UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais
grossos do interior do Estado de São Paulo**

HELIO MARCOS FERNANDES VIANA

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil - Área de Transportes.

Área de concentração: Infra-estrutura de transportes.

ORIENTADOR: Prof. Tit. Alexandre Benetti Parreira

São Carlos
São Paulo - Brasil
2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

V614e Viana, Helio Marcos Fernandes
Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais
grossos do interior do Estado de São Paulo / Helio Marcos
Fernandes Viana ; orientador Alexandre Benetti Parreira.
-- São Carlos, 2007.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Infra-Estrutura de Transportes) -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

1. Resiliência. 2. Módulo de resiliência.
3. Ensaio triaxial cíclico. 4. Redes neurais artificiais.
5. Pavimentação. 6. Solos tropicais. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HELIO MARCOS FERNANDES VIANA**

Tese defendida e julgada em 07/12/2007 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **ALEXANDRE BENETTI PARREIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Dr. **GLAUCO TÚLIO PESSA FABBRI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Associado **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Associado **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES**
(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG) APROVADO

Prof. Titular **ROBERTO FRANCISCO DE AZEVEDO**
(Universidade Federal de Viçosa/UFV) APROVADO

Prof. Titular **ELJI KAWAMOTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes

Prof. Associado **MARCIO ANTONIO RAMALHO**
Vice-Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC
em Exercício

Ao Deus Pai, Filho (Jesus) e Espírito Santo.

Aos meus pais Idelson e Corália.

Aos meus irmãos, irmãs e aos demais familiares.

Prossigo para o alvo, pelo prêmio da
soberana vocação de Deus em Cristo Jesus.

(Apóstolo Paulo, Fil. 3:14)

AGRADECIMENTOS

Ao Deus eterno, supremo criador do universo, pela vida, paz e amor.

Ao Senhor Jesus Cristo, pelos valorosos ensinamentos e obra de redenção.

Ao Espírito Santo, pelo consolo, virtudes, intercessão e justiça.

Aos meus pais Idelson e Corália, heróis anônimos desta conquista, pelos exemplos de dedicação, carinho e amor.

Aos queridos Paulo Márcio e Fabiana, Thales e Laiane, Idelson Filho e Chiara, Léa e Pedro, Corália e Adail, Itamar e Georges, pela ajuda e incentivo em todos os momentos.

Aos meus tios Deusdete, Etelvina e seus filhos, pelo apoio educacional e amizade durante a minha estada em Goiânia, GO.

Ao Prof. Dr. Alexandre Benetti Parreira, de quem tive todo apoio e orientação para a realização desta Tese.

Ao Prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabri, pelos conselhos e ensinamentos transmitidos em várias etapas deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre Braz de Carvalho, pela atenção e por permitir a utilização da prensa de carregamento cíclico da Universidade Federal de Viçosa.

Ao Prof. Dr. Antônio Nelson Rodrigues da Silva, pela concessão do programa de redes neurais artificiais.

Ao Prof. Dr. Roberto F. de Azevedo e Prof.^a Dr.^a Izabel Christina d'Almeida Azevedo, pela confiança em mim depositada.

Ao Prof. Dr. Cláudio da Universidade Federal de Viçosa, pela atenção e ajuda.

Aos Professores Doutores Manuel Henrique Alba Sória, José Leomar Fernandes Júnior e Eiji Kawamoto, pela atenção e ensinamentos transmitidos.

A todos os meus queridos colegas do Departamento de Transportes, em especial, Rogério Bezerra, Shirley Minell, Marilda Serra, Cida, Pastor Willy, Ana Paula, Dinato, Benedito Coutinho, Marcos, Adalberto, Marcelo Takeda, Francis, Paulo, David, Alex, Adriana Goulart, Cira Pitombo e Bruno, pelos momentos compartilhados e atenção recebida.

Aos colegas da Universidade Federal de Viçosa, em particular, Danilo, Iara e Jeovani, pelo companheirismo e ajuda.

À D. Cida, Francis, Jesuíno e Sr. José, pela amizade e apoio.

Aos funcionários do Laboratório de Estradas da EESC/USP, Gigante, João e Paulo, pela participação prestativa e dedicada na execução dos ensaios desta pesquisa.

Às secretárias Heloísa, Bete e Magali, pela atenção e prestimosidade.

Ao Carlos, pelo apoio na instalação de programas de computador.

Aos membros da Obra Missionária Cristo é a Porta, pelas orações, amizade, incentivo e atenção.

Aos membros da Igreja Evangélica Triangular do Candeias, da Igreja Presbiteriana Renovada de São Carlos, da Igreja Presbiteriana de Vitória da Conquista e da Igreja Batista Betesda de Vitória da Conquista, pelas orações, incentivo e atenção.

Aos Missionários do Centro Evangélico das Missões de Viçosa-MG, pelo companheirismo e pelo apoio.

Ao Presbítero Belchior, pelas orações e correção gramatical final da tese.

A todos aqueles que, nos mais diversos locais, ao longo desta jornada, através de citações dos grandiosos exemplos bíblicos ou através de frases ou palavras positivas, incentivaram-me para realização deste trabalho.

Finalmente, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos.

RESUMO

VIANA, H. M. F. ***Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo***. São Carlos, 2007. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O módulo de resiliência é uma propriedade mecânica dos solos indispensável para análise estrutural de pavimentos em termos de tensão e deformação. O principal ensaio laboratorial para estimativa do módulo de resiliência dos solos é o ensaio triaxial cíclico no qual existe um maior controle das condições da amostra, dos carregamentos aplicados e dos deslocamentos medidos. A utilização de relações para obtenção do módulo de resiliência a partir de propriedades do solo obtidas de ensaios mais simples e rotineiros é permitida pelo procedimento NCHRP 1-37A (2004) e pode ser muito útil para fase de anteprojeto de implantação de rodovias, pois permite uma avaliação rápida do módulo de resiliência dos solos de jazidas e subleitos, localizados ao longo das diversas alternativas de traçados a serem analisadas. No entanto, as relações existentes ou são restritivas, por não considerarem os solos das regiões tropicais de comportamento laterítico e não laterítico da classificação MCT (Miniatura Compactado Tropical), ou são de baixa eficiência. Considerando-se o sucesso que as redes neurais artificiais (RNAs) têm apresentado no campo da engenharia em estabelecer relações entre variáveis explicativas e variáveis resposta, neste trabalho foram desenvolvidas RNAs para relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo, tanto para solos grossos compactados na energia modificada como para solos compactados na energia normal. O banco de dados utilizado no trabalho baseou-se nos resultados de

ensaios de setenta e seis amostras de solos coletadas no interior do Estado de São Paulo. Finalmente, verificou-se que as RNAs podem prever, com alta eficiência, o módulo de resiliência dos solos tropicais de comportamento laterítico e não laterítico a partir de propriedades do solo tais como: composição granulométrica, LL, IP, umidade ótima e resultados do ensaio de compressão simples.

Palavras-chave: Resiliência; Módulo de resiliência; Ensaio triaxial cíclico; Redes neurais artificiais; Pavimentação; Solos tropicais.

ABSTRACT

VIANA, H. M. F. ***Study of resilient behavior of tropical sandy soils from interior of Sao Paulo state.*** São Carlos, 2007. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The resilient modulus is an essential mechanical property for stress-strain analysis of pavements. The main test to evaluate resilient modulus of soils is cyclic triaxial test which there is a better control not only of samples but also of loads and displacements. Nowadays, the utilization of relationships to obtain resilient modulus from soils properties, from routine simple tests, is allowed by procedure NCHRP 1-37A, and that can be useful in initial design in construction of roads, as the resilient modulus of material pits and subgrades, places along several alternative traces of design, can be evaluated very fast by relationships. However, the existing relationships are restrictive, because they do not consider tropical soils of lateritic and non-lateritic behavior from MCT (Miniatura Compactado Tropical) classification and they have low performance. Artificial neural networks (ANNs) have shown high success to establish relationships from answering variables and explicative variables, so in this work was developed ANNs to establish relationships from resilient modulus and soil properties, not only for sandy soils in Proctor's modified compaction energy but also for soils in Proctor's standard compaction energy. The data base used in this work was laboratory test results from seventy-six soils which were collected in interior of Sao Paulo state. Finally, for tropical soils of lateritic and non-lateritic behavior, it was verified that ANNs can forecast, with high performance, resilient modulus from

soil properties just as: grain size composition, liquid limit (LL), plasticity index (PI), optimum moisture content and results of simple strength compressive test.

Key-words: Resilient modulus; Resilience; Cyclic triaxial test; Artificial neural networks; Neural networks; Pavement; Tropical soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Variação do módulo de resiliência com adição de finos em um agregado britado de rocha ígnea.....	50
Figura 2.2 - Influência da composição granulométrica no M_R de resiliência material gnaisse-granítico.....	51
Figura 2.3 - Variação do módulo de resiliência de um solo fino do Arkansas com o teor de umidade.....	53
Figura 2.4 - Variação do M_R com o teor de umidade para solo argiloso siltoso tipo A-7-6.....	54
Figura 2.5 - Variação do M_R com a umidade em um solo arenoso tipo A-3....	56
Figura 2.6 - Variação de k_1 (médio) e de k_2 (médio) dos agregados em função da energia de compactação.....	65
Figura 2.7 - Modelo de um neurônio artificial.....	86
Figura 2.8 - Funções de ativação passo (a), rampa (b) e sigmóide do tipo logística (c).....	90
Figura 2.9 - Exemplo de uma rede neural alimentada adiante com camada única.....	93
Figura 2.10 - Exemplo de uma rede alimentada adiante com múltiplas camadas.....	93
Figura 2.11 - Fases de treinamento da rede com o algoritmo <i>backpropagation</i>	98
Figura 2.12 - Esquema sucinto do algoritmo <i>backpropagation</i>	98

Figura 2.13 - Simulação do comportamento tensão-deformação em solos arenosos através de redes neurais.....	108
Figura 2.14 - Recalques medidos versus recalques previstos pelas redes neurais e pelos métodos tradicionais.....	110
Figura 3.1 - Mapa do Estado de São Paulo com indicação aproximada dos locais de coleta.....	118
Figura 3.2 - Prensa de carregamento cíclico Loadtrac II do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa-MG.....	126
Figura 3.3 - Corpo-de-prova instalado na câmara triaxial.....	126
Figura 3.4 - Corpos-de-prova na caixa de isopor com almofadas.....	130
Figura 3.5 - Corpos-de-prova na câmara úmida do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa-MG.....	130
Figura 4.1 - Distribuição, no ábaco da classificação MCT, dos 44 materiais grossos escolhidos para atender os objetivos deste trabalho....	154
Figura 4.2 - Mapa do Estado de São Paulo com a indicação dos locais dos solos selecionados para o estudo e a identificação da classe MCT dos solos.....	156
Figura 4.3 - Massa específica seca máxima versus umidade ótima para solos lateríticos e não lateríticos na energia modificada.....	163
Figura 4.4 - W_{ot} versus limite de liquidez para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada.....	164
Figura 4.5 - W_{ot} versus índice de plasticidade para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada.....	164

Figura 4.6 - W_{ot} versus % que passa na # 0,075 mm para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada.....	165
Figura 4.7 - W_{ot} versus % Arg. para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada.....	165
Figura 4.8 - $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus limite de liquidez para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada.....	168
Figura 4.9 - $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus índice de plasticidade para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada.....	168
Figura 4.10 - $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus % que passa na # 0,075 para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada.....	169
Figura 4.11 - $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus % Arg. para solos de comportamento laterítico não laterítico na energia modificada.....	169
Figura 4.12 - Valores observados de W_{ot} versus valores de W_{ot} previstos pelo modelo da NCHRP 1-37A (2004) - Considerando-se solos de comportamento lateríticos na energia modificada.....	173
Figura 4.13 - Valores observados de W_{ot} versus valores de W_{ot} previstos pelo modelo da NCHRP 1-37A (2004) - Considerando-se solos de comportamento não lateríticos na energia modificada.....	173
Figura 4.14 - Valores observados de $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus valores de $\rho_{dm\acute{a}x}$ previstos pelo modelo da NCHRP 1-37A (2004) - Considerando-se solos de comportamento lateríticos na energia modificada.....	175

Figura 4.15 - Valores observados de $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus valores de $\rho_{dm\acute{a}x}$ previstos pelo modelo da NCHRP 1-37A (2004) - Considerando-se solos de comportamento não lateríticos na energia modificada	176
Figura 4.16 - Relação entre o E_o e a RCS para solos grossos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada.....	184
Figura 4.17 - Relação entre o E_o e a RCS para solos grossos de comportamento laterítico compactados na energia modificada.....	186
Figura 4.18 - Relação entre o E_o e a RCS para solos grossos de comportamento não laterítico compactados na energia modificada.....	186
Figura 4.19 - Erro médio relativo da rede ótima preliminar 1 para solos grossos, compactados na energia modificada.....	216
Figura 4.20 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima preliminar 1 para solos grossos, compactados na energia modificada.....	216
Figura 4.21 - Erro médio relativo da rede ótima 1 para solos grossos, compactados na energia modificada.....	221
Figura 4.22 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima 1 para solos grossos, compactados na energia modificada.....	221
Figura 4.23 - Erro médio relativo da rede ótima 2 para solos grossos, compactados na energia modificada.....	223
Figura 4.24 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima 2 para solos grossos, compactados na energia modificada.....	223

Figura 4.25 - Erro médio relativo da rede ótima preliminar 1 para solos, compactados na energia normal.....	228
Figura 4.26 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima preliminar 1 para solos, compactados na energia normal.....	228
Figura 4.27 - Erro médio relativo da rede ótima 1 para solos, compactados na energia normal.....	233
Figura 4.28 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima 1 para solos, compactados na energia normal.....	233
Figura 4.29 - Erro médio relativo da rede ótima 2 para solos, compactados na energia normal.....	235
Figura 4.30 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima 2 para solos, compactados na energia normal.....	235
Figura 4.31 - Erro médio relativo da rede de teste com solos na energia modificada que foi testada com 8 solos.....	240
Figura 4.32 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 26, com a rede de teste para materiais na energia modificada.....	243
Figura 4.33 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 40, com a rede de teste para materiais na energia modificada.....	243
Figura 4.34 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 57, com a rede de teste para materiais na energia modificada.....	244
Figura 4.35 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 61, com a rede de teste para materiais na energia modificada.....	244
Figura 4.36 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 60, com a rede de teste para materiais na energia modificada.....	246

Figura 4.37 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 79, com a rede de teste para materiais na energia modificada.....	247
Figura 4.38 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 84, com a rede de teste para materiais na energia modificada.....	247
Figura 4.39 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 1, com a rede de teste para materiais na energia modificada.....	248
Figura 4.40 - Erro médio relativo da rede de teste, para solos compactados na energia normal, que foi testada com 6 solos que não foram usados na calibração.....	250
Figura 4.41 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 64, com a rede de teste para materiais na energia normal.....	253
Figura 4.42 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 65, com a rede de teste para materiais na energia normal.....	254
Figura 4.43 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 88, com a rede de teste para materiais na energia normal.....	254
Figura 4.44 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 50, com a rede de teste para materiais na energia normal.....	255
Figura 4.45 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 11, com a rede de teste para materiais na energia normal.....	255
Figura 4.46 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 30, com a rede de teste para materiais na energia normal.....	257
Figura 4.47 - EMR de previsão dos módulos de resiliência com a rede neural ideal para solos grossos, compactados na energia modificada.....	262

Figura 4.48 - Influência das variáveis de entrada da rede neural ideal para solos grossos, compactados na energia modificada.....	262
Figura 4.49 - EMR de previsão dos módulos de resiliência com a rede neural ideal para solos compactados na energia normal.....	265
Figura 4.50 - Influência das variáveis de entrada da rede neural ideal para solos compactados na energia normal.....	265
Figura 4.51 - EMR de previsão das umidades ótimas com a rede neural para solos grossos na energia modificada.....	269
Figura 4.52 - Influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede usada para previsão da umidade ótima para solos grossos na energia modificada.....	269
Figura 4.53 - EMR de previsão das massas específicas secas máximas com a rede neural para solos grossos na energia modificada	271
Figura 4.54 - Influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede usada para previsão da massa específica seca máxima para solos grossos na energia modificada.....	271

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição granulométrica do agregado britado da rocha ígnea intrusiva.....	49
Tabela 2.2 - As composições granulométricas consideradas no estudo dos materiais para base.....	51
Tabela 2.3 - As características do solo fino do Estado do Arkansas (EUA) utilizado no trabalho.....	53
Tabela 2.4 - Os tipos de agregados componentes do trabalho, as localizações, os parâmetros de ruptura, as massas específicas secas máximas e os R^2 resultantes das avaliações feitas com eq. (2.12).....	72
Tabela 2.5 - Valores típicos de k_1 e k_2 para materiais grossos não cimentados de base e subbase.....	76
Tabela 2.6 - Os valores típicos do estado de tensão atuante em base de material granular.....	76
Tabela 2.7 - Os valores típicos do estado de tensão atuante na subbase com espessura entre 15 e 30 cm.....	77
Tabela 2.8 - Relações entre M_R e CBR para materiais granulares não cimentados de base e/ou de subbase.....	77
Tabela 2.9 - Peculiaridades dos solos tropicais lateríticos e saprolíticos.....	81
Tabela 2.10 - Algumas características da constituição mineral dos solos lateríticos e saprolíticos.....	83

Tabela 2.11 - Sumário do projeto das redes desenvolvidas com os dados do ELSYM5.....	113
Tabela 2.12 - Arquiteturas e erros médios relativos de previsão dos módulos de resiliência das redes utilizadas nas retroanálises dos pavimentos.....	114
Tabela 2.13 - Características das redes neurais empregadas no estudo dos ligantes asfálticos.....	115
Tabela 3.1 - Ensaio programado e a quantidade mínima provável de material necessário para realizá-lo.....	119
Tabela 3.2 - Principais características dos solos 44 solos selecionados, inclusive a classificação destes materiais pelos sistemas HRB, USCS e MCT.....	122
Tabela 3.3 - Os valores das massas específicas secas máximas e dos teores de umidade ótimos respectivos na energia de compactação modificada de Proctor para os 44 solos selecionados para dar continuidade ao trabalho.....	124
Tabela 3.4 - Estados de tensão utilizados nos ensaios e que são recomendados pela AASHTO T 307-99 para materiais de base e subbase.....	128
Tabela 3.5 - Valores médios da resistência à compressão simples (RCS) para os 42 solos estudados compactados na energia modificada de Proctor.....	133
Tabela 3.6 - Os valores médios dos módulos tangentes iniciais para os 42 solos estudados compactados na energia modificada.....	135

Tabela 3.7 - Os modelos que foram usados para representação do M_R	138
Tabela 3.8 - Combinações do módulo tangente inicial com as tensões atuantes no solo para as relações que foram desenvolvidas com o M_R	142
Tabela 4.1 - Distribuição dos solos grossos selecionados para o estudo nas classes MCT.....	155
Tabela 4.2 - Característica inferida a partir da microfotografia de solos lateríticos e comparação com a classificação MCT.....	159
Tabela 4.3 - Característica inferida a partir da microfotografia de solos não lateríticos e comparação com a classificação MCT.....	160
Tabela 4.4 - Diversas relações entre a umidade ótima e as propriedades dos solos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada.....	166
Tabela 4.5 - Diversas relações entre a massa específica seca máxima e as propriedades dos solos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada.....	170
Tabela 4.6 - Relações matemáticas para determinação dos parâmetros físicos de compactação segundo a NCHRP 1-37A (2004).....	172
Tabela 4.7 - Estatística dos dados utilizados para calcular o erro médio relativo de previsão da umidade ótima para solos de comportamento laterítico e não laterítico.....	174
Tabela 4.8 - Estatística dos dados utilizados para calcular o erro médio relativo de previsão da massa específica seca máxima para solos de comportamento laterítico e não laterítico.....	177

Tabela 4.9 - Valores das resistências à compressão médias para solos lateríticos compactados na energia modificada.....	178
Tabela 4.10 - Valores das resistências à compressão médias para solos não lateríticos arenosos compactados na energia modificada.....	179
Tabela 4.11 - Valores dos módulos tangentes iniciais médios para solos lateríticos compactados na energia modificada.....	181
Tabela 4.12 - Valores dos módulos tangentes iniciais médios para solos não lateríticos arenosos compactados na energia modificada.....	182
Tabela 4.13 - Módulos de resiliência típicos para solos lateríticos compactados na energia modificada.....	188
Tabela 4.14 - Módulos de resiliência típicos para solos não lateríticos arenosos compactados na energia modificada.....	189
Tabela 4.15 - Comparação entre módulos de resiliência de solos de comportamento laterítico e não laterítico.....	190
Tabela 4.16 - Os modelos usados para representação da variação do M_R com as tensões atuantes no solo.....	193
Tabela 4.17 - Os valores dos coeficientes de determinação obtidos com o ajuste dos modelos A, B, C e D usados para representar o módulo de resiliência, e os modelos com melhores desempenho.....	194
Tabela 4.18 - Relações entre o M_R e o E_o considerando apenas solos grossos lateríticos na energia modificada.....	206

Tabela 4.19 - Relações entre o M_R e o E_o considerando apenas solos grossos não lateríticos na energia modificada.....	208
Tabela 4.20 - Estudo para determinação das redes ótimas preliminares 2 e 3 para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada.....	219
Tabela 4.21 - Estudo para determinação das redes ótimas preliminares 2 e 3 para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal.....	231
Tabela 4.22 - Propriedades do solo das amostras similares às amostras 60, 79, 84 e 1.....	246
Tabela 4.23 - Propriedades do solo das amostras quase totalmente similares à amostra 30.....	256
Tabela 4.24 - Desempenho das redes neurais para solos grossos, compactados na energia modificada, considerando as variáveis correlatas.....	261
Tabela 4.25 - Desempenho das redes neurais para solos compactados na energia normal considerando as variáveis correlatas.....	264
Tabela A.1 - Os locais de coleta das 76 amostras.....	292
Tabela A.2 - As principais características e as classificações pelos sistemas HRB, USCS e MCT dos 76 solos coletados.....	293
Tabela A.3 - D_{60} (diâmetro tal que 60% das partículas do solo, em massa, têm diâmetros menores que ele) dos 76 solos coletados.....	295
Tabela B.1 - As massas específicas secas máximas e os teores de umidade ótimos na energia de compactação modificada de Proctor para os solos coletados.....	297

Tabela C.1 - Modelos usados para representar o módulo de resiliência.....	300
Tabela C.2 - Valores de k_1 , k_2 e k_3 obtidos para solos compactados na energia modificada.....	301
Tabela E.1 - Arquiteturas, momentos, taxas de aprendizagem e erros médios de treinamento dos solos compactados na energia modificada.....	315
Tabela E.2 - Arquiteturas, momentos, taxas de aprendizagem e erros médios de treinamento dos solos para subleito do interior do Estado de São Paulo compactados na energia normal.....	316
Tabela F.1 - Características dos solos de Takeda (2006), inclusive a classificação destes materiais pelos sistemas HRB, USCS e MCT.....	318
Tabela F.2 - Os teores de umidade ótimos, as massas específicas secas máximas, os módulos tangentes iniciais e as resistências à compressão simples dos 28 solos compactados na energia normal de Takeda (2006).....	319
Tabela F.3 - Valores de k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto obtidos para solos compactados na energia normal por Takeda (2006).....	320

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO = American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas.

DER/SP = Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo.

EESC = Escola de Engenharia de São Carlos.

ELSYM5 = Elastic Layered System.

EUA = Estados Unidos de América.

FWD = Falling Weight Deflectometer.

HRB = Highway Research Board.

IFSC = Instituto de Física de São Carlos.

LVDT = Linear variable differential transducer.

MEV = Microscopia Eletrônica de Varredura.

MCT = Miniatura Compactado Tropical.

NCHRP = National Cooperative Highway Research Program.

RNAs = Redes Neurais Artificiais.

USCS = Unified Soil Classification System.

USP = Universidade de São Paulo.

LISTA DE SÍMBOLOS

% passa # 0,075 = % de solo que passa na peneira de malha 0,075 mm.

% passa # 0,15 = % de solo que passa na peneira de malha 0,15 mm.

% passa # 0,42 = % de solo que passa na peneira de malha 0,42 mm.

% Arg. = % de solo com diâmetros menores do que 0,005 mm.

a_F = parâmetro de inclinação da função logística.

AG = necessidade de cravação de material granular sob o subleito.

B = largura da sapata.

c = coesão.

c' = coeficiente de classificação do solo do ábaco da MCT.

C = conjunto englobando todos os neurônios da camada de saída da rede.

CBR = índice de suporte Califórnia.

C_U = coeficiente de uniformidade.

C_V = coeficiente de variação.

$d_j(n)$ = resposta desejada para o neurônio j, na iteração correspondente ao padrão n.

$d_k(n)$ = resposta desejada para o neurônio k, na iteração correspondente ao padrão n.

D_{60} = diâmetro tal que 60% das partículas do solo, em massa, têm diâmetros menores que ele.

D_f = profundidade de embutimento da sapata.

D_f/B = razão embutimento da sapata.

D_r = densidade relativa.

e' = índice de classificação do solo do ábaco da MCT.

e_B = espessura da base.

e_C = espessura da capa.

e_{SB} = espessura da subbase.

EMR = erro médio relativo.

E_{med} = erro médio quadrado.

E_o = módulo tangente inicial.

ES = aplicação de estabilizante.

GC = grau de compactação.

IP = índice de plasticidade.

k_1, k_2, k_3 = constantes de regressão do modelo.

L = comprimento da sapata.

L/B = razão geométrica da sapata.

LL = limite de liquidez.

LP = limite de plasticidade.

LV = limpeza das valetas.

M_R = módulo de resiliência.

M_{RB} = módulo de resiliência da base.

M_{RPE} = módulo de resiliência do pavimento equivalente.

M_{RSB} = módulo de resiliência da subbase.

M_{RSL} = módulo de resiliência do subleito.

M_{RReal} = valor do módulo de resiliência (modelo composto).

M_{RNA} = valor do módulo de resiliência (previsto pela RNA).

N = número de golpes SPT.

OCR = razão de pré-adensamento.

Pa = pressão atmosférica (para Estado de São Paulo, adotou-se Pa = 101,3 kPa).

q = pressão aplicada pela sapata.

R^2 = coeficiente de determinação.

RCS = resistência à compressão simples.

RP = necessidade de camada de revestimento primário sob o subleito.

S_{ot} = grau de saturação.

T_x = espessura efetiva do pavimento.

u = poro pressão.

v = potencial de ativação ou campo local induzido.

$v_j(n)$ = campo local induzido, gerado na entrada da função de ativação, do neurônio j , na iteração correspondente ao padrão n .

v_k = potencial de ativação ou campo local induzido do neurônio k .

$v_k(n)$ = campo local induzido, gerado na entrada da função de ativação, do neurônio k , na iteração correspondente ao padrão n .

$x_0, x_1, x_2, \dots, x_{km}$ = sinais (ou informações) de entrada no neurônio.

$w_{k0}, w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ = pesos sinápticos do neurônio k .

$w_{ji}(n+1)$ = peso sináptico localizado entre o nó i e o nó j da rede, na iteração correspondente ao padrão $n + 1$.

$w_{kj}(n)$ = peso sináptico localizado entre a entrada do neurônio k e a saída do neurônio j , na iteração correspondente ao padrão n .

W_{ot} = teor de umidade ótimo.

$y_i(n)$ = sinal de saída ou resposta do neurônio i , na iteração correspondente ao padrão n .

$y_j(n)$ = resposta que surge na saída do neurônio j , na iteração correspondente ao padrão n .

y_k = resposta ou sinal de saída do neurônio k .

$y_k(n)$ = sinal de saída ou resposta fornecida pelo neurônio k , na iteração correspondente ao padrão n .

α = constante de momento.

$\alpha \cdot \Delta w_{ji}(n-1)$ = termo de momento.

δ_j = gradiente local, na iteração correspondente ao padrão n .

$\delta_j(n)$ = gradiente local para o neurônio de saída j , na iteração correspondente ao padrão n .

$\delta_k(n)$ = gradiente local para o neurônio k que sucede a camada do neurônio j no sentido da saída da rede, na iteração correspondente ao padrão n .

$\Delta \varepsilon$ = variação de deformação axial.

$\Delta \sigma$ = variação de tensão axial.

$\Delta w_{ji}(n)$ = correção aplicada ao peso sináptico localizado entre o nó i e o nó j na iteração correspondente ao padrão n .

ε_1 = deformação axial.

ε_r = deformação recuperável ou resiliente.

ϕ = ângulo de atrito.

γ_s = massa específica dos sólidos.

η = taxa de aprendizagem.

$\phi(v)$ = função de ativação do neurônio.

$\phi(v_k)$ = função de ativação do neurônio k .

$\phi'_j(v_j(n))$ = derivada parcial da função de ativação do neurônio j de saída em relação à $v_j(n)$, na iteração correspondente ao padrão n .

$\phi'_k(v_k(n))$ = derivada parcial da função de ativação do neurônio k em relação à $v_k(n)$, na iteração correspondente ao padrão n .

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão.

$\rho_{dm\acute{a}x}$ = massa específica seca máxima.

σ_a = tensão máxima axial.

σ_c = tensão de contato.

σ_1 = tensão principal maior.

σ_3 = tensão principal menor.

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio.

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO.....	37
1.1	O módulo de resiliência e sua importância.....	37
1.2	Módulo de resiliência, conceito, determinação e comportamento....	38
1.3	Principais objetivos do trabalho.....	41
1.4	Organização do trabalho.....	42
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	43
2.1	O módulo de resiliência e as tensões.....	44
2.2	O módulo de resiliência e a composição granulométrica.....	48
2.3	O módulo de resiliência e a umidade do material.....	52
2.3.1	Variações do módulo de resiliência com a umidade do material	52
2.3.2	O módulo de resiliência e teor de umidade <i>in situ</i> no Brasil.....	57
2.4	O módulo de resiliência e o processo de compactação.....	61
2.4.1	O módulo de resiliência e a densidade.....	61
2.4.2	O módulo de resiliência e a energia de compactação.....	63

2.4.3	O módulo de resiliência e o tipo de compactação.....	66
2.5	Relações usadas para avaliação do módulo de resiliência.....	68
2.5.1	Relações do módulo de resiliência que não consideram tensões.....	69
2.5.2	Relações do módulo de resiliência que consideram tensões.....	71
2.6	Solos tropicais lateríticos e saprolíticos.....	78
2.7	As redes neurais artificiais.....	85
2.7.1	Estrutura de um neurônio artificial.....	85
2.7.2	Redes alimentadas adiante com camada única e redes alimentadas adiante com múltiplas camadas.....	91
2.7.3	Arquitetura das redes.....	94
2.7.4	Aprendizado de uma RNA.....	95
2.7.5	O algoritmo <i>backpropagation</i>	96
2.7.5.1	As duas fases do algoritmo <i>backpropagation</i>	96
2.7.5.2	Formulação do algoritmo <i>backpropagation</i>	99
2.7.6	Aplicações das redes neurais artificiais na engenharia.....	105
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	116
3.1	Coleta dos solos.....	116
3.2	Quantidade de material coletado.....	119
3.3	Armazenamento, caracterização e classificação dos solos coletados.....	120
3.4	Materiais selecionados para o desenvolvimento trabalho.....	121
3.5	Os ensaios de compactação tipo Proctor.....	123
3.6	Os ensaios triaxiais cíclicos.....	125

3.7	Os ensaios de compressão simples.....	131
3.8	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	135
3.9	Procedimentos adotados na análise dos resultados.....	136
3.9.1	Análises dos aspectos concernentes ao caráter laterítico dos solos.....	136
3.9.2	Determinação dos melhores modelos para representar o módulo de resiliência.....	137
3.9.3	Análise das relações envolvendo as constantes de regressão do modelo composto com as propriedades dos solos.....	139
3.9.3.1	Relações entre as constantes de regressão do modelo composto e as propriedades do solo através do método <i>Forward Stepwise</i>	139
3.9.3.2	Relações não lineares diretas entre o módulo de resiliência e as propriedades dos solos.....	141
3.9.4	Aplicação das redes neurais artificiais na previsão do módulo de resiliência.....	143
3.9.4.1	Informações preliminares e diretrizes básicas.....	143
3.9.4.2	Procedimento para determinar as redes ótimas 1 e 2.....	145
3.9.4.3	Situações que serão analisadas no Capítulo 4.....	150
3.9.5	Avaliação da umidade ótima e da massa específica seca máxima dos solos a partir de redes neurais artificiais.....	151
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	152
4.1	Introdução.....	152
4.2	Estudo dos aspectos concernentes ao caráter laterítico dos solos..	153

4.2.1	Resultados da classificação MCT (Miniatura Compactado e Tropical).....	154
4.2.2	Inferência do caráter laterítico e não laterítico dos solos com base nos resultados da microscopia eletrônica de varredura.....	157
4.2.3	Análise de relações envolvendo os parâmetros de compactação dos solos lateríticos e não lateríticos.....	161
4.2.3.1	Relações lineares envolvendo os parâmetros de compactação e propriedades físicas dos solos lateríticos e não lateríticos.....	161
4.2.3.2	Desempenho dos modelos da NCHRP 1-37A (2004) na previsão da umidade ótima e massa específica seca máxima dos solos de comportamento laterítico e não laterítico.....	171
4.2.4	Influência do caráter laterítico e não laterítico no comportamento mecânico dos solos.....	177
4.2.4.1	Influência do caráter laterítico e não laterítico dos solos no comportamento da resistência à compressão simples (RCS).....	178
4.2.4.2	Influência do caráter laterítico e não laterítico dos solos no comportamento do módulo tangente inicial (E_o).....	180
4.2.4.3	Relações entre o módulo tangente inicial e a resistência à compressão simples para solos de comportamento laterítico e não laterítico.....	183
4.2.4.4	Influência do caráter laterítico e não laterítico do solo no comportamento do módulo de resiliência típico.....	187

4.3	Avaliação dos modelos para a representação do módulo de resiliência.....	191
4.4	Relações envolvendo as constantes de regressão do modelo composto e o módulo de resiliência com outras propriedades dos solos.....	196
4.4.1	Relações lineares utilizando as constantes de regressão do modelo composto e as propriedades do solo pelo método <i>Forward Stepwise</i>	197
4.4.2	Relações do M_R utilizando propriedades dos solos.....	204
4.4.2.1	Relações do M_R utilizando apenas o módulo tangente inicial.....	205
4.4.2.2	Relações entre o M_R e propriedades do solo incluindo o módulo tangente inicial.....	210
4.5	As redes neurais artificiais e o módulo de resiliência.....	212
4.5.1	Módulo de resiliência por rede neural para os solos grossos do interior de São Paulo, compactados na energia modificada.....	213
4.5.2	Análise do M_R através de redes neurais de solos de subleito do interior paulista, compactados na energia normal.....	225
4.5.3	Eficiência das redes neurais com solos não usados na calibração.....	237
4.5.3.1	Rede neural com solos grossos na energia modificada testada com materiais não usados na calibração.....	239
4.5.3.2	Avaliação do erro médio relativo de cada amostra, compactada na energia modificada, tomada isoladamente.....	242

4.5.3.3	Rede neural com solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal, testada com materiais não usados na calibração.....	249
4.5.3.4	Avaliação do erro médio relativo de cada amostra, compactada na energia normal tomada isoladamente.....	252
4.5.4	Análise da influência das variáveis correlatas na eficiência das redes neurais artificiais.....	258
4.5.4.1	Análise da influência das variáveis correlatas na eficiência das redes para solos grossos, compactados na energia modificada.....	259
4.5.4.2	Análise da influência das variáveis correlatas na eficiência das redes para solos compactados na energia normal.....	263
4.6	Previsão da umidade ótima e da massa específica seca máxima dos solos lateríticos e não lateríticos a partir de redes neurais artificiais.....	267
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	273
5.1	Introdução.....	273
5.2	Quanto à gênese dos solos, sua identificação e relação com outras propriedades.....	274
5.3	Quanto aos modelos para representar o módulo de resiliência.....	275
5.4	Quanto às relações entre as constantes de regressão do modelo composto e as propriedades do solo.....	276

5.5	Quanto às relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo e as tensões através de regressões não lineares múltiplas.....	276
5.6	Quanto à aplicação das redes neurais artificiais para avaliação do módulo de resiliência do solo.....	277
5.7	Quanto à previsão da umidade ótima e da massa específica seca máxima.....	279
5.8	Sugestões para desenvolvimentos futuros.....	280
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		282
APÊNDICE A.....		291
APÊNDICE B.....		296
APÊNDICE C.....		298
APÊNDICE D.....		302
APÊNDICE E.....		314
APÊNDICE F.....		317

1 INTRODUÇÃO

1.1 O módulo de resiliência e sua importância

Os métodos para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, como o proposto por Motta e Medina (1991), *Guide for Design of Pavement Structures* da AASHTO (1993) e *Guide For Mechanistic - Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures* (NCHRP 1-37A, 2004), recomendam que os materiais das camadas do pavimento e do subleito sejam caracterizados mecanicamente considerando o módulo de resiliência (M_R).

Além do mais, a equação fadiga empregada pelo *Asphalt Institute*¹ (1982 apud HUANG 1993) depende de ε_t (deformação horizontal de tração na face inferior camada de asfalto) que está associada, não só ao módulo de resiliência da camada asfáltica, mas também aos módulos de resiliência das camadas subjacentes e do subleito. Aliás, é possível observar através de um programa de elementos finitos, considerando-se as camadas do pavimento elásticas, que o M_R de uma camada

influencia na deformação de uma outra. Portanto, o módulo de resiliência dos materiais é importante para análise estrutural dos pavimentos rodoviários.

Outros trabalhos destacam a importância do módulo de resiliência. Huang (1993) apresenta uma metodologia de projeto para pavimento flexível, considerando, entre outras coisas, que as propriedades básicas dos materiais para o modelo estrutural, empregado na metodologia de projeto, são os módulos de resiliência da camada de asfalto, base, subbase e subleito. Além disso, as respostas do pavimento são dadas em termos de tensões e de deformações. Segundo, Qiu, Dennis e Elliot (2000), nos métodos de projeto atuais, o M_R tem sido usado para definir a contribuição do subleito nas deformações do pavimento. Kim, Buch e Park (2000) apresentam um modelo para previsão do afundamento de trilha de rodas que possui o módulo de resiliência do subleito como uma das variáveis do modelo.

1.2 Módulo de resiliência, conceito, determinação e comportamento

Basicamente, o módulo de resiliência é uma propriedade mecânica do solo. Na forma clássica, o módulo de resiliência do solo é definido pela eq. (1.1).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1.1)$$

¹ Asphalt Institute. **Thickness design - Asphalt pavements for highways and streets**, Manual Series, n. 1, [S.I.]: Asphalt Institute, 1981.

em que:

M_R = módulo de resiliência;

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio;

σ_1 = tensão axial cíclica;

σ_3 = tensão de confinamento; e

ε_r = deformação recuperável ou resiliente.

O ensaio, utilizado para obtenção do módulo de resiliência do solo, é o ensaio triaxial cíclico; entretanto, alguns autores apontam dificuldades para determinação do módulo de resiliência através deste ensaio. Elliot (1992) afirma que o número de agências, equipadas para realizar o ensaio de módulo de resiliência, numa rotina básica, é limitado. Visser, Queiroz e Hudson (1994) consideram o ensaio do módulo de resiliência sofisticado e relativamente caro. Segundo Drumm, Reeves e Madgett (1996), os ensaios triaxiais cíclicos, para determinação do módulo de resiliência, são muito complexos e demorados para serem aplicáveis na construção de bases.

A determinação alternativa do módulo de resiliência, através de relações com propriedades do solo, é permitida pelo método de dimensionamento de pavimentos da NCHRP 1-37A (2004), para os níveis 2 e 3 de dimensionamento, que correspondem respectivamente às situações relacionadas ao projeto de rodovias de tráfego pesado, onde os equipamentos de ensaios, em laboratório ou em campo, não são disponíveis; e ao projeto de rodovias de baixo volume de tráfego. Assim, existem diversas relações para avaliar o módulo de resiliência, nas quais se utilizam: os limites de consistência (LL, LP), o índice CBR, o módulo tangente inicial, os

parâmetros de ruptura do solo (ângulo de atrito e coesão) e as tensões atuantes no solo. Todavia, até então, as relações desenvolvidas, ou são restritivas, por não considerarem os solos das regiões tropicais de comportamento laterítico e não laterítico da classificação MCT, ou são de baixa eficiência.

O módulo de resiliência do solo é representado por diversos modelos descritos nos trabalhos de Hicks e Monismith (1971), Uzan (1985) e Witczak e Uzan² (1988 apud TUTUMLUER; MEIER, 1996), e que, geralmente, são baseados nas tensões atuantes no solo. Contudo, para realização de análises estruturais de pavimentos mais precisas, existe a necessidade de saber quais são os modelos mais apropriados para representar o comportamento do módulo de resiliência.

Vários fatores influenciam o comportamento do módulo de resiliência do solo, entre os quais, podem citar-se: o nível das tensões, a composição granulométrica, a umidade, a densidade e a energia de compactação. O conhecimento do comportamento do módulo de resiliência, em relação a estes fatores, coopera eficazmente para tomada de decisões na direção do êxito dos projetos de pavimentos. Diante disso, muitos trabalhos tratam dos fatores que influenciam o módulo de resiliência (Rada e Witczak, 1981; Barksdale e Itani, 1989; Mohammad, Puppala e Alavilli, 1995; Rodrigues, 1997). Contudo, ainda, poucos trabalhos direcionados ao tema tiveram como matriz os solos do interior do Estado de São Paulo (Bernucci, 1995; Carmo, 1998).

Atualmente, as redes neurais artificiais (RNAs) têm sido usadas, com frequência, para mapear funções e estabelecer relações entre variáveis explicativas e variáveis resposta em diversos tipos de problemas e áreas do conhecimento. Além disso, sabe-se que os modelos fundamentados em redes neurais artificiais têm demonstrado resultados satisfatórios no campo da Engenharia Civil (Rodgher, Fabbri e Carvalho, 1997; Shahin, Maier e Jaksa, 2002; Dyminski et al., 2006). Assim sendo, possivelmente as RNAs possam ser empregadas para estabelecer relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo.

1.3 Principais objetivos do trabalho

O objetivo principal da pesquisa é analisar o emprego das redes neurais artificiais no estudo das propriedades resilientes dos solos tropicais coletados no interior do Estado de São Paulo. Assim, deseja-se:

- a) Verificar se existe relação consistente entre o módulo de resiliência dos solos e outras propriedades de uso difundido no meio rodoviário e facilmente obtidas, tais como, granulometria, limites plásticos, teor de umidade, massa específica seca máxima, etc.
- b) Identificar quais são as propriedades dos solos que melhor se relacionam com módulo de resiliência à luz das redes neurais artificiais.

² WITCZAK, M. W.; UZAN, J. ***The universal airport pavement design system***: Granular material characterization. Report I. [S.l.]: University of Maryland Department of Civil Engineering, College Park, 1988.

1.4 Organização do trabalho

O presente trabalho foi subdividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao assunto estudado e mostra os principais objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o módulo de resiliência, os principais aspectos relacionados aos solos tropicais e as redes neurais artificiais (RNAs). Inclusive são destacadas algumas aplicações atuais das RNAs na Engenharia Civil.

O terceiro capítulo destaca as informações mais relevantes relacionadas à coleta dos materiais, aos procedimentos adotados nos ensaios, aos materiais pesquisados e às características dos equipamentos e programas utilizados para obtenção e análise de dados. Ainda são destacados os principais métodos adotados para análise dos dados.

O quarto capítulo apresenta as análises dos dados realizadas com base em gráficos, tabelas e equações, e também as discussões onde são considerados os resultados obtidos nas análises e alguns trabalhos anteriores relacionados ao tema.

O quinto capítulo traz as conclusões obtidas com o trabalho em questão e algumas propostas para trabalhos futuros. Em seguida, ao final da tese, apresentam-se as referências bibliográficas e os apêndices A, B, C, D, E e F.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo deste capítulo, apresentam-se diversos fatores que influenciam no módulo de resiliência dos solos, dentre esses: o nível das tensões, a composição granulométrica, o teor de umidade, a densidade e a energia de compactação. Ainda, destacam-se algumas relações matemáticas do módulo de resiliência com os limites de consistência (LL, LP), o índice CBR, o módulo tangente inicial e os parâmetros de ruptura do solo (ângulo de atrito e coesão). Além disso, são mostradas as principais características dos solos tropicais lateríticos e saprolíticos, encontrados freqüentemente no interior do Estado de São Paulo. Na parte final do capítulo, é feito um levantamento envolvendo os principais aspectos relacionados à teoria das redes neurais artificiais (estrutura do neurônio artificial, tipos de redes, arquitetura de redes, algoritmo *backpropagation*, erro médio de treinamento, momento e taxa de aprendizagem). Também são apresentadas diversas aplicações das redes neurais no campo da engenharia.

2.1 O módulo de resiliência e as tensões

Pode-se constatar, tanto no *Guide for Design of Pavement Structures* da AASHTO (1986) como no *Guide For Mechanistic - Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures* (NCHRP 1-37A, 2004), que o módulo de resiliência é influenciado pelo estado de tensão atuante no solo. Tal constatação é ratificada pelos resultados de experimentos apresentados nos trabalhos de Mota, Aranovich e Cerrati (1985), Jorenby e Hicks (1986) e Drumm, Poku e Pierce (1990).

Geralmente, o módulo de resiliência apresenta um comportamento não linear com a variação do estado de tensão atuante no solo (Hicks e Monismith 1971; Uzan 1985). As mudanças do estado de tensão podem ser atribuídas a diversas causas, entre elas: carregamentos externos, alterações das espessuras das seções transversais das camadas e diferenças do peso específico dos materiais das camadas do pavimento.

Há vários modelos para representar o comportamento do módulo de resiliência em função das tensões atuantes no solo. Uma das características desses modelos é a necessidade dos resultados do ensaio triaxial cíclico para serem calibrados (determinação das suas constantes de regressão). Ultimamente, coincidindo com avanço da computação eletrônica, têm surgido modelos mais sofisticados com mais componentes de tensão e maior número de constantes de regressão.

Os primeiros modelos usados para representar o módulo de resiliência foram apresentados por Hicks e Monismith (1971). Nesses modelos, o módulo de resiliência dos materiais granulares (grossos) relacionava-se com a tensão confinamento ou com a soma das tensões principais (primeiro invariante de tensão) de acordo as eq. (2.1) e eq. (2.2) respectivamente.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (2.1)$$

ou

$$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (2.2)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência;

k_1 e k_2 = constantes de regressão do modelo obtidas com os resultados do ensaio triaxial cíclico;

σ_3 = tensão de confinamento; e

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão.

Percebe-se, na eq. (2.1), que o módulo de resiliência se relaciona de forma não linear com a tensão de confinamento a qual no ensaio triaxial cíclico não é responsável diretamente pelo cisalhamento ou pela geração de deformações angulares no material.

Uzan (1985) apresentou um modelo, eq. (2.3), que levava em conta a tensão de desvio e buscava considerar as tensões cisalhantes atuantes no solo. Ele concluiu que o modelo apresentava boa concordância com o comportamento dos materiais granulares.

$$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2.3)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência;

k_1 , k_2 e k_3 = constantes de regressão do modelo;

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio;

$\sigma_d > 0,1 \cdot \sigma_3$; e

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão.

Witczak e Uzan¹ (1988 apud TUTUMLUER; MEIER, 1996) desenvolveram um modelo considerando o primeiro invariante e a tensão cisalhante octaédrica, eq. (2.4).

$$\frac{M_R}{Pa} = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{k_3} \quad (2.4)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência;

k_1 , k_2 e k_3 = constantes de regressão do modelo;

Pa = pressão atmosférica;

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica; e

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica, eq. (2.5).

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{3} \quad (2.5)$$

no caso de ensaio triaxial $\sigma_2 = \sigma_3$ e como $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, tem-se:

$$\tau_{oct} = \sigma_d \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \quad (2.6)$$

A eq. (2.4) guarda semelhança com a eq. (2.3), pois ambas apresentam a tensão volumétrica e também a tensão de desvio. O modelo da eq. (2.4) possui o primeiro invariante de tensão que se relaciona, muitas vezes, às deformações volumétricas e contém a tensão cisalhante octaédrica, responsável pelas deformações angulares ou distorções atuantes no plano octaédrico². Para Witczak, Qi e Mirza (1995) o modelo, eq. (2.4), é uma combinação de relações não lineares para materiais de granulometria grossa e de granulometria fina, pois isso é realizado por meio da incorporação das tensões volumétrica (θ) e de desvio dentro do modelo.

