferida ao solo-cimento, onde a quantidade de água presente na mistura é fundamental para a sua configuração. Foppa (2005) e Consoli et al. (2007) verificaram que a maior resistência ocorre na umidade ótima. A Figura 7 apresenta o descrito anteriormente pelos autores.

**Figura 7 -** Teor de umidade *versus* resistência à compressão simples da mistura solo-cimento



**Fonte:** Foppa (2005) modificado pelo autor

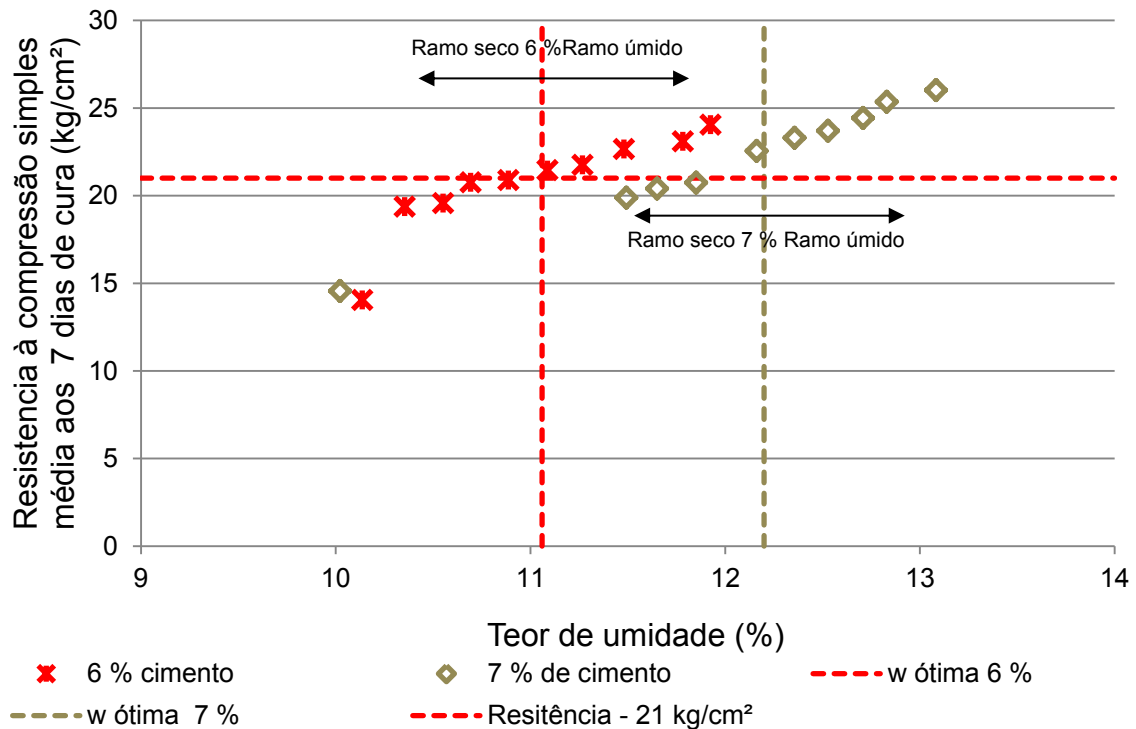
Fonini (2012) trabalhando com solo denominado de areia fina uniforme e teores de cimento de 1, 2, 3, 5 e 7 %, relata em seu trabalho que a quantidade de água deve ser tal que promova as reações do cimento, não podendo ser colocada demasiadamente a fim de produzir efeito adverso.

Vitali, Rios e Fonseca (2012) mencionam que a resistência à compressão simples é inferior para umidades abaixo e acima da umidade ótima da mistura. Rojas (2012) prescreve que antes da umidade ótima a estrutura do solo-cimento mostra-se floculada e após a umidade ótima apresenta-se dispersa, em ambas as estruturas a porosidade é elevada.

Cancian (2013) e Cancian et al. (2016, no prelo) realizaram compactações com 1 % de umidade acima da ótima para os teores de 6 e 7 % de cimento, e mantiveram a massa específica constante nos corpos de prova, constatando melhor desempenho mecânico da mistura compactada. Estes autores verificaram a influência do teor de umidade sobre a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento e encontraram decréscimo de resistência com a diminuição do teor de umidade da mistura. A Figura 8 apresenta a resistência à

compressão simples *versus* o teor de umidade das misturas realizadas por Cancian (2013) e Cancian et al. (2016, no prelo).

**Figura 8** - Teor de umidade *versus* resistência à compressão simples da mistura solo-cimento



Fonte: Cancian (2013) modificado pelo autor

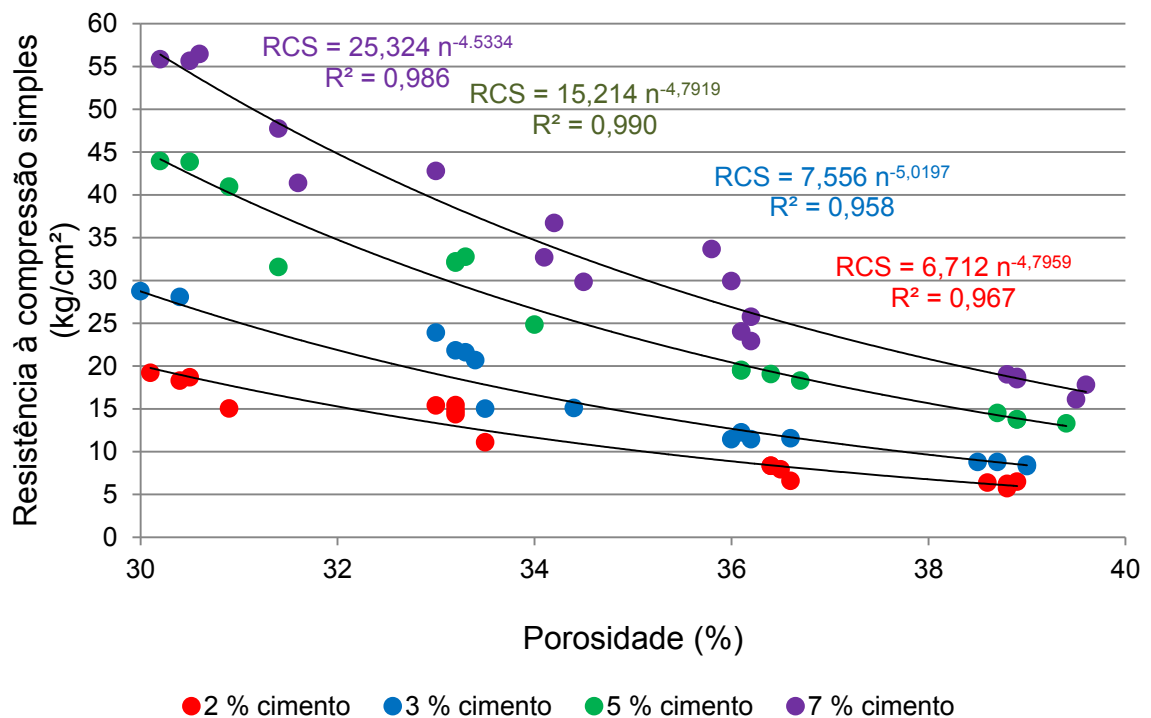
#### 2.4.10.3 Influência da porosidade

Vitali, Rios e Fonseca (2012) descrevem o comportamento da mistura em relação à porosidade *versus* a resistência à compressão simples e apontam que quanto maior a porosidade da mistura solo-cimento, menor é o desempenho mecânico. Carneiro (2009) ainda complementa que o fato independe do teor de cimento utilizado na mistura. Vitali (2008) mostra para o solo estudado que a variação da porosidade em relação à resistência à compressão simples foi exponencial. Lopes et al. (2009) ao realizar seu trabalho encontrou as maiores resistências à compressão simples para menores valores de porosidade e de tendência exponencial.

Foppa (2005), Consoli et al. (2007), Carbelon (2008) e Stracke et al. (2012) além de verificarem a diminuição da resistência à compressão simples, mostraram que esta varia exponencial em função da porosidade quando foi usada

uma areia fina uniforme. Ambos os autores afirmam que a diminuição da porosidade indica um maior número de contatos entre os grãos de solo, cimento e água, e assim maior hidratação do estabilizante com maior cimentação da mistura. A Figura 9 mostra a variação exponencial da resistência à compressão simples em função da porosidade.

**Figura 9** - Porosidade versus resistência à compressão simples da mistura solo-cimento



**Fonte:** Vitali (2008) modificado pelo autor

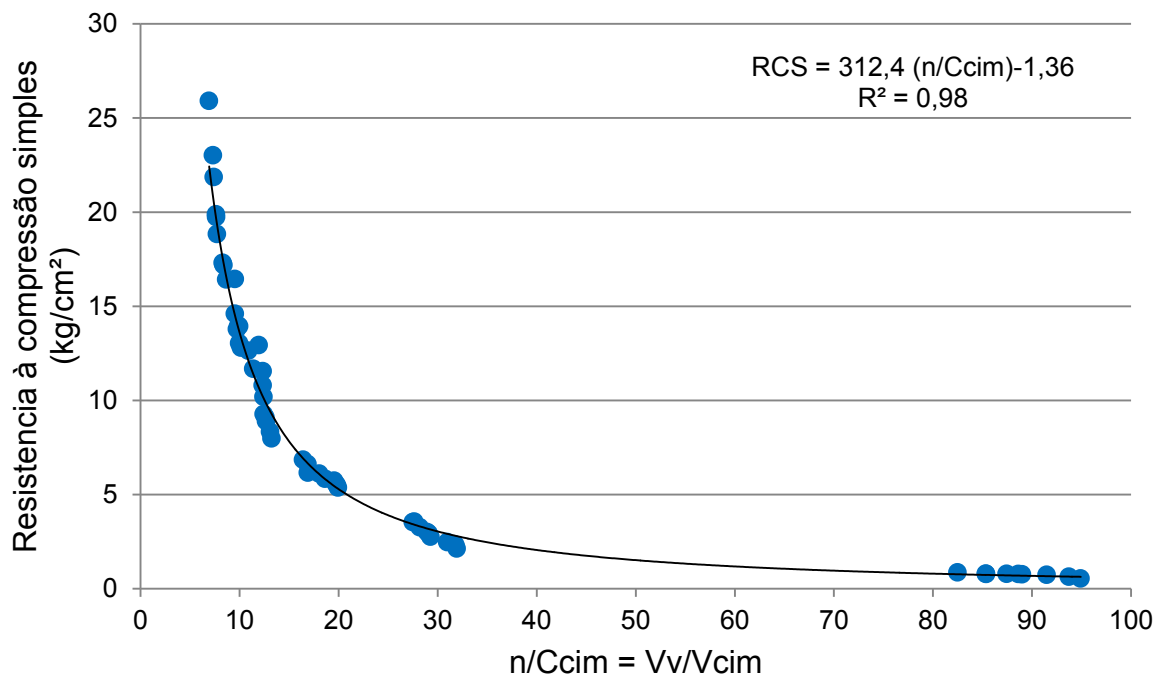
Cancian (2013) e Cancian et al. (2016, no prelo) constataram aumento com tendência linear da resistência à compressão simples com a diminuição da porosidade. E, além disso, verificaram esta mesma tendência para a absorção em relação à porosidade da mistura. Novamente que de acordo com o solo analisado existem diferentes tendências quando se relaciona a porosidade e a resistência à compressão simples. Rojas (2012) afirma que ao diminuir a porosidade menor será a permeabilidade do solo-cimento. As Figuras 10 e 11 apresentam as relações descritas anteriormente por Cancian (2013) e Cancian et al. (2016, no prelo) para o teor de 6 % de cimento.



Vitali (2008) e Stracke et al. (2012) mencionam a existência do fator volume de vazios/volume de cimento (também conhecido como porosidade/consumo de cimento), e que a partir deste é possível escolher a quantidade de cimento apropriada para uma resistência desejada. De acordo com Pereira (2009) o fator  $Vv/V_{cim}$  apresenta-se como um bom parâmetro de projeto para estimar a resistência à compressão simples da mistura compactada.

Floss (2012), Fonini (2012) e Rios et al. (2012), afirmam que a resistência à compressão simples diminui com o aumento do fator porosidade/consumo de cimento ( $n/C_{cim}$ ). Foppa (2005), Carbelon (2008), Vitali (2008), Pereira (2009) e Johann (2013) estudaram o fator volume de vazios/volume de cimento ( $Vv/V_{cim}$ ) na mistura, e mostraram que a diminuição do fator acarreta no aumento da resistência à compressão simples. A Figura 12 apresenta o descrito anteriormente para o fator  $n/C_{cim}$  versus resistência à compressão simples.

**Figura 12** - Porosidade/Consumo de cimento versus resistência à compressão simples da mistura solo-cimento



**Fonte:** Carbelon (2008) modificado pelo autor

Carneiro (2009) explica que quando há uma diminuição da porosidade, aumenta-se o contato entre os elementos de hidratação do cimento e as

partículas de solo, favorecendo a cimentação, portanto a resistência à compressão simples da mistura.

#### 2.4.10.4 Influência da energia de compactação

Quando o solo-cimento é compactado ligações químicas se desenvolvem entre as superfícies adjacentes das partículas de cimento e solo, não podendo mais deslizar umas sobre as outras e em seguida, cria-se as ligações que fazem a estabilização da mistura (OLIVEIRA, 2011).

Lopes et al. (2009), Pereira (2012) e Teixeira (2014) em seus trabalhos utilizaram 3 diferentes energias de compactação (energia normal, intermediária e modificada) para compactar a mistura solo-cimento e constaram melhor desempenho da mistura para a maior energia utilizada, porém todos os autores mencionados utilizam a compactação imediata da mistura (0 minuto). Conforme mostra o Quadro 7, com os valores obtidos por Pereira (2012), ocorre o aumento da resistência com a elevação da energia para a compactação imediata da mistura solo-cimento.

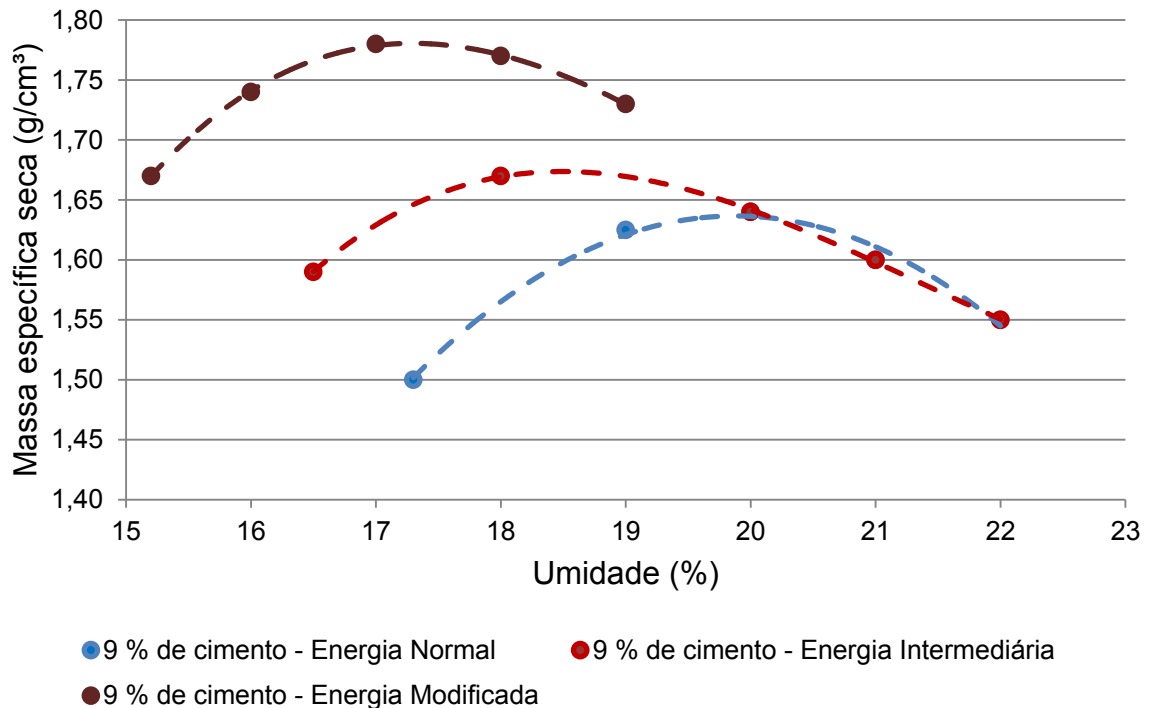
**Quadro 7 - Resistência à compressão simples em função da energia de compactação da mistura**

Resistência à compressão simples média (kg/cm <sup>2</sup> )			
Energia	Teor de cimento (%)		
	3	6	9
Normal	5,68	15,31	19,55
Intermediária	11,45	19,83	22,61
Modificada	21,89	26,04	38,81

**Fonte:** Pereira (2012)

Pereira (2012) aumentou a energia de compactação da mistura solo-cimento e verificou o aumento da massa específica seca máxima e a diminuição do teor de umidade ótima da mistura. A Figura 13 apresenta a massa específica e a umidade da mistura solo-cimento quando variada a energia de compactação para uma mistura com 9 % de cimento.

**Figura 13** - Massa específica seca e umidade para diferentes energias da compactação aplicadas na mistura solo-cimento



**Fonte:** Pereira (2012) modificado pelo autor

Korf (2011) trabalhou com a permeabilidade do solo-cimento. Este autor utilizou energia normal e intermediária, verificando a diminuição da permeabilidade da mistura com o aumento da energia de compactação. Pereira (2009) analisou a variação no grau de compactação de 90 a 100 % da mistura, variando o número de golpes nos corpos de prova de solo-cimento. A resistência à compressão simples do solo-cimento foi maior com o grau de compactação igual a 100 %.

#### 2.4.10.5 Influência do tempo de cura

Dias (2012) menciona que existem várias formas de cura (a vapor, em câmara úmida, entre outras) e estas podem diferenciar o comportamento mecânico do solo-cimento.

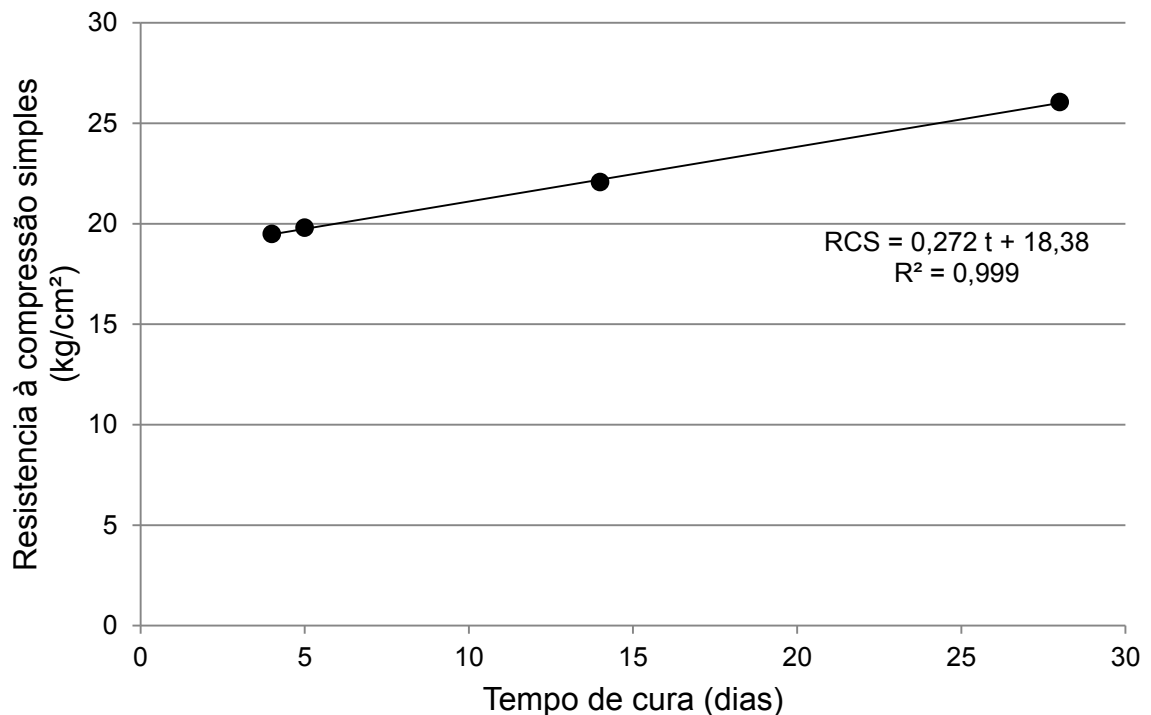
De acordo com Lopes et al. (2009), a cura do solo-cimento é um conjunto de operações ou procedimentos adotados para se evitar a evaporação da água de amassamento e a hidratação do cimento presente nas regiões superficiais da mistura. A cura, em condições adequadas, tem como objetivos:

- Impedir a perda da água da mistura;
- Controlar a temperatura do material, até que se alcance o nível de resistência desejado; e
- Suprir água necessária para as reações de hidratação do cimento.

Há, no entanto, outros fatores a serem considerados como condições locais, temperatura ambiente, existência de ventilação, umidade relativa do ar, como prescrito em norma.

Souza et al. (2008), Carneiro (2009), Fiorini (2012), Kolling et al. (2012) e Oliveira et al. (2014) constataram a elevação da resistência à compressão simples com o aumento do tempo de cura, de 7 para 14 e 28 dias, confirmando que o tempo de cura influencia na resistência do solo-cimento. A Figura 14 apresenta o tempo de cura *versus* resistência à compressão simples da mistura solo-cimento compactada.

**Figura 14** - Tempo de cura *versus* resistência à compressão simples da mistura solo-cimento compactada



**Fonte:** Carneiro (2009) modificado pelo autor

Milani e Freire (2008) e Morreti et al. (2013) trabalharam com tempo de cura maior que os pesquisadores anteriores, variando de 7 a 360 dias, verificando também o aumento da resistência à compressão simples da mistura solo-cimento.

Pereira (2012) e Johann (2013) explicam que o aumento da resistência com o aumento do tempo de cura da mistura de solo-cimento, é promovido pelas reações pozolânicas, as quais proporcionam ganhos efetivos de resistência às misturas compactadas. Mas estas reações são lentas estendendo-se por longos períodos de tempo e tem relação com o teor de cimento. Quanto maior o teor de cimento maior é o ganho para tempos de cura mais longos.

#### 2.4.10.6 Influência do tempo para a compactação

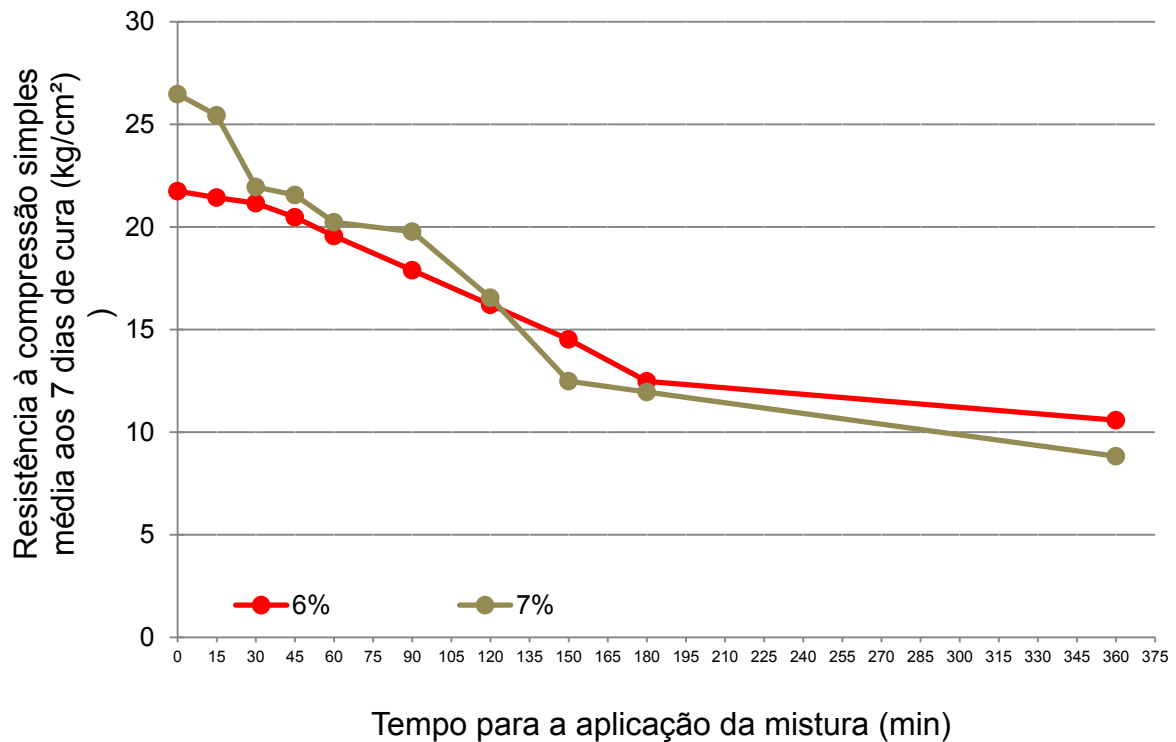
O tempo para a compactação da mistura corresponde ao intervalo de tempo entre a homogeneização dos materiais e a sua compactação.

Ao se empregarem as técnicas de estabilização química com cimento em solos, o tempo entre mistura e compactação é um aspecto de significativa importância para a boa qualidade mecânica. Se na mistura, já ocorreram reações de cimentação de curto prazo antes da compactação, certamente parte do estabilizante adicionado ao solo foi utilizada na efetivação dessas reações. Esta quantidade não será utilizada na cimentação da mistura compactada, diminuindo a resistência à compressão simples (MILANI, 2008).

Felt (1955) e West (1959) realizaram trabalhos nos Estados Unidos da América, e verificaram a influência do tempo na resistência à compressão simples. Os autores evidenciaram a queda da resistência do solo-cimento com o aumento do intervalo de tempo para a compactação da mistura.

A demora na compactação da mistura solo-cimento, a relação entre a umidade, massa específica seca e resistência mudam. Entretanto, a perda de resistência do solo-cimento resultante desta demora na compactação da mistura fresca pode ser significativamente reduzida (CANCIAN, 2013; CANCIAN et al., 2015, CANCIAN et al., 2016, no prelo). A Figura 15 obtida por Cancian (2013), mostra a perda de resistência devido ao aumento do tempo para a compactação tanto para 6 quanto para 7 % de cimento nas misturas.

**Figura 15** - Tempo para a compactação *versus* resistência à compressão simples da mistura solo-cimento



**Fonte:** Cancian (2013) modificado pelo autor

A reação química entre o cimento e a água inicia-se durante a operação de mistura, estando os elementos resistentes provenientes da hidratação formados ao fim de aproximadamente uma hora. Um aumento do tempo de mistura e o atraso da compactação conduzem a diminuição quantidade de água e conseqüentemente o decréscimo da massa específica seca, acarretando na diminuição da resistência e da durabilidade da mistura solo-cimento compactada (VITALI, 2008).

Ferguson (1993) verificou a influência do tempo para a compactação da mistura de solo e cinza volante no decréscimo de resistência à compressão, que foi significativo com o aumento do tempo para a compactação.

Cancian (2013), Cancian et al. (2015) e Cancian et al. (2016, no prelo) em suas pesquisas compactaram as misturas solo-cimento após homogeneização nos tempos de 0 a 360 minutos. Os resultados obtidos foram importantes para o entendimento da influência do tempo para a compactação da mistura solo-cimento sobre a resistência à compressão simples.

Estes autores mostraram que o tempo máximo para a compactação da mistura solo-cimento é limitado, apresentando-se em função do teor de umidade

e da energia de compactação, uma vez que as resistências à compressão simples das misturas solo-cimento estudadas diminuíram com o aumento do tempo para a compactação independente do teor de cimento utilizado.

#### 2.4.10.7 Resistência à compressão simples

Para o emprego do solo modificado por cimento, o método de dimensionamento tradicional tem como referência o ensaio de resistência à compressão simples para obter o coeficiente de equivalência estrutural (valor empírico definido como a relação entre as espessuras de uma base granular e de uma camada de solo-cimento, considerando desempenho semelhante) um dos parâmetros necessários para definir espessuras das camadas do pavimento rodoviário (PEREIRA, 2009; OLIVEIRA, 2011).

O ensaio de resistência à compressão simples é na maioria dos programas experimentais relatados na literatura, a fim de verificar a eficácia da estabilização de solos e avaliar a importância dos fatores que influenciam na resistência dos solos cimentados (STRACKE et al., 2012).

Uma das razões da utilização do ensaio de compressão simples é a experiência acumulada com o concreto. Além disso, este ensaio é simples, rápido, confiável e barato (JOHANN, 2013).

A resistência à compressão tem sido usada como um parâmetro de dosagem, ela serve para indicar o grau de reação da mistura de solo-cimento (CASTRO, 2008).

A resistência à compressão do solo-cimento depende do tamanho e formas das partículas do solo, bem como do vínculo estabelecido entre as mesmas pelo processo de cimentação, devido ao tempo de homogeneização da mistura (OLIVEIRA, 2011).

Prietto (1996) verificou para solos arenosos cimentados, que a resistência à compressão simples é uma medida direta do grau de cimentação do solo-cimento.

Foppa (2005) menciona que a resistência à compressão simples do solo-cimento não é função apenas do teor de cimento, mostrando-se variação em relação a outros fatores como massa específica, forma e natureza das partículas.

#### 2.4.10.8 Reações químicas da mistura solo-cimento

Basso et al. (2003) menciona que basicamente os mecanismos de reação da mistura solo-cimento se devem às reações dos constituintes anidros do cimento. Em presença de quantidade suficiente de água, se hidratam e endurecem, em virtude de processos químicos bastante complexos. Assim, o processo de estabilização do solo com o cimento é resultante do desenvolvimento de reações químicas no cimento em hidratação, a partir das quais se desenvolvem vínculos entre as superfícies das partículas de cimento e de solo. O mecanismo de estabilização do solo são as ligações mecânicas e químicas entre o cimento e a superfície rugosa dos grãos. O cimento se fixa através dos pontos de contato entre os grãos.

Os métodos de alteração que ocorrem no solo-cimento são, por métodos físicos (hidratação - cimentação e endurecimento devido à hidratação de cimento Portland) e métodos químicos (trocas iônicas - processos complexos de mudanças da adsorção nas partículas de solo - trocam de bases) (DIAS, 2012).

Vendrelusco (2003) mostra que o uso de estabilizantes que interajam com as partículas do solo visa à melhoria e à estabilidade de suas propriedades mecânicas e hidráulicas. As ligações químicas que se desenvolvem entre o cimento e as superfícies minerais são mais importantes nas misturas de granulação mais fina.

De acordo com Enamorado (1990), em solos coesivos, o cimento ao hidratar-se, desenvolve fortes pontes entre grãos do solo formando uma matriz muito efetiva na fixação das partículas, tal que elas não possam deslizar umas em relação às outras. Assim, o cimento não só destrói a plasticidade, como ainda produz um incremento na resistência.

Vendrelusco (2003) menciona que as reações ocorridas no sistema solo-cimento podem ser divididas em reações primárias e reações secundárias. Em solos muito granulares e sem argila, a ação cimentante ocorre por meio dos produtos das reações primárias (hidratação e hidrólise); já em solos predominantemente argilosos, a ação cimentante ocorre por meio das reações secundárias (ataque alcalino).

Pereira (2009) relata que o cimento Portland é constituído normalmente por 45 % de silicatos tricálcicos e 27 % de silicatos bicálcicos, e hidrata

com o solo formando um gel de silicato de bi e monocálcico. O gel de silicato de cálcio insolúvel cristaliza lentamente formando uma matriz. Este autor ainda menciona que se a quantidade de cimento utilizada não poder preencher totalmente os poros da mistura compactada, o cimento hidratado tenderá a ligar apenas as áreas de contato das partículas, que por sua vez irão depender da granulometria do solo utilizado.

Ceratti e Casanova (1988) afirmam que nas reações primárias é produzida a cal. Nas reações secundárias, as substâncias cimentantes são formadas sobre as superfícies das partículas de argila ou em sua vizinhança, causando a floculação dos grãos de argila cimentados nos pontos de contato.

Além destas modificações iniciais, Abiko (1980) afirma que, ao longo do tempo, formam-se compostos cimentantes que contribuem para a melhora das propriedades do material, determinadas pelas reações pozolânicas (resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica).

Logo após a adição do cimento Portland em solos finos é possível verificar as alterações na mistura, com a ocorrência do fenômeno da floculação e de alterações nos limites de liquidez e de plasticidade do solo. Tais acontecimentos são devidos à atração das partículas de argilo-minerais pelos íons de cálcio mantendo-as juntas por fracas ligações químicas (BELL, 1996).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e os métodos utilizados, as escolhas dos teores de cimento das baterias, os tempos para a compactação das misturas, os equipamentos usados e a programação realizada para esta pesquisa.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Água

A água utilizada nos experimentos foi potável, fornecida pela Companhia de Saneamento do Estado do Paraná - SANEPAR. Esta empresa realiza frequentemente análises físico-químicas completas, bem como dos principais agrotóxicos usados na região e de metais pesados de todos os seus mananciais de captação. A água usada na mistura de solo-cimento atende os requisitos da norma DNIT-ES 143/2010.

##### 3.1.2 Cimento

O cimento Portland com adição de pozolana com resistência aos 28 dias igual ou superior a 32 MPa (CP II-Z-32) foi empregado nesta pesquisa. Na Tabela 1 são mostradas as características técnicas do cimento utilizado.

Foi realizado o correto manuseio e armazenamento do cimento utilizado, seguindo-se a recomendação do fabricante, e conforme este, o cimento utilizado atende os requisitos prescritos nas normas NBR 11578/1991, NBR 5732/1991, NBR 5736/1991 e demais normas para este tipo de material.

**Tabela 1** - Especificações técnicas do cimento utilizado (NBR 5736/1991)

Tipo de ensaio	Químico				Físico				
	PF	Teores (%)			R.C.S.	Finura (%)	Tempo de		Blaine
NBR 5736/1991		MgO	SO <sub>3</sub>	RI	28 dias	# 200	Início	Fim	cm <sup>2</sup> /g
Limites	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤	≤ 32,0	≤ 12,0	≥ 60	≤	≥ 2600
Valor	5,2	5,8	2,5	11,3	35,4	2,2	322	401	3470

Fonte: NBR 5736/1991

O cimento utilizado atendeu as especificações das normas vigentes, podendo ser utilizado para a realização dos ensaios da pesquisa.

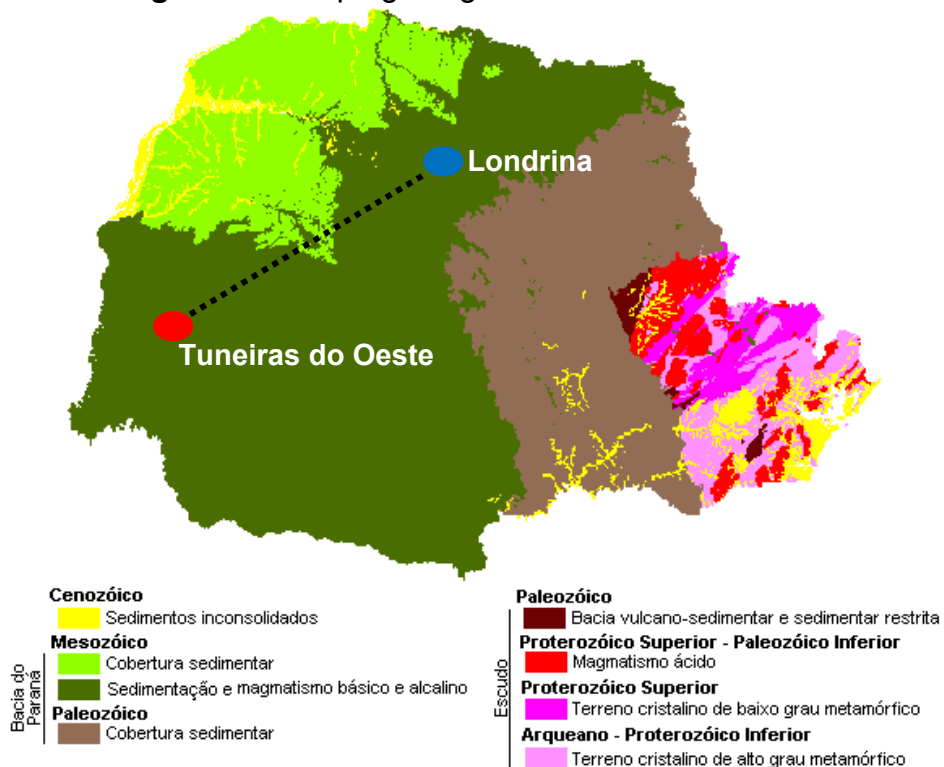
### 3.1.3 Solo

#### 3.1.3.1 Características regionais

O local da coleta das amostras de solo está situado na região Oeste do Estado do Paraná. Localizando-se no terceiro planalto, onde a geologia é constituída por rochas vulcânicas da formação Serra Geral e posicionada na área central da bacia Sedimentar do Paraná (MINEROPAR, 2016).

