

**LUIS MIGUEL GUTIÉRREZ KLINSKY**

**PROPOSTA DE REAPROVEITAMENTO DE AREIA DE  
FUNDIÇÃO EM SUB-BASES E BASES DE PAVIMENTOS  
FLEXÍVEIS, ATRAVÉS DE SUA INCORPORAÇÃO A SOLOS  
ARGILOSOS**

**Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos, da Universidade de  
São Paulo, como parte dos requisitos para  
obtenção do Título de Mestre em Engenharia  
Civil: Transportes**

**Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri**

**São Carlos  
2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, 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

R484p Gutierrez Klinsky, Luis Miguel  
Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos / Luis Miguel Gutierrez Klinsky ; orientador Glauco Tulio Pessa Fabbri. -- São Carlos, 2008.

Dissertação (Mestrado-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, 2008.

1. Fundição. 2. Areia de fundição. 3. Solos lateríticos. 4. Tecnologia MCT. 5. Módulo de resiliência. I. Título.





## DEDICATÓRIA

---

Aos meus pais, Edgar e Maria del Rosário (Cuca).



## AGRADECIMENTOS

---

A Deus, em primeiro lugar, e à Virgem Maria.

Ao Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri, pelos ensinamentos, conselhos, orientação, ajuda constante, paciência e confiança depositada para desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Alexandre Benetti Parreira, pelas contribuições feitas a este trabalho.

À Prof<sup>a</sup>. Silvia Claudia Semensato Povinelli por viabilizar a análise do resíduo e disponibilizar a utilização do Laboratório de Saneamento.

A todos os professores do Departamento de Transportes da EESC-USP, pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Transportes da EESC-USP.

À Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

À CNPq pela bolsa de estudos concedida.

Aos técnicos do Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes, Gigante, João e Paulo, pelos ensinamentos e ajuda na realização dos ensaios.

Aos funcionários do Departamento de Transportes, Heloísa, Beth, Magali, Alexandre, Suely, Vicente, Antonio Carlos e Paulinho.

Aos meus pais, Edgar e Maria del Rosário, pelo amor, pelos sábios ensinamentos, a paciência, os conselhos, a ajuda incondicional.

Aos meus irmãos, Eduardo, Edgar, Rosário, José Carlos, pelo carinho, ensinamentos, brincadeiras e principalmente pela unidade que mantemos sempre apesar da distância.

Aos meus avôs Gelafio(+) e Efigenia (+), Guillermo e Lola, pelo carinho que sempre me demonstraram.

À minha tia Carmela, pela ajuda e carinho brindado sempre.

À Vivian, pela ajuda em todo momento, mas em especial pelo carinho demonstrado.

Aos meus amigos Paulo Reschetti Júnior, Matheus Dezotti, Alex Arancibia, Raphael Vieira, Luiz A. Campos, Paulo Neto, pela amizade, a força a confiança brindada nesse tempo no Brasil, e por todos os momentos e experiências vividas.

Aos meus amigos de Santa Cruz de la Sierra, que sempre me deram força e apoio na distância.





## RESUMO

---

KLINSKY, L.M.G. (2008). *Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Um dos maiores problemas do setor da fundição de metais é a produção de resíduos sólidos, constituídos basicamente pelas areias residuais. Geralmente, o uso de aditivos e ligantes no processo de fundição limita a reutilização da areia, o que obriga as indústrias a destinar esse resíduo a depósitos de descarte, apesar da boa qualidade que a areia apresenta para outros usos, principalmente na engenharia civil. No Brasil, a produção de fundidos em 2006 alcançou três milhões de toneladas, com a geração de, aproximadamente, uma tonelada de resíduo para cada tonelada de metal produzida. Nesse sentido, procuram-se alternativas para reutilizar a areia de fundição em grandes quantidades, que permitam reduzir os custos de descarte pelas siderúrgicas e a utilização na construção de pavimentos fornece oportunidades para o reuso nas diferentes camadas estruturais. O objetivo deste trabalho é avaliar o reaproveitamento da areia de fundição como material de construção em sub-bases e bases de rodovias, através de sua incorporação a solos argilosos lateríticos da região de Sertãozinho/SP, que tem grande produção de fundidos e, conseqüentemente, de resíduos e também carece de jazidas de solos arenosos para a construção de rodovias e vias urbanas. No estudo foi utilizada a técnica de montagem de solos artificiais a partir de dois solos lateríticos argilosos e do resíduo Areia de Fundição e da Areia Virgem. Os solos artificiais foram submetidos aos ensaios de: Limite de Liquidez e Plasticidade, Granulometria por Peneiramento e Sedimentação, mini-MCV, Perda de Massa por Imersão, mini-CBR, Expansão, Contração, Infiltrabilidade e Permeabilidade em corpos-de-prova de dimensões reduzidas e na energia intermediária, CBR na energia intermediária e Triaxial Dinâmico. Para determinar a periculosidade do resíduo foram executados Ensaios Ambientais de Massa Bruta, Lixiviação e Solubilização. A partir dos resultados obtidos nestes ensaios foi possível analisar a variação das propriedades tecnológicas e ambientais dos solos em função do teor de areia de fundição adicionada. Os solos lateríticos argilosos com 60% de Areia de Fundição adicionada apresentaram propriedades mecânicas que atendem as especificações do DER-SP (1991) e do Manual de Pavimentação do DNIT (2006). Os ensaios ambientais mostraram que a areia de fundição, utilizada nesta pesquisa, apresenta características que se enquadram dentro dos parâmetros da CETESB, o que permite que o resíduo seja avaliado para seu reaproveitamento na construção de rodovias. Com base na análise dos resultados conclui-se que o resíduo Areia de Fundição é de uso promissor nas camadas de base e sub-base de rodovias de baixo volume de tráfego.

**Palavras-Chaves:** Fundição, Areia de Fundição, Solos Lateríticos, tecnologia MCT, Módulo de Resiliência.



## ABSTRACT

---

KLINSKY, L.M.G. (2008). *Foundry Sand reuse proposal in bases and sub-bases of flexible pavements, through its incorporation to clay soils*. Máster Thesis (Mastering) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

One of the biggest problems of the foundry industry is the solid residues production, constituted basically by sands. The use of additives and binders in the foundry process reduces the reuse of the sand and the remainder is discarded in industrial landfills or stockpiled on site, although the good quality of the sand as aggregate for manufactured products such as Portland cement, asphalts and geotechnical applications such as road bases, structural fills, embankments and manufactured soils. The foundry production, in year 2007, in Brazil, exceeded three millions tons, and it is had that for each ton of produced metal, a ton of foundry residue results approximately. The long term sustainability, economics and reuse practices suggest that alternative use practices must be done for the foundry sand and the roadways construction supply such opportunities. The purpose of this work is to evaluate the reuse of foundry sand as a construction material for road bases and sub-bases, trough its incorporation to clay lateritic soils from Sertãozinho, Sao Paulo state region. This region has a highly production of foundry metals and residues, and does not have natural sandy soils deposits for the construction of highways and urban roads. The technique used in this study was de soil assembly; Foundry Sand and Virgin Sand were mixed with two clay lateritic soils in different proportions. Tests were made in the soil-sand mixes to evaluate the sand addition influence in the mechanic soil behaviour, which are: Liquid Limit and Plastic Limit, Granulometry, mini-MCV, Immersion Lost Mass, mini-CBR at the intermediate energy, Expansion, Contraction, CBR at the intermediate energy, Infiltrability, Permeability and Dynamic Triaxial. Also, Environment Tests – Leaching and Solubility – were made to establish the hazard of the foundry sand. The results show that lateritic clay soils with 60% of Foundry Sand added has adequate mechanical properties to be used as base and sub-base material for low traffic pavements, according to the DER-SP(1991) specifications and the DNIT Manual Pavement (2006). The environment tests indicate that the foundry sand residue, used in this work, has promising use in road bases and sub-bases.

**Key-Words:** Foundry, Foundry Sand, Lateritic Soils, MCT technology, Resilient Modulus.



## RESUMEN

---

KLINSKY, L.M.G. (2008). *Propuesta de reuso de arena de fundición en bases y sub-bases de pavimentos flexibles, a través de su incorporación a suelos arcillosos*. Tesis de Maestría (Masterado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Uno de los mayores problemas del sector de fundición de metales es la producción de residuos sólidos, constituidos básicamente por las arenas residuales. Generalmente, el uso de aditivos y de ligantes en el proceso de fundición limita la reutilización de la arena en el propio proceso, lo que obliga a las industrias a destinar ese residuo en depósitos de descarte, a pesar de la buena calidad que la arena tiene para otros usos, principalmente en el sector de la ingeniería civil. En Brasil, la producción de fundidos en 2007 rebasó los tres millones de toneladas, con la generación de, aproximadamente, una tonelada de residuo para cada tonelada de metal producida. En ese sentido, se buscan alternativas para reutilizar la arena de fundición en cantidades considerables, que permitan reducir los costos de descarte de las arenas por parte de las siderúrgicas y su utilización en la construcción de pavimentos ofrece oportunidades de reaprovechamiento en las diferentes capas estructurales. El objetivo de este trabajo es evaluar el reaprovechamiento de la arena de fundición como material de construcción de sub-bases y bases de carreteras, a través de su incorporación a suelos arcillosos lateríticos de la región de Sertãozinho/SP, que tiene grande producción de fundidos y consecuentemente de residuos y también carece de yacidas de suelos arenosos para la construcción de carreteras y vías urbanas. En este estudio fue utilizada la técnica de montaje de suelos artificiales a partir de dos suelos lateríticos arcillosos y del residuo Arena de Fundición y de la Arena Virgen. Los suelos artificiales fueron sometidos a ensayos de: límite líquido y plástico, granulometría por tamizado y sedimentación, mini-MCV, pérdida de masa por inmersión, mini-CBR en la energía intermediaria, expansión, contracción, CBR en la energía intermediaria, infiltración y permeabilidad, triaxial dinámico. Para determinar el grado de peligrosidad del residuo fueron ejecutados ensayos ambientales de masa bruta, lixiviación y solubilización. A partir de los resultados obtenidos en estos ensayos fue posible analizar la variación de las propiedades tecnológicas de los suelos en función del porcentaje de arena de fundición agregado. Los suelos lateríticos arcillosos con 60% de Arena de Fundición adicionada presentaron propiedades mecánicas que atienden a las especificaciones del DER-SP (1991) y del Manual de Pavimentación del DNIT (2006). Los ensayos ambientales mostraron que la arena de fundición, utilizada en este trabajo, puede ser sujeta a evaluación de la CETESB. Basado en el análisis de los resultados se puede concluir que el residuo Arena de Fundición tiene uso prometedor en las capas base y sub-base de carreteras de bajo volumen de tráfico.

**Palabras-Llave:** Fundición, Arena de Fundición, Suelos Lateríticos, tecnología MCT, Módulo de Resiliencia.



# SUMÁRIO

---

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA .....	2
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA .....	6
1.2.1. Objetivo Geral .....	6
1.2.2. Objetivos Específicos .....	6
1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA .....	7
CAPITULO 2 – AREIA DE FUNDIÇÃO .....	9
2.1. ANTECEDENTES .....	9
2.2. PROCESSO DE FUNDIÇÃO .....	11
2.2.1. Moldagem em Areia Verde .....	13
2.2.2. Moldagem em Areia Seca .....	14
2.2.3. Moldagem em Areia-Cimento .....	15
2.2.4. Moldagem em Areia de Macho .....	15
2.2.5. Moldagem pelo Processo de CO <sub>2</sub> .....	16
2.2.6. Processo em Casca (Shell molding) .....	16
2.2.7. Moldagem pelo processo de cera perdida ou por investimento (Investment Casting) ...	17
2.2.8. Processo em moldes permanentes ou fundição em coquilha .....	18
2.2.9. Processo em moldes semipermanentes .....	19
2.3. EXEMPLO DE MOLDAGEM DE UMA PEÇA .....	19
2.4. AREIA DE FUNDIÇÃO .....	23
2.4.1. Passivo ambiental de areia de fundição .....	27
2.5. REUTILIZACAO DA AREIA DE FUNDIÇÃO .....	31
2.5.1. Considerações gerais .....	31
2.5.2. Alguns estudos sobre a reutilização da areia de fundição em construção de rodovias no exterior .....	35
2.5.3. Alguns estudos sobre a reutilização da areia de fundição em construção de rodovias no Brasil .....	38
CAPITULO 3 – SOLOS TROPICAIS .....	40
3.1 ANTECEDENTES .....	40
3.2. HISTÓRICO DE USOS DE SOLOS TROPICAIS EM PAVIMENTAÇÃO .....	45
3.3. BASES DE SOLOS ARENOSOS LATERÍTICOS FINOS (SAFL) .....	47
3.3.1. Especificações dos “SAFL” para bases de pavimentos .....	48
3.3.2. Peculiaridades sobre o comportamento de pavimentos com base de “SAFL” .....	51
3.3.3. Considerações sobre defeitos no pavimento devido às deficiências da técnica construtiva .....	52
3.4. BASES DE MISTURAS DE SOLO ARGILOSO LATERITICO E AREIA (ALA) .....	53
3.4.1. Especificações dos componentes e da mistura de argila laterítica com areia (ALA) para bases de pavimentos .....	54
3.4.2. Projeto de Dosagem .....	55
3.4.3. Técnica Construtiva .....	56
3.4.4. Peculiaridade sobre o comportamento de Pavimentos com base ALA .....	56
3.5. PAVIMENTOS DE BAIXO CUSTO .....	57
3.5.1. Considerações para a utilização de pavimentos com solos lateríticos .....	58
3.6. SOLOS ARTIFICIAIS .....	59



3.7. INFILTRABILIDADE DOS SOLOS .....	60
3.8. PERMEABILIDADE DOS SOLOS .....	62
3.9. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS .....	64
3.9.1. Definição e Importância do Módulo de Resiliência ( $M_R$ ) .....	64
3.9.2. Módulo de Resiliência ( $M_R$ ) de materiais convencionais .....	67
3.9.2.1. Comportamento Resiliente de Britas e Lateritas Pedregulhosas .....	67
3.9.2.2. Comportamento Resiliente de Solos .....	70
3.9.2.3. Comportamento de Solos Finos Lateríticos em serviço em pavimentos .....	72
3.9.3. Módulos de Resiliência de alguns resíduos utilizados em pavimentação .....	75
CAPITULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	77
4.1. INTRODUÇÃO .....	77
4.2. MATERIAIS EMPREGADOS .....	78
4.2.1. Solos .....	78
4.2.2. Areia de Fundação .....	81
4.3. MONTAGEM DOS SOLOS ARTIFICIAIS .....	82
4.4. MÉTODOS DE ENSAIOS UTILIZADOS .....	84
4.4.1. Introdução .....	84
4.4.2. Massa Específica dos Sólidos .....	85
4.4.3. Distribuição granulométrica por sedimentação .....	85
4.4.4. Limite de Liquidez .....	85
4.4.5. Limite de Plasticidade .....	86
4.4.6. Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão .....	86
4.4.7. Mini-CBR, Expansão e Contração .....	87
4.4.8. Ensaio de Infiltrabilidade .....	87
4.4.9. Ensaio de Permeabilidade .....	90
4.4.10. CBR .....	92
4.4.11. Ensaio Triaxial Cíclico .....	93
4.4.11.1. Equipamento .....	94
4.4.11.2. Moldagem dos Corpos-de-Prova .....	96
4.4.12. Ensaio Ambientais .....	98
4.4.12.1 Ensaio de Classificação de Resíduos Sólidos (Massa Bruta) .....	99
4.4.12.2 Ensaio de Lixiviação de Resíduos .....	100
4.4.12.3. Ensaio de Solubilização de Resíduos .....	100
CAPITULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	101
5.1. INTRODUÇÃO .....	101
5.2. MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS .....	103
5.3. DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DAS MISTURAS SOLO-AREIA .....	104
5.4. LIMITES DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE .....	104
5.5. CLASSIFICAÇÕES MCT, HRB E USCS .....	105
5.6. MINI-CBR, EXPANSÃO E CONTRAÇÃO .....	107
5.6.1. Solos com a matriz do solo Jardim Botânico (JB) .....	108
5.6.1.1. Umidade Ótima .....	108
5.6.1.2. Massa Específica Aparente Seca Máxima .....	108
5.6.1.3. Mini-CBR Imediato .....	109
5.6.1.4. Mini-CBR após 24 Horas de Imersão .....	110
5.6.1.5. Expansão .....	111
5.6.1.6. Contração .....	111
5.6.1.7. Relação entre índices de suporte (RIS) .....	112

5.6.2. Solos artificiais montados com o “teor ótimo de areia de fundição” .....	112
5.7. INFILTRABILIDADE E PERMEABILIDADE .....	115
5.7.1. Ensaio de Infiltrabilidade.....	116
5.7.1. Ensaio de Permeabilidade.....	118
5.8. CBR E EXPANSÃO .....	121
5.9. TRIAXIAIS CÍCLICOS .....	123
5.9.1. Avaliação do desempenho dos modelos na representação do Módulo de Resiliência. 125	
5.9.2. Cálculo do Módulo de Resiliência para uma estrutura de pavimento de baixo volume de tráfego.....	128
5.10. ENSAIOS AMBIENTAIS.....	140
5.10.1. Areia de Fundição.....	141
5.10.2. Solo Jardim Botânico .....	142
5.10.3. Mistura Solo Jardim Botânico (48%) e Areia de Fundição (52%).....	142
5.10.3. Ensaios de Solubilização executados no Laboratório de Saneamento da EESC-USP .....	143
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	147
6.1. CONCLUSÕES.....	147
6.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO ÀS CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS E ÍNDICES FÍSICOS .....	147
6.3. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS DE MINI-CBR, EXPANSÃO E CONTRAÇÃO .....	148
6.4. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS DE INFILTRABILIDADE E PERMEABILIDADE .....	149
6.5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS DE CBR E EXPANSÃO ..	149
6.6. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS ...	150
6.7. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS AMBIENTAIS.....	151
6.8. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS EM CAMADAS DE BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS .....	152
6.9. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
APÊNDICES .....	161
ANEXOS.....	183



## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Faca e Ponta de lança da idade de ferro.....	10
Figura 2.2 – Modelo e molde de areia.....	12
Figura 2.3 – Exemplo de Moldagem de uma peça, passos 1-6.....	20
Figura 2.4 – Exemplo de Moldagem de uma peça, passos 7-12.....	22
Figura 2.5 – Exemplo de Moldagem de uma peça, passos 13-18.....	23
Figura 2.6 – Prática corrente de gerenciamento de resíduos industriais, adaptada para um processo usual de fundição.....	32
Figura 2.7 – Diagrama do uso de resíduos na construção de estradas.....	32
Figura 3.1 – Faixa granulométrica recomendada para bases de SAFL.....	49
Figura 3.2 – Áreas no Gráfico da classificação MCT dos SAFL utilizados em bases de pavimentos.....	50
Figura 4.1 – Distribuições Granulometrias dos solos Jardim Botânico e Nova Aliança.....	79
Figura 4.2 – Vista da Região de Sertãozinho.....	79
Figura 4.3 – Mapa Pedológico da Região de Sertãozinho/SP.....	81
Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da areia de fundição utilizada na empresa Pama Mecânica e Fundição Ltda.....	82
Figura 4.5 - Organograma da montagem dos solos artificiais montados.....	85
Figura 4.6 – Esquema do ensaio de sorção capilar de água.....	89
Figura 4.7 – Equipamento utilizado no ensaio de sorção de água.....	89
Figura 4.8 – Esquematização do ensaio de permeabilidade.....	91
Figura 4.9 – Equipamento utilizado para o ensaio de Permeabilidade.....	92
Figura 4.10 – Equipamento Triaxial Dinâmico, Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes, EESC-USP.....	95
Figura 4.11– Detalhe da saída do programa de aquisição de dados em plataforma LabView.....	96
Figura 4.12 – Prensa Hidráulica utilizada na moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio Triaxial Dinâmico.....	97
Figura 4.13 – Detalhes do processo de moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio Triaxial Dinâmico.....	98
Figura 5.1 – Massa específica dos sólidos dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.....	103
Figura 5.2 – Curvas granulométricas dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.....	104
Figura 5.3 – Limites de consistência dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.....	105
Figura 5.4 – Localização dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico na classificação MCT.....	107
Figura 5.5 – Variação da umidade ótima em função do teor de areia de fundição.....	108
Figura 5.6 – Variação da massa específica seca máxima dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.....	109
Figura 5.7 – Variação do mini-CBR imediato e após 24h de imersão em função do teor de areia de fundição adicionado.....	110

Figura 5.8 – Variação da expansão e da contração em função do teor de areia de fundição adicionado.....	111
Figura 5.9 – Variação do valor de RIS em função do teor de areia de fundição.....	112
Figura 5.10 – Mini-CBR imediato e após imersão para a matriz Jardim Botânico misturada com Areia de Fundição e Areia Virgem.....	114
Figura 5.11 – Mini-CBR imediato e após imersão para a matriz Nova Aliança misturada com Areia de Fundição e Areia Virgem.....	114
Figura 5.12 – Fotografia dos grãos da Areia de Fundição e da Areia Virgem.....	115
Figura 5.13 – Curvas de infiltrabilidade em função da umidade de moldagem dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.....	117
Figura 5.14 – Coeficiente de sorção $K_c$ em função da quantidade de areia adicionada.....	118
Figura 5.15 – Curvas de Permeabilidade dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.....	119
Figura 5.16 – Coeficiente de permeabilidade $K_p$ em função do teor de areia adicionada.....	120
Figura 5.17 – CBR versus teor de areia de fundição adicionada ao solo Jardim Botânico.....	122
Figura 5.18 – Variação da expansão dos solos artificiais com matriz Jardim Botânico a partir do ensaio de CBR.....	122
Figura 5.19 – Tela do Programa utilizado para o cálculo dos modelos de Módulo de Resiliência.....	125
Figura 5.20 – Estrutura do pavimento utilizado para cálculo do Módulo de Resiliência para Carregamento Simples e Carregamento Duplo.....	129
Figura 5.21 – Faixa de valores do Módulo de Resiliência para a consideração $\sigma_3 = \sigma_{xx}$ no carregamento duplo, na matriz Jardim Botânico.....	133
Figura 5.22 – Faixa de valores do Módulo de Resiliência para a consideração $\sigma_3 = \sigma_{yy}$ no carregamento duplo, na matriz Jardim Botânico.....	133
Figura 5.23 – Faixa de valores do Módulo de Resiliência para a consideração $\sigma_3 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}$ no carregamento duplo, na matriz Jardim Botânico.....	134
Figura 5.24 – Faixa de valores do Módulo de Resiliência para a consideração de carregamento simples, na matriz Jardim Botânico.....	134
Figura 5.25 – Variação do valor do Módulo de Resiliência segundo a consideração para cálculo da tensão de confinamento adotada, para a matriz Jardim Botânico. ....	135
Figura 5.26 – Comparação dos MR das matrizes Jardim Botânico – Nova Aliança.....	136
Figura 5.27 – Comparação dos MR para areia de fundição e areia virgem.....	137
Figura 5.28 – Representação tridimensional do modelo composto para o solo Jardim Botânico.....	138
Figura 5.29 – Representação do modelo composto para o solo da mistura JB60AF.....	139

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

---

Tabela 2.1 - Densidades e pontos de fusão das principais areias utilizadas como material de moldagem.....	25
Tabela 2.2 – Produção de Fundidos no Brasil.....	28
Tabela 3.1 – Faixas de variação dos valores das propriedades mecânicas e hidráulicas de classificação MCT .....	43
Quadro 3.1 – Dados qualitativos das propriedades mecânicas e hidráulicas da classificação MCT, segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995).....	44
Tabela 3.2 – Intervalos Recomendados para Bases de SAFL.....	49
Tabela 3.3 – Intervalos Admissíveis das Propriedades da Mistura ALA.....	55
Tabela 3.4 – Procedimento Construtivo e Controle Tecnológico da Base de ALA.....	56
Tabela 3.5 – Classificação das vias e parâmetros de tráfego.....	58
Tabela 4.1 - Principais características dos solos utilizados.....	78
Tabela 4.2 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais para a matriz do solo Jardim Botânico.....	83
Tabela 4.3 – Seqüência de tensões de ensaio para base/sub-base segundo a AASHTO T 307-99.....	94
Tabela 5.1 – Massa específica dos sólidos para a matriz Jardim Botânico.....	103
Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade para a matriz de solo Jardim Botânico.....	104
Tabela 5.3 – Resultados das classificações MCT, HRB e USCS para os solos artificiais com matriz do Jardim Botânico.....	105
Tabela 5.4 – Resultados de mini-CBR com a adição de 60% Areia de Fundição (AF) e Areia Virgem (AV), para a matriz Jardim Botânico (JB).....	113
Tabela 5.5 – Modelos avaliados na representação do $M_R$ em função do estado de tensões...124	
Tabela 5.6 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) para os solos artificiais com a matriz Jardim Botânico.....	127
Tabela 5.7 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) para os solos artificiais com a matriz Nova Aliança.....	128
Tabela 5.8 – Módulos de Resiliência calculados a partir do Modelo Composto para a matriz de solo Jardim Botânico.....	131
Tabela 5.9 – Módulos de Resiliência calculados a partir do Modelo Composto para a matriz de solo Nova Aliança.....	132
Tabela 5.10 – Resultados do ensaio de Solubilização para o resíduo “Areia de Fundição”.....	141
Tabela 5.11 – Resultados do ensaio de Solubilização para o Solo Jardim Botânico.....	142
Tabela 5.12 – Resultados do ensaio de Solubilização para a mistura “48% de Solo Jardim Botânico com 52% de Areia de Fundição”.....	143
Tabela 5.13 – Resultados do ensaio de solubilização executado no Laboratório de Saneamento da EESC-USP.....	145



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

AASHO	- American Association of State Highway Officials
AASHTO	- American Association of State and Transportation Officials
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIFA	- Associação Brasileira de Fundição
ALA	- Argila Laterítica com Areia
c'	- Coeficiente de deformabilidade da classificação MCT
CBR	- California Bearing Ratio
CBUQ	- Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CFT	- Cota final de Terraplenagem
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de Carbono
d'	- Coeficiente que caracteriza o ramo seco da curva de compactação obtida pelo método MCT
DER-SP	- Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
e'	- Índice da classificação MCT, calculado em função de Pi e d'
E	- Elasticidade
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
$\varepsilon_a$	- Deformação axial
$\varepsilon_R$	- Deformação resiliente
HRB	- Highway Research Board
IBV	- Iowa Bearing Ratio
INDOT	- Indiana Department of Transportation
IP	- Índice de plasticidade
IPT/SP	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas - São Paulo
JB	- Solo Jardim Botânico
K <sub>p</sub>	- Coeficiente de Permeabilidade
K <sub>c</sub>	- Coeficiente de Sucção Capilar
Km	- Quilometro
L	- Solo de comportamento Laterítico
LL	- Limite de Liquidez
LR	- Latossolo Roxo
LVDT	- Linear Variable Differential Transducers
m/s	- metros por segundo
MCT	- Miniatura Compactado Tropical
MCV	- Moisture Condition Value
MEAS <sub>max</sub>	- Massa específica aparente seca máxima
Mini-CBR	- ensaio de suporte da tecnologia MCT
Mini-MCV	- ensaio MCV ou valor de MCV da metodologia MCT
mm	- milimetro
MPa	- Mega Pascal



MPL	- Motores
MR	- Módulo de Resiliência
N	- Número de aplicações do eixo padrão de 8,2 ton
NV	- Solo Nova Aliança
°C	- Graus Centígrados
pol	- Polegadas
%	- Porcentagem
R <sup>2</sup>	- Coeficiente de Determinação
RAF	- Resíduo Areia de Fundição
RIS	- Razão do mini-CBR com imersão em água para o mini-CBR sem imersão em água
$\rho_d$	- Massa específica aparente seca do corpo de prova
$\sigma_3$	- Tensão de confinamento no ensaio Triaxial Cíclico
SAFL	- Solo Arenoso Fino Laterítico
$\sigma_d$	- Tensão Desvio no ensaio Triaxial Cíclico
SI	- Sistema Internacional
t/mês	- tonelada por mês
$\nu$	- Coeficiente de Poisson
USCS	- Unified Soil Classification System
USP	- Universidade de São Paulo
VDM	- Volume Diário Médio de Tráfego
W <sub>o</sub>	- Umidade Ótima

*“A ciência consiste em descobrir  
a mente de Deus”.*  
(Stephen Hawking)



## CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

---

O crescimento do setor industrial tem significado, nos últimos anos, o aumento das quantidades e dos tipos de resíduos gerados e alguns desses resíduos constituem um perigo ao meio ambiente. O gerenciamento destes resíduos tem se convertido em um item importante para a sociedade, cada vez mais ciente da importância da preservação do meio ambiente.

Essa preocupação com a preservação do meio ambiente tem levado à busca do desenvolvimento sustentável, o que significa atender às necessidades da geração atual sem comprometer as futuras, no atendimento das próprias necessidades.

Atualmente, quase toda atividade econômica industrial gera resíduos em quantidades variáveis, cujas características estão ligadas às atividades exercidas. Estes resíduos, quando lançados no meio ambiente sem tratamento adequado, podem provocar impacto ambiental, isto é, uma ação ou atividade adversa (ou benéfica) que produz alterações em todo o meio ambiente ou em alguns dos seus componentes.

Com o objetivo de não causar maiores impactos ao meio ambiente, vem se tentando diminuir os aterros e depósitos de descarte de resíduos industriais que, por sua vez, constituem um alto custo para as indústrias que deles se utilizam para a disposição de seus resíduos como acontece, por exemplo, com o fosfogesso, os resíduos de celulose, os pneus, a escória de aciaria, a areia de fundição, as cinzas, etc. Como uma alternativa à disposição em aterros, há a possibilidade de utilização desses resíduos como materiais de construção, já que há uma

demanda crescente de obras que utilizam grandes volumes de materiais naturais, como a construção de rodovias, por exemplo.

Assim, percebe-se que é necessário que as empresas apliquem em sua política econômica uma visão onde os recursos utilizados nos seus processos sejam otimizados e os impactos ambientais destes processos minimizados.

“Uma das questões de fundamental importância para a sociedade é a necessidade de reciclar ou reaproveitar lixos, rejeitos e resíduos por ela gerados, como forma de recuperar matéria e energia, preservando recursos naturais, oferecendo uma menor degradação do meio ambiente e proporcionando melhorias nas condições de vida das comunidades” (PABLOS, 1996).

A indústria de fundição tem como principal resíduo a areia de fundição de descarte, que nos últimos anos no país experimentou um rápido crescimento, necessitando cada vez mais espaço para a sua disposição, o que se traduz em custos mais elevados para o setor. Por isto, as empresas desse setor têm procurado alternativas para um maior reaproveitamento da areia de fundição descartada, o que diminuiria o custo de disposição do resíduo e implicaria em menor impacto ambiental.

### **1.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA**

Em décadas anteriores, tanto a indústria da fundição quanto o setor siderúrgico, eram reconhecidos pelo fato de despejarem seus poluentes na atmosfera, através de seus fornos de fusão. Na atualidade o maior problema do setor da fundição são os resíduos sólidos, que basicamente são as areias utilizadas na conformação dos moldes e machos ou núcleos.

O método de fundição em areia é largamente usado na indústria siderúrgica para fabricação dos moldes nos quais os metais são vazados. Este método utiliza areia, água e aditivos orgânicos e/ou bentonitas como ligantes. As propriedades da areia de fundição são determinadas dependendo das quantidades e tipos de ligantes usados e dos aditivos; cada areia residual é única para o tipo de processo de fundição usado.

Geralmente, o uso de aditivos e ligantes faz com que a areia possa ser reutilizada no processo de fundição em número limitado de vezes, tornando-a um grave problema ambiental, pois ela fica contaminada por elementos e compostos químicos tais como: arsênio, bário, cádmio, chumbo, sódio, mercúrio, cloretos, fluoretos, fenóis e surfactantes, o que obriga as indústrias a eliminar o excesso de areia de fundição em depósitos de descarte, apesar da boa qualidade que ela apresenta para usos na engenharia civil.

No Brasil, a produção de fundidos excedeu os três milhões de toneladas no ano de 2007 (ABIFA 2008), sendo a região Sudeste geradora de grande parte desses fundidos, com a maior concentração no Estado de São Paulo. Segundo McIntyre et al. (1992), a cada tonelada de metal fundido, tem-se, aproximadamente, uma tonelada de resíduo de fundição, conseqüentemente, a quantidade deste resíduo gerada no país em 2007 deve ter atingido os três milhões de toneladas. Baseado nesses dados constata-se que o passivo ambiental das fundições do Brasil é preocupante e que o descarte desses resíduos significa grande parte dos custos das siderúrgicas, custo que poderia ser reduzido com o reaproveitamento da areia em grandes quantidades.

O reaproveitamento das areias de fundição, seja na reciclagem primária ou secundária, traz benefícios tanto para o meio ambiente como para as indústrias. Com isto contribui-se para

diminuir a poluição do meio ambiente e as quantidades de recursos naturais explorados, e juntamente minimizar-se-ia a problemática das indústrias com o destino final deste resíduo.

Ao destinar os resíduos de maneira adequada, isto é, para aterros industriais de descarte, não se acabaria com o problema, pois isto diminui a vida útil destes aterros e contribui para aumentar o custo final do produto de fundição, já que esta remoção é altamente dispendiosa, visto que há custo de transporte e o pagamento de altas taxas para utilizá-los.

Com a finalidade de acabar com a disposição da areia de fundição em aterros de descarte, universidades e empresas internacionais e nacionais têm desenvolvido pesquisas buscando um destino mais adequado para esse resíduo. Estas pesquisas estão relacionadas à reutilização da areia fora da atividade de fundição, isto é, aplicando reciclagem secundária, tais como: na fabricação de blocos de concreto, aterro em rodovias, como parte de agregado fino na massa asfáltica, na composição da pavimentação asfáltica armada e em concreto para aplicação não estrutural.

Na Universidade de Purdue, em parceria com o Departamento de Transportes de Indiana (INDOT) nos Estados Unidos, desenvolveu-se um estudo por Partridge et al. (1999) sobre a reutilização da areia de fundição para a construção de aterro de rodovias. O estudo consistiu no monitoramento de um aterro rodoviário construído no ano 1996 utilizando areia de fundição de origem ferrosa. Este monitoramento resultou em uma investigação, antes, durante e depois da construção (de 1994 a 1998), das propriedades mecânicas do aterro, assim como a verificação do comprometimento do meio ambiente. Os resultados geotécnicos foram satisfatórios e constatou-se que não houve impacto ambiental negativo.

Javed & Lovel (1995), também em Indiana, estudaram a possível aplicação da areia de fundição na Engenharia Civil. Estes pesquisadores verificaram o potencial de utilização deste resíduo em aterro e subleito de rodovias e como agregado fino no concreto asfáltico. Concluíram, dentre outras, que as areias de fundição estudadas têm boas propriedades físicas e mecânicas e têm baixa possibilidade de contaminar o meio ambiente.

Existem trabalhos desenvolvidos no Brasil com o propósito de se reutilizar a areia de fundição na construção de rodovias. Bonet (2002) propôs o reaproveitamento da areia de fundição residual como agregado fino no Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e Coutinho (2004) estudou a possibilidade de utilizá-la em misturas asfálticas densas; o primeiro trabalho recomendou a utilização de 8% do resíduo na mistura asfáltica, enquanto Coutinho (2004) concluiu que até 15% de incorporação da areia na mistura asfáltica produz materiais com boas propriedades mecânicas sem impactos ambientais significativos.

Apesar dos trabalhos citados anteriormente procurarem encontrar uma aplicação, válida, para as areias de fundição de descarte, suas propostas de reaproveitamento leva a um consumo pequeno do resíduo. Assim, procura-se uma alternativa para o reuso da areia de fundição, no qual as quantidades consumidas sejam tais que permitam a redução do resíduo e, nesse sentido, a utilização em camadas de base e sub-base na construção de rodovias fornece oportunidades para o reuso desses resíduos em grandes quantidades.

A areia de fundição estudada nesta pesquisa é resíduo de um processo de moldagem denominado *cold-box* (cura a frio). Neste processo utilizam-se 98,56% de areia de quartzo, 1,2% de resina fenólica alcalina e 0,24% de catalisador. Portanto, existe uma grande



possibilidade do resíduo conter fenóis, o que foi constatado por ensaios de classificação de resíduos sólidos realizados em amostra deste material.

Assim, esse trabalho avalia a possibilidade de reaproveitamento da areia de fundição como material de construção em sub-bases e bases de rodovias, através de sua incorporação aos solos argilosos lateríticos da região de Sertãozinho/SP, que tem grande produção de fundidos e, conseqüentemente, de resíduos, e também carece de jazidas de solos arenosos para a construção de rodovias e vias urbanas sujeitas a tráfego leve a médio.

## **1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos desta pesquisa estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O objetivo principal desse trabalho consiste em “Avaliar a possibilidade de reaproveitar a areia de fundição na construção de bases e sub-bases de pavimentos através de sua incorporação aos solos argilosos”.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo principal traçaram-se os seguintes objetivos específicos:

- testar a hipótese de que o emprego da areia de fundição das indústrias brasileiras na incorporação aos solos argilosos não contribui para a contaminação do meio ambiente e melhora a qualidade dos solos argilosos;

- classificar a areia de fundição, segundo as normas ambientais vigentes, e as misturas de solo-areia;
- avaliar o desempenho do solo argiloso contendo areia de fundição através da montagem, em laboratório, de misturas, segundo as propriedades da engenharia, no que diz respeito à capacidade de suporte, módulo de resiliência e permeabilidade, de maneira a atender as variáveis estruturais e ambientais.
- avaliar o potencial de poluição da areia de fundição quando incorporada aos solos argilosos;

### **1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA**

O trabalho desenvolvido nessa dissertação encontra-se dividido em seis capítulos, sendo que o Capítulo 1 refere-se a esta introdução.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura a respeito da areia de fundição, onde pode-se encontrar um breve histórico do metal, os métodos de produção de peças metálicas, dando-se ênfase à fundição, visto que está relacionado com o propósito deste trabalho. Dentro do assunto fundição apresenta-se um pequeno exemplo da moldagem de uma peça metálica. Neste capítulo citam-se trabalhos internacionais e nacionais desenvolvidos a respeito da reutilização da areia de fundição.

O Capítulo 3 faz parte da revisão bibliográfica e trata da utilização de solos na construção rodoviária. Encontram-se nesse capítulo um histórico da utilização de solos tropicais na construção de rodovias no Brasil, assim como certas características e estudos feitos nesse material, como: classificação, capacidade de suporte, permeabilidade e módulo de resiliência.

O método empregado para a realização desse trabalho, bem como os materiais utilizados encontram-se especificados no Capítulo 4.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos durante a fase experimental, as análises realizadas e as discussões acerca da variação do comportamento dos solos artificiais montados em laboratório.

As conclusões resultantes das análises dos resultados obtidos em laboratório encontram-se apresentados no Capítulo 6, junto com sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

---

## CAPITULO 2 – AREIA DE FUNDIÇÃO

---

Nesse capítulo são abordados temas relacionados à areia de fundição, que foram estudados para o desenvolvimento dessa pesquisa. Inicia-se pela descrição, em linhas gerais, do processo de fundição e da areia de fundição, onde se desenvolvem os aspectos de passivos ambientais do resíduo e o possível reaproveitamento do resíduo como material de construção de rodovias.

### 2.1. ANTECEDENTES

Não se conhece com precisão a data em que se descobriu a técnica de fundir o mineral do ferro para produzir um metal susceptível de ser utilizado. Os primeiros utensílios de ferro descobertos por arqueólogos no Egito datam do ano 3000 a.C. e sabe-se que antes dessa época usavam-se enfeites de ferro. Os gregos já conheciam a técnica de produzir armas de ferro através de tratamento térmico, aproximadamente no ano 1000 a.C.

O ferro chegou à Europa aproximadamente no ano 1000 a. C e possibilitou a fabricação de armas mais resistentes e duradouras comparadas às armas de bronze (Figura 2.1). Acredita-se que o processo de fundição do ferro tenha sido inventado pelos hititas, que habitaram a atual Turquia. Não obstante, o ferro sofre uma corrosão maior e mais rápida do que o bronze, pois a maior parte dos objetos encontrados dessa época está em condições ruins.