Um outro modelo, eq. (2.7), encontrado na literatura que recebe a designação de modelo combinado (ou composto), propõe que o módulo de resiliência depende da tensão de confinamento e da tensão de desvio.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2.7)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência;

k_1 , k_2 e k_3 = constantes de regressão do modelo;

σ_3 = tensão de confinamento; e

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio.

¹ WITCZAK, M. W.; UZAN, J. **The universal airport pavement design system**: Granular material characterization. Report I. [S.l.]: University of Maryland Department of Civil Engineering, College Park, 1988.

² **Plano octaédrico**: é um plano localizado no interior do paralelepípedo espacial imaginário que é perpendicular ao eixo que atua a tensão normal octaédrica.

2.2 O módulo de resiliência e a composição granulométrica

A influência da composição granulométrica dos solos no módulo de resiliência tem sido investigada já há algum tempo. De acordo com Hicks e Monismith (1971), o módulo de resiliência é influenciado pela porcentagem de material que passa na peneira de número 200. Segundo Visser, Queiroz e Hudson (1994), certas areias naturais têm o módulo de resiliência consideravelmente mais elevado do que os solos argilosos.

Resultados apresentados no trabalho Rodrigues (1997) indicaram que, na umidade ótima e em diferentes níveis de tensão de desvio, sempre o solo mais arenoso (A-2-6) apresentava módulos de resiliência mais elevados do que um solo mais argiloso (A-4). A diferença entre os módulos de resiliência dos dois materiais considerados chegou a 100%.

Jorenby e Hicks (1986) avaliaram o comportamento do módulo de resiliência, quanto à influência da adição de material fino em um agregado granular usado para base, um agregado britado de rocha ígnea intrusiva, cuja granulometria é apresentada na Tabela 2.1. O material selecionado para ser adicionado como fino foi um solo argiloso de baixa plasticidade de subleito (A-7-6, LL = 45,3%, LP = 22,9% e com 90,2% passando na peneira N.º 200), e as porcentagens de material fino de 2, 4, 6, 8 e 19,5% foram usadas para compor as misturas compactadas em torno de 95% da densidade máxima.

Tabela 2.1 - Composição granulométrica do agregado britado da rocha ígnea intrusiva

Peneira		Granulometria (% passando)
1 in.	(25,0 mm)	100,0
3/4 in.	(19,0 mm)	84,0
1/2 in.	(12,5 mm)	74,0
3/8 in.	(9,38 mm)	64,5
N.º 4	(4,75 mm)	48,0
N.º 8	(2,36 mm)	36,0
N.º 30	(0,600 mm)	21,5
N.º 100	(0,150 mm)	8,5
N.º 200	(0,075 mm)	5,5

Fonte: Jorenby e Hicks (1986)

Os resultados obtidos por Jorenby e Hicks (1986), apresentados na Figura 2.1, apontaram que o módulo de resiliência da mistura aumentava com o acréscimo da porcentagem de finos adicionada ao agregado britado, até um valor máximo do módulo de resiliência que ocorre para 6% de material fino. Além disso, para mistura com um acréscimo de finos de 8%, observou-se uma queda significativa do módulo de resiliência. Deste modo, os autores toleraram a adição de até 6% de materiais finos acima da que o material possui (5,5%).

Figura 2.1 - Variação do módulo de resiliência com adição de finos em um agregado britado de rocha ígnea (Fonte: JORENBY; HICKS, 1986)

Barksdale e Itani (1989) pesquisaram cinco tipos materiais (gnaisse-granítico, cascalho, folhelho, quartzito e calcário) quanto ao comportamento para base de pavimentos. No estudo, consideraram-se três granulometrias: grossa, média e fina, apresentadas na Tabela 2.2. Quanto à preparação das amostras, aplicou-se a compactação por vibração, na energia modificada para seis camadas de material.

Para o solo tipo gnaisse-granítico, constatou-se que o módulo de resiliência diminuiu cerca de 60%, quando a composição granulométrica se tornou mais fina (com o aumento da quantidade de finos de 0 para 10%). Na Figura 2.2, destaca-se a

influência da composição granulométrica no módulo de resiliência do solo tipo gnaisse-granítico.

Tabela 2.2 - As composições granulométricas consideradas no estudo dos materiais para base

Graduação	Distribuição granulométrica					
	Percentagem passando					
	1,5 in	3/4 in	3/8 in	N.º 4	N.º 40	N.º 200
Grossa	100	65	43	27	7	0
Média	100	80	60	45	13	4
Fina	100	85	70	58	25	10

Fonte: Barksdale e Itani (1989)

Figura 2.2 - Influência da composição granulométrica no M_R de resiliência material gnaisse-granítico (Fonte: BARKSDALE; ITANI, 1989)

2.3 O módulo de resiliência e a umidade do material

É importante avaliar a influência da água sob o valor do módulo de resiliência dos materiais da base, subbase e subleito, pois a diminuição dos módulos de resiliência dessas camadas contribui para o surgimento de deformações excessivas de tração, na parte inferior da camada de asfalto, favorecendo o aparecimento de trincas de fadiga. Assim sendo, a seguir, são apresentados diversos estudos relacionados à influência do teor de umidade no valor do módulo de resiliência dos solos.

2.3.1 Variações do módulo de resiliência com a umidade do material

Elliott e Thornton (1988) avaliaram a influencia do teor de umidade na estimativa do módulo de resiliência de um solo fino do Estado do Arkansas (EUA) para diferentes tensões de confinamento (0, 21 e 42 kPa). A Tabela 2.3 apresenta as principais características do solo utilizado no estudo.

A Figura 2.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio com o solo fino do Arkansas. Verifica-se que o módulo de resiliência diminui com o aumento do teor de umidade. E mais, o efeito da tensão de confinamento tende a diminuir com o aumento do teor de umidade.

Tabela 2.3 - As características do solo fino do Estado do Arkansas (EUA) utilizado no trabalho

Identificação do solo	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W_{ot} (%)	LL (%)	IP (%)	Granulometria (% passando)				
					N.º 4	N.º 10	N.º 40	N.º 80	N.º 200
Jackport	1,508	20	55	34	100	97	92	89	70

Fonte: Elliott e Thornton (1988)

Figura 2.3 - Variação do módulo de resiliência de um solo fino do Arkansas com o teor de umidade (Fonte: ELLIOTT; THORNTON, 1988)

Para estudar o efeito do teor de umidade sobre o módulo de resiliência, Mohammad, Puppala e Alavilli (1995) utilizaram uma argila siltosa (A-7-6) e uma areia fina (A-3), ainda, corpos-de-prova compactados na energia normal e em três níveis de umidade diferentes (abaixo e acima do W_{ot} e próximo do W_{ot}).

A Figura 2.4 mostra a variação do módulo de resiliência com o teor de umidade para ensaios realizados com o solo argiloso siltoso em uma tensão de confinamento de 42 kPa. Verifica-se, nesta figura, que os valores dos módulos de resiliência decrescem consideravelmente com o acréscimo da umidade.

Mohammad, Puppala e Alavilli (1995) atribuíram o efeito da diminuição do módulo de resiliência com a umidade ao aumento da pressão neutra positiva com o acréscimo do teor de umidade, pois os valores mais altos da pressão neutra diminuem a tensão efetiva e a resistência ao cisalhamento dos corpos-de-prova de argila, resultando em um módulo de resiliência menor.

Figura 2.4 - Variação do M_R com o teor de umidade para solo argiloso siltoso tipo A-7-6 (Fonte: Modificada de MOHAMMAD; PUPPALA; ALAVILLI, 1995)

A variação do módulo de resiliência com o teor de umidade para o solo arenoso fino (A-3), considerando-se tensões de confinamento de 21, 70 e 140 kPa, é apresentada na Figura 2.5.

Constata-se, a partir da Figura 2.5, que o valor do módulo de resiliência cresce com o aumento da tensão de confinamento, independentemente dos teores de umidade empregados na pesquisa. Também é possível notar que a tensão de desvio contribui para um pequeno aumento do módulo de resiliência; contudo, a tensão de desvio tem influência menor, quando comparada com a tensão de confinamento. Para o solo em questão, algumas vezes, os valores dos módulos de resiliência, nas condições de umidade abaixo e acima do W_{ot} , foram ligeiramente maiores que no teor de umidade próximo ao W_{ot} .

Segundo Mohammad, Puppala e Alavilli (1995), o fato de o módulo de resiliência ser maior, para condição de solo mais seco, concorda com o divulgado por outras pesquisas. Contudo, considerando-se os resultados dos experimentos, apresentados na Figura 2.5, observou-se que o solo mais úmido (acima do W_{ot}) apresentou valores do módulo de resiliência maiores do que no teor de umidade próximo ao W_{ot} ; entretanto, para os autores, esse comportamento não seguiu uma tendência consistente, possivelmente por causa dos problemas de vazamentos, durante os ensaios dos corpos-de-prova com umidade acima do W_{ot} . Eles concluíram ainda que a variação total entre os resultados, para todos os três níveis de teores de umidade, foi insignificante e causado provavelmente pela pequena variação do grau de compactação.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5, percebe-se que a influência do teor de umidade; no módulo de resiliência, é mais evidente no solo argiloso (A-7-6) que no solo arenoso (A-3).

Figura 2.5 - Variação do M_R com a umidade em um solo arenoso tipo A-3
(Fonte: Modificada de MOHAMMAD; PUPPALA; ALAVILLI, 1995)

Outros trabalhos abordam os efeitos da variação da umidade no módulo de resiliência. Thadkamalla e George (1995) investigaram o efeito da saturação (quanto ao grau e tipo de saturação) no valor do módulo de resiliência de amostras de solos de subleito compactadas no laboratório. Rodrigues (1997) estudou a Influência da umidade nos valores dos módulos de resiliência de materiais típicos do subleito de pavimentos do Estado do Rio Grande do Sul. Muhanna, Rahman e Lambe (1999) avaliaram o efeito da elevação da umidade pós-compactação sob o valor do módulo de resiliência, em amostras compactadas por impacto e por amassamento. Janoo e Shepherd (2000) estudaram os efeitos da variação da umidade, *in situ*, sobre o módulo de resiliência do subleito de pavimentos do Estado de Montana (EUA).

2.3.2 O módulo de resiliência e teor de umidade *in situ* no Brasil

Sabe-se que abaixo do lençol freático, o solo se encontra saturado. Acima, em região próxima ao lençol, o solo ainda está saturado por capilaridade³ e, um pouco mais acima, ele está não saturado. Além disso, nos projetos de pavimentação, recomenda-se manter o nível do lençol freático a pelo menos 1,5 m do greide, pois, a essa profundidade, as tensões, advindas das rodas dos veículos pesados, são muito baixas, não ocasionando danos nesta região menos resistente.

³ **Capilaridade:** propriedade que os líquidos apresentam de atingirem, em tubos de pequeno diâmetro, pontos acima do nível freático.

No Brasil, de acordo com Medina (1997a) a temperatura média anual está entre 22 e 28 °C, sendo que apenas em 6% do território, no Sul, fica entre 14 e 18 °C. A média das máximas esta entre 30 e 36 °C, exceto nos planaltos do sul, onde se situa entre 24 e 29 °C. O mês mais quente é janeiro no sudoeste e sul, novembro no nordeste e setembro ou outubro no Norte e Centro Oeste. Deste modo, predominam as temperaturas altas em todo o país, apenas no Sul e Parte do Sudoeste (de altitude) a temperatura mínima absoluta do ar atinge 0 °C ou menos, contudo não mais de 15 dias no ano.

Alguns autores propõem teores de umidades para serem utilizados na avaliação dos módulos de resiliência dos materiais dos pavimentos. Motta e Medina (1991) propuseram que os materiais, no Brasil, fossem caracterizados quanto às deformações resilientes e permanentes na umidade ótima e massa específica seca máxima correspondentes à energia adequada à camada considerada. Contudo, mencionou-se que nas poucas partes do Brasil onde predominam o clima superúmido seria conveniente fazer uma verificação do possível efeito da variação da umidade nas características elásticas dos materiais. Além disso, destacou-se que na Região Norte seria necessário fazer algumas verificações adicionais, porque a Região Norte, até então, não tinha feito parte de nenhuma das pesquisas rodoviárias efetuadas com vistas ao levantamento das condições de umidade.

Segundo Medina (1997b), para subleitos, subbases e bases é bastante claro que a despeito de elevadas precipitações pluviométricas anuais (variando entre 1250 a 2500 mm, com um máximo de 4400 mm na cadeia de montanhas à leste de São Paulo, e um mínimo de 500 mm em uma pequena área do nordeste), o teor de

umidade de equilíbrio⁴ é geralmente próximo ao teor de umidade ótimo ou abaixo dele. Finalmente, conclui-se que teor de umidade de equilíbrio dos solos do subleito em regiões tropicais pode ser comparado ao teor umidade ótimo do ensaio de Proctor, portanto este deveria ser o teor de umidade usado quando compactar corpos-de-prova para o ensaio triaxial cíclico.

Outros trabalhos relatam que os teores de umidade *in situ* da base e subleito, nas regiões tropicais, tendem a ser inferiores ou iguais ao teor de umidade ótimo.

De acordo com o *Road note 31*⁵ (1977 apud Medina 1997a), na maioria dos países tropicais, se a drenagem for adequada do ponto de vista de engenharia, raramente o teor de umidade do subleito é superior ao teor ótimo obtido no ensaio de compactação. Na verdade, os subleitos são em geral mais secos e mais resistentes do que nos países temperados.

No Estado de São Paulo, Villibor (1981) analisou bases de pavimentos construídas com solos arenosos finos lateríticos, em várias rodovias, quanto à diferença existente entre o teor de umidade *in situ* e o teor ótimo determinado em energia intermediária, no laboratório. Os solos da pesquisa, ensaiados no laboratório, foram obtidos das jazidas utilizadas na construção das bases. Contudo, as determinações dos teores de umidade, *in situ*, foram feitas para trechos na fase de construção e após a sua abertura ao tráfego.

⁴ **Teor de umidade de equilíbrio (TUE):** é o teor de umidade atingido depois da construção do pavimento e que está em equilíbrio com o meio ambiente (Fonte: THADKAMALLA; GEORGE, 1995)

Os ensaios de campo foram executados, considerando a metade superior (0,0 a 7,5 cm) e a metade inferior (7,5 a 15,0 cm) das bases. Desta forma, após a realização de 179 determinações na metade superior e de 172 determinações na metade inferior do teor de umidade *in situ*, concluiu-se que:

- a) Os teores de umidade das camadas de base, medidos *in situ*, estão no intervalo de 55 a 110% da umidade ótima;
- b) Na metade superior da base, aproximadamente 90% dos trechos estudados apresentaram umidade *in situ* menor do que a ótima.

Finalmente, Villibor (1981) conclui que geralmente as umidades de trabalho da base se encontram abaixo da umidade ótima de laboratório para a energia intermediária, mesmo em períodos de chuva.

Uma pesquisa relacionada à avaliação estrutural de pavimentos, realizada pelo IPR/DNER, relatada por Medina, Motta e Ceratti (1986), verificou que em 53 trechos experimentais situados nas regiões Sul, Sudeste, e Nordeste, ocorreu pouca variação na umidade da base, a qual permaneceu, quase sempre abaixo do teor ótimo de compactação.

⁵ TRANSPORTATION AND ROAD RESEARCH LABORATORY (1977) ***A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries***. Road Note 31. 3. ed. Londres

2.4 O módulo de resiliência e o processo de compactação

A energia mecânica, aplicada ao solo no processo de compactação, contribui para expulsão do ar dos poros do solo, com isso ocorre a diminuição do índice de vazios e o aumento da densidade. A compactação promove o aumento da resistência ao cisalhamento do solo e a diminuição da sua permeabilidade. A importância do processo de compactação, na construção de rodovias, torna indispensável a avaliação da influência desse processo sobre o módulo de resiliência.

O processo de compactação do solo envolve várias partes: a densidade, a energia de compactação, o tipo de compactação e a umidade. Portanto, neste tópico, conduz-se uma revisão bibliográfica, abordando a influência do processo de compactação no módulo de resiliência, enfatizando-se, separadamente, cada uma das partes do conjunto que compõe o processo de compactação, exceto a influência da umidade que já foi comentada anteriormente.

2.4.1 O módulo de resiliência e a densidade

Hicks e Monismith (1971) estudaram a influência da densidade no módulo de resiliência. No estudo, foram utilizados dois materiais para base: Um cascalho bem graduado parcialmente britado e uma pedra britada bem graduada. Também foram

considerados três níveis granulométricos (grosso, médio e fino) e diferentes densidades. Eles verificaram que, para o cascalho parcialmente britado e bem graduado, o módulo de resiliência aumentava com o acréscimo da densidade relativa; além disso, o efeito da densidade sobre o módulo de resiliência diminuía, quando a porcentagem de finos aumentava. Contudo, para brita bem graduada, a densidade teve pequena influência sobre o módulo de resiliência.

Rada e Witczak (1981) avaliaram seis categorias de materiais granulares (areias siltosas, cascalhos arenosos, misturas de areias com outros agregados, pedra britada, calcários e escórias de siderurgia) e relataram que o aumento da densidade faz aumentar o módulo de resiliência.

Pesquisando um material para base, agregado granular gnaisse-granítico, Barksdale e Itani (1989) verificaram que, com o acréscimo da densidade do material, de 95 para 100%, o módulo de resiliência aumentou, de 50 a 160%, considerando-se um baixo nível de tensão volumétrica correspondente a 69 kN/m^2 . Contudo, para um valor elevado de tensão volumétrica, 690 kN/m^2 , o efeito do acréscimo da densidade foi menor. O módulo de resiliência aumentou em torno de 15 a 25%.

2.4.2 O módulo de resiliência e a energia de compactação

Uma parte importante do projeto de pavimentos é a escolha das energias de compactação, empregadas para o melhoramento do subleito e para construção das camadas de reforço do subleito, subbase e base. Para selecionar uma energia de compactação, é conveniente encontrar a energia que gere o menor custo de construção e forneça um material de qualidade (material que tenha um módulo de resiliência satisfatório às condições de projeto e evite recalques indesejáveis).

No Brasil, as principais energias utilizadas na compactação por impacto ou dinâmica são: Normal, intermediária e molificada. Existem diversos procedimentos que tratam da energia de compactação, mais adequada à camada do pavimento. Pode citar-se, para bases estabilizadas granulometricamente, a DNER-ES 303/97 (1997); para regularização⁶ do subleito de pavimentos, a DNER-ES 299/97 (1997) e, para construção da camada de reforço do subleito, a DNER-ES 300/97 (1997).

De acordo com Mohammad, Puppala e Alavilli (1995), o subleito das estradas é, geralmente, executado próximo à combinação da massa específica seca máxima e ao teor de unidade ótimo correspondentes a energia normal do ensaio de compactação de Proctor.

⁶ **Regularização:** operação destinada a conformar o leito estradal, quando for necessário, transversal e longitudinalmente, compreendendo cortes e aterros até 20 cm de espessura e de acordo com os perfis transversais e longitudinais indicados no projeto (DNER-ES 299/97, 1997).

Em um trabalho, que reuniu resultados de ensaios de dez agências de pesquisa, Rada e Witczak (1981) investigaram o efeito da energia de compactação, nos valores dos módulos de resiliência, para vários tipos materiais granulares. Na condução do estudo, eles representaram cada categoria de agregado por um par de valores k_1 (médio) e k_2 (médio), sendo k_1 e k_2 constantes de um modelo do módulo de resiliência (M_R), eq. (2.8).

$$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (2.8)$$

em que:

k_1 e k_2 = constantes de regressão do modelo; e

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão.

Nas análises, utilizaram-se três níveis de energias de compactação: Baixa ($E_C = 2.200 \text{ ft.lb/ft}^3$), normal ($E_C = 12.300 \text{ ft.lb/ft}^3$) e modificada ($E_C = 56.200 \text{ ft.lb/ft}^3$). Rada e Witczak (1981) verificaram que para maioria dos materiais, o valor de k_1 (médio) aumentava com a elevação do nível da energia (E_C) e os valores de k_2 (médio) permaneciam praticamente constantes entre os níveis de energia normal e modificada. Concluíram também que a influência da energia de compactação no melhoramento do módulo de resiliência, em termos de k_1 , não pode ser ignorada.

Pode-se constatar, a partir trabalho de Rada e Witczak (1981), que o módulo de resiliência tende aumentar com a energia de compactação, pois o aumento de k_1 , com a energia de compactação implica o acréscimo do módulo de resiliência. A Figura 2.6 ilustra a variação dos valores de k_1 (médio) e k_2 (médio) de vários agregados em função da energia de compactação.

Figura 2.6 - Variação de k_1 (médio) e de k_2 (médio) dos agregados em função da energia de compactação (Fonte: RADA; WITCZAK, 1981)

Outros estudos apontam que a elevação do nível da energia de compactação causa o aumento do módulo de resiliência dos solos. Resultados apresentados por Bernucci (1995) e, também por Carmo (1998) mostraram que o módulo de resiliência de um solo A-2-4 e LA', laterítico arenosos, aumentou significativamente, com o acréscimo da energia de compactação; e que esse incremento foi mais acentuado com o aumento da tensão de confinamento.

2.4.3 O módulo de resiliência e o tipo de compactação

De acordo com Lambe e Whitman (1979), há vários tipos de ensaios de compactação realizados em laboratório. Cada um é escolhido com o propósito de reproduzir algum método de compactação executada no campo. Geralmente, as curvas de compactação dos ensaios de laboratório fornecem teores de umidade ótimos mais baixos que os teores de umidade ótimos de campo. Contudo, através da variação do procedimento de compactação de laboratório, a relação umidade-massa específica pode ser mudada para melhorar a correlação com o procedimento de compactação de campo. Além disso, controla-se a maioria das compactações de campo através do ensaio de laboratório de compactação por impacto.

Os principais tipos de compactação, utilizados nos laboratórios, e suas características são descritos a seguir.

i) **Compactação dinâmica ou por impacto:** Paulatinamente, em camadas, coloca-se o solo no molde. Assim sendo, ao longo do processo de compactação, cada camada de material recebe um número específico de golpes, aplicados com um soquete, até o preenchimento do molde. Além disso, observa-se que as camadas devem possuir alturas aproximadamente iguais.

ii) **Compactação de amassamento:** De camada em camada, preenche-se o molde do corpo-de-prova com o solo. Nesse procedimento, é importante observar que cada camada depositada é empurrada, um número preestabelecido de vezes, com um

amassador em uma pressão específica. A AASHTO T307-99 recomenda a utilização de cinco camadas de igual massa na moldagem dos corpos-de-prova.

iii) **Compactação estática:** O solo é depositado no molde e, posteriormente, submetido a uma pressão estática. Geralmente, compacta-se o corpo-de-prova com três ou cinco camadas de solo de igual massa.

iv) **Compactação vibratória:** O corpo-de-prova é construído em camadas de solo de mesma massa. Ainda, cada camada de solo depositada no molde é coberta previamente com a cabeça de um vibrador que aplica a vibração, até quando seja alcançada uma altura preestabelecida para camada.

Zaman, Chen e Laguros (1994) estudaram a influência do tipo de compactação no módulo de resiliência de um agregado calcário, encontrado no Estado de Oklahoma (EUA), empregado na construção de camadas de subbase e base. No estudo, foram considerados dois tipos de compactação (vibração e impacto); corpos-de-prova com dimensões diferentes (os menores com 10,16 cm x 23,5 cm, e os maiores com 15,24 cm x 30,48 cm) e a energia modificada (55.986 ft.lb/ft³) de compactação. Constatou-se que os corpos-de-prova de 10,16 cm diâmetro compactados por impacto apresentam módulos de resiliência maiores do que aqueles compactados por vibração. Para corpos-de-prova de 15,24 cm o tipo de compactação teve efeito mínimo no módulo de resiliência.

Para avaliar a influência do tipo de compactação no valor do módulo de resiliência Muhanna, Rahman e Lambe (1999) utilizaram um solo A-6 e um solo A-5 comumente encontrados no Estado da Carolina do Norte (EUA) e compactações por amassamento e por impacto. Tanto para o solo A-6 como para o solo A-5, os tipos de compactação, por amassamento e por impacto, não influenciaram no valor do módulo de resiliência; mesmo para níveis diferentes de tensão de desvio.

2.5 Relações usadas para avaliação do módulo de resiliência

Neste tópico são apresentadas diversas relações entre módulo de resiliência e outras propriedades dos solos e também considerações quanto à consistência teórica das relações que levam em conta o comportamento mecânico dos materiais e os resultados de trabalhos que analisaram o módulo de resiliência dos materiais (Hicks e Monismith, 1971; Jorenby e Hicks, 1986; Barksdale e Itani, 1989). Convém observar que apenas duas das relações, apresentadas (Visser, Queiroz e Hudson, 1994; Parreira et al. 1998), foram desenvolvidas com solos de regiões tropicais, contudo apresentaram baixos coeficientes de determinação.

2.5.1 Relações do módulo de resiliência que não consideram tensões

As primeiras relações desenvolvidas com o módulo de resiliência utilizavam apenas o índice CBR, devido à utilização desse índice nos projetos, à familiarização dos engenheiros com o índice e à facilidade para obtê-lo. Para Witczak, Qi e Mirza (1995), as relações, envolvendo apenas o CBR e o M_R do material, representam a primeira ligação entre a caracterização empírica e racional dos materiais.

Para Helkelom e Foster (1960), a razão entre a deformação plástica e elástica variava para os diversos tipos solos, de modo que uma relação entre M_R e CBR apresentava uma dispersão considerável. Os autores verificaram que o coeficiente de relação entre M_R e CBR variou entre os limites de 50 e 200, aproximadamente, e que o valor médio do coeficiente da relação era 110 o que correspondia à relação representada pela eq. (2.9).

$$M_R = 110.CBR \quad (2.9)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência (kgf/cm^2); e

CBR = índice de suporte Califórnia (%).

A relação de Helkelom e Foster (1960) foi uma das primeiras a tentar relacionar o módulo de resiliência e o CBR. Ela tem, como característica peculiar, a variação linear do M_R com o CBR, assim sendo, ela é limitada por não considerar a o comportamento não linear do módulo de resiliência.

Uma outra relação, correspondente à eq. (2.10), que não considera o estado de tensão atuante no solo é a de Green e Hall⁷ (1975 apud WITCZAK; QI; MIRZA, 1995). Uma de suas principais características é uma variação exponencial do módulo de resiliência com o índice CBR.

$$M_R = 5409.CBR^{0,711} \quad (2.10)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência (psi); e

CBR = índice de suporte Califórnia (%).

As relações, envolvendo o módulo de resiliência e o índice CBR, que não consideram o estado de tensões atuante no solo foram criticadas. Segundo Rada e Witczak (1981), pelo fato de o ensaio de M_R depender da tensão, o coeficiente que relaciona o M_R e o CBR deve ser dependente da tensão que é variável, portanto as relações que não consideram o estado de tensão atuante no material são limitadas.

O fato de essas equações pioneiras que relacionam o módulo de resiliência as propriedades do solo não considerarem a composição granulométrica (ou granulometria) do solo também pode ser encarado como uma deficiência da relação, pois alguns trabalhos (Jorenby e Hicks, 1986; Barksdale e Itani, 1989) demonstram que a relação entre o módulo de resiliência e a granulometria é efetiva.

⁷ GREEN, J. L.; HALL, J. W. Jr. *Nondestructive vibratory testing of airport pavements: experimental test results and development of evaluation methodology and procedure*. Washington D.C.: [s.n], 1975.

2.5.2 Relações do módulo de resiliência que consideram tensões

Rada e Witczak (1981) estudaram muitos materiais grossos (areias siltosas, cascalhos arenosos, misturas arenosas incluindo cascalhos britados, pedras britadas, calcários e escórias de siderúrgicas) e apresentaram uma relação entre o módulo de resiliência e o CBR e com a tensão volumétrica cuja formulação corresponde a eq. (2.11).

$$M_R = (490 \cdot \log \theta - 243) \cdot \text{CBR} \quad (2.11)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência (psi);

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = primeiro invariante de tensão (psi); e

CBR = índice de suporte Califórnia (%).

Relacionar um índice empírico, CBR, com ao módulo de resiliência parece não ser adequado, pois, tem-se de um lado um índice empírico que não leva em conta a variação do estado de tensões e do outro, uma propriedade mecânica elástica que, na maioria das vezes, depende do estado de tensões. É possível que o mais correto seja relacionar o módulo de resiliência com outra propriedade mecânica do solo associada às deformações elásticas, como, por exemplo, módulo tangente inicial, e também agrupar na relação uma ou mais tensões atuantes no solo. Além disso, de acordo com Ruiz⁸ (1964 apud Parreira et al., 1998) já se observou que o módulo tangente inicial obtido a partir de curva de tensão versus deformação guarda uma estreita relação com o módulo dinâmico.

Zaman, Chen e Laguros (1994) desenvolveram uma relação do módulo de resiliência, eq. (2.12), e a testaram em seis materiais grossos, oriundos de pedreiras e empregados na construção de bases e subbases de pavimentos no Estado de Oklahoma (EUA). A Tabela 2.4 mostra os tipos de agregados utilizados no trabalho, as localizações, os parâmetros de ruptura dos materiais (c e ϕ), as massas específicas secas máximas ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e os valores de R^2 resultantes das avaliações feitas com eq. (2.12).

$$M_R = 2860,94 + 275.c + 128.\sigma_1.tg\phi + 118.\theta \quad (2.12)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência (psi);

c = coesão (psi);

σ_1 = tensão principal maior (psi);

ϕ = ângulo de atrito (graus); e

θ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão (psi).

Tabela 2.4 - Os tipos de agregados componentes do trabalho, as localizações, os parâmetros de ruptura, as massas específicas secas máximas e os R^2 resultantes das avaliações feitas com eq. (2.12)

Local	Tipo de agregado	c (psi)	ϕ (graus)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	R^2
Comanche	Calcário	18	41	2,40	0,734
Cherokee	Calcário	14	45	2,39	0,512
Creek	Calcário	18	43	2,42	0,836
Choctaw	Arenito	12	46	2,35	0,541
Johnston	Granito	11	46	2,34	0,735
Murray	Riólito	16	46	2,40	0,861

Fonte: Zaman, Chen e Laguros (1994)

Quando se relacionar uma propriedade elástica, módulo de resiliência, com os parâmetros de ruptura do solo, coesão e ângulo de atrito, associam-se duas coisas conceitualmente diferentes; portanto esse fato pode ter contribuído para a relação apresentar muitos valores de R^2 abaixo de 0,8 (Tabela 2.4). Contudo, a formulação da eq (2.12) considera a tensão volumétrica para materiais grossos; o que está em consonância com Hicks e Monismith (1971) e com Uzan (1985). Todavia ela não leva em conta a composição granulométrica (ou granulometria) do solo que de acordo com os trabalhos de Jorenby e Hicks (1986) e de Barksdale e Itani (1989) exerce influência no módulo de resiliência.

Considerando os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos realizados com amostras de solos extraídas do subleito de pavimentos da região central do Brasil (Goiás, Minas Gerais e São Paulo), Visser, Queiroz e Hudson (1994) conceberam uma relação, com $R^2 = 0,64$, para avaliar o módulo de resiliência de solos arenosos a qual é representada pela eq. (2.13).

$$\text{Log } M_R = 2,79 + 0,0268.LL - 0,0573.LP - 0,000158.LP.\sigma_d \quad (2.13)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência (MPa);

LL = limite de liquidez (%);

LP = limite de plasticidade (%); e

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio (kPa).

⁸ Ruiz, C. L. **Presentación y comentarios sobre los diagramas shell 1963 para el diseño de pavimentos flexibles**. La Plata, Argentina: DVBA, Ministerio de Obras Publicas, 1964.

O fato de a eq. (2.13) não fornecer um R^2 maior pode estar relacionado à utilização dos índices de consistência LL e LP. Pois os índices LL e LP estão relacionados à plasticidade do solo, enquanto o módulo de resiliência está relacionado à elasticidade do solo. Além disso, o baixo valor de R^2 pode estar relacionado a outras causas, pois a formulação da equação não leva em conta nem a tensão volumétrica, nem a granulometria do material as quais, como é sabido, exercem influencia no módulo de resiliência dos materiais arenosos.

Parreira et al. (1998) realizaram um estudo, na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), com solos arenosos (em sua maioria A-2-4 e LA') provenientes dos Estados do Ceará, Paraíba, Piauí e São Paulo. Inclusive, desenvolveram uma relação, eq. (2.14), que forneceu um R^2 de 0,82. Ainda, na relação em questão, o módulo tangente inicial é aferido através do ensaio de compressão simples.

$$M_R = 0,8481.E_o^{0,4559} + 1,1472.\theta^{0,8630} \quad (2.14)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência (MPa);

E_o = módulo tangente inicial (kPa); e

θ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão (kPa).

Há indícios na relação da eq. (2.14) que apontam um caminho promissor para futuras relações do módulo de resiliência. O fato de os materiais, empregados no desenvolvimento da relação, pertencerem à mesma faixa granulométrica (areia), terem comportamento laterítico (pela classificação MCT) e serem majoritários do grupo (A-2-4), impôs uma elevada seletividade no desenvolvimento da relação que

colaborou para aumentar o coeficiente de determinação. Ainda, Verificam-se duas consistências teóricas na estrutura da relação; a tensão volumétrica foi utilizada quando se trabalhou com materiais arenosos, corroborando com Hicks e Monismith (1971) e Uzan (1985); e duas propriedades mecânicas de natureza elástica foram relacionadas (módulo de resiliência e módulo tangente inicial). Contudo, observa-se na formulação da eq. (2.14) que a granulometria do material não foi levada em conta em materiais grossos o que não está de acordo com os trabalhos apresentados por Jorenby e Hicks (1986) e por Barksdale e Itani (1989).

Finalmente, destacam-se as relações propostas pelo o *Guide for Design of Pavement Structures* AASHTO (1986) para materiais de base e de subbase. Para o método de dimensionamento em questão, utiliza-se a eq. (2.15) e os valores apresentados na Tabela 2.5.

$$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (2.15)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência (psi);

k_1 e k_2 = constantes de regressão do modelo; e

θ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão (psi).

Tabela 2.5 - Valores típicos de k_1 e k_2 para materiais grossos não cimentados de base e subbase

Base ($M_R = k_1 \theta^{k_2}$ em psi)		
Condição de umidade	k_1	k_2
Seco	6000 – 10000	0,5 - 0,7
Molhado	4000 – 6000	0,5 - 0,7
Saturado	2000 – 4000	0,5 - 0,7

Subbase ($M_R = k_1 \theta^{k_2}$ em psi)		
Condição de umidade	k_1	k_2
Seco	6000 – 8000	0,4 - 0,6
Molhado	4000 – 6000	0,4 - 0,6
Saturado	1500 – 4000	0,4 - 0,6

Fonte: *Guide for Design of Pavement Structures* AASHTO (1986)

A Tabela 2.6 apresenta, em psi, os valores típicos do estado de tensão atuantes em base de material granular em função da espessura da camada do concreto asfáltico e do módulo de resiliência do subleito, os quais podem ser usados em projetos. Além disso, os valores típicos do estado de tensão que podem ser empregados para selecionar o valor do módulo de resiliência para subbase com espessura entre 15 e 30 cm são mostrados na Tabela 2.7.

Tabela 2.6 - Os valores típicos do estado de tensão atuante em base de material granular

Concreto asfáltico espessura (cm)	Módulo de resiliência do subleito (psi)		
	3000	7500	15000
Menos de 5	20	25	30
5 - 10	10	15	20
10 - 15	5	10	15
Mais de 15	5	5	5

* Estado de tensão em psi

Fonte: *Guide for Design of Pavement Structures* AASHTO (1986)

Para valores intermediários do módulo de resiliência do subleito, podem-se interpolar os valores apresentados na Tabela 2.6. Ainda, no caso de as agências não possuírem relações para avaliação do módulo de resiliência, para os materiais granulares não cimentados de base ou subbase, algumas relações, para estimar o módulo de resiliência através do índice CBR, são sugeridas, como mostra a Tabela 2.8, considerando-se o estado de tensão (θ).

Tabela 2.7 - Os valores típicos do estado de tensão atuante na subbase com espessura entre 15 e 30 cm

Concreto asfáltico espessura (cm)	Estado de tensão (psi)
Menos de 5	10,0
5 – 10	7,5
Mais de 10	5,0

Fonte: *Guide for Design of Pavement Structures* AASHTO (1986)

Tabela 2.8 - Relações entre M_R e CBR para materiais granulares não cimentados de base e/ou de subbase

θ (psi)	M_R (psi)
100	740 x CBR
30	440 x CBR
20	340 x CBR
10	250 x CBR

Fonte: *Guide for Design of Pavement Structures* AASHTO (1986)

Quanto às relações apresentadas pelo *Guide for Design of Pavement Structures* AASHTO (1986), pode-se considerar, como uma limitação das relações, a ausência da composição granulométrica (ou granulometria) nas relações com o módulo de resiliência. Pois os resultados encontrados, tanto por Jorenby e Hicks (1986) como por Barksdale e Itani (1989), mostram que a composição granulométrica do solo influencia no módulo de resiliência.

2.6 Solos tropicais lateríticos e saprolíticos

Neste tópico, são destacadas algumas particularidades, relacionadas aos solos tropicais lateríticos e saprolíticos, encontrados freqüentemente no interior do Estado de São Paulo e muito empregados em pavimentação. Segundo Nogami e Villibor (1995), os solos lateríticos e saprolíticos são as duas grades classes destacadas dentre os solos tropicais (solos que apresentam propriedades peculiares, em relação aos solos não tropicais, em decorrência da atuação de processos geológicos e/ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas).

Segundo o COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF THE ISSMFE (1985) os solos lateríticos e saprolítico apresentam as características descritas a seguir.

i) Solo laterítico:

- a) Pertence aos horizontes A ou B dos perfis bem drenados que se desenvolvem em regiões de clima úmido tropical; e
- b) Tem sua fração argila constituída essencialmente de minerais do grupo da caolinita e de óxidos hidratados de ferro ou alumínio, e esses componentes são agrupados formando estruturas peculiares porosas e agregadas altamente estáveis.

ii) Solo saprolítico:

- a) Ser um solo no sentido geotécnico⁹;
- b) Exibir claramente os traços estruturais inerentes que podem conduzir a fácil identificação da rocha matriz; e

c) Deve ser um solo autenticamente residual¹⁰.

Trabalhos têm indicado que os sistemas de classificações tradicionais, HRB e USCS, não são eficazes na classificação dos solos tropicais saprolíticos e lateríticos. De acordo com Nogami e Villibor (1983), os sistemas de classificação tradicionais, HRB (*Highway Research Board*) e USCS (*Unified Soil Classification System*), têm-se apresentado inadequados para classificação dos solos lateríticos e saprolíticos, pois não permitem distingui-los. Segundo Fabbri (1994), as classificações HRB e USCS, originárias de países temperados, foram desenvolvidas para solos lá encontrados, não sendo adaptadas para solos tropicais. Para Barroso e Fabbri (1997), os sistemas HRB e USCS podem classificar os solos lateríticos e saprolíticos como sendo de uma mesma classe; assim sendo, pode ser conferido aos solos de comportamento laterítico um desempenho inferior àquele observado na prática.

As diferenças de comportamento geotécnico, entre os solos lateríticos e saprolíticos, têm sido consideradas em vários trabalhos. Tanto para Nogami e Villibor (1983), como para Barroso e Fabbri (1997), os solos lateríticos e saprolíticos, quando compactados, possuem propriedades geotécnicas consideravelmente distintas. Nogami (1985) destacou algumas peculiaridades dos solos tropicais lateríticos e saprolíticos, relacionadas com o CBR, a perda de suporte por imersão, a expansão e a classificação pelo sistema HRB, as quais são apresentadas na Tabela 2.9.

⁹ Material que pode ser escavado, sem a execução de técnicas especiais, como explosivos.

¹⁰ Solo residuais são os solos que resultam da decomposição da rocha, *in situ*, e permanecem sobre ela.

No Brasil, desde 1981, existe uma classificação, para solos tropicais designada de MCT (Miniatura Compactado Tropical), que busca diferenciar os solos de comportamento laterítico, daqueles de comportamento não laterítico. Ser um solo de comportamento laterítico (L) ou um solo de comportamento não laterítico (N), segundo a classificação MCT, tem significado essencialmente tecnológico, relacionado com as propriedades do solo (expansão, contração, mini-CBR, coeficiente de sorção e permeabilidade) e com as aplicabilidades do solo na Engenharia Civil (base, reforço de subleito, aterro, etc).

A classificação MCT possui um ábaco para classificação dos solos. Além disso, existe uma tabela associada à MCT que permite a previsão de propriedades do solo onde é possível estimar o comportamento e a adequação do solo para obras rodoviárias. O processo de classificação MCT considera sete grupos de solos: LA (areia laterítica), LA' (laterítico arenoso), NA (areia não laterítica), NA' (não laterítico arenoso), LG' (laterítico argiloso), NG' (não laterítico argiloso) e NS' (não laterítico siltoso) e também se baseia na determinação dos índices e' e c' , que expressam, respectivamente, o caráter laterítico e a argilosidade dos solos. De acordo com Fabbri (1994), parece não haver dúvida, no meio técnico, quanto à aceitação da classificação MCT para solos tropicais, sobretudo se for considerada a quantidade de artigos, dissertações e teses onde ela é citada ou que dela se faz uso para classificação dos solos. Maiores detalhes da classificação MCT são descritas por Nogami e Villibor (1981), Nogami e Villibor (1990), Nogami e Villibor (1993), Fabbri (1994) e Nogami e Villibor (1995).

Tabela 2.9 - Peculiaridades dos solos tropicais lateríticos e saprolíticos

Item	Solos lateríticos	Solos saprolíticos
Suporte (CBR)	Geralmente, apresentam CBR mais elevados (face aos seus índices classificatórios).	Freqüentemente, apresentam valores piores (face aos seus índices de classificação). Contudo algumas variedades podem ser muito resistentes.
	Na densidade seca máxima da energia intermediária, as areias finas argilosas podem atingir CBR de 80% e as argilas CBR de 40%.	Valor de suporte muito dependente da sobrecarga.
Perda de suporte por imersão em água	Reduzida	Grande
Expansão	Mais baixa	Freqüentemente, apresentam valores piores face aos seus índices classificatórios.
		Valor de expansão muito dependente da sobrecarga.
Classificação HRB - AASHTO	De uma maneira geral, possuem capacidade suporte maior do que a prevista pela classificação.	Muitas variedades de solos dos grupos A-1, A-2 e A-4 podem ter capacidade suporte inferior à prevista pela classificação.
	Os solos dos grupos A-2 e A-4 podem ser usados como base.	Índice de grupo zero, ou baixo, pode corresponder a tipos de solo com capacidade de suporte baixo e expansivo.
	Os solos do grupo A-7 podem ser usados como reforço ou subbase de pavimentos, mesmo que tenha índice de grupo bem acima de zero.	

Fonte: Modificada de Nogami (1985)

Trabalhos indicam que solos de comportamento laterítico tendem a apresentar módulos de resiliência maiores do que os solos de comportamento não laterítico. Resultados apresentados por Rodrigues (1997) mostraram que os valores dos módulos de resiliência de um solo de comportamento LA' (laterítico arenoso) foram maiores que os de um solo de comportamento NA' (não laterítico arenoso). Nogami e Villibor (1995) apresentaram módulos de resiliência de solos de um perfil geotécnico, com duas camadas, que foram obtidos de ensaios triaxiais cíclicos

realizados com estados de tensões iguais, de modo que o solo de comportamento LG' (laterítico argiloso) do horizonte superficial apresentou $M_R = 5.600 \text{ Kgf/cm}^2$ e o solo de comportamento NS' (não laterítico siltoso) do horizonte saprolítico apresentou $M_R = 1.100 \text{ Kgf/cm}^2$.

As peculiaridades de constituição mineral dos solos tropicais laterítico e saprolíticos são apresentadas na Tabela 2.10. Observa-se que a laterita tem presença marcante nos solos lateríticos na fração areia e também pode ser encontrada na fração silte. Nos solos lateríticos, além do quartzo, outros minerais resistentes ao intemperismo (ilmenita, magnetita, rutilo, etc) podem estar presentes.

Segundo Schellmann¹¹ (1981 apud COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF THE ISSMFE, 1985) as lateritas são o produto de intenso intemperismo das rochas e, consistem principalmente de ajuntamentos dos minerais goetita, hematita, hidróxidos de alumínio, minerais da caolinita e quartzo.

¹¹ SCHELLMANN, W. *Considerations on the definition and classification of laterites*. Trivandrun, Índia: [s.n], 1981.

Tabela 2.10 - Algumas características da constituição mineral dos solos lateríticos e saprolíticos

Fração	Solos lateríticos	Solos saprolíticos
Areia e pedregulho	O mineral quartzo é encontrado com muita frequência. Contudo, os grãos de quartzo, presentes na fração areia, apresentam as seguintes particularidades: presença de uma película de óxidos (fornecendo uma tonalidade avermelhada, rósea, arroxeada ou amarelada ao conjunto) e depressões (indicando efeitos de dissolução lenta).	Grande diversidade de minerais diferentes do quartzo. Contudo, muitos solos saprolíticos podem apresentar o quartzo com predominância.
	Além do quartzo, outros minerais resistentes à ação das intempéries podem ocorrer, destacam-se os minerais pesados (magnetita, ilmenita, rutilo, turmalina, zircão, etc). Frequentemente, a laterita ou concreção laterítica está presente.	Merece destaque ocorrência de fragmentos de rochas, feldspatos e micas.
Silte	Predominância de quartzo, embora podem ocorrer a magnetita e a ilmenita como constituintes predominantes. Além disso, laterita também pode ocorrer, contudo é difícil de ser distinguida dos torrões de argila.	Constituição muito variada. Todavia, podem ocorrer casos em que a fração é constituída de apenas um mineral. O quartzo é um mineral muito comum, também podem ocorrer a caolinita e micas.
Argila	Contém elevada porcentagem de óxidos e hidróxidos de ferro (goetita, limonita, e ferrihidrita), óxidos anidros de ferro (hematita e magnetita) e hidróxidos de alumínio (diásporo e bohemita, gibbsita, bauxita).	Podem ocorrer argilominerais mais ativos do que a caolinita (e.g. montmorilonita e ilita). Contudo, isso não impede que, em muitos solos, os minerais da família da caolinita sejam exclusivos ou predominantes. Podem ocorrer óxidos e hidróxidos de Fe e Al.
	O argilomineral geralmente presente é a caolinita. Além do mais, óxidos e hidróxidos de ferro ou alumínio costumam envolver a caolinita.	Os argilominerais e, eventualmente outros minerais presentes, não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Fonte: Modificada de Nogami e Villibor (1995)

A microscopia eletrônica de varredura tem sido usada para diferenciar os solos de comportamento laterítico dos solos de comportamento não laterítico. Para Nogami (1985), na micro-estrutura dos solos lateríticos, os grãos individualizados, são difíceis de serem distinguidos, mesmo com grande aumento (cerca de 10.000 vezes) no microscópio eletrônico de varredura, pois formam massas esponjosas ou com aspecto de pipoca, com contornos predominantemente arredondados. Quanto à micro-estrutura dos solos não lateríticos, os grãos individualizados são geralmente fáceis de serem distinguidos, pois neles estão presentes os contornos geométricos característicos, tanto de cristais (faces planas, arestas retilíneas) neoformados da rocha matriz cristalina, como os grãos arredondados pelo transporte. Os vazios intragranulares, resultantes do processo de intemperismo, são freqüentes nos grãos maiores.

Imagens de microfotografias, típicas de solos de comportamento lateríticos e não lateríticos, segundo a MCT, na ampliação de 1.500, 3.000 e 10.000 vezes, podem ser encontradas nos trabalhos de Fabbri (1994), Takeda (2006); e Fernandes (2006). Microfotografias de argilominerais (caulinita, haloisita e illita) são apresentadas por Holtz e Kovaks (1981).

2.7 As redes neurais artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são ferramentas computacionais potentes, utilizadas para aprender funções e para solucionar problemas que envolvem reconhecimento de padrões. Neste tópico, apresentam-se as características do neurônio artificial, que é o elemento fundamental das redes, e alguns tipos de redes usadas atualmente. Além disso, destaca-se o aprendizado tipo supervisionado, geralmente empregado para a classe das redes alimentadas adiante, com múltiplas camadas (MLP), as quais são muito utilizadas nos trabalhos nas áreas da engenharia. Também são descritas as principais características do algoritmo *backpropagation*, muito utilizado no treinamento de redes, inclusive a sua formulação. Ainda são apresentadas, no final do tópico, algumas aplicações bem sucedidas das redes neurais artificiais nas diversas áreas da engenharia.