A Figura 16 ilustra o mapa geológico do Estado do Paraná, onde é possível visualizar o círculo vermelho, local da coleta da amostra de solo deformada, e o círculo azul, onde foram realizados os experimentos da pesquisa. A distância entre o município da jazida, Tuneiras do Oeste, e o município de realização dos ensaios, Londrina, é de 235 km.

**Figura 16 - Mapa geológico do Estado do Paraná**



Fonte: Mineropar (2016) modificada pelo autor

O estado do Paraná está localizado na região de clima Subtropical, com temperaturas amenas, com pequena parte de seu território na região de clima Tropical (CLIMA DO PARANÁ, 2016). A região Oeste apresenta médias de 1.300 milímetros de precipitação de água ao longo do ano, apresentando invernos predominantemente secos e os verões chuvosos.

### 3.1.3.2 Jazida de solo

A jazida de solo está localizada nas proximidades do km 127 da rodovia federal, denominada de BR-487/PR, situada no trecho entre os km 117 e 140, que é administrado pelo DNIT.

O solo utilizado para a realização da pesquisa deve atender a requisitos das normas do DNIT, obrigatoriamente a norma de especificação de serviço de base de solo-cimento, a DNIT-ES 143/2010, a qual define as características físicas do solo a ser utilizado para a realização da mistura solo-cimento.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Plano Experimental da Pesquisa

O plano experimental de atividades da pesquisa foi dividido em:

- 1 - Coleta da amostra de solo, armazenagem em sacos plásticos e transporte até o laboratório;
- 2 - Secagem ao ar livre do solo coletado e posterior armazenagem;
- 3 - Ensaio de caracterização física do solo;
- 4 - Ensaio complementares (compactação, Índice de Suporte Califórnia e classificação) do solo;
- 5 - Definição dos teores de cimento;
- 6 - Ensaio de compactação das misturas solo-cimento;
- 7 - Escolha das baterias, compactações e dos tempos para a compactação da mistura solo-cimento;

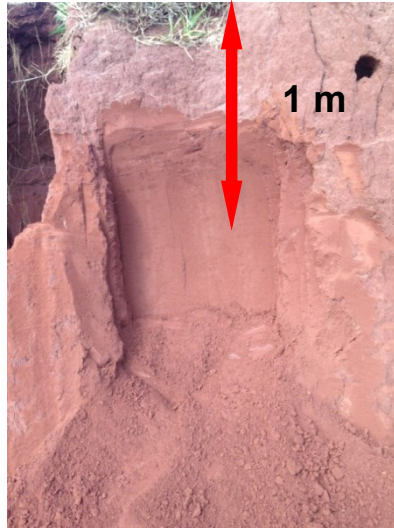
- 8 - Ensaio de compactação dos corpos de prova de solo-cimento, para as diferentes baterias e tempos para a compactação estipulados;
- 9 - Cura dos corpos de prova de solo-cimento;
- 10 - Ensaio de absorção de água após 4 horas de imersão dos corpos de prova de solo-cimento; e
- 11 - Ensaio de compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento.

### 3.2.2 Coleta de Solo

As amostras deformadas de solo foram retiradas a profundidade de 1 metro, com o auxílio de equipamentos manuais como enxada, pá e picareta, de um talude localizado no km 127 da rodovia.

Após coletadas, as amostras de solo foram armazenadas em sacos plásticos e transportadas até o Laboratório de Geotecnia. No total foi coletada uma amostra de 1000 kg. A Figura 17 mostra o local de coleta de solo.

**Figura 17** - Local de coleta do solo



**Fonte:** O próprio autor

### 3.2.3 Preparação da Amostra para os Ensaio de Caracterização Física do Solo

Após a coleta e transporte até o laboratório, o solo foi seco ao ar livre, para atingir a umidade higroscópica, verificando-se esta através da utilização do método da estufa.

Após a secagem da amostra, foi realizado o destorroamento com o auxílio de almofariz e mão de grau, com a intenção de separar os grãos do solo, para isto, este procedimento foi feito vagarosamente.

Seguindo com a preparação da amostra, foi necessária a armazenagem em sacos plásticos com capacidade de 25 litros, corretamente vedados e identificados, para evitar o extravio de material.

Por fim foi determinado o teor de umidade da amostra de solo armazenada, através da utilização de uma estufa elétrica com temperatura de 105 °C, balança com precisão de 0,01 g e cápsulas de alumínio, conforme a DNER-ME 213/1994. O próximo passo foi à determinação das características físicas do solo.

### 3.2.4 Ensaio de Caracterização Física do Solo

Estes ensaios foram necessários para verificar se o solo coletado poderia ser empregado na mistura solo-cimento, segundo as normativas do DNIT, para sua utilização como base de pavimento rodoviário. A amostra de solo foi submetida aos seguintes ensaios de caracterização física apresentados na Tabela 2 e aos ensaios complementares como compactação e Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.), além da sua classificação segundo a AASHTO conforme a Tabela 3.

**Tabela 2 - Ensaio de caracterização física do solo**

Ensaio de caracterização física	Normativa ou método aplicado	Número de
Massa específica dos sólidos	DNER-ME 093/1994	3
Limite de plasticidade	DNER-ME 082/1984	2
Limite de liquidez	DNER-ME 122/1994	2
Análise granulométrica por sedimentação	NBR 7181/1984	2
Análise granulométrica por peneiramento	DNER-ME 080/1994	2

**Fonte:** o próprio autor

**Tabela 3** - Ensaios complementares e classificação do solo

Ensaios complementares e	Normativa ou Método aplicado	Número de
Compactação	NBR 7182/1986	2
Índice de Suporte Califórnia	DNER-ME 049/1994	2
Classificação AASHTO	MANUAL PAVIMENTAÇÃO DNIT/2006	1

**Fonte:** o próprio autor

Com a finalidade de obter a curva granulométrica da fração fina do solo, foi realizada a análise granulométrica por sedimentação, de acordo com a NBR 7181/1984. Foram realizados dois ensaios de sedimentação, um com a utilização de defloculante (hexametáfosfato de sódio) e outro sem a utilização de defloculante. A Figura 18 apresenta as duas provetas com solo quando realizado o ensaio de sedimentação.

**Figura 18** - Provetas graduadas com amostras

(a)

(b)

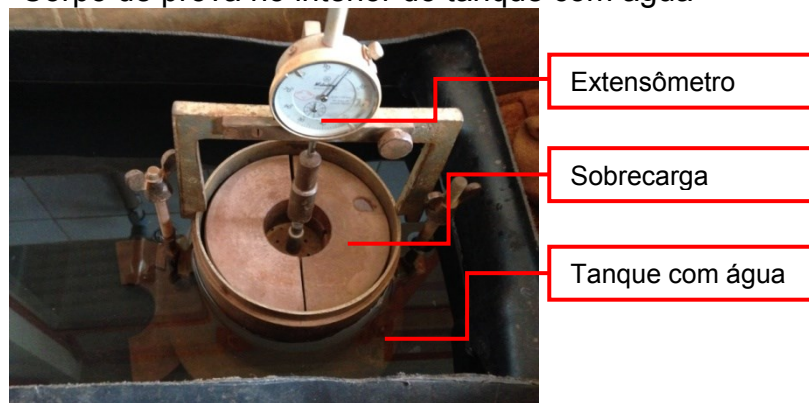
**Fonte:** O próprio autor - (a) amostra com água destilada e solo após o ensaio de sedimentação (b) amostra com água destilada, solo e 125 ml de hexametáfosfato de sódio após a realização do ensaio de sedimentação

O Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.) ou Califórnia Bearing Ratio (C.B.R.), é um ensaio muito difundido no meio rodoviário, pois este é utilizado para estimar o comportamento mecânico do solo e, é a base para o dimensionamento da espessura das camadas do pavimento rodoviário.

Este ensaio foi realizado conforme a DNER-ME 049/1994. Geralmente este ensaio é realizado em conjunto com a curva de compactação do solo, mas não foi o caso desta pesquisa.

O ensaio do I.S.C. foi realizado apenas para o teor de umidade ótima e massa específica seca máxima obtidos da curva de compactação do solo, e a prensa utilizada para o ensaio apresentou um coeficiente (K) do anel de 14,744. A Figura 19 mostra o corpo de prova no interior do tanque com água, com as sobrecargas e extensômetro.

**Figura 19** - Corpo de prova no interior do tanque com água



**Fonte:** O próprio autor

A classificação conforme a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) está contida no Manual de Pavimentação Rodoviária (2006), e foi realizada após adquiridos todos os parâmetros necessários para classificar o solo quanto à sua granulometria, referente à porcentagem passante na peneira # 200 (0,075 mm), # 40 (0,42 mm) e # 10 (2,00 mm), e os limites de consistência de Atterberg.

### 3.2.5 Teores de Cimento e Curvas de Compactação das Misturas Solo-cimento

#### 3.2.5.1 Definição dos teores de cimento

De acordo com a literatura para o solo arenoso os teores de cimento da mistura devem ser de 6 a 10 % (MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DNIT, 2006). Cancian (2013) em sua dissertação de mestrado utilizou este mesmo solo para analisar a mistura solo-cimento com teores de 6 e 7 % de cimento em relação à

massa de solo seca. Nesta pesquisa foram escolhidos outros três teores de cimento, 8, 9 e 10 %, também em relação à massa de solo seca. Por não estar repetindo os teores utilizados deste outro autor e tendo como limite máximo a porcentagem determinada na literatura.

### 3.2.5.1.1 Curvas de compactação das misturas solo-cimento

Definidos os teores de cimento, foram realizadas as compactações para a obtenção das curvas das misturas solo-cimento. A Tabela 4 mostra a quantidade de ensaios de compactação.

**Tabela 4** - Ensaios de compactação das misturas solo-cimento

Ensaio	Norma aplicada	Teor de	Número de	Número de
Compactação do solo-cimento	DNER-ME 216/1994	8	10	2
Compactação do solo-cimento	DNER-ME 216/1994	9	10	2
Compactação do solo-cimento	DNER-ME 216/1994	10	10	2

**Fonte:** o próprio autor

A Figura 20 mostra os materiais utilizados e sua homogeneização.

**Figura 20** - Materiais utilizados e homogeneização da mistura





**Fonte:** O próprio autor - (a) materiais utilizados no ensaio (b) distribuição do cimento sobre o solo  
(c) homogeneização do solo e cimento (d) homogeneização do solo, cimento e água

A Figura 21 mostra alguns procedimentos da compactação dos corpos de prova de solo-cimento.

**Figura 21** - Corpo de prova de solo-cimento após a compactação, massa mensurada e equipamento de extrusão



**Fonte:** O próprio autor - (a) corpo de prova de solo-cimento compactado (b) massa do cilindro com corpo de prova (c) corpo de prova de solo-cimento extrudado (d) massa do corpo de prova isoladamente

Com os 5 pares de valores de massa específica seca e teor de umidade, foi possível a construção da curva de compactação, com o objetivo de obter a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótima para a mistura solo-cimento para cada quantidade de cimento utilizada, assim como a obtenção da resistência à compressão simples de cada corpo de prova da curva de compactação. Vale salientar que após a compactação foram realizados a obtenção das características físicas dos corpos de prova das curvas de compactação, assim como a porosidade e calculado também o fator  $V_v/V_{cim}$ .

### 3.2.6 Compactação dos Corpos de Prova de Solo-cimento para Ensaio de Compressão Simples

#### 3.2.6.1 Definição dos tempos para a compactação da mistura solo-cimento

A fim de verificar a influência do tempo para a compactação da mistura solo-cimento, foi necessário procurar na literatura normas de orientação ou determinação do limite para o tempo entre a homogeneização e compactação da mistura. De acordo com DNIT-ES 143/2010, para usinas, o tempo decorrido entre a mistura pronta e o início da compactação não deve ser superior a 60 minutos (1 hora), a não ser a critério do projetista, e comprovado por ensaios, seja verificada a inexistência de inconveniente da adoção de tempo maior. Para misturas realizadas na pista esta norma limita o tempo máximo, entre o início e o fim, para a adição de água em 3 horas.

A tentando-se ao mencionado na especificação de serviço, e analisando os defeitos ocorridos nos pavimentos, assim como a visão técnica de especialistas na área, foi identificada a necessidade de uma análise do tempo para a compactação da mistura para diferentes baterias. Foram determinados tempos para a compactação até o máximo de 180 minutos (3 horas), levando em consideração o tempo máximo estipulada pela normativa. A fim de se analisar o comportamento da mistura compactada após este tempo de 180 min, foi determinado o tempo de 360 minutos (6 horas).

Para melhor detalhar o comportamento mecânico da mistura em relação ao tempo para a compactação foram adotados tempos menores que 360

minutos. Os tempos para a compactação da mistura solo-cimento foram determinados em:

- 0 minuto ou compactação imediata;
- 15 minutos;
- 30 minutos;
- 45 minutos;
- 60 minutos (1 hora);
- 90 minutos (1 hora e meia);
- 120 minutos (2 horas);
- 150 minutos (2 horas e meia);
- 180 minutos (3 horas); e
- 360 minutos (6 horas).

#### 3.2.6.2 Baterias e compactações dos corpos de prova de solo-cimento

Determinadas as características necessárias, massa específica seca máxima e teor de umidade ótima das curvas de compactação, e os tempos para a compactação da mistura, foram definidas as baterias e as compactações dos ensaios para cada um dos teores de cimento de 8, 9 e 10 %. As baterias foram:

- A primeira bateria (A) foi realizada com a utilização do teor de umidade ótima e energia normal. Realizadas duas (2) compactações para cada teor de cimento;
- A segunda bateria (B) foi realizada com a utilização do teor de umidade ótima + 1 % e energia normal. Realizadas duas (2) compactações para cada teor de cimento; e
- A terceira bateria (C) foi realizada com a utilização do teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação. Realizadas duas (2) compactações para cada teor de cimento.

No total foram realizadas 18 compactações, variando: teor de cimento, teor de umidade e energia de compactação. As baterias de ensaios e as compactações estão apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Baterias de ensaios e compactações**

Bateria	Compactação	Teor de	Umidade	Energia de	Tempo para a	Quantidade
A	1 a	8	Ótima	Normal	0, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 e 360	10
	1 b	8	Ótima	Normal		10
	2 a	9	Ótima	Normal		10
	2 b	9	Ótima	Normal		10
	3 a	10	Ótima	Normal		10
	3 b	10	Ótima	Normal		10
B	4 a	8	Ótima + 1	Normal		10
	4 b	8	Ótima + 1	Normal		10
	5 a	9	Ótima + 1	Normal		10
	5 b	9	Ótima + 1	Normal		10
	6 a	10	Ótima + 1	Normal		10
	6 b	10	Ótima + 1	Normal		10
C	7 a	8	Ótima + 1	Alterada*	10	
	7 b	8	Ótima + 1	Alterada*	10	
	8 a	9	Ótima + 1	Alterada*	10	
	8 b	9	Ótima + 1	Alterada*	10	
	9 a	10	Ótima + 1	Alterada*	10	
	9 b	10	Ótima + 1	Alterada*	10	
					Total	180

**Fonte:** o próprio autor

\*Energia alterada: Aplicação de número de golpes de 26 a 52, para obtenção da massa específica seca máxima determinada na curva de compactação da mistura solo-cimento.

Nesta etapa da pesquisa foram utilizados 500 kg de solo, contabilizando a compactação do solo-cimento e determinações de teor de umidade. Determinadas as baterias de ensaios e suas respectivas compactações, o próximo passo foi à homogeneização da mistura solo-cimento.

### 3.2.6.3 Homogeneização da mistura solo-cimento

Cada compactação utilizou uma massa de 25 kg de solo, já preparado e com umidade higroscópica determinada. Para a realização da homogeneização da mistura, foi utilizada uma betoneira de capacidade de 50 litros.

No dia anterior a realização da mistura, a massa de solo teve sua umidade determinada. Todas as misturas foram realizadas no mesmo horário, porém em dias diferentes, com o início da homogeneização dos materiais as 8:00 hs e iniciando sua compactação as 8:10 hs.

Conhecidas as massas de solo e seu teor de umidade, foi calculada a massa de solo seca, o teor de cimento e a quantidade de água necessária a

adicionar a mistura para atingir a umidade desejada para a bateria. A massa de cimento e solo foi medida com uma precisão de 0,01 g e a quantidade de água com uma precisão de 10 ml.

Após determinadas às massas dos componentes da mistura, foi iniciada a homogeneização na betoneira, seguindo sempre a seguinte ordem: solo, cimento e água. Depois de adicionar totalmente a massa de solo, a quantidade de cimento foi adicionada aos poucos, para evitar a formação de grumos (união de grãos de cimento), e a água também foi colocada aos poucos.

Após a homogeneização da mistura o próximo passo foi à compactação dos corpos de prova de solo-cimento nos tempos definidos.

#### 3.2.6.4 Compactação dos corpos de prova de solo-cimento

Para a realização da compactação dos corpos de prova de solo-cimento utilizou-se apenas 1 cilindro, com altura de 12,7 cm e diâmetro de 10,0 cm, colarinho com altura de 5,0 cm e soquete de 2.500 g, caindo de uma altura de 30,5 cm.

Os corpos de prova das baterias A e B foram compactados em 3 camadas iguais e consecutivas, com aplicação de 26 golpes por camada, com escarificação ao término da primeira e da segunda camada para aderência das camadas adjacentes.

Nas compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b, referentes à bateria C, também realizadas em 3 camadas iguais e consecutivas, os corpos de prova tiveram a aplicação do número de golpes necessários para atingir a massa específica seca máxima determinada nas curvas de compactação de cada teor de cimento. O número de golpes aplicados variou de 26 a 52. Assim a energia com aplicação de golpes acima de 26, foi denominada de alterada. Vale salientar que após a compactação foram realizados a obtenção das características físicas dos corpos de prova compactados, assim como a porosidade e calculado também o fator  $V_v/V_{cim}$ .

#### 3.2.6.5 Cura dos corpos de prova de solo-cimento

Após a compactação, os corpos de prova foram identificados em relação ao número da bateria e compactação, teor de cimento utilizado e tempos

para a compactação, e depois levados para o interior da câmara úmida do Laboratório de Geotecnia, onde permaneceram obrigatoriamente por 7 dias, conforme prescreve a DNER-ME 202/1994.

A temperatura da câmara úmida de acordo com esta norma deve ser de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar não inferior a 95 %. A câmara úmida do laboratório quando monitorada nos ensaios apresentou temperatura de 24 °C e umidade relativa do ar de 97 %.

#### 3.2.6.6 Ensaio de absorção de água e compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento

Após os sete dias de cura os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e tiveram suas massas medidas para avaliar a perda de massa devido à cura, esta etapa foi realizada seguindo a norma DNER-ME 201/1994.

Depois da cura os corpos de prova foram levados para um tanque com água, onde permaneceram em imersão por 4 horas. Finalizado este período os corpos de prova foram retirados do tanque e foram realizados os seguintes passos:

- Leve enxugamento das faces do corpo de prova com o auxílio de um pano seco e limpo;
- Determinação da massa do corpo de prova com balança de precisão de 0,01 g; e
- Verificação das dimensões de altura e diâmetro do corpo de prova, com o auxílio de um paquímetro, com precisão de 0,1 milímetro. Foram retiradas duas medidas (ortogonais entre si) para cada dimensão do corpo de prova mencionada anteriormente.

A Figura 22 apresenta os corpos de prova imersos em tanque com água e a Figura 23 mostra a obtenção das medidas dos corpos de prova.

**Figura 22** - Corpos de prova imersos em tanque com água



Fonte: O próprio autor

**Figura 23** - Determinação das dimensões do corpo de prova de solo-cimento após 4 horas de imersão em água



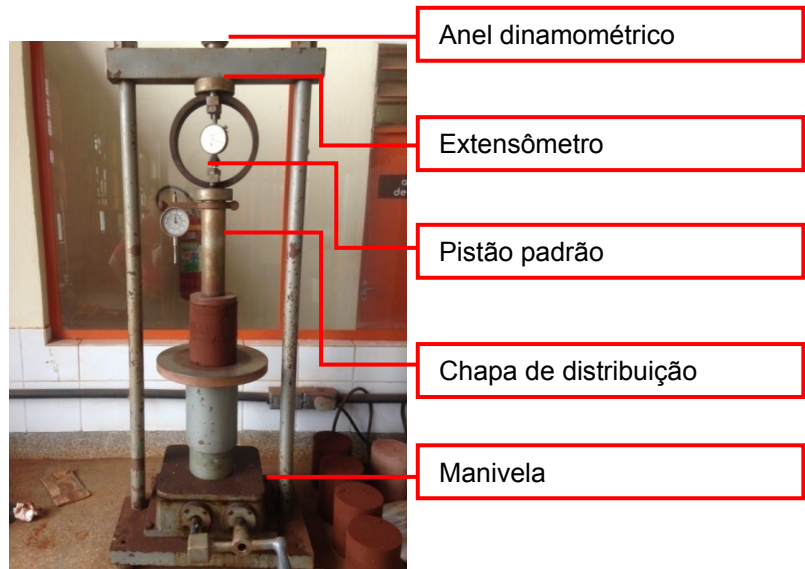
(a)

(b)

Fonte: O próprio autor - (a) verificação da altura (b) verificação do diâmetro do corpo de prova de solo-cimento

Realizados os procedimentos de secagem, determinação da massa após imersão e controle dimensional dos corpos de prova, estes foram levados a uma prensa de compressão simples.

Esta prensa é composta por um anel dinamométrico, um extensômetro, chapa de aço de forma circular com diâmetro de 10,0 cm para distribuição das tensões uniformes sobre o corpo de prova, manivela de aplicação de carregamento e um pistão padronizado de 5,0 cm de diâmetro. A Figura 24 apresenta o equipamento utilizado para a compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento.

**Figura 24** - Prensa de compressão simples

**Fonte:** O próprio autor

A aplicação de carregamento constante foi realizada a uma velocidade de 1,27 mm/min até a ruptura dos corpos de prova. E por fim obtidos os valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova das misturas compactadas de solo-cimento.

A norma DNIT-ES 143/2010, prescreve os requisitos mínimos da mistura solo-cimento compactada. Esta deve apresentar grau de compactação igual ou superior a 100 % e resistência mínima à compressão simples de 21 kg/cm<sup>2</sup> aos 7 dias de cura. E para analisar o tempo máximo para a compactação do solo-cimento, foi estipulado em desvio de teor de umidade de  $\pm 1$  % em relação ao teor de umidade da bateria.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados na pesquisa na seguinte sequência: caracterização física, ensaios complementares do solo e os ensaios realizados com solo-cimento. Os resultados apresentados são válidos para um solo classificado como uma areia média a fina argilosa (A-2-4) de cor avermelhada.

### 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO, COMPACTAÇÃO, ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E CLASSIFICAÇÃO PELA AASHTO

Os resultados dos ensaios realizados no solo serão apresentados conforme a seguir: Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), Limites de Atterberg (limite de plasticidade - LP, e Liquidez - LL), análise granulométrica (por sedimentação e peneiramento), compactação do solo, Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.), e por fim a classificação pela AASHTO.

#### 4.1.1 Massa Específica dos Sólidos

Foi determinada a massa específica dos sólidos para cada um dos ensaios realizados de: 2,85, 2,86 e 2,86 g/cm<sup>3</sup>. Logo foi calculado o valor médio de 2,86 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.2 Limites de Atterberg (Limites de plasticidade e liquidez)

A Tabela 6 apresenta os valores médios dos limites de consistência, índice de plasticidade e os valores máximos impostos pela norma DNIT-ES 143/2010.

**Tabela 6** - Limites de consistência, índice de plasticidade médios do solo, e limites da DNIT-ES 143/2010

Descrição	Solo utilizado	DNIT-ES 143/2010
Limite de plasticidade médio (LP) (%)	14,5	Não contempla
Limite de liquidez médio (LL) (%)	24,5	Máximo 40%
Índice de plasticidade médio (IP) (%)	10,0	Máximo 18%

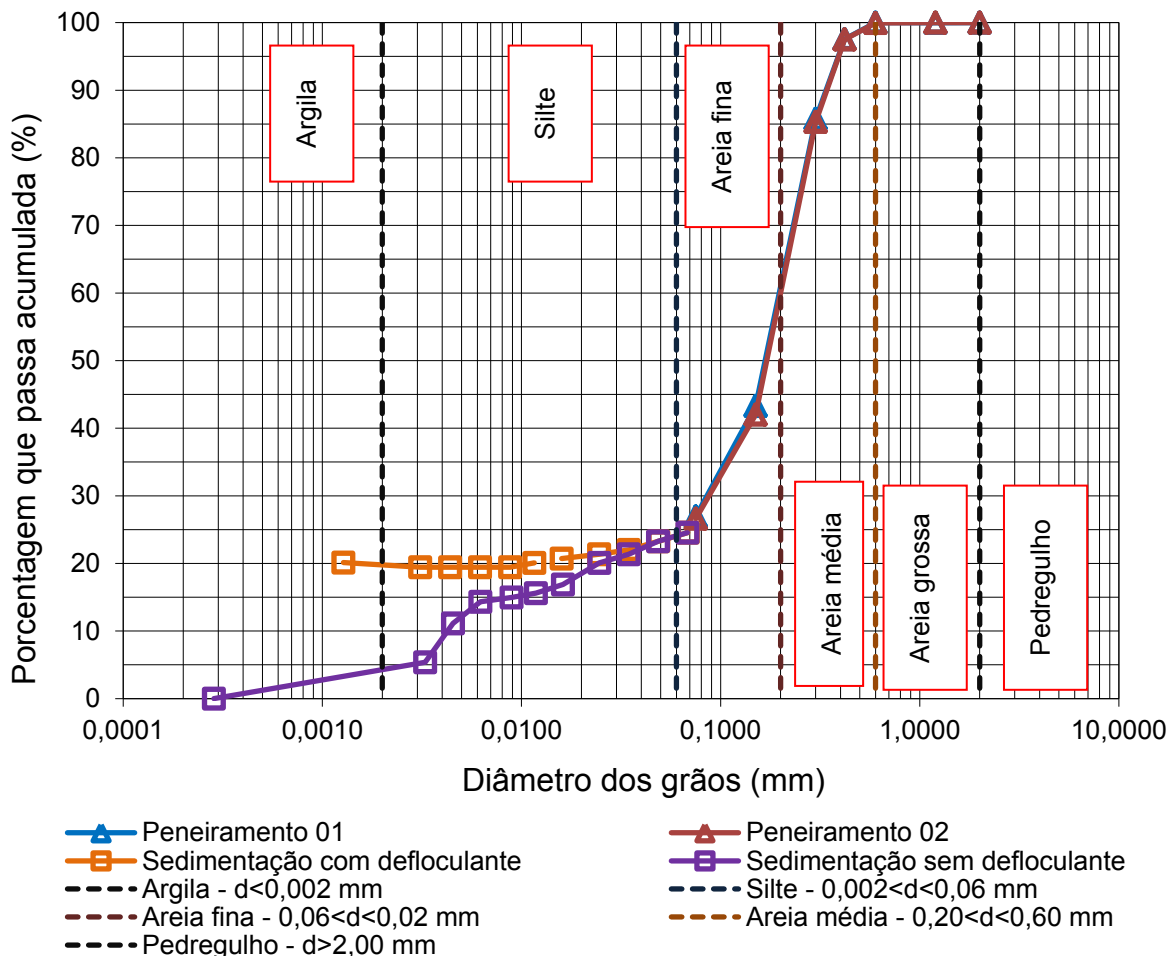
Fonte: o próprio autor

Observando-se a Tabela 6, o solo atende as especificações normativas e pode ser utilizado para a realização da mistura solo-cimento para base de pavimento rodoviário.

#### 4.1.3 Análise Granulométrica do Solo

Os resultados dos ensaios de granulometria por sedimentação e peneiramento estão apresentados no Gráfico 1.

**Gráfico 1** - Curvas granulométricas do solo - com e sem defloculante



Fonte: o próprio autor

\*A nomenclatura conforme a NBR 6502/1995 - classificação geotécnica.

O ensaio da análise granulométrica por sedimentação tem por objetivo definir duas frações finas do solo: silte e argila, grãos de tamanho inferior a 0,075 mm. Conforme o Gráfico 1, é possível verificar a influência da utilização de defloculante no ensaio, mostrando diferença entre as curvas.

A função do defloculante é neutralizar as cargas elétricas naturais dos grãos dos solos finos e assim impedir que as partículas finas se agrupem formando grumos, prejudicando a determinação das frações finas.

Em relação à curva granulométrica sem utilização de hexametáfosfato de sódio, houve agregação das partículas, os grãos menores e mais leves se uniram formando grãos mais densos. Assim ocorreu à decantação mais rápida e total dos grãos do solo no fundo da proveta graduada (Figura 18 - Capítulo Materiais e Métodos), ocasionando a diferença entre as duas curvas granulométricas. Como apresentado na curva granulométrica para o solo caracterizado (LA' - areia laterítica) é necessário a utilização de defloculante, pois o mesmo apresenta agregação das partículas finas quando realizado o ensaio.

No peneiramento, as amostras mostraram-se semelhantes, apresentando praticamente as mesmas frações granulométricas. Após a lavagem do solo ao fim da sedimentação, eliminam-se os finos e a presença do defloculante.

Com as frações granulométricas determinadas como apresenta a Tabela 7, é possível obter a classificação geotécnica do solo, conforme a NBR 6502/1995.

**Tabela 7 - Composição granulométrica segundo a NBR 6502/1995 para classificação textual geotécnica**

Nomenclatura	Tamanho dos grãos NBR 6502/1995	(%) Peneiramento	(%) Peneiramento
Pedregulho	de 2,0 a 60 mm	0	0
Areia grossa	de 0,6 a 2,0 mm	0	0
Areia média	de 0,2 a 0,6 mm	40	40
Areia fina	de 0,06 a 0,2 mm	36	36
Nomenclatura	Tamanho dos grãos NBR 6502/1995	(%) Sedimentação com defloculante	(%) Sedimentação sem defloculante
Silte	de 0,002 a 0,06 mm	4	16
Argila	Inferior a 0,002 mm	20	8

**Fonte:** o próprio autor

De acordo com a norma supracitada é possível classificar geotecnicamente o solo estudado em: Areia Média à Fina Argilosa com uso de

defloculante (areia média 40 %, areia fina 36 %, silte 4 % e argila 20 %) e uma Areia Média a Fina Siltosa sem o uso do defloculante (areia média 40 %, areia fina 36 %, silte 16 % e argila 8 %), porém ambas de cor avermelhada.

A norma DNIT-ES 143/2010 apresenta faixas granulométricas para utilização do solo na mistura solo-cimento. A Tabela 8 mostra os valores da composição granulométrica do solo e os limites normativos.

Para esta comparação com a norma pode ser utilizada qualquer umas das curvas apresentadas, pois é considerada apenas a análise granulométrica por peneiramento.

**Tabela 8 - Composição granulométrica do solo e especificação do DNIT-ES 143/2010**

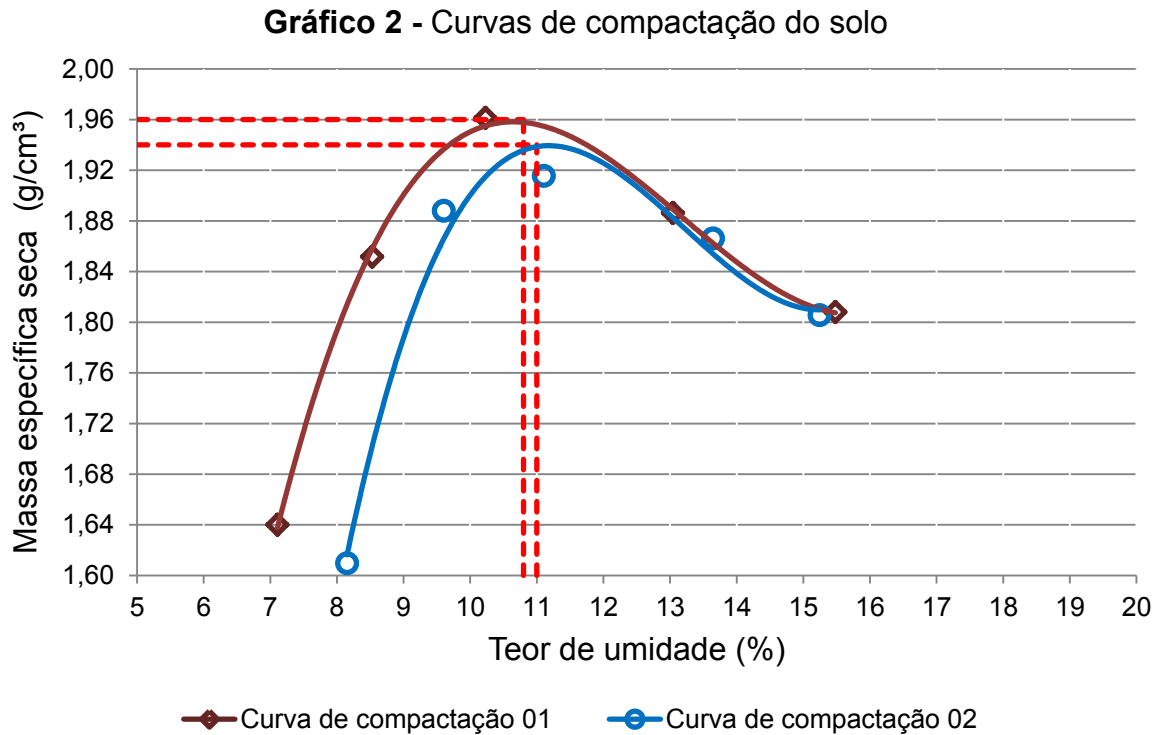
Solo		(%) passante	(%) passante	(%) passante	Tolerância (%)
Peneira	Diâmetro (mm)	peneiramento 01	peneiramento 02	DNIT-ES 143/2010	
2 ½"	63,5	100	100	100	Não contempla
n° 4	4,8	100	100	50 - 100	± 5
n° 10	2,0	100	100	Não contempla	Não contempla
n° 40	0,42	97,6	97,5	15 - 100	± 2
n° 200	0,075	27,0	26,6	5 - 35	± 2

**Fonte:** o próprio autor

Conforme a Tabela 8, a granulometria do solo mostra-se dentro dos limites estabelecidos pela norma e é aceito na realização da mistura solo-cimento para emprego em base de pavimento rodoviário, e é classificado como uma areia fina para fins rodoviários.

#### 4.1.4 Compactação do Solo

Com os resultados do ensaio de compactação do solo foram realizadas as curvas de compactação apresentadas nos Gráfico 2.



Fonte: o próprio autor

A partir do Gráfico 2, obteve-se os valores de massa específica seca máxima ( $\rho_{dmax}$ ) e teor de umidade ótima ( $\omega_{ótima}$ ) para cada curva, mostrados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Massa específica seca máxima e teor de umidade ótima do solo**

Característica física	Curvas	
	01	02
Massa específica seca máxima (g/cm³)	1,96	1,94
Média (g/cm³)	1,95	
Teor de umidade ótima (%)	10,8	11,0
Média (%)	10,9	

Fonte: o próprio autor

Conforme a Tabela 9 foi calculado o valor médio de 1,95 g/cm³ para a massa específica seca máxima e 10,9 % para o teor de umidade ótima.

#### 4.1.5 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.) foi realizado para dois corpos de prova. A Tabela 10 apresenta os resultados das características físicas do solo compactado e dos ensaios de I.S.C. e expansão.

**Tabela 10** - Resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia e expansão

Ensaio	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Descrição	Resultado
I.S.C. 01	1,96	10,9	Suporte (%)	18
			Expansão (%)	0,1
I.S.C. 02	1,96	11,0	Suporte (%)	19
			Expansão (%)	0,1

Fonte: o próprio autor

Os valores médios encontrados para o Índice de Suporte Califórnia e expansão foram de 19 % e 0,1 % respectivamente. Assim pode-se verificar que este solo in natura não pode ser utilizado para base de pavimento, pois de acordo com a norma DNIT 141/2010, para o solo ser utilizado o solo deve apresentar I.S.C. maior ou igual a 60 % para um N (número equivalente de solicitações ao eixo padrão) menor ou igual a 10<sup>6</sup> ou I.S.C. maior ou igual a 80 % para um N maior que o referido anteriormente.

#### 4.1.6 Classificação do Solo Usando a AASHTO

A classificação pela AASHTO utiliza a composição granulometria, limites de consistência e o índice de grupo do solo para sua classificação. A Tabela 11 apresenta os valores para realização desta classificação.

**Tabela 11** - Valores para a classificação do solo pela AASHTO

Característica classificatória	Valor	AASHTO (solo granular)
% passante na peneira nº # 10	100,0	Não contempla
% passante na peneira nº # 40	97,6	Não contempla
% passante nº # 200	26,8	Máximo 35 %
Limite de liquidez médio (%)	24,5	Máximo 40 %
Índice de plasticidade médio (%)	10,0	Máximo 10 %
Índice de grupo	0	0
a = 35 - 35 = 0		
b = 27 - 15 = 12		
c = 40 - 40 = 0		
d = 10 - 10 = 0		
Classificação AASHTO		A-2-4

Fonte: o próprio autor

Portanto de acordo com a AASHTO, o solo estudado é classificado como A-2-4, este grupo é definido como pedregulho, areia siltosa ou areia argilosa.