Figura 2.1 – Faca e Ponta de lança da idade de ferro (Encarta, 2006)

Os primeiros artefatos produzidos de metais ou ligas de ferro (na verdade, todas as ligas produzidas de ferro fabricadas até o século XIV d.C) seriam classificadas na atualidade como ferro forjado. Para produzir estas ligas aquecia-se uma massa de minério de ferro e carvão vegetal num forno. Este tratamento reduzia o mineral a uma massa esponjosa de ferro metálico cheia de uma escória formada por impurezas metálicas e cinzas do carvão vegetal. Essa esponja de ferro era retirada enquanto estava incandescente e era socada com martelos pesados com o propósito de expulsar a escória e soldar e consolidar o ferro. O metal produzido nessas condições costumava conter 3% de partículas de escória e 0,1% de outras impurezas. Em certas ocasiões esta técnica de fabricação produzia acidentalmente aço autêntico em vez de ferro forjado. Os fabricantes do ferro aprenderam a fabricar aço aquecendo ferro forjado e carvão vegetal durante vários dias em recipientes de argila e, com isto, o ferro absorvia carbono suficiente para se converter em aço autêntico, (ENCARTA, 2006).

Depois do século XIV, o tamanho dos fornos utilizados para a fundição foi aumentado e foi incrementada a ventilação para forçar a passagem dos gases de combustão pela carga ou mistura de matérias primas. Nestes fornos maiores o mineral de ferro da parte superior do forno era reduzido a ferro metálico e na continuação absorvia mais carbono com a passagem

dos gases. O resultado era o chamado ferro de molde, uma liga que funde a uma temperatura menor que o ferro forjado. Esse ferro de molde era logo refinado para fabricar o aço.

A produção moderna de aço usa altos fornos que são modelos aperfeiçoados dos usados antigamente. O processo de refinamento do ferro de molde por meio de jorros de ar deve-se ao inventor britânico Henry Bessemer, que no ano 1855 desenvolveu um forno que leva o nome dele. A partir da década de 1960 começaram a funcionar muitos fornos de pequenas dimensões que utilizam eletricidade para produzir aço a partir de material de sucata. Não obstante, as grandes instalações de altos fornos continuam sendo essenciais para produzir aço a partir do mineral de ferro.

## **2.2. PROCESSO DE FUNDIÇÃO**

A fundição é o processo de produção de peças metálicas que são obtidas vertendo-se um metal ou uma liga metálica fundida sobre um molde oco, geralmente feito de areia. A fundição é uma arte antiga empregada até hoje.

A fundição é composta por três processos diferentes: em primeiro lugar é construído um modelo de madeira, plástico ou metal com a forma do objeto já determinado; depois é construído um molde oco rodeando o modelo com areia que, posteriormente, é retirado (Figura 2.2); finalmente o metal fundido é vertido no molde; esta última parte é conhecida como colado.

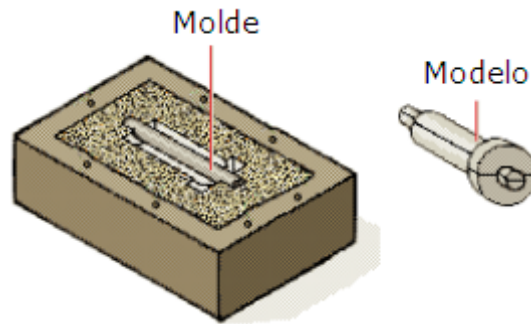


Figura 2.2 – Modelo e molde de areia. (Encarta, 2006)

Nos casos em que o número de peças fundidas é limitado, o modelo costuma ser de madeira impermeabilizada com verniz, mas quando o número é elevado usam-se modelos de plástico, ferro colado, aço, alumínio ou outro metal. O modelo apresenta dimensões um pouco maiores que a peça original, para compensar a contração da peça fundida ao se esfriar.

Embora os modelos possam ser fabricados em uma peça só, quando se tem formas complicadas é mais fácil ter o modelo representado em duas ou mais partes. As partes distintas do modelo apresentam certo tipo de saliências e reentrâncias coincidentes que ajudam a montá-lo de modo que fique alinhado.

A moldagem em areia ainda é responsável pela maior parte (em peso) da produção de peças fundidas, tanto de metais ferrosos como não ferrosos, pela abundância desse material na natureza. Desta forma, verifica-se a importância da areia para a indústria de fundição.

A importância da metodologia utilizada na moldagem no processo de fundição deve-se aos numerosos processos e materiais existentes que são empregados e que influenciam na qualidade dos resíduos resultantes da atividade de fundição. Desta forma, segundo Siegel *et al.* (1982), os processos básicos de fundição são caracterizados pela técnica de moldagem e podem ser classificados da seguinte maneira:

- em areia verde;
- em areia seca;
- em areia-cimento;
- em areia de macho;
- pelo processo CO<sub>2</sub>;
- em casca (*Shell Molding*);
- pelo processo de cera perdida ou por investimento (*Investment Casting*);
- em moldes permanentes;
- em moldes semi-permanentes;

Na continuação são abordados os processos anteriormente citados segundo os conceitos de Kondic (1973), Bradaschia *et al.* (1982) e Siegel *et al.* (1982).

### **2.2.1. Moldagem em Areia Verde**

O processo é efetuado basicamente com uma mistura de areia silicosa, argila (8 a 15%) e água (5 a 10%). Com base no desenho da peça a ser fundida, fabrica-se um modelo em torno do qual se compacta a mistura plástica de areia, utilizando-se caixas de moldagem para suportar as faces laterais do molde. Após esta fase, retira-se o modelo e colocam-se os machos, se necessários, fecham-se as paredes do molde, deixando-o apto para receber o metal vazado imediatamente. O processo é denominado de areia verde pelo fato de não necessitar secagem e, dentre todos os processos de moldagem, é o mais utilizado.

A areia de moldagem pode ser natural, quando encontrada na natureza com as propriedades requeridas, ou sintética, quando misturada tomando-se por base areias lavadas e argilas



selecionadas, ou ainda, semi-sintética, obtida com areia natural, em que se adicionam elementos para retificar as suas propriedades de origem.

Seja qual for o tipo de areia utilizada, esse processo está sujeito a uma série de limitações quanto às suas propriedades, que tendem a limitar sua aplicação à produção de peças pequenas ou medianas. Por sua vez, essas propriedades favorecem a fabricação de peças complicadas, pois facilitam a desmoldagem e limpeza, além de reduzirem o risco de ruptura a quente durante a solidificação.

### **2.2.2. Moldagem em Areia Seca**

Basicamente o processo é igual ao de areia verde, diferindo somente na parte final, pois os moldes são submetidos à secagem em estufa numa faixa de temperatura de 150 a 300°C. Quando os moldes não podem ser levados à estufa, são secados por meio de secadores apropriados.

As areias sintéticas e semi-sintéticas são as mais recomendadas, pois nesse processo são adicionados aglomerantes orgânicos, com o propósito de se alcançar resistências que garantam a qualidade dos moldes. Geralmente as superfícies dos moldes são pintadas para protegê-las, o que também contribui para o bom acabamento do produto.

Esse processo é o mais usual para a fundição de peças pesadas e com grandes seções de parede, sejam ferrosas ou não ferrosas. Devido a sua complexidade, esse processo também é o mais caro.

### **2.2.3. Moldagem em Areia-Cimento**

Os moldes são executados com uma mistura de areia silicosa, cimento Portland (cerca de 10%) e água (5%). É um processo semelhante ao de areia seca com a diferença de usar cimento em vez de aglomerantes orgânicos, eliminando-se a necessidade de secagem do molde. É um processo menos usual do que os demais pela impossibilidade de reaproveitamento da mistura, o que gera maiores quantidades de resíduo.

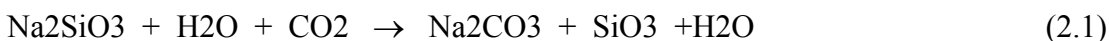
### **2.2.4. Moldagem em Areia de Macho**

A moldagem consiste em uma mistura de areia, óleo secativo (óleo de linhaça, óleo de macho), bentonita e adição de elementos orgânicos e produtos sintéticos (resinas furânicas e fenólicas), que dependem do metal/liga a ser fundido e o porte da peça. A sua boa fluxibilidade permite a conformação de modelos complicados. Os moldes devem ser secos numa temperatura na faixa de 150 a 250°C.

Esse processo é o precursor dos métodos de fundição de alta precisão, bastante utilizado para moldar peças de geometria complicada, difíceis de serem moldadas em areia comum. Em virtude da rigidez adquirida pelo molde, após secagem, o método permite a produção de peças com boa precisão dimensional e acabamento muito bom, pois os moldes são pintados, dependendo do acabamento superficial desejado.

### 2.2.5. Moldagem pelo Processo de CO<sub>2</sub>

Nesse processo é utilizada uma mistura de areia lavada e de ligante inorgânico, a base de silicato de sódio, no teor de 3 a 5%. O processo foi desenvolvido na Europa e tem boa aceitação na confecção de moldes e machos em várias aplicações. Após compactar o molde, ele é submetido à passagem do gás CO<sub>2</sub> por um curto período de tempo (0,5 a 1 min). A reação do silicato de sódio com o gás CO<sub>2</sub> produz sílica-gel, carbonato de sódio e água (Expressão 2.1), provocando o seu endurecimento em um curto espaço de tempo. Após este período, o molde ou o macho fica suficientemente resistente, podendo ser realizada a montagem do molde e em seguida o vazamento do metal.



A alta resistência alcançada nesse processo pelo molde habilita-o a substituir o processo em areia seca ou areia-cimento.

### 2.2.6. Processo em Casca (Shell molding)

É um processo desenvolvido na Alemanha durante a segunda guerra (1943) e denominado de processo Croning ou “C” (devido ao seu inventor Johannes Croning). Nos Estados Unidos é conhecido como *Shell Molding*. Nesse processo, uma mistura de areia aglomerada com ligante orgânico sintético (resina polimerizável a quente), em forma pulverulenta, é distribuída sobre o modelo macho, pré-aquecido, numa temperatura variando de 150 a 350° C. A resina, ao entrar em contato com o modelo ou com a caixa de macho, forma uma casca delgada, devido ao início de polimerização da resina. A espessura da casca formada está

sujeita a parâmetros como: tempo de contato, temperatura de pré-aquecimento e natureza da mistura. Entretanto, a espessura da casca deve ser tal que resista aos esforços causados pelo vazamento do metal entre outros, que dependem do tamanho e peso do produto final, podendo variar de 5 a 10 mm. Após esta fase a casca parcialmente curada, extraída ou ainda sobre o próprio modelo é colocada em estufa, numa faixa de temperatura de 280 a 350° C para completar a cura.

O molde, geralmente constituído de duas partes, tampa e fundo, é montado com os machos e devidamente fechado, e então está pronto para receber o metal vazado. Esse processo é vantajoso na fabricação de peças de pequeno e médio porte, visto que o modelo utilizado neste processo tem custo muito alto, pois deve ser fabricado com acabamento e dimensões desejadas para a peça a ser fundida. Além do custo do modelo, deve ser considerado também o custo elevado da resina polimerizável a quente, utilizada no teor de 3 a 10%.

#### **2.2.7. Moldagem pelo processo de cera perdida ou por investimento (Investment Casting)**

É um processo mais novo que a tecnologia que utiliza areia. A técnica consiste no envolvimento completo de um modelo com o material de moldagem (investimento) e removê-lo sem danificar o molde. Assim, a única forma de remover totalmente o modelo sem danificar o molde, conforme o método original, é destruindo-o. Desta forma, o modelo pode ser usado apenas uma vez, o que torna o processo inviável para produção em larga escala.

Após o investimento do modelo, este é colocado no forno numa temperatura em que o material do modelo seja fundido, ficando apenas o molde. Para garantir a queima final do

material do modelo e eliminar totalmente a umidade, o molde é submetido à temperatura mais elevada, na faixa de 650 a 1000° C. Finalizada esta fase, o molde está pronto para receber o metal vazado.

Esse processo tem sido muito utilizado para produzir peças artísticas e atualmente é usado para fabricação de peças que requerem alta precisão, com geometrias especiais ou em ligas especiais.

A cera é o material mais antigo utilizado para confeccionar o modelo, por isso o processo é denominado de cera “perdida”, mas pode ser feito também em materiais como: mercúrio congelado, poliestireno e plástico. Para confeccionar o molde, usam-se materiais refratários como: gesso, pó de sílica, pó de zircônia, etc.

#### **2.2.8. Processo em moldes permanentes ou fundição em coquilha**

Esse método, como indica o nome, consiste em utilizar o molde inúmeras vezes na confecção de peças iguais. Provavelmente é uma técnica mais antiga que a de moldagem em areia, já que existem registros do processo há mais de 5000 anos. Na antiguidade os moldes utilizados eram abertos e esculpidos em rochas ou argilas endurecidas ao sol, que serviam para a confecção de punhais, machados, pontas de lanças e talhadeiras. Os metais fundidos eram não ferrosos, como ouro, prata e cobre.

Atualmente o material usado na confecção dos moldes é quase que exclusivamente metálico (aço, ferro fundido e bronze). O aprimoramento do coquilha (molde permanente) depende do acabamento e da tolerância dimensional que se deseja do produto final. A vida útil dos moldes

depende de fatores como: material usado para confeccioná-lo, material vazado e temperatura de vazamento.

### **2.2.9. Processo em moldes semipermanentes**

Esta técnica consiste na utilização dos moldes mais de uma vez. O molde é fabricado com materiais refratários menos resistentes do que os utilizados para o processo permanente, tais como: gesso, vidro, borracha, cerâmica refratária cozida e grafita. Moldes de borracha são usados para fabricar pequenas peças metálicas de ponto de fusão muito baixo, como o chumbo e ligas de estanho.

## **2.3. EXEMPLO DE MOLDAGEM DE UMA PEÇA**

A melhor forma de entender o processo de fabricação do molde e o processo da fundição é através de uma peça simples. A maioria dos moldes é preparada usando-se duas caixas de madeira com saliências e reentrâncias que permitem que ambas se situem na mesma posição relativa ao serem unidas. A seguir são descritos dezoito passos para fundir uma peça simples, através de um processo de areia de macho, que estão acompanhados de ilustrações para um melhor entendimento, (Ver Figuras 2.3, 2.4 e 2.5).

**Passo 1.** Os modelos das partes a serem fundidas são colocados na base da caixa e espalha-se nelas um pouco de areia seca ou pó, principalmente quando se tem modelos complicados, para facilitar a desmontagem.

**Passo 2.** A carcaça da caixa é colocada ao redor dos moldes, e na continuação começa-se a colocar areia (já misturada com o ligante) com o cuidado de encher direito ao redor das peças, a compactação da areia deve ser firme, especialmente quando os moldes apresentam detalhes complicados.



Figura 2.3 – Exemplo de Moldagem de uma peça, passos 1-6.  
([www.backyardmetalcasting.com](http://www.backyardmetalcasting.com); 26/10/2007)

### **Passo 3**

Uma vez que a caixa está cheia, a areia é nivelada com a ajuda de uma régua e coloca-se a outra base da caixa. Depois, seguram-se as duas tampas da caixa e esta é virada de maneira que a parte inferior, onde se encontram os moldes, fique na parte superior.

### **Passo 4**

Retira-se a base da caixa na qual ficam apoiados os moldes.

### **Passo 5**

É usado um artefato cortante (faca ou estilete) para retirar um pouco de areia ao redor dos moldes até que estes possam ser retirados facilmente sem estragar a forma da peça deixada na areia, os moldes ainda não são retirados neste passo.

**Passo 6**

Um orifício é realizado na areia, através deste o metal líquido vai ser vertido nos moldes formados de areia. É utilizado para esta operação um cano qualquer para formar o furo, este deve ter uma profundidade maior que os moldes para permitir o vertido correto do metal. Depois disso espalha-se na superfície areia seca ou pó, para permitir evitar que as duas partes do molde fiquem grudadas e para que posteriormente possam ser retirados os modelos.

**Passo 7**

Coloca-se o cano novamente no lugar em que o furo foi feito. Depois se encaixa encima a outra parte da carcaça do sistema.

**Passo 8**

Adiciona-se mais areia e compacta-se até preencher completamente o resto da caixa.

**Passo 9**

A areia é nivelada na parte superior e se forma um funil ao redor do orifício para facilitar o vertido do metal. Deve-se ter o cuidado de deixar areia suficiente entre o furo e a parede da caixa de madeira.

**Passo 10**

É removido com cuidado o cano que forma o orifício e a caixa é tampada com a base de madeira.

**Passo 11**

Separam-se as duas partes da caixa cuidadosamente e a parte superior é deixada a um lado.

**Passo 12**

Com a ajuda de uma faca ou similar, são retirados os moldes da caixa.

**Passo 13**

Para permitir que o metal líquido consiga fluir até os núcleos do molde que já têm a forma do modelo, é esculpido um sistema de caminhos estreitos, os quais ao mesmo tempo permitem a



saída de gases resultantes do vertido do metal. Esses caminhos estreitos conectam o orifício de vazamento até os moldes da areia. Os pequenos canais deixados para ventilação, situam-se na parte contrária aos caminhos estreitos até a parede de madeira como pode ser visto na Figura 2.5. Nessa etapa, certifica-se da não existência de imperfeições nos modelos de areia. Finalmente são montadas novamente as duas partes da caixa.

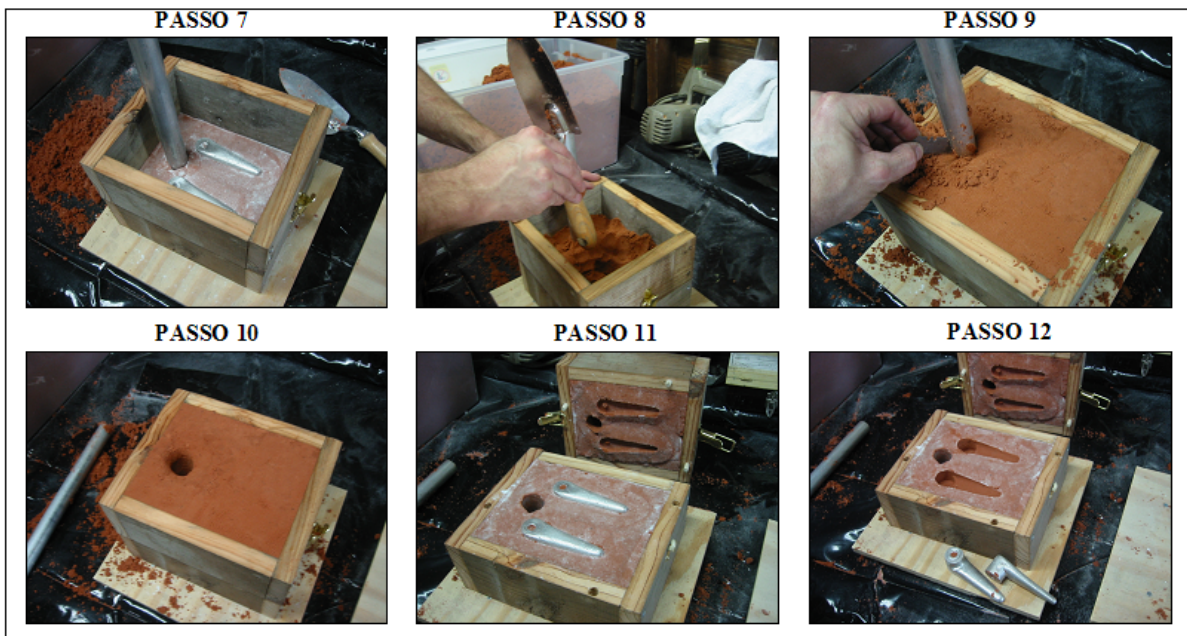


Figura 2.4 – Exemplo de Moldagem de uma peça, passos 7-12.  
([www.backyardmetalcasting.com](http://www.backyardmetalcasting.com); 26/10/2007)

#### **Passo 14**

O metal é fundido até alcançar a temperatura ideal para o vertido nos moldes de areia.

#### **Passo 15**

O metal (alumínio no caso, Figura 2.5) é vertido nos moldes de areia numa velocidade constante, que não deve ser muito lenta para que o metal não solidifique antes de tempo.

#### **Passo 16**

Depois de 5 minutos, o sistema pode ser desmontado para observação.

#### **Passo 17**

As partes finais são colocadas ao lado das originais para que sejam escovadas e aperfeiçoadas.

## Passo 18

A areia que teve contato com o metal é separada como resíduo do processo e o resto da areia pode ser utilizada em novos processos.



Figura 2.5 – Exemplo de Moldagem de uma peça, passos 13-18.  
([www.backyardmetalcasting.com](http://www.backyardmetalcasting.com); 26/10/2007)

## 2.4. AREIA DE FUNDIÇÃO

As areias têm sido usadas por longo tempo para dar a forma aos metais. Os motivos são vários: estão prontas para serem usadas, não são caras, são altamente refratárias e facilmente coesíveis ao serem misturadas com argilas ou outros aditivos orgânicos ou inorgânicos.

Segundo Mariotto (2000), estima-se que mais de 80% dos produtos fundidos sejam fabricados utilizando moldes confeccionados com areia aglomerada, sendo que o ligante mais usual é a argila (moldagem em areia verde) para dar forma às superfícies externas do produto fundido. Para confeccionar os machos são utilizadas as areias aglomeradas com resinas sintéticas, que

geralmente são de origem fenólica. No processo de fundição, a areia é denominada de agregado base ou simplesmente base.

As areias utilizadas nos diferentes processos já citados anteriormente, devem apresentar distribuição granulométrica dentro de uma determinada faixa, que depende principalmente do acabamento do produto, caracterizado pelo processo de moldagem usado. Moldes de superfícies lisas produzem peças de superfícies com a mesma característica. Este tipo de molde é requerido principalmente nos processos de moldagem de investimento e em casca. De um modo geral, a areia utilizada nos diversos processos de fundição apresentam tamanho entre 0,075 e 1,0 mm, sendo que de 85 a 95% do material passa na peneira N<sup>o</sup>. 30 (0,59mm) e é retido na N<sup>o</sup>. 100 (0,149mm).

As areias de fundição são essencialmente produtos de quartzo, originários da decomposição mecânica pela ação atmosférica, tendo as suas propriedades influenciadas pelo tipo de rocha que as originaram, pela forma de processamento da decomposição, pelo transporte e pelas transformações ocorridas após sedimentação (BERNDT, 1989).

O quartzo é bastante utilizado por razões econômicas, pois ocorre na natureza com granulometria variada e em abundância no mundo inteiro, mas na faixa de 560 a 580° C sofre uma transformação alotrópica irreversível, acompanhada de expansão volumétrica aproximada de 1,4%. Essa deformação pode produzir defeitos na peça fundida, por isso deve haver uma seleção cuidadosa do tamanho dos grãos, da distribuição granulométrica e do uso de aditivos orgânicos. A função dos aditivos é aumentar a plasticidade a quente da face do molde, deixando-a livre de trincamento.

Na Tabela 2.1 são mostradas algumas das areias mais utilizadas na fundição de metais, junto com suas densidades aparente e real e o respectivo ponto de fusão.

Tabela 2.1 - Densidades e pontos de fusão das principais areias utilizadas como material de moldagem (COUTINHO, 2004).

<b>Areia</b>	<b>Densidade Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ponto de Fusão (°C)</b>
quartzo	1,7	2,20 a 2,65	1650 a 1750
cromita	2,7 a 2,9	4,5 a 4,8	2180
olivina	2,1 a 2,3	3,25 a 3,4	1300 a 1800
zirconita	3,0 a 3,1	3,9 a 4,8	2200 a 2420

É conveniente que as areias utilizadas no processo de fundição não apresentem em suas composições, minerais que exibam baixo ponto de fusão, pois estes se fundem no momento do vazamento do metal, comprometendo as características desejadas do produto acabado. Estes minerais são considerados impurezas e, dentre eles, podem ser citados a ilmenita, a hematita, o feldspato e a calcinita.

Além do material base, as misturas de moldagem são compostas também, dependendo do método de moldagem, de aglomerantes que podem ser orgânicos ou inorgânicos, água e aditivos. Entre os aglomerantes orgânicos se tem: óleos secativos (óleos de linhaça, mamona, oiticica), farinhas de cereais (dextrina, mogul, breu) e produtos sintéticos (resinas furânicas e fenólicas). Os ligantes inorgânicos principais são: argila, cimento portland e silicato de sódio.

Dos ligantes inorgânicos utilizados, o mais usual é a argila, que tem um alto poder aglomerante, graças à sua coesão ao ser umedecida, conferindo à mistura consistência e plasticidade. Dentre as argilas mais utilizadas tem-se:

- Caulinita: inclui as argilas refratárias de baixa plasticidade, portanto pouco usada como aglomerante nas misturas de areia de moldagem, mas muito utilizada como material refratário nas indústrias de fundição.
- Illitas (micácea): consistem de argilas refratárias com média plasticidade. Exibem grau de plasticidade entre o da caulinita e o da bentonita. São adicionadas à mistura para acrescentar resistência à ligação verde e resistência a seco.
- Bentonitas: seu principal componente é a montmorillonita. Tem grande capacidade de expansão e absorção de umidade, por isso é muito útil para as areias de fundição, já que é necessária só uma pequena quantidade desta argila com água para adquirir resistência necessária para o vazamento do metal.

Dos argilo-minerais, o mais utilizado nas indústrias de fundição é a bentonita, por apresentar características mais favoráveis para esta finalidade (STRAUSS, 1970).

Dentre os aglomerantes sintéticos os mais usuais são as resinas sintéticas, visto que elas produzem estruturas com uma cadeia entrelaçada bem forte que alcançam um estado rígido com alta resistência mecânica, e ao mesmo tempo a estrutura resultante apresenta a propriedade de ser quebradiça, característica desejável, pois permite a remoção dos moldes uma vez que a peça tenha esfriado (BERNDT, 1989). As resinas sintéticas são usadas principalmente para a fabricação dos machos, já que estes precisam de uma mistura resistente.

A resina fenólica foi descoberta em 1907 por Leo Hendrik Backeland. É obtida pela condensação de fenóis com aldeído fórmico (formaldeído) e é conhecida popularmente como baquelita. Outras resinas utilizadas são: a uréia-formaldeído e a poliuretânica. Dentre as resinas, a fenólica é a mais utilizada por ter um preço mais acessível.

---

A quantidade de aglutinante ou resina sintética na mistura de moldagem deve ser a mínima possível, seja por seu alto custo ou por questões técnicas, pois uma quantidade desnecessária pode comprometer a qualidade do produto final, ocasionando o aparecimento de bolhas produzidas pelos gases desprendidos durante o vazamento do metal. Normalmente, o teor de aglutinante é da ordem de 1 a 5% (em peso) na mistura de areia.

#### **2.4.1. Passivo ambiental de areia de fundição**

Segundo MARIOTTO (2000), se não fossem as areias de macho, muitas areias de descartes de fundição poderiam ser classificadas como resíduo “inerte” (resíduos classe II B - Inertes), segundo a NBR 10004/2004. A presença dessa areia nos resíduos, com presença de algumas substâncias nocivas ao meio ambiente, acima do permitido pela norma, faz com que a maioria dessas areias seja classificada como resíduos “não inertes” (resíduos classe II A – Não Inertes) e algumas, dependendo das substâncias e/ou teores, como resíduos “não perigosos” (resíduos classe II – Não Perigosos) e até como resíduos “perigosos” (resíduos classe I – Perigosos) segundo a NBR 10004/2004 (ver capítulo 4).

As indústrias brasileiras de fundição geram aproximadamente três milhões de toneladas ao ano de produtos fundidos, a maior parte dessa produção encontra-se na região Sudeste e o Estado de São Paulo apresenta a maior concentração. As estimativas feitas calculam que, para 1 tonelada de metal fundido se tem 1 tonelada de areia de fundição descartada. A Tabela 2.2 apresenta a produção de fundidos no Brasil de 2004 a 2007 segundo a ABIFA, nela se observa o constante crescimento do setor – de aproximadamente 4,5% anual - e, portanto, segundo a bibliografia, dos resíduos. Baseado nos dados, conclui-se que o passivo ambiental das fundições do país, principalmente do estado de São Paulo, é bastante alarmante. Deve ser

aclarado que parte deste resíduo é recuperado pela empresa que o gerou e reutilizado no processo, e o restante é descartado.

No Estado de São Paulo há vários passivos ambientais oriundos da disposição de resíduos sólidos das indústrias de fundição, em virtude da grande concentração destas empresas no estado.

Tabela 2.2 – Produção de Fundidos no Brasil. (ABIFA, 2008)

ANO 2004		ANO 2005		ANO 2006		ANO 2007	
MÊS	PRODUÇÃO	MÊS	PRODUÇÃO	MÊS	PRODUÇÃO	MÊS	PRODUÇÃO
ene	178,828	ene	225,938	ene	240,463	ene	230,423
fev	217,382	fev	236,174	fev	251,657	fev	244,126
mar	238,388	mar	257,018	mar	282,928	mar	281,211
abr	227,689	abr	242,023	abr	251,291	abr	262,021
mai	240,629	mai	252,702	mai	280,169	mai	283,882
jun	246,969	jun	257,164	jun	271,366	jun	271,261
jul	249,854	jul	248,937	jul	268,585	jul	275,169
ago	254,496	ago	267,225	ago	279,589	ago	298,343
set	249,313	set	254,356	set	250,968	set	273,014
out	250,561	out	248,293	out	252,175	out	289,537
nov	249,072	nov	251,682	nov	258,148	nov	286,410
dez	226,735	dez	227,113	dez	199,706	dez	231,731
<b>TOTAL</b>	<b>2,829,916</b>	<b>TOTAL</b>	<b>2,968,625</b>	<b>TOTAL</b>	<b>3,087,045</b>	<b>TOTAL</b>	<b>3,227,128</b>

Segundo Mariotto (2000), estima-se que o parque industrial brasileiro de fundição tenha cerca de 1000 empresas, sendo 80% de pequeno porte (menos de 100 empregados) e que 60% desse parque se concentre no Estado de São Paulo. No primeiro semestre de 2007 as empresas paulistas foram responsáveis por, aproximadamente, 40% da produção nacional (em peso) de fundidos (ABIFA, 2007).

A título de exemplo, em Ibaté/SP (a 12km de São Carlos) funcionou durante muitos anos (até 1990) uma empresa de fundição de montagem de motores, a MPL – Motores S.A, situada na Rodovia Washington Luiz, km 249 (SP-310). O interesse por essa empresa foi em virtude de querer conhecer mais sobre o assunto, visto que a empresa havia falido e, portanto foi possível verificar como funcionava. Desta forma, verificavam-se os tipos de fornos, cadinhos, sistemas

---

de transportes da matéria prima e/ou peças prontas, modelos e outros equipamentos utilizados com esta finalidade.

Esta fábrica acumulou durante o período de funcionamento, dentro do pátio da empresa, um passivo ambiental em torno de 240.000 toneladas, correspondente ao descarte de produção de peças metálicas ferrosas e não ferrosas.

A empresa MPL – Motores S.A possui três poços de monitoração do lençol freático, pois foi realizado um estudo (informação verbal - informações fornecidas por um ex-funcionário da MPL –Motores AS, Anderson Macieira Brame, em março de 2003) para verificar o seu comprometimento por metais pesados e/ou fenóis. Próximos da área, também, existem mananciais, como o Córrego Bela Vista e o Ribeirão São José das Correntes. Todas estas informações foram posteriormente ratificadas por meio do Parecer Técnico emitido por Schalch *et al.* (2000). Estes poços têm profundidade revestida, em média de 16m, (COUTINHO, 2004).

Para se conhecer melhor a qualidade do resíduo industrial do aterro a céu aberto no pátio da empresa, serão comentados os processos de moldagem empregados, visto que estes são os principais caracterizadores do tipo de resíduo gerado.

Os processos de moldagem empregados pela empresa consistiam de: moldagem em areia verde, processo CO<sub>2</sub> (Silicato de Sódio), moldagem em areia de macho (macho estufado) e processo de cura a frio. Os teores de areia utilizados nestes processos de moldagem foram de 79 a 87% para moldagem em areia verde, 96,8% para moldagem no processo CO<sub>2</sub> (Silicato de



Sódio), 93% para moldagem em areia de macho e 97,6 a 98,8% para moldagem no processo de cura a frio (Fluxograma da Fundição: 26/05/87 – MPL – Motores S.A.)

Na moldagem em areia verde, o aglutinante utilizado era bentonita (7 a 10%) com adição de carvão Cardife (3 a 6%) e água (3 a 5%); no processo CO<sub>2</sub>, era usado o silicato de sódio no teor de 2,4%; 0,8% de dextril-60 ou katsil-F e gás carbono 3kg/100kg; no processo de macho estufado, com os aglutinantes, dextrina (3%) e óleo de macho (3%) e 1% de água; e no processo de cura a frio, eram utilizadas resinas fenólicas no teor de 1 a 1,5%. (Fluxograma de Fundição: 26/05/87 – MPL – Motores S.A; SCHALCH *et al.* 2000).

Com o objetivo de estudar uma região que apresente produção de fundidos na atualidade e, portanto, de resíduos de areia de fundição, foi investigada a região de Sertãozinho/SP, da qual foram retiradas as areias (virgem e de fundição) utilizadas nessa pesquisa. O passivo ambiental anual dessa região está em torno de 26.400 toneladas. O descarte da empresa Pama Mecânica e Fundição Ltda, situada à Rua Albino Russi, 269 – Parque Industrial – Sertãozinho/SP, de onde foi coletada a areia de fundição, é, em média, 200 t/mês, correspondente a 30% da areia utilizada na fabricação dos moldes e machos, sendo 70% reutilizado na fabricação de novas peças (Informação Verbal).

O processo de moldagem usado nessa empresa é o de cura a frio (*cold-box*), que utiliza 98,56% de areia de quartzo; 1,2 de resina fenólica e 0,24% de catalisador (20% do teor da resina), sendo 100% manual. Vale salientar que a empresa funde metais ferrosos e não ferrosos.

## 2.5. REUTILIZACAO DA AREIA DE FUNDIÇÃO

### 2.5.1. Considerações gerais

As indústrias de fundições, que trabalham tanto com metais ferrosos como com metais não ferrosos, têm entre seus objetivos, reduzir e/ou dispor os resíduos sólidos da melhor maneira possível, dado que esses resíduos são bem conhecidos (pó, escórias, areias de descarte) e, de uma certa maneira, encarecem o processo de produção.

O reaproveitamento da areia de fundição se faz necessário para que possa ser evitada a sua disposição inadequada e também porque essa atividade é grande consumidora de insumos naturais. Desta forma se consegue minimizar o uso destes recursos, contribuindo para a diminuição da poluição do meio ambiente, bem como agregando valor a esse resíduo.

A reutilização do resíduo pode se realizada dentro do próprio processo, na chamada “Reciclagem Primária”, ou externamente, quando se tem uma “Reciclagem Secundária” e o resíduo serve como matéria prima em outra atividade que não a fundição. Na Figura 2.6 é apresentado um diagrama de blocos de gerenciamento de práticas correntes para resíduos, segundo Bishop<sup>1</sup> (2000 apud SCHALCH *et al.*; 2002) e adaptado para a indústria de fundição por Coutinho (2004). A Figura 2.7 mostra o ciclo de reutilização de um resíduo industrial na construção de uma estrada.

---

<sup>1</sup> BISHOP, p.l. (2000). Pollution Prevention: Fundamentals and practice. Singapore: McGraw-Hill companies Inc apud SCHALCH, V. et al. (2002). Prevenção da poluição, análise de ciclo de vida, redução reutilização e reciclagem de resíduos sólidos. Apostila. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos.

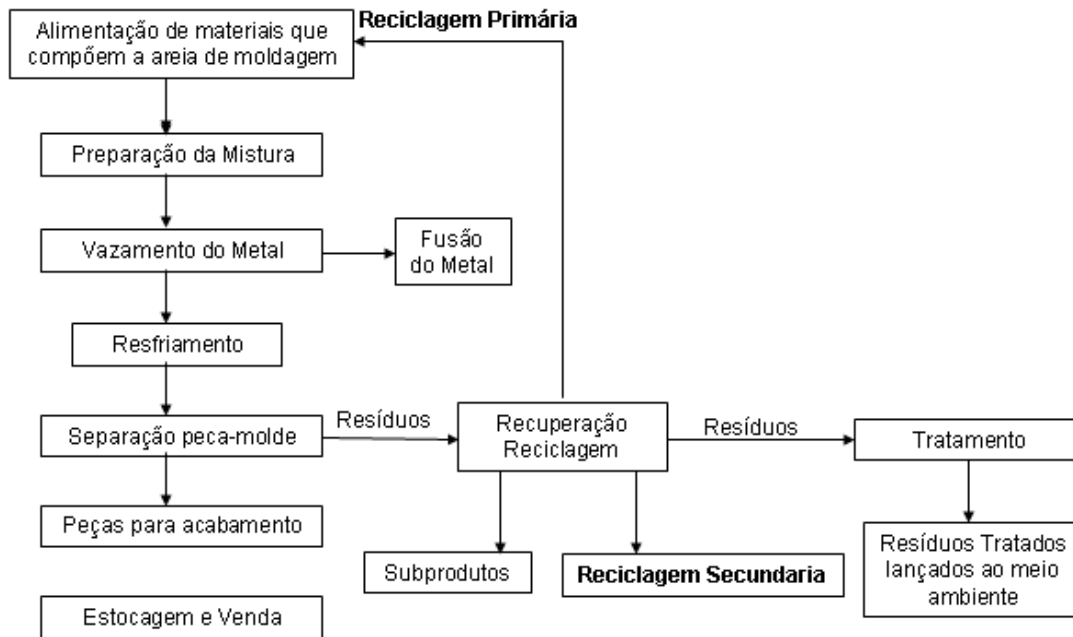


Figura 2.6 – Prática corrente de gerenciamento de resíduos industriais, adaptada para um processo usual de fundição (COUTINHO, 2004).

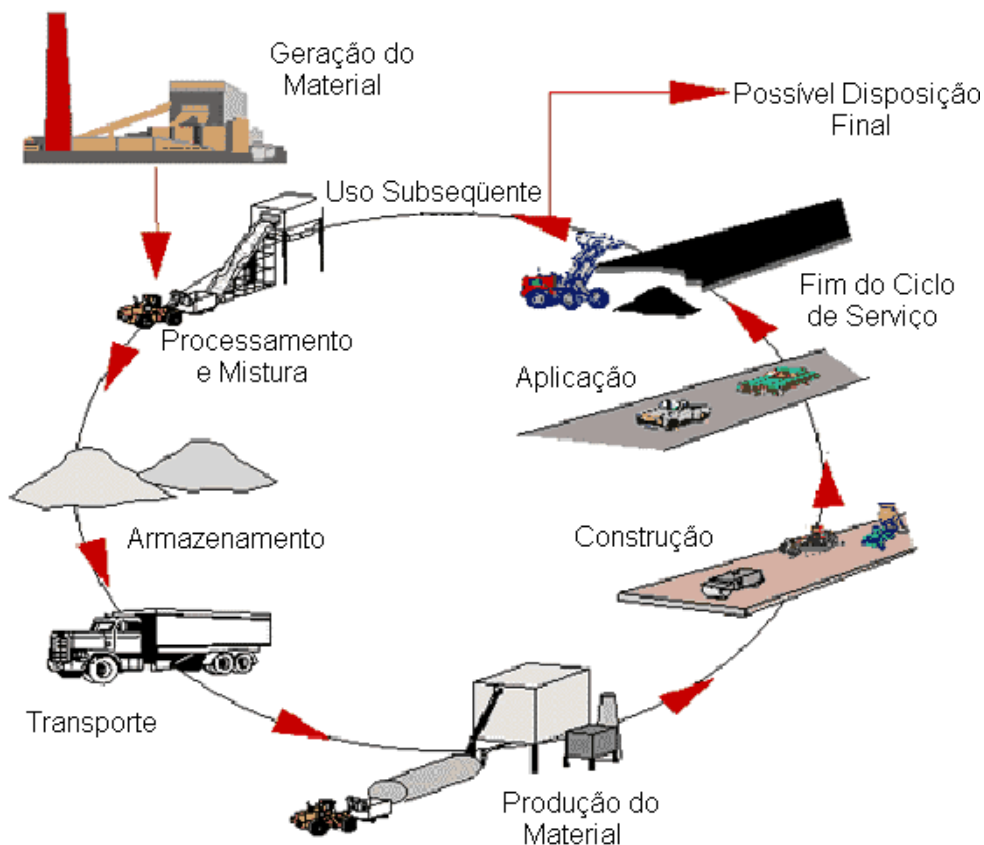


Figura 2.7 – Diagrama do uso de resíduos na construção de estradas; (<http://www.rmrc.unh.edu/Partners/mainMenu.htm>).