2.7.1 Estrutura de um neurônio artificial

Os neurônios artificiais são unidades de processamento de informações usadas na constituição das redes neurais artificiais. A estrutura do neurônio artificial pode ser dividida em três partes: o conjunto de sinapses, o somador e a função de ativação. A Figura 2.7 apresenta o modelo de um neurônio artificial que constitui o fundamento para o projeto de redes neurais artificiais.

Figura 2.7 - Modelo de um neurônio artificial (Fonte: HAYKIN, 2001)

As três características básicas (o conjunto de sinapses, o somador e a função de ativação) que podem ser encontradas no neurônio artificial são descritas a seguir.

a) O conjunto de sinapses

Cada elo de conexão ou sinapse do neurônio possui um peso (w) e um padrão ou informação de entrada (x). Observa-se na Figura 2.7 a forma como são colocados os índices, o padrão x_m é o sinal (ou informação) da entrada sináptica m , e o peso w_{km} refere-se ao peso da sinapse entre o neurônio k e a entrada sináptica m . Portanto, os sinais (ou informações) de entrada e pesos das sinapses relacionados de forma ordenada constituem o conjunto de sinapses.

b) O somador

No centro do neurônio, o somador (Σ) recebe as informações provenientes do conjunto de sinapses e então realiza, para cada sinapse conectada, uma soma ponderada dos sinais (ou informações) de entrada pelos respectivos pesos sinápticos. A entrada fixa $x_0 = +1$ é ponderada pelo peso sináptico $w_{k0} = b_k$ (bias).

c) A função de ativação

A função de ativação gerencia a resposta de saída do neurônio, de modo que a função limita (restringe) o intervalo permissível para liberação da resposta (ou informação) de saída. O bias (b_k) influencia o aumento ou a diminuição da entrada líquida na função de ativação e, conseqüentemente, a resposta do neurônio.

O neurônio k , apresentado na Figura 2.7, matematicamente pode ser representado pelo campo local induzido e pelo sinal de saída (ou resposta do neurônio), respectivamente conforme a eq. (2.16) e a eq. (2.17).

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} \cdot x_j \quad (2.16)$$

em que:

v_k = potencial de ativação ou campo local induzido do neurônio k ;

$x_0, x_1, x_2, \dots, x_{km}$ = sinais (ou informações) de entrada no neurônio; e

$w_{k0}, w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ = pesos sinápticos do neurônio k .

Observa-se que $x_0 = +1$ é um sinal fixo e $w_{k0} = \text{bias}$.

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (2.17)$$

em que:

y_k = resposta ou sinal de saída do neurônio k ; e

$\varphi(v_k)$ = função de ativação do neurônio k .

- As funções de ativação mais utilizadas

Existem vários tipos de função de ativação. Contudo, de acordo com Loesch e Sari (1995), as funções passo, rampa e logística são funções de ativação mais conhecidas e utilizadas nas redes neurais artificiais. Além disso, Braga, Carvalho e Ludermir (2000) apresentam no grupo das funções de ativação utilizadas nas redes neurais as funções passo, rampa e logística. As funções passo ou limiar, rampa e sigmóide do tipo logística que correspondem, respectivamente, as eqs. (2.18), (2.19) e (2.20) são apresentadas na sequência.

a) Função passo ou limiar

$$\varphi(v) = \begin{cases} +1, & \text{SE } v \geq 0 \\ 0, & \text{SE } v < 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

em que:

v = potencial de ativação ou campo local induzido; e

$\varphi(v)$ = função de ativação do neurônio.

b) Função rampa

$$\varphi(v) = \begin{cases} +1, & \text{SE } v \geq +1 \\ v, & \text{SE } 0 < v < +1 \\ 0, & \text{SE } v \leq 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

em que:

v = potencial de ativação ou campo local induzido; e

$\varphi(v)$ = função de ativação do neurônio.

c) Função sigmóide do tipo logística

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-v \cdot a_F)} \quad (2.20)$$

em que:

v = potencial de ativação ou campo local induzido;

$\varphi(v)$ = função de ativação do neurônio; e

a_F = parâmetro de inclinação da função logística.

Os gráficos das funções de ativação passo, rampa e sigmóide do tipo logística são ilustrados respectivamente na Figura 2.8 (a), (b) e (c).

Alguns trabalhos mostram que a função sigmóide do tipo logística tem sido a função de ativação muito utilizada na construção de redes neurais. Para Haykin (2001), a função sigmóide é a função de ativação mais utilizada na construção de redes neurais artificiais. Segundo Braga, Carvalho e Ludermir (2000), as funções sigmoidais são encontradas na elaboração de diversos modelos em variadas áreas e uma das funções sigmoidais mais importantes é a função logística.

Figura 2.8 - Funções de ativação passo (a), rampa (b) e sigmóide do tipo logística (c)

2.7.2 Redes alimentadas adiante com camada única e redes alimentadas adiante com múltiplas camadas

Entre as classes de redes neurais artificiais, destacam-se as redes alimentadas adiante com camada única e as redes alimentadas adiante com múltiplas camadas. A seguir, são apresentadas as principais características dessas duas classes de redes neurais artificiais.

- Redes alimentadas adiante com camada única

As redes neurais alimentadas adiante com camada única (*Single - Layer Feed*) são as classes mais simples de rede de neurônios em camadas. Tem-se uma camada de entrada de nós que recebem informações (sinais ou padrões) de uma fonte e que se projeta sobre uma camada de saída. Contudo, o sentido inverso dos sinais (ou informações) não ocorre entre as camadas; por isso, a rede considerada é acíclica ou alimentada adiante (*feedforward*). Na camada de saída da rede, efetivamente, se localizam os neurônios que realizam a computação e liberam as informações de resposta. Quanto aos nós de entrada da rede (ou nós de fonte), cabe-lhes receber as informações (ou os padrões) externas e retransmiti-las sem qualquer critério de cálculo. Desse modo, a rede possui apenas uma camada de neurônios. Na Figura 2.9, apresenta-se um exemplo da rede neural da alimentada adiante com camada única.

- Redes alimentadas adiante com múltiplas camadas

Esta classe de rede possui uma ou mais camadas de neurônios entre os nós de entrada da rede e os nós computacionais de saída da rede (neurônios de saída da rede). Assim, classificam-se as camadas intermediárias da rede como camadas ocultas de neurônios. As redes, alimentadas adiante com múltiplas camadas, são também conhecidas como *multilayer feedforward network* ou *multilayer perceptron* (MLP).

Na rede MLP, os neurônios ocultos da rede têm a função de intervir nos sinais (ou informações) entre a entrada externa e a saída da rede. Na dinâmica de informações que percorrem a rede, os nós da camada de entrada recebem as informações externas e as transmite aos nós (computacionais) da primeira camada oculta de neurônios a qual, em seguida, fornece informações de resposta para alimentar a segunda camada oculta de neurônios e, dessa forma, o fluxo de informações continua na rede até ser alcançada a camada de neurônios de saída da rede. A camada de neurônios de saída pode possuir um ou mais neurônios. Figura 2.10 ilustra uma rede neural alimentada adiante com múltiplas camadas.

De acordo com HAYKIN (2001), uma das características distintivas das redes classe MLP é a presença da função de ativação não linear sigmóide tipo logística em cada neurônio da rede.

Figura 2.9 - Exemplo de uma rede neural alimentada adiante com camada única

Figura 2.10 - Exemplo de uma rede alimentada adiante com múltiplas camadas

2.7.3 Arquitetura das redes

A forma como os neurônios estão conectados constitui a arquitetura da rede. A escolha da arquitetura, geralmente, se faz através do nível de complexidade do problema a ser realizado, experimentando várias arquiteturas até se chegar a mais adequada.

Muitas vezes, a arquitetura da rede MLP é caracterizada por uma seqüência de números relacionados ao número camadas da rede e ao número de neurônios contidos nas camadas. No trabalho realizado por Tutumuler e Seyhan (1998), as RNAs, foram usadas redes da classe múltiplas camadas alimentadas adiante (MLP) com as seguintes arquiteturas: 5-2-1, 5-3-1, 5-4-1, 5-5-1, 5-6-1 e 5-7-1; a seqüência de três números indicava que as rede possuíam três camadas.

Como exemplo, uma rede neural, alimentada adiante de múltiplas que possui uma arquitetura 10-4-2, deve apresentar, respectivamente, 10 nós de fonte na primeira camada, 4 neurônios ocultos na segunda camada e 2 neurônios de saída na terceira camada da rede (como ilustrado na Figura 2.10).

2.7.4 Aprendizado de uma RNA

A utilização de uma RNA para solução de um problema passa pela fase de aprendizagem. Nesta fase, a RNA se baseia nos padrões (ou dados), apresentados a ela e extrai as informações relevantes. Ainda, na fase de aprendizagem, ocorre um processo iterativo de ajustes aplicados aos pesos das conexões.

- O aprendizado supervisionado de uma RNA

O Aprendizado supervisionado baseia-se na presença de um supervisor externo que fornece para rede neural um conjunto de padrões (ou informações) de entrada e saída desejadas. O processo de treinamento da rede é direcionado pelo supervisor que verifica a qualidade do comportamento da rede; assim sendo, o erro médio do processo do treinamento é avaliado e, como consequência, a rede poderá ou não sofrer alterações para minimizar o erro (e.g. aumento do tempo de aprendizado, mudança da arquitetura rede, mudança do momento e mudança da taxa de aprendizagem).

Na Engenharia Civil, o aprendizado tipo supervisionado foi aplicado em muitos trabalhos com redes neurais artificiais da classe MLP que a utilizavam o algoritmo de treinamento *backpropagation* (Tutumuler e Meier, 1996; Brega, Soria e Sementille, 1998; Rodgher et al. 1998; Tutumuler e Seyhan, 1998; Rodgher, 2002; Coutinho Neto e Fabbri, 2003).

De acordo com Braga, Carvalho e Ludermir (2000), os exemplos mais conhecidos de aprendizado supervisionado são os que usam algoritmo regra delta e a generalização da regra para redes de múltiplas camadas (o algoritmo *backpropagation*). Para eles, o algoritmo de aprendizado é um conjunto de procedimentos para ajustar os parâmetros da rede neural artificial, de modo que ela possa aprender uma função.

2.7.5 O algoritmo *backpropagation*

O algoritmo *backpropagation*, utilizado nas redes tipo MLP, é considerado um algoritmo estático, porque, sem alterar a estrutura da rede, possibilita a variação dos valores de seus pesos. Neste tópico, destacam-se a dinâmica do funcionamento do algoritmo *backpropagation*, que se baseia em um processo iterativo, e a sua formulação.

2.7.5.1 As duas fases do algoritmo *backpropagation*

O treinamento de uma rede neural artificial, com a utilização do algoritmo *backpropagation*, ocorre em duas fases (uma para frente e outra para trás). As características das duas fases são descritas a seguir.

i) Fase para frente (*forward*)

- a) Os sinais (ou informações) são fornecidos para os nós de entrada da RNA;
- b) Os sinais se propagam através das camadas da rede sendo avaliados pelos neurônios até que seja fornecido um conjunto de respostas na saída da rede; e
- c) O conjunto de resposta obtido na saída da rede é comparado com o conjunto de respostas desejadas que estão contidas no conjunto de treinamento.

ii) Fase para trás (*backward*)

- a) Ocorre a produção de um sinal de erro que é a resposta da rede subtraída de uma resposta desejada (alvo);
- b) O sinal de erro é emitido para trás, no sentido da saída para entrada, através da rede fazendo a retropropagação de erro (*error backpropagation*); e
- c) Os pesos sinápticos são todos ajustados para fazer com que a resposta da rede se aproxime da resposta real.

A Figura 2.11 ilustra as duas fases que ocorrem durante o treinamento da rede com a utilização do algoritmo *backpropagation*. Na seqüência, a Figura 2.12 apresenta um esquema sucinto do algoritmo *backpropagation* em que onde se pode observar que o treinamento é parado para um determinado erro mínimo ou então para um determinado número de ciclos de treinamento.

Figura 2.11 - Fases de treinamento da rede com o algoritmo *backpropagation*

Figura 2.12 - Esquema sucinto do algoritmo *backpropagation* (Fonte: Modificada de BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000)

2.7.5.2 Formulação do algoritmo *backpropagation*

- Erro quadrático total em uma iteração de treinamento

Considerando N o número total de padrões (exemplos) contidos no conjunto de treinamento de uma rede neural de múltiplas camadas. Cada padrão do conjunto de treinamento serve para realizar uma iteração para o cálculo do erro. Deste modo, o erro quadrático total da rede na iteração correspondente n-ésimo padrão do conjunto pode ser calculado com a eq. (2.21).

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} (d_j(n) - y_j(n))^2 \quad (2.21)$$

em que:

$d_j(n)$ = resposta desejada para o neurônio j, na iteração correspondente ao padrão n;

$y_j(n)$ = resposta que surge na saída do neurônio j, na iteração correspondente ao padrão n; e

C = conjunto englobando todos os neurônios da camada de saída da rede.

- Erro médio quadrado de treinamento da rede

O erro médio quadrado, também conhecido como energia média do erro quadrado, é calculado após uma época (uma apresentação de todos os padrões do conjunto de treinamento). O erro médio quadrado, E_{med} , representa uma medida da eficácia da aprendizagem da rede, é expresso pela eq. (2.22).

$$E_{med} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C} (d_j(n) - y_j(n))^2 \quad (2.22)$$

Na eq. (2.22), o somatório interno, em relação à j , é executado sobre todos os neurônios da camada de saída, enquanto o somatório externo, em relação à n , é realizado sobre todos os padrões contidos no conjunto de treinamento.

- Minimização do erro

A minimização do erro é feita por um método de treinamento em que os pesos são atualizados, de padrão em padrão, até formar apresentação completa do conjunto de treinamento da rede que está sendo processado, então se calcula o E_{med} correspondente a época correspondente. Portanto, para minimizar o E_{med} durante a aprendizagem, os parâmetros livres (e.g. pesos sinápticos e níveis de bias) são ajustados de época em época.

- Regra delta

A regra delta, de Widrow e Hoff (1960), é usada para correção dos pesos sinápticos e faz parte do algoritmo *backpropagation*. Na regra delta, a correção aplicada ao peso sináptico, que está localizado entre o nó i e o nó j da rede neural, é definida pela eq. (2.23), sendo que, o nó i precede o nó j no sentido da saída da rede.

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \cdot \partial_j(n) \cdot y_i(n) \quad (2.23)$$

em que:

$\Delta w_{ji}(n)$ = correção aplicada ao peso sináptico localizado entre o nó i e o nó j
na iteração correspondente ao padrão n ;

η = taxa de aprendizagem;

δ_j = gradiente local, na iteração correspondente ao padrão n ; e

$y_i(n)$ = sinal de saída ou resposta do neurônio i , na iteração correspondente
ao padrão n .

Como:

$$\Delta w_{ji}(n) = w_{ji}(n+1) - w_{ji}(n) \quad (2.24)$$

em que:

$w_{ji}(n+1)$ = peso sináptico localizado entre o nó i e o nó j da rede, na iteração
correspondente ao padrão $n + 1$.

Então, substituindo-se eq. (2.24) em eq. (2.23), tem-se a regra delta escrita
de uma nova forma eq. (2.25).

$$w_{ji}(n+1) = w_{ji}(n) + \eta \cdot \delta_j(n) \cdot y_i(n) \quad (2.25)$$

O cálculo do gradiente local $\delta_j(n)$ depende se o neurônio j é um neurônio de
saída de rede, ou se é um neurônio de uma camada oculta.

- Fórmula para o cálculo gradiente $\delta_j(n)$, se o neurônio j é de saída

Se o neurônio j é de saída o gradiente local é obtido com base na eq. (2.26).

$$\delta_j(n) = \phi'_j(v_j(n))(d_j(n) - y_j(n)) \quad (2.26)$$

em que:

$\delta_j(n)$ = gradiente local para o neurônio de saída j, na iteração correspondente ao padrão n;

$v_j(n)$ = campo local induzido, gerado na entrada da função de ativação, do neurônio j, na iteração correspondente ao padrão n;

$\phi'_j(v_j(n))$ = derivada parcial da função de ativação do neurônio j de saída em relação à $v_j(n)$, na iteração correspondente ao padrão n;

$d_j(n)$ = resposta desejada para o neurônio j, na iteração correspondente ao padrão n; e

$y_j(n)$ = resposta que surge na saída do neurônio j, na iteração correspondente ao padrão n.

- Fórmula para o cálculo do gradiente $\delta_j(n)$, se o neurônio j é de camada oculta

Se o neurônio j é um neurônio oculto o gradiente local é obtido com a eq. (2.27). Observa-se que a camada do neurônio k sucede camada do neurônio j na direção da saída da rede neural.

$$\delta_j(n) = \phi'_j(v_j(n)) \sum_k \delta_k(n) \cdot w_{kj}(n) \quad (2.27)$$

em que:

$\delta_j(n)$ = gradiente local para o neurônio de saída j , na iteração correspondente ao padrão n ;

$\delta_k(n)$ = gradiente local para o neurônio k que sucede a camada do neurônio j no sentido da saída da rede, na iteração correspondente ao padrão n ;

$w_{kj}(n)$ = peso sináptico localizado entre a entrada do neurônio k e a saída do neurônio j , na iteração correspondente ao padrão n ; e

$\varphi'_j(v_j(n))$ = derivada parcial da função de ativação do neurônio j de saída em relação à $v_j(n)$, na iteração correspondente ao padrão n .

O somatório (Σ) da função $\delta_j(n)$, eq. (2.27), é executado sobre todos os neurônios da camada que se encontra o neurônio k .

Finalmente, destaca-se que o gradiente local $\delta_k(n)$ para o neurônio k é calculado a partir da eq. (2.28).

$$\delta_k(n) = \varphi'_k(v_k(n))(d_k(n) - y_k(n)) \quad (2.28)$$

em que:

$d_k(n)$ = resposta desejada para o neurônio k , na iteração correspondente ao padrão n ;

$y_k(n)$ = sinal de saída ou resposta fornecida pelo neurônio k , na iteração correspondente ao padrão n ;

$v_k(n)$ = campo local induzido, gerado na entrada da função de ativação, do neurônio k , na iteração correspondente ao padrão n ; e

$\phi'_k(v_k(n))$ = derivada parcial da função de ativação do neurônio k em relação à $v_k(n)$, na iteração correspondente ao padrão n.

- Taxa de aprendizagem (η)

A taxa de aprendizagem está relacionada com a variação dos pesos sinápticos da rede de uma iteração para outra. As principais mudanças que a taxa de aprendizagem causam na rede são as que se seguem:

- i) η baixas ou lentas causam pequenas variações nos pesos sinápticos, de uma interação para outra, e uma trajetória mais suave no espaço dos pesos.
- ii) η altas tornam o processo de aprendizagem acelerado, contudo podem causar grandes modificações nos pesos sinápticos tornando a rede instável ou oscilatória.

- Regra delta generalizada

Rumelhart, Hilton e Williams (1986) apresentaram uma modificação da regra delta, com inclusão de um termo de momento que permite aumentar a taxa de aprendizagem evitando a instabilidade na rede. A nova função de ajuste de pesos sinápticos, eq. (2.29), chama-se regra delta generalizada.

$$\Delta w_{ji}(n) = \alpha \cdot \Delta w_{ji}(n-1) + \eta \cdot \delta_j(n) \cdot y_i(n) \quad (2.29)$$

em que:

$\Delta w_{ji}(n)$ = correção aplicada ao peso sináptico localizado entre o nó i e o nó j
na iteração correspondente ao padrão n ;

$\alpha \cdot \Delta w_{ji}(n-1)$ = termo de momento;

α = constante de momento;

η = taxa de aprendizagem;

δ_j = gradiente local, na iteração correspondente ao padrão n ; e

$y_i(n)$ = sinal de saída ou resposta do neurônio i , na iteração correspondente ao padrão n .

Para $\alpha = 0$, pode-se observar que regra delta generalizada, eq. (2.29), é igual à regra delta que é representada pela eq. (2.23).

2.7.6 Aplicações das redes neurais artificiais na engenharia

As redes neurais artificiais têm sido aplicadas em uma diversidade de problemas que envolvem a previsão de variáveis resposta a partir de um conjunto de variáveis explicativas, que, muitas vezes, não são modelados a partir de métodos estatísticos tradicionais. Assim sendo, a seguir, apresentam-se alguns trabalhos no campo da engenharia em que a aplicação das redes neurais obteve êxito.

- Análise da concentração de CO (monóxido de carbono) no ar com base em redes neurais

Freitas (2003) empregou as redes neurais para previsão da concentração de CO no ar na cidade de Ribeirão Preto-SP. As redes neurais, empregadas para previsão da concentração de CO no ar, foram desenvolvidas com diversas variáveis de entrada de rede; contudo, a rede que obteve melhor desempenho na previsão de concentração de CO no ar apresentava apenas cinco entradas: número de veículos leves, velocidade dos ventos, velocidade média de veículos pesados, temperatura e velocidade média das motos. Dos 464 casos observados no campo, utilizaram-se 347 (75%) treinar a rede e 117 (25%) para testar a rede.

Enfim, de acordo com Freitas (2003), a qualidade dos modelos de previsão da concentração CO no ar, baseados em redes neurais, foi satisfatória.

- Redes neurais artificiais aplicadas na modelagem de tensão-deformação e na análise da influência da tensão de confinamento nos solos arenosos

Ellis et al. (1995) empregaram redes neurais artificiais para simular o comportamento tensão deformação de solos arenosos em ensaios triaxiais, não drenados, e também para analisar os efeitos da tensão de confinamento. No trabalho, foram empregadas 8 tipos de areia, ensaiadas nos níveis de tensão de confinamento 70, 210 e 350 kPa.

As redes neurais, usadas para simular o comportamento tensão-deformação, apresentavam seis como entradas: ε_1 (deformação axial), D_r (densidade relativa), OCR (razão de pré-adensamento), C_u (coeficiente de

uniformidade), u (poro pressão) e σ_3 (tensão de confinamento). A única saída da rede era σ_{ax} (tensão axial). Além disso, a rede foi treinada com os resultados de 38 ensaios e testada com os resultados de 7 ensaios. Durante o treinamento, o momento variou de 0,1 a 0,9 e a taxa de aprendizagem variou de 0,1 a 0,3 e o critério de parada de treinamento era um baixo valor para o erro.

A Figura 2.13 mostra as curvas tensão de desvio versus deformação axial, obtidas nos ensaios e previstas pelas redes neurais para 7 diferentes tipos de areias testadas. Pode-se observar que houve uma boa concordância entre os resultados obtidos dos ensaios e os previstos pelas redes neurais.

Finalmente, Ellis et al. (1995) empregaram redes neurais treinadas na análise da influência da tensão de confinamento no comportamento tensão-deformação do solo e concluíram que as redes neurais poderiam ser usadas, para avaliar os efeitos da tensão de confinamento na curva tensão-deformação do solo.

Figura 2.13 - Simulação do comportamento tensão-deformação em solos arenosos através de redes neurais (Fonte: ELLIS et al., 1995)

- Análise do recalque de fundações rasas a partir de redes neurais

As redes neurais artificiais foram utilizadas por Shahin, Maier e Jaksa (2002) para prever o recalque de fundações rasas em solos arenosos. Eles comparam o desempenho das previsões feitas com as redes neurais, com os métodos tradicionais de previsões de recalque.

Convém destacar que a rede neural, usada na previsão de recalques de fundações rasas, apresentava cinco entradas: largura da sapata (B), pressão aplicada pela sapata (q), número de golpes SPT (N), razão geométrica da sapata (L/B) e razão embutimento da sapata (D_f/B), sendo L e D_f respectivamente o

comprimento a profundidade de embutimento da sapata. A única saída da rede neural era o recalque.

O conjunto de dados de análise era composto de 189 casos, medidos no campo, sendo que, utilizaram-se 80% dos casos para o treinamento da rede e 20% dos casos, para validação da rede. Além disso, os dados do treinamento foram subdivididos em 70% para o conjunto de treinamento e 30% para o conjunto de teste.

Outro aspecto importante do trabalho foi que, para obtenção da rede neural com maior desempenho, variou-se o momento (0,01 até 0,80); a taxa de aprendizagem (de 0,005 até 0,60) e o número de neurônios da camada interna da rede (de 1 até 11). Assim, pôde-se observar que a melhor arquitetura de rede foi 5-2-1 e os valores ótimos para o momento e para taxa de aprendizagem foram respectivamente 0,8 e 0,2.

Os recalques medidos versus os recalques, previstos pela rede neural artificial e pelos métodos tradicionais, são apresentados na Figura 2.14.

De acordo com Shahin, Maier e Jaksa (2002), os resultados obtidos na análise indicaram que as redes neurais são uma técnica útil para previsão de recalque em fundações rasas, em solos arenosos; e que as redes neurais superaram os métodos tradicionais de previsão de recalque.

Figura 2.14 - Recalques medidos versus recalques previstos pelas redes neurais e pelos métodos tradicionais (Fonte: SHAHIN; MAIER; JAKSA, 2002)

¹² MEYRHOF, G.G. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divions*, ASCE, v. 91, n. SM2, p. 21-31, 1965.

¹³ SCHULTZE, E.; SHERIF, G. Prediction of settlements from evaluated settlement observations for sand. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8, 1973. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1973. p. 225-230.

¹⁴ SCHMERTMANN, J. H.; HARTMAN, J. P.; BROWN, P. B. Improved strain influence factor diagrams. *Journal o Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [S.I.], v. 104, p. 1131-1135, 1978.

- Redes neurais usadas na previsão de leituras piezométricas

Em um estudo voltado para a estabilidade de um talude localizado na Serra do Mar, Paraná, realizado por Dyminski et al. (2006), as redes neurais foram empregadas na previsão de leituras piezométricas. Observa-se que as leituras piezométricas previstas, realizadas com as redes neurais, baseavam-se em leituras piezométricas anteriores e em medições pluviométricas. Os dados, para construção da rede neural, eram oriundos de 10 piezômetros instalados no talude e 1 pluviômetro localizado a cerca de 2000 m do talude.

Dyminski et al. (2006) concluíram, com o estudo, que os modelos de redes neurais foram capaz de realizar boas previsões de leituras piezométricas para um período de três meses, resultado considerado satisfatório.

- Redes neurais empregadas na previsão de atividades de manutenção e reabilitação de estradas não pavimentadas

Em um trabalho realizado com dados de mais de 100 km de estradas não pavimentadas do município de São Carlos-SP, Rodgher et al. (1998) utilizaram as redes neurais na previsão das atividades de manutenção e reabilitação de estradas não pavimentadas.

As redes neurais desenvolvidas no trabalho apresentavam como variáveis de entrada de rede: tráfego, condições climáticas, severidade (baixa, média, alta) e tipos de defeito. Sendo que, as variáveis de saída de rede foram: necessidade de camada de revestimento primário sob o subleito (RP), necessidade de cravação de

material granular sob o subleito (AG), limpeza das valetas (LV) e aplicação de estabilizante (ES).

Segundo Rodgher et al. (1998), as redes neurais artificiais podem servir como uma nova ferramenta para auxiliar na seleção de atividades de manutenção e reabilitação, pois os resultados, obtidos com o trabalho, reforçam o potencial e a aplicabilidade das redes neurais artificiais dentro do contexto de um sistema de gerência de vias.

- Redes neurais utilizadas na retroanálise de pavimentos flexíveis

Coutinho Neto (2000) aplicou redes neurais na retroanálise de pavimentos flexíveis. As redes neurais desenvolvidas forneciam os módulos de resiliência das camadas de diversos tipos de pavimentos a partir dos dados de bacias de deflexão hipotéticas obtidas com programa ELSYM5 (programa de análise mecânica de pavimentos) simulando ensaios de viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer (FWD). Além disso, na construção das redes, para cada caso analisado, 50% dos dados eram utilizados no conjunto de treinamento, 25% no conjunto de validação e 25% no conjunto de teste das redes, sendo que, os conjuntos de treinamento de treinamento, teste e validação eram disjuntos (dados de um conjunto não se repetia em outro conjunto). Observa-se que foram desenvolvidas seis redes, considerando três tipos de perfis de pavimentos.

- a) Pavimento de duas camadas (pavimento equivalente e subleito);
- b) Pavimento de três camadas (revestimento, base e subleito); e
- c) Pavimento de quatro camadas (revestimento, base, subbase e subleito).

As três redes desenvolvidas com os dados da simulação do ensaio de viga Benkelman possuíam como entradas as deflexões nas distâncias 0, 12,5, 25, 40, 60, 80, 100, 140, 180 e 260 cm do centro de aplicação de carga, o raio de curvatura da bacia de deflexão (R) e as espessuras das camadas (T_X = espessura efetiva do pavimento, e_C = espessura da capa, e_B = espessura da base e e_{SB} = espessura da subbase). As saídas das redes eram os módulos de resiliência das camadas analisadas (M_{RPE} , M_{RB} , M_{RSB} e M_{RSL} , correspondendo respectivamente aos módulos de resiliência do pavimento equivalente, da base, da subbase e do subleito).

As três redes desenvolvidas com os dados da simulação do ensaio FWD apresentaram como entradas as deflexões nas distâncias 0, 20, 30, 45, 60, 90, e 150 cm do centro de aplicação de carga e as espessuras das camadas. As saídas das redes eram os módulos de resiliência das camadas analisadas. A Tabela 2.11 apresenta um sumário do projeto das seis redes para retroanálise dos pavimentos.

Tabela 2.11 - Sumário do projeto das redes desenvolvidas com os dados do ELSYM5

Origem dos dados	Número de camadas do pavimento	Rede	Entradas de rede	Saídas de rede
Simulação do ensaio viga Benkelman	duas	A	10 deflexões, R e T_X	M_{RPE} , M_{RSL}
	três	B	10 deflexões, R , e_C e e_B	M_{RC} , M_{RB} , M_{RSL}
Benkelman	quatro	C	10 deflexões, R , e_C , e_B e e_{SB}	M_{RC} , M_{RB} , M_{RSB} , M_{RSL}
Simulação do ensaio FWD	duas	D	7 deflexões e T_X	M_{RPE} , M_{RSL}
	três	E	7 deflexões, e_C e e_B	M_{RC} , M_{RB} , M_{RSL}
FWD	quatro	F	7 deflexões, e_C , e_B e e_{SB}	M_{RC} , M_{RB} , M_{RSB} , M_{RSL}

Fonte: Modificada de Coutinho Neto (2000)

A Tabela 2.12 destaca, para cada uma das seis redes utilizadas nas retroanálises dos pavimentos, tanto a arquitetura das redes como o desempenho das redes, em termos de erro médio relativo (EMR) de previsão dos módulos de resiliência das camadas dos pavimentos.

Coutinho Neto (2000) concluiu que as redes neurais são ferramentas potentes para serem utilizadas na retroanálise de pavimentos flexíveis de duas, três e quatro camadas.

Tabela 2.12 - Arquiteturas e erros médios relativos de previsão dos módulos de resiliência das redes utilizadas nas retroanálises dos pavimentos

Origem dos dados	Número de camadas do pavimento	Rede	Arquitetura	Erro médio relativo (%)				
				M _{RPE}	M _{RC}	M _{RB}	M _{RSB}	M _{RSL}
Simulações do ensaio viga Benkelman	duas	A	12-9-4-2	5,17	--	--	--	4,47
	três	B	13-21-9-3	--	25,71	16,03	--	7,45
	quatro	C	14-23-12-4	--	12,19	14,79	18,65	6,29
Simulações do ensaio FWD	duas	D	8-10-7-2	3,22	--	--	--	6,03
	três	E	9-20-6-3	--	12,39	11,03	--	11,03
	quatro	F	10-23-13-4	--	10,31	16,12	22,26	6,14

Fonte: Modificada de Coutinho Neto (2000)

- Aplicação de redes neurais na previsão das propriedades de ligantes asfálticos

Redes neurais artificiais foram utilizadas por Faxina et al. (2005) na previsão das propriedades asfálticas: penetração (tipos virgem e RTFOT), ponto de amolecimento (tipos virgem, RTFOT e PAV) e resiliência (tipo virgem), considerando-se ligantes asfálticos virgens e modificados em diferentes condições de processamento.

É importante destacar que, no trabalho, o ligante asfáltico utilizado era puro ou misturado com óleo de xisto e/ou borracha. Assim, as redes neurais desenvolvidas possuíam cinco entradas: teor de asfalto, teor de óleo de xisto, teor de borracha, temperatura e tempo. As redes possuíam apenas uma saída que estava relacionada à propriedade asfáltica de interesse (penetração, ponto de amolecimento ou resiliência).

A Tabela 2.12 indica a propriedade do ligante asfáltico em estudo, o número de observações empregadas (n), a arquitetura da rede mais adequada à análise, a taxa de aprendizagem, o momento e o erro obtido após a aprendizagem da rede.

Tabela 2.13 - Características das redes neurais empregadas no estudo dos ligantes asfálticos

Problema	n	Arquitetura	Taxa de aprendizagem	Momento	Erro médio após a aprendizagem
Penetração virgem	108	5-8-6-1	0,6	0,8	0,0100
Penetração RTFOT	108	5-7-7-1	0,6	0,8	0,0100
PA virgem	113	5-7-7-1	0,6	0,8	0,0181
PA RTFOT	100	5-7-7-1	0,6	0,8	0,0212
PA PAV	93	5-7-7-1	0,6	0,8	0,0213
Resiliência virgem	114	5-7-7-1	0,6	0,8	0,0330

Fonte: Faxina et al. (2005)

No desfecho do trabalho, Faxina et al. (2005) concluíram que o uso das redes neurais de múltiplas camadas se tornou altamente efetivo na previsão de propriedades de ligantes asfálticos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta dos solos

Para cumprir os objetivos deste trabalho, coletaram-se setenta e seis amostras de solos no interior do Estado de São Paulo a exceção do Vale do Ribeira onde não foi coletados solos. Pode-se tomar como limites da área de amostragem: ao leste a BR 116, ligando a Capital ao Estado do Rio de Janeiro, ao Sul a Rodovia Raposo Tavares, unindo a Capital ao Estado do Mato Grosso do Sul, a oeste o Estado de Mato Grosso do Sul e ao norte o Estado de Minas Gerais. Nas proximidades das rodovias foram coletados materiais, a menos de duas amostras, provenientes do extremo oeste do Estado, das proximidades da SP-563, entre as cidades Teodoro Sampaio e Marabá Paulista.

A orientação inicial, para a definição dos locais de coleta, foi feita a partir da análise comparativa de categorias de solos determinadas em mapas pedológicos. Dessa forma, procurou-se selecionar materiais que representassem o maior número

possível de classes pedológicas, dando ênfase aos solos classificados como PV, PVA, LV e LVA, respectivamente, argissolo vermelho, argissolo vermelho amarelo, latossolo vermelho e latossolo vermelho amarelo, pois segundo Oliveira et al. (1999), os argissolos e os latossolos correspondiam a, respectivamente, 33% e 40% do total de unidade de mapeamento registradas. Ou seja, as duas classes representam 73% das ocorrências no Estado de São Paulo.

A partir da análise dos mapas pedológicos, foram selecionados os locais de coleta de 72 amostras de solos. Os materiais receberam códigos de identificação de 21 até 92 conforme a ordem cronológica de coleta. Essa numeração foi escolhida a partir de vinte amostras coletadas e estudadas anteriormente em outras pesquisas desenvolvidas na EESC (Escola de Engenharia de São Carlos). Do grupo original de amostras foram incluídas na presente pesquisa as amostras identificadas como 1, 11, 14 e 17, perfazendo assim um total de 76 amostras.

Para obter materiais que possibilitassem um estudo do módulo de resiliência dos solos, em termos de comportamento laterítico e não laterítico, sempre que possível, duas amostras deveriam ser tomadas de um mesmo perfil geotécnico; uma acima e outra abaixo da linha de seixos. Adotou-se a linha de seixos como um “marco de referência” para separação de solos com comportamentos geotécnicos diferentes. Segundo Nogami e Villibor (1995), geralmente, a linha de seixos tem um significado prático importante. Pois, freqüentemente, essa linha limita inferiormente o horizonte superficial laterítico.

A Figura 3.1 indica a distribuição geográfica dos setenta e seis pontos de coleta no mapa rodoviário do Estado de São Paulo.

Figura 3.1 - Mapa do Estado de São Paulo com indicação aproximada dos locais de coleta

Os locais em que os materiais foram retirados tiveram o registro tradicional (sentido, rodovia, km e lado) e ainda para todos os locais de coleta de materiais, anotaram-se as coordenadas geodésicas, com o uso de um GPS, na latitude sul e longitude a oeste de *Greenwich*. A Tabela A.1 do APÊNDICE A detalha os locais de coleta das amostras e a posição da amostra em relação à linha de seixos, quando foi possível a sua observação.

3.2 Quantidade de material coletado

A quantidade de cada amostra foi estimada considerando os ensaios programados para amostra e também duas majorações (uma de 20%, para compensar um eventual teor de umidade de campo, e outra de 40% para compensar as possíveis perdas, ou outras aplicações para o material). A Tabela 3.1 ilustra respectivamente, cada ensaio programado e a provável quantidade mínima de material necessário para realizá-lo. Finalmente, o peso mínimo de solo de uma amostra foi estabelecido em torno de 90 Kg.

Tabela 3.1 - Ensaio programado e a quantidade mínima provável de material necessário para realizá-lo

Ensaio	Amostra seca (g)
Massa específica real dos grãos	500
Análise granulométrica dos solos	1.000
Limite de plasticidade dos solos	100
Limite de liquidez dos solos	100
Mini-MCV	2.500
Ensaio de compactação (cilindro grande sem reaproveitamento de material - adotado apenas para o cálculo da amostra)	35.000
Ensaio de compressão simples	3.600
Ensaio triaxiais cíclicos	9.500
Total	52.300

3.3 Armazenamento, caracterização e classificação dos solos coletados

Após a amostragem, os solos foram secos ao ar, destorroados, passados na peneira de malha 4,8 mm (n.º 4), homogeneizados, quarteados, acondicionados em sacos plásticos devidamente identificados e estocados no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC-USP, até o início dos ensaios de caracterização. Na sequência, os solos foram caracterizados e classificados pelos métodos HRB, USCS e MCT (Miniatura Compactado e Tropical). A seguir, têm-se os procedimentos que foram utilizados para caracterização e para fins de classificação dos setenta e seis solos coletados.

- a) Preparação para ensaios de compactação e caracterização de solos, NBR 6457/1986;
- b) Densidade real dos solos, NBR 6508/1984;
- c) Análise granulométrica dos solos, NBR 7181/1984;
- d) Limite de plasticidade dos solos, NBR 7180/1984;
- e) Limite de liquidez dos solos, NBR 6459/1984;
- f) Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV, DNER-ME 258/94; e
- g) Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão, DNER-ME 256/94.

Observa-se que a amostra 74 foi descartada por apresentar problemas de compactação (exudação excessiva) durante o ensaio para classificação MCT.

A Tabela A.2, do APÊNDICE A, apresenta as principais características e a classificação pelos sistemas HRB, USCS e MCT dos solos coletados. No APÊNDICE A, encontra-se a Tabela A.3 que mostra o D_{60} (diâmetro tal que 60% das partículas do solo, em massa, têm diâmetros menores que ele) dos solos coletados.

3.4 Materiais selecionados para o desenvolvimento trabalho

Os materiais utilizados para cumprir com os objetivos deste trabalho são os solos considerados grossos pela classificação USCS (*Unified Soil Classification System*), ou materiais com mais de 50% de solo retidos na peneira de malha 0,075 mm (n.º 200). Desse modo, dos 76 solos coletados e caracterizados, escolheram-se 44 solos grossos para dar seqüência aos estudos, sendo 27 de comportamento laterítico e 17 de comportamento não laterítico conforme a classificação MCT.

A Tabela 3.2 apresenta as principais características dos solos 44 selecionados para atender os objetivos deste trabalho, inclusive a classificação dos materiais pelos sistemas HRB, USCS e MCT. Observa-se que a % Arg. é a % de solo com diâmetros menores do que 0,005 mm.

Tabela 3.2 - Principais características dos solos 44 solos selecionados, inclusive a classificação destes materiais pelos sistemas HRB, USCS e MCT

Amostra	Solo passante na peneira (%)			% Arg. %	LP %	LL %	Classificação do solo		
	0,42 mm	0,15 mm	0,075 mm				HRB	USCS	MCT
23	94,0	44,3	28,1	18,0	16	19	A-2-4	SM	LA'
24	93,0	46,0	29,8	16,0	15	21	A-2-4	SM-SC	NA'
26	97,5	60,2	39,1	22,0	22	26	A-4	ML	LA'
27	97,0	69,4	50,0	28,0	23	38	A-6	CL	NG'
28	100,0	56,9	32,2	21,0	18	27	A-2-4	SC	LA'
29	67,0	29,2	24,0	15,0	14	21	A-2-4	SM-SC	LA
30	91,0	49,9	37,8	27,0	19	31	A-6	SC	LG'
40	95,0	55,6	44,7	35,0	22	29	A-4	SM-SC	LA'
41	89,0	52,8	42,3	34,0	19	28	A-4	SC	LG'
42	97,5	66,6	45,5	32,0	23	34	A-6	SC	LG'
43	99,0	47,7	28,0	10,0	0	0	A-2-4	SM	NS'
44	99,0	60,9	38,8	29,0	20	34	A-6	SC	LG'
46	99,0	65,5	36,9	23,0	19	34	A-6	SC	LA'
50	93,5	39,8	22,1	12,0	14	19	A-2-4	SM-SC	LA
52	100,0	87,2	47,2	19,0	18	27	A-4	SC	LA'
54	99,0	75,6	41,8	20,0	17	25	A-4	SC	LA'
55	96,5	56,3	36,9	15,0	14	18	A-4	SM	NA'
56	98,0	70,2	34,6	13,0	15	23	A-2-4	SC	NA'
57	97,0	64,0	44,8	24,0	23	31	A-4	SC	LG'
58	98,5	82,2	45,9	14,0	17	27	A-4	SC	NA'
59	99,0	74,7	43,8	19,0	14	24	A-4	SC	LA'
60	98,0	68,4	40,1	22,0	17	24	A-4	SM-SC	LA'
61	99,0	86,5	48,2	22,0	19	26	A-4	SM-SC	LA'
62	99,0	83,4	41,4	22,0	17	21	A-4	SM	NA'
63	99,8	87,6	44,8	22,0	17	22	A-4	SM-SC	LA'
66	85,5	42,4	31,1	25,0	20	34	A-2-6	SC	LA'
68	96,0	49,2	27,2	20,0	14	27	A-2-6	SC	LA'
72	87,5	50,9	39,5	24,0	0	0	A-4	SM	LA'
75	99,0	78,7	49,6	19,0	23	39	A-6	SC	NS'
76	99,0	63,5	32,7	16,0	16	31	A-2-6	SC	LA'
79	97,0	43,3	27,3	17,0	17	26	A-2-4	SC	LA'
80	98,0	49,6	27,5	15,0	0	0	A-2-4	SM	NA'
81	99,0	62,4	32,5	16,0	0	0	A-2-4	SM	NA'
82	99,9	86,9	37,6	16,0	18	28	A-4	SC	LA'
83	99,9	76,1	40,9	19,0	19	28	A-4	SC	NA'
84	99,9	76,1	36,6	19,0	17	20	A-4	CL	NA'
85	99,8	60,2	30,7	16,0	21	32	A-2-6	SC	NA'
88	92,0	56,4	39,4	28,0	20	28	A-4	SC	LA'
89	86,0	27,8	14,7	8,0	0	0	A-2-4	SM	NA
92	98,0	50,0	17,3	13,0	0	0	A-2-4	SM	NA
1	93,0	45,7	30,3	15,0	23	30	A-2-6	SM-SC	NA'
11	91,0	41,1	31,2	25,0	19	32	A-2-6	SC	LA'
14	83,0	36,9	20,0	14,0	16	19	A-2-6	SM	LA
17	88,0	40,9	35,3	29,0	23	40	A-6	CL	NA'

3.5 Os ensaios de compactação tipo Proctor

Empregou-se a compactação por impacto para obter as curvas de compactação das amostras de solo e, deste modo, determinar o valor da massa específica seca máxima e do teor de umidade ótimo para cada um dos solos. Nos ensaios de compactação, utilizou-se o nível de energia modificado de Proctor, conforme o procedimento DER/SP-M13-71, com reaproveitamento de material.

Considerando-se os 44 solos grossos, selecionados para dar continuidade este trabalho, a Tabela 3.3 apresenta, para a energia de compactação modificada de Proctor, os valores das massas específicas secas máximas e dos teores de umidade ótimos respectivos.

A Tabela B.1 do APÊNDICE B apresenta, para 75 solos coletados, os valores das massas específicas secas máximas e dos teores de umidade ótimos respectivos na energia de compactação modificada de Proctor.

Tabela 3.3 - Os valores das massas específicas secas máximas e dos teores de umidade ótimos respectivos na energia de compactação modificada de Proctor para os 44 solos selecionados para dar continuidade ao trabalho

Amostra	P. Modificado		Amostra	P. Modificado	
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ g/cm ³	W _{ot} %		$\rho_{dm\acute{a}x}$ g/cm ³	W _{ot} %
23	2,070	8,90	61	2,050	9,80
24	2,080	9,00	62	2,040	9,20
26	2,030	10,40	63	2,070	9,20
27	1,950	12,00	66	2,030	9,40
28	2,070	9,70	68	2,070	9,00
29	2,090	7,50	72	2,005	11,20
30	2,006	10,46	75	2,020	10,90
40	2,085	11,70	76	2,010	10,25
41	2,035	10,90	79	2,040	9,70
42	1,975	11,20	80	2,025	9,30
43	1,975	11,80	81	2,065	9,00
44	1,940	11,70	82	1,980	11,00
46	2,025	10,20	83	2,040	10,20
50	2,080	8,20	84	2,080	9,30
52	2,000	10,30	85	2,015	10,40
54	2,115	8,45	88	2,020	11,20
55	2,082	8,80	89	2,080	7,90
56	1,965	7,65	92	1,995	9,45
57	2,020	11,20	1	2,018	10,95
58	1,980	10,30	11	2,080	10,70
59	2,140	8,40	14	2,100	8,40
60	2,120	8,80	17	1,948	12,40

3.6 Os ensaios triaxiais cíclicos

O ensaio triaxial cíclico é um meio para caracterizar os materiais de construção dos pavimentos, incluindo os solos do subleito sob uma variedade de condições de umidade, massas específicas e estados de tensões. Portanto, o ensaio simula as condições de cada camada de solo do pavimento, submetida às cargas das rodas dos veículos em movimento.

Durante o ensaio, um corpo-de-prova cilíndrico é submetido a uma tensão confinante estática (fornecida por meio de uma câmara de pressão triaxial) e também às tensões cíclicas axiais. Um ciclo de carregamento dinâmico, aplicado ao corpo-de-prova, consta de 1,0 s, com 0,1 s de carga após um período de repouso de 0,9 s. Assim, o deslocamento axial resiliente (recuperável) total da amostra é medido e usado para calcular o módulo de resiliência do material.

Para realização dos ensaios triaxiais cíclicos, previstos neste trabalho, foi utilizada a prensa de carregamento cíclico Loadtrac II do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa-MG, ilustrada na Figura 3.2. O carregamento aplicado pela prensa é pneumático; as forças são monitoradas através de uma célula de carga e os deslocamentos são medidos por um transdutor instalado externamente à câmara triaxial. O controle do ensaio e o armazenamento de resultados são feitos por um microcomputador.

A Figura 3.3 ilustra um corpo-de-prova coberto com uma membrana de borracha instalado no interior da câmara triaxial.

Figura 3.2 - Prensa de carregamento cíclico Loadtrac II do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa-MG

Figura 3.3 - Corpo-de-prova instalado na câmara triaxial

Os ensaios triaxiais cíclicos, realizados com Loadtrac II, são automatizados através da utilização de um programa de computador denominado RM que permite, entre outras coisas, ao usuário entrar com as informações do corpo-de-prova (diâmetro, altura, peso, LL, LP), com as tensões axiais máximas e de confinamento que se desejam aplicar ao corpo-de-prova; com número de ciclos de carregamento e com intervalo de carga e repouso. Além disso, o programa aplica a tensão de contato automaticamente. Finalmente, o programa permite o monitoramento do ensaio durante sua realização.

Os ensaios foram realizados, utilizando apenas um corpo-de-prova para cada material e observando-se a norma AASHTO T 307-99, para materiais do tipo 2, que trata dos solos para uso em base e subbase rodoviárias com granulometria e características que não os inclui na categoria de materiais tipo 1 (materiais não cimentados de base, subbase e subleito com mais de 70% passando na peneira de n.º 10, ou de # 2,00 mm, e menos de 20% passando na peneira n.º 200, ou de # 0,075 mm, e ainda $IP \leq 10\%$). Todos os materiais escolhidos para o estudo eram materiais tipo 2, com exceção dos materiais das amostras 89 e 92.