#### 4.1.7 Resumo dos Ensaios de Caracterização Física, Compactação, Índice de Suporte Califórnia e Classificação do Solo

A Tabela 12 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização física, compactação, Índice de Suporte Califórnia e classificação do solo segundo a AASHTO.

**Tabela 12** - Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização física do solo, compactação, Índice de Suporte Califórnia e classificação segundo a AASHTO

Ensaio/classificação	Valor médio	
Massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	2,86	
Limite de liquidez (%)	24,5	
Limite de plasticidade (%)	14,5	
Índice de plasticidade (%)	10,0	
% passante # 2 1/2" (63,5 mm)	100,0	
% passante # 4 (4,8 mm)	100,0	
% passante # 10 (2,0 mm)	100,0	
% passante # 40 (0,42 mm)	97,6	
% passante # 200 (0,075 mm)	26,8	
Compactação	Massa específica seca	1,95
	máxima (g/cm <sup>3</sup> )	
	Umidade ótima (%)	10,9
I.S.C.	Suporte (%)	19,0
	Expansão (%)	0,1
Classificação AASHTO	A-2-4	
Classificação MCT*	*LA*	

**Fonte:** o próprio autor

*\*Valor obtido por Cancian (2013) - Areia Argilosa Laterítica*

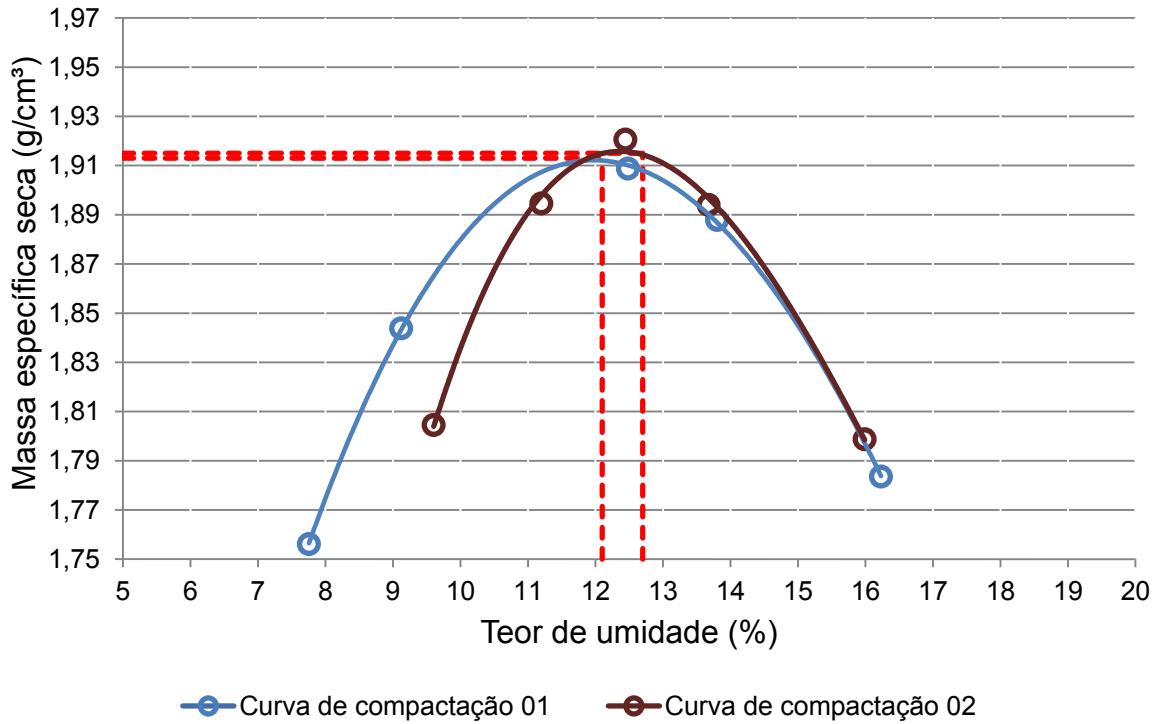
Estes valores foram semelhantes aos encontrados por Cancian (2013) ao realizar seu trabalho utilizando solo da mesma jazida. Assim com os resultados obtidos, o solo pode ser utilizado para a mistura solo-cimento para base de pavimento rodoviário.

## 4.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO

### 4.2.1 Curva de Compactação do Solo-cimento

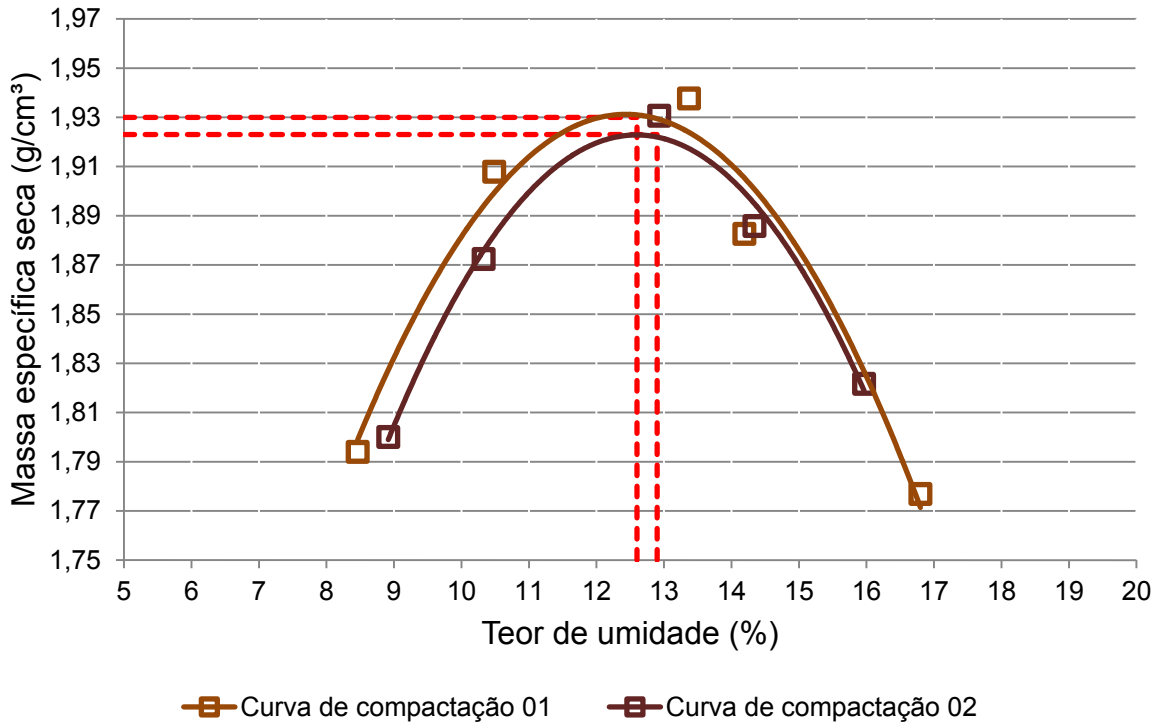
Os Gráficos 3, 4 e 5 apresentam as curvas de compactação das misturas solo-cimento para os teores de 8, 9 e 10 % de cimento em relação à massa de solo seca, onde foram feitas 2 curvas de compactação para cada teor.

**Gráfico 3 -** Curvas de compactação da mistura solo-cimento - 8 % de cimento

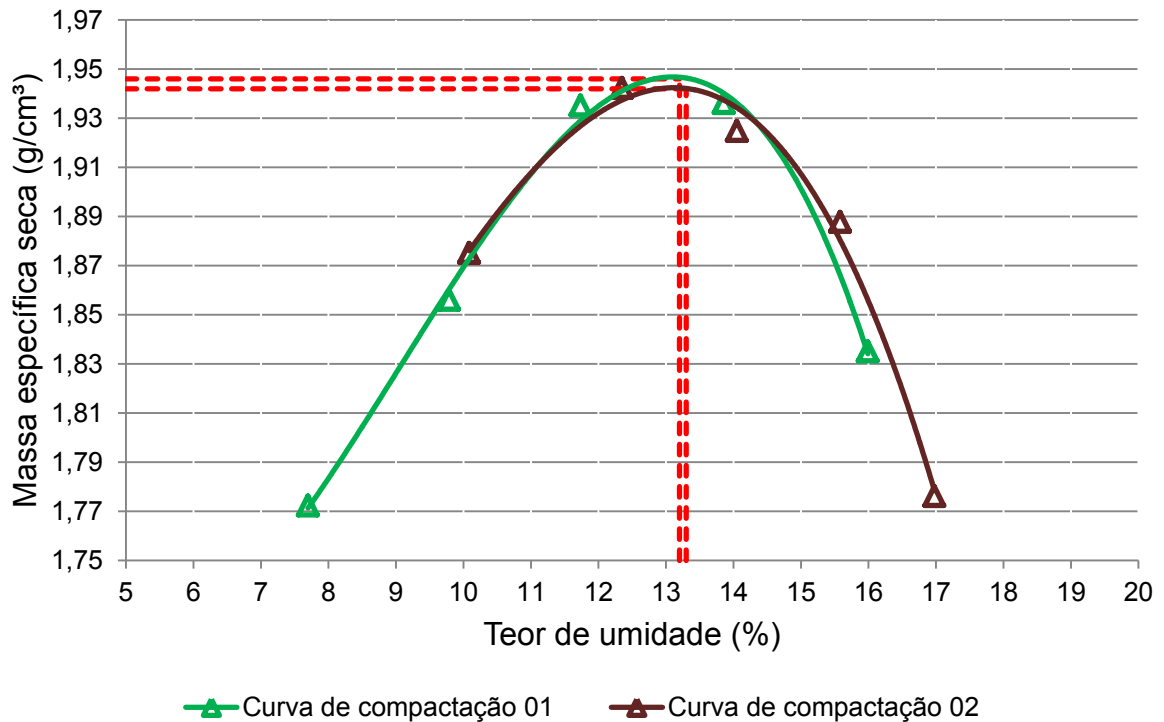


Fonte: o próprio autor

**Gráfico 4 -** Curvas de compactação da mistura solo-cimento - 9 % de cimento



Fonte: o próprio autor

**Gráfico 5** - Curvas de compactação da mistura solo-cimento - 10 % de cimento

Fonte: o próprio autor

Na Tabela 13 encontram-se os resultados de massa específica seca máxima e teor de umidade ótima das misturas solo-cimento.

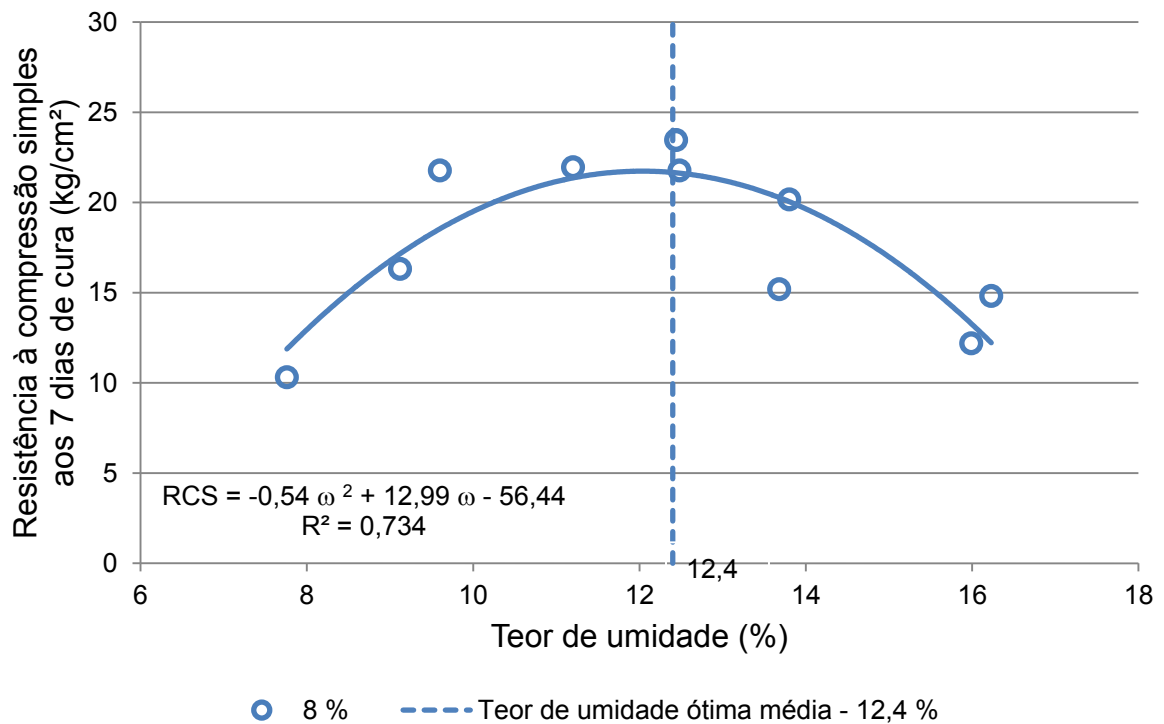
**Tabela 13** - Massa específica seca máxima e teor de umidade ótima das misturas solo-cimento e estudo estatístico dos resultados

Curva	Teor de cimento (%)	Umidade ótima (%)	Massa específica seca máxima (g/cm³)	Energia de compactação
01	8	12,1	1,91	Normal
02	8	12,7	1,92	Normal
Média		12,4*	1,91*	-
Desvio padrão		0,42	0,01	-
Coeficiente de Variabilidade (%)		3,42	0,37	-
01	9	12,6	1,93	Normal
02	9	12,9	1,92	Normal
Média		12,8*	1,93*	-
Desvio padrão		0,21	0,01	-
Coeficiente de Variabilidade (%)		1,66	0,37	-
01	10	13,3	1,94	Normal
02	10	13,4	1,95	Normal
Média		13,4*	1,95*	-
Desvio padrão		0,07	0,01	-
Coeficiente de Variabilidade (%)		0,53	0,05	-

Fonte: o próprio autor - \*Valores médios calculados

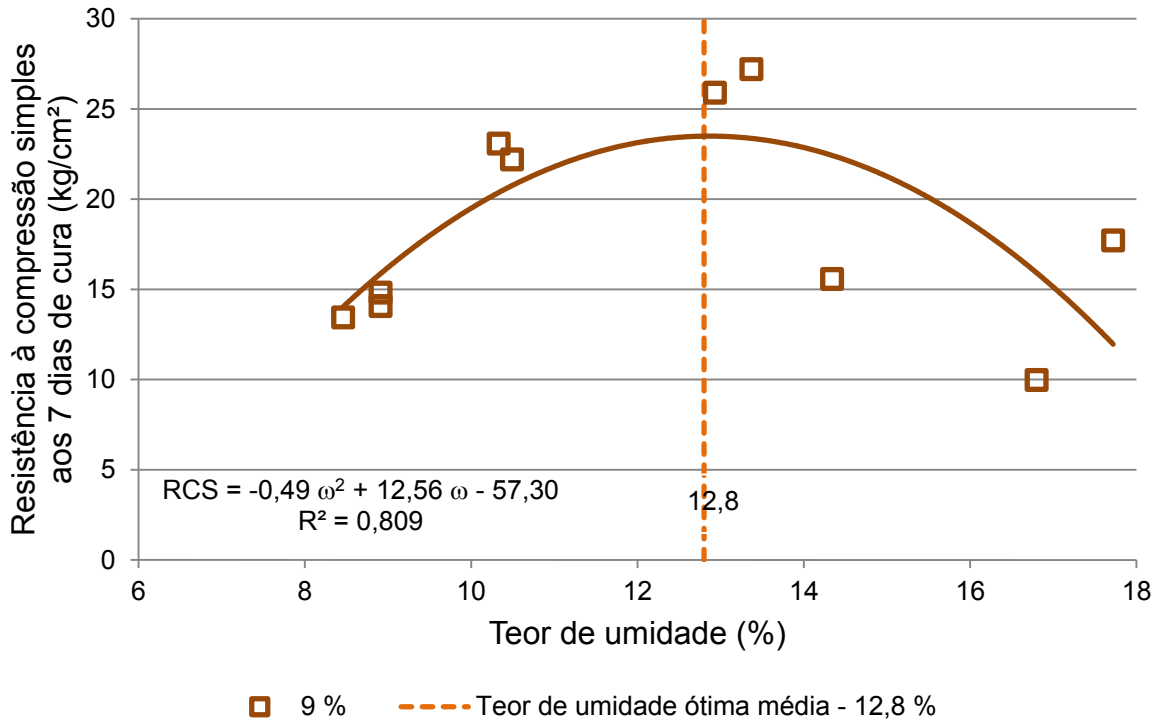
Os corpos de prova da curva de compactação foram curados por 7 dias, imersos em água por 4 horas e rompidos à compressão simples. Foram realizados os Gráficos 6, 7 e 8, apresentando o teor de umidade *versus* a resistência à compressão simples, para os corpos de prova das curvas de compactação dos 3 teores de cimento.

**Gráfico 6** - Teor de umidade *versus* resistência à compressão simples aos 7 dias de cura dos corpos de prova das curvas de compactação - 8 % de cimento



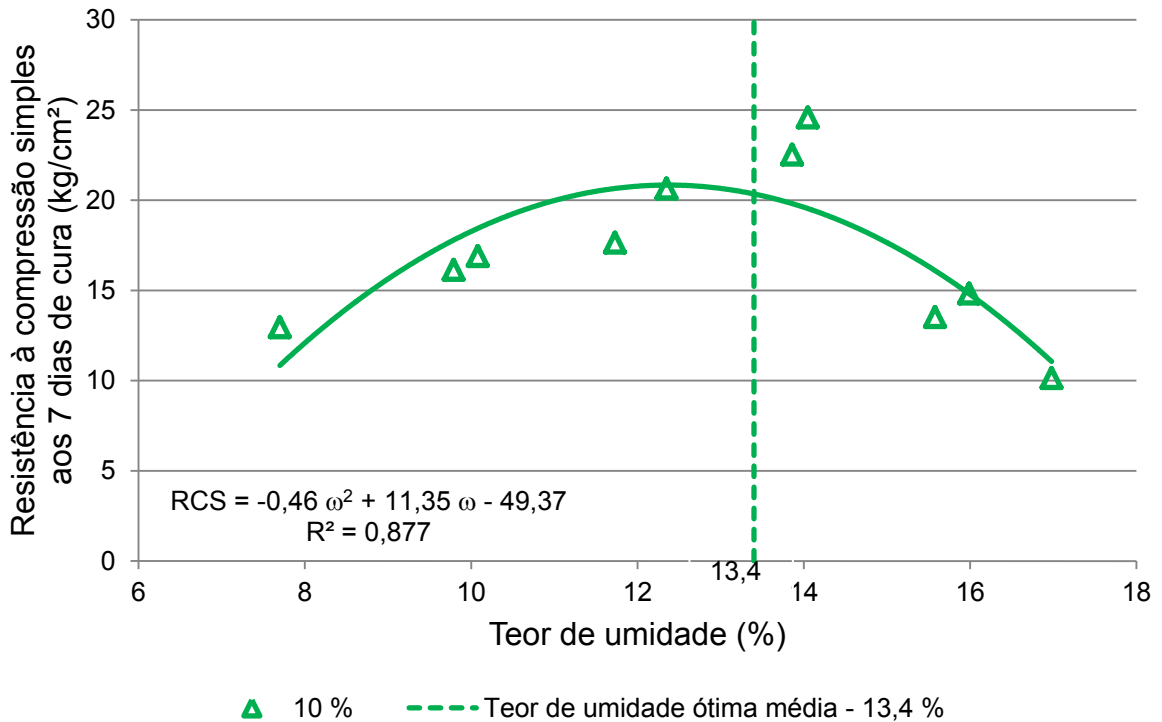
Fonte: o próprio autor

**Gráfico 7 - Teor de umidade versus resistência à compressão simples aos 7 dias de cura dos corpos de prova das curvas de compactação - 9 % de cimento**



Fonte: o próprio autor

**Gráfico 8 - Teor de umidade versus resistência à compressão simples aos 7 dias de cura dos corpos de prova das curvas de compactação - 10 % de cimento**



Fonte: o próprio autor

Em cada um dos gráficos existe uma equação quadrática obtida por uma linha de tendência. A partir desta é possível estimar a resistência à compressão simples em função da variação do teor de umidade na mistura, utilizando energia normal na compactação.

Dos Gráficos 6, 7 e 8, verifica-se a influência do teor de umidade na resistência à compressão simples dos corpos de prova das curvas de compactação. Esta se mostra maior quando a umidade do corpo de prova está o mais próximo da ótima.

A existência de pouca água na mistura (no ramo seco) promove a elevação dos vazios, assim aumentando da porosidade. Esta quantidade insuficiente de água não realiza a hidratação adequada do cimento gerando resistências menores. E muita água no interior da mistura, eleva-se também a porosidade ocasionando novamente menor resistência do solo-cimento. Porém os valores de resistência mostraram-se maiores quando o teor de umidade está ligeiramente maior em relação à umidade ótima da mistura compactada.

#### 4.2.2 Compactação dos Corpos de Prova de Solo-cimento para Ensaio de Compressão Simples

Os resultados obtidos dos ensaios de compactação: teor de umidade, massa específica seca, porosidade, absorção de água após 4 horas de imersão e resistência à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento das baterias realizadas, estão apresentados nas Tabelas 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28.

Na primeira bateria (A) (compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b) foi utilizado o teor de umidade ótima média obtida das curvas de compactação e energia normal. Na segunda bateria (B) (compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b) foi utilizado teor de umidade ótima + 1 %, e energia normal. Na terceira bateria (C) (compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b) foi utilizado o teor de umidade ótima + 1 %, e aplicada uma energia de compactação denominada de alterada.

#### 4.2.3 Bateria de Ensaio com Utilização do Teor de Umidade Ótima e Energia Normal na Compactação

A Tabela 14 apresenta os resultados de umidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b.

**Tabela 14** - Resultados do teor de umidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	Teor de umidade (%)									
Compactação 1a - 8 %	12,2	12,1	11,9	11,8	11,2	11,1	11,1	10,9	10,9	10,5
Compactação 1b - 8 %	12,1	12,1	11,8	11,5	11,2	11,1	10,9	10,6	10,6	10,6
Média (%)	12,2	12,1	11,8	11,7	11,2	11,1	11,0	10,8	10,7	10,5
Desvio Padrão (%)	0,10	0,05	0,09	0,19	0,04	0,01	0,13	0,19	0,20	0,06
Coef. de Variabilidade (%)	0,82	0,41	0,76	1,63	0,36	0,09	1,18	1,76	1,87	0,57
Compactação 2a - 9 %	12,9	12,7	12,2	11,6	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Compactação 2b - 9 %	12,9	12,5	12,1	11,4	11,7	11,6	11,4	11,3	11,3	11,3
Média (%)	12,9	12,6	12,2	11,5	11,6	11,5	11,4	11,4	11,3	11,3
Desvio Padrão (%)	0,04	0,09	0,02	0,19	0,11	0,12	0,00	0,09	0,08	0,04
Coef. de Variabilidade (%)	0,31	0,71	0,16	1,65	0,95	1,04	0,00	0,79	0,71	0,35
Compactação 3a - 10 %	13,1	12,9	12,5	12,6	12,5	12,3	12,1	12,0	11,6	11,6
Compactação 3b - 10 %	12,9	12,7	12,6	12,3	12,3	12,5	12,3	12,1	11,3	11,9
Média (%)	13,0	12,8	12,5	12,5	12,4	12,4	12,2	12,1	11,5	11,7
Desvio Padrão (%)	0,15	0,11	0,04	0,19	0,15	0,09	0,09	0,05	0,21	0,20
Coef. de Variabilidade (%)	1,15	0,86	0,32	1,52	1,21	0,73	0,74	0,41	1,83	1,71

Fonte: o próprio autor

Na Tabela 14 observa-se a existência de perda de umidade por evaporação. Após o tempo de 45 min, para 8 e 9 %, e para o tempo de 90 min para 10 % de cimento, os corpos de prova não mantiveram a umidade dentro do especificado ( $\pm 1$  % em relação à umidade ótima) no momento da compactação.

A Tabela 15 apresenta os resultados de massa específica seca dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b.

**Tabela 15** - Resultados de massa específica seca dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	<b>Massa específica seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>									
Compactação 1a - 8 %	1,91	1,90	1,90	1,87	1,84	1,81	1,76	1,74	1,73	1,60
Compactação 1b - 8 %	1,92	1,91	1,91	1,88	1,88	1,81	1,76	1,75	1,73	1,60
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,92	1,91	1,91	1,88	1,86	1,81	1,76	1,75	1,73	1,60
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,53	0,53	0,53	1,08	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00
Compactação 2a - 9 %	1,93	1,92	1,92	1,93	1,86	1,86	1,80	1,78	1,78	1,55
Compactação 2b - 9 %	1,93	1,93	1,93	1,92	1,89	1,87	1,81	1,78	1,78	1,56
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,93	1,93	1,93	1,93	1,88	1,86	1,80	1,78	1,78	1,56
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	0,54	0,00	0,00	0,56	0,64
Compactação 3a - 10 %	1,95	1,95	1,95	1,94	1,94	1,92	1,81	1,77	1,76	1,71
Compactação 3b - 10 %	1,95	1,96	1,95	1,95	1,94	1,93	1,81	1,76	1,76	1,70
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,95	1,95	1,95	1,95	1,94	1,92	1,81	1,77	1,76	1,71
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coef. de Variabilidade (%)	0,51	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00

Fonte: o próprio autor

Diante dos resultados apresentados da Tabela 15, alguns tempos para a compactação da mistura não obtiveram a massa específica seca determinada na curva de compactação, para todos os teores de cimento. Assim é possível verificar a não obtenção da massa específica seca máxima a partir dos tempos de 45 min para 8 % e de 60 min para 9 e 10 % de cimento.

A Tabela 16 mostra os resultados de porosidade obtidos das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b, e a Tabela 17 apresenta os valores de absorção de água após 4 horas de imersão em água para as mesmas compactações.

**Tabela 16** - Resultados de porosidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	<b>Porosidade (%)</b>									
Bateria 1a - 8 %	33	34	34	35	36	37	39	39	39	44
Bateria 1b - 8 %	33	33	33	34	34	37	38	39	39	44
Média (%)	33	33	33	34	35	37	39	39	39	44
Desvio Padrão (%)	0,11	0,19	0,18	0,33	0,78	0,20	0,17	0,04	0,05	0,14
Coef. de Variabilidade (%)	0,33	0,57	0,54	0,96	2,23	0,54	0,44	0,1	0,13	0,32
Bateria 2a - 9 %	33	33	33	33	35	35	37	38	38	46
Bateria 2b - 9 %	33	33	33	33	34	35	37	38	38	45
Média (%)	33	33	33	33	34	35	37	38	38	46
Desvio Padrão (%)	0,01	0,03	0,05	0,09	0,6	0,24	0,07	0,04	0,18	0,24
Coef. de Variabilidade (%)	0,03	0,09	0,15	0,27	1,74	0,69	0,19	0,11	0,48	0,53
Bateria 3a - 10 %	32	32	32	32	32	33	37	38	39	40
Bateria 3b - 10 %	32	32	32	32	32	33	37	38	38	40
Média (%)	32	32	32	32	32	33	37	38	38	40
Desvio Padrão (%)	0,19	0,19	0,04	0,15	0,09	0,1	0,1	0,17	0,08	0,05
Coef. de Variabilidade (%)	0,6	0,6	0,13	0,47	0,28	0,31	0,27	0,45	0,21	0,12

Fonte: o próprio autor

**Tabela 17** - Resultados de absorção de água após 4 horas de imersão dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	<b>Absorção de água após 4 horas de imersão (%)</b>									
Compactação 1a - 8 %	0,15	0,16	0,17	0,19	0,21	2,98	5,31	5,55	6,11	8,28
Compactação 1b - 8 %	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	2,84	4,94	5,43	5,97	8,36
Média (%)	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20	2,91	5,12	5,49	6,04	8,32
Desvio Padrão (%)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,10	0,26	0,09	0,10	0,06
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,00	0,54	5,42	5,09	3,44	5,08	1,64	1,66	0,72
Compactação 2a - 9 %	0,12	0,18	0,18	0,22	0,26	2,29	4,00	4,63	4,88	8,26
Compactação 2b - 9 %	0,13	0,18	0,19	0,26	0,27	2,27	4,01	4,39	4,84	8,24
Média (%)	0,13	0,18	0,18	0,24	0,27	2,28	4,01	4,51	4,86	8,25
Desvio Padrão (%)	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,17	0,03	0,01
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	5,55	5,44	8,33	3,76	0,44	0,00	3,70	0,62	0,12
Compactação 3a - 10 %	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	2,02	3,52	4,27	4,42	7,86
Compactação 3b - 10 %	0,11	0,14	0,15	0,18	0,22	2,03	3,74	4,47	4,49	7,81
Média (%)	0,11	0,14	0,15	0,18	0,21	2,02	3,63	4,37	4,46	7,83
Desvio Padrão (%)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,16	0,14	0,05	0,04
Coef. de Variabilidade (%)	9,18	7,34	0,00	0,00	4,78	0,49	4,41	3,21	1,12	0,51

Fonte: o próprio autor

Das Tabelas 16 e 17, pode-se verificar o aumento da porosidade com o aumento do tempo para a compactação, logo aumentando a absorção dos corpos de prova das misturas. Além disso, os corpos de prova com 10 % de cimento apresentaram menor porosidade e absorção de água.

A Tabela 18 mostra os resultados de resistência à compressão simples obtidos dos corpos de prova das misturas solo-cimento nas compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b.

**Tabela 18** - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal e estudo estatístico

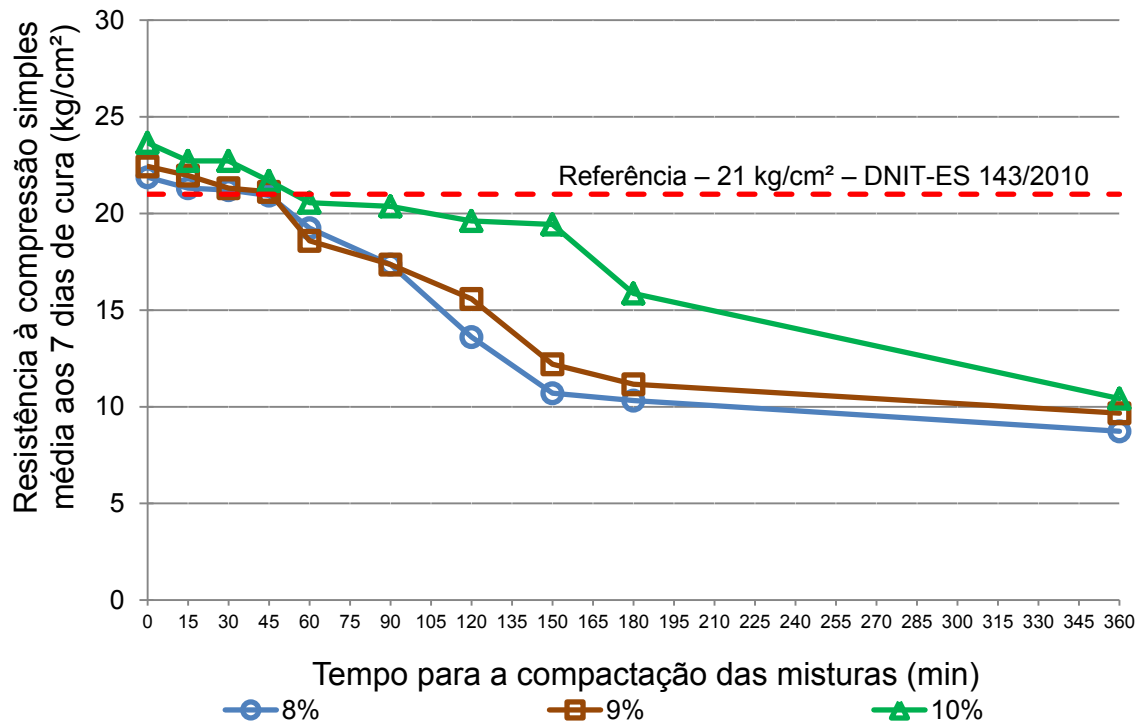
Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	Resistência à compressão simples - RSC (kg/cm <sup>2</sup> )									
Compactação 1a - 8 %	22,0	21,4	21,6	20,8	19,7	18,0	13,1	10,1	9,8	9,0
Compactação 1b - 8 %	21,8	21,2	20,8	21,0	18,8	16,7	14,1	11,3	10,9	8,4
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	21,9	21,3	21,2	20,9	19,2	17,4	13,6	10,7	10,3	8,7
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,13	0,13	0,53	0,13	0,66	0,93	0,66	0,80	0,80	0,40
Coef. de Variabilidade (%)	0,59	0,61	2,50	0,62	3,43	5,36	4,85	7,48	7,75	4,58
Compactação 2a - 9 %	22,3	21,8	21,0	21,2	18,4	16,9	14,5	12,0	11,1	9,4
Compactação 2b - 9 %	22,5	22,2	21,6	21,0	18,8	17,8	16,7	12,4	11,3	9,9
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	22,4	22,0	21,3	21,1	18,6	17,4	15,6	12,2	11,2	9,7
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,13	0,27	0,40	0,13	0,27	0,66	1,59	0,27	0,13	0,40
Coef. de Variabilidade (%)	0,58	1,23	1,88	0,62	1,45	3,80	10,20	2,21	1,16	4,14
Compactação 3a - 10 %	23,8	22,9	22,7	21,6	20,6	20,1	19,5	19,5	16,0	10,3
Compactação 3b - 10 %	23,5	22,5	22,7	21,8	20,5	20,6	19,7	19,3	15,8	10,5
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	23,7	22,7	22,7	21,7	20,6	20,4	19,6	19,4	15,9	10,4
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,27	0,27	0,00	0,13	0,13	0,40	0,13	0,13	0,13	0,13
Coef. de Variabilidade (%)	1,14	1,19	0,00	0,60	0,63	1,96	0,66	0,67	0,82	1,25

Fonte: o próprio autor

De acordo com a Tabela 18, a partir do tempo de 30 minutos para 8 %, e 45 minutos para 9 e 10 % de cimento, os corpos de prova não atingiram a resistência mínima à compressão de 21 kg/cm<sup>2</sup>.

A partir da Tabela 18 obteve-se o Gráfico 9, relacionando o tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média das misturas solo-cimento.

**Gráfico 9** - Tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média das misturas solo-cimento com teores de 8, 9 e 10 % de cimento com umidade ótima e energia normal



Fonte: o próprio autor

A Tabela 18 e o Gráfico 9 mostram que, quando a mistura de solo-cimento for compactada com umidade igual à ótima e utilizada energia normal na compactação o tempo máximo para a compactação é de 45 min, 53 min e 59 min para os teores de 8, 9 e 10 % de cimento, respectivamente. Esses tempos máximos foram obtidos por interpolação linear dos resultados condicionalmente a resistência mínima à compressão simples de 21 kg/cm<sup>2</sup>. A Figura 25 apresenta a ruptura padrão dos corpos de prova rompidos à compressão.

**Figura 25** - Corpos de prova de solo-cimento rompidos aos sete dias de cura



**Fonte:** O próprio autor

#### 4.2.4 Bateria de Ensaio com Utilização do Teor de Umidade Ótima + 1 % e Energia Normal na Compactação

A segunda bateria (B) foi realizada com a utilização do teor de umidade ótima com a adição de 1 % e com a energia normal na compactação. Os critérios de controle em relação à compactação foram os mesmos da bateria anterior.

A Tabela 19 apresenta os resultados de teor de umidade das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b.

**Tabela 19** - Resultados do teor de umidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	Teor de umidade (%)									
Compactação 4a - 8 %	13,0	12,6	12,9	12,9	12,8	12,7	12,5	12,2	12,1	11,7
Compactação 4b - 8 %	12,7	12,8	12,7	12,2	12,0	11,8	12,7	12,2	12,0	11,8
Média (%)	12,8	12,7	12,8	12,6	12,4	12,2	12,6	12,2	12,1	11,8
Desvio Padrão (%)	0,22	0,11	0,11	0,46	0,61	0,64	0,18	0,01	0,13	0,05
Coef. de Variabilidade (%)	1,72	0,87	0,86	3,66	4,92	5,23	1,43	0,08	1,08	0,43
Compactação 5a - 9 %	13,1	12,7	12,4	12,4	12,2	12,2	12,1	12,0	12,0	11,9
Compactação 5b - 9 %	13,2	12,8	12,6	12,4	12,3	12,2	12,1	12,1	12,1	11,8
Média (%)	13,2	12,7	12,5	12,4	12,3	12,2	12,1	12,1	12,0	11,9
Desvio Padrão (%)	0,08	0,08	0,11	0,04	0,04	0,03	0,01	0,06	0,07	0,03
Coef. de Variabilidade (%)	0,61	0,63	0,88	0,32	0,33	0,25	0,08	0,50	0,58	0,25
Compactação 6a - 10 %	13,8	13,1	13,2	13,1	13,0	12,8	12,9	12,8	12,8	12,6
Compactação 6b - 10 %	13,5	13,3	13,1	13,1	12,8	12,7	12,7	12,7	12,7	12,6
Média (%)	13,7	13,2	13,1	13,1	12,9	12,8	12,8	12,8	12,7	12,6
Desvio Padrão (%)	0,21	0,10	0,06	0,01	0,11	0,07	0,12	0,07	0,01	0,03
Coef. de Variabilidade (%)	1,54	0,76	0,46	0,08	0,85	0,55	0,94	0,55	0,08	0,24

Fonte: o próprio autor

É verificado na Tabela 19, que todos os corpos de prova ficaram dentro do desvio de umidade de  $\pm 1$  % na pesquisa. O incremento de 1 % de água na mistura fez a compensação da perda desta por evaporação, e assim resultados de umidade dentro de desvio especificado.