---

Na reciclagem primária, há necessidade de recuperar a areia, dependendo do processo de moldagem utilizado, livre de quaisquer substâncias que venham prejudicar a sua utilização na confecção de novos moldes. Esta regeneração nem sempre é eficiente e/ou econômica, pois dependendo do aglutinante utilizado, torna-se muito caro recuperá-la ou as características desejadas podem ser alteradas.

Para a regeneração de areia de fundição, utilizam-se duas técnicas:

- regeneração mecânica;
- regeneração térmica.

No processo de regeneração mecânica, que pode ser por via seca ou úmida, a matéria estranha na superfície dos grãos de areia é removida por impacto e/ou fricção dos grãos contra grãos e contra componentes do equipamento. A via úmida é utilizada principalmente para areias de grãos duros e estruturas frágeis, e para processos de areia verde.

No processo de regeneração térmica aquece-se a areia a uma temperatura suficiente para queimar completamente todo material estranho, removendo-o da superfície dos grãos da areia. É utilizado principalmente para remoção de matérias orgânicas que são resíduos típicos de processos que utilizam resinas sintéticas, óleos e melancos. Os fornos empregados trabalham em temperaturas na faixa de 500 a 700° C (SIEGEL *et al*; 1982; MARIOTTO, 2000).

Para que a areia de fundição possa ser reaproveitada externamente (Reciclagem Secundária), ela deve ser submetida a um pré-tratamento, com a remoção de restos metálicos e/ou torrões existentes. Antes de efetivar a reciclagem secundária em determinado lugar, é necessário fazer um estudo ambiental com a coleta de dados do lugar ainda no estado virgem, com o objetivo

de comparar com os resultados ambientais após o reaproveitamento do resíduo no lugar e aquilatar o efeito da reutilização no meio ambiente. Quando o uso de um resíduo é feito de maneira rotineira, ele deve ser reavaliado sistematicamente e/ou sempre que mudar de fundição ou siderúrgica, pois, dependendo do metal ou liga moldada e do processo de moldagem empregado, a composição do resíduo pode ser alterada, tendo maior ou menor teor de substâncias contaminantes e esta alteração pode influenciar na classificação do resíduo, de acordo com a NBR 10004/2004.

A areia de fundição residual pode ser utilizada, como reciclagem secundária, principalmente na área de construção civil. Deste ponto de vista, muitas instituições brasileiras e mundiais têm se preocupado pelo desenvolvimento de projetos que possibilitem a reutilização da areia de fundição residual. Alguns desses projetos visam sua reutilização em:

- concreto;
- fabricação de tijolos e tubos;
- terraplenagens para a construção de rodovias;
- aterros drenantes;
- misturas asfálticas, como agregado fino;
- pavimentação asfáltica armada.
- agricultura.

McIntyre *et al.* (1992) substituíram parcialmente o agregado fino do concreto, para confeccionar corpos de prova cilíndricos (com 15% do resíduo) e prismáticos (com adição de 15, 30 e 45% do resíduo), por areia de fundição oriunda do processo de moldagem a verde e compararam com os produzidos com o concreto de controle (100% de agregado fino natural).

As conclusões do trabalho foram as seguintes:

- a resistência à compressão do concreto cresce com o tempo de cura, mas não tão rapidamente como acontece com a mistura de controle;
- a resistência decresce com o aumento da quantidade de areia de fundição, para os corpos de prova prismáticos;

No Centro Superior de Educação Tecnológica UNICAMP em Limeira/SP, Bonin e Rossini (1994) efetuaram um estudo de reaproveitamento de areia de fundição na confecção de tijolos. Nessa pesquisa foram efetuados todos os ensaios ambientais exigidos e foi concluído que os tijolos desenvolvidos apresentaram valores menores de substâncias contaminantes do que os existentes no mercado, originando a denominação “ecossocial”. Foi constatada também a viabilidade de produzir em larga escala blocos, postes, guias, sarjetas, bloquetes e outros artefatos de concreto.

### **2.5.2. Alguns estudos sobre a reutilização da areia de fundição em construção de rodovias no exterior**

A construção de rodovias é consumidora intensa (grandes volumes de materiais) de insumos naturais em suas camadas. Verifica-se que os materiais utilizados para a construção de qualquer uma das camadas que compõem a estrutura do pavimento são constituídos de elementos extraídos da natureza e que não são bens renováveis. Desta forma, visando danificar menos a natureza e preservar mais o meio ambiente, tem-se pesquisado a possibilidade de reutilização de resíduos sólidos de várias procedências (indústrias, domésticos, urbanos) na construção civil: resíduos de celulose, fosfogesso, borrachas de pneus, escoria de aciaria, cinzas de termelétricas, resíduos da construção civil, areia de fundição, etc.

Javed e Lovell (1995), em Indiana nos Estados Unidos, desenvolveram e estudaram a aplicação do resíduo da areia de fundição em Engenharia Civil. Neste trabalho, os autores demonstraram o potencial de reaproveitamento deste resíduo em aterro e subleito de rodovias como agregado fino, assim como no concreto asfáltico. A partir dos estudos das propriedades do resíduo, concluíram, dentre outras, que as areias de fundição estudadas apresentam boas propriedades físicas e mecânicas. Também observaram que as areias provenientes de siderúrgicas que utilizam o processo de moldagem a verde de metais ferrosos apresentam baixa possibilidade de contaminar o meio ambiente.

Posteriormente foi efetuada outra pesquisa a respeito do reaproveitamento da areia de fundição residual por Partridge *et al.* (1999). O projeto consistia na construção de um aterro de rodovia em escala real no estado de Indiana, nos Estados Unidos; o material usado na construção foi areia de fundição oriunda de uma indústria de fundição de metais ferrosos. O aterro foi construído no ano 1996 pelo Departamento de Transportes de Indiana (INDOT) em parceria com a Universidade de Purdue. O objetivo do trabalho consistia na avaliação e no monitoramento do protótipo de aterro antes, durante e depois de construído (de 1994 a 1998) para verificar o comprometimento do meio ambiente. Dentre as conclusões obtidas neste trabalho, pode-se salientar que:

1. o desempenho geotécnico do aterro foi comparável ao desempenho de um aterro construído com areias naturais, com pequenas deformações internas e alto padrão de resistência à penetração;
2. o aterro apresentou condutividade hidráulica baixa, da ordem de  $1 \times 10^{-8}$  a  $7 \times 10^{-7}$  m/s;
3. não se constatou, durante o período de estudo, nenhum impacto ambiental no local;
4. a redução do custo de construção do aterro, quando comparada com outros materiais usados na região, foi da ordem de 70 a 80%.

---

Na Universidade de Wisconsin foi desenvolvida uma pesquisa para avaliar a possibilidade do emprego da areia de fundição em misturas asfálticas a quente. Usaram-se cinco amostras diferentes com a finalidade de verificar se as areias em estudo exibiam propriedades aceitáveis quando usadas na composição de misturas asfálticas. Do estudo concluíram que algumas areias pareciam melhorar a resistência à formação de trilha de roda, enquanto outras não; contudo, todas pareciam contribuir positivamente para a resistência das misturas aos danos de fadiga sob deformação controlada.

Um estudo recente, sobre o reaproveitamento da areia de fundição, foi efetuado por Aydilek e Guney (2007) na Universidade de Maryland, nos Estados Unidos. Neste estudo, efetuaram-se misturas deste resíduo com outros materiais como pedra britada, cimento e cal, totalizando dezoito misturas. O objetivo do trabalho foi obter uma mistura que pudesse ser utilizada em bases e sub-bases de pavimento e obter um número estrutural para o cálculo da espessura da camada. O trabalho concluiu que:

- as maiores capacidades de suporte, para todas as misturas, foram obtidas quando era aumentada a energia de compactação;
- os resultados dos ensaios mostraram que o teor de umidade influi consideravelmente na resistência à compressão das misturas;
- o incremento de pedra britada, cimento ou cal aumentou consideravelmente a resistência à compressão e os valores de CBR dos corpos de prova;
- os ensaios de lixiviação mostraram que as misturas dificilmente contaminarão a água que está em contato com o material (água de chuva, águas drenadas, etc.)
- espessuras de camada menores que as tradicionais podem ser usadas na base e sub-base quando construídas com resíduos de areia de fundição.



Em geral o trabalho de Guney (2007) demonstrou que a areia de fundição satisfaz geotecnicamente e ambientalmente as especificações para que possa ser usada como componente de bases e sub-bases.

### **2.5.3. Alguns estudos sobre a reutilização da areia de fundição em construção de rodovias no Brasil**

No ano de 2002 foi desenvolvida uma pesquisa na Universidade Federal de Santa Catarina por Bonet para incorporar o Resíduo de Areia de Fundição (RAF) nas massas asfálticas do tipo CBUQ. Naquele trabalho concluiu-se que a incorporação de 8% de RAF no concreto asfáltico é viável, dados os resultados satisfatórios obtidos. Da mesma maneira, os ensaios ambientais (lixiviação) desenvolvidos mostraram a não toxicidade do novo material.

Bina *et al.* (2003) estudaram o reaproveitamento da areia de fundição na pavimentação asfáltica armada. Esta tecnologia consiste na colocação de uma camada composta de tela de aço e lama asfáltica (1,0 a 1,5cm de espessura) entre duas camadas de CBUQ, sendo a camada inferior com espessura de 5 a 12 cm e a superior de 5 a 7cm. Dado que se trata de uma tecnologia relativamente nova, os autores consideram uma boa opção para a utilização deste resíduo. Por este motivo, a pesquisa consistiu na execução de um trecho experimental (restauração) na pista expressa da Av. Coronel Alfredo Fláquer (perimetral) no município de Santo André/SP. No trecho foram instalados poços de monitoramento das águas provenientes das chuvas e lavagens da camada em estudo com o objetivo de coletar extratos para serem submetidos aos ensaios ambientais. A partir dos resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova de massa asfáltica e nas águas dos poços de monitoramento, conclui-se que o emprego da areia de fundição na construção de pavimentos asfálticos armados é

ambientalmente viável e mais seguro do que o risco de descarte não controlado ou do risco de acidentes em aterros industriais legalizados.

Coutinho (2004) desenvolveu uma pesquisa para avaliar o reuso da areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas, nas quais se adicionou o resíduo em diferentes porcentagens em peso (5, 10 e 15%). As propriedades mecânicas obtidas, referentes à pavimentação, foram satisfatórias, e as análises químicas da massa asfáltica compactada, contendo 15% de areia de fundição, caracterizaram o material como resíduo classe III – inerte.

Não obstante, a utilização da areia de fundição como agregado em CBUQ não deve ser vista como uma solução definitiva para o problema de geração deste resíduo, pois, segundo Mariotto (2001), o ideal seria desenvolver tecnologias que permitissem regenerar 100% das areias utilizadas na fundição, ou então, teores bem maiores do que os usados no concreto asfáltico.

Coutinho (2004) faz a recomendação de se avaliar a adição deste resíduo na composição de material para base, sub-base e reforço na construção de rodovias, misturando-o aos materiais utilizados habitualmente na região de estudo, trabalho que é desenvolvido na presente pesquisa.

## CAPITULO 3 – SOLOS TROPICAIS

---

Esse capítulo tem o objetivo de reunir informações bibliográficas a respeito de solos tropicais e seu comportamento como material de construção em pavimentos. As informações obtidas são de grande importância para avaliar e analisar os resultados do comportamento dos solos artificiais (misturas solo-areia), em vista do interesse em utilizá-los como materiais de sub-bases e bases de pavimentos flexíveis.

Inicialmente é apresentada uma revisão acerca dos solos tropicais e seu comportamento, seguido de um breve histórico da sua utilização em pavimentação. Na continuação, são descritos materiais utilizados em pavimentação de baixo custo, tais como o Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL) e o Solo Argiloso Laterítico Areia (ALA). Finalmente é desenvolvida uma revisão resumida da permeabilidade e resiliência dos solos, onde se apresenta um breve histórico e são também citados alguns trabalhos que avaliam o comportamento mecânico de outros resíduos.

### 3.1 ANTECEDENTES

A técnica de pavimentação introduzida no Brasil teve seus métodos copiados dos países mais desenvolvidos, em particular os Estados Unidos, França e Alemanha, onde os agregados e os solos pertencem a formações geológicas distintas e sofreram processos de intemperismo diferentes dos sofridos pelos materiais brasileiros. Os solos do Brasil são, na sua maioria, originários de processos de formação específicos dos trópicos (CORRÊA, 1989).

Segundo Nogami & Villibor (1995), a conscientização das peculiaridades dos solos tropicais, como material de construção rodoviária no Brasil, ocorreu a partir de 1930, quando foi criada a Seção de Solos de Fundação no IPT/SP. Ao longo dos anos, a experiência demonstrou que o estudo tradicional de solos, baseado na consideração do Limite Líquido, Índice Plástico, granulometria por peneiramento e outros índices, não atribuía aos solos tropicais qualidades correspondentes ao seu real desempenho.

O excelente desempenho apresentado pela construção de trechos experimentais de pavimentos, principalmente no estado de São Paulo, com utilização de Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL) como base comprovou, no final da década de 60 e início da década de 70, as limitações dos critérios tradicionais para escolha de solos, quando aplicados aos solos tropicais (VILLIBOR, 1981). Uma vez que os critérios tradicionais consideravam os SAFL inadequados para a construção de pavimentos e estando comprovado o excelente desempenho por eles apresentado, tornou-se evidente a necessidade do desenvolvimento de novos critérios de escolha que pudessem ser aplicados aos solos tropicais. Tais critérios deveriam estar relacionados com as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados.

Na busca desses critérios, Nogami & Villibor (1981) propuseram no Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais “Uma nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias” denominada MCT. Foram propostas duas classes de solos, segundo sua origem pedogenética, e sete grupos, sendo os ensaios realizados em corpos-de-prova de dimensões reduzidas com 50 mm de diâmetro nominal.

A classificação geotécnica MCT agrupa os solos tropicais, de acordo com o seu comportamento no estado compactado, em duas classes principais: solos de comportamento

laterítico (L) e solos de comportamento não laterítico (N). Os solos de comportamento laterítico são subdivididos em três subgrupos: areias lateríticas (LA), solos arenosos lateríticos (LA') e solos argilosos lateríticos (LG'); os de comportamento não laterítico são subdivididos em quatro subclasses: areias não lateríticas (NA), solos arenosos não lateríticos (NA'), solos siltosos não lateríticos (NS') e solos argilosos não lateríticos (NG').

O desenvolvimento do método MCT contribuiu para a solução de uma série de problemas relacionados ao emprego de solos em obras de engenharia, sobretudo em rodovias, uma vez que se baseia nas considerações do clima e em materiais que predominam na região brasileira.

Para classificar um solo pela MCT, utiliza-se o ensaio mini-MCV, que foi adaptado a partir do ensaio de MCV (Moisture Condition Value) de Parsons por Sória & Fabbri (1980), e o ensaio de perda de massa por imersão, proposto por Nogami & Villibor (1981).

Outro ensaio desenvolvido por Nogami em 1972, e que posteriormente passou a fazer parte da Metodologia MCT é o ensaio de Mini-CBR, desenvolvido inicialmente na Universidade de Iowa e cujo valor foi designado IBV (Iowa Bearing Value). Posteriormente esse ensaio foi modificado por Nogami & Villibor e caracteriza-se por utilizar corpos de prova de dimensões reduzidas, com 50 mm de diâmetro, e pistão de penetração de 16 mm. Desse ensaio também podem ser obtidas outras características de interesse do solo, como o valor de expansão, de contração, massa específica seca máxima e teor de umidade ótima.

De acordo com Nogami & Villibor (1995), é possível obter várias propriedades dos solos a partir da classificação MCT. A Tabela 3.1 apresenta a faixa de variação dos valores das principais propriedades dos solos lateríticos e no Quadro 3.1 encontram-se os dados

qualitativos sobre as propriedades consideradas mais significativas dos grupos MCT. Os autores organizaram essa tabela para orientar a escolha dos solos para utilização em rodovias baseando-se nos resultados da classificação MCT.

Tabela 3.1 - Faixas de variação dos valores das propriedades mecânicas e hidráulicas de classificação MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

<b>Suporte mini-CBR com sobrecarga padrão (%)</b>	Muito elevado	> 30
	Elevado	12 a 30
	Médio	4 a 12
	Baixo	< 4
<b>Expansão (%)</b>	Elevada	> 3
	Média	0,5 a 3
	Baixa	< 0,5
<b>Coefficiente de sorção – S Log (cm/<math>\sqrt{\text{min}}</math>)</b>	Elevado	> (-1)
	Médio	(-1) a (-2)
	Baixo	< (-2)
<b>Perda de suporte mini-CBR por imersão (%)</b>	Elevada	> 70
	Média	40 a 70
	Baixa	< 40
<b>Contração (%)</b>	Elevada	> 3
	Média	0,5 a 3
	Baixa	< 0,5
<b>Coefficiente de Permeabilidade – k Log (cm/s)</b>	Elevado	> (-3)
	Médio	(-3) a (-6)
	Baixo	< (-6)

Quadro 3.1 – Dados qualitativos das propriedades mecânicas e hidráulicas da classificação MCT, segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995).

<b>GRANULOMETRIAS TÍPICAS</b> Designações do T1-71 do DER-SP		Argilas, siltes (q, s)	Areias siltosas	Siltes (k,m) Siltes arenosos	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltes argilosos	Areias siltosas	Areias argilosas	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltes argilosos
k=caolinítico m=micáceo s=sericítico q=quartzoso								
COMPORTAMENTO		N = Não Laterítico				L = Laterítico		
<b>GRUPO MCT</b>		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI-CBR (%) Sem imersão Perda por imersão	M, E B, M	E B	M, E E	E E	E B	E, EE B	E B
	EXPANSÃO	B	B	E	M, E	B	B	B
	CONTRAÇÃO	B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEF. DE PERMEAB. (k)	M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
	COEF. DE SORÇÃO (s)	E	B, M	E	M, E	B	B	B
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE = Muito elevado E = Elevado			M = médio B = Baixo		
Utilização	Base de pavimento	n	4°	n	n	2°	1°	3°
	Subleito compactado	4°	5°	n	n	2°	1°	3°
	Subleito compactado	4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
	Aterro compactado	4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
	Proteção à erosão	n	3°	n	n	n	2°	1°
	Revestimento primário	5°	3°	n	n	4°	1°	2°
n = não recomendado								
Grupos tradicionais obtidas de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas	USCS	SP SM	MS SC ML	SM CL ML MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
	AASHTO	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5 A-7-5	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

### 3.2. HISTÓRICO DE USOS DE SOLOS TROPICAIS EM PAVIMENTAÇÃO

Segundo Nogami & Villibor (1995), o melhor aproveitamento dos solos lateríticos de granulometria fina (argilosos ou arenosos), em camadas de pavimentos, no Estado de São Paulo, ocorreu a partir da década de 50, quando foram utilizados em reforço do subleito.

A primeira experiência com uma base de argila laterítica compactada da qual se tem notícia foi executada pelo DER-SP num dos acesos à cidade de Campinas no início da década de 50 e o desempenho da obra foi excepcional por mais de 20 anos.

Uma das primeiras utilizações experimentais de base com uso de Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL) registrada foi a construção, em maio de 1967, de dois trechos como variantes de trânsito, de aproximadamente 300 m de extensão cada, na via Washington Luís (SP-310) nas proximidades de Araraquara, interior de São Paulo (CORRÊA, VILLIBOR & GRANDE, 1972). As variantes foram revestidas com tratamento superficial simples e teriam que suportar o tráfego por três meses e meio até a construção do trecho definitivo. Após o término do prazo de utilização das variantes, foi constatado que ambas estavam em boas condições de uso; fato que incentivou a construção de novos trechos experimentais com uso desse tipo de base.

Posteriormente a esses primeiros trabalhos, dos quais se têm registros, foram efetuados outros que são mencionados a seguir:

- Ruas da Cidade de Taquaritinga (Bairro Cidade Talavasso), 1968;
- SP-310 – trecho Pereira Barreto à Ilha Solteira, entre as estacas 200 e 250, 1968;
- Rua 22 de Agosto em Araraquara/SP, 1971;



- Acostamentos dos Acessos de Dobrada e Santa Ernestina (Rodovia Matão – Colômbia – SP-326), 1971;
- Acesso a Dois Córregos / Guarapuã, 1972;
- Entroncamento da BR-153 com SP-270 (Trevo de Ourinhos), 1972.

As principais peculiaridades observadas nos trechos experimentais citados foram a ausência de ruptura, presença de pequenas deflexões e recalques, e trincas de reflexão apenas nos casos onde o revestimento era constituído por tratamento superficial invertido simples.

Em vista do comportamento satisfatório apresentado nesses primeiros serviços, começou-se a empregar o SAFL como parte integrante da estrutura de pavimentos de baixo custo, em substituição às bases convencionais consideradas de baixo custo na época.

Corrêa (1989) estudou a possível aplicação do Latossolo Roxo (LR) na construção de pavimentos como material de base ou sub-base. Do trabalho, o autor concluiu que o LR *in natura* não apresenta os requisitos mínimos necessários para ser utilizado como base ou sub-base de pavimentos, qualquer que seja a energia de compactação empregada. Não obstante, quando é adicionada cal hidratada em teores da ordem de 4%, o LR eleva de maneira substancial e permanente a sua capacidade de suporte, o que permite sua utilização como material de sub-base e base.

Esse mesmo autor (CORRÊA, 1989) também estudou o comportamento do Latossolo Roxo de Transição, que é um Latossolo Roxo com porcentagens variadas de areia. Segundo ele, para teores de areia inferiores a 50%, o LR de Transição apresenta características semelhantes às do Latossolo Roxo puro, quer dizer, é um material inviável para uso em pavimentos sem a

adição da cal. O LR de transição, com porcentagem de areia superior a 50%, apresenta comportamento semelhante aos SAFL, com CBR elevados e expansões baixas quando compactados com energia intermediária de compactação.

### **3.3. BASES DE SOLOS ARENOSOS LATERÍTICOS FINOS (SAFL)**

No território brasileiro existem vastas áreas cobertas por espesso manto de solos arenosos finos. Os solos da parte superficial desse manto apresentam características próprias devido à atuação de processos pedológicos específicos designados genericamente de laterização. Muitos desses solos são jazidas naturais de solo arenoso fino laterítico (SAFL), apropriados para emprego em bases de pavimentos, (VILLIBOR, 2007).

O uso de bases de SAFL, no estado de São Paulo, tornou-se rotineiro após 1975. Uma das primeiras utilizações de solos lateríticos de granulação fina (argilosos e arenosos) em camadas de pavimentos no estado de São Paulo ocorreu ainda na década de 50, quando foram utilizados em camadas de reforço.

Aquele procedimento, de aproveitar o SAFL como material estrutural, foi adotado diante do elevado valor de capacidade de suporte (CBR) apresentado por esses solos, apesar de apresentarem outras características desfavoráveis segundo procedimentos tradicionais.

Devido a esses solos serem utilizados em camadas de reforço e eventualmente como sub-base, não havia grande preocupação por parte do meio técnico quanto ao trincamento ou mesmo à qualidade do acabamento dessas camadas, pois se encontravam sob a base.

Para o sucesso do uso do SAFL em bases de pavimentos, outras características são decisivas, pois tais camadas praticamente não são confinadas, e recebem apenas um revestimento asfáltico esbelto, com espessura máxima de 3,0cm. Mesmo assim, devem absorver os esforços provenientes da construção do revestimento, apresentar boa aderência à camada de revestimento, suportar os esforços verticais e horizontais provenientes do tráfego e resistir à ação das intempéries.

Aproximadamente 50% da área do Estado de São Paulo apresenta solos finos lateríticos que poderiam ser utilizados em bases de pavimentos (VILLIBOR, 2007). Há grande ocorrência desses solos também nos Estados do Paraná, Goiás, Mato Grosso, Bahia e Minas Gerais.

Até o momento, foram feitos aproximadamente 12.300km de rodovias vicinais com bases de SAFL, dos quais 8.000km no Estado de São Paulo. Em vias urbanas foram construídos aproximadamente 12 milhões de m<sup>2</sup> de bases de SAFL em todo o território nacional, (VILLIBOR *et al*, 2007).

### **3.3.1. Especificações dos “SAFL” para bases de pavimentos**

Segundo Villibor *et al*, (2007) para que os SAFL possam ser utilizados como bases de pavimentos, estes solos devem atender às especificações impostas, fundamentadas em suas propriedades mecânicas e hidráulicas, citadas a seguir:

- composição granulométrica tal que 100% seja constituído por grãos que passem integralmente na peneira de abertura de 2,00 mm ou que possua porcentagem, no máximo, 5% retidos nessa peneira.

- pertencer à classe de solos de comportamento laterítico de acordo com a classificação MCT, dos tipos LA, LA' ou LG'.
- apresentar propriedades mecânicas e hidráulicas dentro dos intervalos indicados na Tabela 3.2, quando compactados na energia intermediária do Mini-Proctor. A curva granulométrica destes solos é descontínua e devem apresentar uma distribuição granulométrica que se enquadre na faixa indicada na Figura 3.1, servindo, portanto, esta faixa como orientação para o emprego desses solos como bases de pavimento.

Tabela 3.2 - Intervalos Recomendados para Bases de SAFL. FONTE: VILLIBOR (2007).

PROPRIEDADES	INTERVALOS DE VALORES
Mini-CBR sem imersão	$\geq 40\%$
$RIS = 100 \times \text{Mini-CBR}_i / \text{Mini-CBR}_{hm}$	$\geq 50\%$
Expansão, sem sobrecarga padrão	$\leq 0,3\%$
Contração	0,1% a 0,5%
Coefficiente de Infiltração	$10^{-2}$ a $10^{-4}$ (cm/min <sup>1/2</sup> )

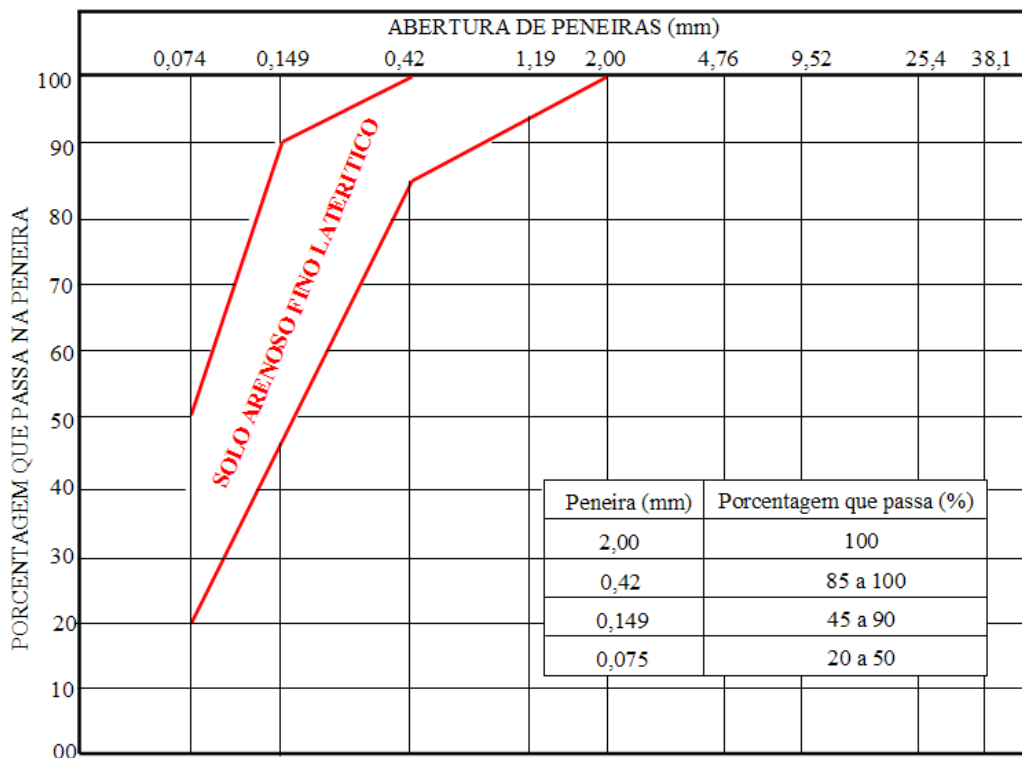


Figura 3.1 - Faixa granulométrica recomendada para bases de SAFL.(VILLIBOR, 2007).

A experiência na construção de bases com SAFL mostrou que alguns solos apresentavam uma série de problemas, enquanto outros não. A partir disso, dividiram-se os solos de comportamento laterítico em 4 grupos, localizados em áreas distintas do gráfico da classificação MCT, conforme ilustrado na Figura 3.2, para priorizar sua utilização de acordo com as características específicas de cada grupo.

A experiência da construção de pavimentos com bases de solo arenoso fino laterítico, mostra que os solos das áreas I e II (Figura 3.2) apresentam, de maneira geral, propriedades adequadas que atendem as recomendações para sua utilização nessas camadas. Por outro lado, os solos das áreas III e IV (Figura 3.2) apresentam problemas e dificuldades para seu uso em camadas estruturais de pavimentos.

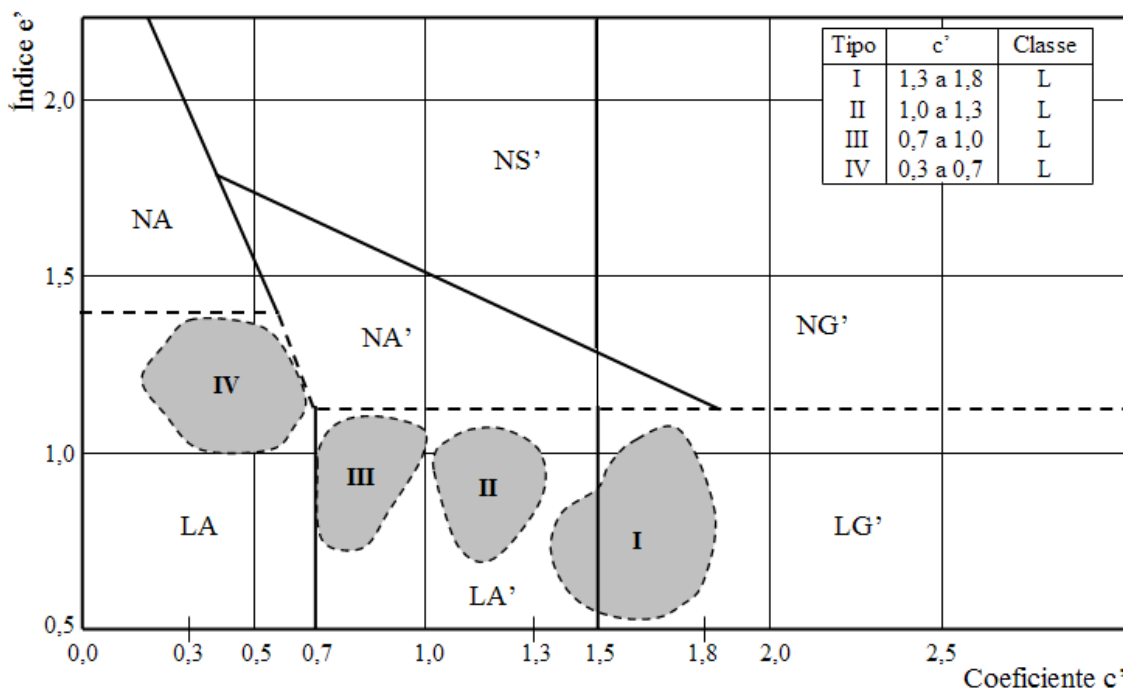


Figura 3.2 - Áreas no Gráfico da classificação MCT dos SAFL utilizados em bases de pavimentos. (VILLIBOR *et al*, 2007).

### 3.3.2. Peculiaridades sobre o comportamento de pavimentos com base de “SAFL”

Algumas das peculiaridades observadas durante a vida de serviço dos pavimentos executados com bases de solo arenoso fino laterítico segundo Villibor (2007) são:

- baixíssima incidência de ruptura de base, exceto em locais onde o lençol freático se encontra a menos de 1,0m de profundidade e/ou em pontos de penetração de águas superficiais;
- pequenas deflexões, geralmente de 20 e 60 centésimos de milímetros;
- pequenas deformações nos rodeiros, porém sem trincamento do revestimento;
- baixa contração por secagem ao ar nos solos da área II, Figura 3.2, resultando em placas de dimensões aproximadas de 50 x 50 cm na base, consideradas ideais como padrão de trincamento. Os solos da área I apresentam contração média a elevada, que conduz a formação de placas da ordem de 30 x 30 cm;
- excelente capacidade para receber compactação (solos das áreas I e II), alcançando facilmente o grau de compactação correspondente a 100% da massa específica seca máxima relativa à “energia intermediária”;
- facilidade de receber a imprimadura, proporcionando uma boa aderência da camada de rolamento à base;
- superfície e borda pouco susceptíveis ao amolecimento por umedecimento.

As peculiaridades mencionadas anteriormente são relativas principalmente aos solos pertencentes às áreas I e II da Figura 3.2. Entretanto, cabe ressaltar que, quando da utilização de solos pertencentes às áreas III e IV, observa-se o seguinte:

- dificuldade de aceitar compactação. O grau de compactação atinge valores entre 93 e 97% da massa específica seca máxima relativa à “energia intermediária”;

- propensão para formação de “lamelas” na construção;
- dificuldade no acabamento da base, principalmente sob ação do tráfego de construção;
- superfície e borda da base muito susceptíveis ao amolecimento por absorção excessiva de umidade. Problemas de erodibilidade nas bordas quando sujeitas à ação de água em segmentos onde não existem guias e sarjetas e/ou proteção lateral.

Num estudo desenvolvido em São Paulo por Villibor (1981), foram realizados ensaios *in situ* com o propósito de analisar as variações do teor de umidade em camadas de base de pavimentos, constituídas de solos arenosos finos lateríticos SAFL. As medidas de umidade foram efetuadas em vários trechos, na fase de construção e após a abertura ao tráfego, e em diversos meses do ano, durante períodos de chuva e de estiagem. Segundo o autor, os teores de umidade da camada de base estavam compreendidos no intervalo de 55% a 110% da umidade ótima. Em 90% dos trechos avaliados, na porção superior da base (0 a 5cm) os teores de umidade apresentam-se inferiores a 80% da umidade ótima, enquanto que na porção inferior (5 a 15cm), estes teores variavam entre 80% e 100% da umidade ótima. De um modo geral, os teores de umidade de trabalho encontram-se abaixo da umidade ótima de laboratório, mesmo em períodos de chuva.

### **3.3.3. Considerações sobre defeitos no pavimento devido às deficiências da técnica construtiva**

Segundo o Villibor *et al*, (2007) os defeitos que mais afetam a vida de um pavimento com base de SAFL são:

- lamelas superficiais decorrentes de pequenos aterros para acerto de greide, quando do acabamento e de super-compacatação superficial da camada, mais incidente em solos pouco coesivos.
- falta de imprimadura impermeabilizante ou taxa insuficiente, que não confere a coesão necessária na superfície da base, acarretando cravamento do agregado do revestimento na base.
- escolha inadequada do solo, por exemplo, com baixa capacidade de suporte, levando conseqüentemente a recalques e deformações excessivas; utilização de solos não coesivos ocasionando escorregamentos do revestimento.

#### **3.4. BASES DE MISTURAS DE SOLO ARGILOSO LATERITICO E AREIA (ALA)**

No Brasil existem muitas regiões que apresentam solos lateríticos finos *in natura*, que não apresentam características adequadas para seu emprego como bases de pavimentos. No entanto, esses solos, quando misturados entre si ou com areias, podem fornecer materiais adequados com comportamento semelhante ao de um solo arenoso fino laterítico, (VILLIBOR *et al*, 2007).

Para a utilização desses materiais como bases de pavimentos podem ser efetuadas dois tipos de misturas, em caso de ocorrência de solos argilosos lateríticos (LG') nas proximidades da obra, estes devem ser corrigidos com o acréscimo de areia laterítica quartzosa e/ou areia lavada de rio. Se houver presença de areia laterítica (LA), deve ser acrescentado solo argiloso laterítico.



Dessa maneira, essas misturas resultantes se caracterizam pela natureza laterítica de seu componente argiloso, que passa na peneira de 0,074 mm (nº 200), e pelo uso de areia laterítica (LA) ou areia de cava ou lavada de rio.

As misturas de solo argiloso laterítico e areia (ALA) são recomendadas para uso em camadas de sub-bases de vias submetidas a tráfego pesado, ou seja, número de repetições do eixo padrão (N) de 80 kN de até  $10^7$ . Quando utilizadas em camadas de bases, são indicadas para vias de tráfego leve, com um N máximo de  $10^5$ .

### **3.4.1. Especificações dos componentes e da mistura de argila laterítica com areia (ALA) para bases de pavimentos**

Segundo Villibor *et al* (2007), os componentes da mistura tipo ALA devem atender as seguintes características, para que possam ser considerados apropriados para camadas de base e sub-base:

#### **- Solo Argiloso:**

- deve pertencer à classe “L” (solo de comportamento laterítico) e grupo LG’ (argilas lateríticas) da classificação MCT.
- deve apresentar propriedades mecânicas e hidráulicas, quando compactado na energia normal, segundo valores indicados a seguir:
  - Suporte Mini-CBR na Energia Normal, sem imersão, maior ou igual a 12%;
  - RIS ou razão do Mini-CBR imerso para o Mini-CBR na umidade de moldagem maior ou igual a 50%;
  - Expansão, sem sobrecarga padrão, menor ou igual a 1%.

**- Areia:**

- deve pertencer aos grupos LA (areia laterítica quartzosa) ou NA (areia não laterítica), porém isenta de mica, segundo a classificação MCT.

As misturas do tipo ALA devem atender às especificações baseadas na classificação MCT e em determinações das propriedades mecânicas e hídricas, descritas a seguir:

- devem pertencer à classe de solos de comportamento laterítico.
- as misturas do tipo ALA, quando compactadas, devem possuir propriedades dentro dos intervalos da Tabela 3.3 e a granulometria descontínua com graduação que se enquadre na faixa indicada na Figura 3.1.

Tabela 3.3 - Intervalos Admissíveis das Propriedades da Mistura ALA. (VILLIBOR, 2007).

PROPRIEDADES	CONDIÇÃO NECESSÁRIA	CONDIÇÃO DESEJÁVEL
Mini-CBR sem imersão	≥ 40%	≥ 50%
RIS = 100 x Mini-CBRi / Mini-CBRhm	≥ 50%	≥ 50%
Expansão, sem sobrecarga padrão	≤ 0,3%	≤ 0,2%
Contração	0,1% a 0,5%	0,2% a 0,4%
Coefficiente de Infiltração	10 <sup>-2</sup> a 10 <sup>-4</sup> cm/min <sup>1/2</sup>	10 <sup>-2</sup> a 10 <sup>-4</sup> cm/min <sup>1/2</sup>

### 3.4.2. Projeto de Dosagem

O projeto de dosagem deve englobar um estudo geotécnico dos componentes da mistura (argila laterítica e areia) e uma verificação dos resultados (em 3 amostras) quanto ao entendimento dos requisitos indicados nas especificações, tanto dos componentes, quanto das misturas de argilas lateríticas e areia.

Segundo Villibor *et al* (2007), caso os resultados atendam às especificações, deve-se proceder à composição das misturas envolvendo amostras representativas de argilas lateríticas com areia laterítica, ou areia de cava ou lavada de rio, em porcentagens de peso.

### 3.4.3. Técnica Construtiva

A Tabela 3.4 apresenta o procedimento construtivo e de controle de Bases de Misturas do Tipo ALA com a adição de areia no solo argiloso laterítico *in situ*. A mistura do tipo ALA também pode ser feita na jazida, com pá carregadeira, e transportada para a aplicação na via.

Tabela 3.4 - Procedimento Construtivo e Controle Tecnológico da Base de ALA. (VILLIBOR *et al*, 2007).