A Tabela 3.4 apresenta os níveis de tensão de desvio e de confinamento, e ainda o número de ciclos de aplicação de carga, que foram utilizados nos ensaios triaxiais cíclicos e que estão em conformidade com AASHTO T 307-99 para materiais de base e subbase.

Tabela 3.4 - Estados de tensão utilizados nos ensaios e que são recomendados pela AASHTO T 307-99 para materiais de base e subbase

Seqüência n.º	Tensão de confinamento σ_3 (kPa)	Tensão máxima σ_a (kPa)	Tensão de contato σ_c (kPa)	Tensão de desvio σ_d (kPa)	Número de aplicações de carga
0	103,4	103,4	10,3	93,1	500-1000
1	20,7	20,7	2,1	18,6	100
2	20,7	41,4	4,1	37,3	100
3	20,7	62,1	6,2	55,9	100
4	34,5	34,5	3,5	31,0	100
5	34,5	68,9	6,9	62,0	100
6	34,5	103,4	10,3	93,1	100
7	68,9	68,9	6,9	62,0	100
8	68,9	137,9	13,8	124,1	100
9	68,9	206,8	20,7	186,1	100
10	103,4	68,9	6,9	62,0	100
11	103,4	103,4	10,3	93,1	100
12	103,4	206,8	20,7	186,1	100
13	137,9	103,4	10,3	93,1	100
14	137,9	137,9	13,8	124,1	100
15	137,9	275,8	27,6	248,2	100

Os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos, em forma de modelos para os 42 solos grossos compactados na energia modificada, estão descritos no APÊNDICE C. Para cada um dos modelos são fornecidas as constantes de regressão e coeficiente de determinação (R^2).

- Características dos corpos-de-prova dos ensaios triaxiais cíclicos

Os corpos-de-prova ensaiados foram moldados num molde de 71 mm x 142 mm, estaticamente e em cinco camadas, o que estava de acordo com recomendação da AASHTO T307-99 para material tipo 2. Observa-se que as amostras 89 e 92 foram descartadas do estudo, pois não foi possível obter as condições de compactação desejadas, usando a moldagem por carregamento estático.

A prensa, utilizada para moldagem estática dos corpos-de-prova era uma Versatester 30M, instalada no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC-USP.

O critério de aceitação dos corpos-de-prova, para o ensaio triaxial cíclico, foi o de uma variação máxima de $\pm 0,5\%$ em torno do teor de umidade ótimo e $\pm 3\%$ em torno da massa específica máxima desejada, conforme a norma AASHTO T307-99. Essa última exigência garantiu que todos os corpos-de-prova tivessem um grau de compactação, GC, entre $100\% \pm 2\%$.

Convém destacar a medida cautelar e os procedimentos seguidos para o transporte e para o armazenamento dos corpos-de-prova. Assim, para cada um dos 42 materiais estudados moldaram-se dois corpos-de-prova, os quais foram devidamente envoltos com três camadas de plástico filme e identificados com etiqueta. Além disso, para transportar os corpos-de-prova até Viçosa-MG, os corpos-de-prova foram envolvidos em duas camadas de plástico bolha, e depositados em caixas de isopor revestidas com almofadas como ilustra a Figura 3.4. Finalmente, ao chegarem ao destino, os corpos-de-prova eram retirados das caixas de isopor, envolvidos em saco plástico e armazenados na câmara úmida do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa, como mostra a Figura 3.5, onde permaneciam até a realização dos ensaios.

Figura 3.4 - Corpos-de-prova na caixa de isopor com almofadas

Figura 3.5 - Corpos-de-prova na câmara úmida do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa-MG

3.7 Os ensaios de compressão simples

O ensaio de compressão simples fornece a curva deformação axial do corpo-de-prova versus tensão axial aplicada que serve para determinar a resistência à compressão simples do solo. Além do mais, a curva é importante, pois fornece subsídios para o cálculo do módulo de tangente inicial do solo. Durante o ensaio, um carregamento axial atua sobre corpo-de-prova causando deformações até a ruptura do corpo-de-prova.

Os ensaios de compressão simples, realizados nos 42 solos grossos estudados, foram realizados segundo a NBR 12770/1992. Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma prensa convencional de deformação controlada, utilizada para execução de ensaios CBR, dotada de um sistema automático de aquisição de dados que permitia leitura de dois canais individualmente que transmitiam as informações de uma célula de carga e de um LVDT.

- Características dos corpos-de-prova dos ensaios de compressão simples

Os corpos-de-prova ensaiados foram moldados em um molde de 51,10 mm x 100,51 mm, estaticamente e em três camadas.

O critério de aceitação dos corpos-de-prova, para o ensaio triaxial cíclico, foi o de uma variação máxima de $\pm 0,5\%$ em torno do teor de umidade ótimo e $\pm 3\%$ em torno da massa específica máxima desejada. Essa última exigência garantiu que todos os corpos-de-prova tivessem um grau de compactação, GC, entre $100\% \pm 2\%$.

É importante destacar a medida cautelar e os procedimentos seguidos para o armazenamento dos corpos-de-prova. Assim, para cada um dos 42 materiais estudados, moldaram-se quatro corpos-de-prova, os quais foram devidamente envoltos com três camadas de plástico filme e identificados com etiqueta. Em seguida, os quatro corpos-de-prova eram envolvidos em um saco plástico e armazenados na câmara úmida do Departamento de Transportes da EESC-USP, onde permaneciam até a realização dos ensaios.

- Obtenção do valor da resistência à compressão simples (RCS)

O critério, seguido para se obter o valor da resistência à compressão simples, foi o do cálculo do valor médio da RCS, obtido de três ensaios, quando nenhum dos três valores da RCS individuais, utilizados no cálculo do valor médio, se desviava mais de 20% do valor médio calculado. Contudo, quando o valor da RCS de um ou mais ensaios se desviava mais de 20% em relação ao valor médio calculado com os três valores da RCS, então o valor da RCS do ensaio com maior desvio era descartado; e, finalmente, uma nova média era calculada para definir o valor da RCS, considerando-se, apenas, os dois valores da RCS restantes.

A Tabela 3.5 apresenta, para os 42 solos grossos estudados, os valores médios da resistência à compressão simples na energia modificada de Proctor.

Tabela 3.5 - Valores médios da resistência à compressão simples (RCS) para os 42 solos estudados compactados na energia modificada de Proctor

Amostra	RCS (kPa) P. modificado	Amostra	RCS (kPa) P. modificado
23	314	60	449
24	469	61	528
26	777	62	232
27	1.483	63	405
28	571	66	617
29	441	68	318
30	1.049	72	664
40	1.125	75	877
41	1.289	76	414
42	1.403	79	385
43	367	80	273
44	1.147	81	270
46	627	82	311
50	190	83	377
52	431	84	364
54	493	85	540
55	675	88	812
56	174	1	477
57	751	11	542
58	322	14	193
59	562	17	712

- Obtenção do valor do módulo tangente inicial (E_0)

O critério seguido, para se obter o valor do módulo tangente inicial, foi o do cálculo do valor médio do E_0 , obtido de três ensaios, quando nenhum dos três valores do E_0 individuais utilizados no cálculo do valor médio se desviava mais de 20% do valor médio calculado. Contudo, quando o valor do E_0 de um ou mais ensaios se desviava mais de 20% em relação ao valor médio calculado com os três

valores do E_o , então o valor do E_o do ensaio com maior desvio era descartado, e finalmente, uma nova média era calculada para definir o valor do E_o , considerando-se, apenas, os dois valores do E_o restantes.

O valor do módulo tangente inicial do solo para um ensaio individual foi obtido a partir da curva tensão versus deformação axial, calculando-se o módulo tangente inicial com base na eq. (3.1).

$$E_o = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.1)$$

em que:

E_o = módulo tangente inicial (kPa);

$\Delta\sigma$ = variação de tensão axial (kPa); e

$\Delta\varepsilon$ = variação de deformação axial (%).

A Tabela 3.6 mostra, para os 42 solos grossos estudados, os valores médios dos módulos tangentes iniciais na energia modificada de Proctor.

Tabela 3.6 - Os valores médios dos módulos tangentes iniciais para os 42 solos estudados compactados na energia modificada

Amostra	E _o (kPa) P. modificado	Amostra	E _o (kPa) P. modificado
23	37.454	60	88.059
24	49.205	61	92.667
26	86.392	62	29.808
27	203.295	63	62.334
28	44.400	66	58.595
29	25.041	68	36.210
30	104.429	72	49.186
40	185.668	75	112.180
41	319.160	76	56.500
42	313.307	79	58.555
43	33.030	80	37.843
44	302.666	81	37.948
46	75.709	82	38.921
50	37.639	83	52.651
52	30.909	84	64.933
54	60.250	85	46.449
55	95.000	88	116.190
56	42.583	1	47.619
57	64.583	11	48.866
58	43.802	14	27.470
59	61.907	17	125.241

3.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As microfotografias das amostras de solos grossos, utilizadas para avaliar a microestrutura dos solos de comportamento laterítico e não laterítico, foram obtidas do microscópio eletrônico de varredura, tipo *Digital Scanning Microscope - DSM 960 - ZEISS*, localizado no Instituto de Física de São Carlos (IFSC).

Na realização dos ensaios de MEV, as amostras de solo (material que passa na peneira n.º 200 ou # 0,075 mm) foram fixadas com esmalte incolor sobre pequenos pinos de alumínio com dimensões padronizadas que, em seguida, foram

mantidas em estufa por cerca de 20 minutos para garantir a secagem do esmalte. Depois da secagem o material era submetido a um banho de ouro.

As microfotografias, com uma ampliação de 10.000 vezes, das amostras de solos grossos de comportamento laterítico e não laterítico que foram analisadas neste trabalho estão apresentadas no APÊNDICE D.

3.9 Procedimentos adotados na análise dos resultados

Na seqüência, apresenta-se um resumo das análises realizadas a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa.

3.9.1 Análises dos aspectos concernentes ao caráter laterítico dos solos

Importantes aspectos relacionados ao caráter laterítico dos solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, foram analisados e discutidos no Capítulo 4. Os resultados dos ensaios da classificação MCT foram analisados, considerando-se as classes de solos e sua distribuição no interior do Estado de São Paulo. As inferências do caráter laterítico dos solos, a partir dos resultados da microscopia eletrônica de varredura, foram avaliados e discutidos.

Analísaram-se as relações envolvendo a massa específica seca máxima e a umidade ótima dos solos grossos de comportamento laterítico e não laterítico, com a granulometria e limites plásticos destes materiais. Os desempenhos das relações propostas pelo NCHRP 1-37A (2004), para obtenção da umidade ótima e da massa específica seca máxima, foram avaliadas, considerando-se solos grossos de comportamento laterítico e não laterítico. Finalmente, a influência do caráter laterítico na resistência à compressão, no módulo tangente inicial e no módulo de resiliência do solo, foi analisada e discutida.

3.9.2 Determinação dos melhores modelos para representar o módulo de resiliência

Para definir os melhores modelos usados para representar o comportamento do módulo de resiliência com o estado de tensão atuante no solo, foi feito um estudo baseado nos valores do coeficiente de determinação (R^2) fornecidos por quatro modelos designados pelas letras A, B, C e D, que estão apresentados na Tabela 3.7 pelas eqs. (3.2) a (3.5),

O desempenho dos quatro modelos (A, B, C e D) analisados foram comparados, de maneira que os números 1 e 2 indicavam, respectivamente, o primeiro e o segundo modelo em termos de desempenho avaliado pelo valor de R^2 .

Tabela 3.7 - Os modelos que foram usados para representação do M_R

Modelo	Equação do modelo	Eq.
A	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	(3.2)
B	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	(3.3)
C	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	(3.4)
D	$M_R = Pa \cdot k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{k_3}$	(3.5)

Nas equações dos modelos apresentados tem-se que:

Pa = pressão atmosférica (para Estado de São Paulo, adotou-se $Pa = 101,3$ kPa);

M_R = módulo de resiliência;

k_1 , k_2 e k_3 = constantes de regressão do modelo;

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão;

σ_3 = tensão de confinamento;

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio; e

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica, em que:

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{3} = \sigma_d \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \quad (3.6)$$

3.9.3 Análise das relações envolvendo as constantes de regressão do modelo composto com as propriedades dos solos

Diversas relações indiretas do módulo de resiliência com as propriedades dos solos, onde as constantes de regressão do modelo composto se relacionavam de forma linear com as propriedades do solo, foram desenvolvidas e analisadas. Além disso, avaliaram-se relações não lineares diretas entre módulo de resiliência e o módulo tangente inicial; e também entre o módulo de resiliência e outras propriedades dos solos.

3.9.3.1 Relações entre as constantes de regressão do modelo composto e as propriedades do solo através do método *Forward Stepwise*

O método estatístico *Forward Stepwise* é usado para estabelecer a relação entre a variável resposta (ou dependentes) e as variáveis explicativas (ou independentes) quando se tem um número grande de variáveis explicativas.

O *Forward Stepwise* é um método para construção de um modelo de regressão linear, no qual as variáveis explicativas são introduzidas uma a uma na equação que as relaciona à variável resposta. Além disso, a cada passo (ou a cada variável explicativa que entra na equação) é calculado o valor de R^2 (coeficiente de determinação). Sabe-se que quanto maior o valor de R^2 , melhor será “a qualidade” do modelo ajustado. O processo de adição de variáveis explicativas à equação da relação é finalizado quando se obtém o maior R^2 .

Para desenvolver e analisar as relações indiretas entre o módulo de resiliência e as propriedades dos solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, foram selecionadas sete propriedades dos solos (% passa # 0,075, LL, IP, E_o , RCS, $\rho_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot}) como variáveis explicativas e as constantes k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto, eq. (3.7), como variáveis dependentes (ou resposta). As relações desenvolvidas foram do tipo linear e foi empregado o método *Forward Stepwise* do programa STATISTICA *kernel release* 5.5a.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3.7)$$

em que:

M_R = módulo de resiliência;

k_1 , k_2 e k_3 = constantes de regressão do modelo;

σ_3 = tensão de confinamento; e

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio.

Para determinar as relações lineares entre as constantes de regressão do modelo composto, k_1 , k_2 e k_3 (variáveis dependentes) e as propriedades do solo (variáveis explicativas), foram consideradas três situações distintas:

- a) Todos os solos grossos na energia modificada, $n = 42$ solos;
- b) Solos grossos lateríticos arenosos (LA') na energia modificada, $n = 19$ solos; e
- c) Solos grossos não lateríticos arenosos (NA') na energia modificada, $n = 12$ solos.

Onde n é o número de solos usados no desenvolvimento da relação e solos grossos são os materiais com mais de 50% de solo retidos na peneira n.º 200 (# 0,075 mm).

3.9.3.2 Relações não lineares diretas entre o módulo de resiliência e as propriedades dos solos

a) Relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial

Para analisar o desempenho das relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial, foram estabelecidas relações não lineares através de regressões múltiplas entre as duas variáveis, considerando-se diferentes combinações de tensões.

Para desenvolver as relações entre o módulo de resiliência e módulo tangente inicial, foram utilizados os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos. Ainda, nas relações o M_R (kPa), foi considerado como variável resposta e, as variáveis explicativas foram E_o (kPa), σ_3 (kPa), σ_d (kPa) e θ (kPa). Além disso, no estudo foi utilizado o programa STATISTICA 99 *Edition* e consideradas duas situações de análise:

- a) Solos grossos lateríticos na energia modificada, $n = 27$ solos; e
- b) Solos grossos não lateríticos na energia modificada, $n = 15$ solos.

Onde n é o número de solos usados no desenvolvimento da relação entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial.

Finalmente, nas relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial foram levadas em conta cinco combinações das tensões atuantes no solo conforme apresenta a Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Combinações do módulo tangente inicial com as tensões atuantes no solo para as relações que foram desenvolvidas com o M_R

Casos	Relações
1	$M_R = f(E_o, \sigma_3, \sigma_d)$
2	$M_R = f(E_o, \theta, \sigma_d)$
3	$M_R = f(E_o, \sigma_3)$
4	$M_R = f(E_o, \theta)$
5	$M_R = f(E_o, \sigma_d)$

b) Relações entre o módulo de resiliência e as propriedades dos solos incluindo o módulo tangente inicial

Para analisar o desempenho das relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo incluindo o módulo tangente inicial, foram desenvolvidas relações não lineares, através de regressões múltiplas com uso do programa STATISTICA 99 *Edition*. E, nas relações, o módulo de resiliência foi a variável resposta e nove propriedades dos solos (% passa # 0,42, % passa # 0,15, % passa # 0,075, LL, IP, $\rho_{dm\acute{a}x}$, W_{ot} , E_o e RCS) incluindo as tensões atuantes no solo (σ_3 e σ_d) foram as variáveis explicativas. Finalmente, no desenvolvimento das relações foram consideradas duas situações distintas:

- a) Solos grossos lateríticos na energia modificada, $n = 27$ solos; e
- b) Solos grossos não lateríticos na energia modificada, $n = 15$ solos.

Onde n representa o número de solos usados no desenvolvimento das relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo.

3.9.4 Aplicação das redes neurais artificiais na previsão do módulo de resiliência

As redes neurais artificiais (RNAs) foram utilizadas neste trabalho para avaliar se existe relação consistente entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo, incluindo as tensões atuantes no solo, e para descrever as principais variáveis que influenciam no módulo de resiliência.

3.9.4.1 Informações preliminares e diretrizes básicas

Para desenvolver as redes neurais artificiais (RNAs), utilizadas previsão do módulo de resiliência e na descrição das variáveis que influenciam na sua determinação, foi empregado o programa EASYNN_{plus} V6.0h (2005). As RNAs foram do tipo Múltiplas Camadas Alimentadas Adiante (*Multilayer Perceptron* - MLP) com a utilização do algoritmo *backpropagation* para o treinamento da rede.

O programa EASYNN_{plus} V6.0h (2005) permite importar arquivos textos preparados no programa Excel, criação de redes neurais com diversas arquiteturas, monitoramento do erro médio de treinamento da rede em tempo real, avaliar a importância que cada variável explicativa tem na composição da variável resposta e, finalmente, obter um arquivo texto com as respostas, fornecidas pela rede, que podem ser comparadas com os valores dos ensaios.

No processo de aprendizagem das redes neurais, foram utilizados dois conjuntos: o conjunto de treinamento e o conjunto de validação. Os dois conjuntos eram disjuntos; o dado de um conjunto não era repetido no outro. 80% dos dados dos ensaios foram usados no conjunto de treinamento da rede e 20% dos dados dos ensaios foram usados no conjunto de validação da rede. E foram construídas redes neurais de modo que a(s) camada(s) oculta(s) possuísem, no mínimo, a mesma quantidade de neurônios da primeira camada da rede.

Foram treinadas várias redes neurais com arquiteturas, momento e taxas de aprendizagem diferentes, assim, o número de neurônios das camadas intermediárias, a taxa de aprendizagem e o momento foram mudados experimentalmente. Para cada rede treinada foi apresentado não o só tipo da arquitetura da rede, mas também o erro médio de treinamento.

Os valores dos módulos de resiliência, utilizados para construção das redes neurais, foram obtidos através do modelo composto ($M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$). Assim sendo, foram gerados para cada solo cem (100) valores do módulo de resiliência considerando a variação do estado de tensão de forma aleatória entre os valores máximos e mínimos da norma AASHTO T307-99. Foram analisadas duas situações distintas: uma para solos compactados na energia modificada e outra para solos compactados na energia normal. Os solos compactados na energia normal foram os materiais ensaiados por Takeda (2006). Os limites máximos e mínimos dos estados de tensão, que foram adotados para se obterem os módulos de resiliência dos solos compactados na energia modificada e na energia normal, foram os limites dos

estados de tensão, da norma em questão, correspondentes respectivamente à base e ao subleito.

Finalmente, para avaliar o módulo de resiliência dos solos através das redes neurais e das propriedades dos solos; e ainda para definir a influência que cada uma das propriedades do solo têm no módulo de resiliência, foram obtidos dois tipos de redes neurais artificiais: Rede ótima 1 e rede ótima 2, cujo procedimento de obtenção é apresentado em seguida.

3.9.4.2 Procedimento para determinar as redes ótimas 1 e 2

- Construção da rede ótima preliminar 1 (ROP1)

Para se obter a rede ótima preliminar 1, que precede a obtenção das redes ótimas 1 e 2, foram seguidos os seguintes passos:

- i) Construíram-se redes neurais com duas camadas internas, de modo que a primeira camada interna tinha o mesmo número de neurônios da camada de entrada da rede acrescidos de 0, 4 e 12 neurônios; de maneira que a segunda camada interna da rede tinha o mesmo número de neurônios da camada de entrada da rede acrescidos de 0, 4 e 12 neurônios.
- ii) Construíram-se redes com uma camada interna de neurônios, de modo que o número de neurônios da camada interna era igual ao número de neurônios da camada de entrada da rede, acrescidos de 0, 4 e 12 neurônios.

iii) Construíram-se redes com mesma arquitetura, mas diferentes taxas de aprendizado e diferentes momentos. As combinações, entre taxa de aprendizado e momento, levaram em conta três taxas de aprendizado 0,3, 0,5 e 0,7 (valores de taxa de aprendizado acima de 1,5 resultam em aprendizado ruim) e três momentos 0,3, 0,5 e 0,7 (momento varia de 0 a 0,9). Foram construídas redes com as seguintes combinações para taxa de aprendizado e momento: (0,3; 0,3), (0,3; 0,5), (0,3; 0,7), (0,5; 0,3), (0,5; 0,5), (0,5; 0,7), (0,7; 0,3), (0,7; 0,5) e (0,7; 0,7).

Diante do exposto, foram geradas 108 redes neurais para definir a rede ótima preliminar 1.

iv) Características do treinamento usado para definir rede ótima preliminar 1.

Nesta etapa, foi estabelecido um erro médio de treinamento alvo (EMT) de 0,01% (0,0001) e tempo de processamento de cálculo, ou de aprendizado, de 45 minutos (2.700 segundos), então se verificou entre as 108 redes a que mais se aproximou do erro médio de treinamento alvo. Assim, foi definida a rede ótima preliminar 1 (ROP1).

O tempo de aprendizado (45 minutos) adotado baseou-se em uma avaliação prévia da convergência do EMT (erro médio de treinamento) da rede.

v) As entradas da rede ótima preliminar 1 (ROP1) foram: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,42, % passa # 0,15, % passa # 0,075, % Arg., LL (%), IP (%), $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). A saída da rede ótima preliminar 1 foi o M_R ; utilizou-se kPa ou MPa, dependendo da energia de compactação do solo.

Em que % Arg. é a % de solo com diâmetros menores do que 0,005 mm.

vi) Anotou-se o EMR (erro médio relativo) da rede ótima preliminar 1.

Sendo:

$$EMR = \frac{\left[\left(\sum \frac{|M_{RReal} - M_{RRNA}|}{M_{RReal}} \right) \cdot 100 \right]}{n} \quad (3.8)$$

em que:

EMR = erro médio relativo;

M_{RReal} = valor do módulo de resiliência (modelo composto);

M_{RRNA} = valor do módulo de resiliência (previsto pela RNA); e

n = número de dados utilizados para avaliar a RNA.

Para os casos em que não existia um conjunto de teste específico, o EMR foi calculado com os dados do conjunto de validação.

- Construção das redes ótimas preliminares 2 e 3

Para se obterem as redes ótimas preliminares 2 e 3, que precediam a obtenção das redes ótimas 1 e 2, foram seguidos os seguintes passos:

i) Uma vez definida a rede ótima preliminar 1, as redes ótimas preliminares 2 e 3 foram obtidas através de um estudo das entradas da rede ótima preliminar 1. Esse estudo procurava avaliar a influência das variáveis de entrada de menor importância na rede ótima preliminar 1.

ii) Características do treinamento usado para avaliar as redes ótimas preliminares 2 e 3.

Nessa etapa, foi feito um estudo baseado nas variáveis de entrada da rede, onde foram descartadas as variáveis que menos influenciam na rede ótima preliminar 1 e então geradas novas redes; sendo que cada nova rede era gerada em um período de 45 minutos (2.700 segundos), com erro médio de treinamento alvo de 0,01% (0,0001).

iii) As novas redes geradas (no passo ii), embora possuísem menor número de entradas que a rede preliminar 1, apresentavam: a mesma taxa de aprendizagem e o mesmo momento da rede ótima preliminar 1. Além disso, as novas redes geradas apresentavam uma arquitetura das camadas internas, igual a rede ótima preliminar 1.

iv) Anotaram-se os EMRs (erros médios relativos) das novas redes geradas que possuíam menor número de entradas que a rede ótima preliminar 1. A rede, gerada com o menor número de entradas do que rede ótima preliminar 1 e que apresentava o menor EMR, era a rede ótima preliminar 2.

v) A rede ótima preliminar 3 era a que apresentava o mínimo de entradas para um valor de EMR razoavelmente próximo ao valor do EMR das redes ótimas preliminares 1 ou 2.

vi) Finalmente, observa-se que, mesmo quando as tensões de confinamento (σ_3) e de desvio (σ_d), que eram entradas nas redes, apresentavam pouca influência na rede ótima preliminar 1, não eram descartadas no estudo de eliminação de entradas de rede, pois essa é uma premissa básica para determinação da rede ótima preliminar 2 e da rede ótima preliminar 3. Sabe-se que as tensões têm uma íntima relação com o módulo de resiliência, por isso não podem ser descartadas, mesmo quando as suas influências são pequenas.

- Construção da rede ótima 1

Para obtenção da rede ótima 1, foi comparada a rede ótima preliminar 1 com a rede ótima preliminar 2. Entre as duas redes, a que apresentou o menor EMR foi submetida a um aprendizado de 7 horas (25.200 segundos), com erro médio de treinamento alvo de 0,01% (0,0001) e teve um novo EMR calculado. A rede, obtida após 7 horas de aprendizado, foi a Rede Ótima 1. Buscou-se, com a Rede Ótima 1, a máxima eficiência para relacionar as entradas com a saída da rede para um conjunto de variáveis de entrada.

Adotou-se um tempo de aprendizado de 7 horas, porque se observou que, para as redes neurais estudadas após esse tempo, o erro médio de treinamento praticamente não sofria mais variação.

- Construção da rede ótima 2

Para o caso em estudo, procurou-se, com a Rede Ótima 2, uma rede eficiente para um número mínimo de variáveis de entrada de rede. Para obter a Rede Ótima 2, a rede ótima preliminar 3 foi submetida a um aprendizado de 7 horas (25.200 segundos), com erro médio de treinamento de 0,01% (0,0001) e teve um novo EMR calculado.

3.9.4.3 Situações que serão analisadas no Capítulo 4

Tendo em vista a obtenção das melhores redes, que relacionam o módulo de resiliência às propriedades do solo, tanto para o caso dos solos compactados na energia modificada, como para os solos compactados na energia normal, conforme será analisado no Capítulo 4. Então, as melhores redes obtidas serão utilizadas numa nova etapa de estudo em que será estudada a previsão do módulo de resiliência de materiais não utilizados na calibração das redes; e as redes onde as variáveis que correlacionam entre si serão parcialmente excluídas, por exemplo, das variáveis RCS e E_o , e W_{ot} e $\rho_{dm\acute{a}x}$, serão consideradas nas redes apenas RCS e W_{ot} .

3.9.5 Avaliação da umidade ótima e da massa específica seca máxima dos solos a partir de redes neurais artificiais

Finalmente, tendo como base as principais informações relacionadas à arquitetura das redes utilizadas na previsão do módulo de resiliência dos solos compactados na energia modificada, serão desenvolvidas e analisadas duas novas redes neurais: uma rede para previsão da umidade ótima e outra rede para previsão da massa específica seca máxima.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Inicialmente, neste capítulo é feito um estudo dirigido aos aspectos concernentes ao caráter laterítico dos solos grossos do interior do Estado de São Paulo, em que são considerados os resultados da classificação MCT, as microfotografias do MEV, os parâmetros de compactação ($\rho_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot}) e as propriedades mecânicas (RCS , E_o e M_R) dos solos. Na seqüência, os melhores modelos para representar o módulo de resiliência dos solos são definidos e discutidos. Além disso, relações lineares e não lineares para previsão do módulo de resiliência são desenvolvidas e analisadas.

Também, neste capítulo, as redes neurais artificiais são aplicadas para previsão do módulo de resiliência e para definir as principais variáveis que influenciam nas redes para obtenção do módulo de resiliência de solos compactados na energia modificada e normal. As redes neurais usadas na previsão do módulo de

resiliência são descritas e têm seu desempenho analisado e discutido. Finalmente, redes neurais são desenvolvidas para previsão da massa específica seca máxima e da umidade ótima dos solos compactados na energia modificada.

4.2 Estudo dos aspectos concernentes ao caráter laterítico dos solos

Neste tópico, são discutidos aspectos relacionados ao caráter laterítico dos solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada. Os resultados dos ensaios da classificação MCT dos solos são analisados e as inferências do caráter laterítico dos solos, a partir dos resultados da microscopia eletrônica de varredura, são apresentadas e discutidas.

São analisadas, ainda, neste tópico, relações envolvendo a massa específica seca máxima e a umidade ótima dos solos lateríticos e não lateríticos com a granulometria e limites plásticos destes materiais. Complementarmente, são avaliados e discutidos os desempenhos de algumas relações propostas pelo *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures* (NCHRP 1-37A, 2004), para obtenção da umidade ótima e da massa específica seca máxima, a partir de resultados de ensaios de caracterização. Finalmente, destaca-se a influência do caráter laterítico na resistência à compressão, no módulo tangente inicial e no módulo de resiliência do solo.

4.2.1 Resultados da classificação MCT (Miniatura Compactado e Tropical)

A Figura 4.1 mostra o ábaco da classificação MCT, onde foram lançados no gráfico os quarenta e quatro solos grossos coletados no interior do Estado de São Paulo a exceção do Vale do Ribeira, selecionados inicialmente para desenvolvimento dos estudos propostos neste trabalho.

Figura 4.1 - Distribuição, no ábaco da classificação MCT, dos 44 materiais grossos escolhidos para atender os objetivos deste trabalho

A Tabela 4.1 apresenta a quantidade de solos grossos selecionados inicialmente para o estudo considerando cada classe MCT, e ainda, os solos separados segundo o comportamento laterítico e não laterítico.

Tabela 4.1 - Distribuição dos solos grossos selecionados para o estudo nas classes MCT

Classe MCT	Lateríticos Quantidade	%	Classe MCT	Não lateríticos Quantidade	%
LA	3	7	NA	2	5
LA'	19	43	NA'	12	27
LG'	5	11	NG'	1	2
			NS'	2	5
Total	27	61	Total	17	39

Analisando-se a Figura 4.1 e a Tabela 4.1, pode-se observar que, dos quarenta e quatro solos grossos selecionados, vinte e sete, ou 61% do total, são identificados como solos de comportamento laterítico, sendo que, três (7% do total) são classificados como areias lateríticas (LA), dezenove (43% do total) são classificados como lateríticos arenosos (LA') e cinco (11% do total) são classificados como lateríticos argilosos (LG'). Os outros 39% das amostras selecionadas, ou seja dezessete, são identificados como solos de comportamento não laterítico. Dentre estes, dois (5% do total) são classificados como areias não lateríticas (NA), doze (27% do total) são classificados como não lateríticos arenosos (NA'), um (2% do total) é classificado como não laterítico argiloso (NG') e dois (5% do total) são classificados como não laterítico siltosos (NS').

A Figura 4.2 mostra o mapa do Estado de São Paulo, com a indicação dos locais de coleta dos solos grossos selecionados, com os solos identificados em função da classe MCT. Analisando-se a Figura 4.2, observa-se que os solos selecionados estão distribuídos de maneira aproximadamente uniforme no interior do Estado de São Paulo. Destaca-se que os solos coletados ao longo da rodovia SP-294

(Comandante João Ribeiro de Barros), região noroeste do estado, foram, em sua maioria, não lateríticos arenosos (NA').

Figura 4.2 - Mapa do Estado de São Paulo com a indicação dos locais dos solos selecionados para o estudo e a identificação da classe MCT dos solos

Finalmente, analisando-se as Figuras 4.1 e 4.2, pode-se observar que todas as classes de solos da classificação MCT foram encontradas no interior do Estado de São Paulo, e que os solos grossos, encontrados no interior do Estado, são, em sua maioria, solos de comportamento laterítico, representando 61% dos solos grossos coletados. As areias lateríticas (LA') representaram 43% dos solos grossos coletados, ou seja, o solo grosso mais comum encontrado no interior do Estado.

Quanto às ocorrências de solos não lateríticos no interior do Estado de São Paulo, destacam-se os solos não lateríticos arenosos (NA') que representaram 27% dos solos grossos coletados.

4.2.2 Inferência do caráter laterítico e não laterítico dos solos com base nos resultados da microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico tem um valor especial no estudo da microestrutura do solo e na confirmação da presença de argilominerais, por suas características morfológicas (Fookes, 1997). Nesta etapa, foram analisadas as microfotografias de 41 solos estudados, com o intuito de encontrar padrões de imagem que permitissem distinguir os solos, segundo a sua gênese laterítica e não laterítica.

Nas análises das microfotografias, entre os padrões utilizados para diferenciar os solos de comportamento laterítico dos solos de comportamento não lateríticos, estão aqueles descritos por Nogami (1985), pois de acordo com ele, na microestrutura dos solos lateríticos, os grãos individualizados são difíceis de serem distinguidos no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os grãos desses solos formam massas esponjosas, ou com aspecto de “pipoca”, com contornos predominantemente arredondados. Já na microestrutura dos solos de comportamento não laterítico, estão presentes contornos característicos de cristais: faces planas e arestas retilíneas. Além do mais, um outro padrão referente aos solos lateríticos, considerado nas análises, foi o aspecto “cimentado” do conjunto de partículas conforme destacado por Takeda (2006).

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os resultados das relações entre as indicações fornecidas a partir dos ensaios realizados no MEV e a classificação MCT dos solos estudados, mostrando as concordâncias e as discordâncias obtidas na comparação entre as características do solo inferidas na microfotografia e a classificação MCT. As 41 microfotografias dos solos estudados com uma ampliação de 10.000 vezes são apresentadas no APÊNDICE D.

Percebe-se na Tabela 4.2 que, para os solos lateríticos segundo a MCT, houve uma concordância de 96% entre os padrões de imagem inferidos dos solos, a partir das microfotografias, e o caráter laterítico dos solos segundo a MCT. Os resultados obtidos para solos lateríticos estão de acordo com os apresentados por Takeda (2006) que obteve uma concordância de 100% em um processo de identificação para esse tipo de solo quando utilizado microfotografias do MEV.

Conforme os resultados das análises das microfotografias apresentados na Tabela 4.3, pode-se observar que a concordância entre os padrões de imagem inferidos dos solos e o caráter não laterítico dos solos segundo a MCT se realizou para 11 amostras ou 73% do total das amostras analisadas. Convém destacar que para solos não lateríticos, Takeda (2006) encontrou uma concordância de 57% em uma análise comparativa similar.

Os bons resultados, obtidos nas análises através das inferências do caráter laterítico e não laterítico dos solos por meio de microfotografias do MEV, servem para confirmar os padrões de imagem sugeridos por Nogami (1985) para solos de

comportamento laterítico e não laterítico e por Takeda (2006) para solos de comportamento laterítico.

Tabela 4.2 - Característica inferida a partir da microfotografia de solos lateríticos e comparação com a classificação MCT

Amostra	Característica inferida a partir da microfotografia	MCT	Concordância entre os resultados
23	L	LA'	Sim
26	L	LA'	Sim
28	L	LA'	Sim
29	L	LA	Sim
30	L	LG'	Sim
40	L	LA'	Sim
41	L	LG'	Sim
42	L	LG'	Sim
44	L	LG'	Sim
46	L	LA'	Sim
50	L	LA	Sim
52	L	LA'	Sim
54	L	LA'	Sim
57	L	LG'	Sim
59	L	LA'	Sim
60	L	LA'	Sim
61	L	LA'	Sim
63	L	LA'	Sim
66	L	LA'	Sim
68	L	LA'	Sim
72	L	LA'	Sim
76	L	LA'	Sim
79	L	LA'	Sim
82	NL	LA'	Não
88	L	LA'	Sim
14	L	LA	Sim
Concorda			25
Discorda			1

(L - Laterítico; NL - Não laterítico)

Tabela 4.3 - Característica inferida a partir da microfotografia de solos não lateríticos e comparação com a classificação MCT

Amostra	Característica inferida a partir da microfotografia	MCT	Concordância entre os resultados
24	NL	NA'	Sim
27	NL	NG'	Sim
43	NL	NS'	Sim
55	NL	NA'	Sim
56	L	NA'	Não
58	NL	NA'	Sim
62	L	NA'	Não
75	NL	NS'	Sim
80	L	NA'	Não
81	NL	NA'	Sim
83	NL	NA'	Sim
84	NL	NA'	Sim
85	NL	NA'	Sim
92	L	NA	Não
1	NL	NA'	Sim
Concorda			11
Discorda			4

(L - Laterítico; NL - Não laterítico)

Finalmente, dada a rapidez do ensaio de MEV para solos, o método de análise de inferir o caráter laterítico ou não laterítico do solo, através das microfotografias obtidas do microscópio eletrônico com ampliação de 10.000 vezes, pode ser útil para diferenciar os solos de comportamento laterítico e não laterítico da classificação MCT em análises que envolvam grandes quantidades de amostras de solo. Pois, de quarenta e uma microfotografias observadas, utilizando-se padrões de imagens de referência comparativa, apenas cinco se mostraram discordantes quanto ao caráter laterítico e não laterítico da classificação MCT.

4.2.3 Análise de relações envolvendo os parâmetros de compactação dos solos lateríticos e não lateríticos

Os ensaios de compactação foram realizados na energia modificada do ensaio de Proctor para determinação da umidade ótima e da massa específica seca máxima (W_{ot} , $\rho_{dm\acute{a}x}$) dos quarenta e quatro solos estudados, conforme apresentado no Capítulo 3.

Nessa fase do estudo, foram desenvolvidas e analisadas diversas relações envolvendo os parâmetros de compactação dos solos de comportamento lateríticos e não lateríticos compactados na energia modificada. Também foi analisado o desempenho dos modelos da NCHRP 1-37A (2004) na previsão da umidade ótima e da massa específica seca máxima dos solos considerados.

4.2.3.1 Relações lineares envolvendo os parâmetros de compactação e propriedades físicas dos solos lateríticos e não lateríticos

Inicialmente, foi verificada a existência da relação entre a massa específica seca máxima e a umidade ótima. A Figura 4.3 mostra o gráfico ilustrando as relações entre a massa específica seca máxima e a umidade ótima correspondente, destacando os solos segundo o comportamento laterítico ou não laterítico dos mesmos conforme previsto pela classificação MCT.

Conforme ilustrado na Figura 4.3, a massa específica seca máxima diminui com o aumento da umidade ótima, tanto para solos de comportamento laterítico quanto para solos de comportamento não laterítico. As eq. (4.1) com $R^2 = 0,543$ e eq. (4.2) com $R^2 = 0,375$ representam as relações entre a massa específica seca máxima e a umidade ótima que foram obtidas para solos lateríticos e não lateríticos respectivamente. Além do mais, observado a Figura 4.3, percebe-se que os pares de valores de valores usados para estabelecer as relações, tanto para os solos de comportamento laterítico como os solos de comportamento não laterítico, estão muito dispersos em relação às retas que relacionam a massa específica seca máxima ao teor de umidade ótimo, e isso contribuiu para obtenção de pequenos valores de R^2 nas relações consideradas.

$$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,03.W_{ot} + 2,3441 \quad (4.1)$$

$$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,0208.W_{ot} + 2,2274 \quad (4.2)$$

em que:

$\rho_{dm\acute{a}x}$ = massa específica seca máxima (g/cm³); e

W_{ot} = teor de umidade ótimo (%).

Figura 4.3 - Massa específica seca máxima versus umidade ótima para solos lateríticos e não lateríticos na energia modificada

Procurou-se analisar as relações entre a umidade ótima e as características físicas do solo, selecionadas dentre aquelas que apresentam melhores relações com os resultados dos ensaios de compactação, com destaque para o limite de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP), teor de finos (% passa # 0,075) e teor de argila (% Arg.). As Figuras 4.4 a 4.7 ilustram as relações consideradas para o teor de umidade ótimo, e respectivamente para o LL, IP, % passa # 0,075 e % Arg..

Observa-se nas Figuras 4.4 a 4.7 que, de maneira geral, tanto para os solos de comportamento laterítico quanto para os solos de comportamento não laterítico, a umidade ótima dos solos compactados na energia modificada tende a crescer com o aumento das propriedades físicas: limite de liquidez, índice de plasticidade, % passa # 0,075 e % Arg..

Figura 4.4 - W_{ot} versus limite de liquidez para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada

Figura 4.5 - W_{ot} versus índice de plasticidade para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada

Figura 4.6 - W_{ot} versus % que passa na # 0,075 mm para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada

Figura 4.7 - W_{ot} versus % Arg. para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada

A Tabela 4.4 destaca as eqs. (4.3) a (4.10), para solos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada, que representam as relações obtidas entre o teor de umidade e as propriedades consideradas (limite de liquidez, índice de plasticidade, % passa # 0,075 e % Arg.), e, os respectivos coeficientes de determinação.

Pode-se verificar na Tabela 4.4 que, de maneira geral, para solos de comportamento laterítico e não laterítico, a umidade ótima dos solos grossos do interior do Estado de São Paulo compactados na energia modificada não se relacionou bem com as propriedades em questão (limite de liquidez, índice de plasticidade, % passa # 0,075 e % Arg.). Na mesma tabela, observa-se que para solos de comportamento não laterítico, a relação entre a umidade ótima e o limite de liquidez apresentou o maior R^2 .

Tabela 4.4 - Diversas relações entre a umidade ótima e as propriedades dos solos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada

Solo	Relações	R^2	Eq.
L	$W_{ot} = 0,1848.LL + 4,8541$	0,559	(4.3)
NL	$W_{ot} = 0,1542.LL + 5,7614$	0,771	(4.4)
L	$W_{ot} = 0,1213.IP + 8,775$	0,136	(4.5)
NL	$W_{ot} = 0,221.IP + 8,066$	0,597	(4.6)
L	$W_{ot} = 0,0773.(\% \text{ passa } \# 0,075) + 7,092$	0,275	(4.7)
NL	$W_{ot} = 0,0562.(\% \text{ passa } \# 0,075) + 7,992$	0,275	(4.8)
L	$W_{ot} = 0,1422.(\% \text{ Arg.}) + 6,756$	0,505	(4.9)
NL	$W_{ot} = 0,1393.(\% \text{ Arg.}) + 7,564$	0,314	(4.10)

(L - Laterítico; NL - Não laterítico)

em que:

W_{ot} = teor de umidade ótimo (%);

LL = limite de liquidez (%);

IP = índice de plasticidade (%);

% passa # 0,075 = % de solo que passa na peneira de malha 0,075 mm; e

% Arg. = % de solo com diâmetros menores do que 0,005 mm.

De forma similar, das relações desenvolvidas para a umidade ótima, também foram investigadas as relações entre a massa específica seca máxima e as características físicas do solo (limite de liquidez, índice de plasticidade, % passa # 0,075 e % Arg.). As Figuras 4.8 a 4.11 mostram as relações consideradas para a massa específica seca máxima, e respectivamente para o LL, IP, % passa # 0,075 e % Arg..

Observa-se nas Figuras 4.8 a 4.11 que, de maneira geral, tanto para os solos de comportamento laterítico quanto para os solos de comportamento não laterítico, a massa específica seca máxima dos solos compactados na energia modificada tende a decrescer com o aumento das propriedades físicas consideradas (limite de liquidez, índice de plasticidade, % passa # 0,075 e % Arg.).

Figura 4.8 - $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus limite de liquidez para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada

Figura 4.9 - $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus índice de plasticidade para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada

Figura 4.10 - $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus % que passa na # 0,075 para solos de comportamento laterítico e não laterítico na energia modificada

Figura 4.11 - $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus % Arg. para solos de comportamento laterítico não laterítico na energia modificada

A Tabela 4.5 apresenta as eqs. (4.11) a (4.18), para solos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada, que representam as relações desenvolvidas entre as massas específicas secas máximas e as propriedades consideradas (limite de liquidez, índice de plasticidade, % passa # 0,075 e % Arg.), além disso, os respectivos coeficientes de determinação.

Analizada a Tabela 4.5, pode-se observar que, de maneira geral, a massa específica seca máxima dos solos compactados na energia modificada não se relacionou bem com as propriedades em questão. Além disso, observa-se na Tabela 4.5 que para solos não lateríticos a relação entre a massa específica seca máxima e o índice de plasticidade apresentou o maior R^2 .

Tabela 4.5 - Diversas relações entre a massa específica seca máxima e as propriedades dos solos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada

Solo	Relações	R^2	Eq.
L	$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,0066.LL + 2,2284$	0,420	(4.11)
NL	$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,0044.LL + 2,1405$	0,481	(4.12)
L	$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,006.IP + 2,103$	0,199	(4.13)
NL	$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,0076.IP + 2,089$	0,555	(4.14)
L	$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,0015.(\% \text{ passa } \# 0,075) + 2,102$	0,063	(4.15)
NL	$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,0012.(\% \text{ passa } \# 0,075) + 2,102$	0,068	(4.16)
L	$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,0027.(\% \text{ Arg.}) + 2,106$	0,109	(4.17)
NL	$\rho_{dm\acute{a}x} = -0,0028.(\% \text{ Arg.}) + 2,069$	0,113	(4.18)

(L - Laterítico; NL - Não laterítico)

em que:

W_{ot} = teor de umidade ótimo (%);

% passa # 0,075 = % de solo que passa na peneira de malha 0,075 mm;

% Arg. = % de solo com diâmetros menores do que 0,005 mm; e

IP = índice de plasticidade (%).

Observando-se as Figuras 4.8 a 4.11, pode-se perceber que a massa específica seca máxima dos solos de comportamento lateríticos tentem a ser maiores do que as dos solos de comportamento não lateríticos. Isso pode ser explicado por uma maior concentração de minerais pesados tais como hematita, magnetita, entre outros óxidos e hidróxidos de ferro presentes nos solos lateríticos. Além disso, segundo Takeda (2006), de maneira geral, os solos de comportamento laterítico apresentam índices de vazios inferiores aos dos solos de comportamento não laterítico.

4.2.3.2 - Desempenho dos modelos da NCHRP 1-37A (2004) na previsão da umidade ótima e massa específica seca máxima dos solos de comportamento laterítico e não laterítico

O *Guide For Mechanistic - Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures* - (NCHRP 1-37A, 2004) permite o uso de relações em detrimento da realização de ensaios para obtenção do teor de umidade ótimo (W_{ot}) e da massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$). No caso dessas variáveis, as relações matemáticas indicadas são funções de propriedades físicas dos solos tais como P_{200} (% passa # 0,075), IP, D_{60} (diâmetro tal que 60% das partículas do solo, em massa, têm

diâmetros menores que ele), grau de saturação (S_{ot}) e peso específico dos sólidos (G_s). As relações preconizadas são apresentadas na Tabela 4.6 e são representadas pela eq. (4.19), que depende das eqs. (4.20) a (4.22), e pela eq. (4.23) que depende das eqs. (4.24) e (4.25).

Tabela 4.6 - Relações matemáticas para determinação dos parâmetros físicos de compactação segundo a NCHRP 1-37A (2004)

Teor de umidade ótimo	Eq.
$W_{ot} = W_{ot(t99)} - \Delta W_{ot}$	(4.19)
em que:	
$\Delta W_{ot} = 0,0156.(W_{ot(t99)})^2 - 0,1465.W_{ot(t99)} + 0,9$	(4.20)
$W_{ot} = W_{ot(t99)} - \Delta W_{ot}$	(4.21)
$W_{ot(t99)} = 8,6425.(D_{60})^{-0,1038}$	(4.22)
Massa específica seca máxima	Eq.
$\rho_{dm\acute{a}x} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + \frac{W_{ot} \cdot G_s}{S_{ot}}}$	(4.23)
em que:	
$G_s = 0,041.(P_{200} \cdot IP)^{0,29} + 2,65$	(4.24)
$S_{ot} = 6,752.(P_{200} \cdot IP)^{0,147} + 78$	(4.25)

As relações, propostas pela NCHRP 1-37A (2004), para obtenção da umidade ótima e massa específica seca máxima, foram utilizados para os solos da pesquisa para se testar a sua aplicabilidade aos materiais estudados.