A Tabela 20 apresenta os valores de massa específica seca dos corpos de prova das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b.

**Tabela 20** - Resultados de massa específica seca dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )									
Compactação 4a - 8 %	1,91	1,92	1,91	1,91	1,91	1,89	1,85	1,82	1,80	1,70
Compactação 4b - 8 %	1,91	1,93	1,91	1,91	1,91	1,89	1,85	1,83	1,80	1,71
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,91	1,92	1,91	1,91	1,91	1,89	1,85	1,83	1,80	1,71
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,56	0,00
Compactação 5a - 9 %	1,93	1,92	1,93	1,93	1,92	1,90	1,86	1,80	1,78	1,69
Compactação 5b - 9 %	1,92	1,93	1,92	1,92	1,93	1,90	1,87	1,81	1,79	1,69
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,90	1,87	1,80	1,79	1,69
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,56	0,00
Compactação 6a - 10 %	1,94	1,96	1,95	1,94	1,94	1,95	1,91	1,87	1,77	1,66
Compactação 6b - 10 %	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,94	1,91	1,88	1,77	1,68
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,95	1,96	1,95	1,95	1,95	1,95	1,91	1,87	1,77	1,67
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60

Fonte: o próprio autor

É possível observar na Tabela 20 que alguns corpos de prova não atingiram massa específica seca máxima requerida. A massa específica seca máxima exigida foi obtida para 8 e 9 % de cimento até os tempos de 60 min e 10 % de cimento até 90 min.

A Tabela 21 apresenta os valores de porosidade dos corpos de prova das misturas obtidos das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b, e na Tabela 22 são mostrados os valores de absorção de água após 4 horas de imersão obtidos das mesmas compactações.

**Tabela 21** - Resultados de porosidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	<b>Porosidade (%)</b>									
Bateria 4a - 8 %	33	33	33	33	33	34	35	36	37	40
Bateria 4b - 8 %	33	33	33	33	33	34	35	36	37	40
Média (%)	33	33	33	33	33	34	35	36	37	40
Desvio Padrão (%)	0,02	0,19	0,15	0,01	0,16	0,05	0,15	0,22	0,18	0,11
Coef. de Variabilidade (%)	0,06	0,58	0,45	0,03	0,48	0,15	0,43	0,61	0,49	0,27
Bateria 5a - 9 %	33	33	33	33	33	34	35	37	38	41
Bateria 5b - 9 %	33	33	33	33	33	33	35	37	37	41
Média (%)	33	33	33	33	33	34	35	37	37	41
Desvio Padrão (%)	0,05	0,08	0,03	0,06	0,09	0,11	0,17	0,2	0,31	0,16
Coef. de Variabilidade (%)	0,15	0,24	0,09	0,18	0,28	0,33	0,49	0,54	0,83	0,39
Bateria 6a - 10 %	32	32	32	32	32	32	33	35	38	42
Bateria 6b - 10 %	32	32	32	32	32	32	33	34	38	41
Média (%)	32	32	32	32	32	32	33	35	38	42
Desvio Padrão (%)	0,05	0,02	0,13	0,08	0,15	0,1	0,04	0,11	0,1	0,33
Coef. de Variabilidade (%)	0,16	0,06	0,41	0,25	0,47	0,31	0,12	0,32	0,26	0,79

Fonte: o próprio autor

**Tabela 22** - Resultados de absorção de água após 4 horas de imersão dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	<b>Absorção de água após 4 horas de imersão (%)</b>									
Compactação 4a - 8 %	0,13	0,10	0,13	0,19	0,23	2,13	3,31	3,63	4,06	7,30
Compactação 4b - 8 %	0,14	0,11	0,14	0,21	0,24	2,24	3,30	3,54	4,19	7,39
Média (%)	0,13	0,11	0,14	0,20	0,23	2,19	3,31	3,59	4,13	7,35
Desvio Padrão (%)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,01	0,07	0,09	0,06
Coef. de Variabilidade (%)	7,44	9,41	7,19	4,90	4,97	3,66	0,30	1,95	2,18	0,82
Compactação 5a - 9 %	0,10	0,09	0,09	0,12	0,19	1,72	2,72	3,34	3,53	7,02
Compactação 5b - 9 %	0,11	0,10	0,10	0,14	0,21	1,75	2,76	3,27	3,48	7,05
Média (%)	0,10	0,10	0,09	0,13	0,20	1,73	2,74	3,31	3,51	7,04
Desvio Padrão (%)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,03	0,02
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	6,80	7,06	7,45	5,02	1,15	1,09	1,51	0,86	0,28
Compactação 6a - 10 %	0,08	0,07	0,10	0,10	0,22	1,42	1,92	2,87	3,61	6,33
Compactação 6b - 10 %	0,09	0,08	0,11	0,11	0,20	1,44	1,88	2,91	3,72	6,25
Média (%)	0,08	0,08	0,10	0,11	0,21	1,43	1,90	2,89	3,67	6,29
Desvio Padrão (%)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,08	0,05
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	8,25	9,29	9,22	4,68	0,70	1,58	1,04	2,18	0,79

Fonte: o próprio autor

Conforme a Tabela 21 e 22, o maior teor de cimento (10 %) acarretou na menor porosidade e absorção de água dos corpos de prova, e ambos aumentando com o acréscimo do tempo para a compactação da mistura.

Por fim na Tabela 23 estão apresentados os valores de resistência à compressão simples das misturas solo-cimento obtidos das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b.

**Tabela 23** - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal e estudo estatístico

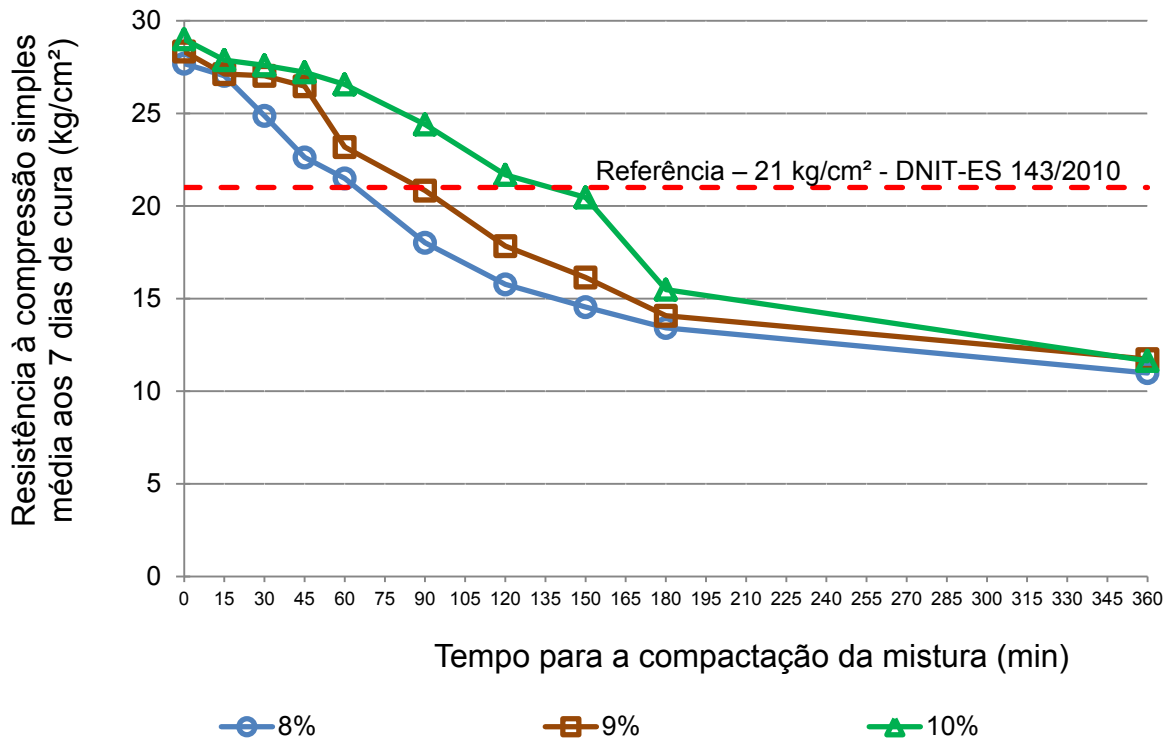
Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	Resistência à compressão simples - RCS (kg/cm <sup>2</sup> )									
Compactação 4a - 8 %	27,8	27,0	24,4	22,7	21,6	17,8	15,6	14,6	13,9	10,9
Compactação 4b - 8 %	27,6	27,0	25,3	22,5	21,4	18,2	16,0	14,5	13,0	11,1
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	27,7	27,0	24,9	22,6	21,5	18,0	15,8	14,5	13,4	11,0
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,13	0,00	0,66	0,13	0,13	0,27	0,27	0,13	0,66	0,13
Coef. de Variabilidade (%)	0,47	0,00	2,65	0,57	0,60	1,50	1,71	0,89	4,92	1,18
Compactação 5a - 9 %	28,2	27,0	27,2	26,3	22,5	20,6	17,6	16,3	14,3	11,6
Compactação 5b - 9 %	28,5	27,2	26,8	26,7	23,8	21,0	18,0	16,0	13,9	11,8
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	28,3	27,1	27,0	26,5	23,2	20,8	17,8	16,1	14,1	11,7
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,27	0,13	0,27	0,27	0,93	0,27	0,27	0,27	0,27	0,13
Coef. de Variabilidade (%)	0,95	0,48	1,00	1,02	4,01	1,30	1,51	1,67	1,92	1,11
Compactação 6a - 10 %	29,1	28,0	27,8	27,2	26,8	24,8	22,0	20,6	16,0	11,5
Compactação 6b - 10 %	28,9	27,8	27,4	27,2	26,3	24,0	21,4	20,3	15,0	11,8
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	29,0	27,9	27,6	27,2	26,6	24,4	21,7	20,5	15,5	11,6
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,13	0,13	0,27	0,00	0,40	0,53	0,40	0,27	0,66	0,27
Coef. de Variabilidade (%)	0,45	0,47	0,98	0,00	1,51	2,17	1,84	1,32	4,26	2,32

Fonte: o próprio autor

Para os teores de 8 e 9 % a resistência mínima até o tempo de 60 min e 120 min para o teor de 10 % de cimento, atende o valor requerido.

Com os dados da Tabela 23 foi possível construir o Gráfico 10 relacionando o tempo médio para a compactação das misturas *versus* resistência à compressão simples média.

**Gráfico 10** - Tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média das misturas solo-cimento com teores de 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal.



Fonte: o próprio autor

Para as misturas com o teor de 10 % de cimento, com a adição de 1 % no teor de umidade ótima foram obtidos resultados mais expressivos de resistência à compressão simples em relação à utilização da umidade ótima, mostrando-se mais sensível ao aumento de água.

Desses resultados é possível afirmar que, quando a mistura de solo-cimento for compactada, com acréscimo de 1 % na umidade ótima e aplicada energia normal na compactação, o tempo máximo para a compactação é de 67 min, 89 min e 124 min para os teores de 8, 9 e 10 % de cimento respectivamente. Esses tempos máximos foram obtidos por interpolação linear, dos resultados da Tabela 23, condicionalmente a resistência mínima à compressão simples de 21 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 4.2.5 Bateria de Ensaio com Utilização do Teor de Umidade Ótima + 1 % e Energia Alterada na Compactação

Com o objetivo de obter maior tempo entre a preparação do solo-cimento e sua compactação foi alterada a energia de compactação, pois já havia sido modificado o teor de umidade da mistura.

A terceira bateria (C) utilizou o teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação. Esta energia foi usada apenas em alguns tempos, onde os corpos de prova não atingiram o grau de compactação de 100 % na segunda bateria (B). A Tabela 24 apresenta os resultados de teores de umidade das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b.

**Tabela 24** - Resultados do teor de umidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	Teor de umidade (%)									
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	32	39	47	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	7,32	8,92	10,75	11,90	11,90	11,90
Compactação 7a - 8 %	13,0	12,7	12,9	12,8	12,6	12,4	12,2	11,9	11,8	11,8
Compactação 7b - 8 %	13,1	13,0	12,8	12,7	12,7	12,6	12,1	11,9	11,9	11,7
Média (%)	13,0	12,9	12,9	12,8	12,7	12,5	12,1	11,9	11,9	11,7
Desvio Padrão (%)	0,13	0,18	0,12	0,10	0,07	0,09	0,03	0,05	0,09	0,02
Coef. de Variabilidade (%)	1,00	1,40	0,93	0,78	0,55	0,72	0,25	0,42	0,76	0,17
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	32	39	47	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	7,32	8,92	10,75	11,90	11,90	11,90
Compactação 8a - 9 %	13,0	12,9	12,8	12,6	12,5	12,5	12,5	12,3	12,0	11,9
Compactação 8b - 9 %	13,2	12,9	12,8	12,8	12,7	12,5	12,4	12,3	12,2	12,1
Média (%)	13,1	12,9	12,8	12,7	12,6	12,5	12,5	12,3	12,1	12,0
Desvio Padrão (%)	0,12	0,02	0,02	0,12	0,11	0,01	0,09	0,07	0,15	0,12
Coef. de Variabilidade (%)	0,92	0,15	0,16	0,94	0,87	0,08	0,72	0,57	1,24	1,00
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	32	39	47	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	7,32	8,92	10,75	11,90	11,90	11,90
Compactação 9a - 10 %	13,9	13,6	13,3	13,3	13,2	13,2	13,1	13,0	12,6	12,4
Compactação 9b - 10 %	13,8	13,5	13,6	13,4	13,3	13,3	12,8	13,0	12,7	12,7
Média (%)	13,9	13,6	13,5	13,4	13,2	13,2	12,9	13,0	12,7	12,6
Desvio Padrão (%)	0,06	0,11	0,19	0,06	0,06	0,08	0,21	0,02	0,04	0,16
Coef. de Variabilidade (%)	0,43	0,81	1,41	0,45	0,45	0,61	1,62	0,15	0,32	1,27

Fonte: o próprio autor

Assim como na bateria anterior, a Tabela 24 mostra o atendimento de todos os corpos de prova da bateria C, em relação ao desvio do teor de umidade de  $\pm 1\%$ .

Mesmo tomando as devidas precauções, verifica-se diminuição do teor de umidade com o aumento do tempo para a compactação da mistura solo-cimento por evaporação.

Na Tabela 25 são mostrados os valores de massa específica seca dos corpos de prova das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b.

**Tabela 25** - Resultados de massa específica seca dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )									
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	32	39	47	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	7,32	8,92	10,75	11,90	11,90	11,90
Compactação 7a - 8 %	1,90	1,91	1,90	1,91	1,91	1,90	1,91	1,90	1,89	1,86
Compactação 7b - 8 %	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,89	1,87
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,90	1,91	1,91	1,91	1,91	1,90	1,91	1,91	1,89	1,87
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	40	46	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	9,15	10,52	11,90	11,90
Compactação a 8a - 9 %	1,93	1,92	1,93	1,93	1,92	1,92	1,93	1,93	1,90	1,80
Compactação a 8b - 9 %	1,92	1,93	1,93	1,92	1,93	1,93	1,92	1,92	1,89	1,80
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,90	1,80
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,90	11,90	11,90
Compactação 9a - 10 %	1,95	1,95	1,95	1,95	1,96	1,96	1,96	1,96	1,92	1,81
Compactação 9b - 10 %	1,94	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,96	1,95	1,91	1,81
Média (g/cm <sup>3</sup> )	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,96	1,96	1,95	1,91	1,81
Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: o próprio autor

Na Tabela 25, pode ser verificado para os tempos de 180 e 360 min a não obtenção da massa específica seca da curva de compactação, para todos os teores de cimento analisados na pesquisa. Foram compactados corpos de prova

com número superior a 52 golpes, e nestes casos notou-se inexistência de variação na massa específica seca da mistura compactada.

Com as compactações da terceira bateria (C) é possível verificar a influência do teor de umidade na mistura, mesmo para os dois últimos tempos, de 180 e 360 minutos, que não atingiram as massas específicas secas desejadas, uma vez que todos os corpos de prova, exceto dos tempos supracitados, atingiram o grau de compactação exigido.

Na Tabela 26 são apresentados os valores de porosidade dos corpos de prova das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b e na Tabela 27 estão os valores de absorção de água após 4 horas de imersão destas compactações.

**Tabela 26** - Resultados de porosidade dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
<b>Porosidade</b>										
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,9	11,9	11,9
Bateria 7a - 8 %	34	33	33	33	33	33	33	34	34	35
Bateria 7b - 8 %	33	33	33	33	33	33	33	33	33	35
Média (%)	33	33	33	33	33	33	33	33	34	35
Desvio Padrão (%)	0,12	0,03	0,12	0	0,01	0,1	0,11	0,16	0,01	0,03
Coef. de Variabilidade (%)	0,36	0,09	0,36	0	0,03	0,3	0,33	0,48	0,03	0,09
<hr/>										
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,9	11,9	11,9
Bateria 8a - 9 %	3	33	33	33	33	33	33	33	34	37
Bateria 8b - 9 %	33	33	33	33	33	33	33	33	34	37
Média (%)	33	33	33	33	33	33	33	33	34	37
Desvio Padrão (%)	0,09	0,01	0,02	0,09	0,08	0,03	0,04	0,03	0,01	0
Coef. de Variabilidade (%)	0,28	0,03	0,06	0,27	0,24	0,09	0,12	0,09	0,03	0
<hr/>										
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,9	11,9	11,9
Bateria 9a - 10 %	32	32	32	32	32	32	32	32	33	37
Bateria 9b - 10 %	32	32	32	32	32	32	31	32	33	37
Média (%)	32	32	32	32	32	32	31	32	33	37
Desvio Padrão (%)	0	0,07	0,12	0,06	0,03	0,06	0,13	0,06	0,07	0,07
Coef. de Variabilidade (%)	0	0,22	0,38	0,19	0,09	0,19	0,41	0,19	0,21	0,19

Fonte: o próprio autor

**Tabela 27** - Resultados de absorção de água após 4 horas de imersão dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
<b>Absorção de água após 4 horas de imersão (%)</b>										
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação (kg.cm/cm³)	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,90	11,90	11,90
Bateria 7a - 8 %	0,13	0,13	0,15	0,21	0,21	0,31	0,40	0,50	1,49	1,70
Bateria 7b - 8 %	0,13	0,12	0,16	0,20	0,20	0,30	0,45	0,48	1,43	1,75
Média (%)	0,13	0,12	0,16	0,21	0,21	0,31	0,43	0,49	1,46	1,72
Desvio Padrão (%)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,04	0,04
Coef. de Variabilidade (%)	0,00	8,13	6,43	4,86	0,00	3,26	7,02	2,04	2,74	2,32
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação (kg.cm/cm³)	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,90	11,90	11,90
Bateria 8a - 9 %	0,11	0,10	0,10	0,12	0,18	0,22	0,27	0,45	1,22	1,48
Bateria 8b - 9 %	0,12	0,11	0,10	0,13	0,16	0,21	0,26	0,43	1,18	1,56
Média (%)	0,12	0,11	0,10	0,13	0,17	0,22	0,27	0,44	1,20	1,52
Desvio Padrão (%)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,03	0,06
Coef. de Variabilidade (%)	8,53	9,45	0,00	0,00	9,66	0,00	3,72	2,27	2,49	3,96
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação (kg.cm/cm³)	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,90	11,90	11,90
Bateria 9a - 10 %	0,08	0,08	0,10	0,11	0,15	0,15	0,17	0,20	0,91	1,13
Bateria 9b - 10 %	0,09	0,08	0,09	0,13	0,15	0,17	0,18	0,22	0,89	1,24
Média (%)	0,08	0,08	0,09	0,12	0,15	0,16	0,18	0,21	0,90	1,18
Desvio Padrão (%)	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,08
Coef. de Variabilidade (%)	9,04	0,00	10,42	9,34	0,00	6,32	5,67	9,51	2,22	6,76

Fonte: o próprio autor

Das Tabelas 26 e 27 é possível verificar o aumento da porosidade, logo aumento da absorção, com o aumento do tempo para a compactação da mistura, e, além disso, é possível verificar que o maior teor de cimento (10 %) apresentou a menor porosidade e absorção de água em todos os tempos, exceto no tempo de 360 minutos. Com a utilização do teor de umidade ótima + 1 %, promovendo a aproximação do teor de umidade ótima de compactação dos corpos de prova e a energia alterada necessária para atingir a massa específica seca, houve significativas reduções de porosidade e absorção de água dos corpos de prova. Na Tabela 28 estão apresentados os resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b.

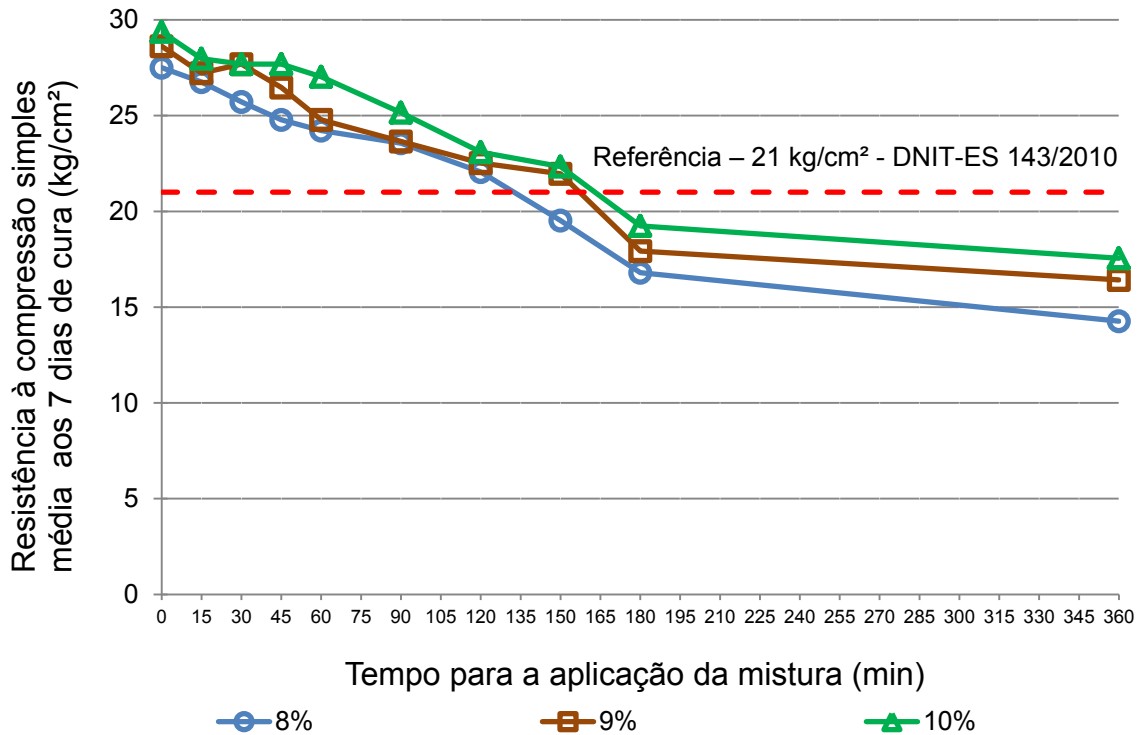
**Tabela 28** - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada e estudo estatístico

Compactação - Teor de cimento	Tempo para a compactação (min)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	360
	Resistência à compressão simples - RCS (kg/cm <sup>2</sup> )									
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,90	11,90	11,90
Compactação 7a - 8 %	27,4	26,7	25,9	24,4	24,0	23,5	22,2	19,3	17,1	14,5
Compactação 7b - 8 %	27,6	26,8	25,5	25,2	24,4	23,7	22,0	19,7	16,5	14,1
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	27,5	26,8	25,7	24,8	24,2	23,6	22,1	19,5	16,8	14,3
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,13	0,13	0,27	0,53	0,27	0,13	0,13	0,27	0,40	0,27
Coef. de Variabilidade (%)	0,48	0,50	1,03	2,14	1,10	0,56	0,60	1,36	2,37	1,86
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,90	11,90	11,90
Compactação 8a - 9 %	28,5	27,2	27,6	26,7	24,4	23,5	22,3	21,6	17,6	16,7
Compactação 8b - 9 %	28,7	27,2	27,8	26,3	25,2	23,8	22,7	22,3	18,2	16,1
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	28,6	27,2	27,7	26,5	24,8	23,7	22,5	22,0	17,9	16,4
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,13	0,00	0,13	0,27	0,53	0,27	0,27	0,53	0,40	0,40
Coef. de Variabilidade (%)	0,46	0,00	0,48	1,00	2,14	1,12	1,18	2,42	2,22	2,42
Nº de golpes por camada	26	26	26	26	26	35	45	52	52	52
Energia de compactação	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	8,01	10,29	11,90	11,90	11,90
Compactação 9a - 10 %	29,3	28,2	27,8	28,0	26,8	26,3	23,5	22,2	18,8	17,8
Compactação 9b - 10 %	29,5	27,8	27,6	27,4	27,2	24,0	22,7	22,5	19,7	17,3
Média (kg/cm <sup>2</sup> )	29,4	28,0	27,7	27,7	27,0	25,2	23,1	22,3	19,2	17,6
Desvio Padrão (kg/cm <sup>2</sup> )	0,13	0,27	0,13	0,40	0,27	1,59	0,53	0,27	0,66	0,40
Coef. de Variabilidade (%)	0,45	0,95	0,48	1,44	0,98	6,33	2,30	1,19	3,45	2,27

Fonte: o próprio autor

A Tabela 28 mostra que nos tempos para a compactação de 180 e 360 minutos não atingiram a resistência à compressão mínima não foi atingida. Com os dados da Tabela 28 foi feito o Gráfico 11, relacionando o tempo médio para a compactação das misturas *versus* resistência à compressão simples média.

**Gráfico 11** - Tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média das misturas solo-cimento com teores de 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada



Fonte: o próprio autor

A partir, dos resultados da Tabela 28 e do Gráfico 11, é possível afirmar que, quando a mistura solo-cimento for compactada com acréscimo de 1 % na umidade ótima e utilizada energia alterada, o tempo máximo para a compactação, é de 139 min para 8 %, 154 min para 9 % e 165 min para 10 % de cimento. Esses tempos máximos foram obtidos por interpolação linear dos resultados da Tabela 29, relativos à resistência mínima à compressão simples de 21 kg/cm<sup>2</sup>.

## 5 DISCUSSÃO

Este capítulo apresentará a discussão dos resultados médios encontrados para um solo classificado geotecnicaamente como uma areia média a fina argilosa, areia fina de acordo com o DNIT e A-2-4 pela AASHTO, estabilizado com teores de 8, 9 e 10 % de cimento Portland em relação à massa de solo seca.

### 5.1 INFLUÊNCIA DO TEOR DE CIMENTO NA CURVA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO

Com os resultados da compactação das misturas solo-cimento com 8, 9 e 10 % de cimento, do solo natural e com os resultados de Cancian (2013) em misturas solo-cimento de 6 e 7 % de cimento, foi construída a Tabela 29.

**Tabela 29** - Massa específica seca máxima média e teor de umidade ótima média obtidas das curvas de compactação das misturas de solo-cimento e solo natural

Teor de cimento (%)	Massa específica seca	Umidade ótima média
0	1,95**	10,9**
6	1,84*	11,2*
7	1,89*	12,2*
8	1,91	12,4
9	1,93	12,8
10	1,95	13,4

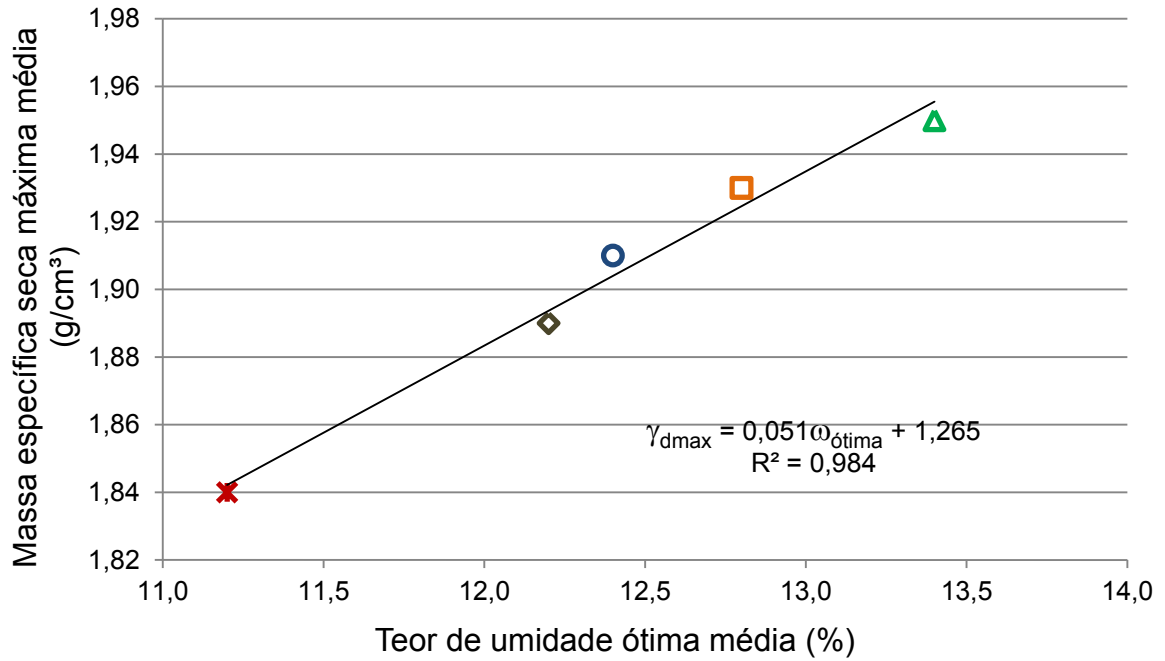
**Fonte:** o próprio autor

\*Valores obtidos por Cancian (2013)

\*\*Valores obtidos da curva de compactação do solo natural

A partir dos valores da Tabela 29 foram construídos três gráficos. O Gráfico 12 apresenta a relação do teor de umidade ótima média *versus* massa específica seca máxima média das misturas solo-cimento. O Gráfico 13 apresenta a relação teor de cimento *versus* massa específica seca máxima média e o Gráfico 14 mostra a relação do teor de cimento *versus* o teor de umidade ótima média das misturas solo-cimento.

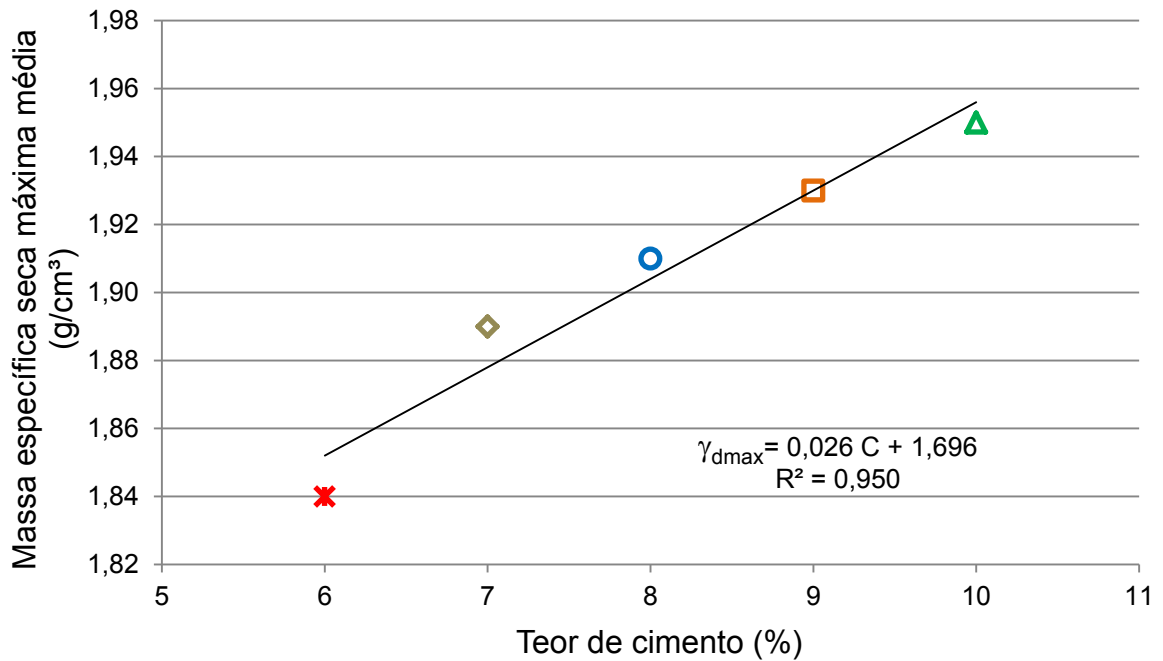
**Gráfico 12 - Teor de umidade ótima média versus massa específica seca máxima média das misturas solo-cimento**



✖ 6 % de cimento    ◆ 7 % de cimento    ● 8 % de cimento    ◻ 9 % de cimento    ▲ 10 % de cimento

Fonte: o próprio autor

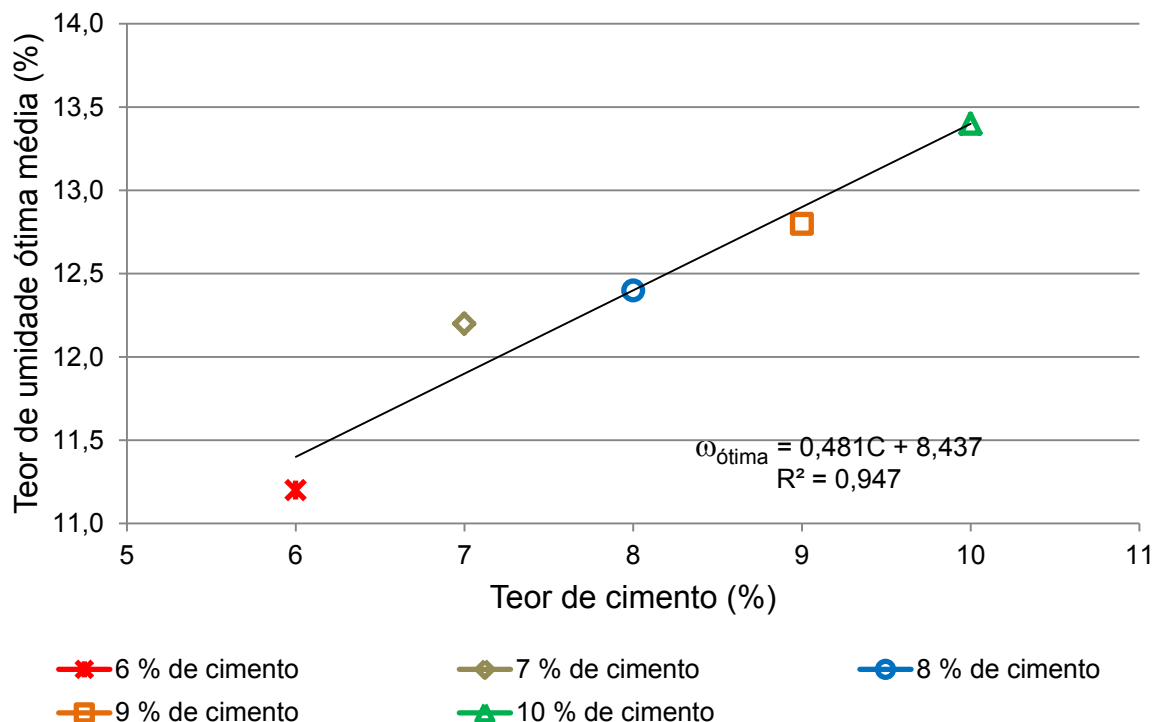
**Gráfico 13 - Teor de cimento versus massa específica seca máxima média das misturas solo-cimento**



✖ 6 % de cimento    ◆ 7 % de cimento    ● 8 % de cimento  
 ◻ 9 % de cimento    ▲ 10 % de cimento

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 14 - Teor de cimento versus teor de umidade ótima média das misturas solo-cimento**



Fonte: o próprio autor

Nota-se no Gráfico 12 e 13 o aumento da massa específica solo-cimento e umidade ótima média da mistura com o aumento do teor de cimento. É possível observar nos Gráficos 13 e 14, a existência de uma tendência linear de ambas as características com o acréscimo do teor de cimento.

Das equações, mostradas nos Gráficos 13 e 14, é possível estimar o a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótima em função do teor de cimento da mistura solo-cimento.