CONTROLE DA MISTURA E DA BASE	PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO DA MISTURA
Controle da mistura a cada 100 m - Granulometria: peneiras 0,42; 0,150 e 0,075mm - Mini-CBR <sub>hm</sub> - Contração	- Lançar uma camada de argila após espalhar a areia na proporção de projeto. - Misturar as duas camadas e proceder a sua pulverização com grade de disco e pulvimixer. Colocar a camada na umidade de projeto. - Iniciar a compactação com rolo-pé de carneiro pata longa, em torno de 6 passadas e, se necessário, complementá-la com o no máximo 3 passadas de pé-de-carneiro vibratório.
Controle da Base a cada 40 m - Grau de compactação ( $\geq 100\%$ da energia intermediária) - Teor de Umidade (hot $\pm 2\%$ )	- Preferencialmente não patrolar o solo para ajuste da espessura da base durante o processo de compactação que deverá terminar quando o grau de compactação de projeto for alcançado. - Após irrigá-la, efetuar acabamento com motoniveladora cortando numa espessura de 2cm. Executar a compactação final com 1 passada do rolo pneumático ou liso. - Deixar a base perder a umidade por um período de 48 a 60 horas ou até a ocorrência de trincas com largura de $\pm 2$ mm.
<b>Recomendações gerais:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Espessura mínima da base é de 12,5 cm e a máxima de 17,0cm;</li> <li>2. A uniformização do teor de umidade do colchão de solo para compactação deverá ser efetuada no final da tarde e sua compactação deverá ser executada no período da manhã;</li> <li>3. A imprimação da base deve ser precedida de uma leve irrigação.</li> </ol>	

### 3.4.4. Peculiaridade sobre o comportamento de Pavimentos com base ALA

Segundo Villibor *et al* (2007), as peculiaridades observadas no comportamento dos pavimentos com bases de misturas do tipo ALA são similares às verificadas nos pavimentos com base de solo arenoso fino laterítico SAFL.

Os defeitos provenientes de deficiências da técnica construtiva da camada de base constituída por argila laterítica com areia (ALA) são também similares às das bases de SAFL.

### 3.5. PAVIMENTOS DE BAIXO CUSTO

Segundo Villibor *et al* (2007), um pavimento é considerado do tipo Baixo Custo quando:

- utiliza bases constituídas de solos locais *in natura*, ou em misturas, com custos substancialmente inferiores aos das bases convencionais tais como: brita graduada, solo-cimento, macadame hidráulico ou macadame betuminoso;
- utiliza revestimento asfáltico esbelto do tipo tratamento superficial ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), com espessura de, no máximo, 3,0cm;
- é dimensionado para atender os tráfegos:
  - urbano, de muito leve a leve, de acordo com a Tabela 3.5;
  - rodoviário, com VDM inferior a 1500 veículos, com no máximo 30% de veículos comerciais, e com  $N < 5 \times 10^6$  solicitações do eixo simples padrão de 80 kN.

Nos pavimentos rodoviários há experiências com volumes superiores ao máximo especificado; no entanto, segundo VILLIBOR *et al.* (2007), o uso dessas bases rodoviárias de tráfego pesado somente pode ser recomendado a partir dos resultados das pistas experimentais (faixas adicionais), já implantadas em alguns trechos de rodovias paulistas.

Tabela 3.5 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego. (VILLIBOR *et al*, 2007).

TIPO DE VIA	FUNÇÃO PREDOMINANTE	TRÁFEGO PREVISTO	VIDA DE PROJETO (ANOS)	VOLUME INICIAL DA FAIXA MAIS CARREGADA		N	N CARACTERÍSTICO
				VEICULO LEVE	CAMINHÕES E ÔNIBUS		
V1	(Via Secundária) via local residencial com passagem	Leve	10	100 a 400	4 a 20	2,7x10 <sup>4</sup> a 1,4x10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>
V2	(Via Principal) via coletora secundária	Médio	10	401 a 1500	21 a 1500	1,4x10 <sup>5</sup> a 6,8x10 <sup>5</sup>	5x10 <sup>5</sup>

### 3.5.1. Considerações para a utilização de pavimentos com solos lateríticos

O uso de solos lateríticos de granulação fina como material para bases *in natura*, ou com misturas com outros agregados, condiciona-se à ocorrência em área próxima às obras e condições ambientais adequadas. Segundo dados geológicos, pedológicos e climáticos disponíveis, essa condição ocorre em quase todos os estados brasileiros.

Segundo Villibor *et al* (2007), a grande maioria dos pavimentos executados com bases de solos lateríticos apresenta comportamento altamente satisfatório e localizam-se em regiões com os seguintes tipos climáticos, segundo Köppen:

- Cwa (quente com inverno seco);
- Aw (tropical com inverno seco);
- Cwb (temperado com inverno seco);

A precipitação pluviométrica anual nestas regiões situa-se entre 1000 e 1800 mm, com temperatura média anual superior a 20° C.

---

Para o emprego de solos lateríticos em pavimentos urbanos, tanto o projeto geométrico quanto o de drenagem devem atender às características técnicas apresentadas a seguir:

- obrigatoriedade de execução de guias e sarjetas;
- perfil longitudinal com declividade mínima de 1% e máxima de 8%;
- seção transversal com declividade entre 3 a 4%;
- exigência de execução do passeio, preferencialmente com revestimento em concreto para evitar infiltração de água por trás das guias e sarjetas;
- execução de um sistema eficiente de captação de águas pluviais e servidas, evitando o acúmulo de água em pontos baixos.
- execução de drenagem profunda para rebaixamento do lençol freático a, pelo menos, 1,50 m em relação à cota final de terraplenagem (CFT).

### **3.6. SOLOS ARTIFICIAIS**

Os primeiros estudos efetuados a partir da montagem de solos artificiais em laboratório foram realizados por Seed, Woodward & Lundgren (1964). O objetivo era, misturando, aos pares, argilo-minerais de caulinita, illita e bentonita, estudar as relações existentes entre o limite de liquidez e as características da argila contida em um solo, e entre o potencial de expansão e a composição do argilo-mineral da fração argila. Os resultados obtidos se mostraram em excelente concordância com os determinados empiricamente por Casagrande, através da utilização de argilas naturais.

Sória (1977) utilizou a técnica de montagem de solos artificiais para caracterizar as diferenças mecânicas entre solos arenosos lateríticos e solos residuais saprolíticos.

Nogami & Villibor (1985) realizaram testes com misturas preparadas em laboratório, tendo por objetivo determinar a influência da graduação da fração areia e da natureza e porcentagem de finos, nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos.

A técnica de montagem de solos artificiais tem se mostrado muito útil, pois permite que sejam obtidos solos de difícil seleção na natureza (BARROSO & FABBRI, 1996). Além disso, a montagem de solos em laboratório tem demonstrado que os resultados obtidos de ensaios com tais solos são semelhantes aos obtidos de ensaios realizados com solos naturais, de características parecidas.

Barroso (1996) fez um estudo do comportamento de solos artificiais em função da variação das características de sua fração fina, trabalho que foi completado posteriormente por Santana (1998), através de um estudo do comportamento de solos artificiais em função da variação das características de sua fração grossa. Ambos os trabalhos constituíram em um aporte para futuras classificações de solos através do método da adsorção de azul de metileno.

A montagem de solos artificiais em laboratório é um recurso que possibilita o estudo de características específicas dos solos, pois permite a obtenção de solos diferindo entre si apenas quanto ao parâmetro escolhido para ser analisado (SANTANA, 1998).

### **3.7. INFILTRABILIDADE DOS SOLOS**

Não se tem uma designação consagrada para a infiltrabilidade dos solos não saturados, caracterizada pela quantidade de água que penetra (ou infiltra) através de sua superfície, quando em contato com água livre. Essa propriedade tem sido designada, às vezes, como

permeabilidade não saturada ou capilar e é caracterizada por coeficientes apropriados. Segundo Nogami & Villibor (1995), o uso do termo permeabilidade não é recomendável, porquanto o coeficiente que a caracteriza difere bastante da permeabilidade saturada. Enquanto que o coeficiente de permeabilidade é independente do tempo, o coeficiente que caracteriza a infiltrabilidade dele depende.

Na infiltrabilidade, a penetração de água é motivada, sobretudo, pela tensão de sucção do solo, mas, em muitas circunstâncias, também é necessário considerar outros fenômenos como inchamento e pressões hidrostáticas.

A infiltrabilidade tem sido pouco considerada em estudos geotécnicos tradicionais para obras viárias e de pavimentação. Isso é justificado devido a que, nos climas frios e temperados, onde foram desenvolvidas as metodologias tradicionais, a infiltrabilidade desempenhe um papel pouco importante, devido ao elevado grau de saturação das camadas de solos envolvidas pelas obras. Já nos climas tropicais úmidos, apesar da elevada pluviosidade, devido à intensa evapotranspiração e à boa drenabilidade dos solos lateríticos, a infiltrabilidade é uma propriedade mais freqüente nas camadas de solos envolvidas nas obras viárias e de pavimentação.

Como exemplo de problemas geotécnicos viários de infiltrabilidade, Nogami & Villibor (1995) destacam a entrada de água das valetas de drenagem superficial não revestidas nas camadas de pavimento, através do acostamento. Se a infiltrabilidade do acostamento for elevada, a água transmitida poderá diminuir drasticamente a capacidade de suporte e/ou deformabilidade do pavimento.



Segundo Nogami & Villibor (1995), a infiltrabilidade é uma propriedade ainda muito pouco estudada na geotecnia viária, razão pela qual a disponibilidade de dados é também muito precária. Praticamente todos os dados disponíveis foram obtidos pelo uso da metodologia MCT, considerando-se principalmente solos tropicais. Observe-se que os dados sobre solos não tropicais também não tem aparecido na bibliografia internacional.

A variação do coeficiente de sorção capilar ao longo da curva de compactação apresenta muita similaridade com a variação observada no coeficiente de permeabilidade. Nos solos lateríticos essa variação é muito mais acentuada que nos solos saprolíticos.

### **3.8. PERMEABILIDADE DOS SOLOS**

A permeabilidade do solo é a propriedade que descreve como a água flui através dele. Geralmente essa propriedade se expressa como “Coeficiente de Permeabilidade ( $K$ )” que é a constante proporcional à relação da velocidade do fluxo pelo gradiente hidráulico entre dois pontos do maciço de solo. Essa relação foi determinada pela primeira vez por um engenheiro francês chamado D’Arcy e está descrita na Expressão 3.1.

$$u = Ki \quad (3.1)$$

Onde:

$u$  = velocidade da água no solo;

$i$  = gradiente hidráulico,  $i = \frac{h}{l}$  (perda de carga  $h$  por unidade de longitude  $l$ )

$K$  = coeficiente de permeabilidade.

O coeficiente de permeabilidade dos solos pode ser determinado em laboratório, seja em ensaio por carga constante ou por carga variável, ou então, no campo através de provas de bombeamento.

Os solos finos e argilas apresentam permeabilidades muito baixas e, portanto, dificilmente apresentam fluxo de água. Os solos graúdos, tais como pedregulhos e areias, apresentam permeabilidade elevada, o que permite à água fluir facilmente através deles.

Segundo Nogami & Villibor (1995), a permeabilidade não é uma propriedade determinada rotineiramente nos solos destinados às obras viárias ou de pavimentação. Somente em casos muito especiais é que se determina a permeabilidade de amostras compactadas; no restante dos casos é avaliada em face de sua granulometria ou ao grupo geotécnico em que o solo se encaixa.

Com o desenvolvimento da tecnologia MCT, verificou-se que a permeabilidade é uma das propriedades de interesse para a finalidade considerada. Desenvolveu-se então, um método de ensaio que permite a sua determinação de maneira muito mais simples que o procedimento tradicional.

Os solos lateríticos no estado natural caracterizam-se por ter elevada permeabilidade, conseqüente ao grande desenvolvimento de agregados argilosos, bastante resistentes, mesmo após imersão total em água. Isso acontece mesmo nas variedades com granulometria de argila ou argilosos (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

A resistência relativamente grande dos agregados argilosos naturais, ou resultantes da própria manipulação do solo no laboratório e no campo, reflete-se na permeabilidade. Assim, a variação da permeabilidade ao longo da curva de compactação é bastante acentuada.

A consideração da permeabilidade apenas nas condições ótimas de compactação pode não explicar muitos problemas de movimentação de água em obras viárias. As argilas lateríticas podem apresentar permeabilidade elevada no ramo seco da curva de compactação e as areias pouco argilosas podem tornar-se praticamente impermeáveis nas condições ótimas de compactação. Por este motivo, segundo Nogami & Villibor (1995), deve-se ter muito cuidado na hora de extrapolar os resultados laboratoriais para camadas “in situ”.

### **3.9. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS**

#### **3.9.1. Definição e Importância do Módulo de Resiliência ( $M_R$ )**

O primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Hveem (1951). O órgão rodoviário da Califórnia havia começado, em 1938, um estudo sistemático para determinar as deflexões de pavimentos sujeitos ao tráfego, que redundou no estabelecimento das deflexões máximas admissíveis para que os pavimentos tivessem uma vida de fadiga satisfatória. Hveem entedia que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos se devia à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, em especial do subleito.

Hveem optou pelo termo resiliente, ao invés de elástico para as deformações reversíveis, argumentando que, estas são nos pavimentos muito maiores que nos sólidos elásticos como

concreto, aço, etc. A deformação resiliente é definida na Mecânica dos Pavimentos como a deformação elástica ou recuperável dos solos e das estruturas de pavimentos sob a ação de cargas repetidas. Em outras palavras, resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações e corresponde à energia potencial de deformação.

O módulo de deformação resiliente, também chamado de módulo de resiliência ou simplesmente módulo resiliente, é definido pela Expressão 3.2:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3.2)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

$\sigma_d$  = tensão axial ou de desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) aplicada repetidamente, em MPa;

$\varepsilon_r$  = deformação específica axial recuperável ou resiliente correspondente a uma aplicação da tensão desvio, adimensional.

A deformação axial tem uma parcela pequena de natureza plástica ou permanente  $\varepsilon_p$  e uma parcela recuperável  $\varepsilon_r$ , considerada na determinação do módulo de resiliência, como se vê na Expressão 3.3.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r + \varepsilon_p \quad (3.3)$$

Para obter o valor do módulo de resiliência utilizam-se ensaios triaxiais de carga repetida que procuram repetir em laboratório as condições de carregamento das cargas de tráfego na

estrutura do pavimento. Diferente de outros sólidos elásticos, a relação do módulo resiliente para a maioria dos materiais de pavimentação é do tipo não linear e existe grande dependência das tensões aplicadas.

Desde 1986 o guia de dimensionamento da AASHTO passou a recomendar o uso do Módulo de Resiliência como a propriedade para a caracterização dos materiais empregados em pavimentos flexíveis.

Também em 1996 iniciou-se o projeto NCHRP 1-37<sup>a</sup> *Guide for Mechanistic Empirical Design of New na Rehabilitated Pavement Structures*, que apresentou seu relatório final em março de 2004 com o novo guia de dimensionamento da AASHTO para pavimentos novos e reabilitados, sejam flexíveis ou rígidos. Este guia é baseado em procedimentos de projetos de pavimentos que usam tecnologias mecanístico-empíricas existentes, incluindo metodologias para calibração, validação e adaptação às condições locais.

No que diz respeito à caracterização dos materiais de pavimentação, o novo guia requer o conhecimento de suas propriedades para previsão dos estados de tensão, deformação e deslocamento quando a estrutura do pavimento está sujeita a uma carga de roda externa. No sistema mecanístico-empírico do guia, as propriedades adotadas são o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson ( $\mu$ ). Estas propriedades são necessárias para cada camada (material) do pavimento.

No caso de materiais de bases não tratadas, sub-bases e subleitos, o módulo de elasticidade é caracterizado em termos do módulo de resiliência, descrito a partir de um modelo universal

não-linear, aplicável a todos os tipos de materiais de pavimentação não-tratados, variando desde uma argila muito plástica até bases granulares.

### 3.9.2. Módulo de Resiliência ( $M_R$ ) de materiais convencionais

Os solos e as britas não são materiais elásticos lineares, portanto não se aplicam a eles as expressões dadas pela lei de Hooke generalizada. Os módulos de resiliência dos solos dependem do estado de tensões atuante, decorrente do peso próprio mais as tensões causadas pelas cargas dos veículos. O que se procura determinar nos ensaios triaxiais é a relação experimental mostrada na Expressão (3.4) para as condições de densidade, umidade e grau de saturação que o solo apresente “in situ”.

$$MR = f(\sigma_3, \sigma_d) \quad (3.4)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

$\sigma_d$  = tensão axial ou de desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) aplicada repetidamente, em MPa;

$\sigma_3$  = tensão de confinamento, em MPa.

A seguir são apresentados os materiais utilizados convencionalmente na construção de camadas estruturais de rodovias, do ponto de vista de suas características resilientes.

#### 3.9.2.1. Comportamento Resiliente de Britas e Lateritas Pedregulhosas

Na construção de rodovias principais é comum utilizar-se camadas de base de brita (pedra britada). Esta deve ser bem graduada, de partículas resistentes à abrasão, e apresentar elevado

índice de suporte CBR. Em muitas regiões carentes de pedreiras de boa qualidade (Norte, Nordeste e Centro-Oeste) recorre-se às jazidas de laterita (concreções ferruginosas).

Segundo Medina & Motta (2005), a qualificação dos materiais de pavimentação através de ensaios de carga repetida é mais adequada para dimensionamento de pavimentos do que através dos antigos ensaios de caracterização acima citados e que ainda predominam nas especificações de materiais de pavimentação.

Por outro lado, medidas de módulo de resiliência não são adequadas para se estabelecer “padrões” ou especificações universais. Deve-se preferir a especificação particular dos módulos de resiliência por obra, ou seja, tendo-se utilizado determinados valores de MR do material de cada camada, na fase de projeto e dimensionamento de uma determinada obra, que estes valores passem a fazer parte de exigências particulares da obra.

As dimensões do corpo-de-prova utilizado no ensaio triaxial de cargas repetidas para testar materiais granulares varia segundo o estudo ou pesquisa e o laboratório. É usual encontrar estudos com corpos-de-prova moldados com diâmetros de 50mm, 100mm e 150mm e com a razão altura por diâmetro igual a dois.

Segundo os resultados obtidos por Motta R.S. (2005), os valores de Módulo de Resiliência dos materiais granulares enquadram-se entre 100 MPa e 500 MPa, os quais concordam com valores obtidos pela IP-08 da PMSP(2002). No manual da AASHTO (1986) sugerem-se também valores para o MR de materiais granulares de bases e sub-bases. No caso específico da pista experimental da AASHTO, os módulos da base, em função da tensão confinante  $\theta$ , foram:

Condição seca:  $M_R = 1100 \cdot \theta^{0,6} (MPa)$

Condição úmida:  $M_R = 550 \cdot \theta^{0,6} (MPa)$

Condição encharcada:  $M_R = 440 \cdot \theta^{0,6} (MPa)$

Espinosa (1987) desenvolveu um estudo de uma amostra de brita graduada de rocha gnáissica da camada de base da BR 101, trecho Manilha-Duque, RJ. O autor utilizou uma amostra de brita I com todas as partículas passantes na peneira de 19,1mm (ou 3/4") e uma amostra de brita II com as partículas passantes na peneira de 9,5mm (ou 3/8"). Os corpos-de-prova de 50mm e 100mm foram compactados na energia Proctor modificado.

Os resultados dos ensaios de cargas repetidas, do estudo de Espinosa (1987), mostraram a influencia destacada da pressão confinante  $\sigma_3$ . A brita I forneceu módulos, em geral, maiores que os da brita II. Obtiveram-se, também, valores de módulos maiores com os corpos-de-prova de 50mm de diâmetro.

Ramos (2003) apresentou resultados de módulos de resiliência de amostras de pó de pedra e de britas corridas de granito e gnaisse da cidade de Rio de Janeiro, usadas como sub-base e base, na energia modificada e intermediária, na condição próxima da umidade ótima e massa específica máxima dos respectivos ensaios de compactação. Nesse estudo o autor verificou que o valor de módulo de resiliência decresce com o aumento da tensão desvio, tanto para o pó de pedra como para a brita corrida.

Comparando-se os resultados da brita corrida de Ramos (2003) com os resultados de Espinosa (1987), observa-se que para britas da mesma natureza geológica, a brita graduada tem



comportamento não-linear mais acentuado do que a brita corrida, o que se explica pela granulometria mais estendida desta última (MEDINA & MOTTA, 2005).

Malasyz (2004) fez um estudo detalhado de comportamento de algumas britas de basalto usadas para pavimentação em Porto Alegre, tanto executando ensaios triaxiais dinâmicos como triaxiais estáticos, visando obter modelos de comportamentos elásticos e plásticos. O autor observou que os valores obtidos de MR foram de 3 a 10 vezes maiores que os estáticos. As envoltórias de ruptura dos vários ensaios mostraram a forte influência da tensão confinante e do grau de compactação na resistência ao cisalhamento, como também nos módulos de resiliência.

Motta (1991) desenvolveu um estudo de resiliência de pedregulhos lateríticos de Roraima (extremo setentrional) e Rondônia (Extremo centro-ocidental). Neste estudo a autora destaca a influência do tamanho dos corpos-de-prova, ainda que a razão altura por diâmetro seja a mesma, 2. Os módulos de resiliência dos corpos-de-prova de 5,0cm foram de 2,5 a 4 vezes maiores que os obtidos com os corpos-de-prova de 10cm e 15cm, pelo efeito principal da mudança da granulometria pelo escalpo, para atender as normas do antigo DNER, e parte pelo efeito de escala e do volume.

### **3.9.2.2. Comportamento Resiliente de Solos**

Tradicionalmente, os solos são agrupados em dois tipos de comportamento resiliente: comportamento granular e comportamento fino. Entretanto, nas regiões tropicais essa simplificação parece não ser aplicável.

---

A deformação resiliente pode ser vista em nível microscópico como deformação elástica das partículas do solo e dos aglomerados de partículas. A micro-estrutura floclada das argilas em baixos teores de umidade, no arranjo bordo-face das partículas (argila caulínica comum nos solos tropicais) pode dispersar-se parcial e reversivelmente para as pequenas deformações que se mantêm em níveis muito aquém da ruptura plástica, (MEDINA & MOTTA, 2005).

Segundo estudo de Bernucci (1995), os solos lateríticos finos apresentam bons módulos de resiliência, às vezes até superiores aos materiais granulares nobres para pavimentação, e os solos lateríticos não coesivos se mostraram nesse estudo inadequados para base de pavimentos, mesmo apresentando CBR altos e baixas expansões.

Parreira *et al.* (1998) desenvolveram um estudo sobre módulo de resiliência de sete solos brasileiros para fins de aplicação em pavimentos rodoviários. Os autores analisaram vários modelos de representação do módulo de resiliência em função da tensão confinante, tensão-desvio, primeiro invariante de tensão, tensão principal maior, e combinações de algumas dessas variáveis. No caso dos solos arenosos, verificou-se que o módulo depende da tensão confinante ( $\sigma_3$ ), sendo pequena a influência de outras variáveis. Quanto ao único solo argiloso analisado, a tensão-desvio ( $\sigma_d$ ) é o principal fator.

Um estudo da resiliência dos solos finos do litoral de Sergipe foi desenvolvido por Costa *et al.* (2006) com vistas ao seu aproveitamento em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego. Os valores do coeficiente  $R^2$ , decorrentes da aplicação do modelo composto nos resultados da pesquisa, foram sempre maiores a 0,97, mostrando a supremacia desse modelo sobre outros modelos, como demonstrado em outras pesquisas, tais como Ferreira (2002), Ferreira & Motta (2002), Marangon (2004) e Tuhler (2005).

Costa *et al.* (2006) determinaram ainda os valores de módulo de resiliência para uma estrutura de pavimento de baixo volume de tráfego (para o par de tensões  $\sigma_d=0,206\text{MPa}$  e  $\sigma_3=0,069\text{MPa}$ ), cujos valores variaram entre 151MPa e 438 MPa, com valor médio de 290MPa.

### **3.9.2.3. Comportamento de Solos Finos Lateríticos em serviço em pavimentos**

A magnitude do módulo de resiliência dos solos é variável quando está em serviço em pavimentos, pois depende de algumas variáveis, que podem ser agrupadas em três categorias, a saber:

- a. condição de carregamento e estado de tensão;
- b. natureza do solo: origem, composição e estrutura;
- c. índices físicos do solo, definidos pelo teor de umidade e massa específica seca.

Os fatores incluídos nas categorias (a) e (b) são considerados quando são propostos modelos que permitem representar o módulo de resiliência a partir do estado de tensão e da natureza do solo (por exemplo MOTTA & CERATTI, 1986), desenvolvidos especialmente para cada tipo de solo. Quanto à categoria (c), índices físicos, estes podem ser alterados pela variação das condições ambientais e pelo efeito da compactação causada pelo tráfego, (MARANGON, 2004).

Sabe-se que o módulo de resiliência de um solo argiloso é um parâmetro muito influenciado pela variação do teor de umidade devido às variações climáticas. Os níveis de umidade dos solos de subleito mudam em função das variações sazonais e ambientais do clima, que resultam na variação no nível de saturação, e conduzem a alterações na resistência e nas

---

propriedades resilientes do subleito. Observa-se que à medida que o teor de umidade nos solos aumenta, o MR diminui para qualquer estado de tensões, (GONÇALVES & PARREIRA, 1999).

Por outro lado, pode acontecer perda de umidade nas camadas do pavimento pelo efeito da evapotranspiração intensa do clima tropical, o que faz o módulo de resiliência aumentar.

Os solos lateríticos podem apresentar valores elevados de módulo de resiliência, comparáveis ou mesmo superiores (considerando igual nível de tensão) aos valores obtidos para materiais granulares normalmente utilizados como base de pavimentos. Desta forma, a perda de umidade não é prejudicial para o comportamento dos solos lateríticos desde que não comprometa o desempenho da estrutura do pavimento, uma vez que a abertura de trincas de alguns milímetros pode diminuir o módulo de resiliência “equivalente” da camada, pois trabalharia como um conjunto de blocos separados por trincas (BERNUCCI, 1997).

Nas regiões tropicais de clima quente e úmido, os solos utilizados em pavimentos trabalham freqüentemente com umidades de equilíbrio abaixo das condições ótimas obtidas em laboratório, se a drenagem for adequada do ponto de vista de Engenharia. Têm-se assim os subleitos, em geral, mais secos e mais resistentes do que os de países de clima temperado.

Bernucci (1997) encontrou valores altos de módulo de resiliência em laboratório para os solos lateríticos compactados, e observou que o MR elevou-se significativamente para amostras que apresentaram perda parcial de umidade. A autora concluiu que a combinação das propriedades dos solos lateríticos coesivos e dos fatores climáticos que atuam nesses solos resulta em um

material para pavimentação estável, com boa capacidade de suporte, resistente às solicitações por cargas repetidas.

Parente *et al.* (2002) avaliaram o comportamento mecânico de dois solos, um laterítico e um não laterítico, mas com a mesma classificação na HRB e USCS, estabilizados pela adição de cimento em diferentes teores e tempos de cura. Os autores concluíram que as misturas compostas com solo de comportamento laterítico apresentam valores de módulo de resiliência superiores aos das misturas constituídas com o solo de comportamento não laterítico para todos os teores de cimento e tempos de cura. Foi notado ainda, que o efeito da tensão confinante no valor do módulo de resiliência das misturas de solo-cimento é pequeno se comparado com o efeito da tensão desvio.

Takeda (2006) avaliou a influência da variação da umidade pós-compactação no módulo de resiliência de solos de rodovias do interior paulista a partir de resultados de ensaios de laboratório. Os resultados obtidos permitiram ao autor realizar a modelagem do MR em função do estado de tensão para diferentes umidades e a avaliação da qualidade de alguns modelos matemáticos. Nesse trabalho verificou-se a influência da granulometria sobre o módulo de resiliência típico, com a tendência de aumento deste com o aumento do teor de finos. Ainda esse autor conclui que, partindo do valor do módulo de resiliência na umidade ótima como referência inicial, a trajetória de secagem produziu o aumento do valor do Módulo de Resiliência típico, e quanto menor a umidade, maior é o MR. Em contraposição, a trajetória de umedecimento levou a uma redução do valor de MR.

### 3.9.3. Módulos de Resiliência de alguns resíduos utilizados em pavimentação

Os resíduos industriais, quando disponíveis próximos das áreas em que são produzidos, resultam, geralmente, em soluções de baixo custo na execução de bases e sub-bases de estradas, na estabilização de solos, na redução de formação de pó, etc.

Na atualidade, existe uma tendência de migração de métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos para métodos chamados semi-empíricos ou mecanístico-empíricos, que requerem o conhecimento de propriedades mecânicas dos materiais. Portanto, os estudos que propõem a reutilização de resíduos na pavimentação devem incluir nos seus programas experimentais a execução de ensaios que determinem as propriedades mecânicas do material, tal como o Módulo de Resiliência.

Rolim (1999), por exemplo, analisou a possibilidade de utilizar como estabilizante o resíduo de água-de-cola, em diferentes teores (8 a 15%) e reforçados com cal (3%). No estudo utilizaram-se dois solos, um arenoso e um argiloso. O autor observou que em todos os casos, o solo argiloso apresentou valores de MR maiores que do solo arenoso. Também concluiu que a adição do resíduo de água-de-cola em ambos os solos, significou um aumento dos módulos de resiliência, não obstante esse aumento não ser significativo quando se adiciona cal (3%). Baseado nos resultados obtidos, o pesquisador recomenda a utilização do solo argiloso com cal estabilizado com água-de-cola para sua utilização em sub-bases devido à expansão obtida, enquanto que o solo arenoso com cal e água-de-cola pode ser utilizado em qualquer camada estrutural do pavimento.

Motta (2005) desenvolveu um estudo laboratorial com agregados reciclados de resíduos da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego. Esse estudo envolveu a análise do agregado reciclado *in natura*, além de sua mistura com 4% de cal ou 4% de cimento Portland, como forma de promover um aumento da resistência do material. A autora comparou no trabalho os resultados de MR do resíduo com valores de módulos de materiais granulares tradicionais utilizados em pavimentação (brita graduada), notando a semelhança de comportamento do resíduo *in natura* após 90 dias de cura. Na estrutura idealizada pela autora para um pavimento de baixo volume de tráfego, os valores de módulos de resiliência verificados em ambos os casos ficaram aproximadamente entre 200 e 400 MPa.

Outro resíduo estudado com fins de reutilização no meio rodoviário é a cinza-pesada resultante da queima de carvão mineral. Trichês *et al.* (2006) analisaram certos aspectos mecânicos da utilização de misturas solo-cinzas-pesadas na pavimentação rodoviária. Os autores observaram que a adição da cinza-pesada não significou numa melhora do solo estudado. Por outro lado, a adição de cal em teores de 3% e 4% melhorou o comportamento resiliente até o ponto do material poder ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

---

## CAPITULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

---

Nesse capítulo são descritos os métodos e procedimentos de ensaio utilizados, assim como os diferentes tipos de materiais empregados para a execução desta pesquisa para alcançar os objetivos propostos.

Tanto os ensaios de caracterização, como os de comportamento mecânico e permeabilidade, foram executados no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes, da EESC-USP. Por outro lado, os ensaios ambientais foram realizados na BIOAGRI Ambiental na cidade de Piracicaba/SP e no Laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos.

### 4.1. INTRODUÇÃO

O propósito dessa pesquisa consiste em avaliar a possibilidade de utilizar a areia de fundição em bases e sub-bases de pavimentos através de sua incorporação a solos argilosos. Para atingir esse propósito é necessário recorrer à técnica de montagem de solos artificiais em laboratório, a partir de uma matriz de solo à qual é agregada uma quantidade determinada de areia de fundição. Foram montados, inicialmente, cinco solos artificiais (misturas solo-areia), a partir do solo Jardim Botânico de Sertãozinho, SP, em estado natural, e adicionou-se areia de fundição em teores crescentes (0%, 20%, 40%, 60%, 70%).

Com solos artificiais montados é possível avaliar as propriedades dos materiais, de interesse à pavimentação, tais como: CBR, expansão, mini-CBR, módulo de resiliência; o resultado da previsão do comportamento dos solos utilizando-se as classificações HRB, USCS e MCT; e do potencial de “periculosidade” a partir de ensaios ambientais.



Para o estudo ambiental e classificação do resíduo e dos solos artificiais foram executados ensaios de lixiviação, solubilização e massa bruta na areia de fundição, no solo Jardim Botânico e em uma mistura com 50% de areia de fundição e 50% do solo Jardim Botânico (JB).

## 4.2. MATERIAIS EMPREGADOS

### 4.2.1. Solos

Para avaliar a influência da quantidade de areia de fundição no comportamento de solos, foram montados solos artificiais a partir de um solo coletado no bairro do Jardim Botânico (que recebe nessa pesquisa a denominação de “JB”) no município de Sertãozinho - São Paulo. Esse solo foi escolhido por ser extremamente argiloso e estar próximo da região produtora do resíduo estudado (areia de fundição). Coletou-se também outro solo, para efeito de comparação, no bairro de Nova Aliança (que recebe nessa pesquisa a denominação de “NV”), também no município de Sertãozinho – São Paulo. A Tabela 4.1 apresenta as principais características dos solos coletados e a Figura 4.1 mostra as suas distribuições granulométricas.

Tabela 4.1 - Principais características dos solos utilizados.

<b>SOLO</b>	<b>Jardim Botânico (JB)</b>	<b>Nova Aliança (NA)</b>
<b>LL</b>	47	47
<b>LP</b>	31	28
<b>IP</b>	16	19
<b>Passante # 4 (%)</b>	100	100
<b>Passante # 10 (%)</b>	100	100
<b>Passante # 40 (%)</b>	98	99
<b>Passante # 200 (%)</b>	95	94
<b>Classificação HRB</b>	A-7-5	A-7-6
<b>Classificação USCS</b>	ML	CL

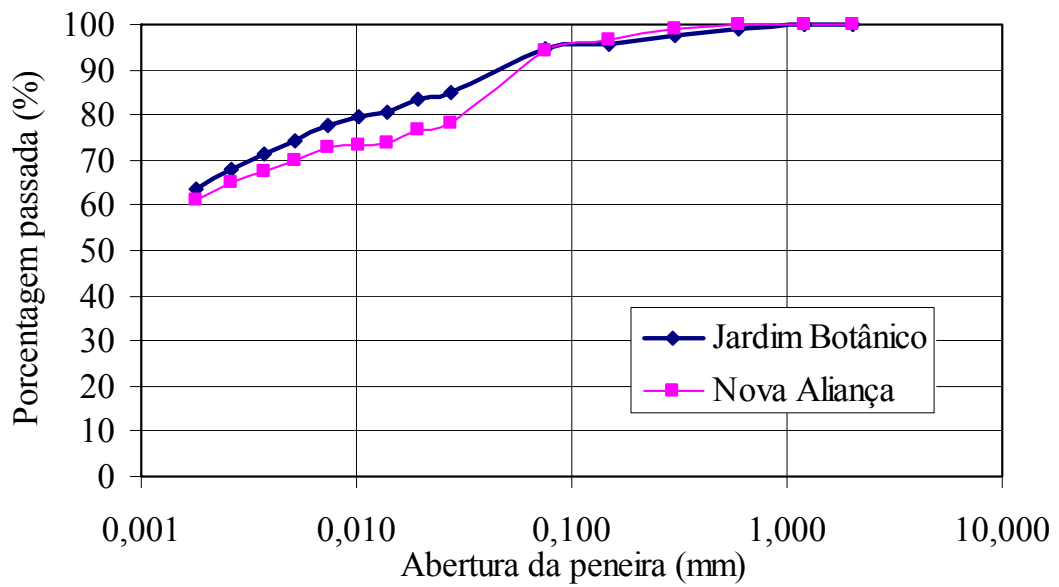


Figura 4.1 - Distribuições Granulométricas dos solos Jardim Botânico e Nova Aliança.

Na Figura 4.2 é apresentada uma imagem obtida com a ajuda do software Google Earth, que permite visualizar a região de coleta dos solos assim como a localização da empresa produtora da areia de fundição utilizada nessa pesquisa.

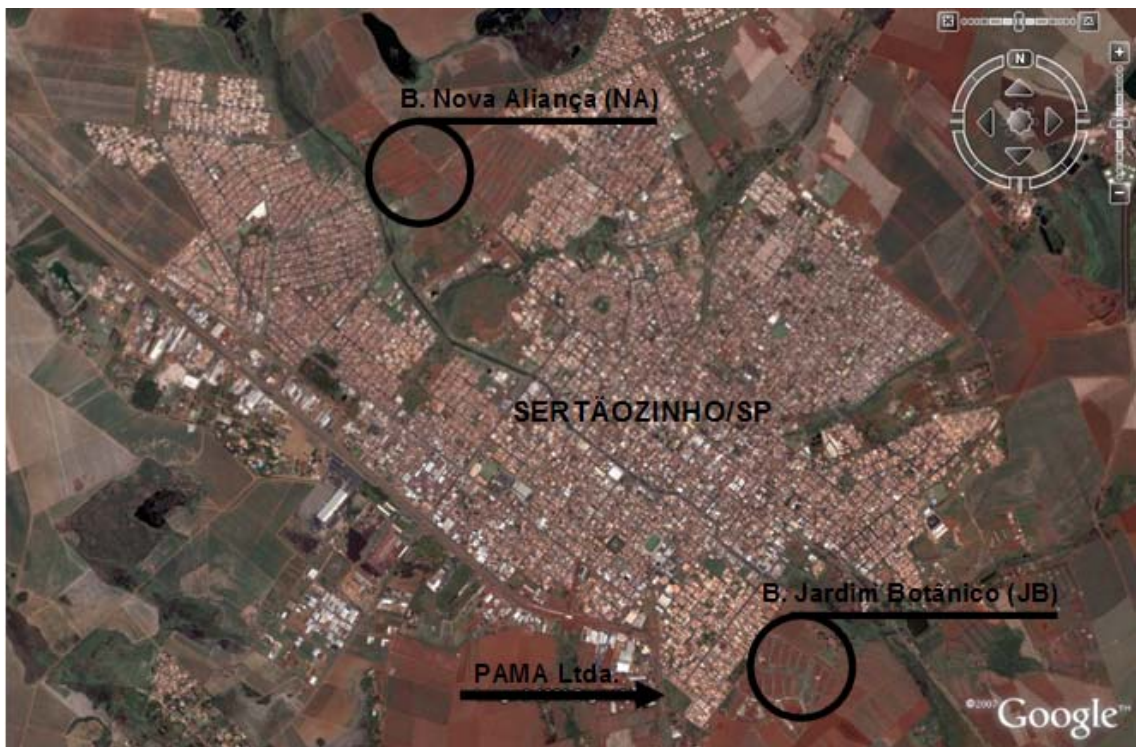


Figura 4.2 - Vista da Região de Sertãozinho. (Google Earth).

Sertãozinho situa-se a noroeste de Ribeirão Preto, a uma distância de, aproximadamente, 25km. Os solos da região são classificados, segundo sua origem pedogenética, quase em sua totalidade, como Latossolos Roxos (LR) na nomenclatura antiga de Camargo *et al.* (1987), ou como Latossolo Vermelho (LV) na nomenclatura nova de EMBRAPA (1999), segundo PRADO (2003).

O LR ou LV, também conhecido como terra roxa legítima, é um dos solos formados a partir da evolução de derrames basálticos e intrusões diabásicas ocorridas durante o período mesozóico superior. Tem ocorrência significativa no Estado de São Paulo, onde ocupa 14,7% da superfície do estado; é um solo profundo, bem drenado, bastante argiloso e de cor vermelha (CORRÊA, 1989).

A partir da análise de mapas pedológicos (ver Figura 4.3) pode-se observar que na região de Sertãozinho não há ocorrência, nas proximidades, de jazidas de solos arenosos para a construção de rodovias e vias urbanas, a cor marrom indica a presença de Latossolo Roxo.