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam, para solos de comportamento laterítico e não laterítico, respectivamente, os valores das umidades ótimas calculados a partir das eqs. (4.19) a (4.22) e os valores correspondentes obtidos nos ensaios. Ainda são mostrados os erros médios relativos que foram obtidos nas previsões dos teores de umidade dos solos em questão usando a NCHRP 1-37A (2004).

Figura 4.12 - Valores observados de W_{ot} versus valores de W_{ot} previstos pelo modelo da NCHRP 1-37A (2004) - Considerando-se solos de comportamento lateríticos na energia modificada

Figura 4.13 - Valores observados de W_{ot} versus valores de W_{ot} previstos pelo modelo da NCHRP 1-37A (2004) - Considerando-se solos de comportamento não lateríticos na energia modificada

A Tabela 4.7 apresenta estatísticas (valores máximos e mínimos, média, desvios padrão e intervalo de variação) dos dados utilizados para calcular o erro médio relativo de previsão da umidade ótima para solos de comportamento laterítico e não laterítico. Comparando-se as estatísticas dos valores da W_{ot} previstos e observados no laboratório pode-se observar que, tanto para solos de comportamento lateríticos como para solos de comportamento não laterítico, apesar dos valores médios de W_{ot} previstos e W_{ot} observados serem próximos, os intervalos de variação, os desvios padrão e os coeficientes de variação são muito diferentes, o que contribui para aumentar o erro médio relativo. Além disso, o fato, de os intervalos de variação dos valores W_{ot} observados serem maiores do que o intervalo de valores W_{ot} previstos, contribuiu para uma tendência de distribuição horizontal dos valores de W_{ot} previstos em relação à reta dos valores de W_{ot} observados como mostra as Figuras 4.12 e 4.13.

Tabela 4.7 - Estatística dos dados utilizados para calcular o erro médio relativo de previsão da umidade ótima para solos de comportamento laterítico e não laterítico

Estatística	Comp. laterítico		Comp. não laterítico	
	W_{ot} (%)		W_{ot} (%)	
	Previstos	Observados	Previstos	Observados
Valor máximo	9,90	11,70	11,25	12,00
Valor mínimo	8,63	7,50	8,99	7,65
Interv. de variação	1,27	4,20	2,26	4,35
Média	9,39	9,92	9,57	9,81
Desvio padrão	0,294	1,179	0,501	1,236
Coef. de variação	0,031	0,119	0,052	0,126

Finalmente, os valores pouco elevados dos erros médios relativos obtidos, de 10,489%, para solos de comportamento laterítico, e 9,127%, para solos de comportamento não laterítico, na previsão da umidade ótima dos materiais estudados indicam, que as equações propostas pela NCHRP 1-37A (2004) podem ser úteis para estimar a umidade ótima dos solos grossos compactados na energia modificada, em etapas preliminares do estudo para implantação de rodovias.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam, para solos de comportamento laterítico e não laterítico, respectivamente, os valores das massas específicas secas máximas calculados a partir das eqs. (4.23) a (4.25) e os valores correspondentes do mesmo parâmetro obtidos através dos ensaios. Além disso, são destacados os erros médios relativos que foram obtidos nas previsões das massas específicas secas máximas, para os solos considerados.

Figura 4.14 - Valores observados de $\rho_{dm\acute{a}x}$ versus valores de $\rho_{dm\acute{a}x}$ previstos pelo modelo da NCHRP 1-37A (2004) - Considerando-se solos de comportamento lateríticos na energia modificada

Figura 4.15 - Valores observados de $\rho_{d\text{máx}}$ versus valores de $\rho_{d\text{máx}}$ previstos pelo modelo da NCHRP 1-37A (2004) - Considerando-se solos de comportamento não lateríticos na energia modificada

A Tabela 4.8 mostra informações estatísticas (valores máximos e mínimos, média, desvios padrão e intervalo de variação) dos dados utilizados para calcular o erro médio relativo de previsão da massa específica seca máxima, para solos de comportamento laterítico e não laterítico. Comparando-se as estatísticas dos valores de $\rho_{d\text{máx}}$ previstos e observados no laboratório, pode-se constatar que, de maneira geral, tanto para solos de comportamento lateríticos como para solos de comportamento não laterítico, as médias dos valores de $\rho_{d\text{máx}}$ previstos são maiores dos que dos valores de $\rho_{d\text{máx}}$ observados, isso contribuiu para aumentar o erro médio relativo e para concentrar os valores previstos acima da reta de erro nulo como mostra as Figuras 4.14 e 4.15.

Tabela 4.8 - Estatística dos dados utilizados para calcular o erro médio relativo de previsão da massa específica seca máxima para solos de comportamento laterítico e não laterítico

Estatística	Comp. laterítico		Comp. não laterítico	
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)		$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	
	Previstos	Observados	Previstos	Observados
Valor máximo	2,262	2,140	2,263	2,082
Valor mínimo	1,940	1,940	2,007	1,948
Interv. de variação	0,322	0,200	0,256	0,134
Média	2,218	2,047	2,154	2,021
Desvio padrão	0,046	0,048	0,096	0,047
Coef. de variação	0,021	0,023	0,045	0,023

Os baixos erros médios relativos obtidos, de 8,436% para solos de comportamento laterítico e 7,350% para solos de comportamento não laterítico, na previsão da massa específica seca máxima, indicam que as equações propostas pela NCHRP 1-37A (2004) podem ser úteis para estimar a massa específica seca máxima dos solos grossos compactados na energia modificada, em etapas preliminares do estudo para implantação de rodovias.

4.2.4 Influência do caráter laterítico e não laterítico no comportamento mecânico dos solos

Neste tópico, os resultados dos ensaios realizados em 42 solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, foram utilizados para verificar se a natureza laterítica ou não laterítica exerce alguma influência significativa nas propriedades mecânicas do solo: resistência à compressão simples, módulo tangente inicial e módulo de resiliência. Além disso, são apresentadas e discutidas relações entre o E_0 e a RCS para os solos estudados.

4.2.4.1 Influência do caráter laterítico e não laterítico dos solos no comportamento da resistência à compressão simples (RCS)

Nas Tabelas 4.9 e 4.10, são mostrados, para os solos estudados, os valores da RCS para solos lateríticos (da classe LA' e LG') e não lateríticos (da classe NA') respectivamente. Ainda, pode-se observar a RCS média, o desvio padrão da RCS e o coeficiente de variação para cada uma das classes de solo consideradas.

Tabela 4.9 - Valores das resistências à compressão médias para solos lateríticos compactados na energia modificada

Amostra	MCT	RCS (kPa) P. modificado	Amostra	MCT	RCS (kPa) P. modificado
23	LA'	314	30	LG'	1.049
26	LA'	777	41	LG'	1.289
28	LA'	571	42	LG'	1.403
40	LA'	1.125	44	LG'	1.147
46	LA'	627	57	LG'	751
52	LA'	431	Média		1.128
54	LA'	493	Desv. padrão		250
59	LA'	562	Cv		0,222
60	LA'	449			
61	LA'	528	Solos lateríticos (LA' e LG')		
63	LA'	405	Média geral		666
66	LA'	617	Desvio padrão		318
68	LA'	318	Cv		0,478
72	LA'	664			
76	LA'	414			
79	LA'	385			
82	LA'	311			
88	LA'	812			
11	LA'	542			
Média		544			
Desv. padrão		202			
Cv		0,371			

Tabela 4.10 - Valores das resistências à compressão médias para solos não lateríticos arenosos compactados na energia modificada

Amostra	MCT	RCS (kPa) P. modificado
24	NA'	469
55	NA'	675
56	NA'	174
58	NA'	322
62	NA'	232
80	NA'	273
81	NA'	270
83	NA'	377
84	NA'	364
85	NA'	540
1	NA'	477
17	NA'	712
Média		407
Desv. padrão		171
Cv		0,421

Considerando-se as Tabelas 4.9 e 4.10, pode-se constatar que para solos do interior do Estado São Paulo, compactados na energia modificada, o valor da resistência à compressão simples variou entre um máximo de 1.403 kPa (amostra 42, solo LG') e um valor mínimo de 174 kPa (amostra 56, solo NA'). Portanto, pode-se concluir que a faixa de variação dos valores da resistência à compressão simples, para os solos em questão, é elevada; pois o valor máximo supera o valor mínimo mais de 8 vezes.

Verifica-se, nas Tabelas 4.9 e 4.10, que, para solos compactados na energia modificada, os solos de comportamento laterítico argiloso (LG') possuem o maior valor da resistência à compressão média, $RCS_{média} = 1.128$ kPa, seguido dos solos lateríticos arenosos (LA'), $RCS_{média} = 544$ kPa, que possuem o segundo maior valor da resistência a compressão média, e dos solos não lateríticos arenosos (NA'), $RCS_{média} = 407$ kPa, que possuem o menor valor. Portanto, na média, os solos de

comportamento não laterítico apresentam valores de resistência à compressão simples menores do que os solos de comportamento laterítico, numa proporção 1 : 1,64.

Com base nas Tabelas 4.9 e 4.10, pode-se afirmar que os solos de comportamento laterítico tendem a apresentar maiores valores de resistência à compressão simples na energia modificada do que os solos de comportamento não laterítico.

4.2.4.2 Influência do caráter laterítico e não laterítico dos solos no comportamento do módulo tangente inicial (E_o)

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam, para os solos estudados, os módulos tangentes iniciais para solos lateríticos (da classe LA' e LG') e não lateríticos (da classe NA'), respectivamente. Além dos valores, são apresentados o módulo tangente inicial médio, o desvio padrão do E_o e o coeficiente de variação, para cada uma das classes de solo consideradas.

Com base nas Tabelas 4.11 e 4.12, pode-se constatar que, para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, o valor do módulo tangente inicial variou entre um máximo de 319.160 kPa (amostra 41, solo LG') e um valor mínimo de 29.808 kPa (amostra 62, solo NA'). Observa-se que a amplitude de variação desta variável é elevada, porque o valor máximo chega a ser mais de 10 vezes superior ao valor mínimo. Observa-se que a variação em questão

é próxima daquela obtida para a resistência à compressão simples, em que o valor máximo, correspondente a um solo LG', era superior 8 vezes ao valor mínimo correspondente a um solo NA'.

Tabela 4.11 - Valores dos módulos tangentes iniciais médios para solos lateríticos compactados na energia modificada

Amostra	MCT	E _o (kPa) P. modificado	Amostra	MCT	E _o (kPa) P. modificado
23	LA'	37.454	30	LG'	104.429
26	LA'	86.392	41	LG'	319.160
28	LA'	44.400	42	LG'	313.307
40	LA'	185.668	44	LG'	302.666
46	LA'	75.709	57	LG'	64.583
52	LA'	30.909	Média		220.829
60	LA'	88.059	Desv. padrão		125.380
61	LA'	92.667	Cv		0,568
63	LA'	62.334			
66	LA'	58.595	Solos lateríticos (LA' e LG')		
68	LA'	36.210	Média geral		103.216
72	LA'	49.186	Desvio padrão		91.480
76	LA'	56.500	Cv		0,886
79	LA'	58.555			
82	LA'	38.921			
88	LA'	116.190			
11	LA'	48.866			
Média		68.624			
Desv. padrão		37.064			
Cv		0,540			

Tabela 4.12 - Valores dos módulos tangentes iniciais médios para solos não lateríticos arenosos compactados na energia modificada

Amostra	MCT	E _o (kPa)
		P. modificado
24	NA'	49.205
55	NA'	95.000
56	NA'	42.583
58	NA'	43.802
62	NA'	29.808
80	NA'	37.843
81	NA'	37.948
83	NA'	52.651
84	NA'	64.933
85	NA'	46.449
1	NA'	47.619
17	NA'	125.241
Média		56.090
Desv. Padrão		27.443
Cv		0,489

Ainda, pode-se observar, nas Tabelas 4.11 e 4.12, que os solos de comportamento laterítico argiloso (LG') possuem o maior módulo tangente inicial médio, com $E_{o(médio)} = 220.829$ kPa, seguidos dos solos de comportamento laterítico arenoso (LA'), com $E_{o(médio)} = 68.624$ kPa, que possuem o segundo maior valor médio, e dos solos de comportamento não laterítico arenoso (NA'), com $E_{o(médio)} = 56.090$ kPa, que possuem o menor módulo tangente inicial médio. Portanto, na média, os solos de comportamento não laterítico possuem módulos tangentes iniciais menores do que os solos de comportamento laterítico, numa proporção 1 : 1,84, praticamente coincidente com a proporção que foi observada para a resistência à compressão simples.

Com base nas Tabelas 4.11 e 4.12, pode-se afirmar que os solos de comportamento laterítico tendem a apresentar maiores valores do módulo tangente inicial na energia modificada do que os solos de comportamento não laterítico.

4.2.4.3 Relações entre o módulo tangente inicial e a resistência à compressão simples para solos de comportamento laterítico e não laterítico

Considerando-se os solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada de Proctor, neste tópico, são apresentadas e analisadas relações, envolvendo as propriedades módulo tangente inicial e resistência à compressão simples, tanto para solos de comportamento laterítico quanto para solos de comportamento e não laterítico.

A Figura 4.16 apresenta a relação polinomial entre o E_o e a RCS, que foi desenvolvida, considerando-se juntamente os solos de comportamento laterítico e não laterítico, e a eq. (4.26) com $R^2 = 0,806$ representa a relação obtida entre as duas variáveis consideradas.

$$E_o = 0,1291.(RCS)^2 - 2,2388.RCS + 27371 \quad (4.26)$$

em que:

E_o = módulo tangente inicial (kPa); e

RCS = resistência à compressão simples (kPa).

Figura 4.16 - Relação entre o E_o e a RCS para solos grossos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada

O fato de a relação anterior, eq. (4.26), ser desenvolvida, considerando juntamente os solos de comportamento laterítico e não laterítico, pode ter contribuído para restringir o aumento do valor de R^2 . Por isso, na seqüência, foram desenvolvidas relações entre o E_o e a RCS, considerando-se separadamente os solos de comportamento laterítico e não laterítico, buscando-se com isso aumentar valores de R^2 .

As relações que foram desenvolvidas entre o módulo tangente inicial e a resistência à compressão simples, considerando separadamente os solos grossos de comportamento lateríticos e solos não lateríticos, compactados na energia modificada, são representadas, respectivamente, pela eq. (4.27) com $R^2 = 0,883$ e pela eq. (4.28) com $R^2 = 0,909$. Convém ressaltar que as relações, obtidas entre o E_o e a RCS, foram do tipo polinomial. Além do mais, foram utilizados 27 solos de

comportamento laterítico e 15 solos de comportamento não lateríticos no desenvolvimento das relações.

$$E_o = 0,2514.(RCS)^2 - 156,14.RCS + 65823 \quad (4.27)$$

$$E_o = 0,0206.(RCS)^2 + 102,7.RCS + 8550,9 \quad (4.28)$$

em que:

E_o = módulo tangente inicial (kPa); e

RCS = resistência à compressão simples (kPa).

As Figuras 4.17 e 4.18 ilustram, respectivamente, as relações entre o módulo tangente inicial e a resistência à compressão simples, para os solos de comportamento laterítico e não laterítico, compactados na energia modificada. As relações indicam que de fato existe forte ligação entre as propriedades (E_o e RCS), considerando-se separadamente os solos de comportamento laterítico e não laterítico; embora, o E_o e a RCS tenham significados físicos diferentes.

Finalmente, observadas as relações entre o E_o e a RCS, verificou-se que as relações desenvolvidas que consideravam, separadamente, os solos de comportamento laterítico e não lateríticos, apresentaram valores de R^2 superiores ao o valor de R^2 , obtido pela relação que considerava juntamente os solos de comportamento laterítico e não laterítico.

Figura 4.17 - Relação entre o E_o e a RCS para solos grossos de comportamento laterítico compactados na energia modificada

Figura 4.18 - Relação entre o E_o e a RCS para solos grossos de comportamento não laterítico compactados na energia modificada

4.2.4.4 Influência do caráter laterítico e não laterítico do solo no comportamento do módulo de resiliência típico

Com vistas a examinar a influência do caráter laterítico ou não laterítico no módulo de resiliência dos solos do interior do Estado de São Paulo compactados na energia modificada, foi feito um estudo considerando as classes LA' (laterítico arenoso), LG' (laterítico argiloso) e NA' (não laterítico arenoso) da classificação MCT, e ainda um módulo de resiliência típico, o qual é calculado a partir do modelo composto para um estado de tensão típico, considerado a partir de um estado de tensão intermediário entre aqueles da AASHTO T307 - 99 para o ensaio de materiais de base, caracterizado por apresentar tensão de confinamento de 68,9 kPa e tensão de desvio de 137,9 kPa.

A Tabela 4.13 mostra os módulos de resiliência típicos para cada amostra de solo laterítico compactada na energia modificada. Pode-se observar que o módulo de resiliência típico médio para solos LA' foi de 464.307 kPa. Além do mais, alguns solos LA' apresentam o módulo de resiliência típico bastante elevado como é o caso das amostras 26, 40, 61, 68 e 88, o que causou um aumento significativo no desvio padrão do módulo de resiliência típico para os solos em questão. Ainda na mesma tabela, pode-se observar que o módulo de resiliência típico médio para os solos LG' foi 161.518 kPa e que o coeficiente de variação para estes solos foi de 0,245, que pode ser considerado um valor baixo.

Tabela 4.13 - Módulos de resiliência típicos para solos lateríticos compactados na energia modificada

Amostra	MCT	$M_{R(típico)}$ (kPa)	Amostra	MCT	$M_{R(típico)}$ (kPa)
11	LA'	139.602	30	LG'	227.263
14	LA	117.065	41	LG'	158.903
23	LA'	100.101	42	LG'	153.562
26	LA'	510.108	44	LG'	147.561
28	LA'	117.689	57	LG'	120.301
29	LA	139.111		Média	161.518
40	LA'	2.922.430		Desv. padrão	39.643
46	LA'	157.086		Cv	0,245
50	LA	107.327			
52	LA'	93.958			
54	LA'	152.477			
59	LA'	140.896			
60	LA'	178.453			
61	LA'	478.260			
63	LA'	197.858			
66	LA'	146.846			
68	LA'	982.631			
72	LA'	216.657			
76	LA'	114.428			
79	LA'	149.250			
82	LA'	101.605			
88	LA'	2.950.907			
	Média	464.307			
	Desv. padrão	825.484			
	Cv	1,778			

Solos lateríticos (LA' e LG')	
Média geral	408.235
Desvio padrão	751.657
Cv	1,841

Os módulos de resiliência típicos dos solos não lateríticos estão apresentados na Tabela 4.14. Pode-se constatar que não há grandes variações no valor do módulo de resiliência típico para esses solos, que se restringiram ao intervalo de 85.233 kPa até um máximo de 162.209 kPa, resultando num desvio padrão apresentado menor do que o observado para os solos LA'. Ainda, o valor médio do módulo de resiliência típico para solos não lateríticos compactados na energia modificada foi de 123.637 kPa.

Tabela 4.14 - Módulos de resiliência típicos para solos não lateríticos arenosos compactados na energia modificada

Amostra	MCT	$M_{R(típico)}$ (kPa)
1	NA'	85.233
17	NA'	124.882
24	NA'	109.447
55	NA'	159.883
56	NA'	162.209
58	NA'	132.687
62	NA'	118.273
80	NA'	119.717
81	NA'	97.606
83	NA'	131.276
84	NA'	94.256
85	NA'	148.170
Média		123.637
Desv. padrão		24.875
Cv		0,201

No caso do módulo de resiliência típico, o valor máximo correspondente a um solo LA' é 35 vezes maior que o valor mínimo correspondente a um solo NA'. Portanto para módulo de resiliência típico, o valor máximo apresentou um aumento, em relação ao valor mínimo, maior do que foi observado para o módulo tangente inicial, em que o valor máximo superou o valor mínimo em 8 vezes.

Comparando-se o módulo de resiliência típico médio dos solos lateríticos e não lateríticos, verifica-se que, para um estado de tensão típico de base, os solos LA' possuem maior módulo de resiliência médio do que os solos LG' que, por sua vez, apresentam maior módulo de resiliência médio que os solos NA'. Portanto, confirma-se a tendência de os módulos de resiliência dos solos lateríticos serem maiores do que os módulos de resiliência dos solos não lateríticos. No caso dos solos estudados, a relação, entre os valores do $M_{R(típico)}$ médios de solos não lateríticos e lateríticos está na proporção 1 : 3,30, aproximadamente; quase o dobro daquela observada para o módulo tangente inicial.

Destaca-se que, para os solos lateríticos, o $M_{R(\text{típico})}$ médio, correspondente aos solos LA', é superior aos dos solos LG', ao contrario do observado para o E_o . Entretanto, quando se analisa o $M_{R(\text{típico})}$ médio dos solos LA', observa-se que esse valor é elevado em função do desempenho superior de 5 amostras entre as 22 estudadas, ou seja, amostras 26, 40, 61, 68 e 88.

Convém destacar também que os resultados encontrados nesta análise concordam com Nogami e Villibor (1990) que apresentam uma comparação entre os resultados de ensaios triaxiais cíclicos realizados em 4 solos de comportamento laterítico e em 4 solos de comportamento não lateríticos, para um estado de tensão típico ($\sigma_3 = 1,0 \text{ kgf/cm}^2$ e $\sigma_d = 0,6 \text{ kgf/cm}^2$), conforme mostra a Tabela 4.15. Pode-se observar através da mesma tabela que a relação entre os valores do M_R médios de solos não lateríticos e lateríticos está na proporção 1 : 2,96, aproximadamente.

Tabela 4.15 - Comparação entre módulos de resiliência de solos de comportamento laterítico e não laterítico

Amostra	MCT	M_R kgf/cm ²	Amostra	MCT	M_R kgf/cm ²
1L	LG'	3.100	1NL	NA'	1.400
2L	LG'	5.900	2NL	NS'	1.200
3L	LG'	3.200	3NL	NS'/NA'	1.100
4L	LG'	2.400	4NL	NS'	1.240
	Média	3.650		Média	1.235
	Desv. padrão	1.542		Desv. padrão	125
	Cv	0,422		Cv	0,101

Fonte: Nogami e Villibor (1990)

Com base nas Tabelas 4.13 e 4.14, pode-se afirmar que os solos de comportamento laterítico tendem a apresentar maiores valores do módulo de resiliência na energia modificada do que os solos de comportamento não laterítico.

4.3 Avaliação dos modelos para a representação do módulo de resiliência

Existem, na literatura, diversos modelos usados para representar a variação do módulo de resiliência, com estado de tensão atuante no solo; os quais são calibrados com os valores do módulo de resiliência obtidos a partir do ensaio triaxial cíclico realizado em corpos-de-prova cilíndricos.

Visando a definir os melhores modelos, que representem o comportamento do módulo de resiliência com o estado de tensão atuante no solo, foi feito um estudo levando em conta os modelos mais comuns utilizados no meio acadêmico e os resultados de ensaios triaxiais cíclicos, realizados com 42 amostras de solos coletados no interior do Estado de São Paulo, compactadas na energia modificada de Proctor.

Para definir os melhores modelos usados, para representar a variação do módulo de resiliência com o estado de tensão, foram considerando os valores do coeficiente de determinação (R^2) fornecidos por quatro modelos designados pelas letras A, B, C e D que estão apresentados na Tabela 4.16 pelas eqs. (4.29) a (4.32). Os resultados correspondentes à calibração de cada um dos quatro modelos,

usados nesta análise, levando-se em conta as 42 amostras de solos pesquisadas, encontram-se registrados no APÊNDICE C.

Observando-se a Tabela 4.17, que aponta os valores dos coeficientes de determinação, obtidos com o ajuste dos modelos A, B, C e D, usados para representar o comportamento do módulo de resiliência. Ainda, os números 1 e 2 indicam, respectivamente, o primeiro e o segundo modelo em termos de desempenho avaliado pelo respectivo valor de R^2 .

Também, com base na Tabela 4.17, é possível constatar que o melhor modelo usado para representar o comportamento do módulo de resiliência é o modelo D, pois obteve o melhor desempenho para 28 amostras de solo, em comparação com 42 amostras de solo que foram analisadas. Finalmente, é importante destacar o fato que o modelo C, segundo melhor a representar o módulo de resiliência, apresentou seus coeficientes de determinação muito próximos aos obtidos pelo D.

Tabela 4.16 - Os modelos usados para representação da variação do M_R com as tensões atuantes no solo

Modelo	Equação do modelo	Eq.
A	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	(4.29)
B	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	(4.30)
C	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	(4.31)
D	$M_R = Pa \cdot k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{k_3}$	(4.32)

Nas equações dos modelos apresentados tem-se que:

Pa = pressão atmosférica = 101,3 kPa;

M_R = módulo de resiliência;

k_1 , k_2 e k_3 = constantes de regressão do modelo;

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão;

σ_3 = tensão de confinamento;

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio; e

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica, em que:

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{3} = \sigma_d \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \quad (4.33)$$

Tabela 4.17 - Os valores dos coeficientes de determinação obtidos com o ajuste dos modelos A, B, C e D usados para representar o módulo de resiliência, e os modelos com melhores desempenho

Amostra	R ² dos modelos considerados				Melhor desempenho			
	A	B	C	D	A	B	C	D
23	0,947	0,345	0,974	0,976			2	1
59	0,832	0,805	0,955	0,955			1	1
60	0,937	0,634	0,962	0,968			2	1
63	0,869	0,270	0,914	0,924			2	1
66	0,857	0,626	0,939	0,939			1	1
72	0,897	0,748	0,972	0,974			2	1
88	0,661	0,643	0,780	0,778			1	2
28	0,819	0,454	0,821	0,814	2		1	
40	0,610	0,806	0,870	0,872			2	1
26	0,812	0,533	0,821	0,824			2	1
68	0,908	0,448	0,943	0,933			1	2
61	0,830	0,206	0,935	0,947			2	1
52	0,976	0,453	0,980	0,982			2	1
76	0,904	0,458	0,906	0,908			2	1
82	0,962	0,545	0,972	0,978			1	2
54	0,709	0,790	0,870	0,874			2	1
11	0,787	0,789	0,951	0,953			2	1
79	0,945	0,490	0,945	0,947			2	1
46	0,863	0,762	0,947	0,949			2	1
81	0,976	0,618	0,990	0,990			1	1
83	0,966	0,511	0,970	0,767	2		1	
84	0,978	0,406	0,986	0,990			2	1
80	0,984	0,560	0,990	0,994			2	1
24	0,701	0,460	0,707	0,711			2	1
56	0,947	0,677	0,988	0,986			1	2
55	0,920	0,661	0,950	0,956			2	1
58	0,937	0,646	0,960	0,964			2	1
17	0,778	0,723	0,865	0,870			2	1
01	0,596	0,143	0,676	0,686			2	1
62	0,955	0,579	0,968	0,966			1	2
42	0,899	0,679	0,945	0,951			2	1
75	0,882	0,508	0,882	0,891			2	1
27	0,914	0,727	0,972	0,976			2	1
50	0,940	0,645	0,970	0,968			1	2
29	0,947	0,653	0,970	0,972			2	1
14	0,986	0,561	0,996	0,996			1	1
43	0,653	0,089	0,822	0,815			1	2
85	0,832	0,297	0,870	0,880			2	1
57	0,945	0,666	0,986	0,990			2	1
44	0,776	0,823	0,927	0,922			1	2
41	0,903	0,724	0,962	0,966			2	1
30	0,884	0,717	0,953	0,958			2	1

Os modelos C e D, expressos pelas eqs. (4.31) e (4.32), respectivamente, são os que apresentam melhores resultados para representar a variação do módulo de resiliência com as tensões atuantes no solo; porque ambos consideram, tanto a tensão de confinamento (σ_3) quanto a tensão de desvio (σ_d). Sabe-se que tensão de desvio é responsável pelas deformações angulares no material, enquanto a tensão de confinamento é responsável pelas deformações volumétricas no material. Por isso, os modelos C e D são de grande abrangência, pois neles são levadas em conta todas as tensões que causam deformações no corpo-de-prova.

Além do mais, os bons resultados obtidos com o uso dos modelos C e D, para as 42 amostras de solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, como mostra a Tabela 4.17, atestam e incentivam a utilização desses modelos para avaliar o comportamento módulo de resiliência com as tensões atuantes no solo.

No Brasil, o modelo composto, representado pela eq. (4.31) e pela letra C, é bastante usado para descrever o comportamento do módulo de resiliência com o estado de tensão atuante no solo. Como autores que utilizaram esse modelo, pode citar-se: Cunto (1998), Gonçalves (1999), Ferreira¹ (2000 apud FERREIRA, 2005) e Takeda (2006).

¹ Ferreira, J. G. H. M. **Elaboração e análise da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ**, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

4.4 Relações envolvendo as constantes de regressão do modelo composto e o módulo de resiliência com outras propriedades dos solos

Diante das dificuldades para se obter o módulo de resiliência dos solos através de ensaios triaxiais cíclicos, na literatura existem diversas relações do módulo de resiliência com as propriedades do solo; contudo, nenhuma das relações foi desenvolvida exclusivamente com solos do interior do Estado de São Paulo. Além do mais, não é aconselhável utilizar relações desenvolvidas com solos de regiões temperadas para solos tropicais, pois a eficiência delas pode ser diminuída.

Portanto, neste tópico, considerando-se os solos tropicais grossos de comportamento laterítico e não laterítico, encontrados com frequência no interior de São Paulo, serão analisadas relações das constantes de regressão do modelo composto, que representa módulo de resiliência, com as propriedades do solo, usando apenas os solos compactados na energia modificada. Além das diversas relações, envolvendo as constantes de regressão do modelo composto e as propriedades dos solos, que serão apresentadas a seguir, também, em uma segunda análise, o módulo de resiliência será relacionado com as propriedades dos solos.

Diante do exposto, nas relações das constantes do modelo composto com as propriedades do solo, que serão apresentadas, foi empregado o método *Forward Stepwise* do programa STATISTICA *kernel release* 5.5a. Nas relações estabelecidas com o módulo de resiliência, foram empregadas regressões não lineares com uso do

programa STATISTICA 99 *Edition*. Finalmente, o desempenho das relações será analisado e discutido principalmente com base no coeficiente de determinação (R^2).

4.4.1 Relações lineares utilizando as constantes de regressão do modelo composto e as propriedades do solo pelo método *Forward Stepwise*

Nesta parte do trabalho, procurou-se desenvolver algumas relações, para obter o módulo de resiliência, através das propriedades do solo de uso corriqueiro no meio rodoviário, considerando-se somente os solos estudados. Portanto, buscando-se estabelecer relações lineares, entre as constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto, eq. (4.31), e as propriedades dos solos (% passa # 0,075, LL, IP, E_o , RCS, $\rho_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot}), utilizou-se programa STATISTICA *kernel release* e o método *Forward Stepwise* descrito no Capítulo 3 (Materiais e métodos).

No estabelecimento de relações lineares múltiplas das constantes de regressão do modelo composto com as propriedades do solo, que serão apresentadas a seguir, consideraram-se os solos estudados compactados na energia modificada e três situações de análise distintas as quais são descritas como se segue:

Caso 1: Análise com todos os solos grossos na energia modificada, $n = 42$ solos;

Caso 2: Análise com solos grossos lateríticos arenosos (LA') na energia modificada, $n = 19$ solos; e

Caso 3: Análise com solos grossos não lateríticos arenosos (NA') na energia modificada, $n = 12$ solos.

Onde n é o número de solos, usados para desenvolver as relações entre as constantes de regressão (k_1 , k_2 e k_3) do modelo composto e as propriedades do solo.

A seguir serão apresentadas as relações das constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 , bem como o coeficiente de determinação, obtido de cada relação para as três situações de análise (caso 1, caso 2 e caso 3) descritas anteriormente.

- Analisando o caso 1 (todos os solos grossos na energia modificada)

Das sete propriedades do solo consideradas, o coeficiente k_1 relacionou-se apenas com LL (%), RCS (kPa) e W_{ot} (%), conforme descrito pela eq. (4.34). Entretanto, cabe destacar que o coeficiente de determinação obtido, $R^2 = 0,156$, é bastante baixo, indicando que a relação não pode ser considerada satisfatória.

$$k_1 = -20187,2 + 696,5.LL - 34,8.RCS + 5920,4.W_{ot} \quad (4.34)$$

em que:

k_1 = constante de regressão do modelo composto;

LL = limite de liquidez (%);

RCS = resistência à compressão simples (kPa); e

W_{ot} = teor de umidade ótimo (%).

A constante de regressão k_2 do modelo composto, para o caso 1, não se relacionou bem com nenhuma das 7 propriedades do solo, portanto foi impossível ajustar um modelo linear múltiplo para k_2 .

O modelo linear múltiplo ajustado, para a constante de regressão k_3 , considerando-se o caso 1, representado pela eq. (4.35) alcançou um R^2 de apenas 0,284. Por isso, pode-se concluir que a relação obtida entre k_3 e as propriedades do solo RCS (kPa) e $\rho_{dm\acute{a}x}$ é inviável para ser aplicada, devido ao baixo coeficiente de determinação.

$$k_3 = -1,73322 + 0,00026.RCS + 0,81924.\rho_{dm\acute{a}x} \quad (4.35)$$

em que:

k_3 = constante de regressão do modelo composto;

RCS = resistência à compressão simples (kPa); e

$\rho_{dm\acute{a}x}$ = massa específica seca máxima (g/cm^3).

De maneira geral, foi observado que, para o caso 1 de análise, com o conjunto de solos estudados, é inviável tentar relacionar as constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto e as propriedades do solo através de regressões lineares múltiplas.

- Analisando o caso 2 (para 19 solos grossos lateríticos arenosos na energia modificada)

De acordo com a eq. (4.36), considerando-se o caso 2, a constante de regressão k_1 do modelo composto se relacionou com E_o (kPa) e % passa # 0,075, além disso, a relação obteve um $R^2 = 0,116$ que é um valor bastante baixo.

$$k_1 = 21640,15 + 930,2.(\% \text{ passa } \# 0,075) + 0,23.E_o \quad (4.36)$$

em que:

k_1 = constante de regressão do modelo composto;

% passa # 0,075 = % de solo que passa na peneira de malha 0,075 mm; e

E_o = modulo tangente inicial (kPa).

A constante de regressão k_2 , do modelo composto, para o caso 2, não se relacionou com nenhuma das propriedades do solo. Portanto foi impossível ajustar um modelo linear múltiplo de k_2 com as propriedades do solo.

Finalmente, para o caso 2, a eq. (4.37) mostra que a constante de regressão k_3 do modelo composto se relacionou com as propriedades % passa # 0,075, RCS (kPa) e E_o (kPa), ainda, tal relação apresentou um $R^2 = 0,600$.

$$k_3 = 0,068908 - 0,011527 \cdot (\% \text{ passa \# } 0,075) + 0,000002 \cdot E_o + 0,000593 \cdot RCS \quad (4.37)$$

em que:

k_3 = constante de regressão do modelo composto;

% passa # 0,075 = % de solo que passa na peneira de malha 0,075 mm;

E_o = modulo tangente inicial (kPa); e

RCS = resistência à compressão simples (kPa).

Os resultados obtidos, para o caso 2, demonstram que não existe boa relação entre as constantes de regressão k_1 , k_2 , k_3 do modelo composto e as propriedades do solo.

- Analisando o caso 3 (para 12 solos grossos não lateríticos arenosos na energia modificada)

Pode-se constatar, através da na eq. (4.38) que, para o caso 3, a constante de regressão k_1 , do modelo composto, se relacionou apenas com as propriedades % passa # 0,075, LL (%) e W_{ot} (%), além do mais, a relação considerada apresentou um $R^2 = 0,836$.

$$k_1 = -29146,1 - 887.(\% \text{ passa } \# 0,075) + 1212,7.LL + 7544,1.W_{ot} \quad (4.38)$$

em que:

k_1 = constante de regressão do modelo composto;

% passa # 0,075 = % de solo que passa na peneira de malha 0,075 mm;

LL = limite de liquidez (%); e

W_{ot} = teor de umidade ótimo (%).

Levando-se em conta o caso 3, a eq. (4.39), mostra que foi possível relacionar a constante de regressão k_2 do modelo composto e o limite de liquidez (%); contudo, a relação alcançou um $R^2 = 0,559$ que ainda é um valor considerado baixo.

$$k_2 = 0,482625 - 0,009653.LL \quad (4.39)$$

em que:

k_2 = constante de regressão do modelo composto; e

LL = limite de liquidez (%).

Finalmente, com base na eq. (4.40), considerando-se o caso 3, observa-se que a constante de regressão k_3 do modelo composto se relacionou com as propriedades % passa # 0,075, LL (%), E_o (%), $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³) e W_{ot} (%), além disso, a relação em questão apresentou um $R^2 = 0,800$.

$$k_3 = 1,605182 + 0,004246.(\% \text{ passa \# 0,075}) - 0,003162.LL + 0,000001.E_o - 0,69053.\rho_{dm\acute{a}x} - 0,033882.W_{ot} \quad (4.40)$$

em que:

k_3 = constante de regressão do modelo composto;

% passa # 0,075 = % de solo que passa na peneira de malha 0,075 mm;

LL = limite de liquidez (%);

E_o = módulo tangente inicial (kPa);

$\rho_{dm\acute{a}x}$ = massa específica seca máxima (g/cm³); e

W_{ot} = teor de umidade ótimo (%).

As relações desenvolvidas para o caso 3, como apresentado anteriormente, indicam que foi possível relacionar as constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto com as propriedades do solo através de regressões lineares. Contudo, como a constante de regressão k_2 apresentou uma relação, eq. (4.39), com um baixo coeficiente de determinação, $R^2 = 0,559$, é inviável a aplicabilidade da relação tanto para obter k_2 como para obter o módulo de resiliência através do modelo composto para solos grossos não lateríticos arenosos na energia modificada.

No estudo antecedente, pode-se verificar que em se tratando de solos, foi muito difícil estabelecer relações lineares entre as constantes de regressão (k_1 , k_2 e k_3) do modelo composto e as propriedades do solo que são usuais no meio rodoviário. Além disso, as poucas relações obtidas não podem ter aplicabilidade face aos baixos valores dos coeficientes de determinação apresentados.

Neste mesmo sentido, Mohammad et al. (1999), estudando solos do Estado da Luisiana nos EUA, desenvolveram relações entre as constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 de um modelo para obtenção do módulo de resiliência com as propriedades do solo, contudo não obtiveram sucesso, visto que as relações desenvolvidas apresentaram baixos coeficientes de determinação, sendo que para k_2 o R^2 foi de 0,48.

Finalmente, é importante destacar, diante dos resultados observados anteriormente, que boas relações entre as constantes de regressão do modelo composto (k_1 , k_2 e k_3) e as propriedades do solo de fato não existem, confirmando o que foi observado também por Ferreira (2000 apud FERREIRA, 2005) que não obteve bons resultados na tentativa de relacionar, através de redes neurais, as constantes do modelo composto com propriedades do solo (granulometria dadas por várias peneiras, limite de liquidez, índice de plasticidade, massa específica de moldagem, umidade de moldagem, CBR e expansão).

4.4.2 Relações do M_R utilizando propriedades dos solos

A seguir, analisaremos a possibilidade da existência de relações diretas entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo obtidas por meio de regressões não lineares múltiplas (sem a utilização de relações indiretas das constantes de regressão de modelos com as propriedades do solo para obter o módulo de resiliência). Aliás, existem diversas relações, entre o módulo de resiliência e as várias propriedades do solo, que podem ser encontradas nos trabalhos de Rada e Witczak (1981), Zaman, Chen e Laguros (1994), Visser, Queiroz e Hudson (1994) e Parreira et al. (1998).

Além disso, o fato, de as relações do módulo de resiliência com as propriedades do solo dos trabalhos anteriores, serem desenvolvidas com solos de outras regiões, parecia indicar que desenvolvendo relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo, utilizando apenas solos de uma região, poderiam ser obtidas relações melhores. Portanto, na seqüência, buscou-se desenvolver relações do módulo de resiliência com as propriedades do solo considerando-se solos grossos do interior do Estado de São Paulo.

4.4.2.1 Relações do M_R utilizando apenas o módulo tangente inicial

Parreira et al. (1998) realizaram um estudo com solos arenosos, em sua maioria A-2-4 e LA', provenientes de vários estados do Brasil e apresentaram uma relação não linear do módulo de resiliência com o módulo tangente inicial que também considerava o estado de tensão atuante no solo. Tal relação apresentou um $R^2 = 0,82$. Por essa razão, em primeira análise, relacionar o módulo de resiliência com o módulo tangente indicava um caminho promissor.

A experiência anterior, que obteve um razoável coeficiente de determinação na relação entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial, serviu de incentivo para que fossem estabelecidas, nesta parte do trabalho, exclusivamente para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, várias relações não lineares, entre o módulo de resiliência e módulo tangente inicial, levando em conta as tensões atuantes do solo.

Nas relações estabelecidas entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial, mostradas a seguir, o módulo de resiliência foi a variável resposta das relações, ao passo que as variáveis explicativas foram: E_o (kPa), σ_3 (kPa), σ_d (kPa) e θ (kPa). Finalmente, destaca-se que para desenvolvimento das relações utilizou-se apenas os solos grossos (materiais com mais de 50% de solo retidos na peneira n.º 200) do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada e duas situações de estudo que se apresentam como:

a) Relações do M_R com E_o considerando solos grossos lateríticos na energia modificada, $n = 27$ solos; e

b) Relações do M_R com E_o considerando solos grossos não lateríticos na energia modificada, $n = 15$ solos.

Onde n é o número de solos usados no desenvolvimento das relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial.

- Relações M_R e E_o que consideram apenas solos grossos lateríticos na energia modificada

As relações matemáticas da Tabela 4.18 (eqs. 4.41 a 4.45) representa as relações obtidas entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial, considerando várias combinações de tensões atuantes no solo. No desenvolvimento das relações, foram utilizados os resultados de ensaios triaxiais cíclicos realizados com 27 solos.

Tabela 4.18 - Relações entre o M_R e o E_o considerando apenas solos grossos lateríticos na energia modificada

Casos	Relações	R^2	Eq.
1	$M_R = 291,25.E_o^{0,356}.\sigma_3^{0,605}.\sigma_d^{0,046}$	0,09	(4.41)
2	$M_R = 21,72.E_o^{0,359}.\theta^{1,074}.\sigma_d^{-0,016}$	0,09	(4.42)
3	$M_R = 167,64.E_o^{0,369}.\sigma_3^{0,835}$	0,09	(4.43)
4	$M_R = 40,77.E_o^{0,353}.\theta^{0,904}$	0,09	(4.44)
5	$M_R = 763,63.E_o^{0,332}.\sigma_d^{0,564}$	0,07	(4.45)

em que:

M_R = módulo de resiliência (kPa);

E_o = módulo tangente inicial (kPa);

σ_3 = tensão de confinamento (kPa);

σ_d = tensão de desvio (kPa); e

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica (kPa).

É possível constatar, através dos resultados apresentados na Tabela 4.18, que as relações do módulo de resiliência com o módulo tangente inicial, para solos lateríticos arenosos, compactados na energia modificada, do interior do Estado de São Paulo, não apresentaram bons resultados; pois os valores dos coeficientes de determinação foram iguais ou menores que 0,09 o que é considerado um valor muito baixo.

- Relações entre M_R e E_o que consideram apenas solos grossos não lateríticos na energia modificada

As eqs. (4.46) a (4.50), apresentadas na Tabela 4.19, representam as relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial, levando-se em conta várias combinações de tensões atuantes no solo, que foram obtidas para os solos grossos não lateríticos, compactados na energia modificada. As relações foram desenvolvidas a partir dos resultados dos ensaios triaxiais cíclicos, realizados em 15 amostras de solos do interior do Estado de São Paulo.

Tabela 4.19 - Relações entre o M_R e o E_o considerando apenas solos grossos não lateríticos na energia modificada

Casos	Relações	R^2	Eq.
1	$M_R = 16683,37.E_o^{0,045}.\sigma_3^{0,270}.\sigma_d^{0,071}$	0,47	(4.46)
2	$M_R = 13566,65.E_o^{0,044}.\theta^{0,234}.\sigma_d^{0,078}$	0,42	(4.47)
3	$M_R = 17885,16.E_o^{0,049}.\sigma_3^{0,318}$	0,46	(4.48)
4	$M_R = 14279,25.E_o^{0,048}.\theta^{0,276}$	0,40	(4.49)
5	$M_R = 27114,68.E_o^{0,037}.\sigma_d^{0,241}$	0,30	(4.50)

em que:

M_R = módulo de resiliência (kPa);

E_o = módulo tangente inicial (kPa);

σ_3 = tensão de confinamento (kPa);

σ_d = tensão de desvio (kPa); e

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica (kPa).

Com base na Tabela 4.19, verifica-se que as relações, entre módulo de resiliência e o módulo tangente inicial, para solos não lateríticos do interior de São Paulo, compactados na energia modificada, apresentaram baixos valores dos coeficientes de determinação que variaram de 0,30 a 0,47. Portanto, não é aconselhável a aplicação de tais relações para obtenção do módulo de resiliência.

Os baixos coeficientes de determinação, apresentados pelas relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial, eqs. (4.41) a (4.50), mostram que a experiência observada por Parreira et al. (1998), que obteve um coeficiente de determinação mais elevado ($R^2 = 0,82$) na relação entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial, não se repetiu neste trabalho.

É importante destacar que, nas análises anteriores, dos 27 solos lateríticos, apenas 5 solos eram A-2-4. Portanto, os solos lateríticos do grupo A-2-4 não eram majoritários o que contrasta com o estudo realizado por Parreira et al. (1998) que utilizaram em seu trabalho 7 solos lateríticos. Desse total, 5 eram do grupo A-2-4, assim, o fato de eles utilizarem mais solos lateríticos A-2-4 pode ter contribuído para eles obterem uma relação do módulo de resiliência com o módulo tangente inicial com coeficiente de determinação mais elevado.

Os baixos coeficientes de determinação, obtidos anteriormente, nas relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial (Tabelas 4.18 e 4.19), indicaram que o procedimento utilizado, caracterizado por considerar apenas solos grossos do interior de São Paulo e de agrupar dos solos em lateríticos e não lateríticos, não surtiu efeito com vistas à obter relações entre o módulo de resiliência e módulo tangente inicial, com elevado coeficiente de determinação.

Ficou claro, diante das ineficientes relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial apresentadas antes (eqs. 4.41 a 4.50), que as regressões não lineares podem não ser o método mais eficiente para estabelecer a relação, ou então, que a relação do módulo de resiliência pode ocorrer com outras propriedades do solo associadas ou não ao módulo tangente inicial. Portanto, é importante verificar o desempenho de relações do módulo de resiliência com as propriedades quando nas propriedades está contido ou não o módulo tangente inicial.

4.4.2.2 Relações entre o M_R e propriedades do solo incluindo o módulo tangente inicial

Como as relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial desenvolvidas anteriormente foram impotentes, buscou-se avaliar a existência de relações diretas entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo, incluindo o módulo tangente inicial (sem utilizar indiretamente as relações das constantes de regressão de modelos com as propriedades do solo para obter o módulo de resiliência). Nas análises, consideraram-se apenas os solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, e, mais uma vez, desenvolveram-se relações não lineares através de regressões múltiplas.

As relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo, que serão apresentadas na seqüência, foram estabelecidas sendo o módulo de resiliência a variável resposta e nove propriedades dos solos (% passa # 0,42, % passa # 0,15, % passa # 0,075, LL, IP, $\rho_{dm\acute{a}x}$, W_{ot} , E_o e RCS), juntamente com as tensões atuantes no solo (σ_3 e σ_d), as variáveis explicativas. Além disso, as relações levavam e conta duas situações distintas que são descritas como se segue:

- a) Relação do M_R com as propriedades do solo, considerando apenas os solos lateríticos na energia modificada, $n = 27$ solos; e
- b) Relação do M_R com as propriedades do solo, considerando apenas os solos não lateríticos na energia modificada, $n = 15$ solos.

Onde n é o número de solos usados no desenvolvimento das relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo.

- Relação do M_R com as propriedades do solo, considerando apenas os solos lateríticos na energia modificada

Não foi estabelecida uma relação entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo, incluindo as tensões, considerando-se a análise com solos lateríticos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada; pois a regressão não linear múltipla não forneceu o valor do R^2 .

- Relação do M_R com as propriedades do solo, considerando apenas os solos não lateríticos na energia modificada

Não foi possível obter relação entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo, incluindo as tensões, considerando-se a análise com solos não lateríticos do interior do Estado de São Paulo compactados na energia modificada, uma vez que não foi fornecido o valor do coeficiente de determinação (R^2) para regressão não linear múltipla.