Observa-se no Gráfico 13 o aumento na massa específica seca máxima com a adição de cimento. Isso se deve ao aumento da quantidade de finos da mistura com o acréscimo no teor de cimento, ocorrendo à diminuição da porosidade, devido ao preenchimento dos poros da mistura compactada pelo cimento.

Este aumento de cimento acarreta também no acréscimo do teor de umidade ótima da mistura (Gráfico 14). O aumento de cimento provoca aumento na superfície específica a ser hidratada, necessitando de maior quantidade de água na mistura.

No entanto o aumento do teor de umidade provoca aumento dos vazios na mistura solo-cimento resultando na massa específica inferior a do solo natural ( $1,95 \text{ g/cm}^3$ ). As quantidades de 6, 7, 8 e 9 % de cimento não foram suficientes para preencher os vazios ocasionados pelo acréscimo de água no interior da mistura solo-cimento. Apenas a mistura com o teor de cimento de 10 % adicionado em relação à massa de solo seca, apresentou massa específica seca máxima igual a do solo natural.

Na umidade ótima, a mistura solo-cimento compactada apresenta sua menor porosidade, gerando maior contato entre os grãos de solo, água e cimento, acarretando aumento da hidratação do cimento e assim maior resistência mecânica.

A existência de pouca água na mistura promove a elevação dos vazios, assim aumentando da porosidade da mistura. Este aumento da porosidade não permite a aproximação dos grãos de solo, água e cimento diminuindo a hidratação e gerando resistências menores.

Muita água no interior da mistura acarreta no aumento da porosidade (aumentando os vazios) ocasionando novamente menor resistência do solo-cimento. Por isso, na umidade ótima ocorre a menor porosidade e assim o aumento do contato entre os grãos de solo, água e cimento, favorecendo a resistência.

Vale também destacar os resultados encontrados por outros autores que utilizaram solos arenosos estabilizados com cimento para determinar as características da compactação em relação ao teor de cimento. Sanbonsuge (2013), aponta aumento da massa específica e da umidade ótima com o acréscimo de cimento em uma areia argilosa. Porém existem trabalhos que mencionam parcialmente o contrário, como é o caso de Pereira (2012) e Teixeira (2014) onde a massa específica aumentou, para o teor de umidade ótima menor.

O fato pode ser decorrente das frações granulométricas dos solos analisados neste e nos trabalhos de Pereira (2012) e Teixeira (2014). O primeiro autor estudou um solo silto argiloso (com granulometria constituída por 22 % de argila, 39 % de silte, 20 % de areia fina, 10 % de areia média, 6 % de areia grossa e 3 % de pedregulho) e Teixeira um solo silto arenoso (20 % de areia fina, 75 % de silte e 5 % de argila).

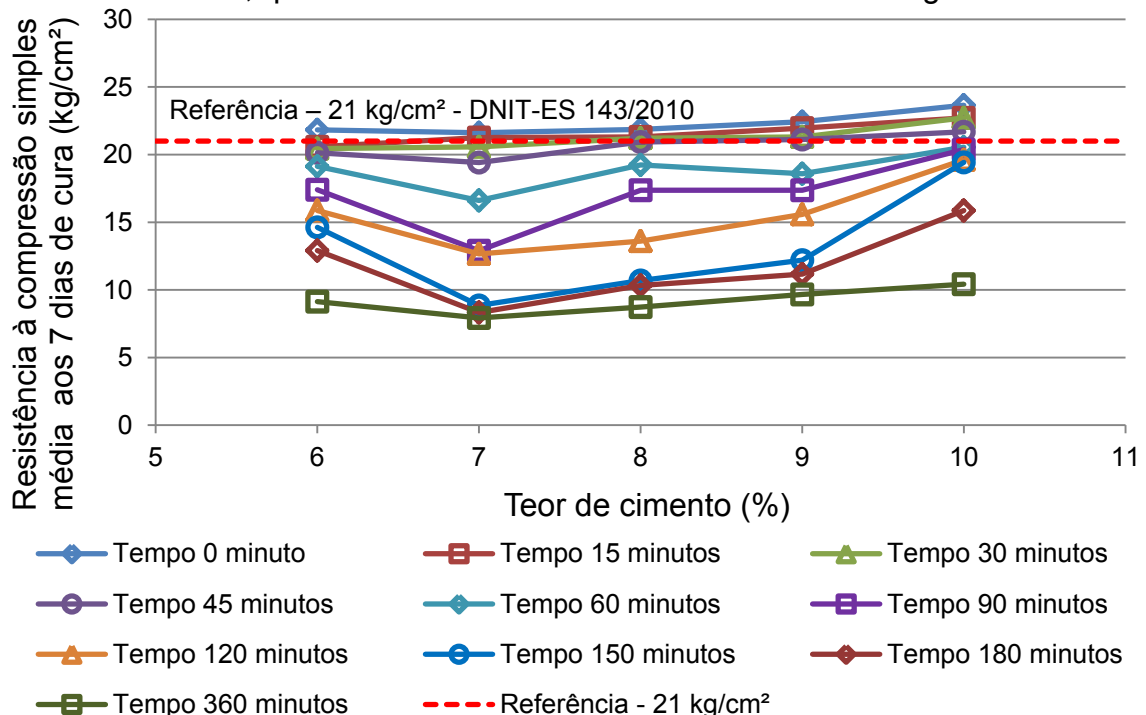
Vendrelusco (1996) explica que a diminuição da umidade ótima é uma característica atrelada ao silte, e assim quanto mais siltosa a mistura maior será a redução do teor de umidade ótimo da mistura, diferentemente do solo estudado

nesta pesquisa, onde a fração de silte é de 4 % quando utilizado defloculante e 16 % quando não utilizado. Porém ambas as porcentagens abaixo dos solos dos outros autores.

## 5.2 INFLUÊNCIA DO TEOR DE CIMENTO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA SOLO-CIMENTO

Após realizadas as 3 baterias, num total de 18 compactações com solo-cimento, utilizando 8, 9 e 10 %, e com os dados de Cancian (2013) foi possível realizar os Gráficos 15, 16 e 17, apresentando a relação do teor de cimento *versus* a resistência à compressão simples média do solo-cimento de cada um dos tempos para a compactação.

**Gráfico 15** - Teor de cimento *versus* resistência à compressão simples média do solo-cimento, quando utilizado teor de umidade ótima e energia normal



Fonte: o próprio autor

A partir das linhas de tendências do Gráfico 15, foi possível a construção da Tabela 30, apresentando as equações e as correlações do teor de cimento *versus* a resistência à compressão simples média de cada um dos tempos para a compactação.

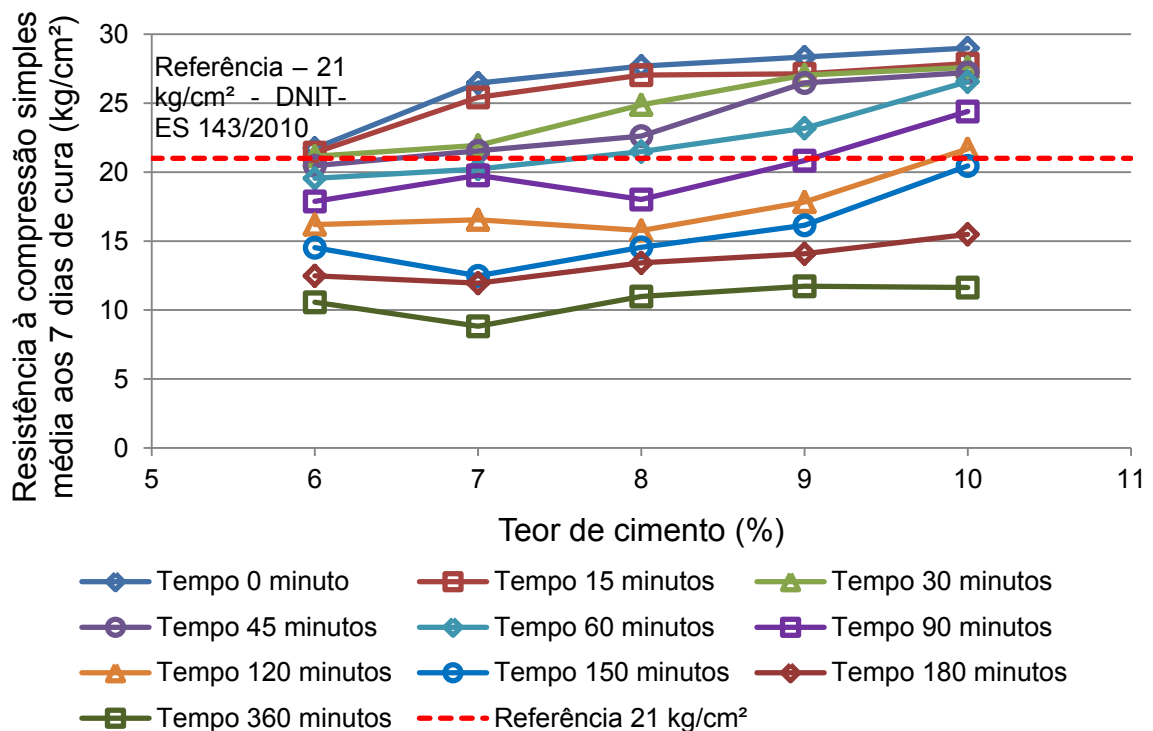
**Tabela 30** - Equações das linhas de tendência e correlações do teor de cimento *versus* a resistência à compressão simples média de cada tempo para a compactação das misturas solo-cimento com teor de umidade ótima e energia normal

Tempo para a	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e C em %)	R <sup>2</sup>
0	RCS = 0,446 C + 18,71	0,732
15	RCS = 0,499 C + 17,56	0,947
30	RCS = 0,525 C + 17,04	0,853
45	RCS = 0,478 C + 16,83	0,729
60	RCS = 0,482 C + 14,96	0,783
90	RCS = 1,041 C + 8,75	0,778
120	RCS = 0,288 C <sup>2</sup> - 4,19 C + 23,61	0,855
150	RCS = 1,142 C <sup>2</sup> - 19,00 C + 81,76	0,905
180	RCS = 1,183 C <sup>2</sup> - 28,01 C + 116,30	0,952
360	RCS = 1,108 C <sup>2</sup> - 16,68 C + 75,83	0,976

Fonte: o próprio autor

Observa-se tendências diferentes para o comportamento mecânico do solo-cimento em relação aos tempos para a compactação da mistura, quando utilizado o teor de umidade ótima e energia normal. Até o tempo para a compactação de 90 minutos a relação resistência à compressão simples *versus* teor de cimento se mostra linear e após este tempo a tendência passa a ser quadrática.

**Gráfico 16** - Teor de cimento *versus* resistência à compressão simples média do solo-cimento, quando utilizado teor de umidade ótima + 1 % e energia normal



Fonte: o próprio autor

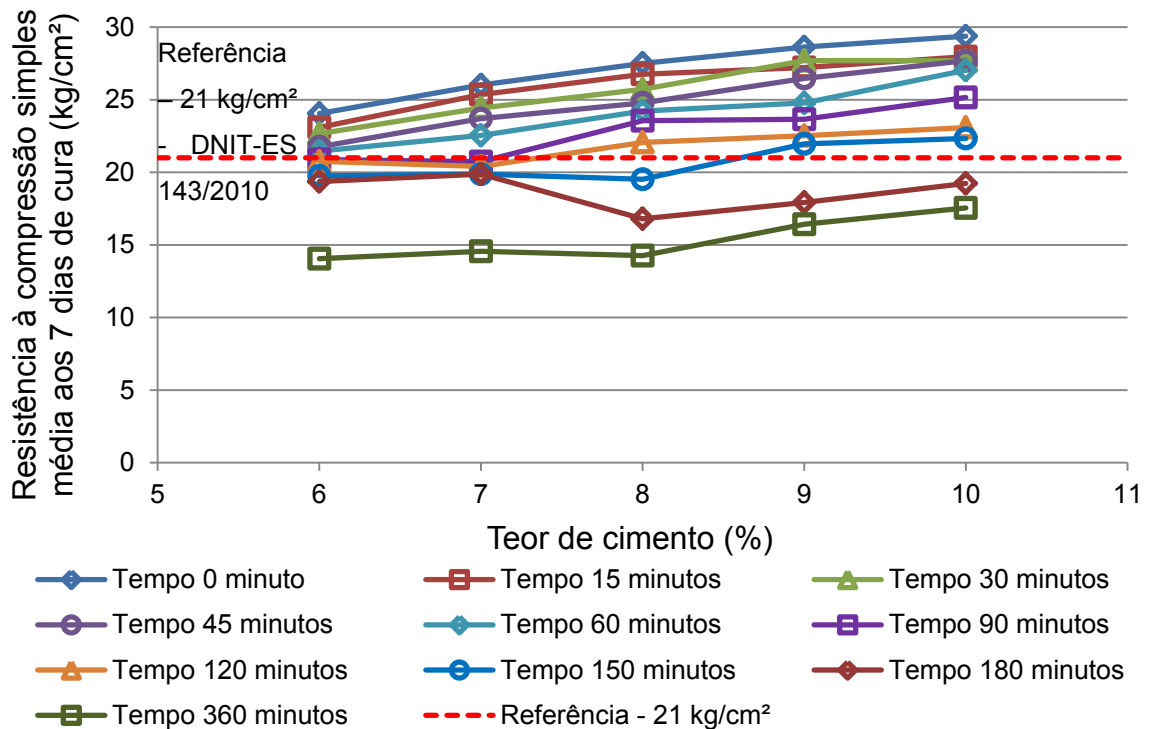
A partir das linhas de tendências do Gráfico 16, foi possível a construção da Tabela 31, apresentando as equações e as correlações do teor de cimento *versus* a resistência à compressão simples média de cada tempo para a compactação.

**Tabela 31** - Equações das linhas de tendência e correlações do teor de cimento *versus* a resistência à compressão simples média de cada tempo para a compactação das misturas solo-cimento com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal

Tempo para a	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e C em %)	R <sup>2</sup>
0	$RCS = 1,643 C + 13,49$	0,800
15	$RCS = 1,461 C + 14,08$	0,793
30	$RCS = 1,798 C + 10,13$	0,953
45	$RCS = 1,842 C + 8,93$	0,935
60	$RCS = 1,698 C + 8,62$	0,918
90	$RCS = 1,411 C + 8,89$	0,791
120	$RCS = 1,224 C + 7,81$	0,748
150	$RCS = 1,554 C + 3,19$	0,772
180	$RCS = 0,814 C + 6,97$	0,857
360	$RCS = 0,504 C + 6,72$	0,759

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 17** - Teor de cimento *versus* resistência à compressão simples média do solo-cimento, quando utilizado teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada



Fonte: o próprio autor

A partir das linhas de tendências do Gráfico 17, foi possível a construção da Tabela 32, apresentando as equações e as correlações do teor de cimento *versus* a resistência à compressão simples de cada tempo para a compactação.

**Tabela 32** - Equações das linhas de tendência e correlações do teor de cimento *versus* a resistência à compressão simples média de cada tempo para a compactação das misturas solo-cimento com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada

Tempo para a	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e teor de	R <sup>2</sup>
0	RCS = 1,326 C + 16,50	0,969
15	RCS = 1,160 C + 16,79	0,914
30	RCS = 1,329 C + 15,00	0,946
45	RCS = 1,462 C + 13,17	0,992
60	RCS = 1,337 C + 13,30	0,971
90	RCS = 1,146 C + 13,62	0,889
120	RCS = 0,677 C + 16,34	0,871
150	RCS = 0,726 C + 14,88	0,728
180	RCS = 0,834 C + 14,40	0,877
360	RCS = 0,887 C + 8,27	0,829

Fonte: o próprio autor

Dos Gráficos 15, 16 e 17 verifica-se o aumento na resistência à compressão simples com o aumento do teor de cimento provocada pelo acréscimo da hidratação da mistura compactada em todos os tempos para a compactação. Observa-se na Tabela 31 a tendência linear da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento até o tempo de 90 minutos (após este tempo foi verificada tendência quadrática), e as Tabelas 32 e 33 apresentaram variação linear para todos os tempos para a compactação da mistura solo-cimento. Dos Gráficos 15, 16 e 17, foi construída a Tabela 33, que mostra a diferença da resistência à compressão simples entre os tempos para a compactação de 0 e 180 minutos (o tempo de 3 horas é o limite imposto pela norma DNIT-ES 143/2010).

**Tabela 33** - Diferença de resistência à compressão simples média dos tempos de 0 e 180 minutos

Bateria	Teor de cimento (%)				
	6	7	8	9	10
	Diferença de resistência à compressão simples (RCS) entre os tempos de 0 e 180 min (kg/cm <sup>2</sup> )				
A	8,9	13,3	11,5	11,3	10,8
B	9,3	14,5	14,3	14,0	13,5
C	4,7	6,1	10,7	10,1	11,5

Fonte: o próprio autor

A Tabela 33 mostra que o aumento do teor de cimento causa aumento da diferença de resistência entre os tempos citados. Isso se deve ao endurecimento da mistura ocasionado pela maior quantidade de cimento.

Na bateria C, foram compactados corpos de prova com energia normal (tempos menores) e também energia alterada (tempo maiores). Foi verificada diferença de resistência entre os corpos de prova compactados nos tempos mencionados, mesmo ambos apresentando a massa específica desejada. A resistência mostrou-se maior para os corpos de prova compactados em tempos menores.

Observa-se que esta pesquisa tem um enfoque diferente dos outros trabalhos. Neste trabalho foi verificada a influência do teor de cimento na resistência à compressão simples em cada tempo de compactação, mas não pode ser feita uma comparação devido à escassez de trabalhos referente ao assunto.

É possível verificar aumento da resistência à compressão simples do solo-cimento com o aumento do teor de cimento, independente do tempo para a compactação da mistura. Esse aumento acarreta também na diminuição do ganho de resistência em tempos para compactação maiores, mesmo ao se elevar a energia de compactação. Deve-se ter claro, que a adoção menor de quantidade de cimento na mistura especificado em projeto, produzirá o desempenho real inferior do solo-cimento.

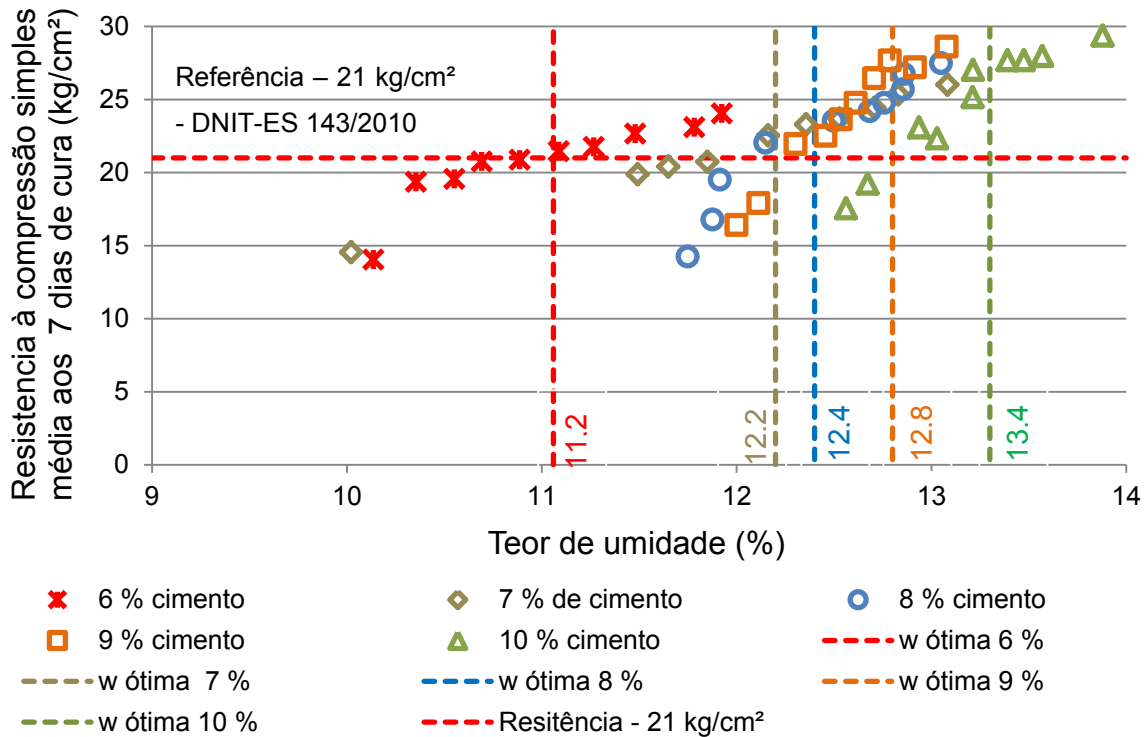
### 5.3 INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA SOLO-CIMENTO

Com a intenção de verificar a influência do teor de umidade na mistura solo-cimento, foram realizadas as compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b, referentes à bateria C. O objetivo, nessa bateria, foi manter a massa específica constante nos valores de 1,91, 1,93 e 1,95 g/cm<sup>3</sup> para os teores de 8, 9 e 10 % de cimento respectivamente.

Mesmo nos tempos para a compactação de 180 e 360 min, nos quais não foi atingida a massa específica seca máxima determinada na curva de compactação para os teores de 8, 9 e 10 % de cimento, é possível verificar a influência do teor de umidade na mistura solo-cimento compactada.

O Gráfico 18 apresenta a relação entre o teor de umidade *versus* resistência à compressão simples média das compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b, e os resultados obtidos por Cancian (2013).

**Gráfico 18** - Teor de umidade média *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada



Fonte: o próprio autor

A Tabela 34 apresenta as equações das linhas de tendência e suas respectivas correlações para cada um dos teores de cimento.

**Tabela 34** - Equações das linhas de tendência e correlações para o teor de umidade média *versus* a resistência à compressão simples média aos 7 dias de cura dos ensaios com 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento

Teor de cimento (%)	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e □□ em %)	R <sup>2</sup>
6	RCS = 4,104 □ - 24,44	0,883
7	RCS = 3,792 □□ - 23,67	0,994
8	RCS = 3,792 □ - 23,60	0,994
9	RCS = 11,680 □ - 122,90	0,953
10	RCS = 9,436 □□ - 99,78	0,914

Fonte: o próprio autor

Conforme a Tabela 34 é possível verificar uma tendência linear da resistência à compressão simples com a variação do teor de umidade da mistura solo-cimento compactada, possibilitando a estimativa da resistência à compressão simples em função de outros teores de umidade para misturas com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento.

O Gráfico 18 mostra que a perda de umidade provoca decréscimo da resistência à compressão simples da mistura. O fato está relacionado à diminuição da hidratação do cimento, menos água para hidratar o cimento, acarreta menor desempenho mecânico. Observa-se também, que as maiores resistências à compressão simples foram obtidas pelos corpos de prova compactados com as misturas mais úmidas. O 1 % a mais de água na mistura acarretou em maior hidratação da mistura e assim maior resistência mecânica.

Ao ser acrescido 1 % na umidade da bateria B (compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b) observou-se que os teores de umidade dos corpos de prova apresentaram-se dentro do desvio de umidade especificado de  $\pm 1$  % (Tabela 19 - Capítulo Resultados). Porém mesmo assim alguns dos valores de massa específica seca não atingiram o valor requerido para 8, 9 e 10 % de cimento.

O fato dos corpos de prova não atingirem a massa específica seca obtida na curva de compactação do solo-cimento, está associado, além da influência do cimento já mencionada, ao teor de umidade da mistura.

Em tempos maiores para a compactação, já ocorreu a perda de umidade por evaporação, ficando a umidade do corpo de prova abaixo da ótima, não existindo a hidratação adequada da mistura compactada, e assim, além de não apresentar massa específica seca da curva de compactação, ocorre diminuição da resistência à compressão simples.

Excluindo-se o ponto extremo 360 minutos (6 horas), as baterias apresentaram uma variação de resistência à compressão simples de 2,7; 6,1; 10,7; 10,1 e 11,5 kg/cm<sup>2</sup> (Tabela 33) para os teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento respectivamente (referente à bateria C). Analisando a taxa de perda de resistência em relação ao tempo, foram obtidas 1,6; 2,0; 3,5; 3,4 e 3,8 kg/cm<sup>2</sup> por hora devido a influência do teor de umidade. Assim pode-se afirmar a existência do aumento da taxa de perda de resistência por hora devido à influência da umidade com o aumento do teor de cimento.

O fato está relacionado à perda de umidade da mistura, fazendo com que a hidratação da mistura com maior teor de cimento seja mais sensível a variação de umidade em relação à utilização de teores menores.

Além disso, pode-se realizar uma comparação entre este e outros trabalhos. Este trabalho vem em complemento ao trabalho realizado por Cancian (2013), mostrando que a maior resistência do solo-cimento ocorre com a mistura mais úmida. Mas em relação ao descrito por Foppa (2005) se confirma parcialmente, uma vez que este autor ao estudar uma areia fina à média siltosa verificou decréscimo na resistência à compressão simples da mistura quando esta se apresenta mais úmida, e neste trabalho com 1 % a mais no teor de umidade ótima da mistura verificou-se aumento da resistência.

Porém pode-se concordar com os resultados de Fonini (2012) ao trabalhar com uma areia fina uniforme, mencionando que a quantidade de água não pode ser colocada demasiadamente acarretando em decréscimo de resistência à compressão simples, assim como apresentado nos corpos de prova das curvas de compactação, se colocada água em excesso, independente do teor de cimento a resistência à compressão simples decresce.

Desses resultados é possível verificar nas obras com adoção de bases de pavimento com a utilização de solo-cimento, a necessidade de um rigoroso controle tecnológico referente ao teor de umidade. A adoção da proposta certa, mas com o teor de umidade fora do especificado pode gerar desempenho mecânico indesejável para a base de solo-cimento do pavimento, refletindo na Verificando-se a diminuição da resistência com a diminuição do teor de umidade e o aumento da taxa de perda de resistência por hora devido à influência da umidade com o aumento do teor de cimento.

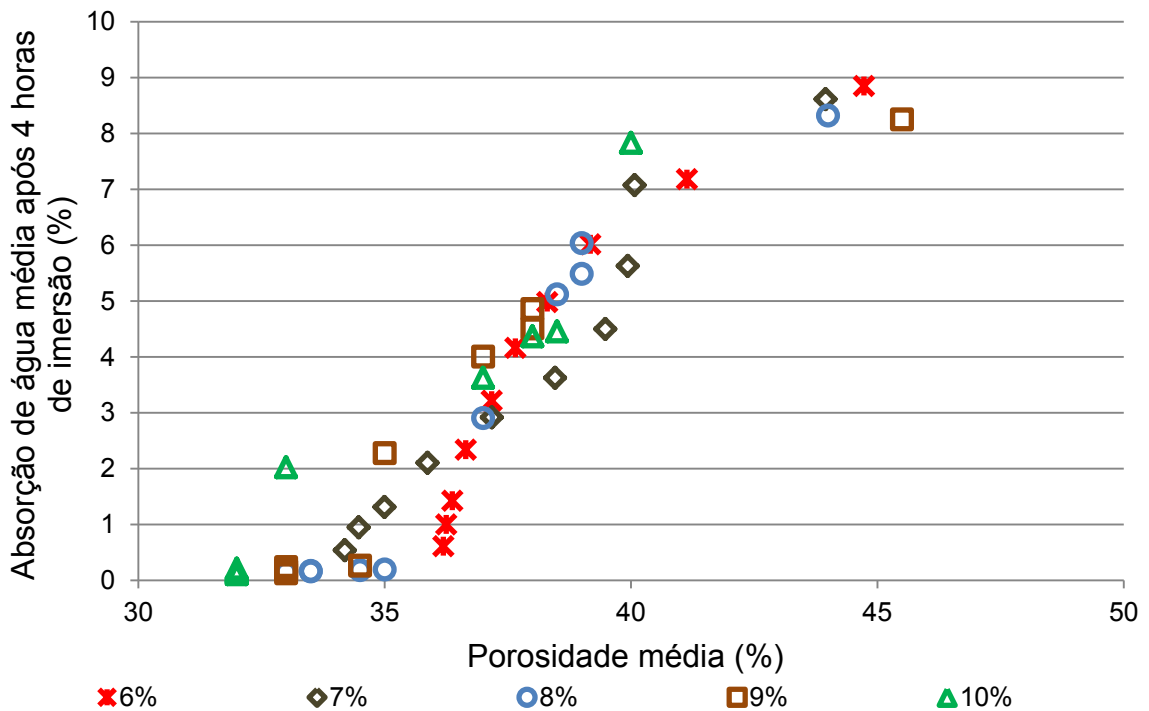
#### 5.4 INFLUÊNCIA DA POROSIDADE E ABSORÇÃO DE ÁGUA SOBRE A RESISTÊNCIA À

##### COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA SOLO-CIMENTO

De posse dos dados das baterias realizadas dos ensaios de compactação das misturas solo-cimento, mais especificamente os resultados de porosidade, absorção de água após 4 horas de imersão e resistência à compressão simples, foi realizado o Gráfico 19, relacionando a porosidade *versus* absorção de água após 4 horas de imersão, o Gráfico 20, mostrando absorção de água *versus* a

resistência à compressão simples, e o Gráfico 21 apresenta a porosidade *versus* a resistência à compressão simples para a bateria A (compactações 1a, 1b, 2a, 2b, 3a e 3b), realizada com umidade ótima e energia normal na compactação. Estão presentes neste gráfico os resultados encontrados por Cancian (2013) com 6 e 7 % de cimento.

**Gráfico 19** - Porosidade média *versus* absorção de água média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação



Fonte: o próprio autor

A partir do Gráfico 19 foi possível construir a Tabela 35 apresentando as equações das linhas de tendência e suas respectivas correlações.

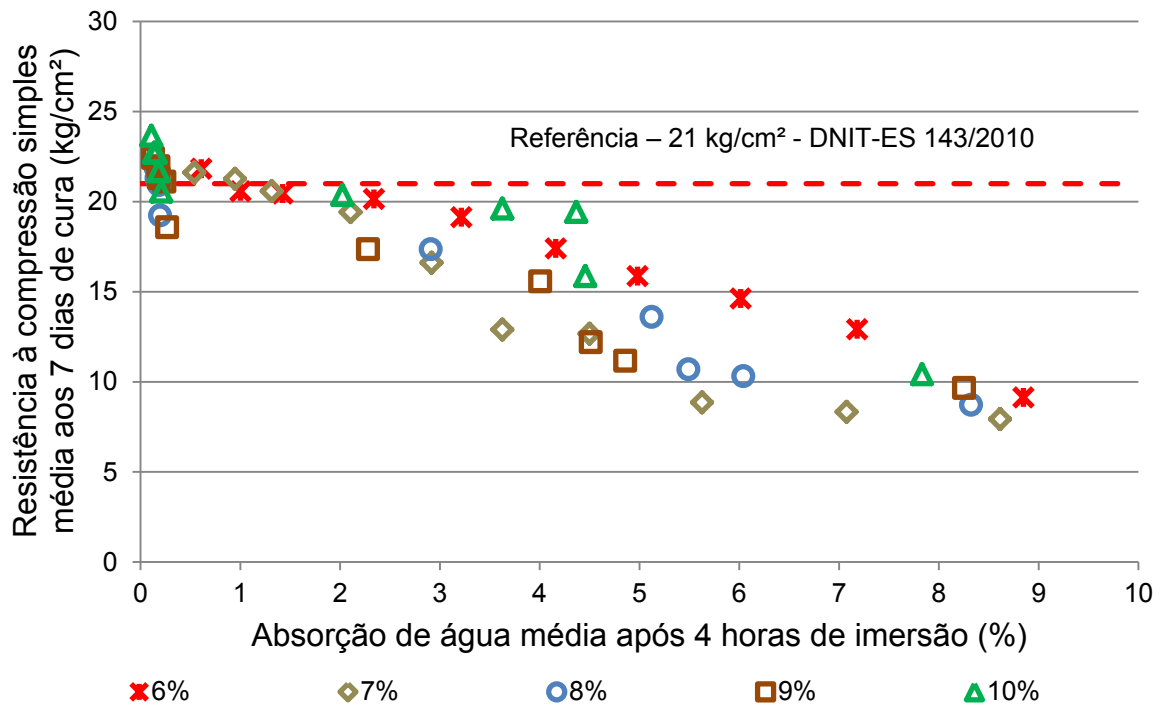
**Tabela 35** - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade média *versus* a absorção média após 4 horas de imersão dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação

Teor de cimento (%)	Equação (n em valor absoluto e abs em %)	R <sup>2</sup>
6	abs = 95,32 n - 32,59	0,878
7	abs = 85,35 n - 28,58	0,953
8	abs = 86,02 n - 28,67	0,950
9	abs = 67,99 n - 21,87	0,934
10	abs = 75,47 n - 23,80	0,939

Fonte: o próprio autor

De acordo com o Gráfico 19 para todos os teores de cimento é verificado aumento na absorção de água com a elevação da porosidade (maior o índice de vazios), acarretando em maior quantidade de água no interior da mistura compactada, com uma tendência linear apresentada na Tabela 35.

**Gráfico 20** - Absorção de água média após 4 horas de imersão *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação



Fonte: o próprio autor

A Tabela 36 mostra as equações das linhas de tendência apresentadas e suas respectivas correlações.

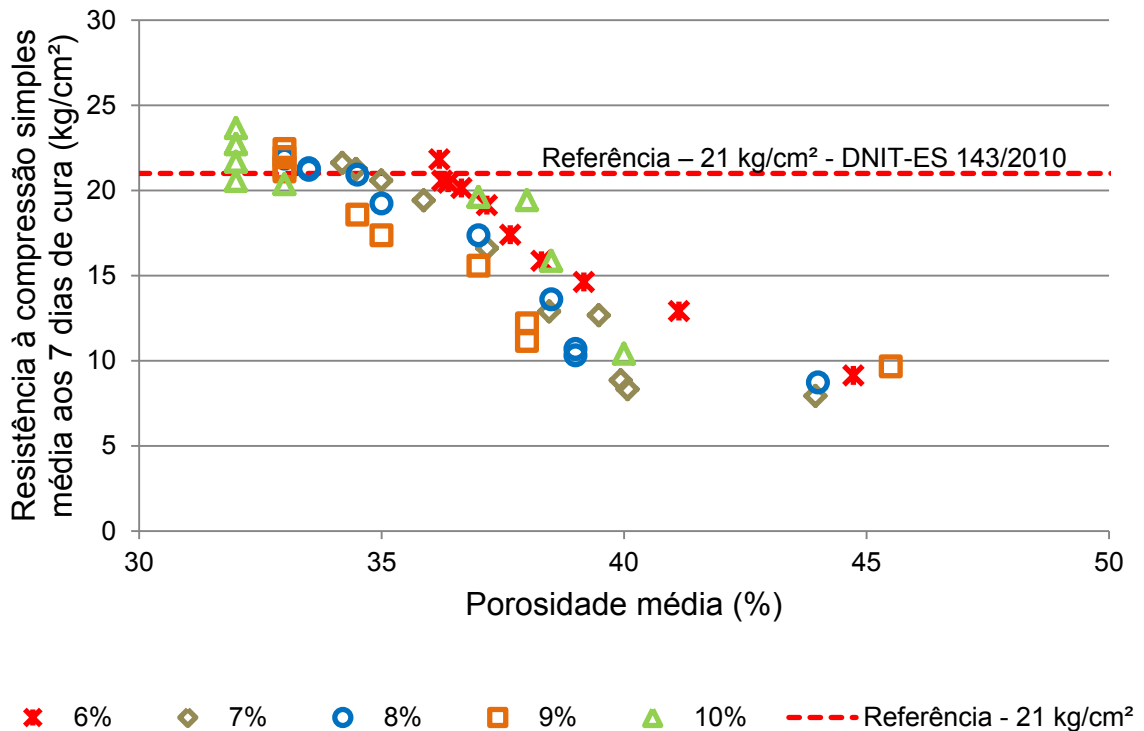
**Tabela 36** - Equações das linhas de tendência e correlações da absorção média após 4 horas de imersão *versus* a resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação

Teor de cimento (%)	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e abs em %)	R <sup>2</sup>
6	RCS = -1,442 abs + 22,94	0,975
7	RCS = -1,969 abs + 22,35	0,923
8	RCS = -1,625 abs + 21,20	0,959
9	RCS = -1,608 abs + 21,14	0,903
10	RCS = -1,370 abs + 22,86	0,863

Fonte: o próprio autor

Conforme o Gráfico 20, os corpos de prova que apresentaram maior absorção de água (maior porosidade) também apresentaram menor resistência mecânica, verificando-se uma relação linear entre a absorção e a resistência à compressão simples como verificada na Tabela 36.

**Gráfico 21** - Porosidade média *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação



Fonte: o próprio autor

A Tabela 37 mostra as equações das linhas de tendência apresentadas e suas respectivas correlações.