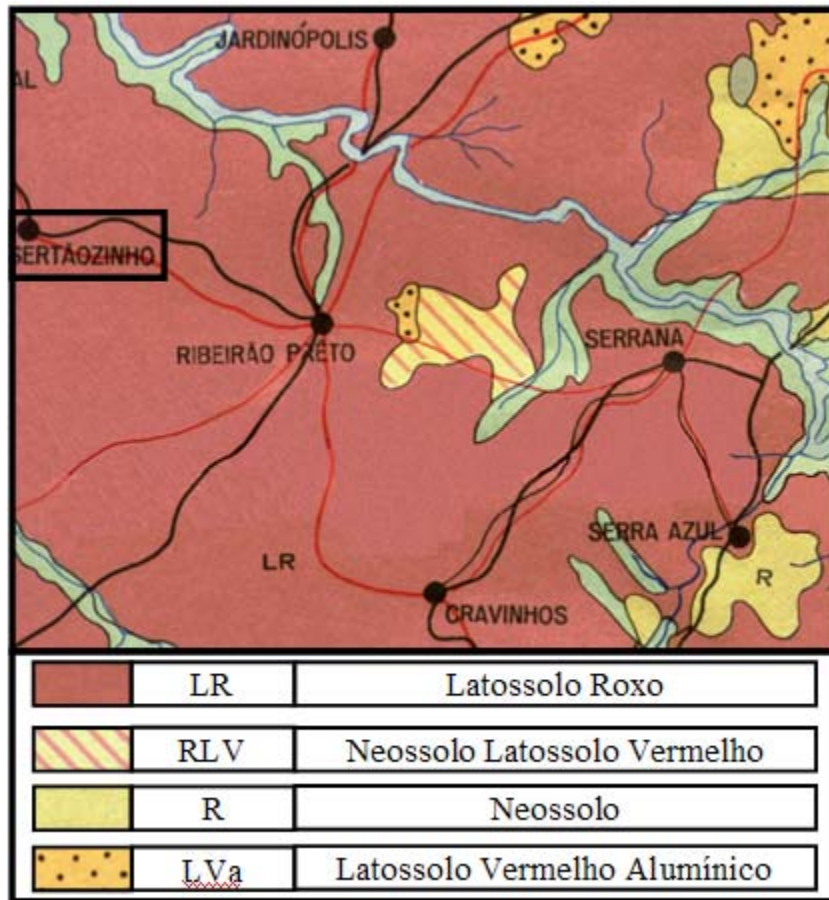


Figura 4.3 - Mapa Pedológico da Região de Sertãozinho/SP.

#### 4.2.2. Areia de Fundição

As areias utilizadas neste trabalho, tanto a Areia Virgem (AV) como a Areia de Fundição (AF) descartada, foram coletadas da empresa Pama Mecânica e Fundição Ltda., situada à Rua Albino Russi, 269 – Parque Industrial - Sertãozinho-SP. O processo de moldagem utilizado nessa empresa de fundição é o de cura a frio (*cold-box*), que utiliza 98,56% de areia de quartzo; 1,2% de resina fenólica e 0,24% de catalisador (20% do teor da resina), sendo a mistura 100% manual; a empresa funde metais ferrosos e não ferrosos.

A areia antes de passar pelo processo de fundição de metais recebe o nome comum de “Areia Virgem” (AV); sua distribuição granulométrica, assim como a da Areia de Fundição, está

apresentada na Figura 4.4, onde pode ser observada a sua uniformidade, antes e depois do processo de fundição.

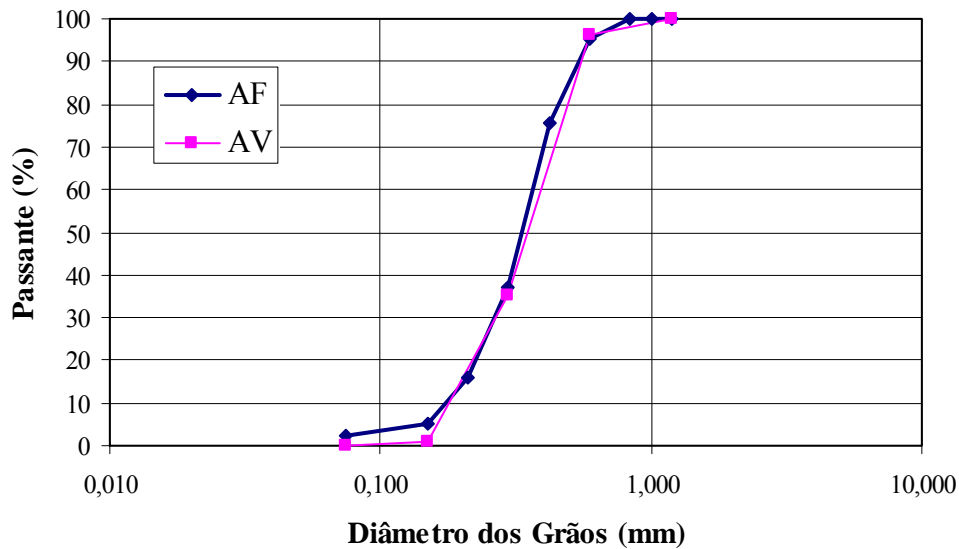


Figura 4.4. - Distribuição granulométrica da areia de fundição utilizada na empresa Pama Mecânica e Fundição Ltda.

### 4.3. MONTAGEM DOS SOLOS ARTIFICIAIS

Após a secagem ao ar, os solos foram destorroados e peneirados na peneira de 2,00 mm de abertura para, posteriormente serem homogeneizados. A areia de fundição foi secada em estufa durante 24 horas à temperatura constante de 110° C; uma vez retirada da estufa a areia foi homogeneizada.

A montagem dos solos artificiais foi efetuada no laboratório adicionando-se ao solo do Jardim Botânico (JB) areia de fundição em diferentes teores (0%, 20%, 40%, 60%, 70%). A mistura foi feita após secagem e sem a adição de água, produzindo-se quantidades de 20kg de solo artificial para cada teor de areia selecionado, e cada solo assim preparado foi armazenado

separadamente em sacos plásticos. Cabe ressaltar que cada solo artificial resultante foi devidamente homogeneizado a fim de obter amostras representativas.

Na Tabela 4.2 pode-se ver a distribuição granulométrica dos solos artificiais com o incremento do teor de areia, utilizando-se como matriz o solo Jardim Botânico (JB).

Tabela 4.2 – Distribuição granulométrica dos solos artificiais para a matriz do solo Jardim Botânico.

<b>Peneiras (mm)</b>	<b>0%de areia % passante</b>	<b>20%de areia % passante</b>	<b>40%de areia % passante</b>	<b>60%de areia % passante</b>	<b>70%de areia % passante</b>
2,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,200	99,84	99,82	99,86	99,88	99,91
0,600	98,83	98,58	98,26	97,32	96,91
0,300	97,70	86,38	76,48	58,99	54,42
0,150	95,80	77,49	62,35	38,99	31,56
0,075	94,51	74,76	59,98	36,71	28,97
0,030	85,04	69,50	56,75	32,19	26,31
0,022	83,43	65,48	53,97	31,11	25,22
0,015	80,75	62,54	52,59	30,56	24,13
0,011	79,67	59,86	49,81	30,02	23,04
0,008	77,52	55,57	48,42	28,39	21,40
0,006	74,30	52,71	45,18	26,30	20,40
0,004	71,62	48,16	38,52	23,58	18,22
0,003	67,80	44,70	37,43	21,71	16,33
0,002	63,39	38,74	32,65	18,38	13,26

A partir dos resultados obtidos nos ensaios executados nas misturas montadas, foi determinada uma porcentagem de areia adicionada ao solo que foi denominada de “Teor Ótimo de Areia de Fundação” por apresentar propriedades mecânicas adequadas para sua utilização em bases e sub-bases de pavimentos urbanos e rodoviários de baixo volume de tráfego.

Para efeitos de comparação, adotou-se o valor do “Teor Ótimo de Areia de Fundação” para testar o solo Jardim Botânico (JB) misturado com Areia Virgem com o propósito de avaliar a

influência do processo de fundição sobre a areia empregada. De igual forma, o solo Nova Aliança (NV) foi misturado com Areia de Fundição e Areia Virgem no “teor ótimo”. Os ensaios desenvolvidos nesses materiais foram o mini-CBR e o triaxial dinâmico.

Para um melhor entendimento, na Figura 4.5 mostra-se a organização da montagem dos solos artificiais (misturas solo-areia) que foi seguido para alcançar os objetivos traçados neste trabalho.

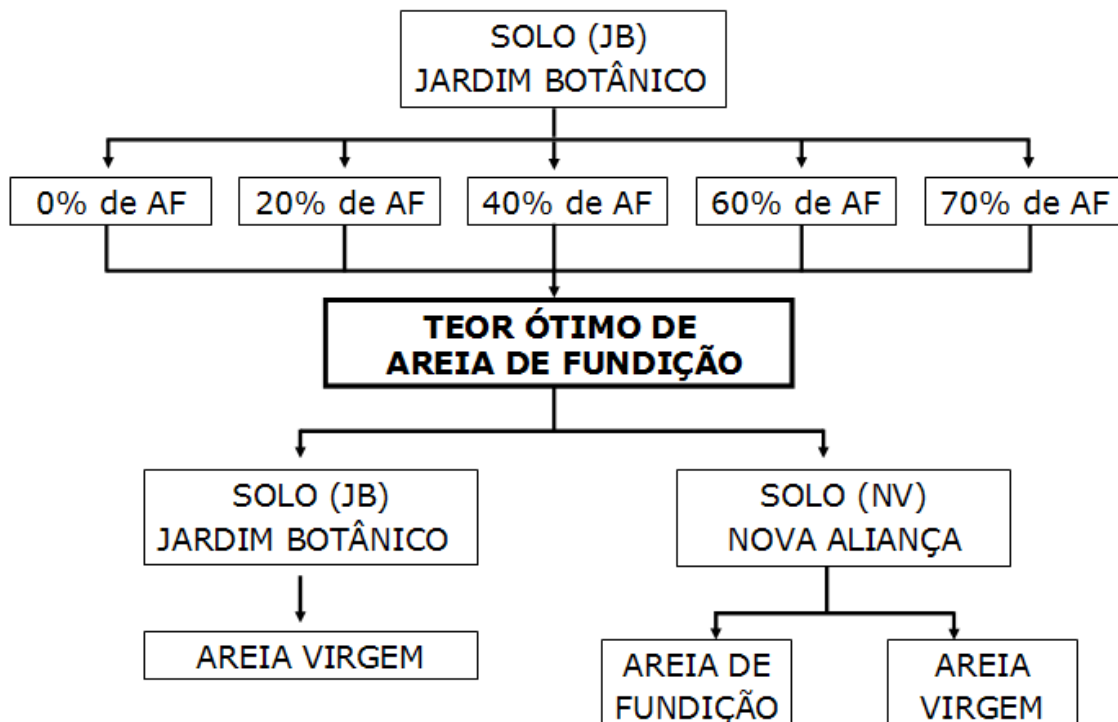


Figura 4.5 - Organograma da montagem dos solos artificiais montados.

## 4.4. MÉTODOS DE ENSAIOS UTILIZADOS

### 4.4.1. Introdução

Com os solos artificiais montados foram executados ensaios de massa específica dos sólidos, distribuição granulométrica por sedimentação, limite de liquidez, limite de plasticidade, mini-

MCV e perda de massa por imersão, mini-CBR, CBR, infiltrabilidade, permeabilidade e triaxial cíclico no Laboratório de Estradas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

As amostras resultantes das misturas solo-areia foram submetidas ao programa de ensaios descrito nos itens seguintes.

#### **4.4.2. Massa Específica dos Sólidos**

Este ensaio foi realizado segundo o método de ensaio “Densidade Real dos Solos” – ME 093-94, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, (DNER) atual DNIT (Departamento Nacional da Infra-Estrutura de Transportes).

#### **4.4.3. Distribuição granulométrica por sedimentação**

A análise granulométrica por sedimentação dos solos artificiais foi executada utilizando-se o método de ensaio “Análise Granulométrica de Solos” – ME 51-94, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, (DNER) atual DNIT. O deflocuante usado para a dispersão das amostras foi o hexametáfosfato de sódio.

#### **4.4.4. Limite de Liquidez**

O valor de limite de liquidez foi determinado conforme o método de ensaio “Determinação do Limite de Liquidez – Método de Referência” ME 122-94, do (DNER) atual DNIT. A



determinação do limite de liquidez foi necessária para que os solos artificiais pudessem ser classificados de acordo com as classificações HRB e UCSC.

#### **4.4.5. Limite de Plasticidade**

O valor do limite de plasticidade foi determinado de acordo com o método de ensaio “Determinação do Limite de Plasticidade” ME 82-94 do DNER (atual DNIT). A determinação do limite de liquidez também foi necessária para que as amostras de solos artificiais pudessem ser classificadas de acordo com as classificações HRB e UCSC.

#### **4.4.6. Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão**

O ensaio MCV (Moisture Condition Value), introduzido por Parsons (1976) e adaptado para corpos de prova de dimensões reduzidas por Sória e Fabbri (1981), facilitou a compreensão do comportamento dos solos lateríticos compactados. Esse ensaio apresenta vantagem sobre o ensaio de compactação tradicional (Proctor), pois fornece uma família de curvas de compactação, ao contrário de somente uma curva em uma energia, utilizando o mesmo número de corpos de prova. Estes autores chamaram o ensaio de mini-MCV.

Os ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão foram executados para fins de classificação dos solos montados através do método MCT. Realizaram-se esses ensaios conforme os procedimentos dos métodos de ensaio: “Solos Compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV” DNER-ME 258/94 e “Solos Compactados em equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão” DNER-ME 256/94. A classificação foi efetuada segundo a norma “Classificação de solos tropicais para finalidades

---

rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura” DNER-CLA 259/96.

#### **4.4.7. Mini-CBR, Expansão e Contração**

O ensaio de mini-CBR foi realizado na energia de compactação intermediária, visando a determinação da capacidade de suporte dos solos e da relação entre índices de suporte (RIS), bem como as características de expansão e contração. Os ensaios foram executados de acordo com os procedimentos descritos nos métodos de ensaio: “Solos Compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão” DNER-ME 254/97.

#### **4.4.8. Ensaio de Infiltrabilidade**

O método de ensaio utilizado para a determinação da infiltrabilidade foi executado segundo descrito por Villibor (1981). Este ensaio tem como objetivo medir a velocidade e a quantidade de água que penetra em camadas de solo (bases), quando chove durante a fase de execução e/ou operação da rodovia. Estima, aproximadamente, quanto uma frente de umidade pode caminhar para dentro do pavimento a partir de uma valeta lateral não revestida e/ou através de locais de concentração e acúmulo de água, próximos ao acostamento. O ensaio serve como balizamento para se determinar a distância em que se deve encontrar o rodeiro externo da pista em relação à borda do acostamento, para dimensionar sua largura, evitando assim a ocorrência de deformação.

**Procedimento de ensaio**

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam um esquema do equipamento utilizado no ensaio. Mede-se no tubo horizontal a quantidade de água que penetra no corpo-de-prova, através de sua base, em função da raiz quadrada do tempo. Para isso, a base do corpo de prova compactado é colocada sobre um recipiente plástico, o qual, na parte superior é constituído de uma placa porosa, este recipiente contém água e está comunicado a um tubo, que se encontra na mesma altura da placa porosa, no qual são feitas as medidas de sorção capilar.

Para determinar o coeficiente de sorção capilar de água empregam-se cinco corpos-de-prova compactados nas umidades obtidas no ensaio de mini-CBR e, com isto, traça-se uma curva com os valores do coeficiente de sorção em função do teor de umidade de compactação. A partir da curva traçada é possível obter o coeficiente de sucção capilar de água correspondente ao teor ótimo.

Para cada teor de umidade de compactação obtém-se então um valor do coeficiente de sorção capilar de água ( $K_c$ ) através da Expressão 4.1:

$$K_c = \frac{q}{S \times \sqrt{t}} \left( \frac{cm}{\sqrt{\text{min}}} \right) \quad (4.1)$$

Onde:

$K_c$  = coeficiente de sucção de água,  $\left( \frac{cm}{\sqrt{\text{min}}} \right)$ ;

$q$  = quantidade de água absorvida pelo corpo de prova, em  $\text{cm}^3$ ;

$S$  = área da seção transversal do corpo de prova, em  $\text{cm}^2$ ;

$t$  = intervalo de tempo decorrido desde o início do ensaio, em minutos;

O ensaio está normalizado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER-ME 194/88.

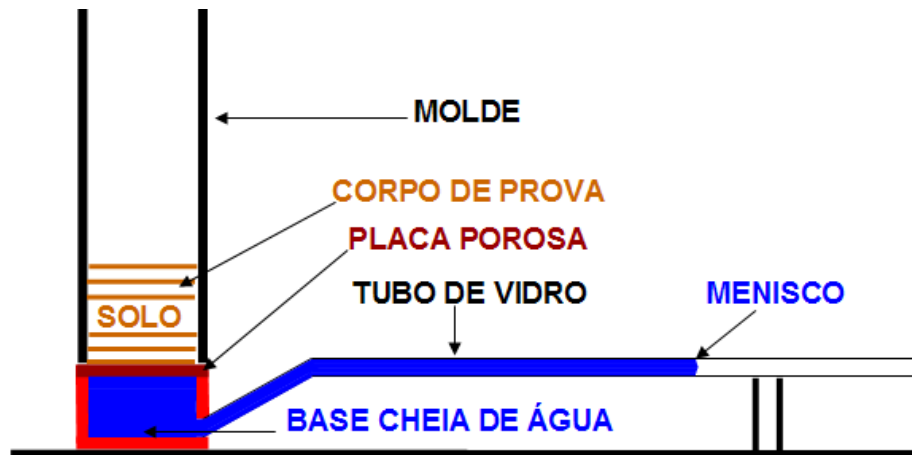


Figura 4.6 - Esquema do ensaio de sorção capilar de água.

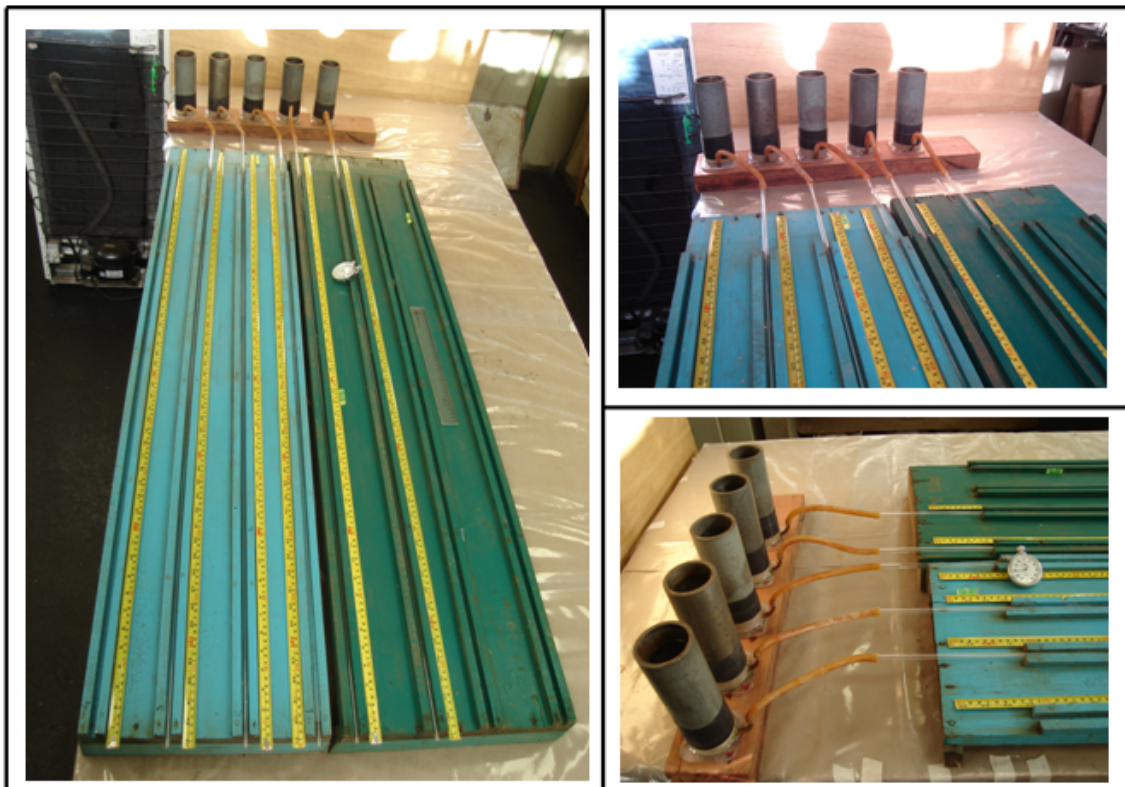


Figura 4.7 - Equipamento utilizado no ensaio de sorção de água.

#### 4.4.9. Ensaio de Permeabilidade

O método de ensaio utilizado para a determinação da permeabilidade foi o desenvolvido e descrito por Villibor (1981). Este método determina, mediante o uso do ensaio de carga variável, o coeficiente de permeabilidade de solos compactados em laboratório segundo o método de compactação Mini-CBR.

Utilizam-se cinco corpos-de-prova produzidos nas umidades obtidas no ensaio de Mini-CBR e, deste modo, é possível traçar uma curva de variação do coeficiente de permeabilidade em função do teor de umidade de compactação, e encontrar o valor do coeficiente de permeabilidade correspondente ao teor de umidade ótimo. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram o equipamento para o ensaio de permeabilidade.

Para cada teor de umidade de compactação obtém-se um valor do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) utilizando-se a Expressão 4.2:

$$k = \frac{2,3 \times L \times a}{60 \times S \times t} \times \log \frac{h_1}{h_2} \quad (4.2)$$

Onde:

$k$  = coeficiente de permeabilidade, em cm/s;

$L$  = altura do corpo de prova, em cm;

$S$  = área da seção transversal do corpo de prova, em cm<sup>2</sup>;

$h_1$  = carga hidráulica no instante  $t_1$  (cm);

$h_2$  = carga hidráulica no instante  $t_2$  (cm);

$t$  =  $t_1 - t_2$  em minutos;

$a$  = área da seção transversal da bureta, em  $\text{cm}^2$ ;

O método está normalizado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo DER/SP-ME 194/88.

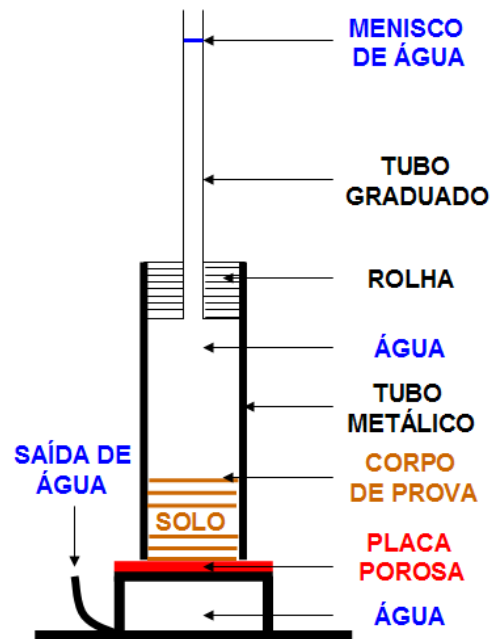


Figura 4.8 - Esquemática do ensaio de permeabilidade.

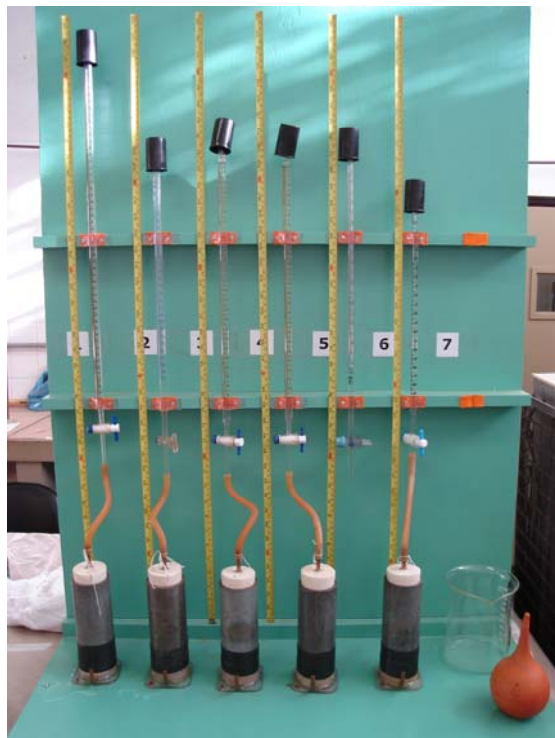


Figura 4.9 - Equipamento utilizado para o ensaio de Permeabilidade.

#### 4.4.10. CBR

O ensaio de CBR (Califórnia Bearing Ratio) dispensa qualquer descrição, já que é bastante usado no Brasil para obras viárias. Uma de suas grandes vantagens é ser um ensaio bem difundido entre os engenheiros rodoviários, que desenvolveram, com base na experiência, uma sensibilidade em relacionar o valor de suporte com a qualidade do material de subleito e para a estrutura de pavimento propriamente dita (BERNUCCI, 1995).

A capacidade de suporte foi determinada através de ensaios CBR, realizado de acordo com os procedimentos descritos pelo método de ensaio “CBR” do DNER-ME 49-94. Os corpos de prova foram moldados nas condições de umidade ótima e da massa específica seca máxima na energia intermediária, obtidas do ensaio de mini-CBR. Foi utilizado esse procedimento uma vez que, segundo Vilar & Röhm (1994), os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima obtidos do ensaio de compactação são apenas 1,7% menores que os valores

---

obtidos no ensaio de mini-CBR, o que justifica a possível utilização dos resultados do ensaio de mini-CBR para realização dos ensaios de CBR (OLIVEIRA, 2003).

#### **4.4.11. Ensaio Triaxial Cíclico**

O ensaio foi realizado segundo a norma “*Standard Method of Test for determining the resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*”(AASHTO Designation: T 307-99). Esse método descreve procedimentos de preparação e ensaio de solos de subleito e materiais de base e sub-base não tratados, para determinação do Módulo de Resiliência (MR) sob condições que simulam o estado físico e o estado de tensões dos materiais sob pavimentos flexíveis sujeitos a cargas de roda. Os níveis de tensões a que são submetidos os corpos-de-prova para determinação do MR são determinados por sua localização na estrutura do pavimento. Amostras de base e sub-base estão sujeitas a diferentes níveis de tensões quando comparado a amostras do subleito.

A Tabela 4.3 apresenta a seqüência das tensões usadas para ensaio de materiais de sub-base e base, definidas pela AASHTO Designation: T 307-99.



Tabela 4.3 – Sequência de tensões de ensaio para base/sub-base segundo a AASHTO T 307-99.

Seqüência n <sup>o</sup>	Tensão confinante $\sigma_3$ (kPa)	Tensão máxima $\sigma_a$ (kPa)	Tensão de contato $\sigma_c$ (kPa)	Tensão desvio $\sigma_d$ (kPa)	Número de aplicações de carga
0	103,4	103,4	10,3	93,1	500-1000
1	20,7	20,7	2,1	78,6	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	100
5	34,5	68,9	6,9	62	100
6	34,5	103,4	10,3	93,1	100
7	68,9	68,9	6,9	62,2	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	100
11	103,4	103,4	10,3	93,1	100
12	103,4	206,8	20,7	196,1	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

#### 4.4.11.1. Equipamento

O equipamento utilizado nessa pesquisa foi projetado e construído no Departamento de Transportes da EESC-USP pelo Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri. Na Figura 4.10 apresenta-se o equipamento do ensaio, a Figura 4.10 (a) mostra uma imagem geral da prensa e computador, onde são obtidos os dados do ensaio; (b) apresenta em detalhe a prensa com a câmara triaxial e (c) ilustra um detalhe do corpo-de-prova (CP) com a membrana e os LVDTs.

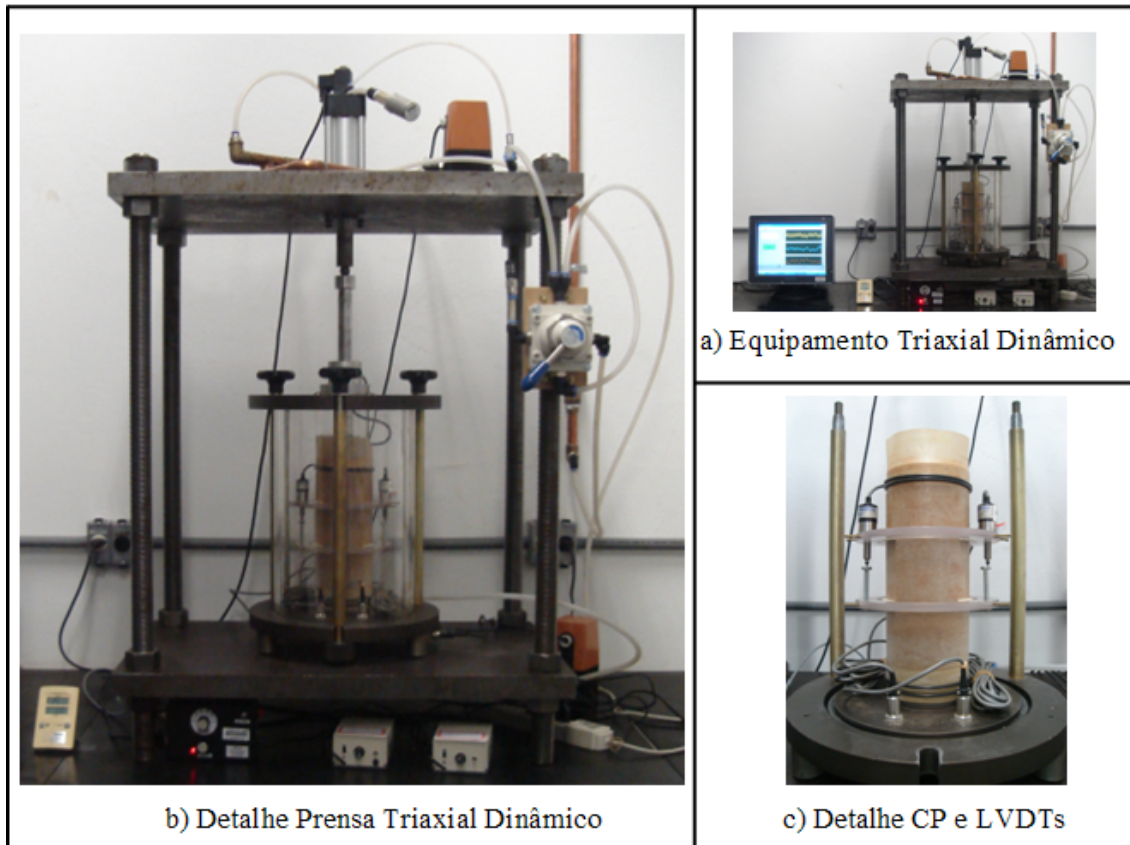


Figura 4.10 - Equipamento Triaxial Dinâmico, Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes, EESC-USP.

A prensa usada é de fabricação própria e possui um sistema de carregamento pneumático, no qual a tensão desvio e a tensão confinante são controladas pelo computador através de válvulas proporcionais. A célula de carga é da marca GEFTRAN (Indústria Italiana), com capacidade de carga de 5,0 kN e posicionada internamente à câmara triaxial. O fluido utilizado para o confinamento dos corpos-de-prova no interior da câmara triaxial é ar. Os deslocamentos do corpo-de-prova são medidos com o auxílio de dois LVDTs, instalados no terço médio do corpo-de-prova.

A aquisição de dados foi realizada através de um programa desenvolvido no Departamento de Transportes, pelo Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri, em plataforma LabView. A Figura 4.11 apresenta a tela fornecida pelo programa onde nota-se que o programa permite a leitura

de três canais individualmente, onde são adquiridas as informações sobre os deslocamentos (2) e a carga cíclica (1).

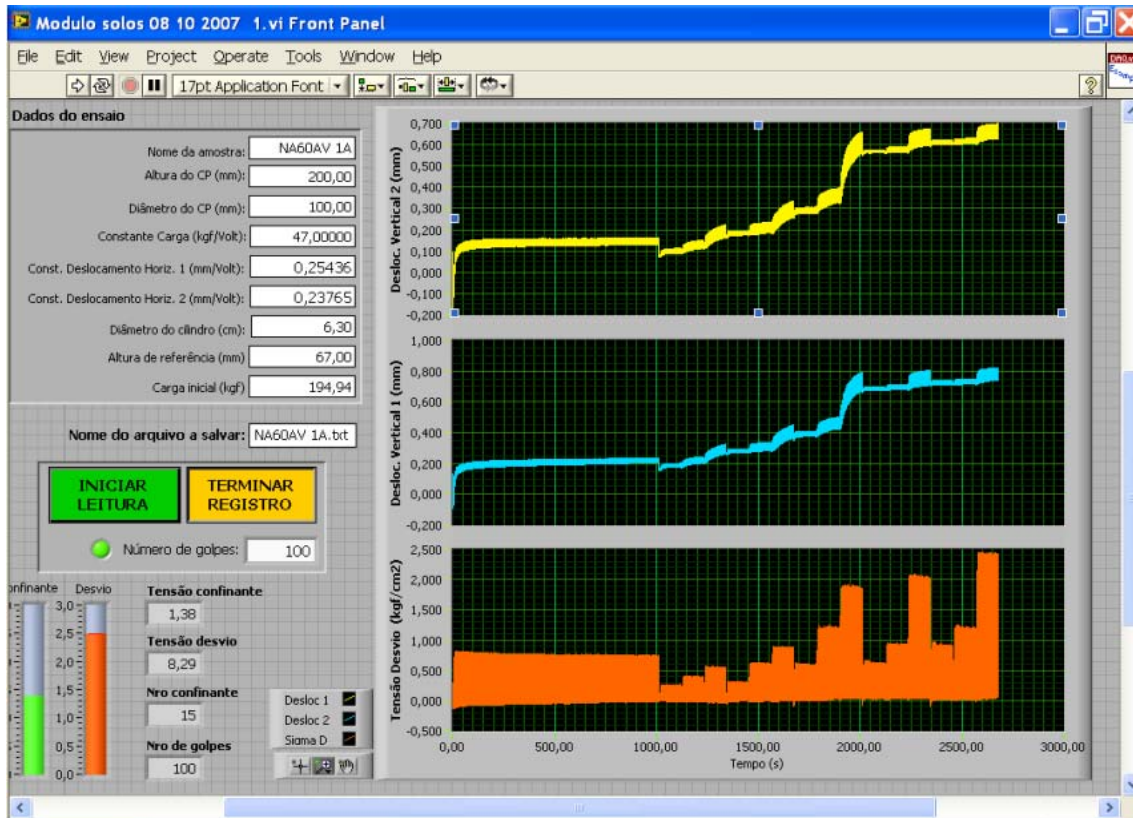


Figura 4.11 - Detalhe da saída do programa de aquisição de dados em plataforma LabView.

Dessa forma foi possível determinar a carga cíclica efetivamente aplicada em cada ciclo de carregamento e os deslocamentos resultantes. O deslocamento resiliente de cada ciclo é obtido pela média dos deslocamentos registrados nos dois LVDTs.

#### 4.4.11.2. Moldagem dos Corpos-de-Prova

Ao solo previamente seco ao ar foi adicionada água na quantidade suficiente para atingir-se a umidade desejada; logo, o material foi homogeneizado e embalado em saco plástico. Após a homogeneização, foi verificado se o teor de umidade foi atingido. Os corpos-de-prova foram

moldados depois de 24 horas, período usado para a determinação da umidade e também para a equalização da umidade da amostra. A moldagem foi efetuada só quando a umidade da amostra se enquadrou no intervalo de  $\pm 0,5\%$  da umidade alvo.

O processo de moldagem foi realizado estaticamente em cinco camadas, para corpos-de-prova de 200mm de altura e 100mm de diâmetro, utilizando a prensa mostrada na Figura 4.12. A desmoldagem dos corpos-de-prova efetuou-se com a ajuda de um macaco hidráulico mostrado na Figura 4.13.



Figura 4.12 - Prensa Hidráulica utilizada na moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio Triaxial Dinâmico.

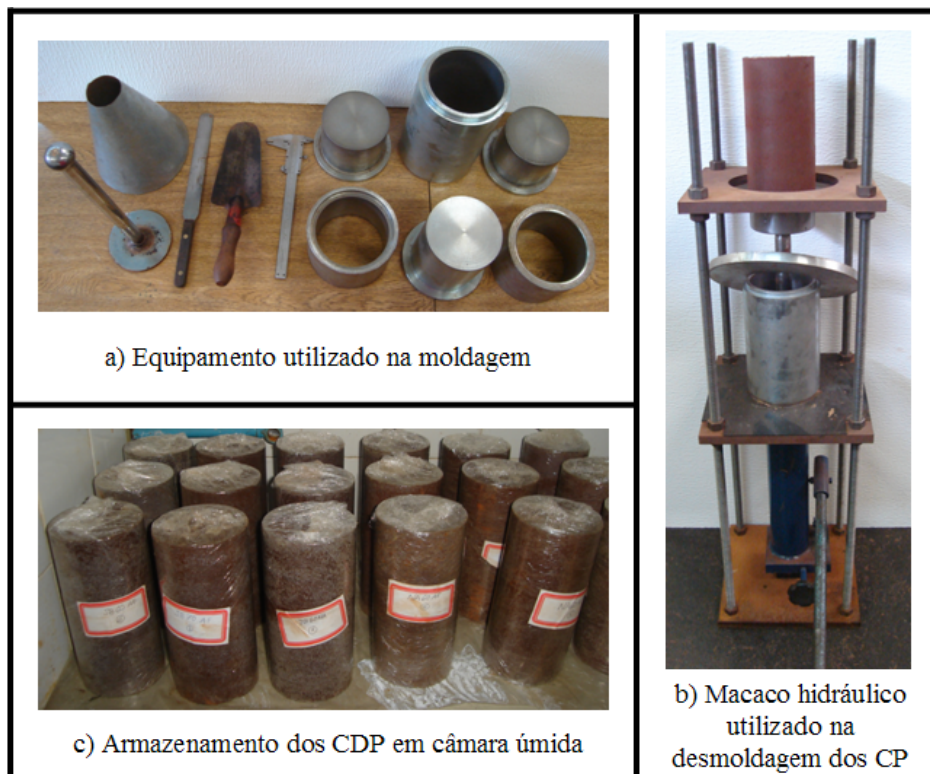


Figura 4.13 - Detalhes do processo de moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio Triaxial Dinâmico.

Após a moldagem de cada corpo-de-prova procedeu-se à determinação de sua massa e geometria (altura e diâmetro), para obter o grau de compactação que deve estar no intervalo de 99% a 101%. Logo depois, os corpos-de-prova foram envolvidos com filme plástico e armazenados em câmara úmida (ver Figura 4.12) para evitar a perda de umidade, e ensaiados antes de completar cinco dias, segundo recomendação da norma AASHTO T 307-99.

#### 4.4.12. Ensaio Ambientais

Com o propósito de alcançar os objetivos deste trabalho, também foi necessário verificar se a areia de fundição de descarte incorporada ao solo contamina ou não o meio ambiente e, portanto, constitui-se ou não em um risco potencial à saúde. Com essa finalidade foram executados os ensaios seguintes:

- lixiviação de resíduos, (ABNT-NBR 10005/2004);

- solubilização de resíduos, (ABNT-NBR 10006/2004);
- classificação de Resíduos Sólidos (massa bruta), (ABNT-NBR 10004/2004).

#### **4.4.12.1 Ensaio de Classificação de Resíduos Sólidos (Massa Bruta)**

O ensaio de classificação de resíduos sólidos tem por objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Segundo a ABNT-NBR 10004/2004, os resíduos são classificados em:

- Resíduos Classe I – perigosos: aqueles que apresentam periculosidade, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem exibir risco à saúde e/ou riscos ao meio ambiente (resíduo manuseado ou destinado de forma inadequada). Além da periculosidade, podem apresentar uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Resíduos Classe II – não inertes: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I (perigosos) ou de resíduo classe III (inertes), podendo ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos Classe III – inertes: quaisquer resíduos que quando amostrado de forma adequada e submetidos a um contato estático ou dinâmico com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, segundo ensaio de solubilização (NBR 10006/2004), não apresentarem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

#### **4.4.12.2 Ensaio de Lixiviação de Resíduos**

O ensaio de lixiviação de resíduos é executado com objetivo de separar substâncias contaminantes, fenóis, metais pesados e outras, ou não, contidas nos resíduos, neste caso areia de fundição, por meio de lavagem e percolação e desta forma, classificar esse resíduo, conforme seu potencial contaminante, segundo é descrito pela norma da ABNT-NBR 10004/2004.