Levando-se em conta a experiência anterior, relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo, através de regressões não lineares múltiplas, não parece o melhor caminho a ser trilhado para estabelecer relações do módulo de resiliência com as propriedades do solo. Ficou claro que as regressões não lineares múltiplas não foram capaz de selecionar automaticamente as propriedades do solo (ou variáveis explicativas) mais importantes para relação com o módulo de resiliência.

4.5 As redes neurais artificiais e o módulo de resiliência

Como as tentativas de representar a variação do módulo de resiliência com as propriedades do solo, usando os métodos tradicionais de análise, foram infrutíferas, tentou-se a utilização das redes neurais artificiais (RNAs) para cumprir essa tarefa. Além do mais, no campo da engenharia, sabe-se que atualmente as redes neurais artificiais têm obtido um bom desempenho em relacionar variáveis respostas com variáveis explicativas; portanto, isso serviu de incentivo para lançar mão do novo recurso tecnológico (RNAs), para tentar relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo e as tensões atuantes.

Para estabelecer as relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo e as tensões através das redes neurais artificiais, que serão apresentadas a seguir, foi aplicada a metodologia descrita no Capítulo 3 (Materiais e métodos). Reitera-se que as RNAs desenvolvidas foram do tipo Múltiplas Camadas Alimentadas Adiante (*Multilayer Perceptron* - MLP) que empregam o algoritmo *backpropagation*, e ainda, que se utilizou o programa EASYNN_{plus} V6.0h.

No estudo, para desenvolver relações do módulo de resiliência com as propriedades do solo e as tensões através do uso das redes neurais artificiais (RNAs), foram feitas análises para duas situações distintas, utilizando-se os solos do interior do Estado São Paulo a exceção do Vale do Ribeira. Assim, nos estudos, consideraram-se, nas redes neurais que foram desenvolvidas, primeiramente os

solos grossos, compactados na energia modificada (42 amostras de solos); e depois, os solos compactados na energia normal (28 amostras de solos).

Na seqüência do trabalho, as melhores RNAs usadas para relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo e as tensões, foram testadas com solos que não foram empregados na calibração das redes. Por isso, conforme o tipo da rede que foi testada, utilizaram-se os dados de solos, compactados na energia modificada; ou então de solos compactados na energia normal.

Finalmente, considerando-se a existência de relações tanto entre E_o e RCS, quanto entre $\rho_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot} , avaliou-se o desempenho de redes neurais artificiais, isentas de variáveis correlatas em sua estrutura.

4.5.1 Módulo de resiliência por rede neural para os solos grossos do interior de São Paulo, compactados na energia modificada

Considerando-se a metodologia descrita no Capítulo 3, para analisar a relação entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo e às tensões através das redes neurais artificiais, foram obtidas as redes ótimas 1 e 2, para o caso dos solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada. Assim, na seqüência, serão apresentadas as informações pertinentes às principais redes neurais, geradas durante processo para obtenção das redes ótimas 1 e 2 para o caso estudado.

a) A rede ótima preliminar 1 (para solos grossos compactados na energia modificada)

Sabe-se que a rede ótima preliminar 1 é importante para se chegar as redes ótimas preliminares 2 e 3, que antecedem a obtenção das redes ótimas 1 e 2, que representam as melhores relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo. Portanto, a seguir, descrevem-se os principais dados de construção e as características mais importantes da rede ótima preliminar 1, para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na modificada.

Os módulos de resiliência, empregados para construção das redes neurais, utilizadas para definição da rede ótima preliminar 1, foram obtidos através do modelo composto, conforme a metodologia descrita no Capítulo 3. Além disso, os dados empregados para adquirir a rede ótima preliminar 1, para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, foram os seguintes:

i) Variáveis de entrada da rede ou variáveis explicativas da rede: $e1 = \sigma_3$ (kPa), $e2 = \sigma_d$ (kPa), $e3 = \% \text{ passa } \# 0,42$, $e4 = \% \text{ passa } \# 0,15$, $e5 = \% \text{ passa } \# 0,075$, $e6 = \% \text{ Arg.}$, $e7 = LL$ (%), $e8 = IP$ (%), $e9 = \rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), $e10 = W_{ot}$ (%), $e11 = E_o$ (kPa) e $e12 = RCS$ (kPa). A variável saída da rede ou resposta foi o M_R (kPa).

ii) O conjunto de análise da rede, contendo 42 solos, perfazendo um total de 4.200 padrões distintos, com base no estado de tensão atuante. 3.360 padrões foram para o conjunto de treinamento da rede e 840 padrões eram para o conjunto de validação da rede.

A rede ótima preliminar 1 (ROP1), obtida para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, foi uma rede de arquitetura 12-12-12-1, taxa de aprendizado de 0,7 e momento de 0,7, que apresentou um erro médio de treinamento de 0,001958. Além do mais, a Tabela E.1 no APÊNDICE E mostra outras arquiteturas e erros médios de treinamento de redes testadas antes de definir a rede ótima preliminar 1 em questão.

Além disso, a previsão do módulo de resiliência, a partir das propriedades do solo através rede ótima preliminar 1, para os solos compactados na energia modificada, apresentou um EMR = 8,739%, como mostra a Figura 4.19. Finalmente, a Figura 4.20 destaca a influência que cada variável de entrada de rede tem na rede ótima preliminar 1 usada para previsão do módulo de resiliência.

Um EMR = 8,739%, na estimativa do módulo de resiliência através das propriedades do solo, utilizando-se uma rede neural, pode ser considerado um erro baixo; pois valores de EMR, menores que 30%, ainda demonstram uma boa estimativa para o módulo de resiliência, principalmente quando a dispersão das previsões se encontram uniformemente distribuídas em torno da reta central de EMR zero como foi o caso da rede ótima preliminar 1 em questão. Ademais, desde já, frente ao baixo EMR, apresentado pela rede ótima preliminar 1, ficou claro que foi possível relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo através de uma rede neural.

Pode-se observar na Figura 4.20 que as propriedades do solo (variáveis explicativas ou entradas de rede) IP (%), E_o (kPa) e % Arg. têm uma alta influência na rede ótima preliminar 1 usada para obter o módulo de resiliência.

Figura 4.19 - Erro médio relativo da rede ótima preliminar 1 para solos grossos, compactados na energia modificada

Figura 4.20 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima preliminar 1 para solos grossos, compactados na energia modificada

b) As redes ótimas preliminares 2 e 3 (para solos grossos, compactados na energia modificada)

A redes ótimas preliminares 2 e 3 são importantes para obtenção das redes ótimas 1 e 2 respectivamente. Por isso, a seguir, descrevem-se os dados usados para obter as redes ótimas preliminares 2 e 3 bem como as principais características destas redes.

Considerando-se a rede ótima preliminar 1, para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, determinaram-se as redes ótimas preliminares 2 e 3, com base no estudo de desempenho de algumas redes geradas, quando eram eliminadas as variáveis de entrada de pouca importância na rede ótima preliminar 1. Assim sendo, para ótima preliminar 1, que está sendo considerada, selecionaram-se as 4 entradas de pouca influência na rede as quais foram: $e_3 = \% \text{ passa } \# 0,42$, $e_4 = \% \text{ passa } \# 0,15$, $e_5 = \% \text{ passa } \# 0,075$ e $e_7 = LL (\%)$.

Além disso, é importante destacar que as variáveis de entrada da rede ótima preliminar 1 eram: $e_1 = \sigma_3 \text{ (KPa)}$, $e_2 = \sigma_d \text{ (kPa)}$, $e_3 = \% \text{ passa } \# 0,42$, $e_4 = \% \text{ passa } \# 0,15$, $e_5 = \% \text{ passa } \# 0,075$, $e_6 = \% \text{ Arg.}$, $e_7 = LL (\%)$, $e_8 = IP (\%)$, $e_9 = \rho_{dm\acute{a}x} \text{ (g/cm}^3\text{)}$, $e_{10} = W_{ot} (\%)$, $e_{11} = E_o \text{ (kPa)}$ e $e_{12} = RCS \text{ (kPa)}$. A variável de saída da rede ótima preliminar 1 considerada foi o $M_R \text{ (kPa)}$.

- A rede ótima preliminar 2 (para solos grossos, compactados na energia modificada)

A Tabela 4.20 mostra os resultados do estudo da eliminação das variáveis de entrada de pouca influência na rede ótima preliminar 1. Portanto, com base Tabela 4.20, observa-se que a rede neural indicando um EMR = 8,141% é a rede ótima preliminar 2, pois foi a rede com o máximo desempenho (menor EMR) com menor número de entradas do que a rede ótima preliminar 1. Também, pode-se constar na Tabela 4.20 que a rede ótima preliminar 2 apresentou uma arquitetura 10-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem = 0,7.

Além do mais, a rede ótima preliminar 2 apresentou as seguintes entradas de rede: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,075, % Arg., LL (%), IP (%), $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). A saída da rede ótima preliminar 2 em questão foi o M_R (kPa).

- A rede ótima preliminar 3 (para solos grossos, compactados na energia modificada)

Conceitualmente, a rede ótima preliminar 3 é aquela que apresenta um valor do EMR (erro médio relativo) próximo aos obtidos pelas redes ótimas preliminar 1 ou 2, para um mínimo de entradas de rede. Assim, observa-se na Tabela 4.20 que a rede ótima preliminar 3 foi a rede neural que apresentou um EMR de 8,756% para um número mínimo de 8 entradas de rede, e ainda, pode-se verificar que a rede ótima preliminar 3 possuía uma arquitetura 8-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem = 0,7.

Tabela 4.20 - Estudo para determinação das redes ótimas preliminares 2 e 3 para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada

Variáveis descartadas	Arquitetura	Taxa aprend.	Momento	EMR (%)
e3	11-12-12-1	0,7	0,7	9,687
e4	11-12-12-1	0,7	0,7	9,720
e5	11-12-12-1	0,7	0,7	9,995
e7	11-12-12-1	0,7	0,7	11,147
e3, e4	10-12-12-1	0,7	0,7	8,141
e3, e5	10-12-12-1	0,7	0,7	8,911
e3, e7	10-12-12-1	0,7	0,7	10,824
e4, e5	10-12-12-1	0,7	0,7	9,067
e4, e7	10-12-12-1	0,7	0,7	9,771
e5, e7	10-12-12-1	0,7	0,7	10,213
e3, e4, e5	9-12-12-1	0,7	0,7	10,561
e3, e4, e7	9-12-12-1	0,7	0,7	9,705
e3, e5, e7	9-12-12-1	0,7	0,7	10,561
e4, e5, e7	9-12-12-1	0,7	0,7	11,885
e3, e4, e5, e7	8-12-12-1	0,7	0,7	8,756

e1 = σ_3 (kPa), e2 = σ_d (kPa), e3 = % passa # 0,42, e4 = % passa # 0,15, e5 = % passa # 0,075, e6 = % Arg., e7 = LL (%), e8 = IP (%), e9 = $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), e10 = W_{ot} (%), e11 = E_o (kPa) e e12 = RCS (kPa).

Finalmente, as 8 entradas da rede ótima preliminar 3 foram as seguintes: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % Arg., IP (%), $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). A saída da rede ótima preliminar 3 continuou sendo o M_R (kPa).

c) As redes ótimas 1 e 2 (para solos grossos, compactados na energia modificada)

A seguir, descrevem-se os principais dados, usados para se obterem as redes ótimas 1 e 2, para solos compactados na energia modificada, bem como as principais características dessas redes ótimas. Finalmente, é feito um comentário dos resultados apresentados pelas redes.

- A rede ótima 1 (para solos grossos, compactados na energia modificada)

Conforme a metodologia descrita no Capítulo 3, a rede ótima preliminar 2 foi mais eficiente do que a rede ótima preliminar 1, pois apresentou o menor erro médio de relativo (EMR = 8,141%); então, a rede ótima preliminar 2 foi submetida a um aprendizado durante 7 horas (25.200 segundos), com erro médio de treinamento alvo de 0,01% (0,0001) para definir a rede ótima 1.

Após o aprendizado de 7 horas com a rede ótima preliminar 2, a rede ótima 1 foi obtida e apresentou arquitetura 10-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem 0,7. Além disso, para rede ótima 1 em questão foram definidas 10 entradas: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,075, % Arg., LL (%), IP (%), $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). A saída da rede ótima 1 para o caso em estudo continuou sendo o M_R (kPa).

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram, para rede ótima 1 dos solos grossos do interior de Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, respectivamente o erro médio relativo (EMR = 4,211%) e a influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede ótima 1 usada para previsão do módulo de resiliência. Ainda, observa-se na Figura 4.22 que o E_o e o IP são as variáveis que mais influenciam na rede ótima 1 em questão.

Figura 4.21 - Erro médio relativo da rede ótima 1 para solos grossos, compactados na energia modificada

Figura 4.22 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima 1 para solos grossos, compactados na energia modificada

Foi constatado que o aumento do tempo de aprendizado da rede ótima preliminar 2, para obter a rede ótima 1, contribuiu substancialmente para diminuição do EMR, que passou de 8,141%, obtido após 45 minutos, para 4,211% apresentado após 7 horas de aprendizado.

O elevado desempenho da rede ótima 1, que apresentou um EMR de apenas 4,211 %, mostrou que é perfeitamente possível relacionar, através das redes neurais artificiais, o módulo de resiliência com as propriedades dos solos (% passa # 0,075, % Arg., LL, IP, $\rho_{dm\acute{a}x}$, W_{ot} , E_o e RCS).

- A rede ótima 2 (para solos grossos, compactados na energia modificada)

Aplicando-se a metodologia para obtenção da rede ótima 2, apresentada antes (Capítulo 3), a rede ótima preliminar 3, que apresentou um valor do EMR (erro médio relativo), próximo ao da rede ótima preliminar 1, para um número mínimo de entradas, foi submetida a um aprendizado de 7 horas (25.200 segundos) com erro médio de treinamento alvo de 0,01% (0,0001), para definir a rede ótima 2.

A rede ótima 2 que foi obtida a partir da rede ótima preliminar 3, apresentou arquitetura 8-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem 0,7. As Figuras 4.23 e 4.24 mostram respectivamente o erro médio relativo, EMR = 3,815% e a influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede ótima 2 usada para previsão do módulo de resiliência.

Além do mais, as 8 entradas da rede ótima 2 dos solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada foram: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % Arg., IP (%), $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). A saída da rede ótima 2 estabelecida continuou sendo o M_R (kPa).

Figura 4.23 - Erro médio relativo da rede ótima 2 para solos grossos, compactados na energia modificada

Figura 4.24 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima 2 para solos grossos, compactados na energia modificada

O aprendizado de 7 horas, a que foi submetida a rede ótima preliminar 3, para obtenção da rede ótima 2, para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, contribuiu para que o erro médio relativo diminuísse significativamente de 8,756% para 3,815%. Desse modo, mais uma vez, foi demonstrado que o aumento do tempo de aprendizado de fato contribui para diminuição do EMR. Sabe-se que, considerando-se a rede ótima preliminar 3, para tempo de aprendizado maior que 7 horas o erro médio de treinamento se mantém praticamente constante.

Acrescenta-se que o baixo erro médio relativo (3,815%) para previsão do módulo de resiliência, apresentado pela rede ótima 2, evidencia que foi possível relacionar de forma eficiente o módulo de resiliência dos solos grossos, compactados na energia modificada, com apenas 6 propriedades dos solos as quais foram em ordem de importância na rede ótima 2: IP (%), E_o (kPa), % Arg., RCS (kPa), W_{ot} (%) e $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³).

Com base nos resultados indicados na Figura 4.24, pode-se concluir que as propriedades do solo que mais influenciam na rede ótima 2 usada para previsão do módulo de resiliência foram: IP (%), E_o (kPa) e % Arg. por causa da alta importância que elas têm na rede em questão. Essas propriedades do solo guardam relevantes informações relacionadas com a plasticidade, deformabilidade e teor argila contidas no solo.

Comparando-se as redes ótimas 1 e 2, para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada, fica claro que a rede ótima 2 foi a mais eficiente para avaliar o módulo de resiliência dos solos através de suas propriedades, pois além de possuir menor erro médio relativo (3,815%), ela possui menor número de entradas de rede (apenas 8 entradas), o que otimiza o trabalho do operador (ou treinador) da rede neural. Finalmente, não se recomenda a aplicação prática da rede ótima 2, pois ela não foi testada com materiais não usados em sua calibração.

4.5.2 Análise do M_R através de redes neurais de solos de subleito do interior paulista, compactados na energia normal

Nesta fase do trabalho, utilizaram-se os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos de Takeda (2006) para avaliar, através de redes neurais artificiais, a relação do módulo de resiliência com as propriedades do solo, considerando-se os materiais de subleito do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal. As principais características dos solos de Takeda (2006), que foram úteis nas análises a seguir, estão apresentadas no APÊNDICE F.

Para analisar a relação entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo e as tensões através das redes neurais artificiais, considerando-se a metodologia descrita no Capítulo 3, foram obtidas as redes ótimas 1 e 2 para os solos do interior de São Paulo, compactados na energia normal. Assim, serão descritas a seguir, as principais redes neurais geradas e as análises destas redes geradas até, finalmente, se obterem as redes ótimas 1 e 2 que representam as melhores relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo para o caso estudado.

a) A rede ótima preliminar 1 (para solos, compactados na energia normal)

De acordo com o procedimento apresentado no Capítulo 3, a rede ótima preliminar 1 é importante para se chegar às redes ótimas preliminares 2 e 3 que precedem a obtenção das redes ótimas 1 e 2.

Diante disso, na seqüência, serão destacados os principais dados de construção e as características da rede ótima preliminar 1, para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal.

Os módulos de resiliência utilizados para construção das redes neurais para a obtenção da rede ótima preliminar 1, foram adquiridos através do modelo composto a partir dos resultados de Takeda (2006), para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal de Proctor (descritos na Tabela F.3 no APÊNDICE F). Os principais dados para se obter a rede ótima preliminar 1, para solos compactados na energia normal, apresentam-se como:

i) Variáveis de entrada de rede (ou variáveis explicativas): $e1 = \sigma_3$ (kPa), $e2 = \sigma_d$ (kPa), $e3 = \% \text{ passa } \# 0,42$, $e4 = \% \text{ passa } \# 0,15$, $e5 = \% \text{ passa } \# 0,075$, $e6 = \% \text{ Arg.}$, $e7 = LL$ (%), $e8 = IP$ (%), $e9 = \rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), $e10 = W_{ot}$ (%), $e11 = E_o$ (kPa) e $e12 = RCS$ (kPa). A variável saída da rede ou variável resposta foi o M_R em MPa.

ii) O conjunto para análise da rede, contendo 28 solos, perfazendo um total de 2.800 padrões distintos, com base no estado de tensão atuante. 2.240 padrões (80% do total de padrões), foram para o conjunto de treinamento e 560 padrões (20% do total de padrões), eram para o conjunto de validação da rede neural.

A rede ótima preliminar 1 obtida, para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal, foi uma rede de arquitetura 12-12-12-1, taxa de aprendizado de 0,7, momento de 0,7 e que apresentou um erro médio de treinamento de 0,001488. Ainda, na Tabela E.2 no APÊNDICE E estão descritas as

arquiteturas e os erros médios de treinamento de outras redes testadas para se obter a rede ótima preliminar 1 considerada.

A previsão do módulo de resiliência através das propriedades do solo, através da rede ótima preliminar 1, para solos compactados na energia normal, apresentou um EMR de 0,562% como ilustra a Figura 4.25. A Figura 4.26 destaca a influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede ótima preliminar 1 usada para previsão módulo de resiliência.

A previsão dos módulos de resiliência, feita através da rede ótima preliminar 1, para solos compactados na energia normal, pode ser considerada excelente, devido ao baixíssimo erro médio relativo apresentado ($\text{EMR} = 0,562\%$); portanto fica evidente que foi possível relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo utilizado a rede em questão. Contudo, para obter erros médios relativos ainda mais baixos do que o apresentado pela rede ótima preliminar 1, é necessário desenvolver as redes ótimas 1 e 2.

Pode-se verificar na Figura 4.26 que as 3 propriedades do solo (variáveis explicativas ou entradas de rede), que mais influenciam na rede ótima preliminar 1 usada para previsão do módulo de resiliência foram: % Arg., IP (%) e RCS (kPa).

Figura 4.25 - Erro médio relativo da rede ótima preliminar 1 para solos, compactados na energia normal

Figura 4.26 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima preliminar 1 para solos, compactados na energia normal

b) As redes ótimas preliminares 2 e 3 (para solos, compactados na energia normal)

A partir ótima preliminar 1, para solos compactados na energia normal, foi possível obter as redes ótimas preliminares 2 e 3, realizando-se uma análise do desempenho de algumas redes geradas, quando eram eliminadas as variáveis de entrada de pouca importância na rede ótima preliminar 1. Assim sendo, para rede ótima preliminar 1, em questão, selecionaram-se as 4 entradas de pouca influência

na rede as quais foram: $e3 = \% \text{ passa } \# 0,42$, $e5 = \% \text{ passa } \# 0,075$, $e9 = \rho_{d\text{máx}}$ (g/cm^3) e $e7 = \text{LL } (\%)$.

Além do mais, é importante destacar que as variáveis de entrada da rede ótima preliminar 1 eram: $e1 = \sigma_3$ (kPa), $e2 = \sigma_d$ (kPa), $e3 = \% \text{ passa } \# 0,42$, $e4 = \% \text{ passa } \# 0,15$, $e5 = \% \text{ passa } \# 0,075$, $e6 = \% \text{ Arg.}$, $e7 = \text{LL } (\%)$, $e8 = \text{IP } (\%)$, $e9 = \rho_{d\text{máx}}$ (g/cm^3), $e10 = W_{ot}$ (%), $e11 = E_o$ (kPa) e $e12 = \text{RCS}$ (kPa). A variável saída da rede ótima preliminar 1 considerada foi o M_R (MPa)

- A rede ótima preliminar 2 (para solos, compactados na energia normal)

A Tabela 4.21 indica os resultados do estudo da eliminação das variáveis de entrada de pouca influência na rede ótima preliminar 1. Com base na Tabela 4.21, a rede neural que apresenta o $\text{EMR} = 0,558\%$ é rede ótima preliminar 2 para solos, compactados na energia normal, pois foi a rede com o maior desempenho (menor EMR), com menor número de entradas do que a rede ótima preliminar 1.

Ainda, na Tabela 4.21, é possível verificar que a rede ótima preliminar 2, que apresentou $\text{EMR} = 0,558 \%$, possuía uma arquitetura 9-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem = 0,7. Além do mais, a rede ótima preliminar 2, para solos compactados na energia normal, possuía as seguintes entradas de rede: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), $\% \text{ passa } \# 0,42$, $\% \text{ passa } \# 0,15$, $\% \text{ Arg.}$, $\text{IP } (\%)$, W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). A saída da rede ótima preliminar 2, em questão, foi o M_R (MPa).

- A rede ótima preliminar 3 (para solos, compactados na energia normal)

De acordo com a metodologia, a rede ótima preliminar 3 é aquela que apresenta um valor do EMR, próximo aos erros médios relativos EMR, redes ótimas preliminares 1 ou 2, para o mínimo de entradas de rede. A partir da Tabela 4.21 que mostra os resultados do estudo da eliminação das variáveis de entrada de pouca influência na rede ótima preliminar 1. Nota-se que a rede ótima preliminar 3 é a rede neural que alcançou um $EMR = 0,575\%$, na previsão dos módulos de resiliência, para um número mínimo de 8 entradas de rede.

Com base na Tabela 4.21, pode-se constatar que a rede ótima preliminar 3 apresentou uma arquitetura 8-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem = 0,7. Ainda, a rede ótima preliminar 3, para solos compactados na energia normal, possuía e as seguintes entradas de rede: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,15, % Arg., IP (%), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). A saída da rede neural considerada era o M_R (MPa).

Tabela 4.21 - Estudo para determinação das redes ótimas preliminares 2 e 3 para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal

Variáveis descartadas	Arquitetura	Taxa aprend.	Momento	EMR (%)
e3	11-12-12-1	0,7	0,7	0,722
e5	11-12-12-1	0,7	0,7	0,708
e7	11-12-12-1	0,7	0,7	0,575
e9	11-12-12-1	0,7	0,7	0,668
e3, e5	10-12-12-1	0,7	0,7	0,695
e3, e7	10-12-12-1	0,7	0,7	0,656
e3, e9	10-12-12-1	0,7	0,7	0,683
e5, e7	10-12-12-1	0,7	0,7	0,624
e5, e9	10-12-12-1	0,7	0,7	0,708
e7, e9	10-12-12-1	0,7	0,7	0,963
e3, e5, e7	9-12-12-1	0,7	0,7	1,012
e3, e5, e9	9-12-12-1	0,7	0,7	0,667
e3, e7, e9	9-12-12-1	0,7	0,7	0,646
e5, e7, e9	9-12-12-1	0,7	0,7	0,558
e3, e5, e7, e9	8-12-12-1	0,7	0,7	0,575

e1 = σ_3 (kPa), e2 = σ_d (kPa), e3 = % passa # 0,42, e4 = % passa # 0,15, e5 = % passa # 0,075, e6 = % Arg., e7 = LL (%), e8 = IP (%), e9 = $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), e10 = W_{ot} (%), e11 = E_o (kPa) e e12 = RCS (kPa).

c) As redes ótimas 1 e 2 (para solos, compactados na energia normal)

A seguir são apresentados os principais dados para se obterem as redes ótimas 1 e 2 dos solos compactados na energia normal; Destacam-se as principais características dessas redes ótimas, e, finalmente, serão discutidos os resultados apresentados por elas.

- A rede ótima 1 (para solos, compactados na energia normal)

A rede ótima preliminar 2 foi mais eficiente que a rede ótima preliminar 1; pois apresentou EMR = 0,558%, ou seja, um valor mais baixo do EMR. Diante do exposto, a rede ótima preliminar 2 foi submetida a um aprendizado durante 7 horas

(25.200 segundos), com erro médio de treinamento alvo de 0,01% (0,0001), para definir a rede ótima 1.

A rede ótima 1, que foi obtida para solos compactados na energia normal, possuía uma arquitetura 9-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem = 0,7. Além do mais, a rede ótima 1 considerada apresentava 9 entradas de rede: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,42, % passa # 0,15, % Arg., IP (%), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). A saída da rede ótima 1 continuou sendo o M_R (MPa).

As Figuras 4.27 e 4.28 ilustram respectivamente, para rede ótima 1, o erro médio relativo (EMR = 0,208%) de previsão do módulo de resiliência e a influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede ótima 1 usada na previsão do módulo de resiliência.

O baixo erro médio relativo (EMR = 0,208%) para previsão do módulo de resiliência, apresentado pela rede ótima 1, indica o alto potencial da rede para relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo.

Enfim, analisando-se as propriedades dos solos que influenciam nas redes ótimas 1 usadas para previsão do módulo de resiliência das redes ótimas nas Figuras 4.22 e 4.28, tanto para os solos grossos compactados na energia modificada, como para solos compactados na energia normal, foi constatado que a propriedades IP (%), E_o (kPa) RCS (kPa) e W_{ot} (%) exercem considerável influência nas redes ótimas 1.

Figura 4.27 - Erro médio relativo da rede ótima 1 para solos, compactados na energia normal

Figura 4.28 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima 1 para solos, compactados na energia normal

- Rede ótima 2 (para solos, compactados na energia normal)

A rede ótima preliminar 3, com $EMR = 0,575\%$, foi submetida a um aprendizado de 7 horas (25.200 segundos) com erro médio de treinamento alvo de $0,01\%$ (0,0001) para definir a rede ótima 2 para solos do interior do Estado de São Paulo compactados na energia normal.

Após o treinamento de 7 horas, foi obtida a rede ótima 2 que possuía uma arquitetura 8-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem = 0,7. Ainda, as Figuras 4.29 e 4.30 apresentam respectivamente o erro médio relativo (EMR = 0,276%) e a influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede ótima 2 usada na previsão do módulo de resiliência.

Além do mais, a rede ótima 2 para solos compactados na energia normal possuía 8 entradas de rede: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,15, % Arg., IP (%), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). Ainda, a saída da rede ótima 2 continuou sendo o M_R (MPa).

O baixo erro médio relativo (0,276%) apresentado pela rede ótima 2, serve para confirmar que as 6 propriedades do solo que mais influenciam na rede ótima 2 usada para previsão do módulo de resiliência são: % passa # 0,15, % Arg., IP, W_{ot} , E_o e RCS. Ainda, pode-se concluir, frente ao baixo erro médio relativo alcançado pela rede ótima 2, que essa rede neural apresentou um altíssimo potencial para relacionar o módulo de resiliência com as 6 propriedades dos solos consideradas.

Figura 4.29 - Erro médio relativo da rede ótima 2 para solos, compactados na energia normal

Figura 4.30 - Influência das variáveis de entrada da rede ótima 2 para solos, compactados na energia normal

Foi observado que a rede ótima preliminar 3, com um EMR = 0,575%, após 45 minutos de aprendizado, reduziu o erro para 0,276%, após 7 horas de aprendizado. Portanto, mais uma vez, verificou-se que o aumento do tempo de aprendizado contribuiu significativamente para uma diminuição do erro médio relativo (EMR) de previsão do módulo de resiliência.

Comparando-se as redes ótimas 1 e 2, para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal, pode-se observar que as duas redes apresentaram erros médios relativos muito próximos, $EMR = 0,208\%$, para rede ótima 1 e $EMR = 0,276\%$ para rede ótima 2. Contudo, a rede ótima 2 apresenta menos entradas de rede do que a rede ótima 1; assim sendo, é mais fácil para o usuário da rede trabalhar com a rede ótima 2; e, ainda, a velocidade dos cálculos através da rede ótima 2 é maior. Diante disso, conclui-se que a rede ótima 2 apresenta ligeira vantagem sobre a rede ótima 1.

Analisado a influência que as propriedades do solo têm nas redes ótimas 2, nas Figuras 4.24 e 4.30, tanto para solos grossos, compactados na energia modificada, como para solos compactados na energia normal, pode-se verificar que o IP (%), E_o (kPa), RCS (kPa) e W_{ot} (%) influenciam consideravelmente nas redes ótimas 2 usadas para previsão do módulo de resiliência dos solos.

Diante do exposto até aqui, como foi verificado para as redes ótimas 1 e redes ótimas 2, tanto para solos grossos, compactados na energia modificada, como para os solos compactados na energia normal, que as propriedades IP (%), E_o (kPa), RCS (kPa) e W_{ot} (%) exercem influência considerável nas redes usadas para previsão do módulo de resiliência, pode-se concluir que, de maneira geral, o módulo de resiliência dos solos do interior do Estado de São Paulo se relaciona com as propriedades IP (%), E_o (kPa), RCS (kPa) e W_{ot} (%).

Finalmente não se recomenda a aplicação prática das redes ótimas 1 e 2 para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal, pois essas redes não foram testadas com solos não usados em sua calibração. Embora, o conjunto de validação, que é usado para validar a rede através do cálculo do EMR, utilize dados sorteados aleatoriamente que não são usados no conjunto de treinamento da rede, contudo, o conjunto de validação utiliza os mesmos solos empregados no conjunto de treinamento.

4.5.3 Eficiência das redes neurais com solos não usados na calibração

Apesar do bom desempenho apresentado pelas redes neurais para relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo, as redes desenvolvidas, até agora, não foram testadas com solos não usados em sua calibração ou em sua estrutura de treinamento. Portanto, teoricamente, as redes neurais aprenderam a relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo, excelentemente bem, e possibilitaram encontrar as propriedades do solo mais importantes na relação. Contudo, para que as redes neurais sejam aptas para aplicação prática elas necessitam ser testadas com materiais (solos) que não sejam usados na sua calibração ou constituição.

Nesta fase do estudo, desenvolveram-se duas redes neurais de teste com solos do interior do Estado de São Paulo a exceção do Vale do Ribeira, as quais foram testadas com solos não utilizados na calibração e validação. Foram

construídas uma rede neural de teste para os solos grossos compactados na energia modificada e outra rede neural de teste para os solos compactados na energia normal. Avaliou-se então o desempenho das redes neurais de teste através do erro médio relativo (EMR) de previsão dos módulos de resiliência dos solos testados.

A construção das redes neurais utilizadas para teste, baseou-se nas redes ótimas 2, que são as redes neurais com uma alta eficiência para o número mínimo de entradas de rede, apresentadas anteriormente.

Após analisar o erro médio relativo para a rede testada com um grupo de solos não usados na calibração, também se verificou o erro médio relativo para cada solo testado individualmente, deste modo, avaliando-se a capacidade de previsão do módulo de resiliência através da rede neural de teste para materiais isolados. Na sequência do estudo, foram analisadas as propriedades dos solos que formavam as redes neurais de teste, buscando-se explicar o que colaborou para os maiores ou os menores erros médios relativos de previsão do módulo de resiliência de cada solo que foi utilizado para testar a rede neural.

Como as redes neurais de teste basearam-se nas redes ótimas 2, a arquitetura, a taxa de aprendizagem e o momento utilizados nas redes ótimas 2 construídas anteriormente foram mantidas nas redes neurais de teste, tanto para os solos grossos na energia modificada quanto para os solos na energia normal, e também para as redes de teste com os solos testados individualmente.

Optou-se por utilizar as configurações das redes ótimas 2, pois elas apresentaram uma elevada precisão para o número mínimo de variáveis de entrada de rede. Como visto anteriormente, o menor número de entradas de rede diminui o tamanho da rede neural e eleva a velocidade de cálculos, permitindo mais ciclos de aprendizado da rede em um intervalo de tempo. Além disso, o menor número de variáveis de entrada de rede otimiza o trabalho do usuário da rede.

4.5.3.1 Rede neural com solos grossos na energia modificada testada com materiais não usados na calibração

Os principais dados usados para construir a rede neural de teste, para os solos grossos compactados na energia modificada são os seguintes:

- i) Um grupo de 34 solos, correspondendo a 3.400 padrões, foi utilizado para treinar e validar a rede neural de teste, sendo que os 3.400 padrões foram divididos de forma aleatória da seguinte forma: 80% dos dados usados para treinar a rede de teste e 20% dos dados usados para validar a rede de teste. Destaca-se que os 34 solos foram escolhidos aleatoriamente.

- ii) Um grupo de 8 solos (19% do total de solos do total de 42 solos), correspondendo a 800 padrões, foi usado para testar a rede neural de teste. Neste caso, também os 8 solos foram escolhidos aleatoriamente.

Para construção da rede de teste com solos na energia modificada foi utilizada uma arquitetura 8-12-12-1, taxa de aprendizagem = 0,7 e momento = 0,7, e ainda, as entradas da rede de teste foram: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % Arg., IP (%), $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa), sendo que a saída da era o M_R (kPa).

A rede de teste foi submetida a um aprendizado de 7 horas (25.200 segundos) com erro médio de treinamento alvo de 0,01% (0,0001). Além disso, as 8 amostras de solos escolhidos aleatoriamente para testar a rede foram: 26, 40, 57, 60, 61, 79, 84 e 1.

A Figura 4.31 mostra o erro médio relativo (37,049%) obtido na previsão do módulo de resiliência dos 8 solos usados para teste com a utilização da rede de teste com solos na energia modificada.

Figura 4.31 - Erro médio relativo da rede de teste com solos na energia modificada que foi testada com 8 solos

Considerando-se o valor elevado do erro médio relativo de 37,049% (tendo em vista que, nos ensaios triaxiais cíclicos, é aceitável erros de até 30% na estimativa do módulo de resiliência), pode-se afirmar que a previsão do módulo de resiliência dos 8 solos testados apresentou uma precisão baixa, se comparada ao erro de 3,815% determinado quando os 42 solos foram utilizados conjuntamente na fases de treinamento e validação da rede.

Além do mais, como foram 8 materiais testados conjuntamente, possivelmente a rede neural de teste apresentou boas previsões do módulo de resiliência para alguns materiais do grupo considerado; portanto, é interessante averiguar o desempenho individual da rede de teste para cada um dos materiais testados individualmente.

Como o EMR não foi muito alto, nesse teste, confirmou-se que as principais propriedades, que influenciam na rede de teste usada na previsão do módulo de resiliência dos solos grossos compactados na energia modificada, são as mesmas determinadas anteriormente para rede ótima 2, ou seja: IP, E_o , % Arg., RCS, W_{ot} e $\rho_{dm\acute{a}x}$.

4.5.3.2 Avaliação do erro médio relativo de cada amostra, compactada na energia modificada, tomada isoladamente

Nessa oportunidade, foram analisados individualmente os erros médios relativos de previsão do módulo de resiliência das 8 amostras de solos (26, 40, 57, 60, 61, 79, 84 e 1) escolhidas conforme destacado anteriormente. Assim sendo, procedeu-se às análises dos resultados, considerado o mau ou o bom desempenho da rede neural de teste, com base no EMR obtido para as amostras testadas.

a) Mau desempenho da rede de teste para solos compactados na energia modificada tomados isoladamente

As Figuras 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam erros médios relativos de 72,544%, 62,223%, 56,426% e 66,102%, obtidos na previsão do módulo de resiliência, que foram determinados respectivamente para amostras de solo 26, 40, 57 e 61, compactadas na energia modificada e tomadas de maneira isolada.

Com base nos elevados erros médios relativos de 72,544%, 62,223%, 56,426% e 66,102%, determinados para as amostras 26, 40, 57 e 61, respectivamente, pode-se afirmar que a previsão do módulo de resiliência, feita pela rede para os 4 solos testados individualmente, foi ruim.

Analisando-se as propriedades dos solos, que constituíam a rede neural de teste, pode-se afirmar que, na estrutura da rede de teste, não havia solos com muitas propriedades semelhantes aos das amostras 26, 40, 57 e 61 empregadas no teste da rede. Portanto, a rede neural de teste não teve referenciais para aprender a

relação do módulo de resiliência com as propriedades do solo para os casos estudados; desse modo, pode-se justificar os altos erros médios relativos, apresentados nas previsões dos módulos de resiliência, feitas com a rede de teste para as amostras 26, 40, 57 e 61.

Figura 4.32 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 26, com a rede de teste para materiais na energia modificada

Figura 4.33 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 40, com a rede de teste para materiais na energia modificada

Figura 4.34 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 57, com a rede de teste para materiais na energia modificada

Figura 4.35 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 61, com a rede de teste para materiais na energia modificada

b) Bom desempenho da rede de teste para solos na energia modificada tomados isoladamente

As Figuras 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39 mostram os erros médios relativos de 10,794%, 10,420%, 10,978% e 6,905%, obtidos na previsão do módulo de resiliência, que foram determinados respectivamente para as amostras 60, 79, 84 e 1, compactadas na energia modificada e tomadas isoladamente para teste.

Os erros médios relativos de previsão do módulo de resiliência, obtidos para amostras de teste 60, 79, 84 e 1, são considerados baixos ($EMR < 30\%$); portanto, fica claro que a rede neural de teste apresentou um alto desempenho em relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo.

Levando-se em conta as propriedades dos solos que constituíam a rede de teste, pode-se afirmar que foram utilizados, na estrutura da rede de teste, solos com propriedades (% Arg., IP, $\rho_{dm\acute{a}x}$, W_{ot} , E_o e RCS) similares aos das amostras 60, 79, 84 e 1, aplicadas no teste da rede. Portanto, na estrutura da rede de teste, existiam materiais que serviam de referencial para a rede de teste aprender a relação entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo, para os casos considerados. Desse modo, explicam-se os baixos erros médios relativos, obtidos na previsão dos módulos de resiliência das amostras 60, 79, 84 e 1.

A Tabela 4.22 apresenta as características das amostras 60, 79, 84 e 1 e os solos correspondentes com características próximas às mesmas.

Tabela 4.22 - Propriedades do solo das amostras similares às amostras 60, 79, 84 e 1

Amostra	% Arg. (%)	IP (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W_{ot} (%)	E_o (kPa)	RCS (kPa)	Observação
60	22,0	7	2,120	8,80	88059	449	
54	20,0	8	2,115	8,45	60250	493	Similar à 60
79	17,0	9	2,040	9,70	58555	385	
58	14,0	10	1,980	10,30	43802	322	Similar à 79
84	19,0	3	2,080	9,30	64933	364	
63	22,0	5	2,070	9,20	62334	405	Similar à 84
1	15,0	7	2,018	10,95	47619	477	
58	14,0	10	1,980	10,30	43802	322	Similar à 1
82	16,0	10	1,980	11,00	38921	311	Similar à 1

Figura 4.36 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 60, com a rede de teste para materiais na energia modificada

Figura 4.37 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 79, com a rede de teste para materiais na energia modificada

Figura 4.38 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 84, com a rede de teste para materiais na energia modificada

Figura 4.39 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 1, com a rede de teste para materiais na energia modificada

É importante destacar que a relação entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo desenvolvida pela rede ótima 2, para solos grossos do interior do Estado de São Paulo, mais uma vez, foi ratificada, através dos baixos erros médios relativos, apresentados pelas amostras teste 60, 79, 84 e 1, as quais, mesmo não fazendo parte da calibração da rede de teste, possuíam materiais similares a si na constituição da rede de teste. Além do mais, os baixos erros médios relativos da rede de teste confirmam que as propriedades do solo que influenciam na rede ótima 2 usada para previsão do módulo de resiliência são: IP, E_o , % Arg., RCS, W_{ot} e $\rho_{dmáx}$, uma vez que a rede de teste se originou da rede ótima 2.

4.5.3.3 Rede neural com solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal, testada com materiais não usados na calibração

As informações mais importantes utilizadas para construir a rede neural, para solos compactados na energia normal, que foi testada com solos não usados em sua calibração são as seguintes:

- i) Um grupo de 22 solos, correspondendo a 2.200 padrões, foi utilizado para treinar e validar a rede neural de teste, sendo que os 2.200 padrões foram divididos de forma aleatória da seguinte forma: 80% dos dados (1.760 padrões) usados para treinar a rede e 20% dos dados (440 padrões) usados para validar a rede. Ainda, os 22 solos foram escolhidos aleatoriamente.

- ii) Um grupo de 6 solos (21,4% do total de 28 de solos), correspondendo a 600 padrões, foi usado para testar a rede neural. Neste caso, também os 6 solos foram escolhidos aleatoriamente.

A rede de teste com solos compactados na energia normal, que era baseada na rede ótima 2, apresentava arquitetura 8-12-12-1, taxa de aprendizagem = 0,7 e momento = 0,7. Além disso, as entradas da rede de teste foram: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,15, % Arg., IP (%), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa), sendo que a saída era o M_R (MPa).

A rede de teste foi submetida a um aprendizado de 7 horas (25.200 segundos) com erro médio de treinamento alvo de 0,01% (0,0001). Finalmente, as 6 amostras de solos escolhidos aleatoriamente para o teste da rede neural foram: 11, 88, 50, 65, 30 e 64.

A Figura 4.40 ilustra o elevado erro médio relativo (70,681%), obtido na previsão do módulo de resiliência, através da rede de teste. Pode-se notar, na mesma figura, a forte dispersão das previsões em relação à reta central de erro nulo.

Figura 4.40 - Erro médio relativo da rede de teste, para solos compactados na energia normal, que foi testada com 6 solos que não foram usados na calibração

Com vistas ao elevado erro médio relativo (70,681%), apresentado pela rede de teste em questão, pode-se afirmar que a previsão do módulo de resiliência, feita por essa rede, para os 6 solos testados, foi ruim; se comparada a previsão feita pela

rede ótima 2 que apresentou um EMR = 0,276%, quando foram utilizados todos os 28 solos conjuntamente.

Considerando-se que a rede neural aprende com os dados a ela apresentados, ficou claro através do elevado erro médio relativo, 70,681%, que no banco de dados da rede de teste não havia informações suficientes para que a rede de teste aprendesse a relação existente entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo. Portanto, a rede neural de teste pode ser considerada pequena ou com poucos materiais (apenas 22 solos) usados na sua construção.

Na rede de teste, os solos não eram separados em grupos granulométricos; por exemplo, para os solos usados na construção da rede de teste, a porcentagem que passava na peneira 200 (# 0,075 mm) variava de 95,6% a 22,1% que é uma amplitude elevadíssima, abrangendo solos finos e grossos, por tal motivo, mais uma vez, uma rede neural de teste, com apenas 22 solos é considerada pequena para tão grande variação granulométrica.

Observando-se a Figura 4.40, nota-se que o valor do erro médio relativo, obtido na previsão do módulo de resiliência, com a rede de teste foi bastante elevado. Contudo, pode-se perceber que alguns dos resultados apresentam certa constância no erro de previsão e que os valores dos módulos de resiliência, previstos estão próximos à reta central de erro nulo. Assim sendo, possivelmente, a rede de teste foi capaz de aprender, para algum material ou para alguns materiais, acerca da relação do módulo de resiliência com as propriedades do solo, mesmo ocorrendo um elevado erro de previsão. Portanto, é interessante a análise do EMR

individual para cada solo testado, e assim observar se, para algum solo testado, a rede de teste apresentou alto desempenho.

4.5.3.4 Avaliação do erro médio relativo de cada amostra, compactada na energia normal tomada isoladamente

Nesta fase do trabalho, foram analisados individualmente os erros médios relativos de previsão do módulo de resiliência de cada uma das 6 amostras de solos (64, 30, 65, 50, 11 e 88), escolhidas aleatoriamente e usadas para avaliar a rede de teste. Assim sendo, foram realizadas as análises dos resultados, levando-se em conta o mau ou o bom desempenho da rede neural de teste, com base no EMR, obtido para as amostras testadas.

a) Mau desempenho da rede de teste para solos na energia normal tomados isoladamente

As Figuras 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45 apresentam os erros médios relativos 169,632%, 62,085%, 68,973%, 48,647% e 54,948% para as amostras de solo 64, 65, 88, 50 e 11, respectivamente, tomadas de maneira isolada.

Analisando-se os elevados erros médios relativos, determinados para cada uma das amostras de solo testadas, observa-se que a previsão dos módulos de resiliência, para os solos 64, 65, 88, 50 e 11, feita pela rede de teste, pode ser considerada ruim.

Após observar as propriedades dos materiais, que formavam a rede de teste, para solos compactados na energia normal, pode-se assegurar que a rede de teste não apresentava, em sua constituição, solos com as propriedades semelhantes aos das amostras 64, 65, 88, 50 e 11, empregadas para testá-la. Portanto, como a rede neural aprende com os exemplos apresentados a ela, é possível compreender o motivo dos elevados erros médios relativos, apresentados pela rede de teste, na previsão dos módulos de resiliência das amostras 64, 65, 88, 50 e 11.

Figura 4.41 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 64, com a rede de teste para materiais na energia normal

Figura 4.42 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 65, com a rede de teste para materiais na energia normal

Figura 4.43 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 88, com a rede de teste para materiais na energia normal

Figura 4.44 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 50, com a rede de teste para materiais na energia normal

Figura 4.45 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 11, com a rede de teste para materiais na energia normal

b) Bom desempenho da rede de teste para solo na energia normal tomado isoladamente

A Figura 4.46 mostra o erro médio relativo de 19,800%, obtido para amostra 30, que foi tomada isoladamente para teste da rede neural. O valor do EMR demonstra uma relativa precisão da rede de teste prevê os módulos de resiliência da amostra 30.

Considerando-se as propriedades dos materiais que constituíam a rede de teste, pode-se afirmar que a amostra 30 apresentava pelo menos dois materiais (amostra 27 e 57), com quatro (mais da metade) propriedades similares às suas; os quais foram usados na calibração da rede teste. Embora, os dois materiais não fossem totalmente similares à amostra 30, de certo modo, a rede de teste aprendeu a relacionar o módulo de resiliência com as propriedades do solo (E_o , W_{ot} , IP, % passa # 0,15, RCS e % Arg.), usadas como entrada da rede.

A Tabela 4.23 apresenta as características da amostra 30 e os solos com a maioria das características próximas ao da amostra 30.

Tabela 4.23 - Propriedades do solo das amostras quase totalmente similares à amostra 30

Amostra	% Arg. (%)	% passa # 0,15	IP (%)	W_{ot} (%)	E_o (kPa)	RCS (kPa)	Observação
30	27,0	49,9	12	10,46	104429	1049	
27	28,0	69,4	15	12,00	203295	1483	Quase similar à 30
57	24,0	64,0	8	11,20	64583	751	Quase similar à 30

Figura 4.46 - EMR de previsão dos módulos de resiliência da amostra 30, com a rede de teste para materiais na energia normal

Pode-se observar na Figura 4.46 que a rede de teste aprendeu a relacionar, razoavelmente bem, o módulo de resiliência com as propriedades do solo, principalmente no que diz respeito ao aumento e a diminuição do módulo de resiliência previsto, mesmo havendo uma certa constância de erro na previsão; pois, os módulos de resiliência previstos são quase constantes em relação à reta de erro nulo.