**Tabela 37** - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade média *versus* a resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação

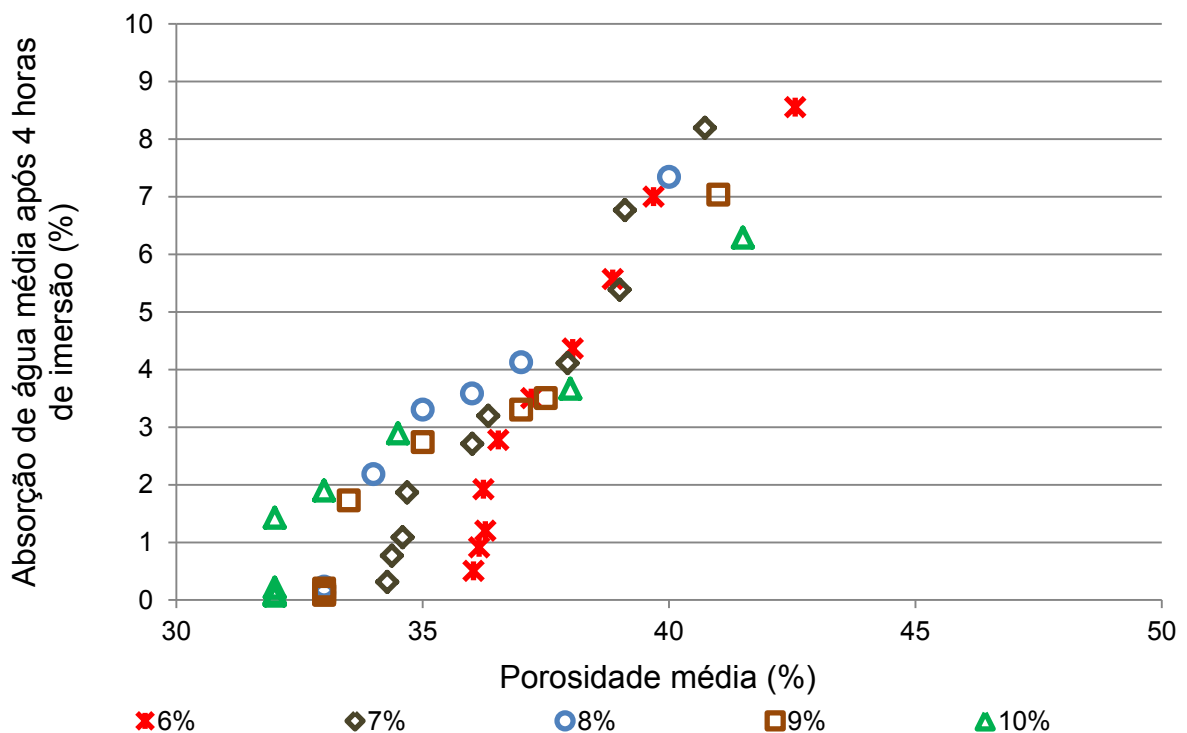
Teor de cimento (%)	Equação (RCS em kg/cm² e n em valor)	R²
6	RCS = -144,10 n + 72,48	0,940
7	RCS = -169,27 n + 79,10	0,919
8	RCS = -139,91 n + 67,84	0,912
9	RCS = -107,13 n + 55,53	0,892
10	RCS = -100,19 n + 54,37	0,869

Fonte: o próprio autor

De acordo com o Gráfico 21 ao elevar a porosidade diminui-se à resistência à compressão simples, devido à diminuição do contato entre os grãos de solo, cimento e água promovendo uma menor hidratação da mistura, apresentando uma tendência linear entre a porosidade e a resistência à compressão simples, como apresentado na Tabela 37.

O Gráfico 22 apresenta a porosidade *versus* absorção de água após 4 horas de imersão, o Gráfico 23 relaciona a absorção de água após 4 horas de imersão *versus* a resistência à compressão simples e o Gráfico 24 apresenta a porosidade *versus* a resistência à compressão simples, para a bateria B (compactações 4a, 4b, 5a, 5b, 6a e 6b) com umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação.

**Gráfico 22** - Porosidade média *versus* absorção de água média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação



Fonte: o próprio autor

A Tabela 38 apresenta as equações das linhas de tendência e suas correlações.

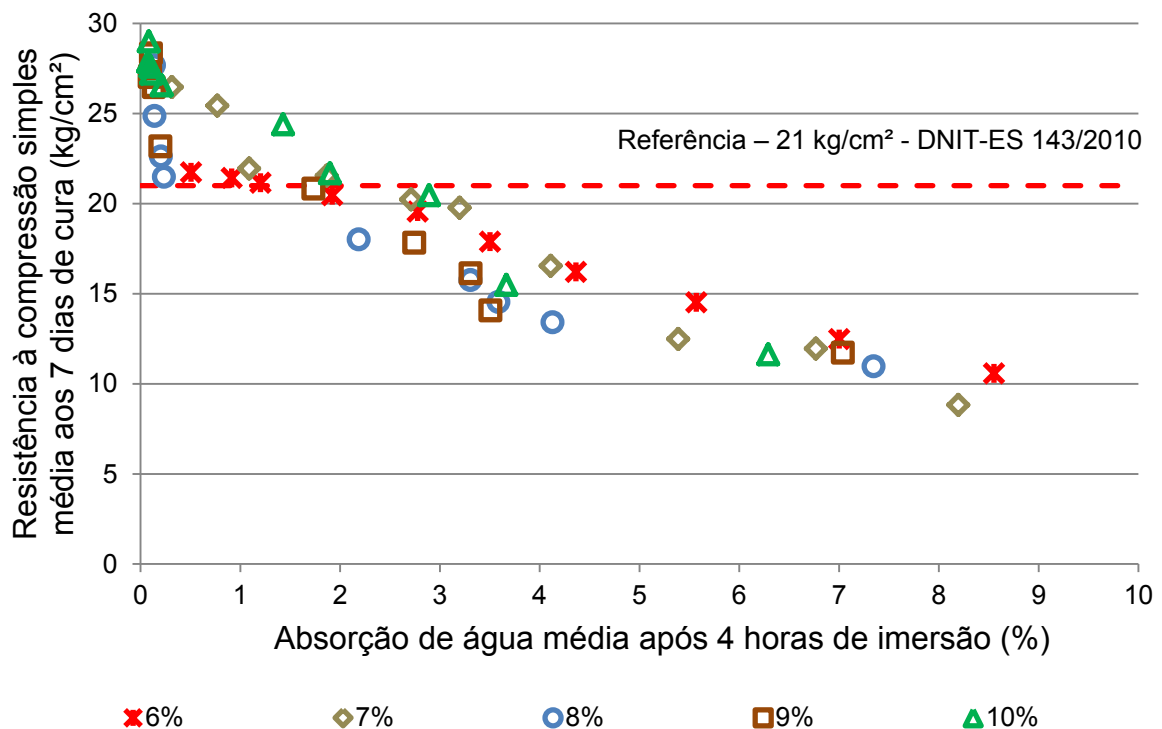
**Tabela 38** - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade *versus* a absorção média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação

Teor de cimento (%)	Equação (n em valor absoluto abs em %)	R <sup>2</sup>
6	abs = 123,91 n - 43,17	0,923
7	abs = 111,62 n - 37,54	0,967
8	abs = 99,85 n - 32,65	0,958
9	abs = 79,56 n - 25,73	0,955
10	abs = 59,47 n - 18,47	0,928

Fonte: o próprio autor

Conforme o Gráfico 22, os corpos de prova que apresentaram menor porosidade também apresentaram menor absorção de água, verificando-se uma relação linear entre a absorção e a resistência à compressão simples como verificada na Tabela 38.

**Gráfico 23** - Absorção de água média após 4 horas de imersão *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação



Fonte: o próprio autor

A Tabela 39 mostra as equações das linhas de tendência e suas correlações.

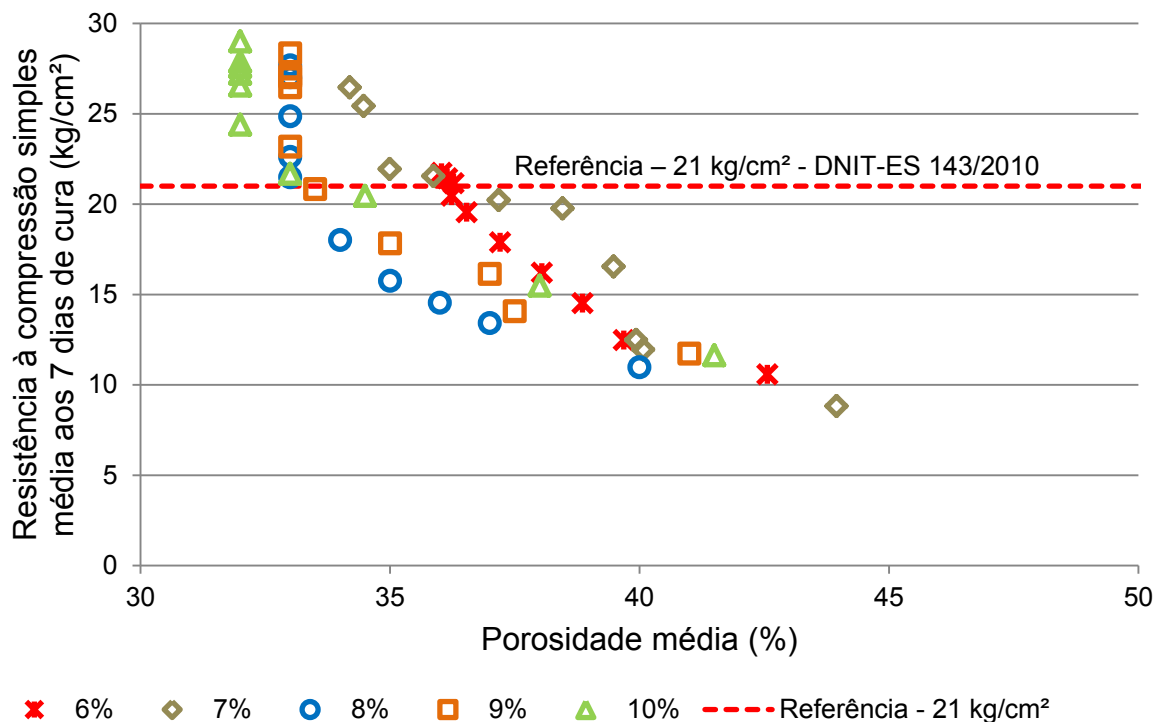
**Tabela 39** - Equações das linhas de tendência e correlações da absorção média após 4 horas de imersão *versus* a resistência à compressão simples dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação

Teor de cimento	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e abs em %)	R <sup>2</sup>
6	RCS = -1,462 abs + 22,91	0,992
7	RCS = -2,186 abs + 26,05	0,966
8	RCS = -2,171 abs + 24,13	0,865
9	RCS = -2,427 abs + 25,79	0,879
10	RCS = -2,702 abs + 27,59	0,972

Fonte: o próprio autor

Do Gráfico 20 pode-se observar que os corpos de prova que apresentaram maior absorção de água (maior porosidade) também apresentaram menor desempenho mecânico, verificando-se uma relação linear entre a absorção e a resistência à compressão simples como verificada na Tabela 39.

**Gráfico 24** - Porosidade média *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação



Fonte: o próprio autor

A Tabela 40 mostra as equações das linhas de tendência e suas correlações.

**Tabela 40** - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade média *versus* a resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação

Teor de cimento (%)	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e n em valor)	R <sup>2</sup>
6	RCS = -182,29 n + 86,43	0,926
7	RCS = -246,7 n + 109,02	0,955
8	RCS = -215,10 n + 94,60	0,868
9	RCS = -196,35 n + 89,45	0,878
10	RCS = -165,91 n + 79,42	0,918

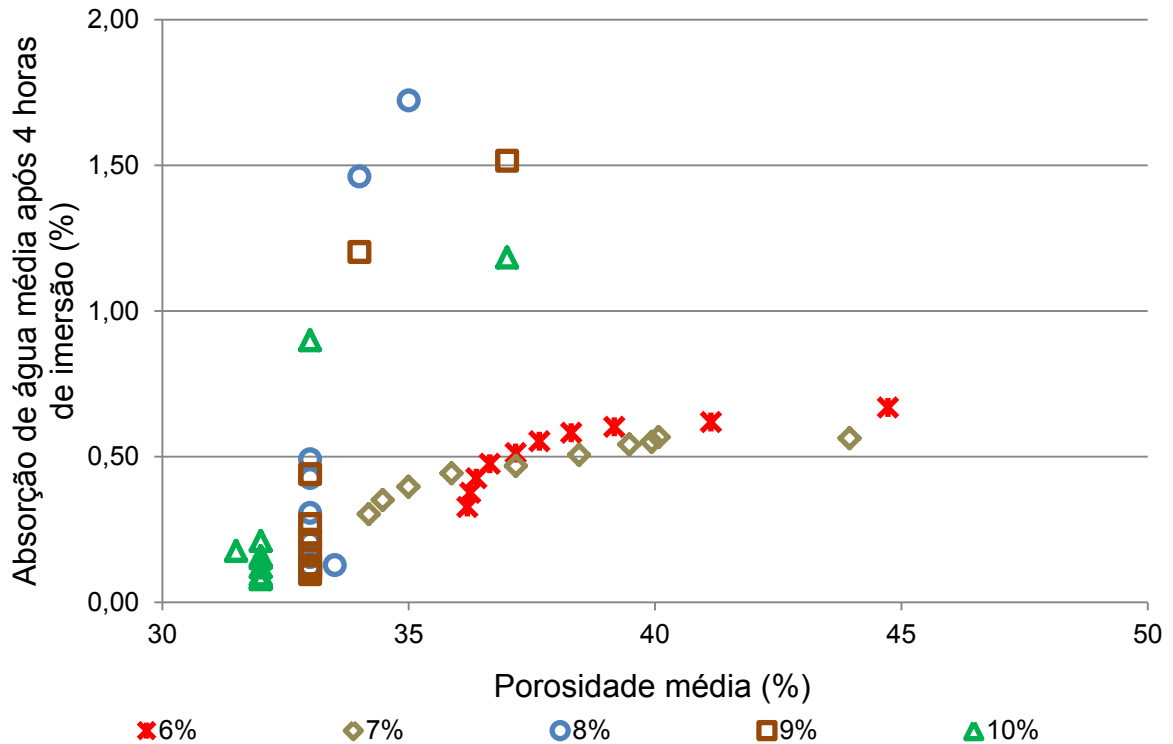
Fonte: o próprio autor

As tendências observadas nos Gráficos 22, 23 e 24 são as mesmas dos Gráficos 19, 20 e 21 em relação à interação da porosidade com a absorção e com a resistência à compressão simples. Na bateria B, o teor de umidade adicional de 1 % não provocou modificação significativa na absorção de água e porosidade das misturas compactadas. Mas influenciou na resistência do solo-cimento, com expressivo aumento, devido à maior hidratação da mistura.

Nas Tabelas 38, 39 e 40 é possível observar tendências lineares da absorção em relação à porosidade, da resistência à compressão simples em função da absorção e da resistência à compressão simples em função da porosidade. É possível estimar a absorção e a resistência à compressão simples para misturas com diferentes porosidades das encontradas nesta pesquisa.

O Gráfico 25 apresenta a porosidade *versus* a absorção de água após 4 horas de imersão, o Gráfico 26 mostra a variação da absorção *versus* a resistência à compressão simples e o Gráfico 27 mostra a porosidade *versus* a resistência à compressão simples para a bateria C (compactações 7a, 7b, 8a, 8b, 9a e 9b), com a umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação.

**Gráfico 25** - Porosidade média *versus* absorção de água média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação



Fonte: o próprio autor

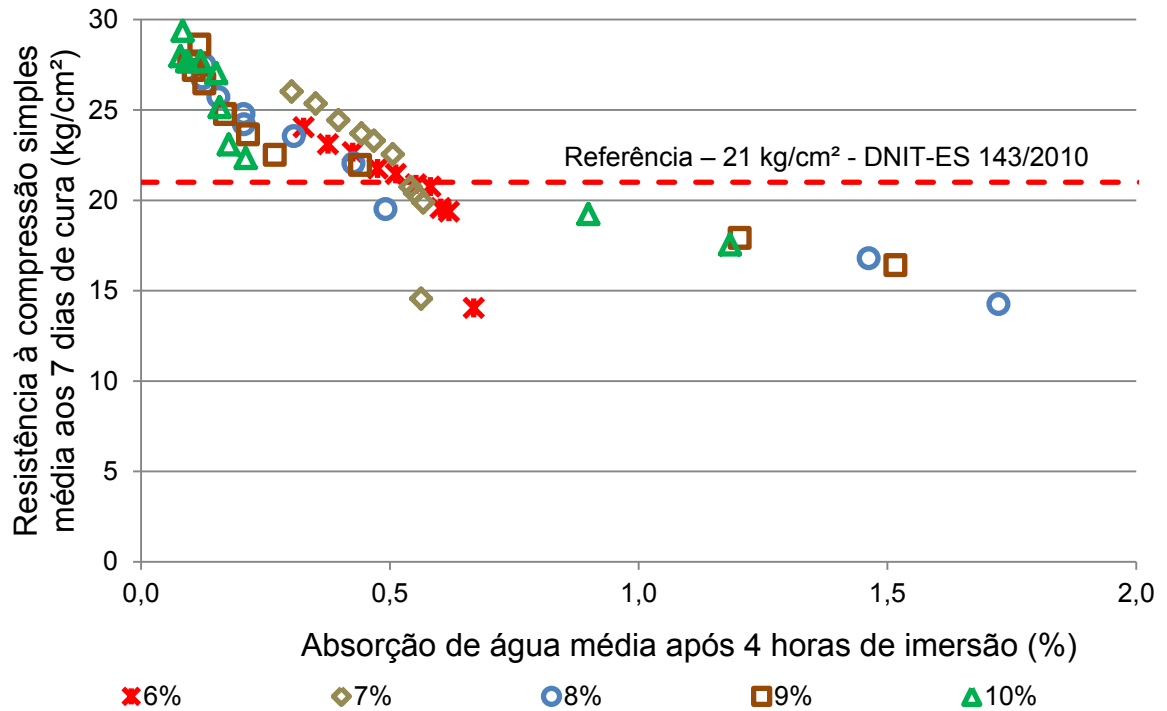
A Tabela 41 apresenta as linhas de tendência do Gráfico 22 e suas correlações.

**Tabela 41** - Equações das linhas de tendência e correlações da porosidade média *versus* a absorção de água média após 4 horas de imersão dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação

Teor de cimento (%)	Equação (n em valor absoluto e abs em %)	R <sup>2</sup>
6	abs = $-72,83 n^2 + 61,93 n - 12,47$	0,880
7	abs = $-37,98 n^2 + 32,05 n - 6,19$	0,973
8	abs = $-1265,00 n^2 + 963,70 n - 180,30$	0,818
9	abs = $-2264,00 n^2 + 1609,00 n - 284,11$	0,962
10	abs = $-662,80 n^2 + 474,60 n - 83,73$	0,894

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 26** - Absorção de água média após 4 horas de imersão *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação



Fonte: o próprio autor

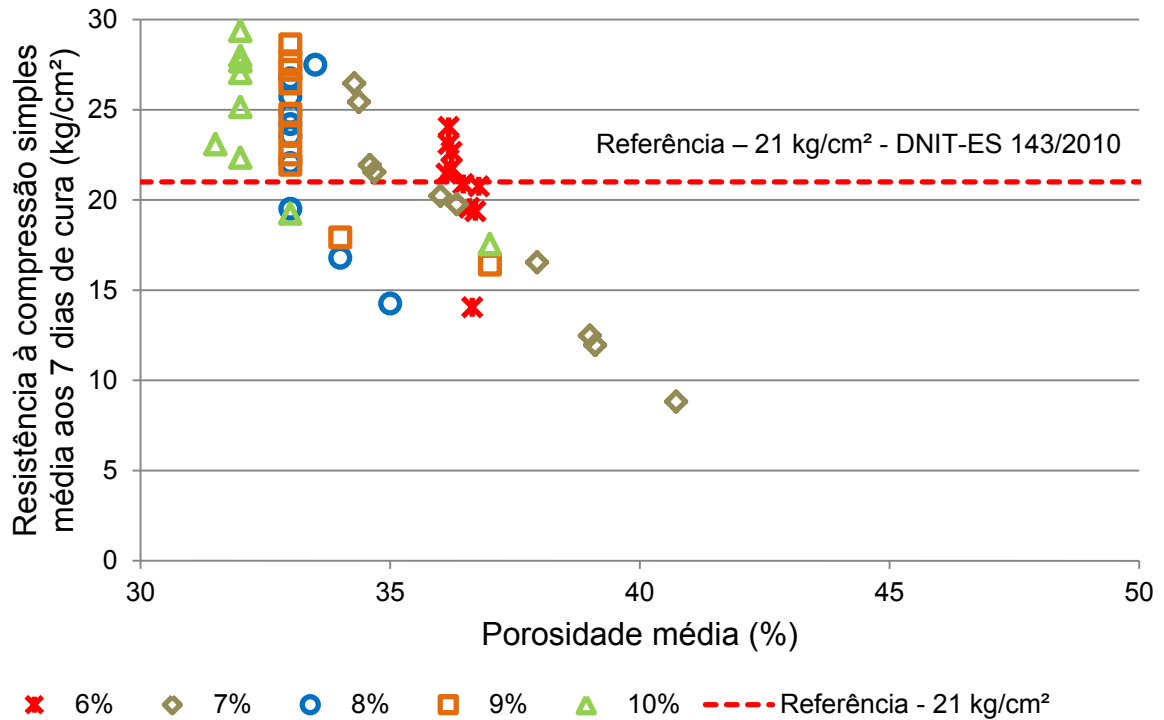
Na Tabela 42 estão as equações das linhas de tendência apresentadas com suas correlações.

**Tabela 42** - Equações das linhas de tendência e correlações da absorção média após 4 horas de imersão *versus* a resistência à compressão simples dos corpos de prova dos ensaios de laboratório com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação

Teor de cimento	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e abs em %)	R <sup>2</sup>
6	RCS = -21,654 abs + 31,90	0,754
7	RCS = -30,213 abs + 36,26	0,708
8	RCS = -6,993 abs + 26,34	0,943
9	RCS = -7,230 abs + 26,63	0,879
10	RCS = -8,771 abs + 27,29	0,807

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 27** - Porosidade média *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação



Fonte: o próprio autor

Na Tabela 43 estão as equações das linhas de tendência apresentadas com suas correlações.

**Tabela 43** - Equações das linhas de tendência e correlações da absorção média após 4 horas de imersão *versus* a resistência à compressão simples dos corpos de prova dos ensaios de laboratório com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação

Teor de cimento (%)	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e n em valor	R <sup>2</sup>
6	RCS = -747,17 n + 292,84	0,455
7	RCS = -356,78 n + 146,03	0,574
8	RCS = -688,02 n + 253,12	0,602
9	RCS = -235,62 n + 102,15	0,560
10	RCS = -177,33 n + 82,11	0,494

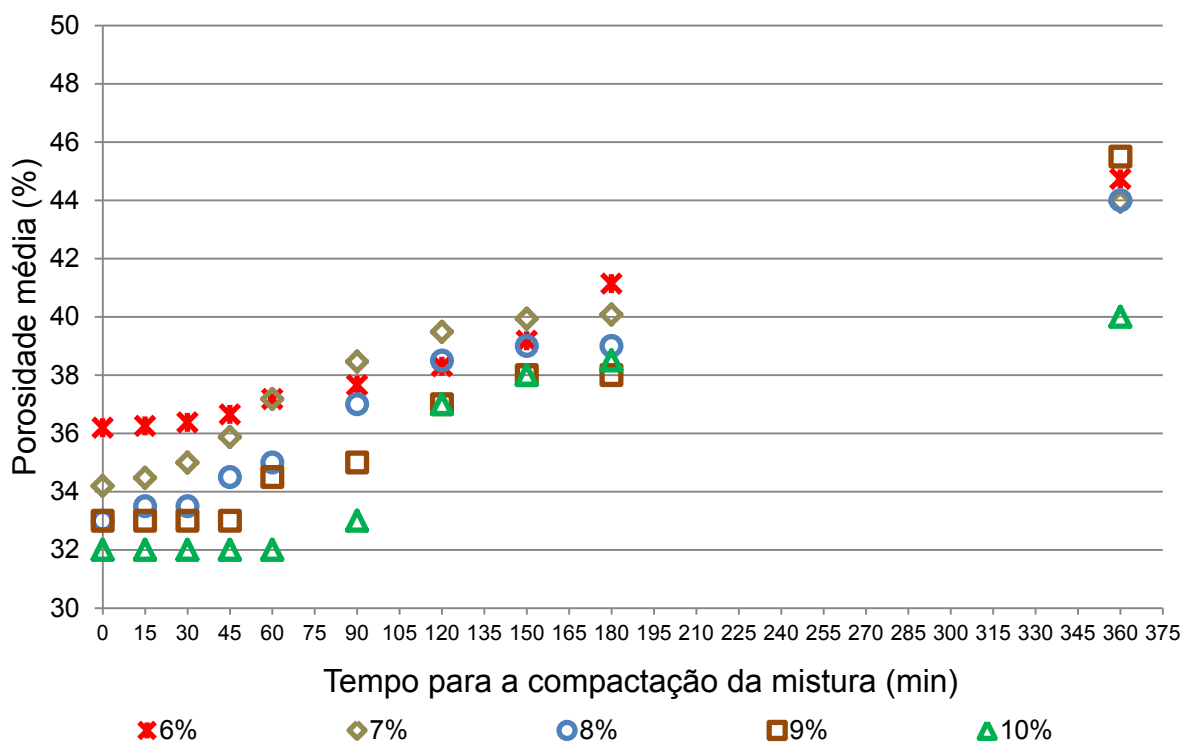
Fonte: o próprio autor

Os Gráficos 25, 26 e 27 apresentam as mesmas considerações dos gráficos anteriores. O aumento da porosidade acarreta no aumento da absorção, os corpos de prova com maior absorção apresentam menores resistências à compressão simples, e por fim o aumento da porosidade diminui a resistência à compressão simples.

Das Tabelas 41, 42 e 43, pode-se verificar a não linearidade da absorção de água dos corpos de prova em relação à porosidade, mostrando variação quadrática. Mas continua com uma tendência linear da resistência à compressão simples em relação à absorção de água média após 4 horas de imersão e não se tem uma tendência bem definida para a variação da resistência à compressão simples com a variação da porosidade.

Os Gráficos 28, 29 e 30 apresentam o tempo para a compactação da mistura *versus* a porosidade dos corpos de prova compactados na bateria A (teor de umidade ótima e energia normal), bateria B (teor de umidade ótima + 1% e energia normal e bateria C (teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada) respectivamente, estão presentes nos gráficos os valores encontrados por Cancian (2013) para 6 e 7 % de cimento.

**Gráfico 28** - Tempo médio para a compactação da mistura *versus* porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teor de umidade ótima e energia normal na compactação



Fonte: o próprio autor

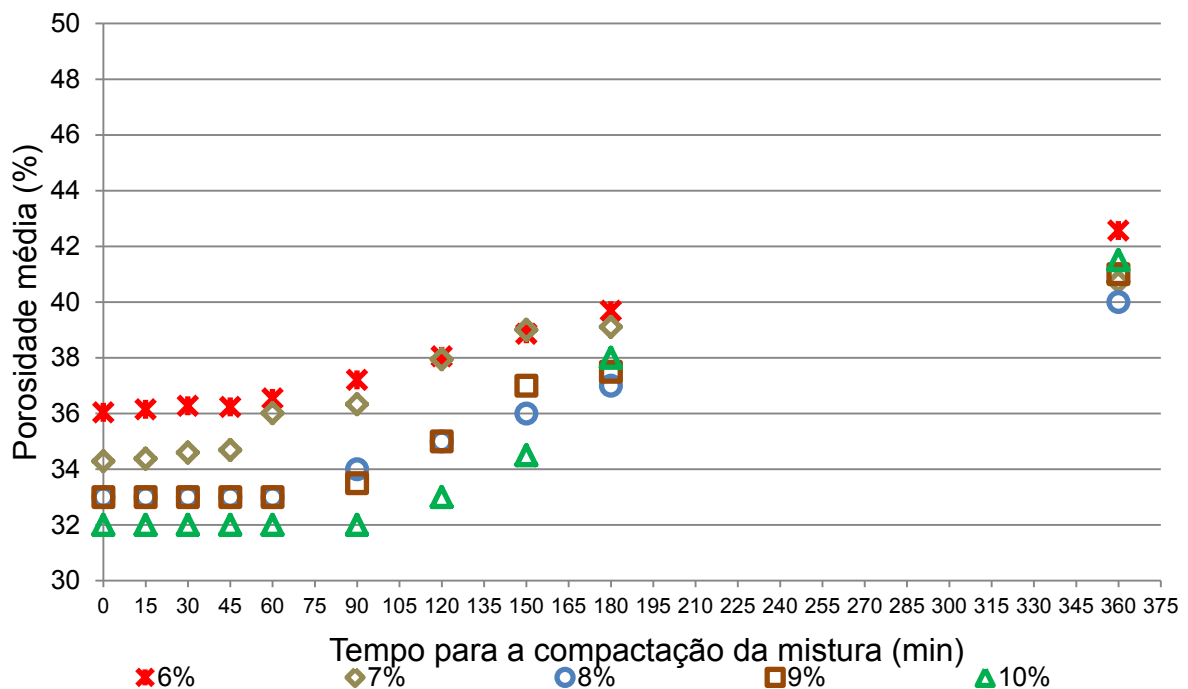
Na Tabela 44 estão apresentadas as equações das linhas de tendência e suas correlações.

**Tabela 44** - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo para a compactação *versus* a porosidade dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima e energia normal na compactação

Teor de cimento	Equação (n em valor absoluto e t em	R <sup>2</sup>
6	$n = 0,00025 t + 0,357$	0,977
7	$n = 0,00028 t + 0,350$	0,924
8	$n = 0,00032 t + 0,333$	0,957
9	$n = 0,00037 t + 0,320$	0,981
10	$n = 0,00029 t + 0,315$	0,826

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 29** - Tempo médio para a compactação da mistura *versus* porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação



Fonte: o próprio autor

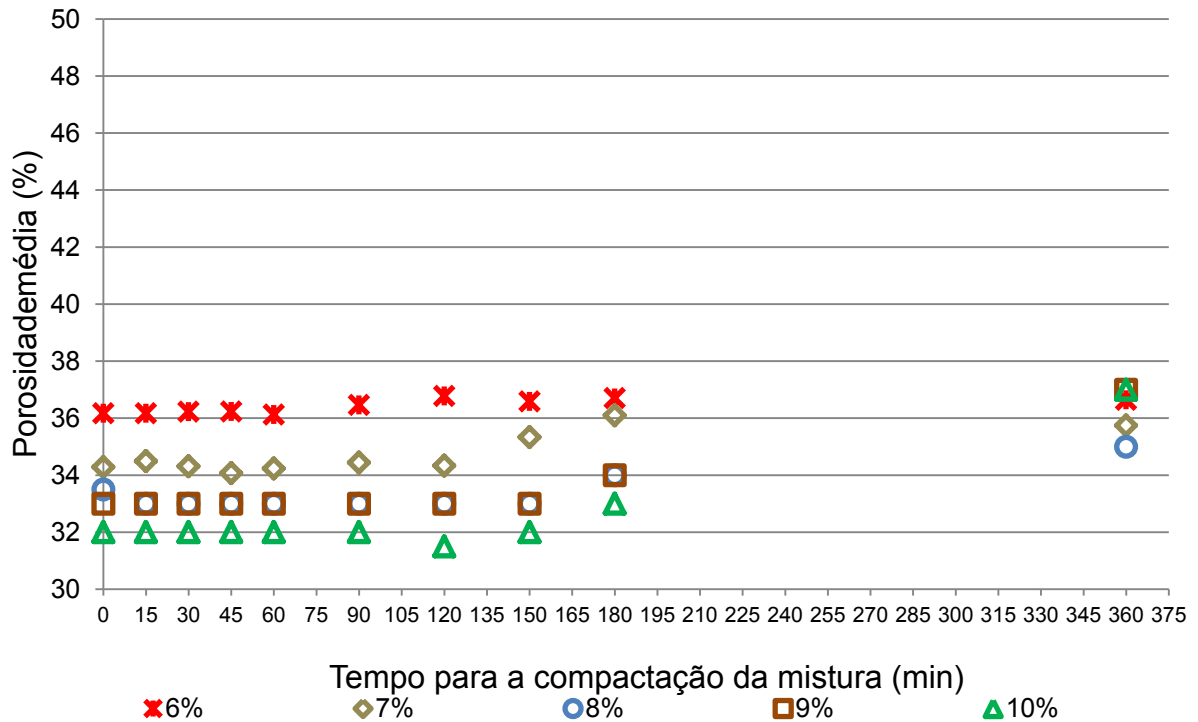
Na Tabela 45 estão apresentadas as equações das linhas de tendência e suas correlações.

**Tabela 45** - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo para a compactação *versus* a porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação

Teor de cimento	Equação (n em valor absoluto e t em	R <sup>2</sup>
6	$n = 0,00019 t + 0,357$	0,981
7	$n = 0,00020 t + 0,346$	0,873
8	$n = 0,00022 t + 0,325$	0,968
9	$n = 0,00025 t + 0,321$	0,936
10	$n = 0,00030 t + 0,308$	0,900

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 30** - Tempo médio para a compactação da mistura *versus* porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação



Fonte: o próprio autor

Na Tabela 46 estão apresentadas as equações das linhas de tendência e suas correlações.

**Tabela 46** - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo para a compactação *versus* a porosidade média dos corpos de prova dos ensaios com teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação

Teor de cimento	Equação (n em valor absoluto e t em	R <sup>2</sup>
6	n = 0,00002 t + 0,3623	0,739
7	n = 0,00005 t + 0,342	0,830
8	n = 0,00004 t + 0,331	0,753
9	n = 0,00011 t + 0,321	0,809
10	n = 0,00013 t + 0,310	0,703

Fonte: o próprio autor

Dos Gráficos 28, 29 e 30 e das Tabelas 44, 45 e 46, pode-se verificar a diminuição da porosidade com o aumento no teor de cimento para todos os tempos para a compactação da mistura.

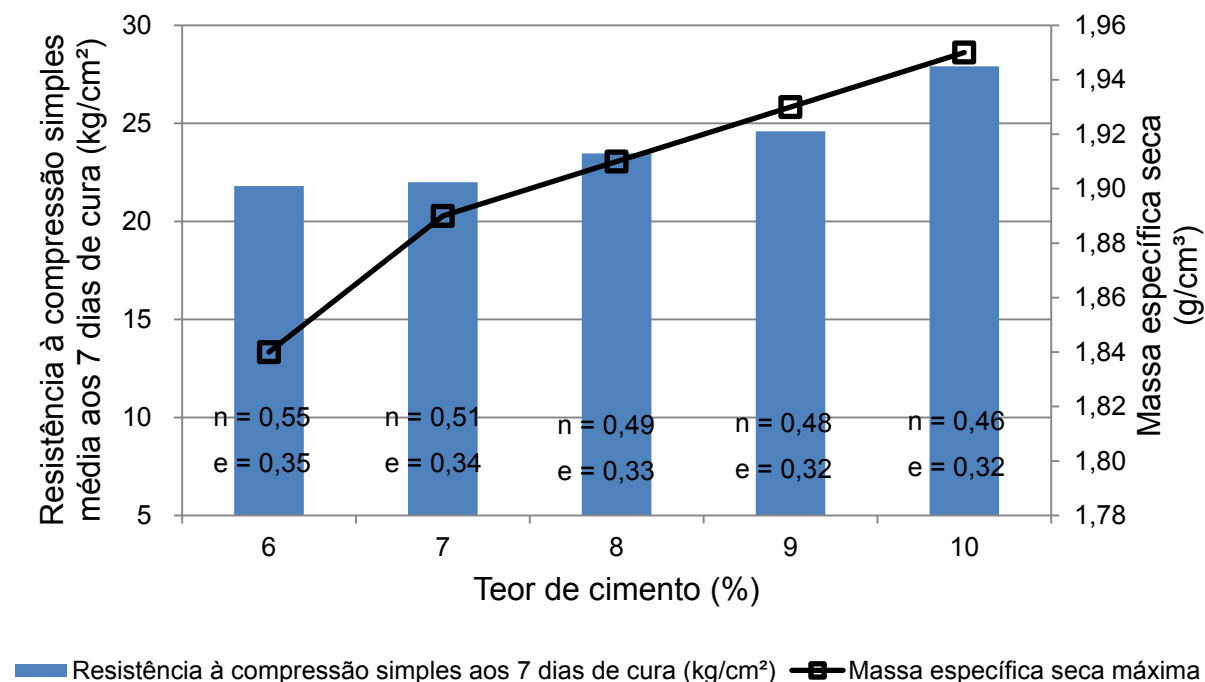
Pode-se observar também a elevação da porosidade com o aumento do tempo para a compactação da mistura, apresentando uma variação linear para

todas as baterias. Possibilitando estimar a porosidade dos corpos de prova em função do tempo para a compactação da mistura solo-cimento.

O motivo do aumento da porosidade deve-se a perda do teor de umidade e ao teor de cimento existente na mistura, acarretando na diminuição da massa específica e aumento da absorção da mistura compactada. Estes dois fatores não permitem o alcance à massa específica seca máxima determinada pela curva de compactação. Ao elevar-se a energia de compactação na bateria C, houve diminuição da porosidade nos tempos avançados em relação às baterias A e B. Vale salientar a escassez de trabalhos que mencionam sobre a variação da porosidade em relação ao tempo para compactação da mistura, não possibilitando a análise deste com outros trabalhos.