#### **4.3.12.3. Ensaio de Solubilização de Resíduos**

O ensaio de solubilização de resíduos (NBR 10006/2004) foi executado com o propósito de diferenciar os resíduos da classe II (não inertes), que é o caso da areia de fundição utilizada neste estudo, dos resíduos classe III (inertes), sendo aplicado somente para resíduo no estado físico sólido.

Os ensaios classificatórios de resíduos, lixiviação, solubilização e massa bruta, foram realizados em amostras de: areia de fundição (resíduo de fundição), solo do Jardim Botânico e mistura de 50% de solo Jardim Botânico com 50% de areia de fundição.

---

## **CAPITULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

---

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de laboratório executados com os solos artificiais, acompanhados de uma análise crítica, objetivando identificar padrões de comportamento no tocante às características mecânicas e ambientais.

### **5.1. INTRODUÇÃO**

Os solos artificiais (misturas solo-areia), como se viu no capítulo anterior, foram submetidos aos ensaios de limites de consistência, massa específica dos sólidos, granulometria por sedimentação, mini-MCV, perda de massa por imersão, mini-CBR com e sem imersão, expansão e contração na energia intermediária, infiltrabilidade e permeabilidade, CBR na energia intermediária, triaxial dinâmico e ensaios ambientais..

Dos ensaios realizados, os de índices físicos e granulometria tiveram por finalidade a classificação dos solos através dos sistemas usuais (HRB e USCS). Essas classificações estrangeiras, embora inadequadas aos solos tropicais, foram utilizadas por constituírem uma referência aos profissionais ligados ao uso de solos para fins de construção rodoviária.

Os ensaios mini-MCV e perda de massa por imersão foram realizados para classificação dos solos pelo sistema MCT, com o objetivo de obter uma previsão de suas propriedades tecnológicas.



Através dos ensaios mini-CBR, expansão e contração, na energia intermediária, foram determinadas as propriedades mecânicas, umidade ótima, massa específica seca máxima, mini-CBR imediato, mini-CBR após 24h de imersão, expansão e contração. Uma vez obtidas tais propriedades, foi analisada a variação de cada uma delas em função do teor de areia adicionada ao solo.

Os ensaios de infiltrabilidade e permeabilidade, se bem não são regularmente executados para fins rodoviários, foram utilizados nesta pesquisa para analisar a variação dessas propriedades com o aumento do teor de areia de fundição no solo.

O ensaio de CBR na energia intermediária foi executado a partir dos dados obtidos no mini-CBR, a fim de obter o valor da capacidade de suporte conhecido mundialmente e obter o valor da expansão tradicional, depois de quatro dias de imersão dos corpos de prova.

Com o propósito de avaliar o comportamento mecânico, tanto os solos naturais como os artificiais, foram submetidos ao ensaio triaxial dinâmico, para serem obtidos os modelos matemáticos do Módulo de Resiliência, como uma ferramenta adicional de análise.

Finalmente são apresentados neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios ambientais – massa bruta, lixiviação e solubilização, que foram executados na BIOAGRI Ambiental Ltda. e no Laboratório de Saneamento da EESC-USP.

## 5.2. MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

A determinação do valor de massa específica dos sólidos foi realizada para os solos artificiais usando-se como matriz o solo Jardim Botânico, e os resultados são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Massa específica dos sólidos para a matriz Jardim Botânico.

% de areia adicionada	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
0	3,124
20	2,964
40	2,812
60	2,782
70	2,724

Na Figura 5.1 é mostrada a variação do valor da massa específica dos sólidos; nela pode-se verificar, como era esperado, que com o aumento do teor de areia na mistura a massa específica dos sólidos diminui.

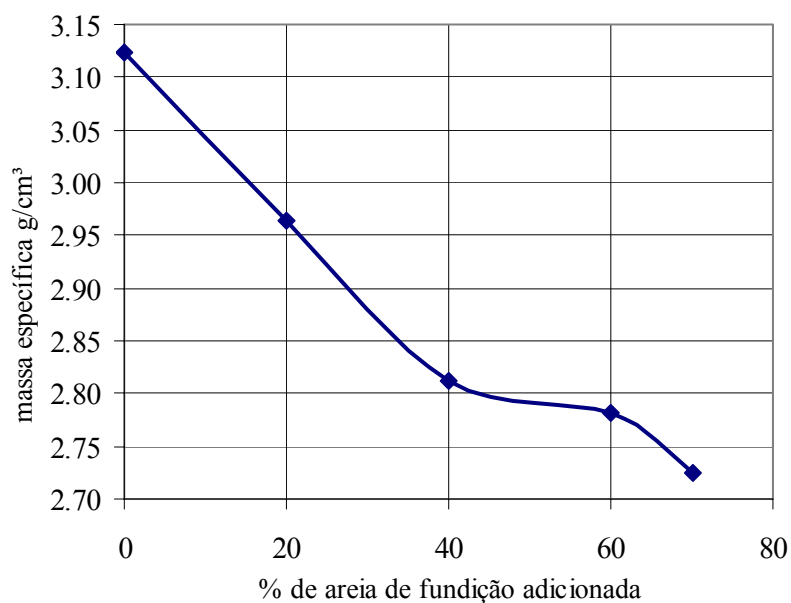


Figura 5.1 - Massa específica dos sólidos dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.

### 5.3. DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DAS MISTURAS SOLO-AREIA

A análise granulométrica por sedimentação foi executada nos solos artificiais montados em laboratório. Verifica-se na Figura 5.2 a variação das curvas granulométricas com o aumento do teor de areia.

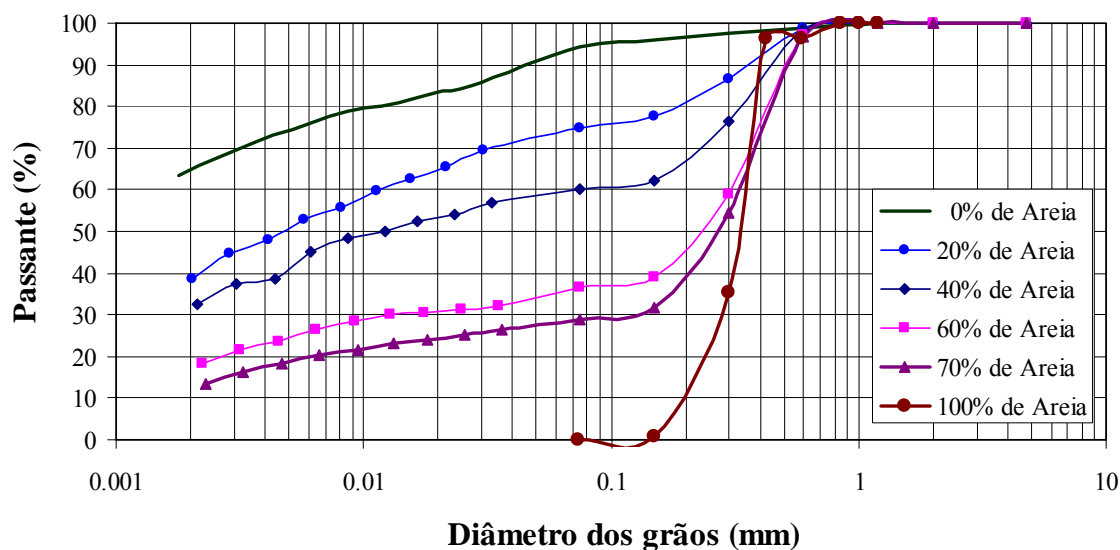


Figura 5.2 - Curvas granulométricas dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.

### 5.4. LIMITES DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE

Os valores do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade obtidos para os solos artificiais são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade para a matriz de solo Jardim Botânico.

% de areia	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0	47	31	16
20	40	24	16
40	32	20	12
60	27	19	8
70	23	15	8

Na Figura 5.3 são apresentadas as variações dos limites de consistência dos solos artificiais, na qual nota-se que tanto o valor do Limite de Liquidez como o do Índice de Plasticidade decrescem com o aumento do teor de areia.

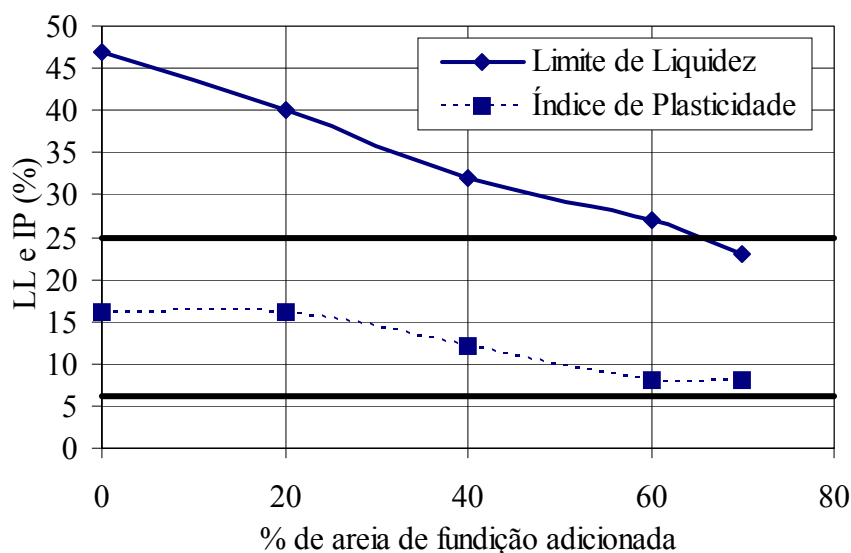


Figura 5.3 - Limites de consistência dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.

### 5.5. CLASSIFICAÇÕES MCT, HRB E USCS

Uma vez obtidos os resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos, limites de consistência, granulometria, mini-MCV e perda massa por imersão, procedeu-se à classificação dos solos artificiais. Os resultados das classificações MCT, HRB e USCS são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultados das classificações MCT, HRB e USCS para os solos artificiais com matriz do Jardim Botânico.

% de areia de fundição	MCT	HRB	USCS
0	LG'	A-7-5	ML
20	LG'	A-6	CL
40	LA'	A-6	CL
60	LA'	A-4	SM-SC
70	LA'	A-2-4	SM-SC

Comparando os resultados apresentados na Tabela 5.3 com os contidos na proposta por Nogami & Villibor (1995), mostrada no Capítulo 3, para orientar a utilização rodoviária dos solos da classificação MCT, pode-se verificar que os resultados são bastante parecidos com os esperados.

Para que os solos possam ser classificados pelo método MCT é necessária a determinação dos coeficientes  $c'$  e  $e'$ , obtidos dos ensaios de mini-MCV e de perda de massa por imersão.

As classes MCT dos solos artificiais são apresentadas na Figura 5.4. Nela percebe-se que o índice  $c'$  fez um caminhamento da direita para a esquerda, desde um valor maior, igual a 2,25, para o solo sem adição de areia, até um valor menor, igual a 0,95, para o solo com 70% de areia adicionada, como era esperado, uma vez que o  $c'$  traduz a argilosidade do solo, conforme Nogami e Villibor (1995). De maneira análoga, o índice  $e'$  manteve-se aproximadamente constante (variando de 0,95 a 1,12), já que foi utilizado o mesmo solo para todos os teores de areia de fundição, também concordando, de certa maneira, com o previsto pelos mesmos autores, já que esse índice traduz o “caráter” laterítico dos solos e o solo argiloso matriz manteve-se o mesmo.

O comportamento do  $c'$  nesta pesquisa difere do observado por Barroso (1996) e Santana (1998), pois nesses estudos esse índice, na maioria dos casos, não representou diretamente a quantidade de argila presente nas misturas; do mesmo modo, o índice  $e'$  nessas pesquisas não apresentou valor constante, quando comparadas misturas montadas a partir de uma mesma matriz, ao contrário do que aconteceu neste trabalho.



### 5.6.1. Solos com a matriz do solo Jardim Botânico (JB)

#### 5.6.1.1. Umidade Ótima

Os resultados da variação da umidade ótima em função do teor de areia adicionado ao solo Jardim Botânico encontram-se na Figura 5.5. Pode ser observado que com o aumento do teor de areia adicionada no solo a umidade ótima diminui; de acordo com a literatura esse comportamento estava previsto, uma vez que a superfície específica do material diminui com a diminuição de finos presentes (solo), ocasionando menor absorção de água pelas partículas.

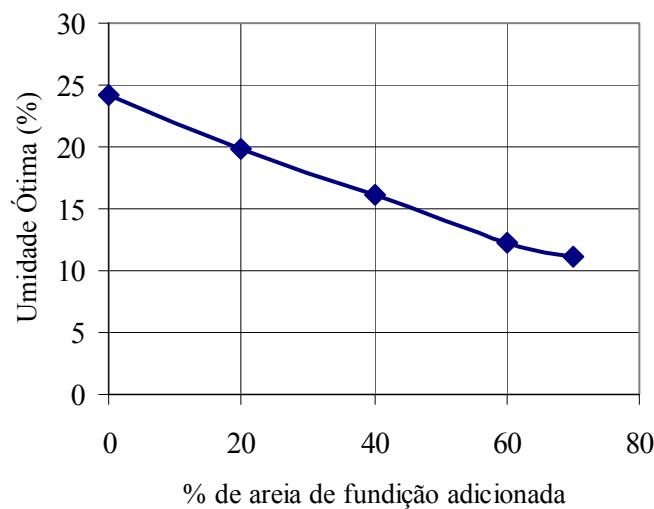


Figura 5.5 - Variação da umidade ótima em função do teor de areia de fundição.

#### 5.6.1.2. Massa Específica Aparente Seca Máxima

Na Figura 5.6 são apresentados os resultados da variação da massa específica seca máxima dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico em função do teor de areia de fundição adicionada. Observa-se que a massa específica aumentou com o incremento do teor de areia presente no solo, conforme era esperado segundo a literatura estudada.

Esse aumento da massa específica com o aumento do teor de areia no solo, segundo Santana (1998) tem um limite, que corresponde ao valor ideal de teor de fração grossa, que neste caso corresponde à areia, já que a partir desse valor, acontece uma diminuição na massa específica, devido à falta de finos para o preenchimento dos vazios existentes entre os grãos da fração de areia.

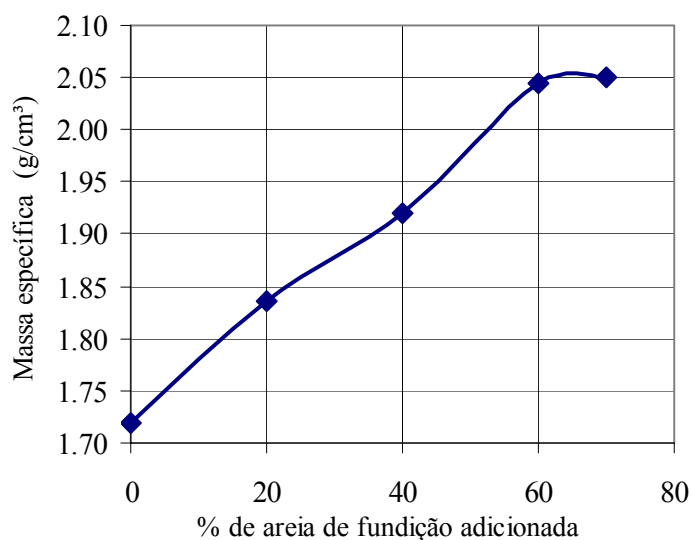


Figura 5.6 - Variação da massa específica seca máxima dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.

### 5.6.1.3. Mini-CBR Imediato

O comportamento do mini-CBR imediato em função da porcentagem de areia de fundição adicionada ao solo Jardim Botânico é apresentado na Figura 5.7. Pode-se verificar que não houve um aumento desse índice de suporte em função do aumento do teor de areia, provavelmente pela uniformidade do tamanho dos grãos da areia utilizada. Entretanto, constata-se que foi obtido para 60% de areia adicionada um valor de 52% para o mini-CBR imediato e 48%, após 24h de imersão.



#### 5.6.1.4. Mini-CBR após 24 Horas de Imersão

O comportamento do mini-CBR após 24 horas de imersão é apresentado Figura 5.7, onde pode ser acompanhada sua variação em função do teor de areia de fundição adicionada ao solo Jardim Botânico. Apesar do gráfico não apresentar uma tendência crescente constante, pode-se verificar que para todos os teores de areia adicionada ao solo, o valor do mini-CBR após imersão aumentou, apresentando um valor máximo para 60% de teor de areia.

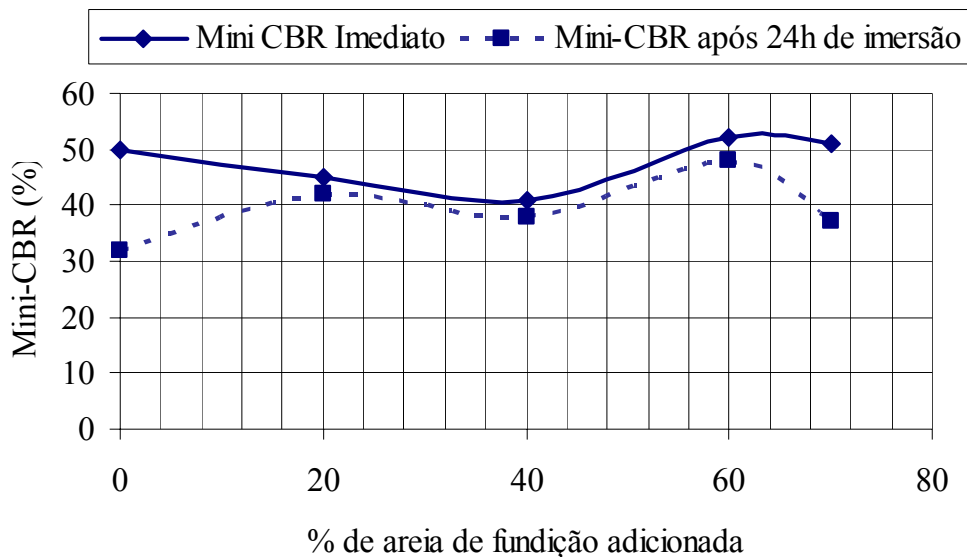


Figura 5.7 – Variação do mini-CBR imediato e após 24h de imersão em função do teor de areia de fundição adicionado.

Assim, verifica-se que o solo com 60% de areia de fundição foi o que apresentou melhores propriedades mecânicas, com valores de mini-CBR após imersão de 24h igual a 48%, expansão nula, contração de 0,2% e perda de suporte por imersão da ordem de apenas 8%. Segundo as especificações do DER-SP (1991), Seção 3.09-88 - Base de Solo Arenoso Fino Laterítico, tanto esse solo, quanto aquele com 70% de areia de fundição atenderiam os requisitos mínimos para serem utilizados em camadas de bases.

### 5.6.1.5. Expansão

A expansão, tanto para o solo Jardim Botânico em estado puro, quanto para os solos artificiais em todos os teores de areia de fundição adicionada, foi nula (ver Figura 5.8). A ausência ou baixo valor da expansão é uma característica típica dos solos lateríticos (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

### 5.6.1.6. Contração

Na Figura 5.8 encontram-se os resultados de variação da contração em função da porcentagem de areia de fundição adicionada ao solo Jardim Botânico. Nela pode-se verificar que a contração diminui com o aumento do teor de areia, de um valor inicial de 1,80% para o solo em JB em estado natural até 0,20% de contração para 70% de areia de fundição adicionada. Este fenômeno era esperado, pois a contração depende mais significativamente das características e da porcentagem de fração fina do solo.

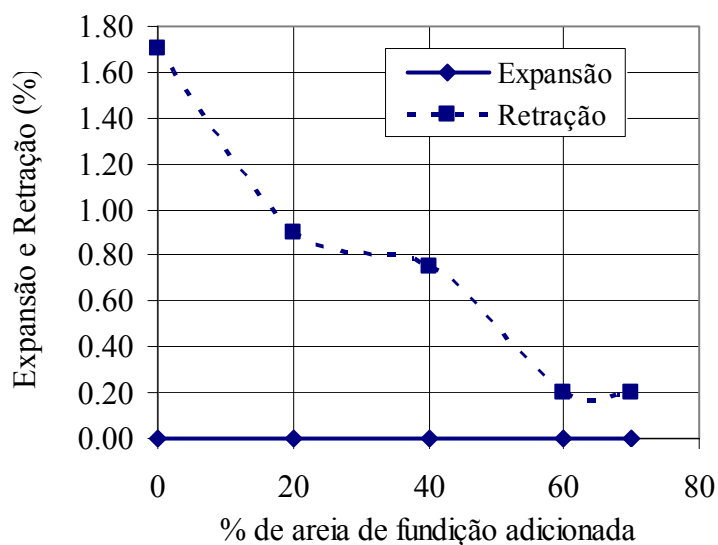


Figura 5.8 - Variação da expansão e da contração em função do teor de areia de fundição adicionado.

### 5.6.1.7. Relação entre índices de suporte (RIS)

Os resultados da relação entre índices de suporte (RIS) em função do teor de areia de fundição adicionada ao solo Jardim Botânico estão apresentados na Figura 5.9, onde pode-se observar valores superiores a 50% para todos os de teores de areia de fundição adicionada ao solo JB, fator favorável para a aplicação dos materiais como bases e sub-bases na construção de rodovias.

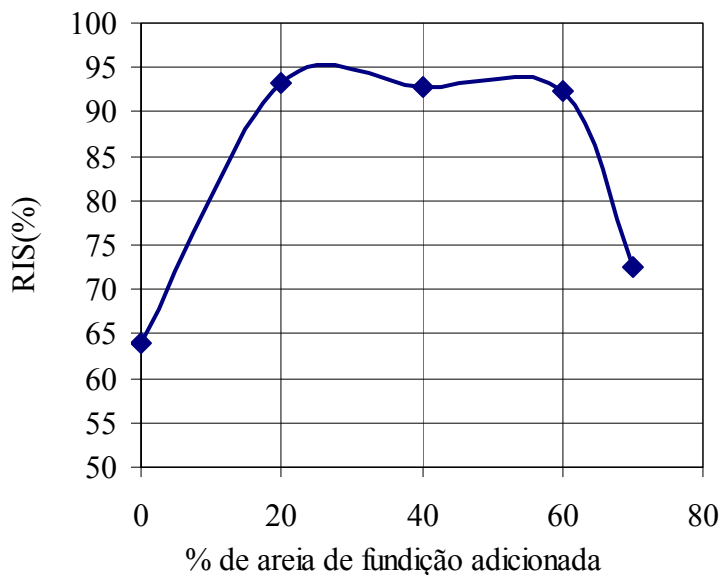


Figura 5.9 - Variação do valor de RIS em função do teor de areia de fundição.

### 5.6.2. Solos artificiais montados com o “teor ótimo de areia de fundição”

Como foi explicado anteriormente, adotou-se um “teor ótimo de areia de fundição” com base nos resultados obtidos nos diferentes ensaios. O teor de areia de fundição adicionado ao solo Jardim Botânico que apresentou propriedades satisfatórias, do ponto de vista de sua aplicação em bases e sub-bases de pavimentos, foi de 60%. Baseado nesse teor foram montados os solos artificiais utilizando-se a Areia de Fundição e a Areia Virgem e os solos Jardim Botânico (JB) e Nova Aliança (NV), cujos resultados dos ensaios de mini-CBR são discutidos a seguir.

Na Tabela 5.4 são mostrados os resultados obtidos no solo Jardim Botânico com a incorporação de 60% de Areia de Fundação (JB 60 AF) e 60% de Areia Virgem (JB 60 AV), assim como no solo Nova Aliança com a adição de 60% de Areia de Fundação (NV 60 AF) e 60% de Areia Virgem (NV 60 AV). Nessa tabela pode-se observar a variação dos valores das propriedades obtidas dos ensaios de mini-CBR para os diferentes solos artificiais (misturas solo-areia).

Tabela 5.4 – Resultados de mini-CBR com a adição de 60% Areia de Fundação (AF) e Areia Virgem (AV), para a matriz Jardim Botânico (JB).

<b>Propriedade</b>	<b>JB 60 AF</b>	<b>JB 60 AV</b>	<b>NV 60 AF</b>	<b>NV 60 AV</b>
mini-CBR imediato (%)	52	65	46	53
mini-CBR imerso (%)	48	55	43	46
RIS (%)	92	85	93	87
MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	2,045	2,060	2,095	2,080
umidade ótima (%)	12,30	11,90	12,20	11,80
expansão (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
contração (%)	0,20	0,27	0,10	0,20

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram que os valores de mini-CBR imediato e após imersão são maiores para o solo artificial com Areia Virgem, quando comparado aos valores obtidos nos solos artificiais montados a partir da Areia de Fundação, tanto para a matriz Jardim Botânico quanto para a matriz Nova Aliança.

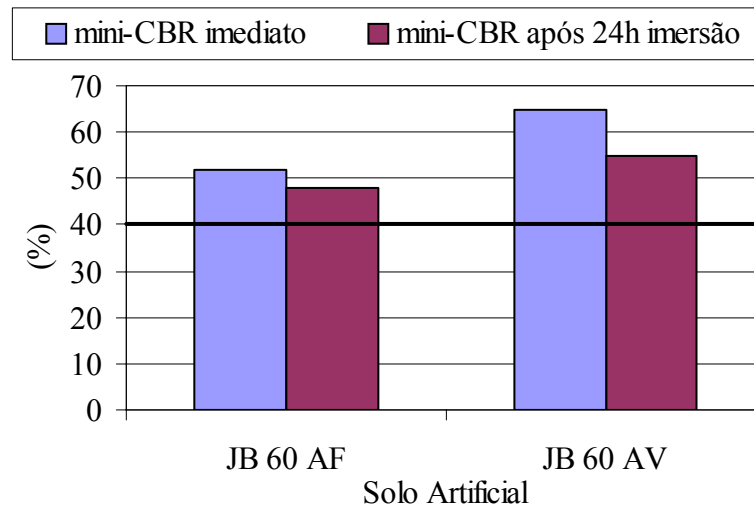


Figura 5.10 - Mini-CBR imediato e após imersão para a matriz Jardim Botânico misturada com Areia de Fundição e Areia Virgem.

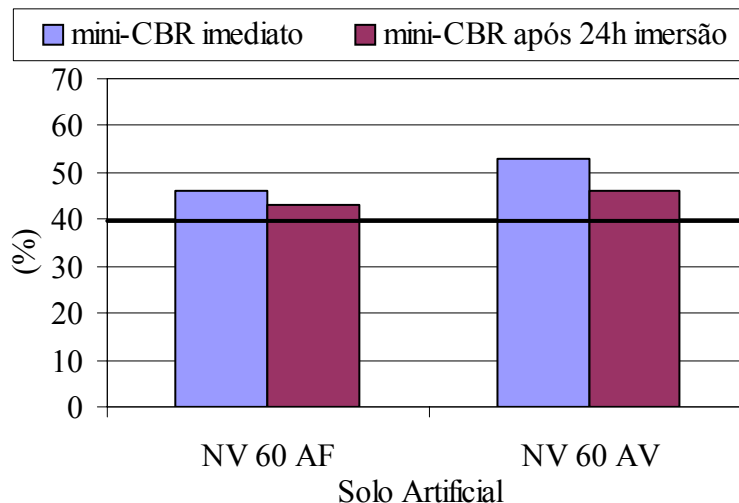


Figura 5.11 - Mini-CBR imediato e após imersão para a matriz Nova Aliança misturada com Areia de Fundição e Areia Virgem.

Esse aumento dos valores de mini-CBR, quando utilizada Areia Virgem, poderia ser atribuído ao maior grau de esfericidade da Areia de Fundição em relação à AV. Entretanto, essa hipótese foi descartada, as areias não mostraram variação no índice de esfericidade, pois os ensaios mostraram que a AV e a AF apresentam um índice de esfericidade médio de 0,90; considerado alto.

O aumento nos valores de mini-CBR para os solos com AV em relação à AF pode ser causado pelo desgaste que a areia sofreu no processo de moldagem de metais, no qual determinadas propriedades de superfície podem ter sido modificadas ao entrar em contato com os metais fundidos. Vale salientar que a areia de fundição, quando adicionada aos solos estudados, gerou uma menor queda de resistência no valor do mini-CBR após imersão. A Figura 5.12 mostra fotografias dos grãos da Areia Virgem e da Areia de Fundição, onde se pode observar a coloração escura da AF.

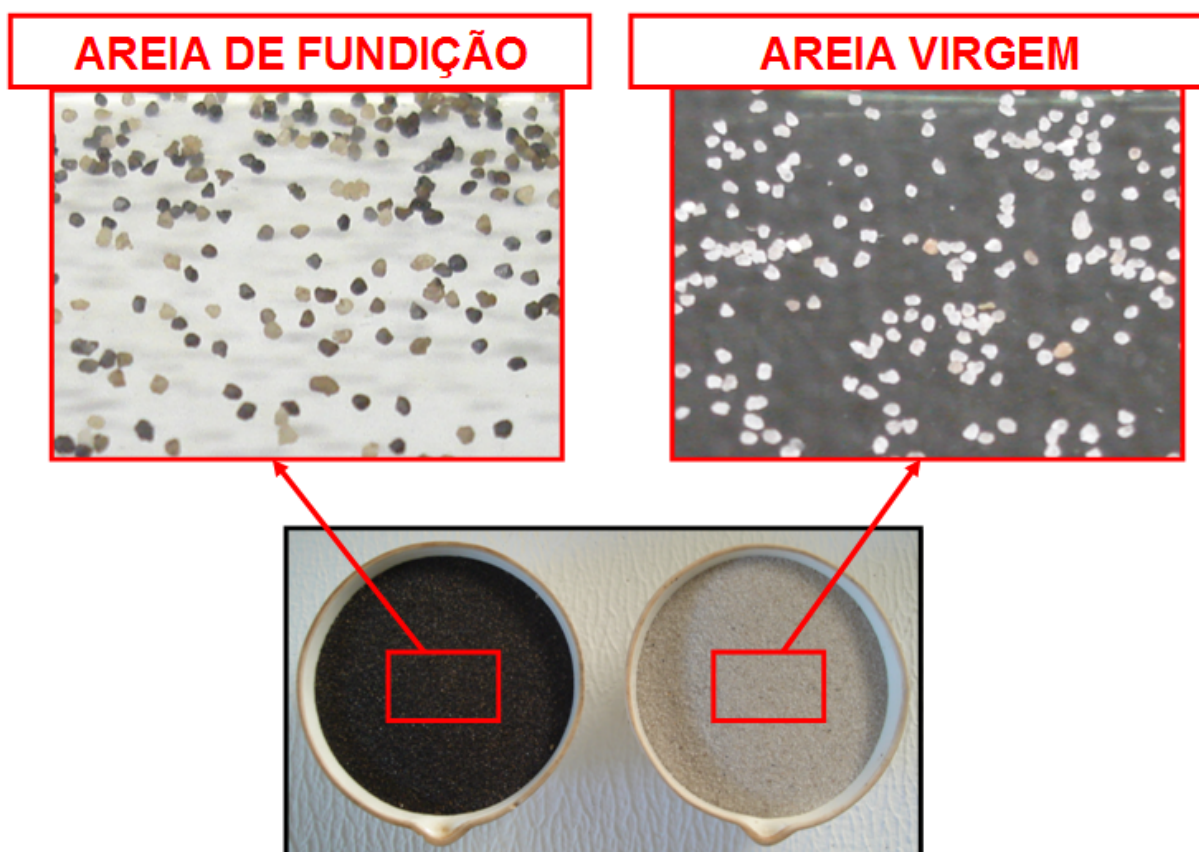


Figura 5.12 - Fotografia dos grãos da Areia de Fundição e da Areia Virgem.

## 5.7. INFILTRABILIDADE E PERMEABILIDADE

O ensaio de permeabilidade foi realizado segundo a descrição apresentada no Capítulo de Materiais e Métodos. No ensaio de mini-CBR foram compactados três corpos-de-prova em

vez de dois, um para o valor de mini-CBR imediato, outro para o valor após 24 h de imersão e o terceiro destinado ao ensaio de infiltrabilidade (sorção capilar) e de permeabilidade.

### **5.7.1. Ensaio de Infiltrabilidade**

Os resultados do ensaio de infiltrabilidade em função da umidade de moldagem são mostrados na Figura 5.13. As curvas apresentadas mostram semelhança de forma e magnitude com aquelas apresentadas por Nogami & Villibor (1995).

As infiltrabilidades decrescem, passam por um mínimo e crescem ligeiramente com o aumento da umidade de compactação. Os valores mínimos ocorrem aproximadamente na umidade ótima de compactação. No ramo úmido a diferença entre os valores de infiltrabilidade foi pequena. A partir dessas curvas e da umidade ótima de compactação foram obtidos os coeficientes de sorção para os solos artificiais.

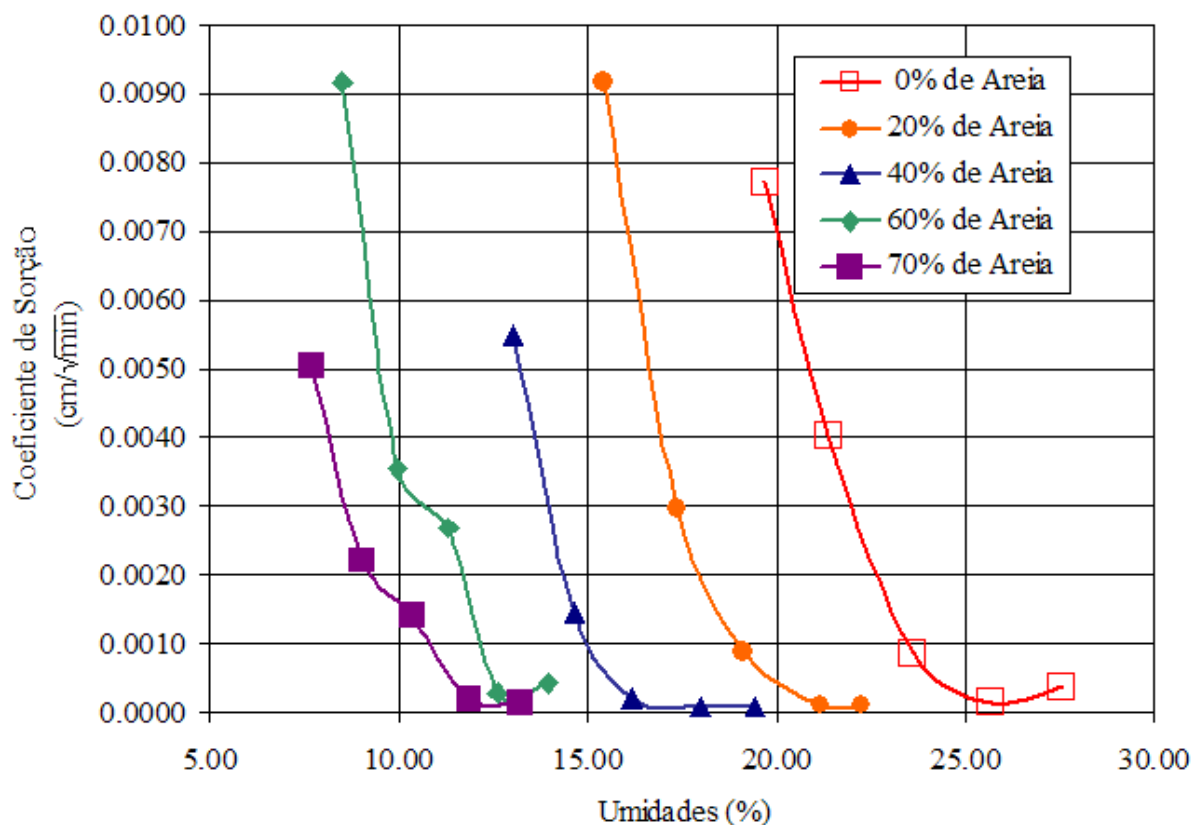


Figura 5.13 - Curvas de infiltrabilidade em função da umidade de moldagem dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.

A Figura 5.14 apresenta os resultados do coeficiente de sorção capilar ( $K_c$ ) obtidos no ensaio de infiltrabilidade. Observa-se na figura que o coeficiente tende a decrescer com o aumento do teor de areia de fundição adicionada ao solo. Tem-se para o solo Jardim Botânico puro um coeficiente de sorção igual a  $6,0 \times 10^{-4} (cm/\sqrt{min})$  e para o mesmo solo com 70% de areia adicionada, o coeficiente decresce até o valor de  $2,5 \times 10^{-4} (cm/\sqrt{min})$ . Tal comportamento é coerente segundo Nogami & Villibor (1995), que afirmam que os solos lateríticos argilosos apresentam um coeficiente de sorção maior que dos solos lateríticos arenosos.



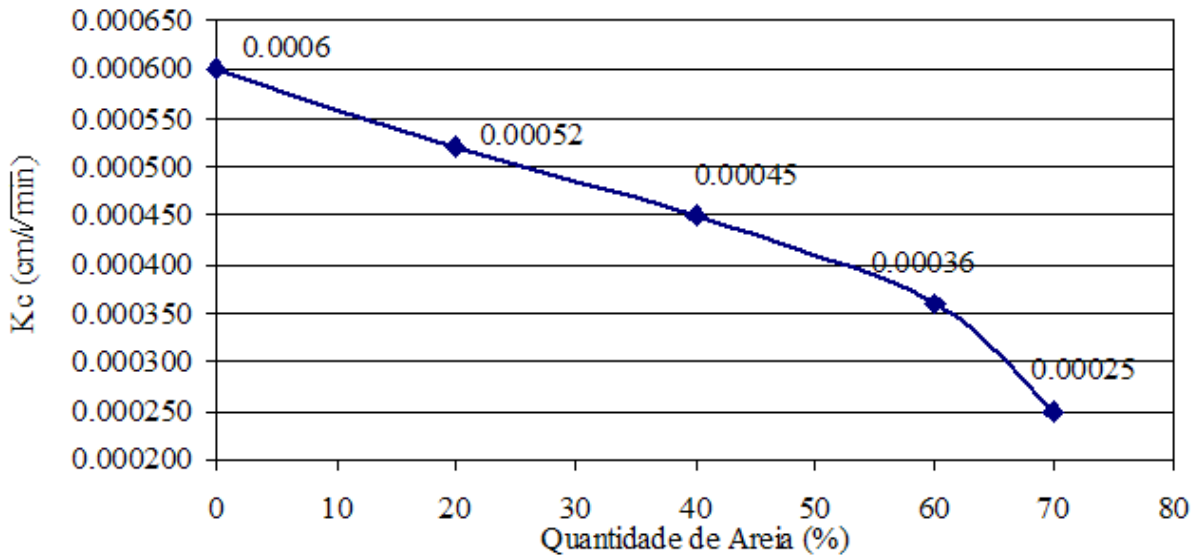


Figura 5.14 - Coeficiente de sorção Kc em função da quantidade de areia adicionada.

Segundo a classificação MCT, as misturas solo-areia para a matriz JB com 0% e 20% de areia apresentam comportamento laterítico argiloso (LG'), e os restantes (40%, 60% e 70%) apresentam comportamento laterítico arenoso (LA'). Essa classificação mostrou certa correlação com os resultados obtidos no ensaio de infiltrabilidade, pois os solos LG' apresentam geralmente infiltrabilidade menor que solos LA'..

São poucas as observações que podem ser feitas a respeito dos valores obtidos, devido ser infiltrabilidade ainda uma propriedade pouco estudada na geotecnia viária, razão pela qual a disponibilidade de dados também é muito precária.

### 5.7.1. Ensaio de Permeabilidade

A Figura 5.15 mostra os resultados dos ensaios de permeabilidade em função da umidade de compactação; devido à escala, as curvas correspondentes aos solos artificiais com 60 e 70%

de areia são mostradas apenas com três umidades, já que para os pontos mais secos, obtiveram-se valores de permeabilidades mais elevados.

A forma das curvas de permeabilidade, à semelhança das de infiltrabilidade, é similar às apresentadas por Nogami & Villibor (1995), onde a permeabilidade diminui até a umidade ótima e a partir daí permanece praticamente constante. A partir dessas curvas e da umidade ótima de compactação podem ser obtidos os coeficientes de permeabilidade dos solos artificiais.