Enfim, o EMR, obtido com a rede de teste na avaliação da amostra 30, que ainda é um erro aceitável na previsão do módulo de resiliência, serve para confirmar a relação existente entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo, apresentada pela rede ótima 2 para solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia normal.

Diante dos resultados apresentados, pode-se observar que, de maneira geral, quando uma rede neural possui em sua calibração dados de um solo similar ao solo, que é usado para testá-la, a rede fornece um baixo EMR; todavia quando uma rede não possui, em sua calibração, dados de um solo similar ao solo, que é usado no seu teste, ela apresenta um elevado EMR. Portanto, é necessário construir redes neurais artificiais suficientemente grandes, de modo que dentre os materiais, utilizados para calibrar as redes, exista pelo menos um material similar ao que é utilizado para o teste das redes; pois, assim, as redes neurais estarão aptas à aplicação prática.

4.5.4 Análise da influência das variáveis correlatas na eficiência das redes neurais artificiais

Como é sabido, existe uma forte relação entre as variáveis resistência à compressão simples (RCS) e módulo tangente inicial (E_o); Além disso, as variáveis massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima (W_{ot}) também se relacionam. As redes originais estudadas, além das variáveis relacionadas à granulometria e plasticidade, incluíam E_o , RCS, W_{ot} e $\rho_{dm\acute{a}x}$. Nessa fase do estudo será comparado o desempenho das redes originais com o desempenho das redes, onde foi utilizada apenas uma variável de cada par de variável correlata. Assim foram analisadas redes construídas, considerando-se as seguintes combinações de variáveis: RCS e $\rho_{dm\acute{a}x}$, RCS e W_{ot} , E_o e $\rho_{dm\acute{a}x}$, e ainda E_o e W_{ot} .

As redes neurais isentas da conjunção de variáveis correlatas, na estrutura das mesmas, que serão implementadas a seguir, têm como objetivo otimizar, ainda mais, a eficiência das redes neurais no que tange ao trabalho do usuário da rede e a diminuição do EMR. Além do mais, nas análises realizadas foram considerados separadamente os solos do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada e na energia normal.

Para obter redes neurais, sem a existência da conjunção de variáveis correlatas em sua estrutura, tomaram-se como referência as redes ótimas 2, as redes de melhor desempenho que foram descritas anteriormente, e geraram-se redes com o número de neurônios de entrada menor do que as das redes ótimas 2.

Finalmente, as redes desenvolvidas, nesta fase do estudo, foram submetidas a um aprendizado de 7 horas (25.200 segundos) e EMT alvo de 0,01%, para definição da rede neural ideal, isenta da conjunção de variáveis correlatas em sua estrutura, bem como, para descrição da influência de cada variável da rede na determinação do módulo de resiliência.

4.5.4.1 Análise da influência das variáveis correlatas na eficiência das redes para solos grossos, compactados na energia modificada

As redes neurais geradas, a partir da rede ótima 2, para solos grossos compactados na energia modificada, que foram usadas, na análise da influência da conjunção das variáveis correlatas nas redes, têm um número menor de entradas do

que a rede ótima 2. O momento, a taxa de aprendizagem e a arquitetura dos neurônios internos das redes geradas eram iguais ao da rede ótima 2.

É importante destacar que a rede ótima 2, para solos grossos compactados na energia modificada, possuía as seguintes entradas: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % Arg., IP (%), $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa). Ainda, a saída da rede ótima 2 era o M_R (kPa), sendo que a rede ótima 2 em questão possuía: arquitetura 8-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem 0,7, e também EMR = 3,815%.

A Tabela 4.24 mostra os nomes das redes neurais, usadas na análise da influência da conjunção das variáveis correlatas nas redes e as variáveis correlatas que são consideradas nas redes, as variáveis correlatas que são descartadas nas redes, as arquiteturas das redes, o momento, a taxa de aprendizagem e o erro médio relativo (EMR) de previsão do módulo de resiliência com a rede neural de análise. Ainda, a título de comparação, a Tabela 4.24 traz os dados da rede ótima 2, para os solos grossos, compactados na energia modificada.

Observa-se, na Tabela 4.24, que a rede neural R(RCS, W_{ot}) apresentou um erro médio de treinamento muito baixo (3,851%). Assim sendo, o fato de a rede neural R(RCS, W_{ot}) ter um EMR muito baixo e também a RCS, como entrada de rede, permitiu concluir que a rede R(RCS, W_{ot}) é a rede neural ideal, para obtenção do módulo de resiliência para solos grossos, compactados na energia modificada; pois, o baixo EMR da rede R(RCS, W_{ot}) é proporcional aos erros das demais redes neurais analisadas, e a RCS pode ser obtida nos laboratórios rodoviários com maior facilidade e precisão do que o E_o .

Tabela 4.24 - Desempenho das redes neurais para solos grossos, compactados na energia modificada, considerando as variáveis correlatas

Nome	Variáveis de estudo		Arquitetura	Taxa aprend.	Momento	EMR (%)
	Consideradas na rede	Descartadas da rede				
Rede ótima 2	Completa	---	8-12-12-1	0,7	0,7	3,815
$R(E_o, \rho_{dm\acute{a}x})$	$E_o, \rho_{dm\acute{a}x}$	RCS, W_{ot}	6-12-12-1	0,7	0,7	4,686
$R(E_o, W_{ot})$	E_o, W_{ot}	RCS, $\rho_{dm\acute{a}x}$	6-12-12-1	0,7	0,7	3,727
$R(RCS, \rho_{dm\acute{a}x})$	RCS, $\rho_{dm\acute{a}x}$	E_o, W_{ot}	6-12-12-1	0,7	0,7	4,195
$R(RCS, W_{ot})$	RCS, W_{ot}	$E_o, \rho_{dm\acute{a}x}$	6-12-12-1	0,7	0,7	3,851

A rede ideal $R(RCS, W_{ot})$, para solos grossos, compactados na energia modificada, isenta da conjunção de variáveis correlatas, apresentava as seguintes entradas: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % Arg., IP (%), W_{ot} (%) e RCS (kPa), e ainda, a saída da rede era o M_R (kPa). Além do mais, a rede em questão possuía momento = 0,7, taxa de aprendizagem = 0,7 e arquitetura = 6-12-12-1.

As Figuras 4.47 e 4.48 mostram, considerando-se a rede ideal $R(RCS, W_{ot})$, respectivamente, o erro médio relativo e a influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede ideal $R(RCS, W_{ot})$ usada para previsão do módulo de resiliência.

Figura 4.47 - EMR de previsão dos módulos de resiliência com a rede neural ideal para solos grossos, compactados na energia modificada

Entradas RNA	Importância (%)	Importância relativa
RCS	25,33	
IP	24,89	
% Arg.	21,35	
W _{ot}	15,74	
σ_3	6,78	
σ_d	5,92	

Figura 4.48 - Influência das variáveis de entrada da rede neural ideal para solos grossos, compactados na energia modificada

Finalmente, com base no estudo com redes neurais isentas da conjunção de variáveis correlatas, pode-se observar que as propriedades dos solos que mais influenciam na rede ideal $R(RCS, W_{ot})$ usada para previsão do módulo de resiliência, dos solos grossos compactados na energia modificada, são: RCS, IP, % Arg. e W_{ot} . Além do mais, as tensões atuantes no solo também influenciam na rede ideal $R(RCS, W_{ot})$ em questão. Contudo, as tensões influenciam menos que as propriedades do solo.

4.5.4.2 Análise da influência das variáveis correlatas na eficiência das redes para solos compactados na energia normal

Para analisar as redes neurais, para solos compactados na energia normal, isentas da conjunção de variáveis correlatas, foram construídas novas redes neurais com menor número de entradas do que a rede ótima 2, usada como referencial. Diante do exposto, as redes construídas apresentavam momento, taxa de aprendizagem e a arquitetura dos neurônios internos iguais ao da rede ótima 2, para solos compactados na energia normal.

É importante reiterar que a rede ótima 2, para solos compactados na energia normal do interior do Estado de São Paulo, tinha as seguintes entradas: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,15, % Arg., IP (%), W_{ot} (%), E_o (kPa) e RCS (kPa), sendo que a saída da rede ótima 2 era o M_R (MPa). Além do mais, a rede em questão apresentava arquitetura 8-12-12-1, momento = 0,7, taxa de aprendizagem = 0,7 e EMR = 0,276%.

As informações concernentes à rede ótima 2, para os solos compactados na energia normal, são apresentadas na Tabela 4.25. Além do mais, na mesma tabela, têm-se os nomes das redes neurais, usadas na análise das redes isentas da conjunção de variáveis correlatas, e ainda, as variáveis correlatas que são consideradas nas redes, as variáveis correlatas que são descartadas das redes, as arquiteturas das redes, o momento, a taxa de aprendizagem e o EMR de previsão do módulo de resiliência da rede neural que estava sendo analisada.

Tabela 4.25 - Desempenho das redes neurais para solos compactados na energia normal considerando as variáveis correlatas

Nome	Variáveis de estudo		Arquitetura	Taxa aprend.	Momento	EMR (%)
	Consideradas na rede	Descartadas da rede				
Rede ótima 2	Completa	---	8-12-12-1	0,7	0,7	0,276
R(E_o , W_{ot})	E_o , W_{ot}	RCS	7-12-12-1	0,7	0,7	0,399
R(RCS, W_{ot})	RCS, W_{ot}	E_o	7-12-12-1	0,7	0,7	0,308

Com base na Tabela 4.25, a rede neural R(RCS, W_{ot}) que apresentou um EMR = 0,308% foi escolhida como rede neural ideal para obtenção do módulo de resiliência dos solos na energia normal, pois além da rede considerada possuir um EMR muito baixo e similar aos erros das demais redes neurais analisadas, ela tinha a RCS como entrada de rede o que é muito vantajoso, porque, no laboratório, é mais fácil e mais preciso obter RCS do que E_o .

A rede ideal R(RCS, W_{ot}), para solos compactados na energia normal, isenta da conjunção de variáveis correlatas possuía as seguintes entradas: σ_3 (kPa), σ_d (kPa), % passa # 0,15, % Arg., IP (%), W_{ot} (%) e RCS (kPa), sendo que a saída da rede era o M_R (MPa). Além disso, a rede em questão possuía momento = 0,7, taxa de aprendizagem = 0,7 e arquitetura = 7-12-12-1.

Finalmente, o erro médio relativo da rede ideal R(RCS, W_{ot}) e a influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede ideal R(RCS, W_{ot}) usada para previsão do módulo de resiliência, para solos compactados na energia normal, são apresentados respectivamente nas Figuras 4.49 e 4.50.

Figura 4.49 - EMR de previsão dos módulos de resiliência com a rede neural ideal para solos compactados na energia normal

Figura 4.50 - Influência das variáveis de entrada da rede neural ideal para solos compactados na energia normal

Considerando-se o baixíssimo EMR, 0,308% apresentado pela rede ideal $R(RCS, W_{ot})$ e a influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede ideal $R(RCS, W_{ot})$ para solos compactados na energia normal (Figura 4.50), pode-se observar que as propriedades dos solos que mais influenciam na rede ideal $R(RCS, W_{ot})$ considerada são: IP, % Arg., RCS, W_{ot} e % passa # 0,15. Além disso, as tensões atuantes no solo também influenciam na rede; todavia as tensões influenciam menos que as propriedades do solo.

Além do mais, observando-se as influências das propriedades do solo nas redes ideais, isentas da conjunção de variáveis correlatas, tanto para solos compactados na energia modificada, como para solos compactados na energia normal, é possível verificar que a influência total da granulometria, na rede ideal com solos compactados na energia normal, é de 31,12 % (% Arg. e % passa # 0,015); enquanto, na rede ideal com solos compactados na energia modificada, essa influência é de 21,35% (% Arg.). Portanto, ficou claro que a granulometria influencia mais na rede com solos compactados na energia normal e que a influência da granulometria é maior do que a do IP.

Finalmente, levando-se em conta o estudo realizado, para obtenção de redes neurais artificiais isentas da conjunção de variáveis correlatas, é possível afirmar que, de maneira geral, o módulo de resiliência se relacionou muito bem com as propriedades do solo, através das redes neurais, e ainda, as propriedades do solo que mais influenciam nas redes usadas para previsão do módulo de resiliência são: IP, RCS, granulometria e W_{ot} . Além disso, as tensões de confinamento e de desvio também influenciam nas redes; mas esta influência é bem menor do que a influência das propriedades do solo.

4.6 Previsão da umidade ótima e da massa específica seca máxima dos solos lateríticos e não lateríticos a partir de redes neurais artificiais

Tendo em vista o excelente desempenho apresentado pelas redes neurais artificiais, em relacionar variável resposta e variáveis explicativas, nessa fase do estudo, foram desenvolvidas redes neurais, para previsão da umidade ótima e da massa específica seca máxima a partir de outras características físicas dos solos.

Os estudos, realizados anteriormente, mostram que as variáveis IP, D_{60} , % passa # 0,075 e % Arg. se relacionaram com os parâmetros de compactação do solo. Portanto, essas variáveis foram utilizadas como entradas das redes desenvolvidas. Além do mais, as redes neurais que foram construídas, para previsão da umidade ótima e massa específica seca máxima, foram baseadas nas redes ótimas 2. Assim a arquitetura interna da rede, o momento e a taxa de aprendizagem das redes ótimas 2 foram mantidas nas novas redes.

É importante destacar que, tanto rede neural desenvolvida para previsão da umidade ótima, quanto a rede neural desenvolvida para previsão da massa específica seca máxima, foram submetidas a um aprendizado de 45 minutos (2.700 segundos) com um erro de treinamento alvo de 0,01% (0,0001). Optou-se por tempo de treinamento menor que 7 horas de aprendizado, pois a quantidade de dados das redes em questão é bem menor, se comparado com a quantidade de dados das redes usadas na previsão do módulo de resiliência.

a) Características e análise do desempenho da rede neural usada na previsão da umidade ótima

A rede neural usada para previsão da umidade ótima apresentava um conjunto de análise formado por 44 solos, sendo que foram usados 36 solos no conjunto de treinamento e 8 solos (18,2% do total) no conjunto de validação. Além disso, a rede apresentava as seguintes entradas: $e_1 = IP$ (%), $e_2 = D_{60}$ (mm), $e_3 = \% \text{ passa } \# 0,075$ e $e_4 = \% \text{ Arg.}$. A variável de saída da rede era W_{ot} (%). Ainda, a rede neural possuía uma arquitetura 4-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem = 0,7.

É importante destacar que para o caso estudado, o conjunto de validação é coincidente com o conjunto de teste; visto que os solos usados, para fornecer dados para o conjunto de validação, não foram utilizados para fornecer dados para o conjunto de treinamento. Portanto, quando a rede neural fazia previsões para a variável resposta, com base nos dados do conjunto de validação, as previsões eram comparadas com os dados observados no laboratório para obtenção do erro médio relativo, o que pode ser encarado como um teste da rede neural.

As Figuras 4.51 e 4.52 mostram, respectivamente, o erro médio relativo (EMR = 9,329%) de previsão da umidade ótima com a rede e a influência que cada variável de entrada tem na rede usada para previsão da umidade ótima. Observa-se que para rede neural em questão, as variáveis $\% \text{ Arg.}$, IP e $\% \text{ passa } \# 0,075$ têm grande influência na rede em questão, contudo estas propriedades físicas não são empregadas no modelo da NCHRP 1-37A (2004) usado na previsão da umidade ótima.

Figura 4.51 - EMR de previsão das umidades ótimas com a rede neural para solos grossos na energia modificada

Entradas RNA	Importância (%)	Importância relativa
% Arg.	27,75	<div></div>
IP	26,06	<div></div>
# 0,075	23,72	<div></div>
D60	22,47	<div></div>

Figura 4.52 - Influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede usada para previsão da umidade ótima para solos grossos na energia modificada

O erro médio relativo, apresentado pela rede neural na previsão da umidade ótima, foi de 9,329%, em uma rede que levava em conta juntamente solos de comportamento laterítico e não laterítico; esse erro pode ser considerado similar aos erros de 10,489% e 9,127% observados nas previsões feitas com modelo da NCHRP 1-37A (2004) para solos de comportamento laterítico e não laterítico respectivamente. Acredita-se que uma rede neural construída com um maior banco de dados (maior número de solos) possa superar o desempenho do modelo da NCHRP 1-37A (2004) usado na previsão da umidade ótima.

Mesmo se utilizando de poucos solos no treinamento da rede neural, convém destacar que a rede neural aprendeu a relacionar à umidade ótima com as propriedades do solo as quais são: % Arg., IP, % passa # 0,075 e D_{60} .

b) Características e análise do desempenho da rede neural usada na previsão da massa específica seca máxima

A rede neural usada para previsão da massa específica seca máxima também apresentava um conjunto de análise formado por 44 solos, sendo que foram usados 36 solos no o conjunto de treinamento e 8 solos no conjunto de validação. A rede possuía as seguintes entradas: e_1 = IP (%), e_2 = D_{60} (mm), e_3 = % passa # 0,075 e e_4 = % Arg.. A variável de saída da rede era $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³). Ainda, a rede neural possuía uma arquitetura 4-12-12-1, momento = 0,7 e taxa de aprendizagem = 0,7.

As Figuras 4.53 e 4.54 apresentam, respectivamente, o erro médio relativo (EMR = 1,345%) de previsão da massa específica seca máxima com a rede e a influência que cada variável de entrada tem na rede usada para previsão da massa específica seca máxima. Pode-se constatar na Figura 4.54 que a variável % Arg. é a variável que tem maior influência na rede usada para previsão da massa específica seca máxima, contudo não é levada em conta no modelo da NCHRP 1-37A (2004) usado na previsão da massa específica seca máxima.

Figura 4.53 - EMR de previsão das massas específicas secas máximas com a rede neural para solos grossos na energia modificada

Figura 4.54 - Influência que as variáveis de entrada de rede têm na rede usada para previsão da massa específica seca máxima para solos grossos na energia modificada

Comparando-se o desempenho da rede neural com o desempenho do modelo da NCHRP 1-37A (2004), no que se refere à previsão da massa específica seca máxima, indubitavelmente a rede neural foi muito mais eficiente; pois enquanto a as previsões com o modelo da NCHRP 1-37A (2004) apresentaram erros médios relativos de 8,436% e 7,350%, para solos de comportamento laterítico e não laterítico, respectivamente, a previsão feita com a rede neural apresentou um erro médio relativo de 1,345 %, considerando juntamente solos de comportamento

laterítico e não laterítico. Portanto, o baixo EMR obtido na previsão com a rede neural demonstra que a maneira mais eficiente de relacionar a massa específica seca máxima com as propriedades do solo é realizada através de redes neurais.

Finalmente, destaca-se que as propriedades físicas do solo que mais influenciam na rede usada para previsão da massa específica seca máxima, são: % Arg., IP, D_{60} e % passa # 0,075.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa, que teve, como objetivo principal, verificar se existe relação consistente entre o módulo de resiliência dos solos e outras suas propriedades difundidas no meio rodoviário. E também identificar quais são as propriedades dos solos que melhor se relacionam com módulo de resiliência à luz das redes neurais artificiais. Observa-se que a maioria das conclusões apresentadas foram tomadas a partir de análises realizadas com os solos grossos (ou arenosos), do interior do Estado de São Paulo, compactados na energia modificada de Proctor. Na parte final do capítulo, são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros no campo da Infra-estrutura em Transportes Rodoviários.

5.2 Quanto à gênese dos solos, sua identificação e relação com outras propriedades

Os solos grossos, coletados para pesquisa, são em sua maioria solos de comportamento laterítico e representaram 61% dos solos grossos coletados, sendo que, os solos arenosos lateríticos (LA') representaram 43% dos solos grossos coletados, ou seja, o solo grosso mais comum encontrado no interior do Estado de São Paulo a exceção do Vale do Ribeira onde não foi coletado solos.

O método de análise para inferir o caráter laterítico ou não laterítico do solo, através das microfotografias obtidas do microscópio eletrônico de varredura pode ser útil para diferenciar os solos de comportamento laterítico e não laterítico.

Mesmo considerando, separadamente, solos de comportamento laterítico e não laterítico, não se obteve êxito em relacionar linearmente a massa específica seca máxima e a umidade ótima com as características dos solos, tais como o LL, IP, % passa # 0,075 e % Arg..

As equações propostas pela NCHRP 1-37A (2004) se mostram úteis para estimar tanto a umidade ótima como a massa específica seca máxima dos solos grossos de comportamento laterítico e não laterítico compactados na energia modificada.

Na média, os solos de comportamento laterítico apresentam valores de resistência à compressão simples, módulos tangentes iniciais e módulos de resiliência (típicos) maiores do que os solos de comportamento não laterítico.

O módulo tangente inicial se relacionou de forma consistente com a resistência à compressão simples, considerando-se separadamente os solos grossos de comportamento lateríticos e não lateríticos compactados na energia modificada.

5.3 Quanto aos modelos para representar o módulo de resiliência

O melhor modelo para representar o módulo de resiliência dos solos grossos compactados na energia modificada foi o modelo de Witczak e Uzan

$$(M_R = Pa \cdot k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3});$$

contudo, os valores dos coeficientes de determinação

obtidos com o modelo de Witczak e Uzan e com o modelo composto

$$(M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3})$$

foram muito próximos.

5.4 Quanto às relações entre as constantes de regressão do modelo composto e as propriedades do solo

Foi possível, para solos NA', estabelecer relações lineares entre as constantes de regressão (k_1 , k_2 e k_3) do modelo composto e as propriedades do solo que são usuais no meio rodoviário. Contudo, as relações obtidas não podem ter aplicabilidade face aos baixos valores dos coeficientes de determinação apresentados.

5.5 Quanto às relações entre o módulo de resiliência e as propriedades do solo e as tensões através de regressões não lineares múltiplas

As relações não lineares entre módulo de resiliência e o módulo tangente inicial e as tensões, desenvolvidas através de regressões múltiplas, foram ineficazes, pois apresentaram baixos valores de R^2 , variando entre 0,07 e 0,47.

Considerando-se as relações não lineares do estudo anterior e introduzindo-se as propriedades do solo tais como: % passa # 0,42, % passa # 0,15, % passa # 0,075, LL, IP, $\rho_{dm\acute{a}x}$, W_{ot} , e RCS, no desenvolvimento de novas relações, também não se obteve sucesso.

5.6 Quanto à aplicação das redes neurais artificiais para avaliação do módulo de resiliência do solo

De maneira geral, as redes neurais podem ser empregadas, com alta eficiência, na previsão do módulo de resiliência dos solos a partir da utilização de propriedades dos solos tais como: granulometria, LL, IP, umidade ótima e resultados do ensaio de compressão simples.

Para obtenção de redes neurais artificiais eficientes que relacionam o módulo de resiliência às propriedades do solo, não é necessário separar os solos quanto ao comportamento laterítico e não laterítico.

O aumento do tempo de aprendizado das redes neurais artificiais contribuiu substancialmente para diminuição do EMR (erro médio relativo).

As redes ótimas 2, obtidas para relacionar o módulo de resiliência com propriedades do solo, não podem ser aplicadas na prática, pois foram utilizados poucos solos na calibração destas redes (42 solos para rede com solos na energia modificada, e 28 solos para rede com solos na energia normal).

Quando uma rede neural que relaciona o módulo de resiliência às propriedades do solo é testada, com solos não são usados em sua calibração ela apresenta baixo erro médio relativo na previsão do módulo de resiliência, se existir, na constituição da rede, pelo menos um material similar ao solo que esta sendo testado pela rede.

Com base nas análises, realizadas com as redes neurais artificiais, acredita-se que as redes neurais formadas a partir de um banco de dados robusto (muitos solos) são capazes de prever com elevada precisão o módulo de resiliência dos solos a partir de outras propriedades do solo que são usuais no meio rodoviário.

Quando redes neurais que relacionam o módulo de resiliência com propriedades dos solos apresentarem como entradas de rede uma conjunção de variáveis correlatas tal como E_o e RCS, ou também como $\rho_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot} , é possível eliminar uma das variáveis correlatas do conjunto e gerar uma nova rede sem que haja prejuízo para nova rede gerada.

Considerando-se redes neurais artificiais ideais usadas para previsão do módulo de resiliência, tanto para solos compactados na energia modificada, como para solos compactados na energia normal, pode-se afirmar que as propriedades dos solos que mais influenciam nas redes neurais artificiais ideais usadas para previsão do módulo de resiliência são: granulometria, IP, RCS e W_{ot} . Portanto, estas propriedades (granulometria, IP, RCS e W_{ot}) são as que melhor se relacionam com o módulo de resiliência. Além disso, as tensões de confinamento e de desvio também influenciam nas redes neurais artificiais ideais usadas para previsão do módulo de resiliência, contudo as tensões influenciam menos que as propriedades do solo.

5.7 Quanto à previsão da umidade ótima e da massa específica seca máxima

Foi possível, com uma rede neural artificial, prever a umidade ótima dos solos grossos compactados na energia modificada a partir de suas propriedades granulométricas e plásticas, e determinar as propriedades dos solos que mais influenciam na rede usada para previsão da umidade ótima dos solos grossos compactados na energia modificada as quais são: % Arg., IP, % passa # 0,075 e D_{60} .

Comparando-se as previsões da umidade ótima, a partir de outras propriedades do solo, feitas com uma rede neural artificial e com a equação da NCHRP 1-37A (2004) observou-se que os erros médios relativos são baixos e similares.

Foi possível, com uma rede neural artificial, prever a massa específica seca máxima dos solos grossos compactados na energia modificada a partir de suas propriedades granulométricas e plásticas, e determinar as propriedades dos solos que mais influenciam na rede usada para previsão da massa específica seca máxima as quais são: % Arg., IP, D_{60} e % passa # 0,075. Portanto, estas propriedades se relacionam com a massa específica seca máxima dos solos.

Comparando-se as previsões da massa específica seca máxima, a partir de outras propriedades do solo, feitas com uma rede neural artificial e com as equações da NCHRP 1-37A (2004), verificou-se que as previsões feitas com a rede foram mais precisas do que as previsões feitas com a equação da NCHRP 1-37A (2004).

5.8 Sugestões para desenvolvimentos futuros

Sugere-se que, em trabalhos futuros, sejam desenvolvidos os aspectos apresentados a seguir.

- Construção de redes neurais com um grande volume de dados

Desenvolver, para as energias de compactação modificada, intermediária e normal de Proctor, redes neurais artificiais para previsão do módulo de resiliência a partir das propriedades do solo e tensões atuantes no solo, levando-se em conta que cada rede seja desenvolvida com um maior número de solos representados em sua calibração.

- Regionalizar o desenvolvimento das redes neurais

Frente às dimensões continentais do Brasil e a diversidade de solos encontrada no país, recomenda-se que as redes neurais que relacionam o módulo de resiliência com as propriedades do solo e as tensões atuantes no solo sejam

desenvolvidas regionalmente, assim sendo, as redes seriam mais representativas, pois seriam redes desenvolvidas com muitas amostras de solo oriundas de uma única e menor região.

- Redes neurais para previsão de deformações plásticas

Desenvolver, para as energias de compactação modificada, intermediária, e normal de Proctor, redes neurais artificiais para previsão da deformação plástica do solo a partir das propriedades dos solos e das tensões atuantes no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. ***Guide for design of pavement structures 1986***. Washington, D.C, 1986.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. ***Guide for design of pavement structures 1993***. Washington, D.C, 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. ***AASHTO T307-99***. Determining the resilient modulus of soil and aggregate materials. Washington, D.C., [199-?].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 6502***. Rochas e solos. Rio de janeiro, 1980.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 6508***. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. Rio de janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 7180***. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**. Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**. Solo coesivo - determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.

BARKSDALE, R. D.; ITANI, S. Y. Influence of aggregate shape on base behavior. *Transportation Research Record*, [S.l.], n. 1227, p. 173-182, 1989.

BERNUCCI, L. L. B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. 237f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F.; LUDERMIR, T.B. **Redes neurais artificiais teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 262p.

BREGA, J.R.F.; SORIA, M.H.A; SEMENTILLE, A.C. Redes neurais artificiais aplicadas em sistemas de gerência de pavimentos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 31., 1998, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, SP: ABPv (Associação Brasileira de Pavimentação), 1998. p. 1138-1150.

CARMO, C. A. T. **A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros**. São Carlos. 131f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF THE ISSMFE (1985). **Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils**. Progress Report, 1982-1985. São Paulo: ABMS, 1985.

COUTINHO NETO, B. **Redes neurais artificiais como procedimento para retroanálise de pavimentos flexíveis São Carlos**. 119f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

COUTINHO NETO, B.; FABBBRI, G. T. Uso de redes neurais artificiais na retroanálise de pavimentos flexíveis. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 34., 2003, Campinas, SP. **Anais...** Campinas, SP: ABPv (Associação Brasileira de Pavimentação), 2003. p. 574-589.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: estudo de três solos do nordeste brasileiro**. 154f. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP - M13 - 71**. Ensaio de compactação de solos. São Paulo, 1971.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E DE RODAGEM. **DNER-ME 256/94**. Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E DE RODAGEM. **DNER-ES 303/97**. Pavimentação - base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E DE RODAGEM. **DNER-ME 258/94**. Solos compactados com equipamento miniatura - Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994.

DRUMM, E. C.; BOATENG-POKU, Y.; PIERCE, J. Estimation of subgrade resilient modulus from standard tests. **Journal of the Geotechnical Engineering**, [S.l.], v. 116, n. 5, p. 774-789, 1990.

DRUMM, E. C.; LI, Z.; REEVES, J. S.; MADGETT, M. R. Alternative test method for resilient modulus of fine-grained subgrades. **Geotechnical Testing Journal**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 141-154, 1996.

DYMINSKI, A. S.; ANDRIONI, M.; SOARES, H. C.; CHAVES NETO, A.; ROMANEL, C. Modelos neurais de previsão de séries temporais piezométricas com acoplamento de dados pluviométricos. **Solos e Rochas**, [S.l.], n. 2, v. 29, p. 189-198, 2006.

ELLIOT, R. P.; THORNTON, S. I. Simplification of subgrade resilient modulus testing. **Transportation Research Record**, [S.l.], n. 1192, p. 1-7, 1988.

- ELLIOT, R. P. Selection of subgrade modulus for AASHTO flexible pavement design. ***Transportation Research Record***, [S.l.], n. 1354, p. 39-44, 1992.
- ELLIS, G. W.; YAO, C.; PENUMADU, D. Stress-strain modeling using artificial neural networks. ***Journal of Geotechnical Engineering***, [S.l.], v. 121, n. 5, p. 429-435, 1995.
- FABBRI, G. T. P. ***Caracterização da fração fina de solos tropicais através da absorção de azul de metileno***. 101f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.
- FAXINA, A. L.; FABBRI, G. T. P.; SÓRIA, M. H.; LEITE, L. F. M. Aplicação de redes neurais artificiais e de modelagem estatística para previsão de propriedades convencionais de asfaltos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 36., 2005, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba, PR: ABPv (Associação Brasileira de Pavimentação), 2005. "Não paginada".
- FERNANDES, E. ***Estudo comparativo da aplicação de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais***. 106f. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- FERREIRA, J. G. H. M. ***Tratamento computacional de dados geotécnicos e predição de módulos de resiliência de solos de materiais não tratados quimicamente utilizando ferramentas de Data Mining e Redes Neurais Artificiais***. 146f. Seminário de qualificação acadêmica ao doutorado - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- FOOKES, P. G. ***Tropical residual soils***. Londres: Geological society London, 1997. 184p.
- FREITAS, K. M. ***Investigação da produção e dispersão de poluentes do ar no ambiente urbano: determinação empírica e modelagem em rede neural da concentração de CO***. "Paginação irregular". Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A. B.; RODRIGUES, J. E.; MARINO, L.; MATTIELLO, F. ***Ensaios de laboratório em geologia***. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2002. 134p.

GONÇALVES, R. F. ***Estudo da influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso encontrado em subleito de rodovias no interior paulista***. 149f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

HAYKIN, S. ***Redes neurais princípios e prática***. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

HELKELOM, W.; FOSTER, C. R. Dynamic testing of pavements. ***Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions***, [S.I.], v. 86, n. SM1, p. 1-27, 1960.

HICKS, R. G.; MONISMITH, C. L. Factors influencing the resilient response of granular materials. ***Highway Research Record***, [S.I.], n. 345, p. 15-31, 1971.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. ***An introduction to geotechnical engineering***. New Jersey: Prentice Hall, 1981. 733p.

HUANG, Y. H. ***Pavement analysis and design***. New Jersey: Prentice Hall, 1993. 805p.

JANOO, V.; SHEPHERD, K. Seasonal variation of moisture and subsurface layer moduli. ***Transportation Research Record***, [S.I.], n. 1709, p. 98-107, 2000.

JOENBY, B. N.; HICKS, R. G. Base course contamination limits. ***Transportation Research Record***, [S.I.], n. 1095, p. 86-101, 1986.

KIM, B. H.; BUCH, N.; PARK, D. Mechanistic-empirical rut prediction model for in-service pavements. ***Transportation Research Record***, [S.I.], n. 1730, p. 99-109, 2000.

LAMBE, W. T.; WHITMAN, R. V. (1979) ***Soil Mechanics, SI Version***. New York: John Wiley & Sons, 1979. 553p

LOESCH, C.; SARI, S.T. (1996) ***Redes neurais artificiais fundamentos e modelos***. Blumenau: Furb, 1996. 166p

- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. Estudos de resiliência na mecânica dos pavimentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, RS: ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos solos), 1986. v. IV, p. 137-147.
- MEDINA, J. (1997a). **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), 1997. 380p.
- MEDINA, J. (1997b). Tropical soils and climates in pavement mechanics studies. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro, RJ. **Proceedings...** Rio de Janeiro, RJ: UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), 1997. p. 103-115.
- MOHAMMAD, L. N.; PUPPALA, J. A.; ALAVILLI, P. Resilient properties of laboratory compacted subgrade soils. **Transportation Research Record**, [S.l.], n. 1504, p. 87-102, 1995.
- MOHAMMAD, L. N.; HUANG, B.; PUPPALA, A. J.; ALLEN, A. Regression model for resilient modulus of subgrade soils. **Transportation Research Record**, [S.l.], n. 1687, p. 47-54, 1999.
- MOTTA, L. M. G.; ARANOVICH, L. A. S.; CERRATI, J. A. P. Comportamento resiliente de solos utilizados em pavimentos de baixo custo. **Solos e Rochas**, [S.l.], n. 3, v. 8, p. 15-41, 1985.
- MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J. Um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis desenvolvido no Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, SP: ABPv (Associação Brasileira de Pavimentação), 1991. p. 1117-1206.
- MUHANNA, A. S.; RAHMAN, M. S.; LAMBE, P. C. Resilient modulus measurement of fine-grained subgrade soils. **Transportation Research Record**, [S.l.], n. 1687, p. 3-12, 1999.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (2004). NCHRP 1-37A - **Guide for mechanistic-empirical design of new rehabilitated pavement structures** - Final Report. Transportation Research Board. Illinois, 2004.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos), 1981. v. 1, p. 30-41.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Estudos geotécnicos e de drenagem aplicados à pavimentação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 18., 1983, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, RS: ABPv (Associação Brasileira de Pavimentação), 1983. v. 2, p. 465-484.

NOGAMI, J. S. Os solos tropicais lateríticos e saprolíticos. In REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 18., 1983, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABPv, 1983. p. 465-484.

NOGAMI, J. S. Características dos solos tropicais. In REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DE SOLO CAL: O USO DA CAL NA ENGENHARIA CIVIL, 5., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/Abpc, 1985. p. 47-55.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação tecnológica de solos tropicais pela metodologia MCT. In: COBRAMSEF, 9., 1990, Salvador. **Anais...** Salvador, BA: ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos), 1990. p. 281-287.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Novos rumos dos estudos geotécnicos para obras viárias pela identificação expedita dos grupos da MCT. IN: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 7., 1993, [S.I.]. **Anais...** [S.I.:s.n.], 1993. p. 923-935.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995. 213p.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**. Campinas: IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), 1999. 64p.

PARREIRA, A. B.; CUNTO, F. J. C.; CARMO, C. T.; RODRIGUES, J. K. G. O módulo de resiliência de alguns materiais de pavimentação e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos), 1998. v. 1, p. 149-155.

- QIU, Y.; DENNIS, N. D.; ELLIOT, R. P. Design criteria for permanent deformation of subgrade soils in flexible pavements for low-volume roads. ***Soils and Foundations*** (Japanese Geotechnical Society), [S.l.], v. 40, n. 1, p. 1-10, 2000.
- RADA, G.; WITCZAK, M. W. Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for granular materials. ***Transportation Research Record***, [S.l.], n. 810, p. 23-33, 1981.
- RODGHER, S. F.; FABBRI, G. T. P.; CARVALHO, A. C. P. L. A utilização de redes neurais artificiais para classificação de solos tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 11., 1997, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: [s.n], 1997. v. 1, p. 51-59.
- RODGHER, S. F.; ODA, S.; FERNANDES JUNIOR, J. L.; FABRI, G. T. P.; SORIA, M. H. A. (1998). Uso de redes neurais artificiais na seleção de atividades de manutenção e reabilitação de estradas não-pavimentadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 12., 1998, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza, CE: [s.n], 1998. p. 183-196.
- RODGHER, S. F. ***Aplicação de redes neurais artificiais para previsão de propriedades dos solos tropicais***. 306f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- RODRIGUES, M. R. ***Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul***. 105f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- RUMELHART, D.E.; HILTON, G.E.; WILLIAMS, R.J. Learning representations of back-propagating erros, ***Nature***, London, v. 323, p. 533-536, 1986.
- SHAHIN, M. A.; MAIER H. R.; JAKSA M. B. (2002) Predicting settlement of shallow foundations using neural networks. ***Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering***, v. 128, n. 9, p. 785-793.
- TAKEDA, M. C. ***A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista***. 255f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

- THADKAMALLA, G. B.; GEORGE, K. P. Characterization of subgrade soils at simulated field moisture. ***Transportation Research Record***, [S.I.], n. 1481, p. 21-27, 1995.
- TUTUMLUER, E.; MEIER, W. R. Attempt at resilient modulus modeling using artificial neural networks. ***Transportations Research Record***, [S.I.], n. 1540, p. 1-6, 1996.
- TUTUMLUER, E.; SEYHAN, U. Neural network modeling of anisotropic aggregate behavior from repeated load triaxial tests. ***Transportations Research Record***, [S.I.], n. 1615, p. 85-93, 1998.
- UZAN, J. Characterization of granular material. ***Transportations Research Record***, [S.I.], n. 1022, p. 52-59, 1985.
- VILLIBOR, D. F. ***Pavimentos econômicos. Novas considerações***. 224f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.
- VISSER, A. T.; QUEIROZ, C.; HUDSON, W. R. A study of resilient characteristics of tropical soils for use in low-volume pavement design. In: SYMPOSIUM ON PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEMS, 1994, Belo Horizonte, Brasil. ***Proceedings...*** Belo Horizonte, Brasil: D.E.R. Minas Gerais, 1994. p. 1-25.
- WITCZAK, M.W.; QI, X.; MIRZA, M. W. Use of nonlinear subgrade modulus in AASHTO design procedure. ***Journal of Transportation Engineering***, [S.I.], v. 121, n. 3, p. 273-282, 1995.
- WIDROW, B.; HOFF, M. E. JR. Adaptive switching circuits. ***IRE WESCON Convention Record***, [S.I.], p. 96-104, 1960.
- ZAMAN, M.; CHEN, D.; LAGUROS, J. Resilient moduli of granular materials. ***Journal of Transportation Engineering***, [S.I.], v. 120, n. 6, p. 967-988, 1994.

APÊNDICE A - Os locais de coleta das 76 amostras oriundas do interior do Estado de São Paulo. As principais características dos solos coletados e as classificações pelos sistemas HRB, USCS e MCT. Ainda, os D_{60} (mm) dos solos coletados

Tabela A.1 - Os locais de coleta das 76 amostras

Amostra	Sentido e local	Lado	Latitude sul	Longitude oeste	Profundidade (m)	Solo e linha de seixos (ls)
21	SP-225 / Dois Córregos (vicinal / km 6)	Direito	22° 18' 58,0"	48° 23' 36,5"	2,00	Solo acima da ls
22	SP-225 / Dois Córregos (vicinal / km 6)	Direito	22° 18' 58,0"	48° 23' 36,5"	4,00	Solo abaixo da ls
23	SP-225 / Dois Córregos (vicinal / km 11)	Esquerdo	22° 21' 30,9"	48° 23' 28,5"	0,50	Solo acima da ls
24	SP-225 / Dois Córregos (vicinal / km 11)	Esquerdo	22° 21' 30,9"	48° 23' 28,5"	8,00	Solo abaixo da ls
25	Dois Córregos / Min. do Tietê (SP-304 / Km 277+ 50m)	Esquerdo	22° 23' 58,1"	48° 27' 02,4"	6,00	Não definida
26	Pedemeiras / Bauru (SP-225 / Km 220 + 500m)	Esquerdo	22° 19' 44,9"	48° 55' 26,8"	2,00	Solo acima da ls
27	Pedemeiras / Bauru (SP-225 / Km 220 + 500m)	Esquerdo	22° 19' 44,9"	48° 55' 26,8"	6,00	Solo abaixo da ls
28	Pirajuí / Cafelândia (SP-300 / km 400)	Direito	21° 57' 51,0"	49° 27' 39,3"	8,00	Não definida
29	Santa Cruz das Palmeiras / Casa Branca (SP-215 / km 54 + 400m)	Direito	21° 47' 53,6"	47° 05' 05,1"	10,00	Solo abaixo da ls
30	Santa Cruz das Palmeiras / Casa Branca (SP-215 / Km 54+ 400m)	Direito	21° 47' 53,6"	47° 05' 05,1"	8,00	Solo acima da ls
31	S. J. Rio Pardo / S. S. da Grama (SP-207 / Km 8)	Direito	21° 39' 08,9"	46° 52' 13,9"	3,00	Solo acima da ls
32	S. J. Rio Pardo / S. S. da Grama (SP-207 / Km 8)	Direito	21° 39' 08,9"	46° 52' 13,9"	8,00	Solo abaixo da ls
33	Amparo / Morungaba (SP-360 / Km 124)	Direito	22° 44' 45,1"	46° 45' 47,3"	2,00	Solo abaixo da ls
34	Capivari / Rio das Pedras (SP-308 / Km 150)	Direito	22° 49' 23,2"	47° 34' 28,4"	2,00	Não definida
35	Piracicaba / Limeira (SP-147 / Km 133)	Direito	22° 40' 44,6"	47° 33' 56,5"	3,00	Não definida
36	Santo Antônio do Pinhal / V. Dutra (BR -116) [SP-123 / Km 29]	Esquerdo	22° 51' 10,7"	45° 36' 56,8"	Não definida	Não definida
37	Trevo Tremembé / V. Dutra (BR -116) [SP-123 / Km 23 + 500m]	Direito	22° 53' 19,6"	45° 35' 47,4"	Não definida	Não definida
38	V. Dutra / Caçapava Velha [(+ ou -) 1 Km do trevo da V. Dutra]	Esquerdo	23° 06' 01,6"	45° 40' 33,2"	Não definida	Solo abaixo da ls
39	Via Dutra (BR 116) / Igaratá (SP-65 / Km 16+700m)	Direito	23° 14' 58,2"	46° 06' 21,3"	4,00	Não definida
40	São Carlos / Ribeirão Preto (SP-255 / km 23 + 600m)	Esquerdo	21° 23' 29,9"	47° 51' 40,7"	Não definida	Não definida
41	Pitangueiras / Bebedouro (SP-322 / km 378 + 500m)	Direito	20° 57' 53,6"	48° 19' 53,5"	Não definida	Não definida
42	Bebedouro / Monte Azul (SP-322 / km 404 + 300m)	Esquerdo	20° 54' 36,3"	48° 34' 13,4"	Não definida	Não definida
43	Monte Azul / Severínea (SP-322 / km 429 + 100m)	Esquerdo	20° 49' 20,8"	48° 47' 12,8"	3,30	Solo abaixo da ls
44	Monte Azul / Severínea (SP-322 / km 429 + 100m)	Esquerdo	20° 49' 20,8"	48° 47' 12,8"	0,30	Solo acima da ls
45	Mirassol / Monte Aprazível (SP-310 / km 458)	Esquerdo	20° 47' 41,0"	49° 34' 35,0"	Não definida	Solo abaixo da ls
46	Mirassol / Monte Aprazível (SP-310 / km 458)	Direito	20° 47' 41,0"	49° 34' 35,0"	Não definida	Solo acima da ls
47	Borborema / Ibitinga (SP-304 / km 384 + 600m)	Esquerdo	21° 41' 35,9"	49° 00' 31,9"	3,50	Solo abaixo da ls
48	Borborema / Ibitinga (SP-304 / km 384 + 600m)	Esquerdo	21° 41' 35,9"	49° 00' 31,9"	1,50	Solo acima da ls
49	Assis / Maracá (SP-270 / km 460)	Direito	22° 37' 39,5"	50° 33' 52,2"	Não definida	Não definida
50	Maracá / Regente Feijó (SP-270 / km 515 + 500m)	Esquerdo	22° 25' 05,5"	51° 02' 12,5"	2,00	Não definida
51	SP-487 / Regente Feijó (SP-270 / km 550 + 500m)	Direito	22° 15' 10,9"	51° 19' 04,0"	6,00	Solo abaixo da ls
52	SP-487 / Regente Feijó (SP-270 / km 550 + 500m)	Direito	22° 15' 10,9"	51° 19' 04,0"	2,00	Solo acima da ls
53	Teodoro Sampaio / Marabá P. (SP-563 / km 33)	Direito	22° 15' 13,2"	52° 01' 03,9"	3,00	Solo abaixo da ls
54	Teodoro Sampaio / Marabá P. (SP-563 / km 33)	Direito	22° 15' 13,2"	52° 01' 03,9"	2,00	Solo acima da ls
55	N. Independência / Pontal (SPV-9)	Esquerdo	20° 57' 26,9"	51° 37' 12,4"	1,50	Não definida
56	N. Independência / Castilho (SPV-8)	Direito	20° 56' 05,1"	51° 32' 36,4"	0,40	Não definida
57	São Carlos / Catanduva (SP-310 / km 380 + 800m)	Direito	21° 10' 14,2"	48° 58' 17,2"	Não definida	Não definida
58	Fernandópolis / Estrela do Oeste (SP-320 / km 559 + 500m)	Direito	20° 16' 13,6"	50° 18' 50,8"	4,00	Não definida
59	Santa Fé (SP) / Aparecida do Taboado (MS) [SP-597 / km 634]	Esquerdo	20° 08' 09,6"	50° 58' 11,6"	Não definida	Solo abaixo da ls
60	Nova Canaã / Entronc. SP-310 (SP-595)	Direito	20° 26' 15,8"	51° 16' 26,4"	Não definida	Solo acima da ls
61	Auriflama / Entronc. SP 463 (SP 310 / Km 563)	Esquerdo	20° 39' 37,2"	50° 31' 59,9"	Não definida	Solo abaixo da ls
62	Auriflama / Entronc. SP 463 (SP 310 / Km 563)	Esquerdo	20° 39' 37,2"	50° 31' 59,9"	3,00	Solo acima da ls
63	Birigui / Penápolis (SP 300 / Km 514 + 300m)	Direito	21° 20' 12,0"	50° 19' 38,8"	2,00	Não definida
64	Interior da capital / Barueri (SP-280 / km 34)	Esquerdo	23° 31' 08,3"	46° 56' 52,8"	5,00	Não definida
65	Mairinque / Alumínio (SP 270 / Km 72)	Esquerdo	23° 31' 49,7"	47° 13' 38,4"	Não definida	Não definida
66	Sorocaba / Itapetininga (SP 270 / Km 140 + 400m)	Direito	23° 33' 20,9"	47° 49' 25,4"	"Pé do talude"	Não definida
67	Itapetininga / Piraju (SP 270 / Km 213 + 300m)	Direito	23° 31' 28,8"	48° 28' 39,2"	Não definida	Não definida
68	Itapetininga / Piraju (SP 270 / Km 273 + 500m)	Esquerdo	23° 21' 53,6"	49° 00' 38,7"	"Pé do talude"	Não definida
69	Avaré / Barra Bonita (SP 255 / Entroncamento SP 255 / SP 280)	Direito	22° 57' 38,8"	48° 48' 26,0"	"Pé do talude"	Não definida
70	SP-255 / Iaras (SP 280 / Km 282 + 600m)	Direito	22° 50' 55,5"	49° 10' 51,6"	1,50	Não definida
71	Guará / Ituverava (SP 330 / Km 400 + 500m)	Direito	20° 25' 03,3"	47° 49' 40,9"	3,00	Não definida
72	Ituverava / Jeriquara (Vicinal)	Direito	20° 20' 04,6"	47° 36' 58,3"	2,00	Não definida
73	Batatais / Altinópolis (SP-351)	Direito	21° 00' 28,4"	47° 24' 20,1"	2,00	Não definida
74	Altinópolis / Cajuru (SP-338 / km 333)	Direito	21° 03' 12,3"	47° 18' 50,1"	2,00	Não definida
75	Cajuru / Santa Cruz da Esperança (SP-333 / km 13 + 400m)	Direito	21° 17' 28,5"	47° 24' 46,6"	2,00	Solo abaixo da ls
76	Cajuru / Santa Cruz da Esperança (SP-333 / Km 13 + 400m)	Direito	21° 17' 28,5"	47° 24' 46,6"	1,00	Solo acima da ls
77	Bauru / Piratininga (SP-294)	Direito	22° 20' 28,5"	49° 12' 24,8"	4,00	Solo abaixo da ls
78	Entronc. Piratininga / Entroca. Duartina (SP-294 / Km 375)	Direito	22° 19' 38,5"	49° 19' 31,6"	6,00	Solo abaixo da ls
79	Entronc. Piratininga / Entroca. Duartina (SP-294 / Km 375)	Direito	22° 19' 38,5"	49° 19' 31,6"	5,50	Solo acima da ls
80	Tupã / Osvaldo Cruz (SP-294 / Km 517+ 700m)	Esquerdo	21° 57' 53,7"	50° 25' 56,4"	1,00	Não definida
81	Osvaldo Cruz / Lucélia (SP-294 / Km 575)	Esquerdo	21° 45' 43,7"	50° 55' 29,6"	1,00	Não definida
82	Pacaembu / Tupi Paulista (SP-294 / Km 620 + 500m)	Esquerdo	21° 33' 11,4"	51° 17' 18,3"	3,00	Não definida
83	Dracena / Entronc. SP-563 (SP 294)	Direito	21° 25' 51,1"	51° 36' 07,0"	2,00	Não definida
84	Entronc. SP-563 / Trevo Nova Guataporanga (SP-294 / Km 665 + 500m)	Esquerdo	21° 22' 53,3"	51° 40' 31,6"	1,00	Não definida
85	São Carlos / Rio Claro (SP 310 / Km 191)	Esquerdo	22° 18' 17,0"	47° 40' 08,0"	4,00	Não definida
86	São Carlos / Rio Claro (SP 310 / Km 187)	Esquerdo	22° 19' 50,3"	47° 39' 14,4"	2,00	Não definida
87	Limeira / Araras (SP-330 / Km 154 + 300m)	Direito	22° 29' 36,5"	47° 23' 55,5"	Não definida	Não definida
88	Pirassununga / Porto Ferreira (SP 330)	Direito	21° 56' 31,0"	47° 27' 51,5"	1,00	Não definida
89	Santa Rita do Passa Quatro / Luís Antônio (SP 330 / Km 255)	Direito	21° 38' 20,2"	47° 36' 41,5"	Não definida	Não definida
90	Batatais / Franca (SP 334 / Km 356 + 800m)	Direito	20° 50' 22,9"	47° 36' 03,8"	4,00	Solo abaixo da ls
91	Batatais / Franca (SP 334 / Km 356 + 800m)	Direito	20° 50' 22,9"	47° 36' 03,8"	3,00	Solo acima da ls
92	Analândia / Pirassununga (SP 225 / Km 63)	Direito	22° 04' 38,6"	47° 33' 07,4"	4,00	Não definida
1	Descalvado / São Carlos (SP 215 / Km 145 + 600m)	Direito	22° 02' 20,0"	47° 51' 22,9"	5,00	Solo abaixo da ls
11	Ribeirão Bonito / São Carlos (SP 215 / Km 152 + 500m)	Direito	22° 03' 54,4"	47° 54' 32,1"	2,00	Solo acima da ls
14	Ribeirão Bonito / São Carlos (SP 215 / Km 170 + 500m)	Direito	22° 03' 36,6"	48° 04' 58,7"	3,50	Solo acima da ls
17	Ribeirão Bonito / Dourados (SP 215 / Km 193 + 100m)	Esquerdo	22° 06' 58,8"	48° 17' 26,6"	4,00	Solo abaixo da ls