O Gráfico 31 mostra a relação da resistência à compressão simples *versus* teor de cimento *versus* a massa específica seca máxima de corpos de prova de solo-cimento das curvas de compactação que, obtiveram as maiores resistências das misturas analisadas nesta e na pesquisa de Cancian (2013). Confirmando juntamente com os Gráficos 21, 24 e 27 que, a mistura solo-cimento menos porosa apresenta o melhor desempenho mecânico.

**Gráfico 31** - Resistência à compressão simples *versus* teor de cimento *versus* massa específica seca máxima dos corpos de prova das misturas solo-cimento das curvas de compactação



Fonte: o próprio autor

Dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se verificar a existência de diferença entre as tendências encontradas com os trabalhos realizados por Carbelon (2008) ao estudar uma areia fina muito uniforme e Lopes *et al* (2009) ao avaliar uma areia grossa uniforme. Onde foi verificado por ambos os autores a variação exponencial da resistência à compressão simples para uma areia uniforme, enquanto para o solo areno argiloso deste trabalho atingiu-se a tendência linear. Assim verifica-se diferença de comportamento mecânico em relação à porosidade devido as curvas granulométricas do solo utilizado na mistura, especialmente em relação a fração fina do solo estabilizado.

Conforme os gráficos e tabelas apresentadas, quando a mistura solo-cimento for realizada com a umidade ótima e energia normal ou com a umidade ótima + 1 % e energia normal, a diminuição da porosidade provoca decréscimo linear na absorção de água e aumenta linearmente a resistência à compressão simples. Quando é utilizada a umidade ótima + 1 % e energia alterada, a diminuição da porosidade acarreta na diminuição linear da absorção, e diminuição da resistência à compressão simples, porém sem uma tendência bem definida. O aumento no tempo para a compactação aumenta de forma linear a porosidade da mistura, mesmo elevando-se a energia de compactação. E quanto menos porosa a mistura solo-cimento maior a resistência à compressão simples, devido ao aumento dos pontos de contatos entre o solo, água e o cimento.

##### 5.5 COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SOLO-CIMENTO: FATOR $V_v/V_{CIM}$

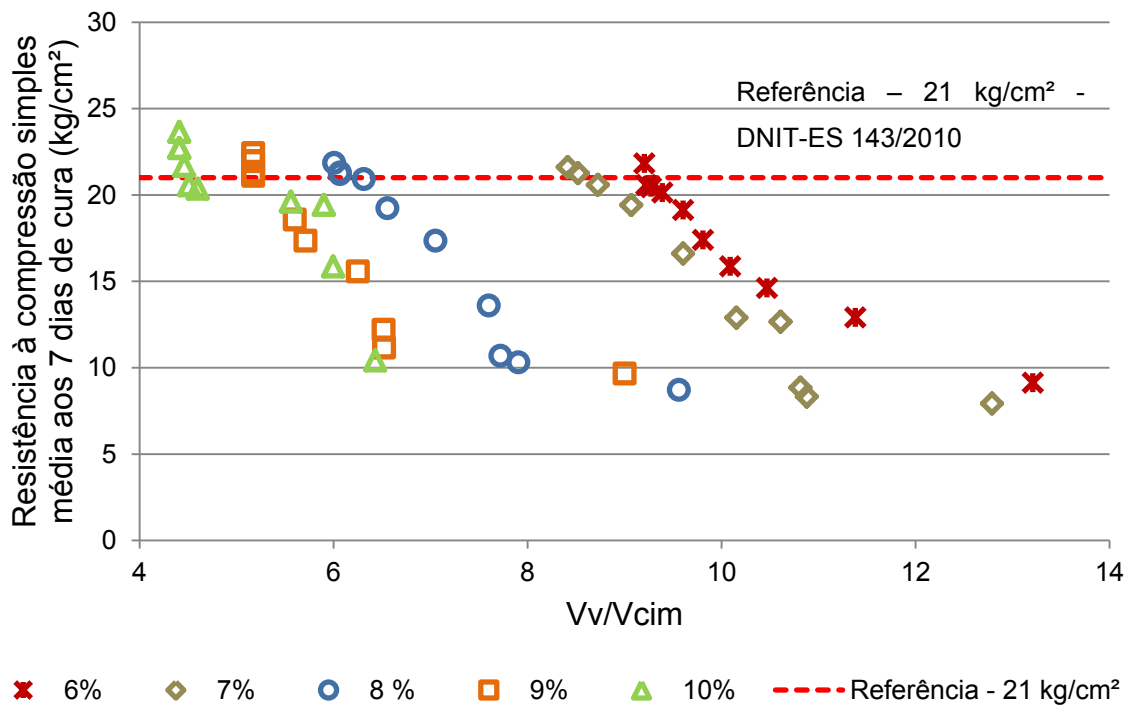
Conforme os trabalhos científicos citados no capítulo revisão bibliográfica, vários autores com Foppa (2005), Carbelon (2008), Vitali (2008), Lopes *et al* (2009) e Stracke et al. (2012) se preocupam em avaliar o comportamento da mistura solo-cimento através da utilização do fator volume de vazios por volume de cimento ( $V_v/V_{cim}$ ).

São tentativas para descrever um comportamento extremamente complexo, pois os solos diferenciam-se muito uns dos outros, seja pela composição granulométrica e química, entre outros aspectos. Quando se analisa os componentes água, solo e cimento as relações se tornam ainda mais complexa.

Depois de realizados os ensaios foi possível calcular a relação ou fator ( $V_v/V_{cim}$ ) para os corpos compactados das 3 baterias. Assim foram gerados os

Gráficos 32, 33 e 34, apresentando a relação do fator ( $V_v/V_{cim}$ ) *versus* a resistência à compressão simples média das misturas solo-cimento para os teores de cimento 8, 9 e 10 %, adicionados em relação à massa de solo seca. Estão apresentados nestes gráficos os resultados obtidos por Cancian (2013) com teores de 6 e 7 % de cimento.

**Gráfico 32** - Fator  $V_v/V_{cim}$  *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima e energia normal



Fonte: o próprio autor

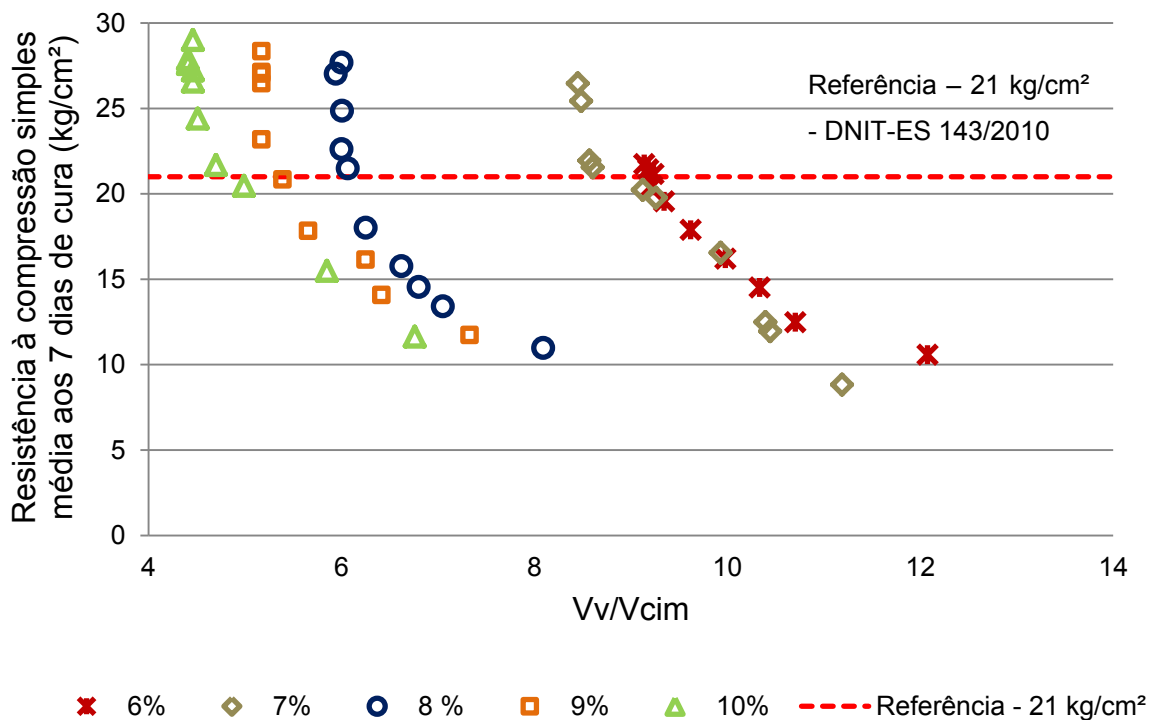
A Tabela 47 apresenta as equações das linhas de tendência e as correlações das curvas do  $V_v/V_{cim}$  *versus* resistência à compressão simples média da bateria A com umidade ótima e energia normal na compactação.

**Tabela 47** - Equações das linhas de tendência e correlações do Vv/Vcim versus resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima e energia normal

Teor de cimento (%)	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e Vv/Vcim em	R <sup>2</sup>
6	RCS = 3627,04 (Vv/Vcim) <sup>-3,02</sup>	0,984
7	RCS = 9634,07 (Vv/Vcim) <sup>-2,85</sup>	0,894
8	RCS = 1201,01 (Vv/Vcim) <sup>-2,22</sup>	0,925
9	RCS = 306,07 (Vv/Vcim) <sup>-1,64</sup>	0,867
10	RCS = 158,80 (Vv/Vcim) <sup>-1,30</sup>	0,783

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 33** - Fator Vv/Vcim versus resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal



Fonte: o próprio autor

A Tabela 48 mostra as equações das linhas de tendência e as correlações das curvas do Vv/Vcim versus resistência à compressão simples média da bateria com umidade ótima + 1 % e energia normal na compactação.

**Tabela 48** - Equações das linhas de tendência e correlações do Vv/Vcim *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal

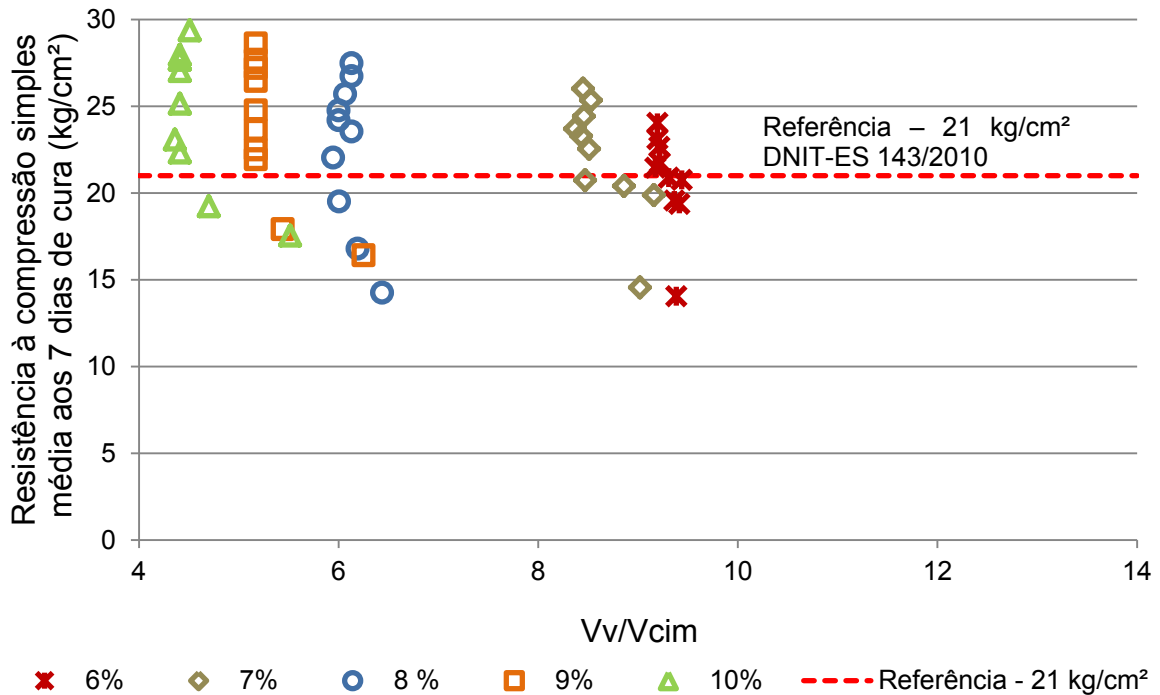
Teor de cimento (%)	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e Vv/Vcim em	R <sup>2</sup>
6	RCS = 8838,01 (Vv/Vcim) <sup>-3,73</sup>	0,966
7	RCS = 4018,23 (Vv/Vcim) <sup>-3,45</sup>	0,955
8	RCS = 4903,02 (Vv/Vcim) <sup>-2,98</sup>	0,876
9	RCS = 1372,04 (Vv/Vcim) <sup>-2,43</sup>	0,921
10	RCS = 544,10 (Vv/Vcim) <sup>-2,02</sup>	0,970

**Fonte:** o próprio autor

Dos Gráficos 32 e 33, para as baterias A e B é possível observar o aumento da resistência à compressão simples média da mistura compactada com a diminuição do fator Vv/Vcim. O aumento no teor de cimento provoca a diminuição do índice de vazios, devido ao preenchimento dos poros com cimento, e conseqüentemente diminuição do fator, com melhor desempenho mecânico da mistura compactada.

As Tabelas 47 e 48 apresentam uma tendência exponencial da resistência à compressão simples em função do fator. Visualizando os expoentes das misturas solo-cimento em relação ao fator Vv/Vcim, verifica-se que o aumento do teor de cimento da mistura diminui o expoente. Observa-se também o aumento deste em relação ao teor de umidade da bateria, apresentando-se maior quando utilizado teor de umidade ótima + 1 %. Para a bateria C, foi feito o Gráfico 34, relacionando o Vv/Vcim *versus* resistência à compressão simples média.

**Gráfico 34 - Fator Vv/Vcim versus resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada**



Fonte: o próprio autor

Na Tabela 49 são mostradas as equações das linhas de tendência da e suas correlações das curvas do Vv/Vcim versus resistência à compressão simples média para as compactações com umidade ótima + 1% e energia alterada.

**Tabela 49 - Equações das linhas de tendência e correlações do Vv/Vcim versus resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das compactações com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada**

Teor de cimento (%)	Equação (RCS em kg/cm² e Vv/Vcim em	R²
6	$RCS = 4 \times 10^9 (Vv/Vcim)^{-8,59}$	0,397
7	$RCS = 11204 (Vv/Vcim)^{-3,96}$	0,560
8	$RCS = 96376 (Vv/Vcim)^{-5,90}$	0,389
9	$RCS = 1397, (Vv/Vcim)^{-2,45}$	0,632
10	$RCS = 391,0 (Vv/Vcim)^{-1,83}$	0,564

Fonte: o próprio autor

Do Gráfico 34 é possível observar que o aumento da energia de compactação acarretou no aumento da resistência à compressão simples média da mistura compactada devida a diminuição do fator (Vv/Vcim). Das Tabelas 47, 48 e 49, pode-se verificar diminuição no expoente com o aumento do teor de cimento,

para todas as baterias. Mas não foi possível obter uma tendência bem definida para a bateria C.

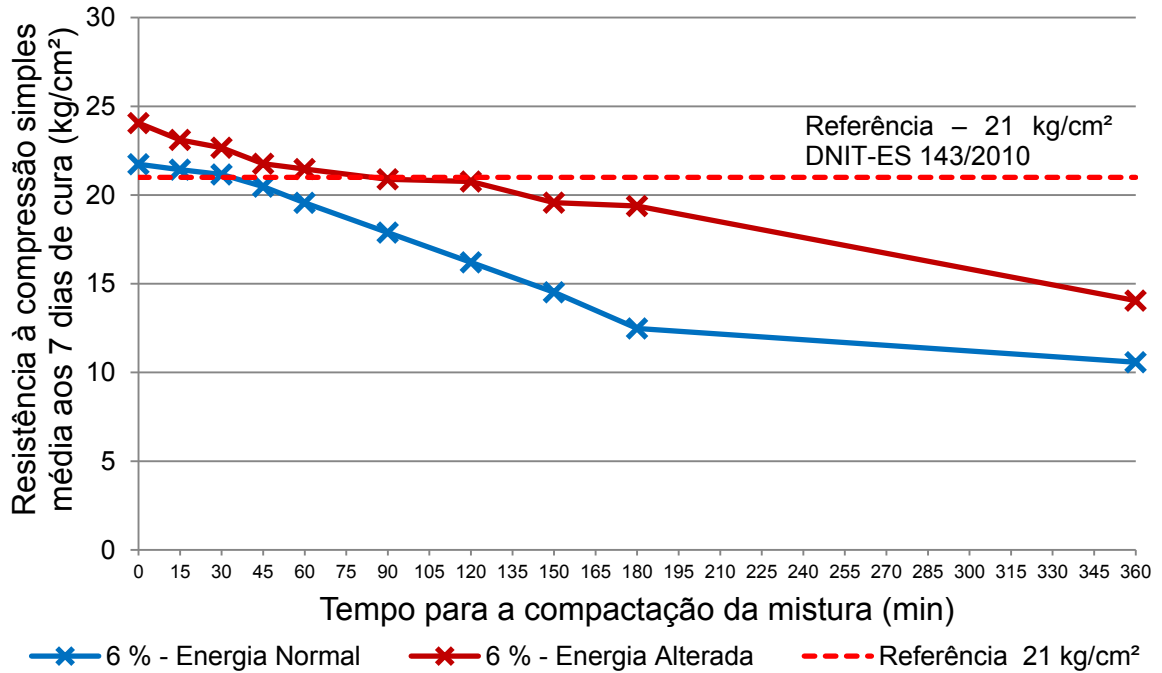
Com os resultados deste trabalho, e analisando-se autores como Foppa (2005), Carbelon (2008), Vitali (2008), Pereira (2009) e Johann (2013), confirma-se que a existência de uma tendência exponencial da resistência à compressão simples com a variação do fator, para todos os solos verificados pelos autores e neste trabalho.

Assim com os resultados apresentados nos gráficos e tabelas, verifica-se a diminuição do fator  $V_v/V_{cim}$ , com a diminuição da porosidade, com o aumento do teor de cimento e aumento da energia de compactação. O aumento do fator com o aumento do tempo para a compactação (uma vez que este aumenta a porosidade). Por fim é possível afirmar que a diminuição do fator aumenta a resistência mecânica do solo-cimento.

#### 5.6 INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA SOLO-CIMENTO

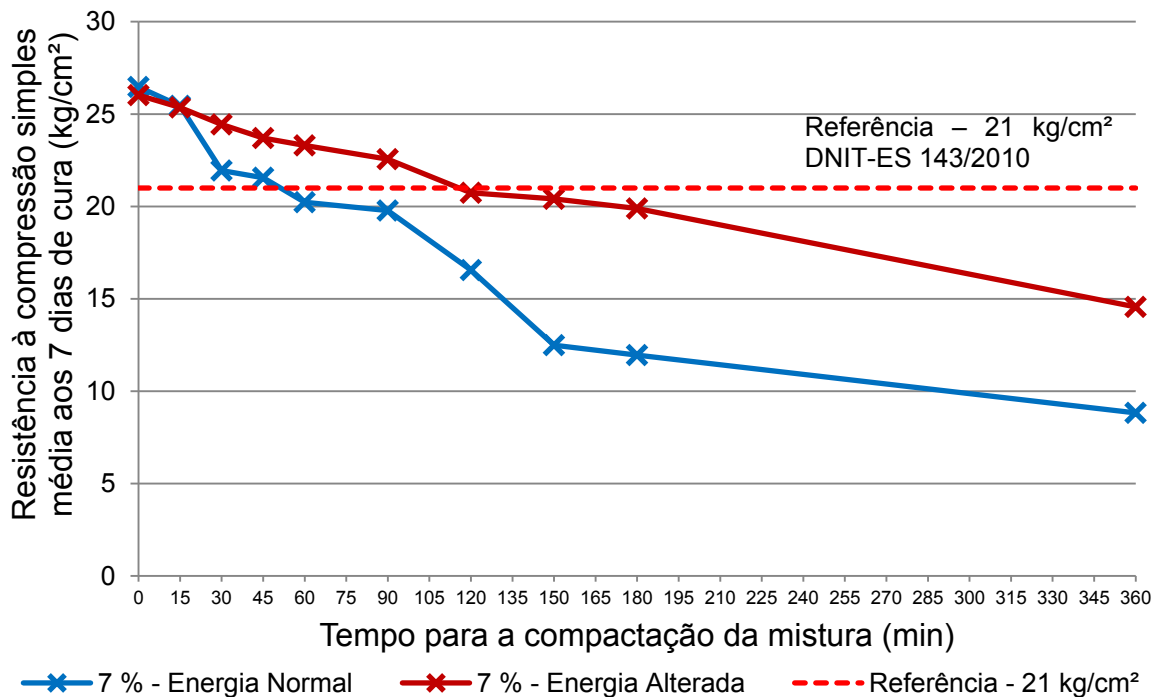
Os Gráficos 35, 36, 37, 38 e 39 apresentam a influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples e o tempo para a compactação da mistura, para os teores de 6, 7, 8, 9, e 10 % de cimento e o teor de umidade ótima + 1 %, obtidos nesta pesquisa e por Cancian (2013).

**Gráfico 35** - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 6 % e teor de umidade ótima + 1 %



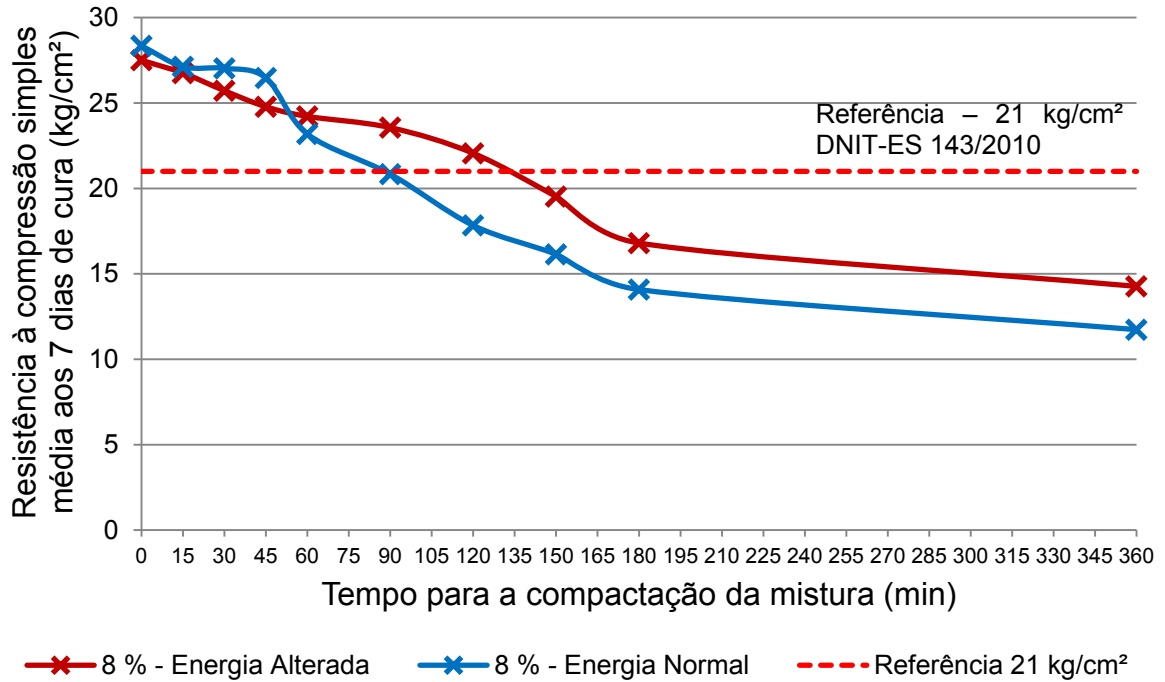
Fonte: Cancian (2013)

**Gráfico 36** - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 7 % e teor de umidade ótima + 1 %



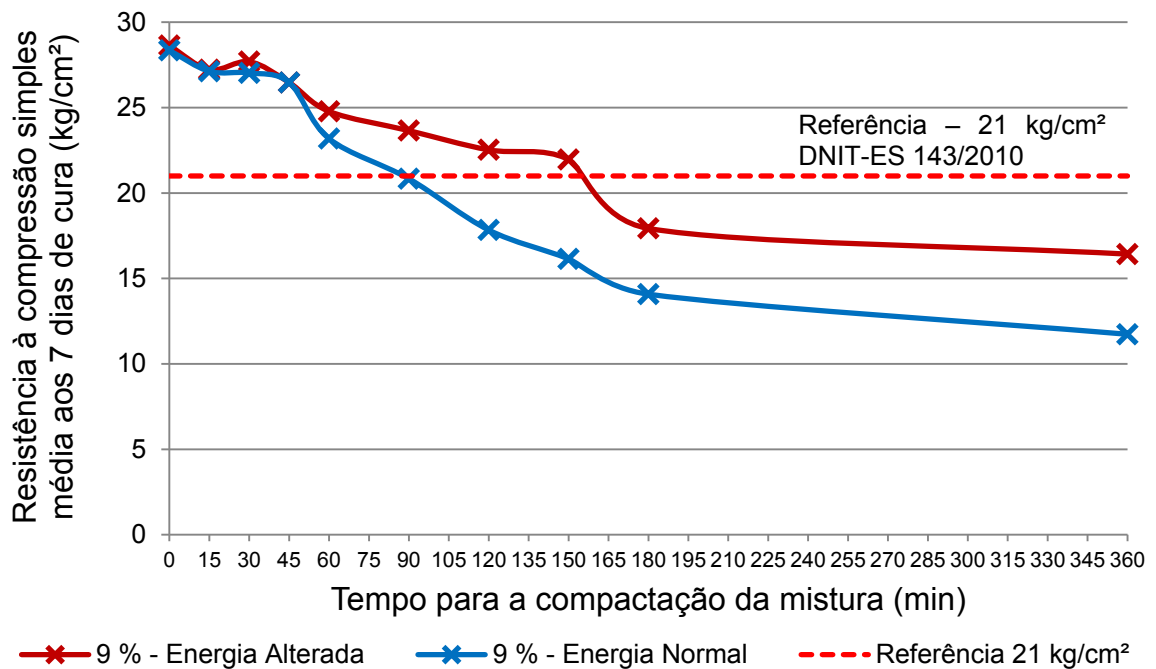
Fonte: Cancian (2013)

**Gráfico 37** - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 8 % e teor de umidade ótima + 1 %



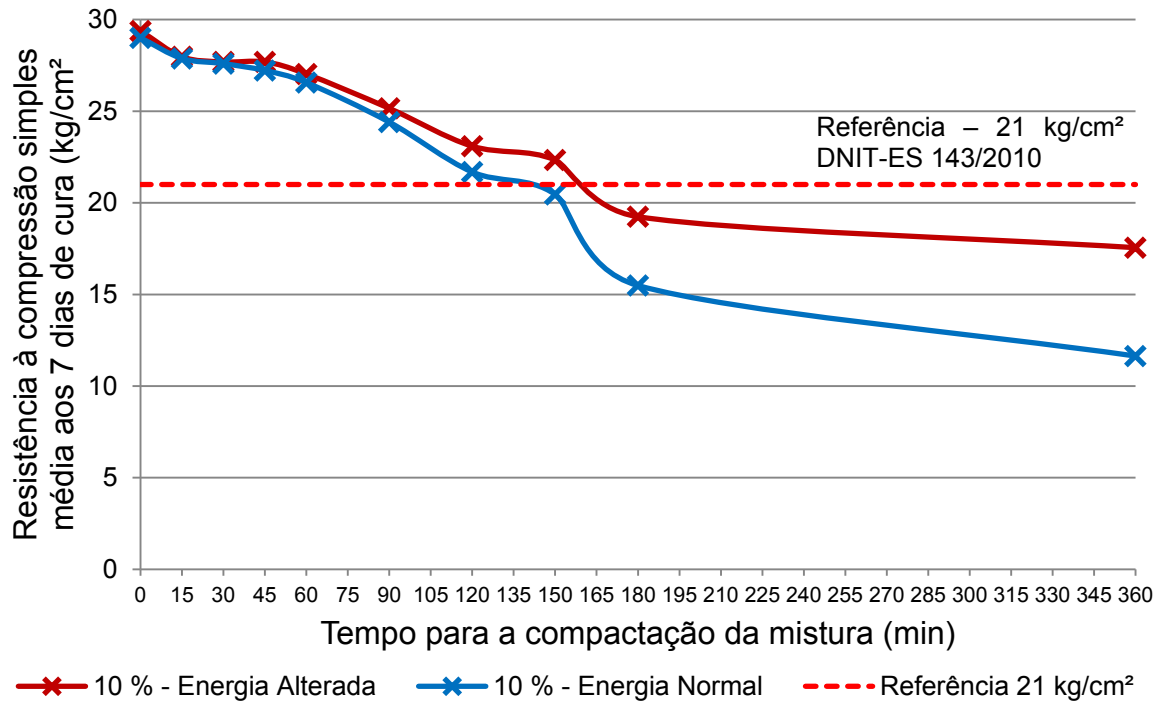
**Fonte:** o próprio autor  
*\*os dois últimos corpos de prova não atingiram o grau de compactação de 100 %*

**Gráfico 38** - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 9 % e teor de umidade ótima + 1 %



**Fonte:** o próprio autor  
*\*os dois últimos corpos de prova não atingiram o grau de compactação de 100 %*

**Gráfico 39** - Influência da energia de compactação sobre a resistência à compressão simples média do solo-cimento para o teor de cimento de 10 % e teor de umidade ótima + 1%



**Fonte:** o próprio autor

*\*os dois últimos corpos de prova não atingiram o grau de compactação de 100 %*

Os Gráficos 35, 36, 37, 38 e 39, indicam o acréscimo do desempenho mecânico das misturas solo-cimento com o aumento da energia de compactação. Isso se deve a diminuição da porosidade (diminuição dos vazios e do fator  $V_v/V_{cim}$ ), promovendo maior cimentação ocasionado pelo maior contato dos grãos de solo, cimento e água e aumento no tempo máximo para a compactação da mistura.

Dos Gráficos 35, 36, 37, 38 e 39 foi possível construir a Tabela 50, apresentando os tempos máximos obtidos na bateria B (com umidade ótima +1 % e energia normal) e bateria C (com umidade ótima + 1 % e energia alterada), assim como o ganho de tempo para a compactação oriundo da alteração da energia.

**Tabela 50** - Ganho de tempo devido ao aumento da energia para a compactação

Tempo máximo (min)	Teor de cimento %				
	6	7	8	9	10
Bateria B (min)	33	51	67	89	124
Bateria C (min)	84	116	139	154	165
Ganho de tempo para a compactação (min)	51	65	72	65	41

**Fonte:** o próprio autor

De acordo com a Tabela 50 o maior incremento ocorreu quando alterada a energia e utilizado o teor de 8 % de cimento. É necessário avaliar na prática qual é a melhor solução a ser utilizada, verificando qual é o melhor componente a ser modificada para obter o maior tempo para a compactação possível.

Como mostra a Tabela 50, o maior teor de cimento apresentou o menor ganho de tempo para a compactação da mistura.

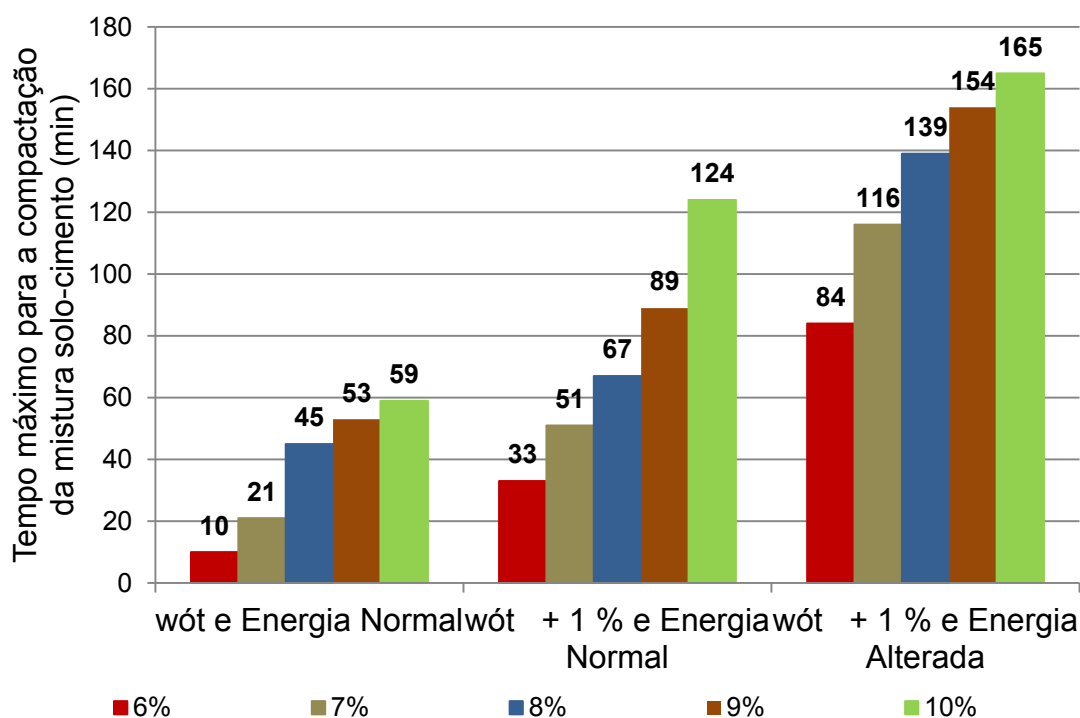
Verifica-se neste trabalho, assim como no de Lopes et al. (2009), Pereira (2012) e Teixeira (2014), que o aumento na energia de compactação, ocasiona o aumento da resistência à compressão simples, porém os autores aqui mencionados não avaliaram em relação ao tempo para a compactação maiores do que a compactação imediata.

Assim pode-se verificar de acordo com esta pesquisa que o aumento da energia causa aumento da resistência na mistura solo cimento em todos os tempos para a compactação e todos os teores de cimento estudados, aumentando o tempo máximo para a compactação da mistura solo-cimento. Nota-se assim a existência da necessidade do controle da energia de compactação utilizada na mistura solo-cimento quando realizada a base de pavimento, por esta ser um dos componentes responsáveis pela resistência à compressão simples do material e do tempo máximo para a compactação da mistura.

#### 5.7 INFLUÊNCIA DO TEMPO PARA A COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Dos resultados obtidos das 18 compactações de ensaios laboratoriais realizados, para as 3 baterias, foi possível analisar os tempos máximos entre a preparação das misturas solo-cimento e a compactação, para cada teor de cimento utilizado.

O Gráfico 40 apresenta os tempos máximos para a compactação nos quais os corpos de prova da mistura solo-cimento com teores de 8, 9 e 10 % de cimento, apresentaram desvio do teor de umidade dentro do estabelecido de  $\pm 1$  %, grau de compactação  $\geq 100$  % e resistência à compressão simples de 21 kg/cm<sup>2</sup>. Neste gráfico também são mostrados os tempos máximos para a compactação obtidos por Cancian (2013), para teores de 6 e 7 % de cimento.

**Gráfico 40** - Tempo máximo para a compactação da mistura solo-cimento

Fonte: o próprio autor

Assim pode ser realizada a Tabela 51, mostrando o ganho de tempo para a compactação em relação às baterias.

**Tabela 51** - Ganho de tempo devido ao aumento de 1 % na umidade e aumento da energia para a compactação

Tempo máximo (min)	Teor de cimento %				
	6	7	8	9	10
Bateria A (min)	10	21	45	53	59
Bateria B (min)	33	51	67	89	124
Bateria C (min)	84	116	139	154	165
Ganho de tempo para a compactação (min) entre as baterias B e A	23	30	22	36	65
Ganho de tempo para a compactação (min) entre as baterias C e B	51	65	72	65	41

Fonte: o próprio autor

Observando-se o Gráfico 40 e a Tabela 51, é possível verificar que os resultados de tempo máximo da bateria B, com 1 % de teor de umidade adicional, foram maiores em relação à bateria A, com umidade ótima.

Com a realização da bateria B houve melhoras de 3,3; 2,4; 1,5; 1,7 e 2,1 vezes em relação à bateria A da mistura para 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento, respectivamente. Mostrando que o aumento da quantidade de água acarretou maior incremento no tempo máximo para a compactação no teor de 10 %, com o acréscimo de 65 minutos.

Se for analisada a relação de aumento do tempo máximo para a compactação da mistura solo-cimento entre as baterias B e C, houve um aumento de 2,5; 2,3; 2,1; 1,7 e 1,3 vezes para os teores de cimento 6, 7, 8, 9 e 10 % respectivamente. Onde o teor de 8 % obteve o maior acréscimo no tempo máximo para a compactação, com o acréscimo de 72 minutos.

De acordo com o Gráfico 40 os tempos para a compactação variaram de 10 a 165 minutos (2 horas e 45 minutos), sendo o maior tempo para a compactação da mistura com o maior teor de cimento de 10 %, teor de umidade ótima + 1% e energia alterada na compactação.