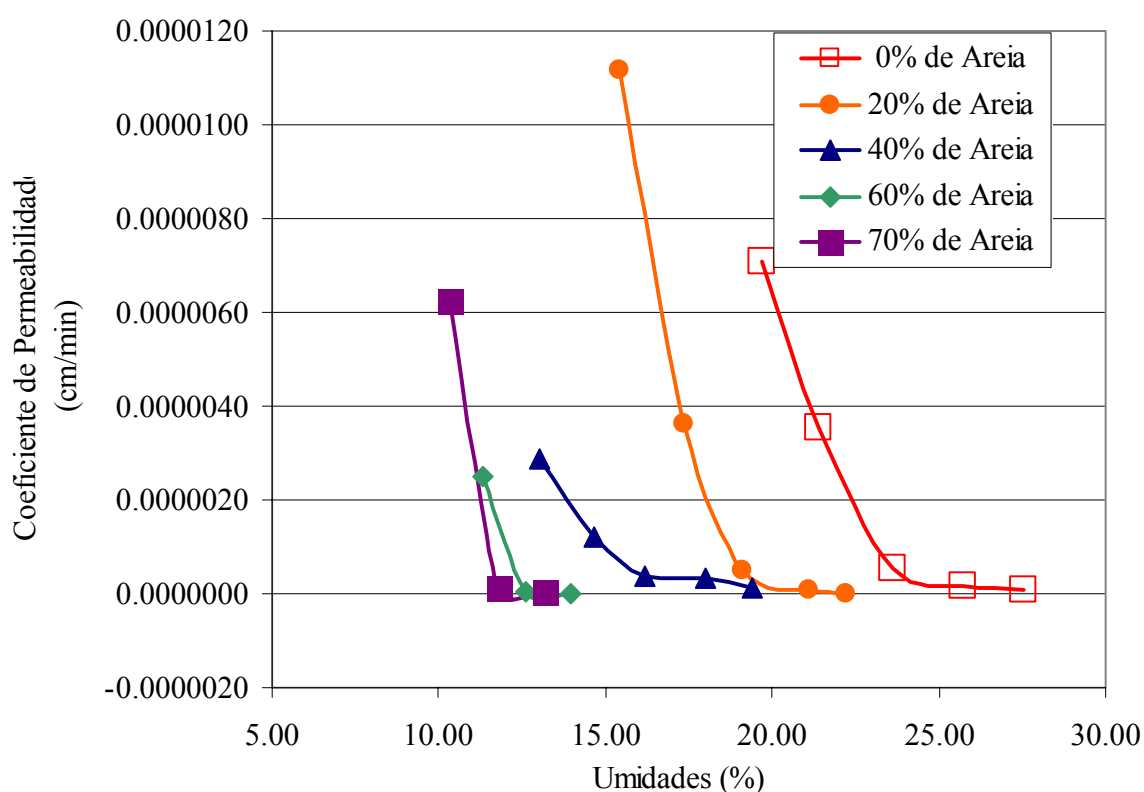


Figura 5.15 - Curvas de Permeabilidade dos solos artificiais para a matriz Jardim Botânico.

Um fator que pode exercer grande influência nos resultados de permeabilidade é o arranjo das partículas. Segundo Seed & Chan (1959), o aumento da umidade impõe uma maior orientação das partículas de solos. No ramo seco da curva de compactação as partículas de água fluem de forma mais fácil. Para umidades maiores (ramo úmido) as partículas apresentam-se de forma

alinhada (estrutura dispersa) aumentando a tortuosidade, assim, diminuindo a condutividade hidráulica (MACAMBIRA, 2002). Esse comportamento pode ser uma justificativa para os valores das condutividades hidráulicas obtidas neste estudo.

Na Figura 5.16 são mostrados os resultados do coeficiente de permeabilidade ( $K_p$ ). Para o solo Jardim Botânico em estado natural (0% de areia adicionada) tem-se um coeficiente de permeabilidade igual a  $5,0 \times 10^{-7} (cm/s)$  e para o mesmo solo com 70% de areia adicionada o coeficiente aumenta até o valor de  $10,0 \times 10^{-7} (cm/s)$ . Apesar desse aumento, pode-se observar que o solo artificial com 70% de areia (maior porcentagem adicionada ao solo) apresenta um valor de permeabilidade baixo, o que demonstra o alto teor argiloso do solo utilizado neste trabalho e garante a baixa permeabilidade dos solos ainda que com grandes teores de areia.

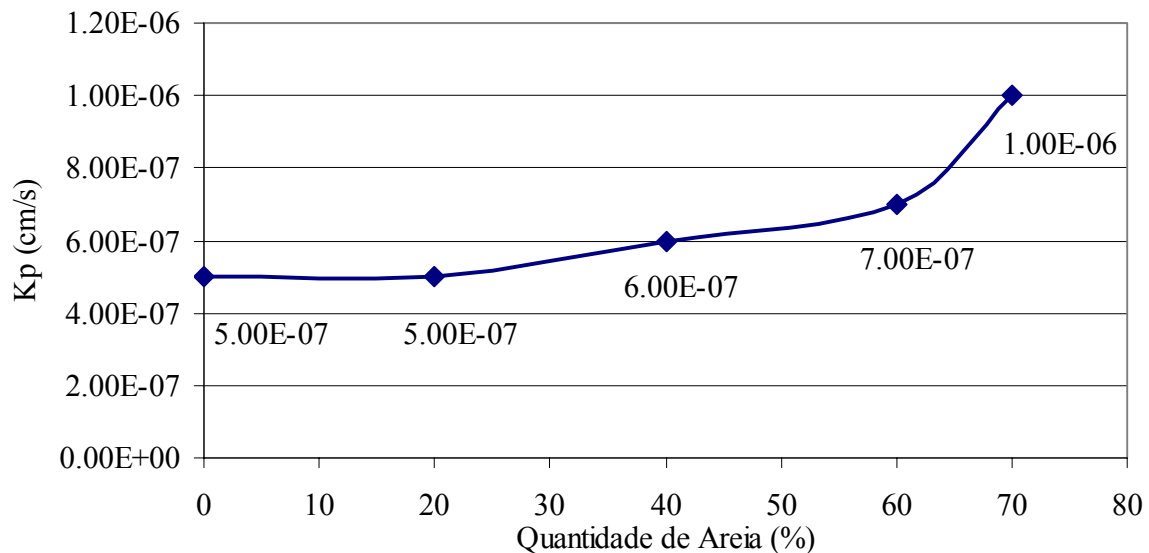


Figura 5.16 - Coeficiente de permeabilidade  $K_p$  em função do teor de areia adicionada.

Pode-se observar, a partir dos valores apresentados na Figura 5.17, que o coeficiente de permeabilidade apresenta uma tendência crescente com o aumento do teor de areia de

fundição adicionada ao solo Jardim Botânico. Essa tendência crescente da permeabilidade era esperada, já que se sabe que solos de partículas finas (LG' por exemplo) apresentam maior dificuldade para o fluxo de água através de suas estruturas do que solos de partículas mais grossas (LA' por exemplo), o que se traduz em coeficientes de permeabilidade muito baixos para solos argilosos.

### **5.8. CBR E EXPANSÃO**

Com a finalidade de obter valores de índices de suporte tradicionais para os solos artificiais (misturas solo-areia) montados em laboratório, executou-se o ensaio de CBR (Califórnia Bearing Ratio), na energia intermediária de compactação, e de expansão.

Os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima foram obtidos a partir dos ensaios de mini-CBR na energia intermediária de compactação.

Na Figura 5.17 são apresentados os resultados dos ensaios de CBR. Nela nota-se um aumento da capacidade de suporte, a partir do solo natural, que apresenta um CBR de 28%, até o solo artificial com um teor de areia de 60%, com um CBR de 67%; a partir do qual o valor do CBR decresce.

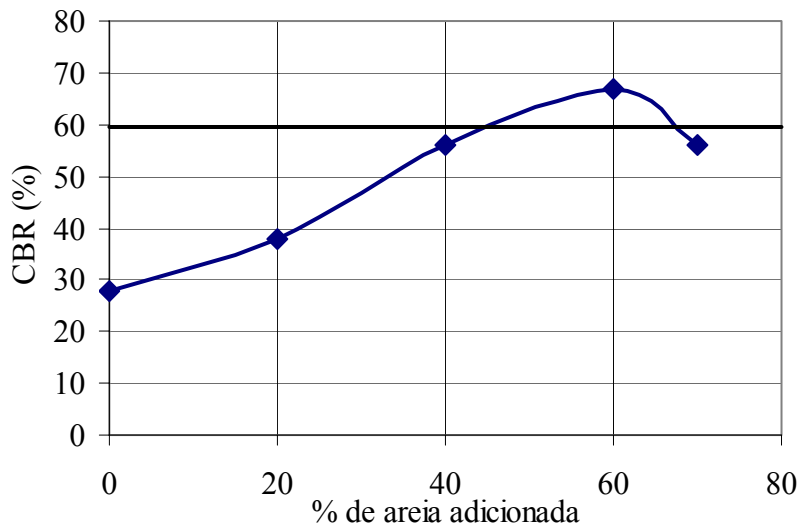


Figura 5.17 - CBR versus teor de areia de fundição adicionada ao solo Jardim Botânico.

A Figura 5.18 apresenta os valores de expansão obtidos a partir dos ensaios de CBR. Nela nota-se que a expansão dos solos decresce com o aumento do teor de areia. Para teores acima de 20%, as expansões apresentam-se menores que 0,5%, limite este fixado pelas normas brasileiras para aproveitamento dos solos como material para uso em sub-bases e bases de pavimentos.

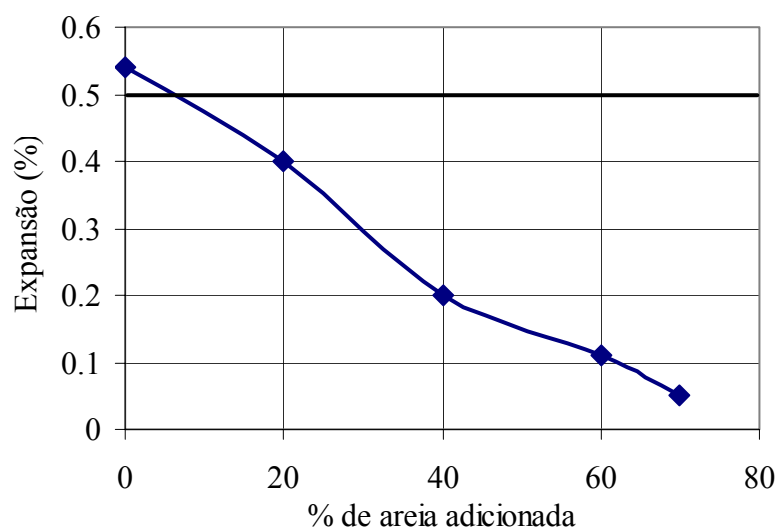


Figura 5.18 - Variação da expansão dos solos artificiais com matriz Jardim Botânico a partir do ensaio de CBR.

Os resultados de CBR e expansão convencional indicam que o solo Jardim Botânico com 60% de areia de fundição poderia ser utilizado como material para base de pavimentos com tráfego leve ( $N \leq 5 \times 10^6$  solicitações de eixo padrão) segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) ( $CBR \geq 60\%$  e  $expansão \leq 0,5\%$ ).

## 5.9. TRIAXIAIS CÍCLICOS

Com o objetivo de determinar os módulos de resiliência dos solos artificiais foram executados ensaios triaxiais cíclicos nas misturas solo-areia. Os corpos-de-prova foram compactados na umidade ótima e massa específica seca máxima na energia intermediária, determinados no ensaio de mini-CBR, e ensaiados nessa condição.

Foram produzidas três réplicas para cada um dos materiais estudados nesta pesquisa e cada corpo-de-prova foi ensaiado no mínimo seis vezes e, desses ensaios, foram escolhidos os que apresentaram resultados com melhores ajustes.

Inicialmente, foram avaliados os desempenhos de quatro modelos matemáticos a partir do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtidos para cada um deles. A Tabela 5.5 mostra os modelos avaliados, que estão em função da tensão desvio ( $\sigma_d$ ), tensão confinante ( $\sigma_3$ ), primeiro invariante de tensões ( $\theta$ ) e da tensão cisalhante ( $\tau_{oct}$ ).

Tabela 5.5 – Modelos avaliados na representação do  $M_R$  em função do estado de tensões.

<b>Modelo</b>	<b>Modelagem Matemática</b>	<b>Equação</b>
Modelo em Função da Tensão Desvio	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2}$	(5.1)
Modelo em Função da Tensão de Confinamento	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_3}$	(5.2)
Modelo Composto	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_3^{k_3}$	(5.3)
Modelo Universal da AASHTO	$M_R = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$	(5.4)

O cálculo dos quatro modelos mostrados na Tabela 5.5 foi realizado utilizando-se um programa computacional desenvolvido pelo Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri em plataforma LabView. A Figura 5.19 ilustra uma imagem do programa. Esse software permite:

- selecionar, dos 16 pares de tensão aplicados no ensaio, os que apresentam menor erro na previsão do  $M_R$ , para calcular os modelos matemáticos;
- variar o número de pontos considerados para o cálculo dos módulos de resiliência médios, usando no máximo 50 e no mínimo 20;
- variar o valor do desvio padrão em torno da média dos valores de  $M_R$ , de 0,05 até 10,00; para o cálculo dos modelos matemáticos.

Uma vez avaliados os quatro modelos matemáticos, escolheu-se o modelo, com melhor ajuste, para calcular os valores de módulo de resiliência em uma estrutura de pavimento de baixo volume de tráfego de quatro camadas: revestimento, base, sub-base e subleito; e avaliou-se a variação dos  $M_R$  em função do teor de areia de fundição adicionada ao solo Jardim Botânico e em função do tipo de carregamento.

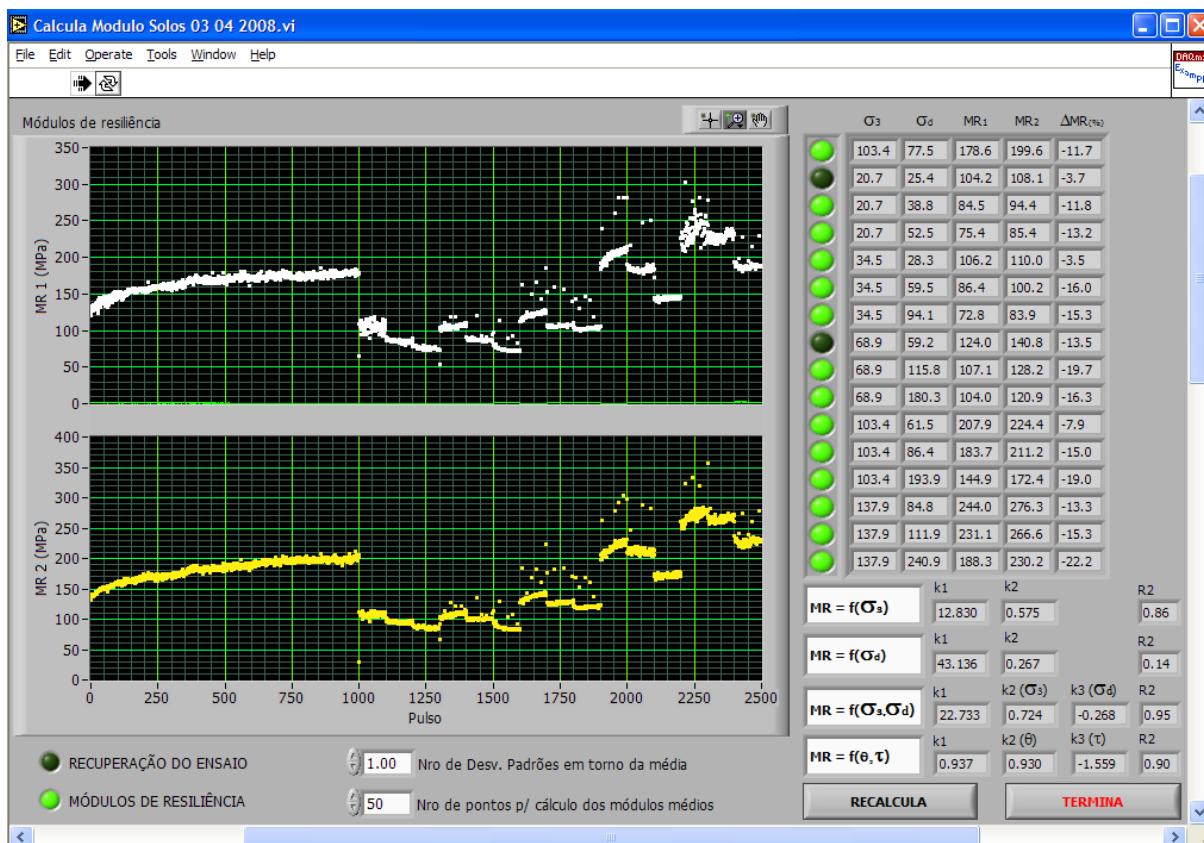


Figura 5.19 - Tela do Programa utilizado para o cálculo dos modelos de Módulo de Resiliência.

### 5.9.1. Avaliação do desempenho dos modelos na representação do Módulo de Resiliência

Para avaliar os quatro modelos utilizados nesta pesquisa, como foi citado anteriormente, partiu-se do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de cada um deles. As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para as regressões determinadas; nessas tabelas pode-se notar que os solos artificiais (misturas solo-areia) foram agrupados segundo a matriz de solo utilizado, Jardim Botânico (JB) e Nova Aliança (NV), (por exemplo, JB20AF significa solo Jardim Botânico com 20% de Areia de Fundição). As regressões foram calculadas a partir dos ensaios onde se obteve um número mínimo de doze pontos, correspondentes a doze diferentes estágios de tensão.



Nota-se na Tabela 5.6 que, conforme aumenta o teor de areia no solo Jardim Botânico, os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) diminuem para o modelo em função da Tensão Desvio, por sua vez, estes aumentam para o modelo em função da Tensão de Confinamento, como era de ser esperado segundo a bibliografia estudada, pois os solos argilosos dependem mais da tensão desvio, enquanto que os solos arenosos dependem em maior grau da tensão de confinamento. Este fato pode ser observado também na Tabela 5.7 para o solo Nova Aliança, quando compara-se o solo em estado natural com o solo artificial com 60% de areia adicionada.

Pode-se verificar ainda nas Tabelas 5.6 e 5.7 que, de maneira geral, o Modelo Composto apresentou um bom desempenho, notavelmente melhor que o Modelo Universal da AASHTO, para os materiais estudados neste trabalho. Esse resultado não era esperado, já que outros estudos mostram o desempenho do Modelo da AASHTO semelhante ao do Modelo Composto. Portanto, devido ao melhor desempenho do Modelo Composto na representação do  $M_R$  em função do estado de tensão, e a tendência observada no Brasil de se privilegiar este modelo, as análises seguintes foram efetuadas com base nele.

Tabela 5.6 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) para os solos artificiais com a matriz Jardim Botânico.

MODELO	Função da Tensão Desvio	Função da Tensão de Confinamento	Modelo Composto	Modelo Universal da AASHTO
SOLO	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
	0.52	0.13	0.92	0.86
<b>JB0AF</b>	0.34	0.00	0.91	0.74
	0.87	0.06	0.96	0.92
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	<b>0.58</b>	<b>0.06</b>	<b>0.93</b>	<b>0.84</b>
	0.91	0.14	0.93	0.93
	0.91	0.58	0.94	0.93
<b>JB20AF</b>	0.96	0.40	0.97	0.86
	0.96	0.40	0.97	0.87
	0.99	0.44	0.99	0.96
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	<b>0.97</b>	<b>0.41</b>	<b>0.97</b>	<b>0.89</b>
	0.25	0.52	0.91	0.62
<b>JB40AF</b>	0.28	0.45	0.91	0.62
	0.29	0.50	0.95	0.72
	0.12	0.26	0.88	0.88
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	<b>0.23</b>	<b>0.40</b>	<b>0.91</b>	<b>0.74</b>
	0.06	0.68	0.93	0.80
	0.02	0.76	0.94	0.89
<b>JB60AF</b>	0.11	0.12	0.90	0.76
	0.00	0.54	0.92	0.76
	0.04	0.72	0.95	0.93
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	<b>0.05</b>	<b>0.46</b>	<b>0.93</b>	<b>0.81</b>
	0.35	0.97	0.97	0.96
	0.29	0.95	0.98	0.96
<b>JB70AF</b>	0.28	0.96	0.98	0.96
	0.26	0.90	0.97	0.92
	0.13	0.86	0.96	0.91
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	<b>0.22</b>	<b>0.91</b>	<b>0.97</b>	<b>0.93</b>
	0.09	0.85	0.97	0.95
	0.03	0.69	0.97	0.87
<b>JB60AV</b>	0.00	0.55	0.94	0.79
	0.00	0.51	0.95	0.76
	0.05	0.70	0.96	0.85
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	<b>0.02</b>	<b>0.59</b>	<b>0.95</b>	<b>0.80</b>

Tabela 5.7 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) para os solos artificiais com a matriz Nova Aliança.

MODELO	Função da Tensão Desvio	Função da Tensão de Confinamento	Modelo Composto	Modelo Universal da AASHTO
NV0AF	0.81	0.15	0.97	0.93
	0.43	0.01	0.84	0.83
	0.61	0.88	0.88	0.88
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	0.62	0.34	0.90	0.88
NV60AF	0.12	0.89	0.97	0.95
	0.09	0.83	0.95	0.91
	0.12	0.88	0.96	0.93
	0.15	0.87	0.94	0.93
	0.08	0.89	0.97	0.96
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	0.12	0.88	0.95	0.94
NV60AV	0.05	0.82	0.96	0.94
	0.14	0.85	0.96	0.92
	0.15	0.91	0.98	0.95
	0.24	0.85	0.97	0.84
	0.26	0.84	0.96	0.86
<b>R<sup>2</sup> médio</b>	0.22	0.87	0.97	0.88

### 5.9.2. Cálculo do Módulo de Resiliência para uma estrutura de pavimento de baixo volume de tráfego

O objetivo deste trabalho consiste em reutilizar a areia de fundição em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis de baixo volume de tráfego. Assim, escolheu-se uma estrutura com tais características para identificar as tensões atuantes no centro da camada de base e poder calcular os Módulos de Resiliência a partir dos modelos matemáticos.

Para calcular as tensões atuantes utilizou-se o programa computacional ELSYM5, no qual foi simulado um pavimento com as características iniciais mostradas na Figura 5.20, na qual podem ser observadas as duas condições de carregamento utilizadas.

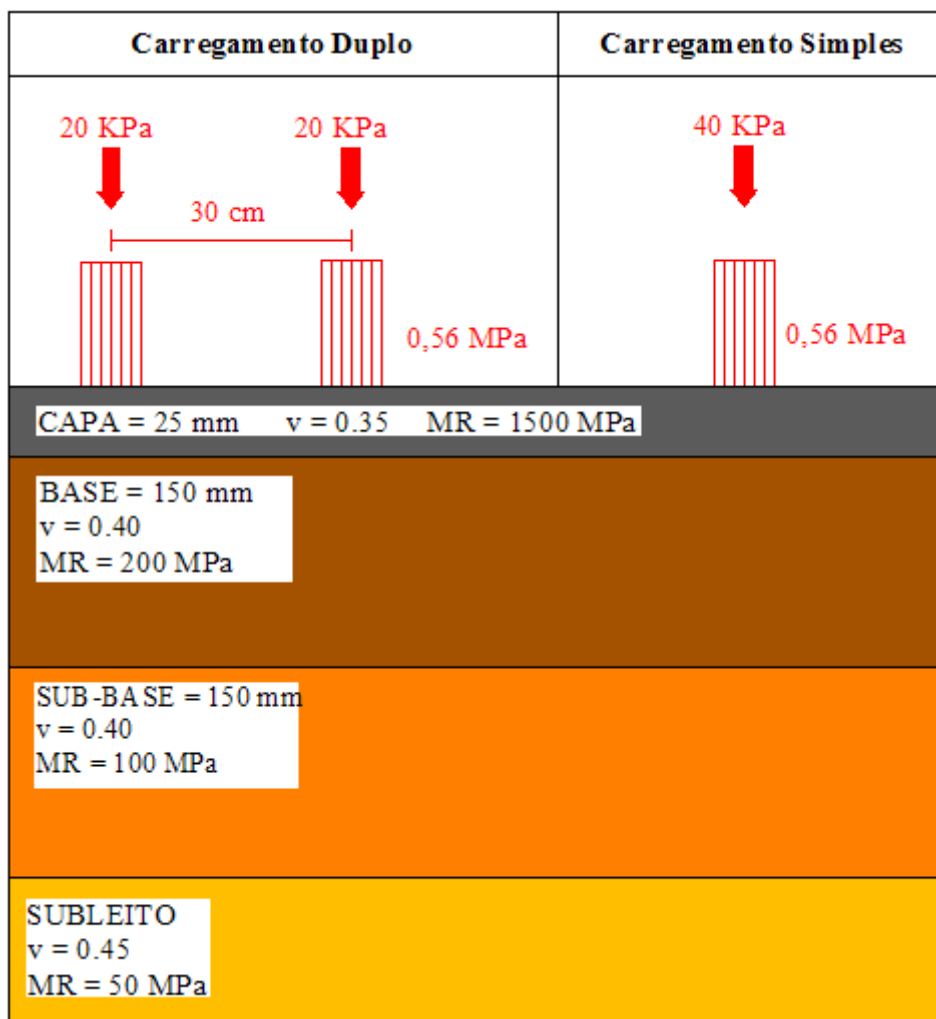


Figura 5.20 - Estrutura do pavimento utilizado para cálculo do Módulo de Resiliência para Carregamento Simples e Carregamento Duplo.

Os valores das tensões principais, encontradas no centro da camada de base da estrutura mostrada na Figura 5.20, foram utilizadas no Modelo Composto para calcular os valores de Módulo de Resiliência; esse cálculo foi realizado de maneira iterativa até convergir em um  $M_R$  com um erro menor que 10%.

O valor da tensão desvio ( $\sigma_d$ ) foi calculado a partir da equação (5.5) e para calcular a tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ), no caso do carregamento duplo, aplicaram-se três considerações mostradas nas equações (5.6), (5.7) e (5.8). Deve ser esclarecido que as tensões  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$  são

as tensões principais atuantes no plano perpendicular à direção em que atua a tensão principal  $\sigma_{zz}$ .

$$\sigma_d = \sigma_{zz} - \sigma_3 \quad (5.5)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{xx} \quad (5.6)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{yy} \quad (5.7)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \quad (5.8)$$

A partir dessas considerações, obtiveram-se quatro valores de  $M_R$ :

- $M_{R1}$ , calculado considerando-se que  $\sigma_3 = \sigma_{xx}$  no carregamento duplo;
- $M_{R2}$ , calculado considerando-se que  $\sigma_3 = \sigma_{yy}$  no carregamento duplo;
- $M_{R3}$ , calculado a partir da consideração que  $\sigma_3 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}$  no carregamento duplo;
- $M_{R4}$ , calculado a partir das tensões atuantes no meio da base quando aplicado carregamento simples.

A Tabela 5.8 mostra os resultados dos Módulos de Resiliência para a matriz de solo Jardim Botânico e a Tabela 5.9 para a matriz de solo Nova Aliança.

Tabela 5.8 – Módulos de Resiliência calculados a partir do Modelo Composto para a matriz de solo Jardim Botânico.

SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
JB0AF	400.717	0.066	-0.020	0.92	392	439	422	445
	548.492	0.086	-0.099	0.91	367	407	385	413
	672.353	0.051	-0.143	0.96	332	353	343	352
	<b>MÉDIA</b>				<b>364</b>	<b>400</b>	<b>383</b>	<b>403</b>
	<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>30</b>	<b>43</b>	<b>40</b>	<b>47</b>
SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
JB20AF	869.358	0.034	-0.242	0.93	238	249	244	243
	943.216	-0.046	-0.174	0.94	311	301	306	289
	1109.16	0.037	-0.293	0.97	230	241	236	247
	948.530	0.033	-0.231	0.97	273	286	281	279
	987.922	0.010	-0.217	0.99	291	299	295	291
<b>MÉDIA</b>				<b>269</b>	<b>275</b>	<b>272</b>	<b>270</b>	
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>34</b>	<b>28</b>	<b>31</b>	<b>23</b>	
SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
JB40AF	215.155	0.444	-0.499	0.91	76	87	83	89
	193.460	0.303	-0.332	0.91	95	108	101	110
	253.239	0.285	-0.348	0.95	105	115	110	118
	174.884	0.418	-0.417	0.88	81	98	91	103
	<b>MÉDIA</b>				<b>94</b>	<b>107</b>	<b>101</b>	<b>110</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>12</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	
SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
JB60AF	75.303	0.555	-0.320	0.93	104	120	115	137
	67.038	0.574	-0.320	0.94	100	117	112	134
	253.699	0.356	-0.404	0.90	101	114	108	118
	86.206	0.597	-0.422	0.92	78	100	91	109
	112.021	0.629	-0.493	0.95	77	100	88	108
<b>MÉDIA</b>				<b>89</b>	<b>108</b>	<b>100</b>	<b>117</b>	
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>13</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	
SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
JB70AF	10.055	0.851	-0.173	0.97	100	127	114	148
	7.837	0.945	-0.224	0.98	82	110	102	132
	8.961	0.877	-0.183	0.98	93	122	111	145
	19.792	0.897	-0.346	0.97	87	112	106	133
	34.189	0.839	-0.395	0.96	92	121	110	140
<b>MÉDIA</b>				<b>89</b>	<b>116</b>	<b>107</b>	<b>138</b>	
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>5</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	
SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
JB60AV	39.67	0.72	-0.33	0.97	97	116	107	139
	113.69	0.55	-0.38	0.97	108	123	119	139
	109.78	0.60	-0.42	0.94	101	118	114	135
	101.93	0.57	-0.42	0.95	84	107	96	113
	70.11	0.62	-0.39	0.96	91	105	94	113
<b>MÉDIA</b>				<b>96</b>	<b>113</b>	<b>106</b>	<b>125</b>	
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>11</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	

Tabela 5.9 – Módulos de Resiliência calculados a partir do Modelo Composto para a matriz de solo Nova Aliança.

SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
NV0AF	651.876	0.211	-0.511	0.97	363	380	374	377
	656.258	0.187	-0.350	0.84	379	394	389	391
	919.196	0.421	-0.878	0.88	341	362	354	358
	<b>MÉDIA</b>				<b>361</b>	<b>379</b>	<b>372</b>	<b>375</b>
	<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>19</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>17</b>
SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
NV60AF	36.642	0.762	-0.352	0.97	94	115	110	138
	43.467	0.683	-0.287	0.95	108	133	122	153
	23.724	0.735	-0.230	0.96	109	133	120	150
	33.841	0.688	-0.255	0.94	105	129	125	150
	21.333	0.766	-0.256	0.97	96	116	112	141
	<b>MÉDIA</b>				<b>105</b>	<b>128</b>	<b>120</b>	<b>149</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>6</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	
SOLO	K1	K2	K3	R2	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MR3 (MPa)	MR4 (MPa)
NV60AV	65.751	0.625	-0.348	0.96	101	118	114	138
	44.864	0.660	-0.291	0.96	109	121	110	146
	33.131	0.673	-0.262	0.98	100	118	114	140
	34.719	0.786	-0.351	0.97	98	124	112	143
	112.021	0.629	-0.493	0.96	77	100	88	108
	<b>MÉDIA</b>				<b>96</b>	<b>116</b>	<b>106</b>	<b>134</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>14</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	

Para melhor entendimento e análise dos resultados apresentados nas Tabelas 5.8 e 5.9 foram elaboradas figuras que serão discutidas a seguir. As Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 mostram uma faixa de variação dos valores dos Módulos de Resiliência  $M_{R1}$ ,  $M_{R2}$ ,  $M_{R3}$  e  $M_{R4}$  respectivamente, para a matriz de solo Jardim Botânico, essa faixa de variação, foi construída a partir do valor médio do  $M_R$ , e do desvio padrão foram obtidos os limites superiores e inferiores da faixa. Em todas essas figuras pode-se observar claramente que o valor do  $M_R$  diminui de 400 MPa, para o solo Jardim Botânico puro, até um valor próximo dos 100 MPa, para 40% de areia adicionada, oscilando em torno desse valor para os demais teores de areia adicionada.

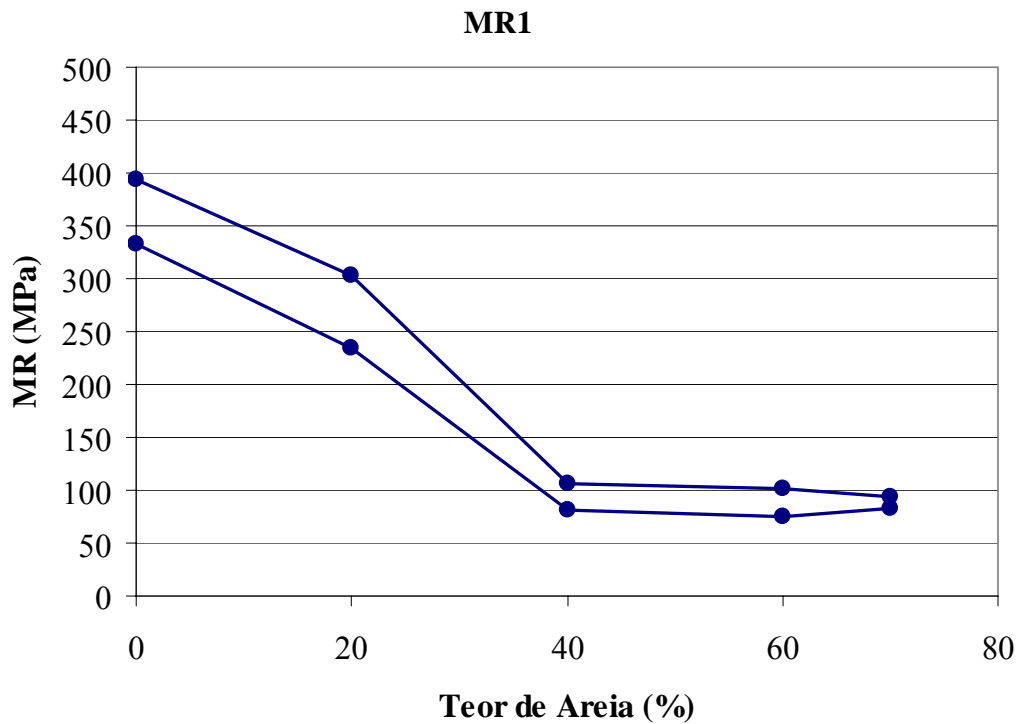


Figura 5.21 - Faixa de valores do Módulo de Resiliência para a consideração  $\sigma_3 = \sigma_{xx}$  no carregamento duplo, na matriz Jardim Botânico.

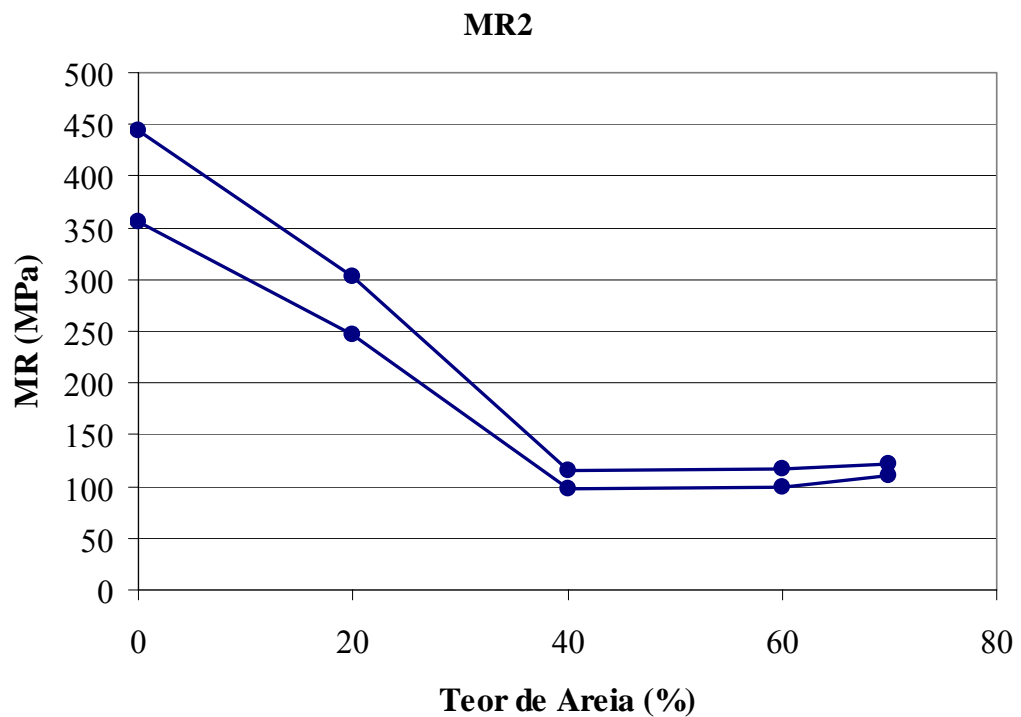


Figura 5.22 - Faixa de valores do Módulo de Resiliência para a consideração  $\sigma_3 = \sigma_{yy}$  no carregamento duplo, na matriz Jardim Botânico.



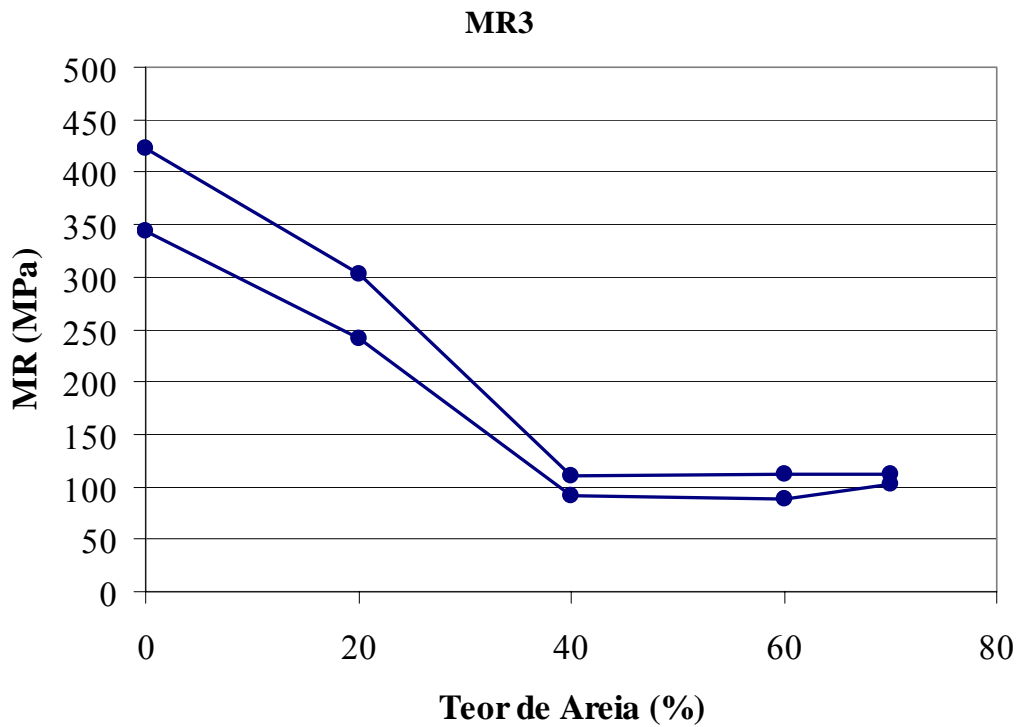


Figura 5.23 - Faixa de valores do Módulo de Resiliência para a consideração  $\sigma_3 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}$  no carregamento duplo, na matriz Jardim Botânico.