Tabela A.2 - As principais características e as classificações pelos sistemas HRB, USCS e MCT dos 76 solos coletados

Amostra	γ_s g/cm ³	c'	e'	Solo passante na peneira (%)								% Arg.	LP	LL	IP	Classificação do solo		
				4,76 mm	2,00 mm	1,19 mm	0,59 mm	0,42 mm	0,30 mm	0,15 mm	0,075 mm					HRB	USCS	MCT
21	2,878	1,95	1,04	100,0	99,7	98,9	98,2	97,0	93,4	77,3	68,3	48,0	30	44	14	A-7-5	ML	LG'
22	2,980	1,69	1,27	100,0	100,0	99,8	99,4	99,0	98,2	94,7	92,0	45,0	53	79	26	A-7-5	MH	NG'
23	2,601	0,74	1,15	100,0	100,0	99,9	99,2	94,0	83,6	44,3	28,1	18,0	16	19	3	A-2-4	SM	LA'
24	2,627	0,82	1,17	100,0	100,0	100,0	99,6	93,0	82,2	46,0	29,8	16,0	15	21	6	A-2-4	SM-SC	NA'
25	2,932	1,71	1,05	100,0	100,0	100,0	99,6	99,0	96,6	89,0	84,7	41,0	33	46	13	A-7-5	ML	LG'
26	2,655	1,25	0,95	100,0	99,9	99,7	99,1	97,5	92,0	60,2	39,1	22,0	22	26	4	A-4	ML	LA'
27	2,641	1,64	1,42	100,0	100,0	99,9	99,4	97,0	91,0	69,4	50,0	28,0	23	38	15	A-6	CL	NG'
28	2,605	1,01	1,04	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	96,9	56,9	32,2	21,0	18	27	9	A-2-4	SC	LA'
29	2,578	0,74	1,14	100,0	100,0	99,1	85,8	67,0	48,1	29,2	24,0	15,0	14	21	7	A-2-4	SM-SC	LA
30	2,611	1,60	0,88	100,0	100,0	99,8	97,7	91,0	80,5	49,9	37,8	27,0	19	31	12	A-6	SC	LG'
31	2,638	1,74	1,02	100,0	98,8	96,6	90,8	88,0	84,1	78,2	72,9	53,0	38	55	17	A-7-5	MH	LG'
32	2,648	1,62	1,49	100,0	100,0	99,6	97,4	95,0	90,2	85,1	80,5	38,0	39	64	25	A-7-5	MH	NG'
33	2,579	1,41	1,50	100,0	99,8	98,4	88,1	80,0	72,3	63,0	57,1	20,0	38	57	19	A-7-5	MH	NS'
34	2,629	1,89	1,67	100,0	100,0	99,9	99,6	99,5	99,2	98,8	90,6	37,5	40	57	17	A-7-5	MH	NG'
35	2,846	2,19	1,06	100,0	99,9	99,7	99,1	98,5	97,8	94,3	87,6	58,5	37	53	16	A-7-5	MH	LG'
36	2,606	1,24	1,66	100,0	100,0	99,7	97,6	94,0	89,0	79,4	70,0	7,0	29	40	11	A-6	ML	NS'
37	2,593	2,15	0,99	100,0	100,0	99,8	98,2	95,0	90,9	76,9	61,6	44,0	37	61	24	A-7-5	MH	LG'
38	2,613	2,17	1,00	100,0	100,0	98,7	91,9	86,0	79,9	68,1	59,0	43,0	32	61	29	A-7-5	MH	LG'
39	2,657	2,24	1,22	100,0	100,0	100,0	99,4	98,5	97,8	94,9	91,8	84,5	55	108	53	A-7-5	MH	NG'
40	2,729	1,40	1,01	100,0	100,0	100,0	99,8	95,0	85,8	55,6	44,7	35,0	22	29	7	A-4	SM-SC	LA'
41	2,561	1,80	1,09	100,0	100,0	99,8	97,4	89,0	78,7	52,8	42,3	34,0	19	28	9	A-4	SC	LG'
42	2,585	1,65	1,14	100,0	100,0	100,0	99,9	97,5	91,2	66,6	45,5	32,0	23	34	11	A-6	SC	LG'
43	2,547	1,30	1,63	100,0	100,0	100,0	99,8	99,0	97,7	47,7	28,0	10,0	0	0	NP	A-2-4	SM	NS'
44	2,596	2,05	1,06	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	97,6	60,9	38,8	29,0	20	34	14	A-6	SC	LG'
45	2,616	1,15	1,33	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	99,0	80,2	52,6	15,4	25	36	11	A-6	ML	NA'
46	2,566	1,02	0,87	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	97,6	65,5	36,9	23,0	19	34	15	A-6	SC	LA'
47	2,932	1,60	1,25	100,0	100,0	98,7	95,7	94,5	92,9	88,9	85,0	33,0	37	49	12	A-7-5	ML	NG'
48	2,844	1,85	0,70	100,0	100,0	99,5	99,4	98,0	95,5	86,4	78,2	60,4	30	47	17	A-7-5	ML	LG'
49	2,767	2,00	1,02	100,0	100,0	100,0	99,5	97,5	94,3	82,5	72,1	57,5	31	47	16	A-7-5	ML	LG'
50	2,589	0,30	1,25	100,0	100,0	100,0	99,9	93,5	82,1	39,8	22,1	12,0	14	19	5	A-2-4	SM-SC	LA
51	2,636	1,90	1,34	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	95,4	75,9	40,0	30	47	17	A-7-5	ML	NG'
52	2,579	1,04	1,14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	87,2	47,2	19,0	18	27	9	A-4	SC	LA'
53	2,660	2,48	1,24	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	98,0	87,2	69,1	50,5	35	55	20	A-7-5	MH	NG'
54	2,590	0,84	1,03	100,0	100,0	100,0	99,9	99,0	96,5	75,6	41,8	20,0	17	25	8	A-4	SC	LA'
55	2,565	1,00	1,40	100,0	100,0	99,8	99,5	96,5	89,6	56,3	36,9	15,0	14	18	4	A-4	SM	NA'
56	2,535	0,48	1,71	100,0	100,0	99,9	99,9	98,0	94,0	70,2	34,6	13,0	15	23	8	A-2-4	SC	NA'
57	2,564	1,55	1,11	100,0	100,0	100,0	99,8	97,0	91,8	64,0	44,8	24,0	23	31	8	A-4	SC	LG'
58	2,554	0,80	1,23	100,0	100,0	100,0	99,9	98,5	97,6	82,2	45,9	14,0	17	27	10	A-4	SC	NA'
59	2,590	0,96	1,14	100,0	100,0	100,0	99,8	99,0	96,9	74,7	43,8	19,0	14	24	10	A-4	SC	LA'
60	2,568	0,84	1,04	100,0	99,9	99,8	99,4	98,0	93,2	68,4	40,1	22,0	17	24	7	A-4	SM-SC	LA'
61	2,616	0,94	1,02	100,0	100,0	99,8	99,5	99,0	98,9	86,5	48,2	22,0	19	26	7	A-4	SM-SC	LA'
62	2,607	0,69	1,41	100,0	99,9	99,8	99,6	99,0	98,5	83,4	41,4	22,0	17	21	4	A-4	SM	NA'
63	2,607	0,98	1,11	100,0	100,0	100,0	99,9	99,8	99,7	87,6	44,8	22,0	17	22	5	A-4	SM-SC	LA'
64	2,661	1,28	1,63	100,0	100,0	99,3	96,7	95,0	94,1	92,3	88,8	18,0	0	0	NP	A-4	CL	NS'
65	2,749	1,98	1,31	100,0	100,0	99,8	99,2	98,5	97,8	95,6	92,3	58,0	34	58	24	A-7-5	MH	NG'
66	2,566	1,19	0,99	100,0	100,0	99,5	95,3	85,5	72,6	42,4	31,1	25,0	20	34	14	A-2-6	SC	LA'
67	2,666	2,02	0,95	100,0	100,0	99,8	99,6	99,5	99,3	98,0	95,6	81,0	43	60	17	A-7-5	MH	LG'
68	2,574	0,88	0,88	100,0	100,0	100,0	99,9	96,0	92,5	49,2	27,2	20,0	14	27	13	A-2-6	SC	LA'
69	2,867	2,03	1,11	100,0	100,0	100,0	99,9	98,5	96,9	87,3	80,6	54,5	34	49	15	A-7-5	ML	LG'
70	2,894	2,25	1,09	100,0	100,0	100,0	99,6	99,0	98,1	93,6	88,4	67,1	41	60	19	A-7-5	MH	LG'
71	2,996	2,03	1,09	100,0	100,0	99,7	99,3	98,5	98,2	95,8	92,6	62,0	37	47	9	A-7-5	ML	LG'
72	2,600	1,32	1,13	100,0	100,0	99,9	98,7	87,5	75,0	50,9	39,5	24,0	0	0	NP	A-4	SM	LA'
73	2,617	1,90	1,11	100,0	100,0	99,1	95,6	88,0	79,8	63,9	56,2	42,0	0	0	NP	A-4	CL	LG'
74	2,559	--	--	100,0	100,0	99,9	99,8	99,0	98,5	33,5	9,5	4,0	0	0	NP	A-3	GC-SM	--

Tabela A.2 - As principais características e as classificações pelos sistemas HRB, USCS e MCT dos 76 solos coletados (continuação)

Amostra	γ_s g/cm ³	c'	e'	Solo passante na peneira (%)								% Arg. %	LP %	LL %	IP %	Classificação do solo		
				4,76	2,00	1,19	0,59	0,42	0,30	0,15	0,075							
				mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm					HRB	USCS	MCT
75	2,580	1,44	1,34	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	98,9	78,7	49,6	19,0	23	39	16	A-6	SC	NS'
76	2,532	1,21	1,11	100,0	100,0	100,0	99,9	99,0	98,4	63,5	32,7	16,0	16	31	15	A-2-6	SC	LA'
77	2,701	2,62	1,39	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	99,2	80,1	67,0	49,0	30	55	24	A-7-5	MH	NG'
78	2,684	2,28	1,30	100,0	100,0	100,0	99,9	99,4	99,0	86,6	75,1	47,0	39	59	20	A-7-5	MH	NG'
79	2,578	1,35	1,14	100,0	100,0	99,9	99,3	97,0	91,4	43,3	27,3	17,0	17	26	9	A-2-4	SC	LA'
80	2,549	0,58	1,29	100,0	100,0	100,0	99,9	98,0	97,3	49,6	27,5	15,0	0	0	NP	A-2-4	SM	NA'
81	2,575	0,78	1,29	100,0	100,0	100,0	99,9	99,0	98,5	62,4	32,5	16,0	0	0	NP	A-2-4	SM	NA'
82	2,559	0,97	1,06	100,0	100,0	99,9	99,9	99,9	99,9	86,9	37,6	16,0	18	28	10	A-4	SC	LA'
83	2,606	1,14	1,23	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,9	76,1	40,9	19,0	19	28	9	A-4	SC	NA'
84	2,598	0,73	1,26	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,8	76,1	36,6	19,0	17	20	3	A-4	CL	NA'
85	2,533	1,02	1,42	100,0	100,0	100,0	99,9	99,8	99,7	60,2	30,7	16,0	21	32	11	A-2-6	SC	NA'
86	2,580	2,60	1,49	100,0	100,0	99,3	96,8	94,0	92,6	87,9	85,2	62,0	36	74	38	A-7-5	MH	NG'
87	2,856	2,10	1,18	100,0	100,0	100,0	99,4	99,0	98,5	92,7	85,7	61,0	34	49	15	A-7-5	ML	NG'
88	2,634	1,44	1,10	100,0	100,0	98,4	96,3	92,0	87,2	56,4	39,4	28,0	20	28	8	A-4	SC	LA'
89	2,598	0,40	1,54	100,0	99,9	99,5	96,4	86,0	72,4	27,8	14,7	8,0	0	0	NP	A-2-4	SM	NA
90	2,869	2,11	1,10	100,0	100,0	99,7	99,2	98,0	96,7	89,8	87,2	58,8	33	46	13	A-7-5	ML	LG'
91	2,803	2,21	1,06	100,0	99,8	99,2	98,4	97,0	92,8	78,0	72,9	48,5	33	46	13	A-7-5	ML	LG'
92	2,518	0,27	1,82	100,0	99,9	99,4	98,6	98,0	95,8	50,0	17,3	13,0	0	0	NP	A-2-4	SM	NA
1	2,582	1,22	1,36	100,0	100,0	99,9	97,2	93,0	84,3	45,7	30,3	15,0	23	30	7	A-2-6	SM-SC	NA'
11	2,600	1,30	1,07	100,0	100,0	98,8	95,5	91,0	80,5	41,1	31,2	25,0	19	32	13	A-2-6	SC	LA'
14	2,532	0,43	1,11	100,0	99,6	94,3	91,2	83,0	73,4	36,9	20,0	14,0	16	19	3	A-2-6	SM	LA
17	2,555	1,52	1,22	100,0	100,0	99,8	95,9	88,0	76,2	40,9	35,3	29,0	23	40	17	A-6	CL	NA'

Tabela A.3 - D_{60} (diâmetro tal que 60% das partículas do solo, em massa, têm diâmetros menores que ele) dos 76 solos coletados

Amostra	D_{60} mm	Amostra	D_{60} mm
21	0,033	59	0,120
22	0,013	60	0,130
23	0,200	61	0,095
24	0,200	62	0,100
25	0,037	63	0,095
26	0,160	64	0,026
27	0,120	65	0,006
28	0,170	66	0,230
29	0,380	67	0,000
30	0,180	68	0,180
31	0,017	69	0,009
32	0,016	70	0,002
33	0,100	71	0,004
34	0,025	72	0,200
35	0,008	73	0,120
36	0,055	74	0,200
37	0,070	75	0,095
38	0,080	76	0,150
39	0,000	77	0,030
40	0,170	78	0,016
41	0,180	79	0,190
42	0,130	80	0,170
43	0,180	81	0,150
44	0,150	82	0,100
45	0,090	83	0,120
46	0,140	84	0,120
47	0,037	85	0,160
48	0,005	86	0,004
49	0,008	87	0,005
50	0,220	88	0,170
51	0,050	89	0,250
52	0,090	90	0,006
53	0,057	91	0,017
54	0,110	92	0,170
55	0,170	1	0,200
56	0,130	11	0,220
57	0,140	14	0,230
58	0,095	17	0,220

APÊNDICE B - Os valores das massas específicas secas máximas e dos teores de umidade ótimos respectivos na energia de compactação modificada de Proctor para os solos coletados no interior do Estado de São Paulo

Tabela B.1 - As massas específicas secas máximas e os teores de umidade ótimos na energia de compactação modificada de Proctor para os solos coletados

Amostra	P. Modificado		Amostra	P. Modificado		Amostra	P. Modificado	
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ g/cm ³	W _{ot} %		$\rho_{dm\acute{a}x}$ g/cm ³	W _{ot} %		$\rho_{dm\acute{a}x}$ g/cm ³	W _{ot} %
21	1,845	18,20	46	2,025	10,20	71	1,720	24,00
22	1,530	29,00	47	1,730	23,90	72	2,005	11,20
23	2,070	8,90	48	1,820	18,70	73	1,845	15,80
24	2,080	9,00	49	1,800	19,00	75	2,020	10,90
25	1,780	20,80	50	2,080	8,20	76	2,010	10,25
26	2,030	10,40	51	1,880	15,00	77	1,785	15,20
27	1,950	12,00	52	2,000	10,30	78	1,745	17,20
28	2,070	9,70	53	1,675	21,80	79	2,040	9,70
29	2,090	7,50	54	2,115	8,45	80	2,025	9,30
30	2,006	10,46	55	2,082	8,80	81	2,065	9,00
31	1,680	21,40	56	1,965	7,65	82	1,980	11,00
32	1,790	16,70	57	2,020	11,20	83	2,040	10,20
33	1,830	13,00	58	1,980	10,30	84	2,080	9,30
34	1,680	20,60	59	2,140	8,40	85	2,015	10,40
35	1,740	21,30	60	2,120	8,80	86	1,600	21,60
36	1,820	13,50	61	2,050	9,80	87	1,780	21,50
37	1,820	15,50	62	2,040	9,20	88	2,020	11,20
38	1,775	16,20	63	2,070	9,20	89	2,080	7,90
39	1,527	27,70	64	1,690	18,50	90	1,715	24,00
40	2,085	11,70	65	1,770	18,30	91	1,765	20,50
41	2,035	10,90	66	2,030	9,40	92	1,995	9,45
42	1,975	11,20	67	1,615	25,00	1	2,018	10,95
43	1,975	11,80	68	2,070	9,00	11	2,080	10,70
44	1,940	11,70	69	1,780	20,80	14	2,100	8,40
45	1,930	12,80	70	1,725	23,40	17	1,948	12,40

APÊNDICE C - Os modelos obtidos a partir dos resultados dos ensaios triaxiais cíclicos, realizados nos solos grossos compactados na energia modificada de Proctor

- Os modelos obtidos a partir dos resultados dos ensaios triaxiais cíclicos

A seguir serão apresentados alguns modelos ajustados a partir dos resultados dos ensaios triaxiais cíclicos e de regressões não lineares com a utilização do programa Statistica; observa-se que os valores das tensões e do módulo de resiliência são dados em kPa. Além disso, na Tabela C.1, têm-se os principais modelos que são utilizados para representar o módulo de resiliência. Ainda, a Tabela C.2 mostra os valores de k_1 , k_2 e k_3 , e também os valores de R^2 obtidos com os modelos para solos compactados na energia modificada.

Nas equações dos modelos apresentados a seguir tem-se que:

P_a = pressão atmosférica (para Estado de São Paulo, adotou-se $P_a = 101,3$ kPa);

M_R = módulo de resiliência;

k_1 , k_2 e k_3 = constantes de regressão do modelo;

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão;

σ_3 = tensão de confinamento;

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão de desvio; e

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica, sendo:

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{3} = \sigma_d \cdot \frac{\sqrt{2}}{3}$$

Tabela C.1 - Modelos usados para representar o módulo de resiliência

Modelo	Equação do modelo
k- σ_3	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$
k- σ_d	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$
k- σ_3 - σ_d	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$
k- θ - τ_{oct}	$M_R = Pa \cdot k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3}$

Tabela C.2 - Valores de k_1 , k_2 e k_3 obtidos para solos compactados na energia modificada

Amostra	Modelos para M_R em kPa (energia modificada)													
	$k-\sigma_3$			$k-\sigma_d$			$k-\sigma_3-\sigma_d$				$k-\theta-\tau_{oct}$			
	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	k_3	R^2	k_1	k_2	k_3	R^2
46	45101	0,25	0,86	47670	0,22	0,76	39187	0,20	0,11	0,95	1010	0,24	0,03	0,95
79	45505	0,28	0,95	62971	0,19	0,49	45626	0,28	0,00	0,95	845	0,40	-0,12	0,95
11	52122	0,20	0,79	45110	0,24	0,79	40121	0,12	0,15	0,95	1190	0,15	0,11	0,95
54	91330	0,10	0,71	87723	0,12	0,79	83201	0,05	0,08	0,87	1446	0,06	0,07	0,87
82	25250	0,31	0,96	31870	0,27	0,55	23273	0,29	0,05	0,97	631	0,37	-0,03	0,98
76	63136	0,14	0,90	73962	0,10	0,46	63708	0,15	-0,01	0,91	850	0,22	-0,07	0,91
23	39354	0,22	0,95	55863	0,13	0,35	42607	0,26	-0,05	0,97	571	0,38	-0,17	0,98
52	47304	0,17	0,98	57717	0,11	0,45	48400	0,18	-0,02	0,98	663	0,26	-0,10	0,98
61	35328	0,66	0,83	172198	0,78	0,21	50923	0,89	-0,31	0,94	788	1,27	-0,66	0,95
68	137	2,07	0,91	23103	0,91	0,45	83	1,89	0,28	0,94	325	2,64	-0,45	0,93
26	82529	0,42	0,81	142496	0,30	0,53	79277	0,37	0,06	0,82	2843	0,48	-0,04	0,82
40	25100	1,05	0,61	16140	1,09	0,81	7547	0,50	0,78	0,87	15329	0,73	0,57	0,87
28	74078	0,12	0,82	85684	0,08	0,45	73881	0,11	0,00	0,82	963	0,16	-0,04	0,81
88	41990	0,91	0,66	82940	0,80	0,64	27797	0,59	0,44	0,78	14256	0,75	0,30	0,78
72	28439	0,46	0,90	34333	0,39	0,75	22082	0,33	0,18	0,97	1191	0,47	0,04	0,97
66	29096	0,35	0,86	33345	0,34	0,63	22367	0,27	0,15	0,94	1014	0,35	0,09	0,94
63	46856	0,37	0,87	100144	0,20	0,27	53199	0,45	-0,12	0,91	925	0,57	-0,23	0,92
60	10802	0,65	0,94	18970	0,49	0,63	8729	0,55	0,14	0,96	645	0,79	-0,09	0,97
59	48722	0,24	0,83	53117	0,20	0,81	43132	0,14	0,12	0,96	1097	0,21	0,06	0,96
85	55583	0,24	0,83	82101	0,14	0,30	61298	0,29	-0,07	0,87	794	0,42	-0,20	0,88
62	20539	0,40	0,96	28008	0,31	0,58	18254	0,36	0,07	0,97	587	0,51	-0,08	0,97
1	64454	0,07	0,60	73770	0,39	0,14	67978	0,10	-0,04	0,68	687	0,12	-0,07	0,69
17	77430	0,10	0,78	77385	0,10	0,72	72585	0,07	0,05	0,87	1082	0,10	0,02	0,87
58	53943	0,21	0,94	61064	0,19	0,65	50507	0,17	0,05	0,96	1043	0,22	0,01	0,96
55	17651	0,51	0,92	25456	0,40	0,66	14859	0,41	0,13	0,95	735	0,60	-0,05	0,96
56	24582	0,43	0,95	32995	0,34	0,68	20415	0,35	0,12	0,99	851	0,49	-0,02	0,99
24	51761	0,17	0,70	57414	0,13	0,46	50036	0,15	0,03	0,71	785	0,21	-0,04	0,71
80	7444	0,65	0,98	16272	0,45	0,56	6737	0,61	0,06	0,99	378	0,87	-0,19	0,99
84	43100	0,20	0,98	54375	0,15	0,41	44923	0,21	-0,03	0,99	670	0,27	-0,08	0,99
83	46524	0,24	0,97	57523	0,20	0,51	44937	0,23	0,02	0,97	690	0,34	-0,20	0,77
81	19041	0,38	0,98	25610	0,29	0,62	17223	0,34	0,06	0,99	518	0,48	-0,08	0,99
42	11073	0,61	0,90	15526	0,50	0,68	8295	0,48	0,18	0,95	652	0,69	-0,02	0,95
41	20898	0,47	0,90	25504	0,40	0,72	16422	0,35	0,16	0,96	865	0,50	0,02	0,97
30	12866	0,65	0,88	17040	0,55	0,72	8756	0,49	0,24	0,95	948	0,71	0,03	0,96
44	82299	0,14	0,78	80479	0,14	0,82	73983	0,07	0,08	0,93	1364	0,10	0,05	0,92
57	6521	0,66	0,95	10729	0,52	0,67	4832	0,55	0,18	0,99	431	0,78	-0,05	0,99
27	15353	0,47	0,91	17991	0,40	0,73	11815	0,35	0,17	0,97	631	0,51	0,01	0,98
14	27553	0,32	0,99	36363	0,27	0,56	25703	0,30	0,05	1,00	729	0,37	-0,03	1,00
29	27750	0,37	0,95	38128	0,28	0,65	25255	0,31	0,08	0,97	765	0,45	-0,05	0,97
50	25345	0,33	0,94	30540	0,27	0,65	22123	0,28	0,08	0,97	641	0,39	-0,03	0,97
43	44544	0,13	0,65	62211	0,05	0,09	50740	0,20	-0,09	0,82	476	0,28	-0,18	0,82
75	18635	0,43	0,88	28250	0,31	0,51	18027	0,41	0,02	0,88	509	0,59	-0,15	0,89

(*) Tensões e M_R em kPa

APÊNDICE D - As microfotografias dos solos estudados com uma ampliação de 10.000 vezes

Microfotografia da amostra 23

Microfotografia da amostra 26

Microfotografia da amostra 24

Microfotografia da amostra 27

Microfotografia da amostra 28

Microfotografia da amostra 30

Microfotografia da amostra 29

Microfotografia da amostra 40

Microfotografia da amostra 41

Microfotografia da amostra 43

Microfotografia da amostra 42

Microfotografia da amostra 44

Microfotografia da amostra 46

Microfotografia da amostra 52

Microfotografia da amostra 50

Microfotografia da amostra 54

Microfotografia da amostra 55

Microfotografia da amostra 57

Microfotografia da amostra 56

Microfotografia da amostra 58

Microfotografia da amostra 59

Microfotografia da amostra 61

Microfotografia da amostra 60

Microfotografia da amostra 62

Microfotografia da amostra 63

Microfotografia da amostra 68

Microfotografia da amostra 66

Microfotografia da amostra 72

Microfotografia da amostra 75

Microfotografia da amostra 79

Microfotografia da amostra 76

Microfotografia da amostra 80

Microfotografia da amostra 81

Microfotografia da amostra 83

Microfotografia da amostra 82

Microfotografia da amostra 84

Microfotografia da amostra 85

Microfotografia da amostra 92

Microfotografia da amostra 88

Microfotografia da amostra 1

Microfotografia da amostra 14

APÊNDICE E - Arquiteturas, momentos, taxas de aprendizagem e erros médios de treinamento dos solos compactados na energia modificada e na energia normal

Tabela E.1 - Arquiteturas, momentos, taxas de aprendizagem e erros médios de treinamento dos solos compactados na energia modificada

Arquitetura	Momento	Taxa aprend.	EMT	Arquitetura	Momento	Taxa aprend.	EMT
12-12-12-1	0,3	0,3	0,003145	12-24-12-1	0,3	0,3	0,004548
12-12-12-1	0,3	0,5	0,002989	12-24-12-1	0,3	0,5	0,004009
12-12-12-1	0,3	0,7	0,002610	12-24-12-1	0,3	0,7	0,003334
12-12-12-1	0,5	0,3	0,003182	12-24-12-1	0,5	0,3	0,004207
12-12-12-1	0,5	0,5	0,002761	12-24-12-1	0,5	0,5	0,003300
12-12-12-1	0,5	0,7	0,002602	12-24-12-1	0,5	0,7	0,003219
12-12-12-1	0,7	0,3	0,002969	12-24-12-1	0,7	0,3	0,003407
12-12-12-1	0,7	0,5	0,002245	12-24-12-1	0,7	0,5	0,002731
12-12-12-1	0,7	0,7	0,001958	12-24-12-1	0,7	0,7	0,002232
12-12-16-1	0,3	0,3	0,004162	12-24-16-1	0,3	0,3	0,004641
12-12-16-1	0,3	0,5	0,003678	12-24-16-1	0,3	0,5	0,003989
12-12-16-1	0,3	0,7	0,003137	12-24-16-1	0,3	0,7	0,003673
12-12-16-1	0,5	0,3	0,003677	12-24-16-1	0,5	0,3	0,004212
12-12-16-1	0,5	0,5	0,002985	12-24-16-1	0,5	0,5	0,003618
12-12-16-1	0,5	0,7	0,002603	12-24-16-1	0,5	0,7	0,003278
12-12-16-1	0,7	0,3	0,002885	12-24-16-1	0,7	0,3	0,003670
12-12-16-1	0,7	0,5	0,002583	12-24-16-1	0,7	0,5	0,003088
12-12-16-1	0,7	0,7	0,002299	12-24-16-1	0,7	0,7	0,002757
12-12-24-1	0,3	0,3	0,004514	12-24-24-1	0,3	0,3	0,006754
12-12-24-1	0,3	0,5	0,003596	12-24-24-1	0,3	0,5	0,005129
12-12-24-1	0,3	0,7	0,003243	12-24-24-1	0,3	0,7	0,004348
12-12-24-1	0,5	0,3	0,003883	12-24-24-1	0,5	0,3	0,005618
12-12-24-1	0,5	0,5	0,003271	12-24-24-1	0,5	0,5	0,004222
12-12-24-1	0,5	0,7	0,003232	12-24-24-1	0,5	0,7	0,003853
12-12-24-1	0,7	0,3	0,003279	12-24-24-1	0,7	0,3	0,004244
12-12-24-1	0,7	0,5	0,003223	12-24-24-1	0,7	0,5	0,003137
12-12-24-1	0,7	0,7	0,002674	12-24-24-1	0,7	0,7	0,003327
12-16-12-1	0,3	0,3	0,003749	12-12-1	0,3	0,3	0,004034
12-16-12-1	0,3	0,5	0,003501	12-12-1	0,3	0,5	0,003695
12-16-12-1	0,3	0,7	0,003223	12-12-1	0,3	0,7	0,002690
12-16-12-1	0,5	0,3	0,003528	12-12-1	0,5	0,3	0,003935
12-16-12-1	0,5	0,5	0,003146	12-12-1	0,5	0,5	0,002989
12-16-12-1	0,5	0,7	0,003089	12-12-1	0,5	0,7	0,002957
12-16-12-1	0,7	0,3	0,003226	12-12-1	0,7	0,3	0,002990
12-16-12-1	0,7	0,5	0,002794	12-12-1	0,7	0,5	0,002434
12-16-12-1	0,7	0,7	0,001995	12-12-1	0,7	0,7	0,002297
12-16-16-1	0,3	0,3	0,004343	12-16-1	0,3	0,3	0,004432
12-16-16-1	0,3	0,5	0,003749	12-16-1	0,3	0,5	0,003420
12-16-16-1	0,3	0,7	0,003410	12-16-1	0,3	0,7	0,002638
12-16-16-1	0,5	0,3	0,004039	12-16-1	0,5	0,3	0,004119
12-16-16-1	0,5	0,5	0,003400	12-16-1	0,5	0,5	0,003614
12-16-16-1	0,5	0,7	0,002995	12-16-1	0,5	0,7	0,003385
12-16-16-1	0,7	0,3	0,003411	12-16-1	0,7	0,3	0,003162
12-16-16-1	0,7	0,5	0,002609	12-16-1	0,7	0,5	0,002693
12-16-16-1	0,7	0,7	0,002392	12-16-1	0,7	0,7	0,002756
12-16-24-1	0,3	0,3	0,005089	12-24-1	0,3	0,3	0,004830
12-16-24-1	0,3	0,5	0,004586	12-24-1	0,3	0,5	0,003987
12-16-24-1	0,3	0,7	0,004268	12-24-1	0,3	0,7	0,003470
12-16-24-1	0,5	0,3	0,004580	12-24-1	0,5	0,3	0,004316
12-16-24-1	0,5	0,5	0,004125	12-24-1	0,5	0,5	0,003591
12-16-24-1	0,5	0,7	0,004072	12-24-1	0,5	0,7	0,003147
12-16-24-1	0,7	0,3	0,004002	12-24-1	0,7	0,3	0,003452
12-16-24-1	0,7	0,5	0,002944	12-24-1	0,7	0,5	0,003326
12-16-24-1	0,7	0,7	0,002695	12-24-1	0,7	0,7	0,002828

Tabela E.2 - Arquiteturas, momentos, taxas de aprendizagem e erros médios de treinamento dos solos para subleito do interior do Estado de São Paulo compactados na energia normal

Arquitetura	Momento	Taxa aprend.	EMT	Arquitetura	Momento	Taxa aprend.	EMT
12-12-12-1	0,3	0,3	0,003383	12-24-12-1	0,3	0,3	0,004207
12-12-12-1	0,3	0,5	0,002755	12-24-12-1	0,3	0,5	0,003301
12-12-12-1	0,3	0,7	0,002404	12-24-12-1	0,3	0,7	0,002550
12-12-12-1	0,5	0,3	0,002888	12-24-12-1	0,5	0,3	0,003420
12-12-12-1	0,5	0,5	0,002354	12-24-12-1	0,5	0,5	0,002384
12-12-12-1	0,5	0,7	0,002361	12-24-12-1	0,5	0,7	0,001674
12-12-12-1	0,7	0,3	0,002474	12-24-12-1	0,7	0,3	0,002205
12-12-12-1	0,7	0,5	0,001927	12-24-12-1	0,7	0,5	0,001595
12-12-12-1	0,7	0,7	0,001488	12-24-12-1	0,7	0,7	0,001520
12-12-16-1	0,3	0,3	0,003496	12-24-16-1	0,3	0,3	0,004721
12-12-16-1	0,3	0,5	0,003126	12-24-16-1	0,3	0,5	0,003359
12-12-16-1	0,3	0,7	0,002593	12-24-16-1	0,3	0,7	0,003136
12-12-16-1	0,5	0,3	0,003113	12-24-16-1	0,5	0,3	0,003507
12-12-16-1	0,5	0,5	0,002649	12-24-16-1	0,5	0,5	0,003486
12-12-16-1	0,5	0,7	0,002566	12-24-16-1	0,5	0,7	0,002524
12-12-16-1	0,7	0,3	0,002776	12-24-16-1	0,7	0,3	0,002874
12-12-16-1	0,7	0,5	0,002085	12-24-16-1	0,7	0,5	0,001906
12-12-16-1	0,7	0,7	0,001657	12-24-16-1	0,7	0,7	0,001631
12-12-24-1	0,3	0,3	0,005344	12-24-24-1	0,3	0,3	0,006665
12-12-24-1	0,3	0,5	0,004010	12-24-24-1	0,3	0,5	0,004769
12-12-24-1	0,3	0,7	0,004201	12-24-24-1	0,3	0,7	0,004449
12-12-24-1	0,5	0,3	0,004240	12-24-24-1	0,5	0,3	0,005694
12-12-24-1	0,5	0,5	0,002820	12-24-24-1	0,5	0,5	0,004422
12-12-24-1	0,5	0,7	0,002727	12-24-24-1	0,5	0,7	0,003727
12-12-24-1	0,7	0,3	0,003006	12-24-24-1	0,7	0,3	0,004047
12-12-24-1	0,7	0,5	0,002840	12-24-24-1	0,7	0,5	0,002629
12-12-24-1	0,7	0,7	0,002045	12-24-24-1	0,7	0,7	0,002149
12-16-12-1	0,3	0,3	0,003822	12-12-1	0,3	0,3	0,004638
12-16-12-1	0,3	0,5	0,003015	12-12-1	0,3	0,5	0,003326
12-16-12-1	0,3	0,7	0,002253	12-12-1	0,3	0,7	0,002963
12-16-12-1	0,5	0,3	0,002795	12-12-1	0,5	0,3	0,004194
12-16-12-1	0,5	0,5	0,002111	12-12-1	0,5	0,5	0,002601
12-16-12-1	0,5	0,7	0,001972	12-12-1	0,5	0,7	0,002803
12-16-12-1	0,7	0,3	0,002033	12-12-1	0,7	0,3	0,002841
12-16-12-1	0,7	0,5	0,001488	12-12-1	0,7	0,5	0,002792
12-16-12-1	0,7	0,7	0,001549	12-12-1	0,7	0,7	0,002959
12-16-16-1	0,3	0,3	0,005731	12-16-1	0,3	0,3	0,004103
12-16-16-1	0,3	0,5	0,003249	12-16-1	0,3	0,5	0,003253
12-16-16-1	0,3	0,7	0,002999	12-16-1	0,3	0,7	0,002921
12-16-16-1	0,5	0,3	0,003315	12-16-1	0,5	0,3	0,003026
12-16-16-1	0,5	0,5	0,003072	12-16-1	0,5	0,5	0,002932
12-16-16-1	0,5	0,7	0,002486	12-16-1	0,5	0,7	0,002879
12-16-16-1	0,7	0,3	0,002667	12-16-1	0,7	0,3	0,003007
12-16-16-1	0,7	0,5	0,001972	12-16-1	0,7	0,5	0,002316
12-16-16-1	0,7	0,7	0,001751	12-16-1	0,7	0,7	0,002238
12-16-24-1	0,3	0,3	0,006056	12-24-1	0,3	0,3	0,003119
12-16-24-1	0,3	0,5	0,004476	12-24-1	0,3	0,5	0,002786
12-16-24-1	0,3	0,7	0,004370	12-24-1	0,3	0,7	0,002825
12-16-24-1	0,5	0,3	0,004468	12-24-1	0,5	0,3	0,002815
12-16-24-1	0,5	0,5	0,003622	12-24-1	0,5	0,5	0,002914
12-16-24-1	0,5	0,7	0,003207	12-24-1	0,5	0,7	0,002454
12-16-24-1	0,7	0,3	0,003173	12-24-1	0,7	0,3	0,002880
12-16-24-1	0,7	0,5	0,001916	12-24-1	0,7	0,5	0,002859
12-16-24-1	0,7	0,7	0,002086	12-24-1	0,7	0,7	0,002931

APÊNDICE F - Resultados obtidos por Takeda (2006) para solos de subleito do interior de São Paulo compactados na energia normal

Tabela F.1 - Características dos solos de Takeda (2006), inclusive a classificação destes materiais pelos sistemas HRB, USCS e MCT

Amostra	γ_s g/cm ³	c'	e'	Solo passante na peneira (%)								% Arg. %	LP %	LL %	IP %	Classificação do solo		
				4,76	2,00	1,19	0,59	0,42	0,30	0,15	0,075							
				mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm					HRB	USCS	MCT
76	2,532	0,86	1,08	100,0	100,0	100,0	99,9	99,0	98,0	63,5	32,7	16,0	16	31	15	A-2-6	SC	LA'
81	2,663	0,80	1,28	100,0	100,0	100,0	99,9	99,0	98,5	62,4	32,5	16,9	0	0	NP	A-2-4	SM	NA'
85	2,624	1,00	1,37	100,0	100,0	100,0	99,9	99,8	99,7	60,2	30,7	16,0	18	34	16	A-2-6	SC	NA'
11	2,633	0,80	1,10	100,0	100,0	98,8	95,5	91,0	80,5	41,1	31,2	25,0	21	34	13	A-2-6	SC	LA'
17	2,638	1,00	1,17	100,0	100,0	99,8	95,9	88,0	76,2	40,9	35,3	29,0	24	38	14	A-2-6	SC	NA'
50	2,629	0,46	1,28	100,0	100,0	100,0	99,9	93,5	82,1	39,7	22,1	12,0	0	0	NP	A-2-4	SM	LA
55	2,565	0,98	1,41	100,0	100,0	99,8	99,5	96,5	89,6	56,2	36,9	15,5	14	18	4	A-4	SM-SC	NA'
60	2,568	1,13	1,01	100,0	99,9	99,8	99,4	98,0	93,2	68,4	40,1	21,8	17	23	6	A-4	SM-SC	LA'
27	2,691	1,63	1,42	100,0	100,0	99,9	99,4	97,0	91,1	69,4	50,0	28,5	23	38	15	A-6	SC	NG'
30	2,546	1,52	0,93	100,0	100,0	99,8	97,7	91,0	80,5	49,9	37,8	26,7	19	31	12	A-6	SC	LG'
57	2,564	1,73	1,12	100,0	100,0	100,0	99,8	97,0	91,8	64,0	44,8	24,0	23	31	8	A-4	SM	LG'
46	2,606	1,28	0,94	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	97,6	65,5	36,9	23,0	19	34	15	A-6	SC	LA'
88	2,675	1,50	1,09	100,0	100,0	98,5	96,3	92,0	87,2	56,4	39,4	28,0	20	28	8	A-4	SC	LA'
21	2,878	1,95	1,04	100,0	99,7	98,9	98,2	97,0	93,4	77,3	68,3	48,0	30	44	14	A-7-5	ML	LG'
77	2,701	2,62	1,39	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	99,2	80,1	67,0	49,0	30	55	24	A-7-5	MH	NG'
38	2,613	2,17	1,00	100,0	100,0	98,7	91,9	86,0	79,9	68,1	59,0	43,0	32	61	29	A-7-5	MH	LG'
53	2,660	2,48	1,24	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	98,0	87,2	69,1	50,5	35	55	20	A-7-5	MH	NG'
48	2,844	1,85	0,70	100,0	100,0	99,5	99,4	98,0	95,5	86,4	78,2	60,4	30	47	17	A-7-5	ML	LG'
91	2,896	2,50	1,06	100,0	99,8	99,3	98,4	97,0	92,8	78,0	72,9	49,0	33	46	13	A-7-5	ML	LG'
78	2,684	2,28	1,30	100,0	100,0	100,0	99,9	99,4	99,0	86,6	75,1	47,0	39	59	20	A-7-5	MH	NG'
25	2,932	1,71	1,05	100,0	100,0	100,0	99,6	99,0	96,6	89,0	84,7	41,0	33	46	13	A-7-5	ML	LG'
22	2,980	1,69	1,27	100,0	100,0	99,8	99,4	99,0	98,2	94,7	92,0	45,0	53	79	26	A-7-5	MH	NG'
34	2,629	1,89	1,67	100,0	100,0	99,9	99,6	99,5	99,2	98,8	90,6	37,5	40	57	17	A-7-5	MH	NG'
67	2,666	2,02	0,95	100,0	100,0	99,8	99,6	99,5	99,3	98,0	95,6	81,0	43	60	17	A-7-5	MH	LG'
39	2,657	2,24	1,22	100,0	100,0	100,0	99,4	98,5	97,8	94,9	91,8	84,5	55	108	53	A-7-5	MH	NG'
71	2,996	2,03	1,09	100,0	100,0	99,7	99,3	98,5	98,2	95,8	92,6	62,0	37	47	9	A-7-5	ML	LG'
65	2,749	1,98	1,31	100,0	100,0	99,8	99,2	98,5	97,8	95,6	92,3	58,0	34	58	24	A-7-5	MH	NG'
64	2,661	1,28	1,63	100,0	100,0	99,3	96,7	95,0	94,1	92,3	88,8	18,0	0	0	NP	A-4	CL	NS'

Tabela F.2 - Os teores de umidade ótimos, as massas específicas secas máximas, os módulos tangentes iniciais e as resistências à compressão simples dos 28 solos compactados na energia normal de Takeda (2006)

Amostra	W _{ot} %	ρ _{dmáx} g/cm ³	E _o kPa	RCS kPa
76	12,90	1,858	36.000	239
81	10,60	1,909	25.000	292
85	12,80	1,841	22.000	259
11	13,20	1,905	20.000	245
17	14,70	1,788	67.000	438
50	10,60	1,944	16.000	205
55	11,50	1,923	34.000	331
60	10,20	2,014	52.000	437
27	17,00	1,739	110.000	700
30	12,60	1,888	103.000	728
57	13,50	1,862	96.000	486
46	13,50	1,809	69.000	143
88	13,90	1,855	42.000	181
21	21,00	1,679	97.000	553
77	20,00	1,570	92.000	709
38	20,90	1,626	60.000	278
53	29,10	1,417	51.000	185
48	21,80	1,642	115.000	595
91	23,90	1,583	98.000	254
78	21,90	1,443	65.000	381
25	24,90	1,608	84.000	457
22	32,00	1,415	123.000	828
34	26,40	1,433	57.000	497
67	29,80	1,362	176.000	719
39	37,70	1,272	153.000	906
71	26,60	1,597	109.000	630
65	22,90	1,563	98.000	600
64	25,70	1,459	11.000	205

Tabela F.3 - Valores de k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto obtidos para solos compactados na energia normal por Takeda (2006)

Amostra	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$			R^2
	k_1	k_2	k_3	
76	519	0,08	-0,24	0,98
81	214	0,38	-0,29	0,98
85	607	0,16	-0,48	1,00
11	430	0,16	-0,28	0,98
17	850	0,08	-0,31	0,92
50	117	0,43	-0,21	0,99
55	230	0,26	-0,34	0,98
60	805	0,20	-0,38	0,96
27	1076	0,06	-0,24	0,97
30	838	0,15	-0,23	0,95
57	674	0,11	-0,28	0,99
46	864	0,26	-0,46	0,97
88	1070	0,42	-0,67	0,99
21	653	0,14	-0,33	0,99
77	554	0,08	-0,17	0,96
38	853	0,13	-0,33	0,99
53	378	0,01	-0,13	0,92
48	867	0,09	-0,23	0,94
91	1308	0,07	-0,34	0,98
78	963	0,00	-0,21	0,95
25	1275	0,08	-0,42	0,99
22	974	-0,05	-0,12	0,95
34	822	0,01	-0,29	0,99
67	746	0,05	-0,17	0,97
39	1240	-0,01	-0,19	0,97
71	1938	0,08	-0,34	0,99
65	1195	-0,07	-0,19	0,94
64	329	0,13	-0,42	0,99

(*) Tensões em kPa e M_R em MPa