Os tempos máximos para a compactação das misturas com 8, 9 e 10 % de cimento, da bateria com umidade ótima + 1 % e energia alterada na compactação foram relativamente próximos. Nesses tempos para a compactação, 180 e 360 minutos, houve perda de umidade, logo não foi possível alcançar o grau de compactação e resistência à compressão simples mínima desejados, devido ao aumento da porosidade e diminuição da hidratação do cimento.

Considerando o prescrito na DNIT-ES 143/2010, recomenda-se que o tempo entre a homogeneização e compactação não deve ser superior 1 hora (mistura em usina de solos). Pode-se verificar que quando utilizado a umidade ótima e a energia normal (bateria A), as misturas não atenderam a resistência à compressão simples mínima e nem o grau de compactação especificado na norma, mesmo quando compactadas dentro do intervalo determinado, após os tempos de 10, 21, 45, 53 e 59 minutos para os teores de 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento.

Para a bateria B (umidade ótima + 1 % e energia normal), os teores de 6 e 7 % de cimento não atingiram a resistência à compressão simples e nem o grau de compactação especificado após os tempos de 33 e 51 minutos, porém os outros 3 teores mantiveram os parâmetros normativos dentro do esperado em uma hora.

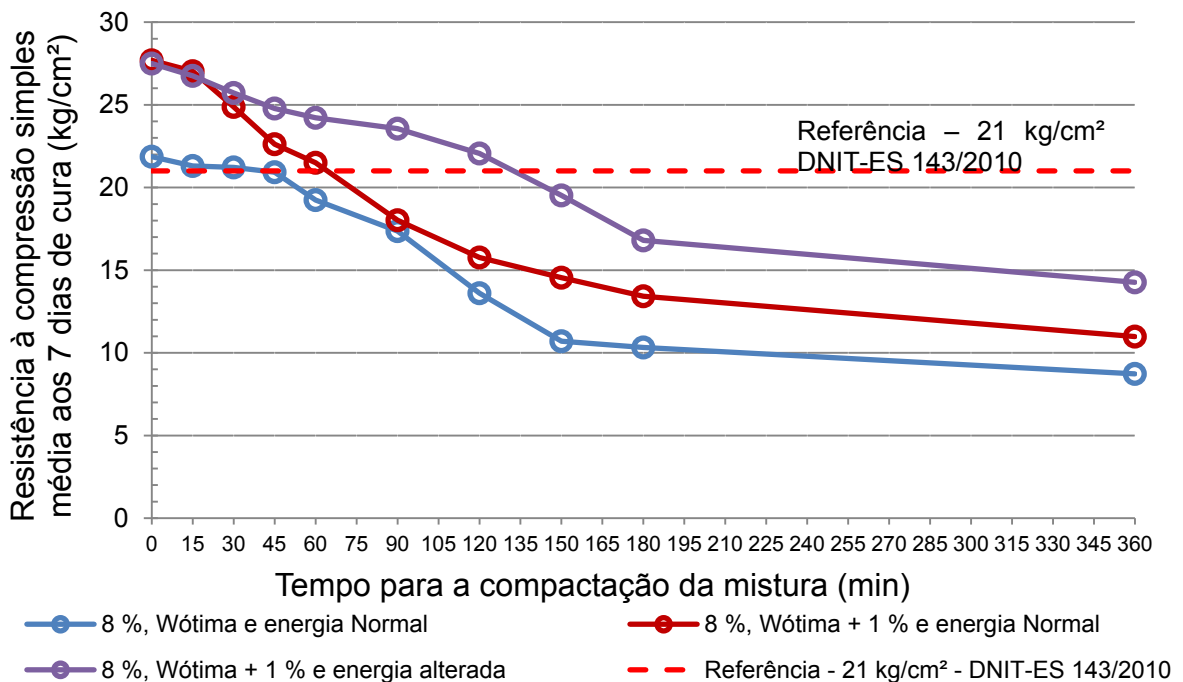
Na bateria C, para todos os teores de cimento, foi possível atingir a resistência à compressão simples e o grau de compactação da normativa, em tempo superior à 1 hora.

Vale salientar que nenhum dos teores de cimento, independente das condições adotadas de umidade e energia, atingiu desempenho mecânico igual ou superior a 21 kg/cm<sup>2</sup> e grau de compactação maior ou igual a 100 % após o tempo de 3 horas.

Assim é preciso verificar qual é a alternativa mais vantajosa para realizar a compactação da mistura solo-cimento em campo, considerando a modificação do teor de cimento, teor de umidade e energia de compactação em função do tempo entre a homogeneização e compactação da mistura.

Os Gráficos 41, 42 e 43, mostram a relação do tempo para a compactação da mistura solo-cimento *versus* resistência à compressão simples média para as 3 baterias realizadas, utilizando o mesmo teor de cimento, de 8, 9 e 10 %, respectivamente.

**Gráfico 41** - Tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das 3 baterias realizadas com teor de cimento de 8 %



Fonte: o próprio autor

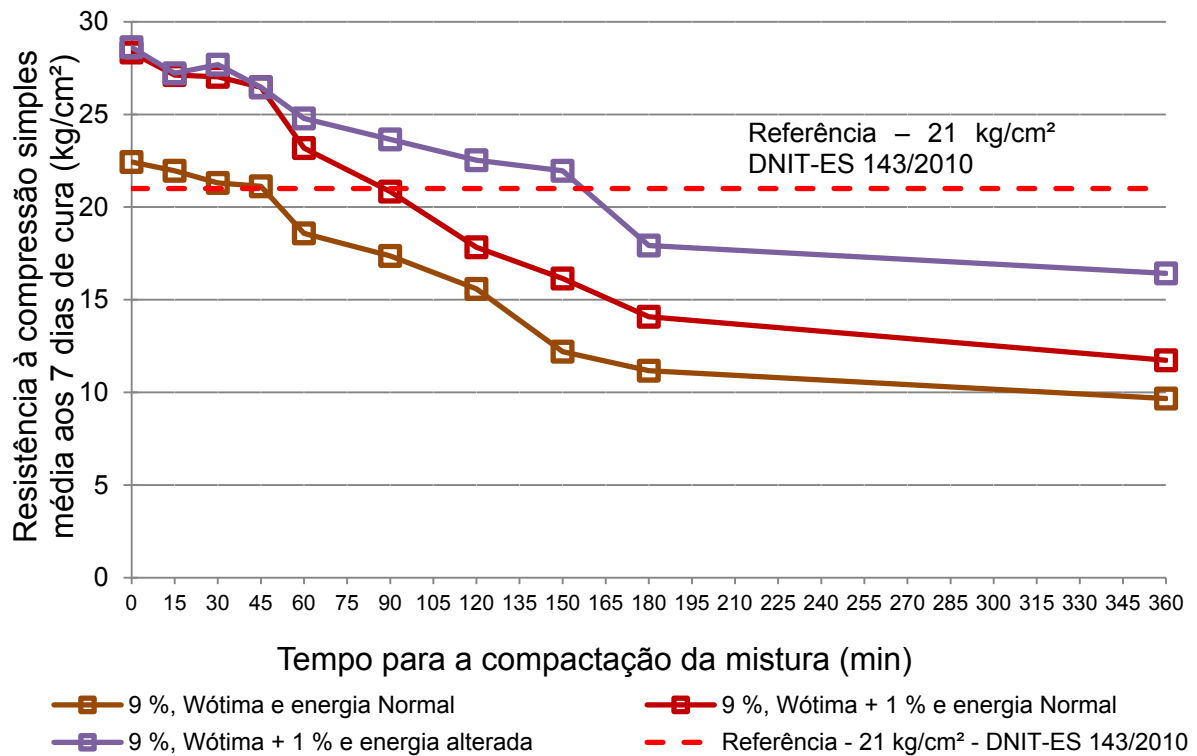
A Tabela 52 apresenta as equações das linhas de tendência e suas respectivas correlações.

**Tabela 52** - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das 3 baterias com 8 % de cimento

Teor de cimento (%)	Bateria	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e t em min)	R <sup>2</sup>
8	A	$RCS = 0,00016 t^2 - 0,098 t + 23,51$	0,950
	B	$RCS = 0,00021 t^2 - 0,123 t + 28,06$	0,993
	C	$RCS = 0,00008 t^2 - 0,066 t + 28,83$	0,970

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 42** - Tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das 3 baterias realizadas com teor de cimento de 9 %



Fonte: o próprio autor

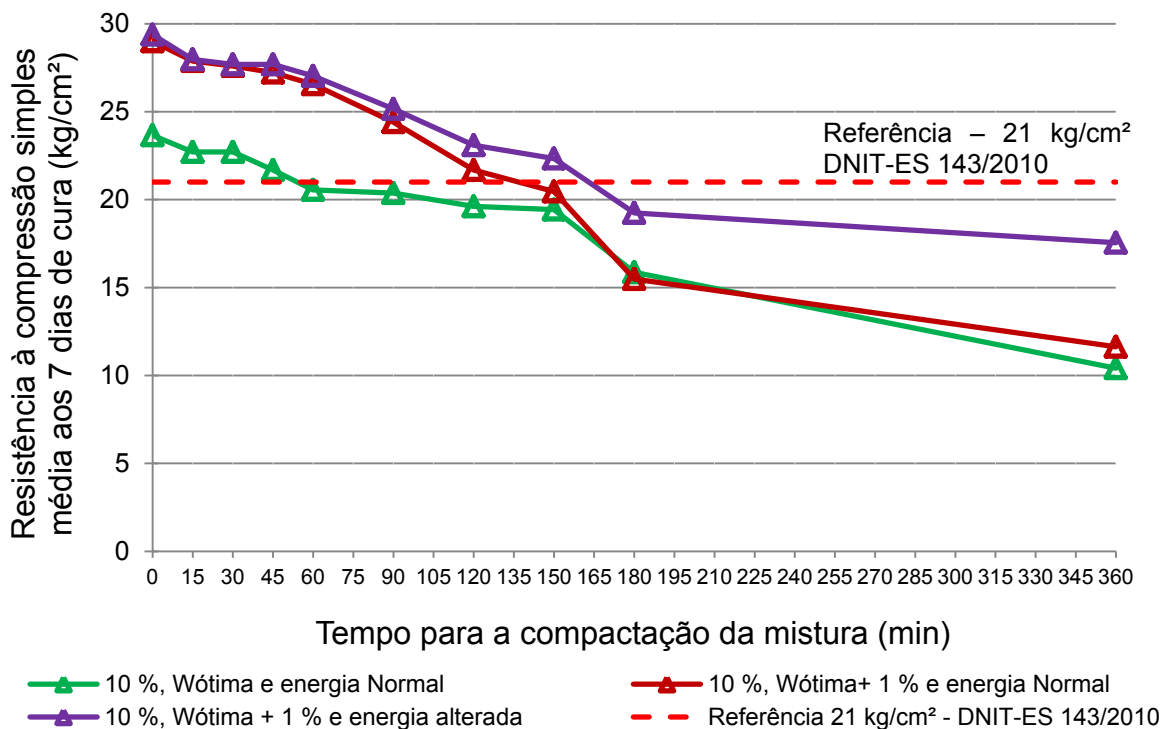
A Tabela 53 apresenta as equações das linhas de tendência e suas respectivas correlações.

**Tabela 53** - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das 3 baterias com 9 % de cimento

Teor de cimento (%)	Bateria	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e t em min)	R <sup>2</sup>
9	A	RCS = 0,00014 t <sup>2</sup> - 0,090 t + 23,57	0,970
	B	RCS = 0,00018 t <sup>2</sup> - 0,115 t + 29,50	0,981
	C	RCS = 0,00009 t <sup>2</sup> - 0,067 t + 29,90	0,960

Fonte: o próprio autor

**Gráfico 43** - Tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das 3 baterias realizadas com teor de cimento de 10 %



Fonte: o próprio autor

A Tabela 54 apresenta as equações das linhas de tendência e suas respectivas correlações.

**Tabela 54** - Equações das linhas de tendência e correlações do tempo médio para a compactação *versus* resistência à compressão simples média dos corpos de prova das misturas solo-cimento das 3 baterias com 10 % de cimento

Teor de cimento (%)	Bateria	Equação (RCS em kg/cm <sup>2</sup> e t em min)	R <sup>2</sup>
10	A	RCS = 0,00001 t <sup>2</sup> - 0,034 t + 23,42	0,971
	B	RCS = 0,00008 t <sup>2</sup> - 0,079 t + 29,91	0,961
	C	RCS = 0,00009 t <sup>2</sup> - 0,065 t + 29,95	0,965

Fonte: o próprio autor

Das Tabelas 52, 53 e 54 é possível verificar uma variação quadrática da resistência à compressão simples em relação ao tempo para a compactação da mistura solo-cimento. Dos Gráficos 41, 42 e 43 é possível verificar e analisar as variáveis que promovem o aumento do tempo máximo para compactação da mistura solo-cimento.

A maior quantidade de cimento aumenta a presença de finos na mistura e proporciona aumento do contato com o solo e a água, com diminuição da porosidade e com isso aumenta a resistência, elevando o tempo máximo para a compactação da mistura.

Quando é adicionado 1 % a mais de água, além da umidade ótima, aumentou-se o tempo máximo para a compactação da mistura conforme mostra os Gráficos 41, 42 e 43. A quantidade de água adicional promove compensação da perda de umidade por evaporação, uma maior hidratação no cimento contido na mistura, melhorando o desempenho mecânico, e por consequência atingindo maior tempo máximo para a compactação da mistura solo-cimento.

A alteração da energia de compactação diminui a porosidade da mistura e realiza ganhos na resistência à compressão. Ao elevar a energia, consegue-se alcançar o mais próximo possível o grau de compactação desejado (massa específica seca máxima determinada na curva de compactação da mistura), logo atingindo um bom desempenho mecânico e aumentando o tempo máximo para a compactação da mistura. Assim, confirma-se que o teor de cimento, o teor de umidade e a energia de compactação são variáveis que influenciam no aumento do tempo para a compactação da mistura solo-cimento.

Em contrapartida o tempo para a compactação mostra-se importante na obtenção da massa específica seca do solo-cimento. O fato de não atingir a massa específica desejada, está relacionado à perda de umidade da mistura motivada pela evaporação natural com o aumento do tempo para a compactação da mistura solo-cimento. Com esta perda, a compactação não ocorre mais na umidade ótima, acarretando aumento da porosidade e absorção de água pelo corpo de prova.

Além da umidade, o tempo para a compactação da mistura ao ser elevado provoca o endurecimento do cimento existente da mistura. Em tempos maiores, o cimento encontra-se em estado elevado de hidratação, não permitindo a mesma eficiência na compactação e gerando desempenho mecânico inferior em comparação com tempos mais curtos, mesmo atingindo o grau de compactação de

100 %, assim parte do cimento já foi utilizado nas reações da mistura, e esta consumida quantidade não confere resistência à mistura compactada.

Pode-se verificar também que, o tempo para a compactação da mistura influencia no fator  $V_v/V_{cim}$ , pois com o aumento do tempo para a compactação eleva-se a porosidade (aumenta o índice de vazios ou volume de vazios), com conseqüente aumento do fator.

Os resultados encontrados neste e no trabalho de Cancian (2013) para o solo denominado de areia média a fina argilosa favorecem o entendimento da variação da resistência à compressão simples em função do tempo para a compactação da mistura e corroboram com as afirmações apresentadas por Milani (2008), ao mencionar que a resistência à compressão simples diminuiu com a demora na compactação da mistura.

Assim todas as baterias realizadas nesta pesquisa e por Cancian (2013) apontam que o aumento no tempo para a compactação da mistura solo-cimento provoca a diminuição da umidade, aumento da porosidade, aumento da absorção de água e aumento do fator  $V_v/V_{cim}$ , e a diminuição da resistência à compressão simples da mistura solo-cimento compactada.

A partir dos resultados encontrados neste trabalho para o solo analisado estabilizado com cimento, é possível estimar as características da compactação (massa específica seca máxima e umidade ótima) e a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento em cada um dos tempos analisados nesta pesquisa em relação aos teores de cimento.

Através das características da compactação da mistura solo-cimento é possível estimar a absorção de água, a resistência à compressão simples e o tempo máximo para a compactação. Outro ponto notável é que os resultados apontados neste trabalho em relação ao tempo para a compactação da mistura não podem ser comparados a outros trabalhos, uma vez que a literatura brasileira existente apresenta escassez referente em relação a este aspecto importante da mistura solo-cimento.

## 6 CONCLUSÕES

Após obtidos os resultados, foram realizadas as análises e as discussões sobre as características e os componentes que influenciam no comportamento mecânico das misturas do solo-cimento investigadas: teor de cimento, teor de umidade, porosidade, energia e tempo para a compactação da mistura, para um solo caracterizado geotecnicamente como areia média a fina argilosa de cor avermelhada, classificado pelo DNIT como areia fina e pela AASHTO como A-2-4. Apresentando suas características físicas compatíveis com as especificações do DNIT, para sua utilização na mistura solo-cimento em base de pavimento rodoviário. O solo estudado foi estabilizado com teores de 8, 9 e 10 % de cimento Portland (CP II-Z-32) em relação à massa de solo seca, assim possibilitando as seguintes conclusões para o solo e as condições de contorno utilizadas nesta pesquisa.

O teor de cimento influencia na massa específica seca máxima, na umidade ótima, na porosidade, na resistência à compressão simples e no tempo máximo para a compactação da mistura. O acréscimo de cimento acarreta aumento linear da massa específica seca máxima e na umidade ótima da mistura.

O aumento no teor de cimento provoca a diminuição da porosidade da mistura e, quanto mais compactada, menor a absorção de água, aumentando a cimentação, melhorando linearmente o desempenho mecânico da mistura em todos os tempos para a compactação, e também aumentando o tempo máximo para a compactação.

O aumento da umidade ótima acarreta no acréscimo de água para hidratar a mistura, e esta por sua vez provoca aumento de vazios, que não são completamente preenchidos pelo cimento, o que provoca diminuição da mistura menor em relação à massa específica do solo natural, exceto para o teor de 10 % de cimento.

A umidade influencia no comportamento mecânico do solo-cimento, pois com o decréscimo da umidade ocorre o aumento da porosidade, diminuição da massa específica seca e a diminuição linear da resistência à compressão simples da mistura compactada. Ao compactar a mistura solo-cimento com umidade ótima + 1 %, aumenta-se a quantidade de água no interior da mistura, não acarretando em modificação na porosidade e na absorção de água dos corpos de prova, mas

provoca maior hidratação do cimento e promove melhor desempenho mecânico da mistura compactada com conseqüente aumento do tempo máximo para a compactação. Foi verificado também que quanto maior o teor de cimento maior é a perda de resistência devido à umidade.

A porosidade interfere de modo significativo na mistura solo-cimento compactada. A diminuição da porosidade da mistura implica na diminuição linear da absorção de água após 4 horas de imersão, decréscimo do fator  $V_v/V_{cim}$  e maior resistência à compressão simples também com tendência linear quando utilizado a umidade ótima e energia normal, e, umidade ótima + 1 % e energia normal. E quando utilizado a umidade ótima + 1 % e energia alterada a absorção apresenta tendência quadrática e diminui a resistência à compressão simples.

O fator  $V_v/V_{cim}$  varia em função do teor de cimento e do teor de umidade. O aumento do teor de cimento acarreta na diminuição do fator, logo menor é o seu expoente. Com a variação do teor de umidade, os expoentes se mostraram maiores quando usada a umidade ótima + 1 % em relação à umidade ótima. A diminuição do  $V_v/V_{cim}$  acarretou em todas as baterias o aumento da resistência à compressão simples.

Quando a energia foi alterada, foi obtida menor porosidade e menor absorção de água, como conseqüência maior resistência à compressão simples. Além disso, foram alcançados maiores tempos máximos entre a homogeneização da mistura e a sua compactação em todos os teores de cimento. O menor teor de cimento utilizado na mistura apresentou maior incremento de resistência quando utilizada energia alterada na compactação.

O tempo para a compactação mostrou-se de suma importância. Ao elevar o tempo para a compactação da mistura solo-cimento, ocorre por processo natural à perda de umidade, conseqüentemente, há a diminuição da massa específica seca, o aumento linear da porosidade, o aumento da absorção de água após 4 horas de imersão, o aumento do fator ( $V_v/V_{cim}$ ) e diminui a hidratação do cimento da mistura. Constata-se ainda que o aumento no tempo para a compactação da mistura solo-cimento, independente das condições da bateria realizada, resultou na diminuição (com tendência quadrática) da resistência à compressão simples do solo-cimento.

Em média os tempos máximos para a compactação da mistura foram de: 10 min, 21 min, 45 min, 53 min e 59 min para bateria com teor de umidade

ótima e energia normal (A); 33 min, 51min, 1 hora e 07 minutos (67 min), 1 hora e 29 minutos (89 min) e 2 horas e 4 minutos (124 min) para a bateria com teor de umidade ótima + 1 % e energia normal (B); e, 1 hora e 24 minutos (84 min), 1 hora e 56 minutos (116), 2 horas e 19 minutos (139 min), 2 horas e 34 minutos (154 min) e 2 horas e 45 minutos (165 min) para a bateria com teor de umidade ótima + 1 % e energia alterada (C), para 6, 7, 8, 9 e 10 % de cimento respectivamente.

Com a utilização de umidade ótima + 1 %, a mistura com o teor de 10 % obteve o maior acréscimo de tempo máximo para compactação, sendo este aumento de 65 minutos em relação à bateria com a utilização da umidade ótima. Com o aumento da energia de compactação, o teor de 8 % obteve o maior incremento no tempo máximo para a compactação, com o acréscimo de 72 minutos.

A bateria A (umidade ótima e energia normal) quando realizada, não atingiu a resistência à compressão simples mínima de 21 kg/cm<sup>2</sup> e nem o grau de compactação maior ou igual a 100 %, para todos os teores de cimento em tempos superior à 1 hora conforme a norma do DNIT.

Na bateria B (umidade ótima + 1 % e energia normal), os teores de 6 e 7 % de cimento, não atenderam a resistência à compressão simples e nem o grau de compactação especificado em tempo superior a 1 hora, porém os teores de 8, 9 e 10 % atingiram.

Na bateria C, para os teores de cimento 6, 7, 8, 9 e 10 %, foram atingidas a resistência à compressão simples e o grau de compactação da normativa em tempo superior à 1 hora.

Vale salientar que nenhum dos teores de cimento, independente das condições adotadas de umidade e energia, atingiu desempenho mecânico igual ou superior a 21 kg/cm<sup>2</sup> e grau de compactação maior ou igual a 100 % após o tempo de 3 horas.

As normais e manuais abordam procedimentos relacionados ao teor de cimento, teor de umidade, energia e tempo para a compactação da mistura solo-cimento, porém o não controle dos fatores supracitados podem influenciar no comportamento mecânico da mistura, assim trazendo prejuízos, mesmo estando a mistura teoricamente dentro dos limites estabelecidos nas normas, principalmente com relação ao tempo para a compactação.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho para o solo analisado estabilizado com cimento, foi possível estimar as características da compactação

(massa específica seca máxima e umidade ótima) e a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento em cada um dos tempos analisados em relação ao teor de cimento. Também através das características da compactação da mistura foi possível estimar a relação entre a absorção de água da mistura, a resistência à compressão simples e o tempo máximo para a compactação da mistura.

Portanto, em relação ao comportamento mecânico da mistura solo-cimento afirma-se que a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento eleva-se com o aumento do teor de cimento e aumento da energia de compactação, com a diminuição da porosidade e do fator  $V_v/V_{cim}$ , e a resistência diminui com o decréscimo da umidade e aumento do tempo para a compactação da mistura.

Por isso, quando for preciso um tempo maior para a compactação da mistura solo-cimento em campo, será necessário alterar o teor de cimento e ou o teor de umidade e ou a energia de compactação para atingir os requisitos de compactação e resistência à compressão mínima exigidos na DNIT-ES 143/2010, quando utilizados o solo arenoso, o cimento Portland (CP-II-Z-32) e as condições de adotadas nesta pesquisa. Dos resultados obtidos e análises realizadas foi possível concluir que a compactação da mistura solo-cimento deve ser realizada com a escolha correta do teor de cimento, do teor de umidade, da energia de compactação e do tempo entre a mistura e a sua compactação.

Este trabalho contribuiu para o conhecimento da mistura solo-cimento em relação as modificações causadas em seus componentes, porosidade e tempo para a compactação da mistura. Com a finalidade de auxiliar os projetistas e os órgãos federais e estaduais responsáveis pelas normas de utilização e execução das misturas solo-cimento em pavimento.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a intenção de agregar conhecimento ao estudo do solo-cimento, em reflexão sobre este e outros trabalhos realizados com este solo para a realização de solo-cimento, nesta dissertação sugere-se:

- Verificar a influência do teor de umidade, da porosidade e do tempo para compactação da mistura para 4 e 5 % de cimento;
- Verificar o desempenho mecânico do solo-cimento e o tempo máximo para compactação da mistura quando utilizada a umidade ótima + 2 %;
- Verificar qual a influência da quantidade de finos, as modificações causadas na curva de compactação e na resistência à compressão simples da mistura;
- Repetir os ensaios utilizando a umidade ótima e energia alterada utilizando o solo e o cimento adotados nesta pesquisa;
- Encontrar os módulos de resiliência e as curvas de fadiga para as misturas compactadas nos tempos definidos nesta pesquisa visando dimensionar um pavimento com base de solo-cimento;
- Avaliar o desempenho destas misturas em campo com a realização de trecho experimental.

## REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A versatilidade do solo-cimento.** Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro>>. Acesso em: 14 de mar. de 2016.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Estradas de concreto: este é o caminho para o futuro.** 2013.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **O Solo-Cimento.** Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteúdo/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento>>. Acesso em: 15 de mai. de 2016.

ABIKO, A. K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento.** 1980. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

ALMEIDA, Wilson Barbosa Filho. **Emprego da Mistura Solo-Cimento em Bases e Sub-Bases de Pavimentos.** 2008. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Unidade Acadêmica da Área de Ciências Exatas da Universidade São Francisco, Itatiba. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Julho, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11798:** Materiais para base de solo-cimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Julho, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023** - Solo-cimento - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024** - Solo-cimento - moldagem e cura - Corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025** - Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dezembro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253** - Solo-cimento - dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732:** Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Julho, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736:** Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Julho, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Rochas e Solos - Terminologia. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solos - Análise Granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dezembro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dezembro, 1986.

BASSO, Rafael; FERRAZ, Roberto; BELINCANTA, Antonio; RAMOS, Fabiano; Aplicação do método físico-químico de dosagem de misturas solo-cimento aos solos típicos do noroeste do Paraná. 2003. In: IV Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. Universidade Estadual de Maringá (UEM). **Anais de Congresso**. Maringá. 2003. p. 348–357.

BELL, F. G. **Lime stabilization of clay minerals and soils**. In: Engineering Geology 42. Elsevier Science, 1996.

CANCIAN, M. A.; CANCIAN, V. A.; TEIXEIRA, R. S.; FONTENELE, H. B.; COSTA BRANCO, C. J. M. da. Influência do teor de umidade, da porosidade e do intervalo de tempo até a aplicação da mistura solo-cimento em pavimento rodoviário.

**REVISTA TRANSPORTES**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, 2016. No prelo.

CANCIAN, Max Alberto. **Influência do Teor de umidade, Porosidade e do Tempo de Aplicação da Mistura Solo-Cimento para Pavimento Rodoviário de um Solo da Bacia do Paraná**. 2013. Dissertação de conclusão de curso (Pós-Graduação em Engenharia Civil, Mestrado) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2013.

CANCIAN, Victor; TEIXEIRA, Raquel; FONTENELE, Heliana; SILVA JUNIOR, Carlos Prado; COSTA BRANCO, Carlos José Marques da. Influência do tempo de mistura de solo-cimento na resistência à compressão simples. In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, 2015,. Ouro Preto. **Anais de Congresso**. Solos, agregados e concreto. Minas Gerais, 9 a 13 de Novembro de 2015. p. 184-195.

CARBELON, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CARNEIRO, A. Z. C. **Parâmetros - Chave de controle do comportamento Resiliente de saibros estabilizados com cimento: Estudo laboratorial em Ensaios triaxiais cíclicos**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2009.

CASTRO, S. F. **Incorporação de resíduos de caulim em solo-cimento para construção civil**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CAVALCANTE, F. C. I. T.; BARROSO, S. H. A. Influência da Energia de Compactação e do Teor de Areia na Estabilização Granulométrica de Bases e Sub-bases de Pavimentos. 2009. Vitória. **Anais do XXIII - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES**. Vitória, 2009. p. 1-11.

CERATTI, J. A. P.; CASANOVA, F. J. Um método físico químico para dosagem de solo-cimento. In: SIMPÓSIO SOBRE NOVOS CONCEITOS EM ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO EM GEOTECNIA. 1988. RJ. **Anais de Congresso**. Rio de Janeiro: COPPE; ABMS; ABGE, v. 1. 1988. p. 191-200.

Clima do Paraná. **Ciência e Diversão**. Disponível em:

<<http://parquedaciencia.blogspot.com.br/2014/11/clima-do-parana.html>>. Acesso em: 14 de mar. de 2016.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 133, n. 2, p. 197-205. abr. 2007. DOI: 10.1061/(ASCE) 1090-241(2007)133:2(197)

CRISTELO, N. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Lisboa, 2001.

DIAS, Débora Regina. **Resistência à compressão não confinada de misturas de solo-cimento visando à aplicação do sistema de estabilização Dry-Mix**.

Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, Campinas, 2012.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Cimento Portland - recebimento e aceitação. **Norma DNER-EM 036/1995**. Rio de Janeiro, 1995.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solos - Análise granulométrica por peneiramento. **Norma DNER-ME 080/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solos - determinação do limite de plasticidade. **Norma DNER-ME 082/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solos - determinação da densidade real dos grãos. **Norma DNER-ME 093/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solos - determinação do limite de liquidez. **Norma DNER-ME 122/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. **Norma DNER-ME 049/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solos - determinação do teor de umidade: método de ensaio. **Norma DNER-ME 213/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solo-cimento - determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente. **Norma DNER-ME 216/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solo-cimento - compressão axial de corpos de prova cilíndricos. **Norma DNER-ME 201/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Desenvolvimento Tecnológico - IPR. Divisão de Capacitação Tecnológica. Solo-cimento - moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. **Norma DNER-ME 202/1994**. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Norma DNIT 141/2010 - ES**. Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, Nov. 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Norma DNIT-ES 143/2010**. Pavimentação - Base de solo-cimento - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, Nov. 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. p. 56. Rio de Janeiro, 2006.

ENAMORADO, M. A. **Estudo Comparativo Entre o Método Mecânico e o Método Físico-químico para Dosagem do Solo-cimento**. 1990. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

FELT, E. J. Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures. **Highway Research Bulletin**, v. 1, n. 108, p. 138-162. mar.1955. The national Academies of SCIENCES - ENGINEERING - MEDICINE.

FERGUSON, G. Use of self cementing fly ashes as a soil stabilization agent. Fly Ash for soil improvement. **Geotechnical Special Publication**, v. 3, n. 36; p. 1-14, nov. 1993.

FLOSS, M. F. **Parâmetros de controle da resistência e da rigidez de solos granulares artificialmente cimentados**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia

Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FONINI, A. **Comportamento mecânico de uma areia cimentada: Análise experimental e Micromecânica**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FOPPA, Diego. **Análise das variáveis chaves no controle da resistência de solos artificialmente cimentados**. 2005, 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GRANDE, F. M. **Fabricação de Tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem a adição de sílica ativa**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

INGLES O. G.; MDETCALF, J. B. **Soil Stabilization - Principles and Practice**. Austrália: Butter Worths Pty. Limited, 1972. 366p.

JOHANN, A. D. R. **Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento**. 2013. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

KOLLING, E. M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A. J. Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 7, n. 3, (2012), p. 185 -191, out. 2012.

KORF, E. P. **Comportamento hidráulico e reativo de uma mistura solo-cimento para a aplicação em barreiras de contenção de resíduos ácidos contendo chumbo e cádmio**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração Meio Ambiente) - Programa de Pós-graduação em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LIMA, Rosa do Carmo de Oliveira. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

LIMA, T. V. **Estudo da produção de blocos de solo-cimento com solo do núcleo urbano da cidade de Campos dos Goytacazes**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, Goyatacazes, 2006.

LOPES, Régia; MORETTI, Geraldo; VIANA, Antonio; CARVALHO, David; MOURA, Darcia; SEVERO, Ricardo. Efeito do umedecimento e da velocidade de deformação sobre a resistência de solos cimentados artificialmente. 2009. **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rio Grande do Norte**. Rio grande de Norte. Holos, ano 25, v. 2.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. 2002. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,

Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2002.

MARCONDES, M. G. **Contribuição ao estudo do método Físico-químico de Dosagem do solo-cimento.** 1992. Dissertação (Mestrado) - Coordenadoria de Programas de Pós-Graduação em Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

MEDERO, G. M. **Comportamento de um solo colapsível artificialmente cimentado.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro. Editora Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil. 1997. 345 p.

MILANI, A. P. S. **Avaliação física, mecânica e térmica de misturas de solo-cimento adicionadas de cinza de casca de arroz sem atividade pozolânica.** 2008. Tese (Doutorado em engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP, Campinas, 2008.

MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. Avaliação física e mecânica e térmica de misturas de solo-cimento adicionadas de cinza de casca de arroz sem atividade pozolânica. 2008. Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP. **Revista Teoria e pratica na engenharia civil**, v. 7, n. 11, p. 23 - 30, abr. 2008.

MORRETI, G. V.; PASCHOALIN FILHO, J. A.; CASVALHO, D.; FONSECA, A.V. Time-enhanced strength increase of an alluvial clay, typical of the northeastern region of Brazil, mixed with different cement dosages. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 35, n. 3, p. 457 - 462, july-sep, 2013. DOI: 10.4025/actascitechnol.v35i3.16042.

OLIVEIRA, J. R. de. AMARAL, A. G. do. SCHNEIDER, R. M. Incorporação de resíduos sólidos de torneiras mecânicas na fabricação de tijolos solo-cimento. **Nátiva**, Sinop, Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e ambientais, Universidade federal do Mato Grosso, v. 2, n. 1, p. 53-57, jan/mar. 2014.

OLIVEIRA, Rodrigo Fidelis Viana de. **Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Ouro Preto, Ouro preto, 2011.  
PARANÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Mineropar**. Disponível em: <[www.mineropar.pr.gov/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=106](http://www.mineropar.pr.gov/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=106)>. Acesso em: 14 de mar. de 2016.

PEREIRA, Ana Catarina Martins Rodrigues. **Índice volumétrico “vazios-cimento” para avaliação de resistência e rigidez em areia grossa - generalização a outros solos.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-graduação em Engenharia civil - Faculdade de engenharia do Porto. Porto, 2009.

PEREIRA, Kiev Luiz Araujo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PITTA M. R. **Dimensionamento de pavimentos com camadas estabilizadas com cimento**. São Paulo, 1985.

PRIETTO, P. D. M. **Estudos do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. 1996. 150 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

RIOS, Sara; FONSECA, Antônio Viana; BAUDET, Beatrice Anne. (2012). Effect the Porosity/Cement ratio on the Compression of Cement Soil. **Journal of Geotechnical. Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 11, p. 1422-1426, nov 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000698.

ROJAS, J. W. J. **Estudo da resistência, condutividade hidráulica e lixiviação de um solo argiloso cimentado e contaminado**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SAMPAIO, M. G. **Comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SANBONSUGE, K. **Comportamento mecânico e desempenho em campo de base de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTOS, M. P. **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos provenientes de construção civil**. 2009. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira (SP)**. 2000. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

SOUZA JUNIOR, J. D. **Efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do Estado do Ceará**. 2005. 222 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SOUZA PINTO, Carlos. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 páginas.

SOUZA, M. I. B.; SEGATINI, 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, fev. 2008.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

STRACKE, Fernanda; JUNG, Jonatan; KORF, Eduardo; CONSOLI, Nilo. 2012. The influence of moisture content on tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Revista Soils & Rocks**, v. 35, n. 3, p. 303-308, Sep-Dec., 2012.

SUZUKI, Luis Eduardo Akioshi Sanches. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas e crescimento de culturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

TEIXEIRA, I. **Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

VENDRUSCOLO, M. A. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado**. 1996. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 248 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VITALI, Oswaldo Paiva Magalhães. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Engenharia- Universidade do Porto, Porto, 2008.

VITALI, Oswaldo; RIOS, Sara; FONSECA, Antonio. Efeito da composição nos parâmetros de resistência e de rigidez de misturas de solo-cimento. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG 2012), 2012, **Anais de Congresso**, Porto de Galinhas. 2012. p. 17-25.

WEST, G. (2015). A laboratory Investigation into the effect of elapsed time after mixing on the compaction and strength of soil-cement. **Géotechnique**, v.9, n. 1, p. 22-28. DOI: 10.1680/geot.1959.9.1.22

ZÓRTEA, F; de SOUZA, M; CONSOLI, N. Studies on the dosage of Fiber-Reinforced Cemented Soils. **Journal of Material in Civil Engineering**, v. 23, n. 12, p. 1624-1632, dec. 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000343