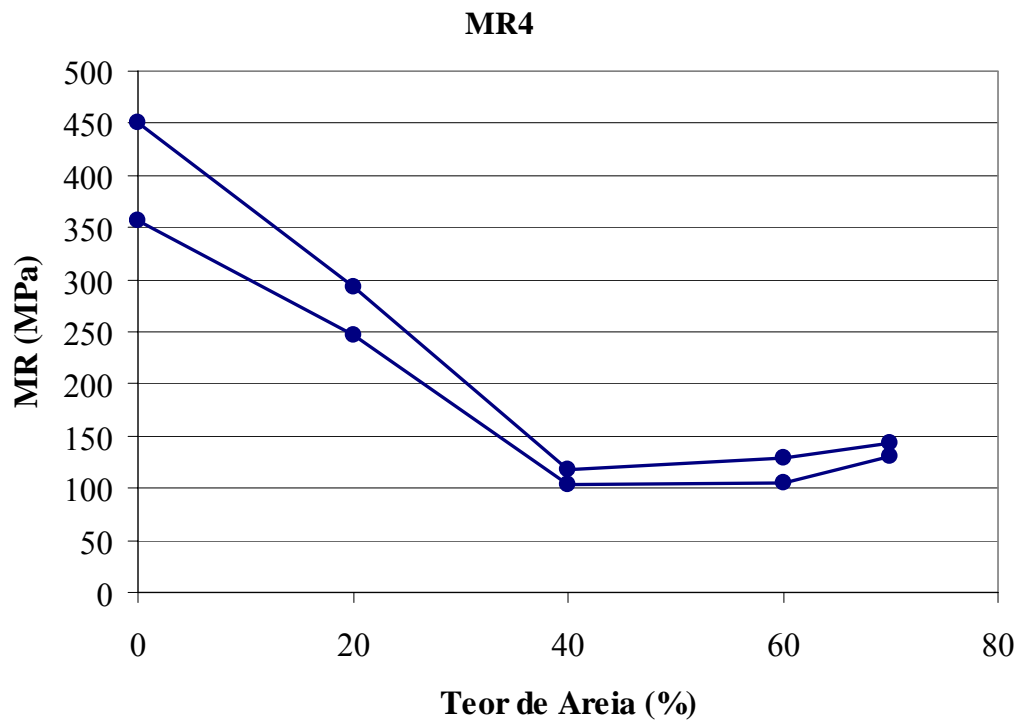


Figura 5.24 - Faixa de valores do Módulo de Resiliência para a consideração de carregamento simples, na matriz Jardim Botânico.

A Figura 5.25 mostra a variação do valor do Módulo de Resiliência segundo as diferentes considerações adotadas para o cálculo da tensão de confinamento e segundo o tipo de carregamento. Nela pode-se verificar que, para o carregamento duplo, os maiores valores do  $M_R$  foram obtidos considerando  $\sigma_3 = \sigma_{yy}$ . Por outro lado, o carregamento simples na estrutura de pavimento gerou Módulos de Resiliência levemente maiores que no carregamento duplo, com exceção do solo JB20AF; este fenômeno foi mais notório para os valores de  $M_R$  mais baixos.

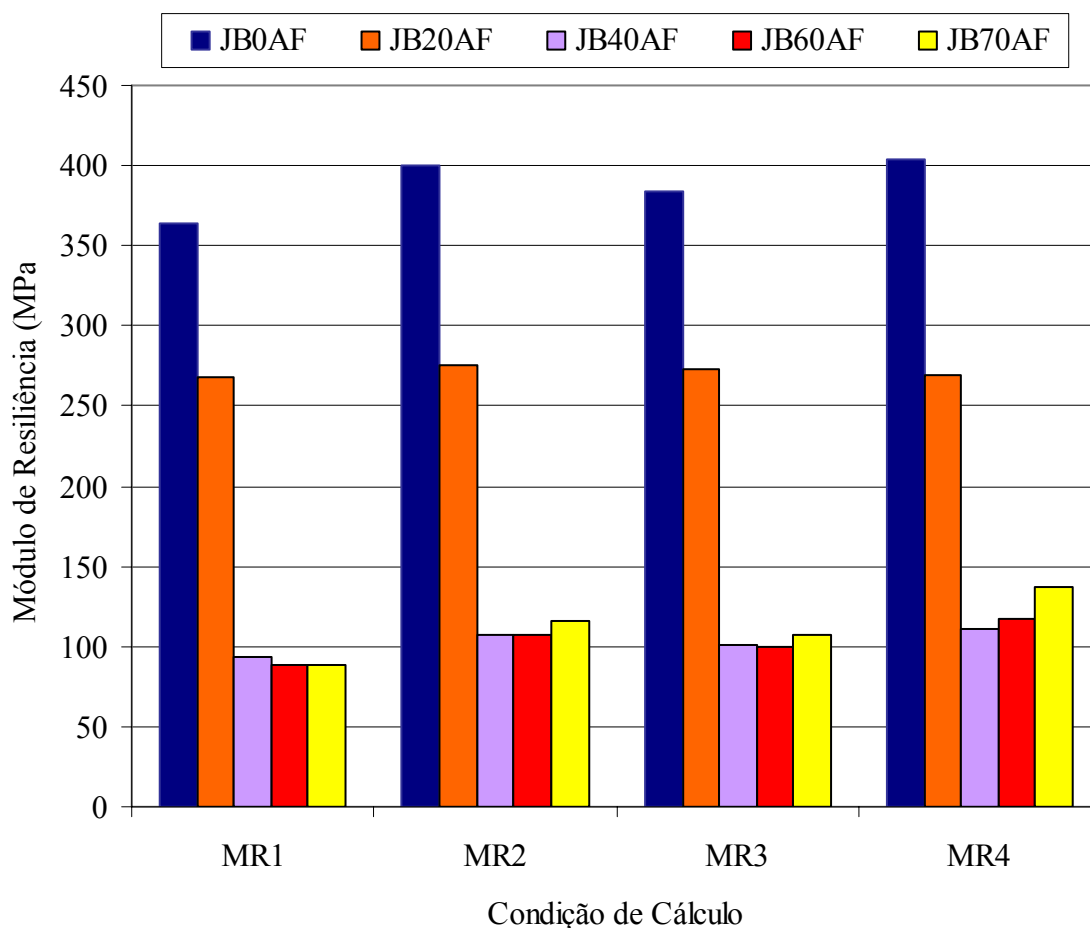


Figura 5.25 - Variação do valor do Módulo de Resiliência segundo a consideração para cálculo da tensão de confinamento adotada, para a matriz Jardim Botânico.

Na Figura 5.26 é feita uma comparação dos resultados dos Módulos de Resiliência obtidos para as duas matrizes utilizadas neste trabalho, Jardim Botânico (JB) e Nova Aliança (NV).

Os solos JB e NV apresentaram valores próximos a 400 MPa para as considerações mais críticas e apresentaram comportamento semelhante para as diferentes considerações adotadas neste trabalho.

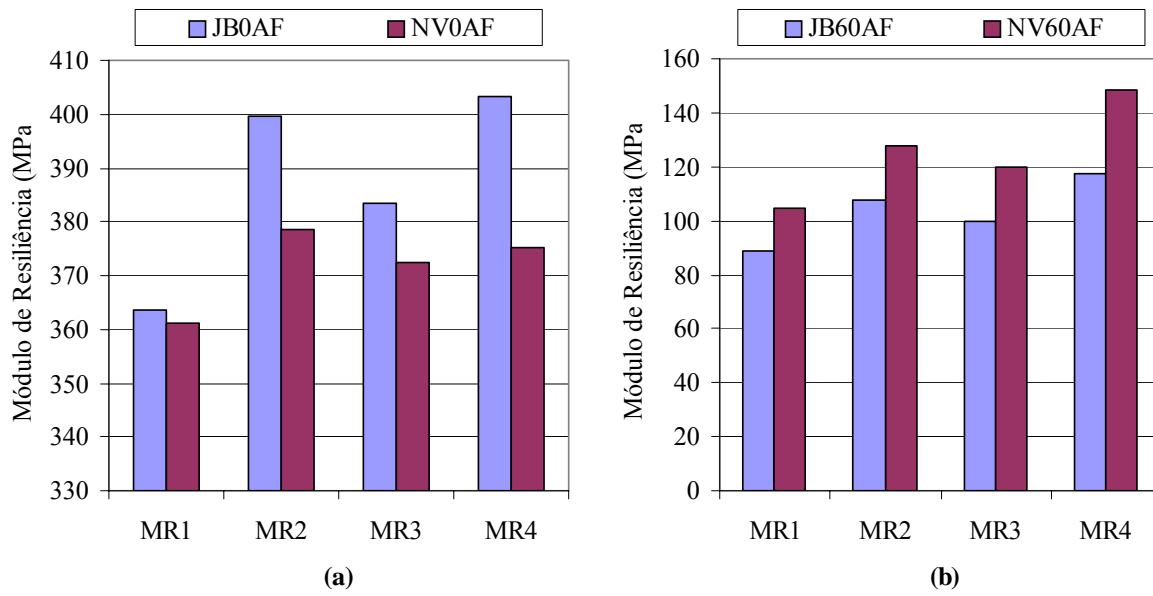


Figura 5.26 - Comparação dos MR das matrizes Jardim Botânico – Nova Aliança.

Quando comparados os solos JB e NV misturados com areia de fundição e areia virgem, pode-se notar que os módulos de resiliência para a matriz Nova Aliança foram ligeiramente maiores para os dois tipos de areia (ver Figura 5.26b). O solo Jardim Botânico misturado com Areia Virgem (JB60AV) gerou valores de  $M_R$  levemente maiores que o solo misturado com Areia de Fundição (JB60AF), porém isso não aconteceu com a matriz do solo Nova Aliança, pois o solo NV60AF apresentou  $M_R$  superiores aos do solo NV60AV (ver Figura 5.27). Apesar do exposto anteriormente, não se encontrou explicações para estes fatos, já que os módulos destes quatro solos artificiais variaram em uma faixa bastante próxima.

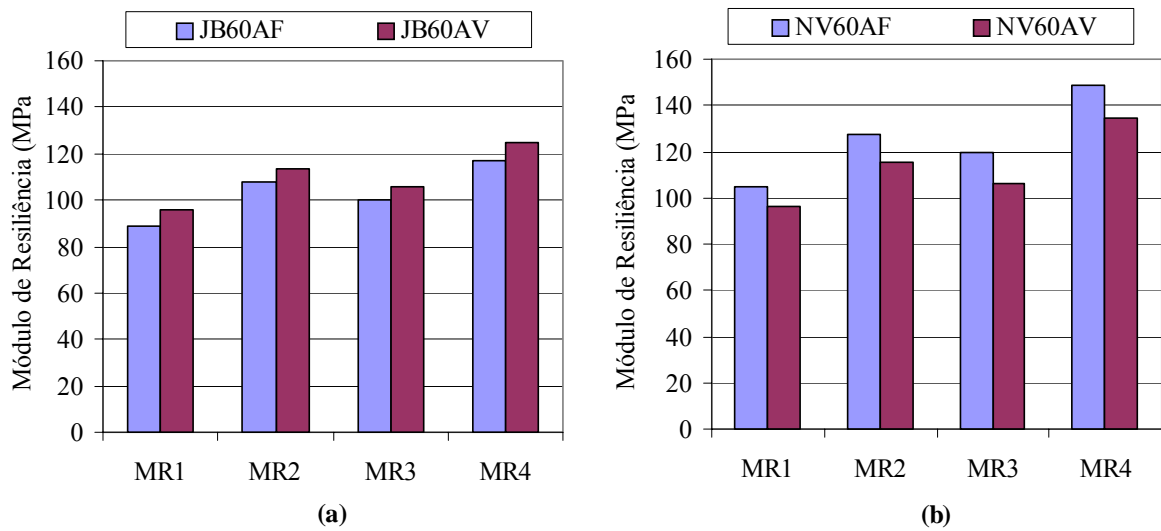


Figura 5.27 - Comparação dos MR para areia de fundição e areia virgem.

A Figura 5.28 mostra a representação gráfica tridimensional do modelo do solo Jardim Botânico descrito pela equação:  $M_R = 400.72 \cdot \sigma_3^{0.0659} \cdot \sigma_d^{-0.02}$ ; nela é notada a variação do valor do  $M_R$  em função das tensões  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$ .

O modelo composto para a mistura JB60AF – Solo Jardim Botânico com 60% de Areia de Fundição adicionada – descrito pela equação:  $M_R = 253.7 \cdot \sigma_3^{0.3558} \cdot \sigma_d^{-0.404}$ , encontra-se representado na Figura 5.29, onde se pode verificar a variação do valor do  $M_R$  em função das tensões  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$ .

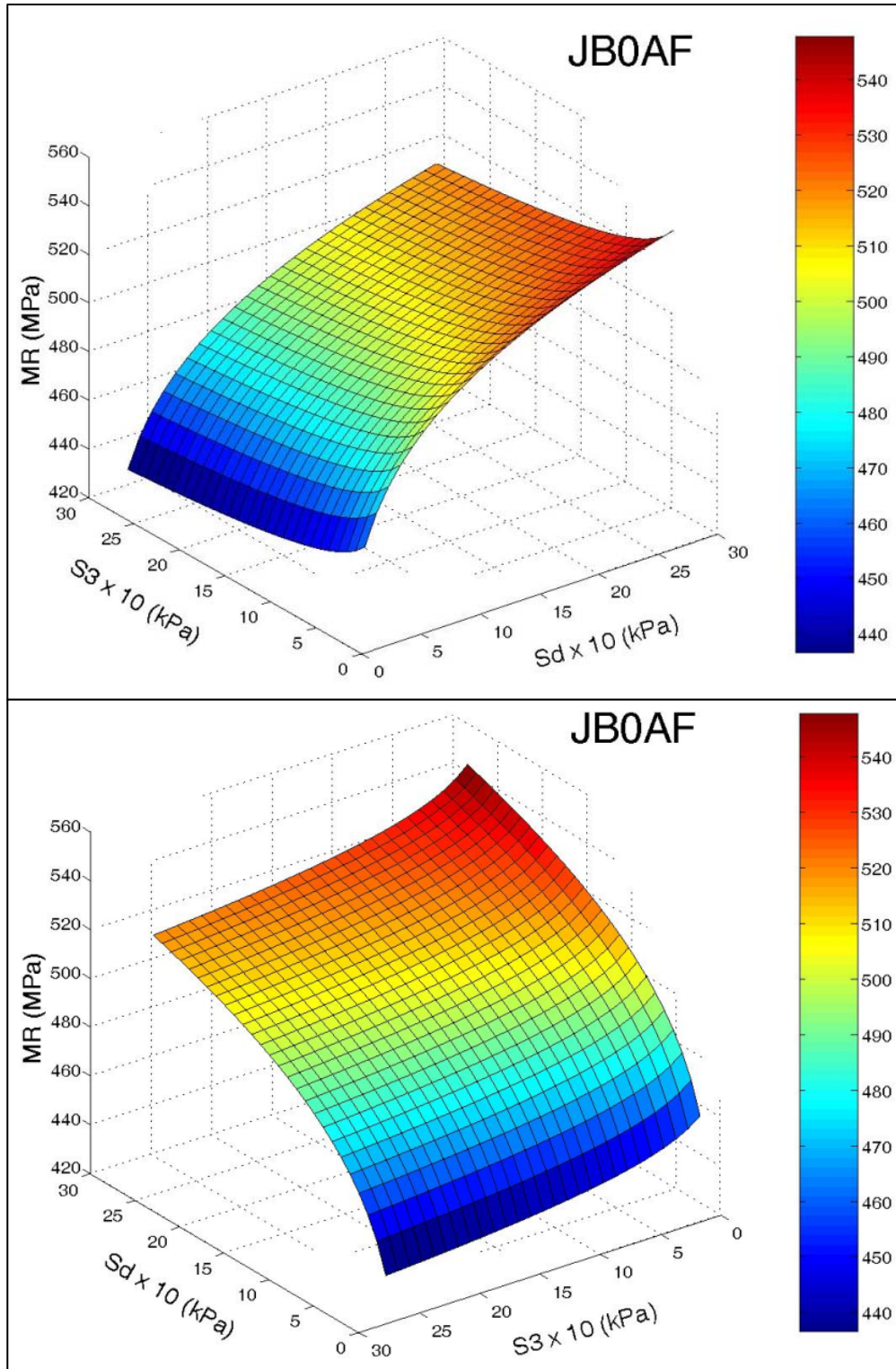


Figura 5.28 - Representação tridimensional do modelo composto para o solo Jardim Botânico.

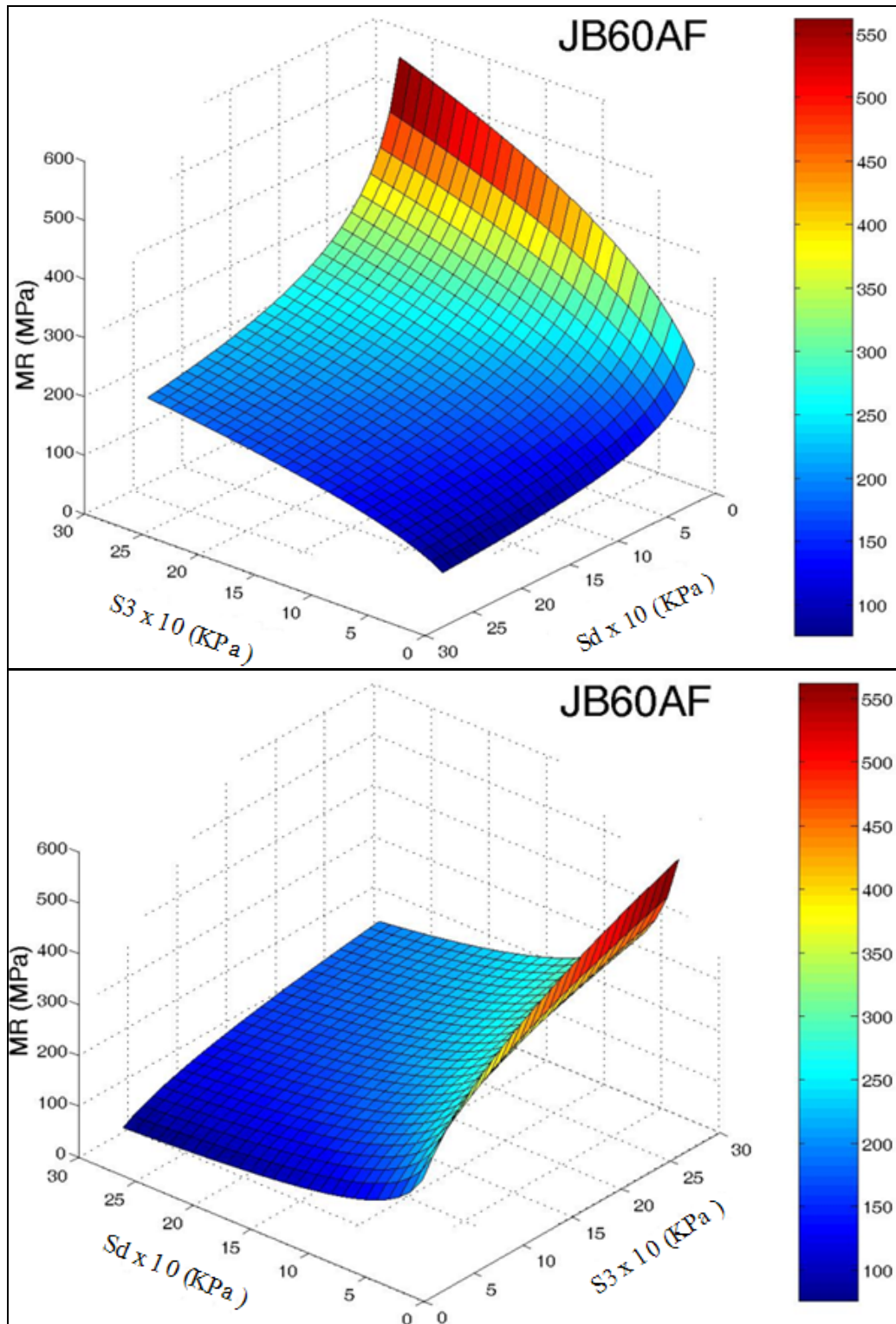


Figura 5.29 - Representação do modelo composto para o solo da mistura JB60AF.

A partir da comparação entre as Figuras 5.28 e 5.29, pode-se ressaltar que o solo argiloso JB apresenta valores de  $M_R$  elevados, mesmo para pares de tensão baixos; não entanto, o mesmo

solo, JB, quando misturado com 60% de areia de fundição, gera valores de  $M_R$  menores, só apresentando valores similares para tensões confinantes elevadas.

Bernucci (1995) e Alvarez Neto (1998) pesquisaram a utilização do solo laterítico fino como componente estrutural das camadas de pavimentos de baixo volume de tráfego e realizaram dimensionamentos de pavimentos a partir de valores de módulos de resiliência obtidos através da retroanálise de rodovias construídas com SAFL no Estado de São Paulo. Esses estudos mostram que, nesses pavimentos em serviço, as bases construídas com solos lateríticos finos apresentam  $M_R$  de 150 a 300 MPa. Por outro lado, segundo Villibor (1981), concluiu que as camadas de bases construídas com SAFL apresentam teores de umidade abaixo da umidade ótima de laboratório, mesmo em períodos de chuva; portanto, essa secagem do material, até alcançar a umidade de equilíbrio, significa um aumento do valor do módulo de resiliência, segundo descrito por Takeda (2006). Assim, pode-se salientar de que os valores de módulos de resiliência obtidos em laboratório neste estudo, na umidade ótima de compactação, são menores que os  $M_R$  dos solos quando estes se encontram em serviço; portanto, a partir destas considerações, conclui-se que as misturas montadas neste estudo poderiam ser utilizadas em camadas de bases de solos arenosos finos lateríticos.

## **5.10. ENSAIOS AMBIENTAIS**

Os Ensaio Ambientais foram executados com o propósito de determinar o grau de periculosidade do resíduo “Areia de Fundição” e da sua reutilização em bases e sub-bases de pavimentos urbanos e rodoviários de baixo volume de tráfego.

Para a classificação dos resíduos, através dos ensaios de lixiviação, solubilização e massa bruta, foram preparadas três amostras: a) Areia de Fundição, b) Solo Jardim Botânico e c) mistura de Solo Jardim Botânico (48%) e Areia de Fundição (52%). Esses ensaios foram executados na BIOAGRI Ambiental em Piracicaba/SP e no Laboratório de Saneamento da EESC-USP; Os resultados da análise completa podem ser encontrados no Anexo A.

### 5.10.1. Areia de Fundição

Os resultados obtidos no ensaio de Massa Bruta, para a Areia de Fundição, satisfazem os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004.

Do ensaio de Lixiviação realizado no resíduo de Areia de Fundição, pode se afirmar que os parâmetros satisfazem os limites permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo F.

Os resultados do ensaio de Solubilização mostraram que os parâmetros Índice de Fenóis e Manganês ultrapassaram os limites máximos permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G; esses parâmetros podem ser observados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Resultados do ensaio de Solubilização para o resíduo “Areia de Fundição”.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>LQ*</b>	<b>Resultados Analíticos</b>	<b>ABNT NBR 10004:2004 VMP**</b>
Índice de Fenóis	mg/L	0,002	0,06	0,01
Manganês	mg/L	0,01	0,0114	0,1

LQ\* Limite de Quantificação      VMP\*\* Valor Máximo Permitido pela Norma ABNT NBR 10004:2004 (BIOAGRI Ambiental Ltda.).

Em função dos resultados obtidos nos três ensaios, a amostra de resíduo “Areia de Fundição” pode ser classificada como Classe II A – Resíduo Não Inerte.



### 5.10.2. Solo Jardim Botânico

O Solo Jardim Botânico apresentou resultados satisfatórios no ensaio de Massa Bruta, quando comparados com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004. No Ensaio de Lixiviação os valores obtidos satisfazem os limites permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo F.

No ensaio de Solubilização, o Índice de Fenóis ultrapassou os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G, como pode ser observado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Resultados do ensaio de Solubilização para o Solo Jardim Botânico

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>LQ*</b>	<b>Resultados Analíticos</b>	<b>ABNT NBR 10004:2004 VMP**</b>
Índice de Fenóis	mg/L	0,002	0,04	0,01

LQ\* Limite de Quantificação VMP\*\* Valor Máximo Permitido pela Norma ABNT NBR 10004:2004 (BIOAGRI Ambiental Ltda.).

A partir dos resultados dos ensaios ambientais, o Solo Jardim Botânico é classificado como Classe II A – Resíduo Não Inerte.

### 5.10.3. Mistura Solo Jardim Botânico (48%) e Areia de Fundição (52%)

Os ensaios ambientais foram desenvolvidos no começo da pesquisa, antes da realização dos ensaios mecânicos e, portanto, o “Teor Ótimo de Areia de Fundição” era desconhecido e optou-se por montar uma mistura de solo-areia em proporções próximas.

A mistura de solo Jardim Botânico (48%) e Areia de Fundação (52%) foi submetida ao ensaio de Massa Bruta e os resultados obtidos apresentam parâmetros dentro dos limites dados pela NBR 10004:2004.

Os resultados do ensaio de Lixiviação da mistura solo-areia mostram que os parâmetros satisfazem os limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 – Anexo F.

Finalmente, do ensaio de Solubilização obtiveram-se resultados que mostraram que o parâmetro Índice de Fenóis ultrapassa o limite máximo permitido pela NBR 10004:2004 – Anexo G; a Tabela 5.12 apresenta esse parâmetro.

Tabela 5.12 – Resultados do ensaio de Solubilização para a mistura “48% de Solo Jardim Botânico com 52% de Areia de Fundação”

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>LQ*</b>	<b>Resultados Analíticos</b>	<b>ABNT NBR 10004:2004 VMP**</b>
Índice de Fenóis	mg/L	0,002	0,02	0,01

LQ\* Limite de Quantificação      VMP\*\* Valor Máximo Permitido pela Norma ABNT NBR 10004:2004 (BIOAGRI Ambiental Ltda.).

A partir dos resultados obtidos nos ensaios ambientais, a amostra composta por 48% Solo Jardim Botânico e 52% de Areia de Fundação, pode ser classificada como Classe II A – Resíduo Não Inerte.

### **5.10.3. Ensaio de Solubilização executados no Laboratório de Saneamento da EESC-USP**

A partir da análise dos ensaios de solubilização, nos quais as três amostras estudadas apresentaram índices que ultrapassaram os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G, optou-se por realizar os ensaios de solubilização no Laboratório de

Saneamento da EESC-USP. Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 5.13. Vale salientar que estes ensaios foram executados aproximadamente 18 meses depois dos executados na BIOAGRI Ambiental Ltda.

Para o resíduo Areia de Fundição pode ser observado na Tabela 5.13 que os fenóis não foram detectados no ensaio de solubilização; o restante dos parâmetros foram inferiores aos Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G. Estes resultados permitem que a Areia de Fundição seja classificada como Resíduo Classe II B – Inerte.

O solo Jardim Botânico apresentou fenóis em uma concentração de 0,004 mg/L, inferior aos 0,01 mg/L estipulados como Valor Máximo Permitido (VMP) pela NBR 10004:2004 – Anexo G; os demais parâmetros também foram inferiores aos VMP. Porém, não era esperado que fossem encontrados fenóis no solo JB puro, o que leva à suspeita da “possível” contaminação dos solos da região de Sertãozinho. Apesar disso, o solo JB pode ser classificado como Resíduo Classe II B – Inerte.

Finalmente, na mistura JB com 52% de AF, o índice de fenóis não foi detectado e todos os demais parâmetros satisfazem os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G, o que permite classificar a mistura como Resíduo Classe II B – Inerte.

Tabela 5.13 – Resultados do ensaio de solubilização executado no Laboratório de Saneamento da EESC-USP.

<b>Parâmetros</b>	<b>UNID</b>	<b>Areia de Fundição</b>	<b>Jardim Botânico</b>	<b>Areia de Fundição (52%) Jardim Botânico (48%)</b>
<b>Ag</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Al</b>	(mg/L)	ND	ND	0.06
<b>As</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Ba</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Cd</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Cianeto</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Cloreto</b>	(mg/L)	3.5	4	14
<b>Cr</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Cu</b>	(mg/L)	0.02	0.02	0.01
<b>Fe</b>	(mg/L)	0.07	3.2	9.28
<b>Fenol</b>	(mg/L)	ND	0.004	ND
<b>Fluoreto</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Mn</b>	(mg/L)	0.07	ND	0.01
<b>Na</b>	(mg/L)	2.3	2.6	2.1
<b>Nitrato</b>	(mg/L)	2.53	1.35	1.46
<b>Pb</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Se</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Se</b>	(mg/L)	ND	ND	ND
<b>Sulfato</b>	(mg/L)	ND	10	13
<b>Surfactado</b>	(mg/L)	2.4	2.5	5.5
<b>Zn</b>	(mg/L)	0.1	0.11	0.12
<b>pH Final</b>		8.15	6.93	7.7

ND = Não Detectado

Assim, pode-se verificar que quando comparados os resultados dos ensaios realizados na BIOAGRI Ambiental Ltda. com os executados no Laboratório de Saneamento da EESC-USP, que os índices de fenóis foram superiores na análise do primeiro laboratório. Entretanto, os ensaios foram efetuados na BIOAGRI Ambiental Ltda. no início desta pesquisa e as amostras foram levadas diretamente do local da coleta até o Laboratório; enquanto que os testes realizados no Laboratório de Saneamento da EESC-USP foram executados 18 meses depois e, durante esse tempo, as amostras permaneceram armazenadas em sacos ao ar livre no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC-USP. Isto leva a induzir

que o tempo e as condições de armazenamento das amostras estudadas podem ter influenciado de alguma maneira nos resultados obtidos nos ensaios ambientais executados no Laboratório de Saneamento da EESC-USP.

A “Decisão de Diretoria N° 152/2007/C/E, de 08 de agosto de 2007” da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB – faz referência da reutilização da areia de fundição. Segundo este documento, para avaliar propostas de reutilização do resíduo areia de fundição, este deve ser classificado como Classe II – A ou II – B, de acordo com a norma NBR 10004:2004. Considerando isto, a areia de fundição utilizada nesta pesquisa pode ser sujeita a avaliação da CETESB para seu reaproveitamento em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis de baixo volume de tráfego.

---

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

### 6.1. CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa permitiu que fosse realizada uma avaliação das propriedades mecânicas e ambientais da areia de fundição quando incorporada aos solos lateríticos argilosos.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões fundamentadas nos resultados, nas análises e nas discussões apresentadas no Capítulo 5. Deve-se ressaltar que as conclusões apresentadas restringem-se aos solos lateríticos argilosos com incorporação de areia de fundição proveniente do processo de *cold-box* (cura a frio), sendo que as generalizações, para outros tipos de solos e areias provenientes de outros tipos de processos de fundição, devem ser realizadas considerando essa restrição.

### 6.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO ÀS CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS E ÍNDICES FÍSICOS

A partir das classificações dos solos artificiais pode-se concluir:

- o limite de liquidez e o índice de plasticidade decresceram com o incremento do teor de areia de fundição nos solos;
- nas classificações tradicionais de solos USCS e HRB, o aumento progressivo do teor de areia originou solos SM e SC e A-4 e A-2-4 respectivamente, materiais esses que apresentam comportamento de regular a bom como material de subleito;

- segundo a classificação MCT, os índices  $e'$  e  $c'$  obtidos concordaram com o esperado, já que o  $e'$  se manteve aproximadamente constante, pois a matriz argilosa foi a mesma e o  $c'$  fez um caminhar de direita à esquerda indicando a diminuição da argilosidade dos solos com o aumento do teor de areia de fundição;
- na Classificação MCT, os solos com 0% e 20% de areia apresentam comportamento Laterítico Argiloso (LG'), indicando uso preferencial como proteção à erosão; entretanto, os solos com adição de 40% a 70% de areia apresentam comportamento Laterítico Arenoso (LA'), material ideal para ser usado em bases e sub-bases de pavimento, reforços de subleitos e aterros.

### **6.3. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS DE MINI-CBR, EXPANSÃO E CONTRAÇÃO**

Do ensaio de mini-CBR podem ser realizadas as seguintes conclusões:

- os valores de índice de suporte de mini-CBR indicaram pequena variação em função do aumento do teor de areia de fundição. O solo artificial Jardim Botânico com 60% de areia de fundição apresentou os maiores valores de mini-CBR imediato e após 24h de imersão, iguais a 52 e 48%, respectivamente;
- as expansões foram iguais a zero para todos os teores de areia de fundição estudados e a contração diminuiu com o aumento do teor de areia até alcançar valores de 0,2%, para os teores de areia de 60 e 70%, inferiores aos valores apresentados nas especificações do DER-SP (1991);
- foi observado que as umidades ótimas das misturas decresceram com o aumento do teor de areia de fundição, enquanto que as massas específicas aumentaram, como era esperado;

- o maior valor de perda de suporte por imersão obtido foi de 37%, para o solo puro.

#### **6.4. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS DE INFILTRABILIDADE E PERMEABILIDADE**

Dos ensaios de infiltrabilidade e permeabilidade realizados nos solos artificiais, conclui-se que:

- a infiltrabilidade, representada pelo coeficiente de sucção capilar, decresce com o aumento do teor de areia adicionada ao solo, de  $6,0 \times 10^{-4} (cm/\sqrt{\min})$ , para o solo Jardim Botânico puro, até o valor de  $2,5 \times 10^{-4} (cm/\sqrt{\min})$  para o solo com 70% de resíduo, o que confirma que os solos lateríticos argilosos apresentam um coeficiente de sorção maior que dos solos lateríticos arenosos;
- a permeabilidade apresentou uma tendência crescente com o aumento do teor de areia de fundição. O solo Jardim Botânico puro apresentou um coeficiente de permeabilidade de  $5,0 \times 10^{-7} (cm/s)$  e o mesmo solo, com 70% de resíduo adicionado, o valor de  $1,0 \times 10^{-6} (cm/s)$ . Apesar desse aumento, pode-se verificar que o solo com 70% de areia – maior porcentagem adicionada ao solo utilizada na pesquisa – apresenta permeabilidade baixa, devido ao alto teor argiloso do solo utilizado, o que garante a “impermeabilidade” dos solos ainda que com grandes teores de areia.

#### **6.5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS DE CBR E EXPANSÃO**

Do ensaio de CBR tradicional conclui-se que:



- o valor do Índice de Suporte Califórnia aumenta com a adição do teor de areia de fundição até um valor máximo de 67% para o teor de 60% de resíduo adicionado ao solo; a partir desse teor o valor do CBR decresce;
- a expansão, com sobrecarga padrão, mostrou-se decrescente com o aumento do teor de areia.

## **6.6. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS**

A partir dos resultados obtidos no Ensaio Triaxial Cíclico conclui-se o seguinte:

- o Modelo Composto apresentou o melhor ajuste quando comparado com os outros modelos utilizados nesta pesquisa;
- conforme aumenta o teor de areia de fundição adicionado aos solos lateríticos argilosos, a qualidade do ajuste do modelo em função da tensão desvio piora, enquanto que a do modelo em função da tensão de confinamento melhora;
- os valores de Módulo de Resiliência apresentaram uma tendência decrescente com o aumento do teor de areia de fundição, de aproximadamente 400 MPa, para os solo Jardim Botânico e Nova Aliança puros, até 100 MPa para os mesmos solos com Areia de Fundição ou Areia Virgem adicionada. Porém, é observado que, a partir do teor de areia de 40% até 70%, na matriz Jardim Botânico os valores de Módulo de Resiliência se mantêm em um patamar em torno dos 100 MPa;
- a partir da estrutura de pavimento proposta no estudo, foi verificado que a condição de carregamento simples – carregamento de uma roda só – gerou Módulos de Resiliência dos solos, na camada de base, ligeiramente maiores que aqueles módulos obtidos a partir da condição de carregamento duplo – carregamento de duas rodas – com exceção do solo Jardim Botânico com 20% de Areia de Fundição.

- os solos Jardim Botânico e Nova Aliança, misturados com Areia de Fundação e Areia Virgem, mostraram comportamento mecânico semelhante.

## **6.7. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO AOS ENSAIOS AMBIENTAIS**

Da análise dos resultados dos ensaios ambientais – Massa Bruta, Lixiviação e Solubilização – podem ser efetuadas as seguintes observações:

- o resíduo Areia de Fundação, o solo Jardim Botânico e a Mistura de Areia de Fundação (52%) com o solo Jardim Botânico (48%), foram classificados como Classe IIA – Resíduo Não Inerte, a partir dos resultados obtidos na BIOAGRI Ambiental Ltda;
- baseado nos resultados obtidos nos ensaios de solubilização realizados no Laboratório de Saneamento da EESC-USP, o resíduo Areia de Fundação, o solo Jardim Botânico e a Mistura de Areia de Fundação (52%) com o solo Jardim Botânico (48%), foram classificados como Classe IIA – Resíduo Inerte.
- foi observado que os ensaios de solubilização efetuados no Laboratório de Saneamento da EESC-USP, 18 meses depois de que os realizados na BIOAGRI Ambiental Ltda., apresentaram uma diminuição no parâmetro de Índice de Fenóis, que pode ser atribuído ao tempo transcorrido e à armazenagem das amostras.
- no solo Jardim Botânico foi detectado a presença de fenóis nos dois laboratórios onde foram executados os ensaios ambientais, o que leva à suspeita de contaminação dos solos da região de Sertãozinho.
- a partir dos resultados obtidos da BIOAGRI Ambiental Ltda. e do Laboratório de Saneamento da EESC-USP, pode se concluir que o resíduo areia de fundição, estudado, proveniente do processo de moldagem de “Macho”, apresenta características que se enquadram dentro dos parâmetros da decisão promulgada pela CETESB em

Agosto de 2007, o que permite que o resíduo seja avaliado para seu reaproveitamento na construção de pavimentos.

## **6.8. PRINCIPAIS CONCLUSÕES QUANTO À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS EM CAMADAS DE BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS**

Dos resultados dos ensaios executados em corpos de prova de dimensões reduzidas nos solos artificiais montados em laboratório, verificou-se que aquele com 60% de areia de fundição foi o que apresentou melhores propriedades mecânicas, com valores de mini-CBR após imersão de 24h igual a 48%, expansão nula, contração de 0,2% e perda de suporte por imersão da ordem de apenas 8%. Segundo as especificações do DER-SP (1991), Seção 3.09-88 - Base de Solo Arenoso Fino Laterítico, tanto esse solo, quanto o com 70% de areia de fundição atenderiam os requisitos mínimos para serem utilizados em camadas de bases.

Já em relação aos ensaios de CBR tradicional, os resultados indicam que o solo com 60% de areia de fundição poderia ser utilizado como material para base de pavimentos com tráfego leve ( $N \leq 5 \times 10^6$  solicitações de eixo padrão) segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) ( $CBR \geq 60\%$  e  $expansão \leq 0,5\%$ ).

Do exposto pode-se concluir que a adição de 60% de Areia de Fundição a solos lateríticos argilosos gera materiais com características técnicas e comportamento mecânico adequados para serem utilizados nas camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis; porém, o reaproveitamento da Areia de Fundição não é limitado a este teor, já que o resíduo pode ser utilizado em outros teores para as diferentes camadas estruturais.

A partir da adição de 60% de Areia de Fundação pode ser calculado o consumo médio do resíduo na construção de vias urbanas e rodovias vicinais. A título de exemplo, para uma base de 15 cm de espessura, o consumo do resíduo seria de 0,18 t/m<sup>2</sup> e para uma rodovia vicinal de 6,0m de largura, o reaproveitamento alcançaria 1,1 t/m ou 1100 t/km. Portanto, constata-se que o reuso da Areia de Fundação seria elevado se utilizado como insumo de camadas estruturais de pavimentos e conseguiria reutilizar uma parcela significativa das areias utilizadas pelas indústrias siderúrgicas brasileiras.

Os resultados dos ensaios realizados e sua análise, apresentados no capítulo anterior, permitem concluir que o reaproveitamento da areia de fundição, incorporada a solos lateríticos argilosos para a construção de bases e sub-bases de pavimentos sujeitos a baixo volume de tráfego é viável. Assim, demonstra-se que o objetivo geral e os objetivos específicos traçados nesta pesquisa foram atingidos.

Finalmente, conclui-se que o reaproveitamento do resíduo Areia de Fundação é promissor como material de construção de estruturas de pavimentos e favoreceria o meio ambiente de duas maneiras: uma porque evitar-se-ia a disposição inadequada desse resíduo em aterros e outra porque poder-se-ia utilizar materiais locais argilosos onde há escassez de solos arenosos.

## **6.9. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com o propósito de ampliar os conhecimentos em relação ao resíduo e assim facilitar a aceitação da Areia de Fundação como material de construção de rodovias, na continuação são realizadas sugestões para trabalhos futuros:

- investigar o comportamento dos solos lateríticos argilosos para teores de areia de fundição não estudados e para outros tipos de areias, para verificar se permanece a tendência de regularidade do comportamento encontrado neste estudo;
- estudar a incorporação da areia de fundição a solos de outras regiões com concentração de siderúrgicas e, portanto, de resíduos;
- avaliar a influência do tempo nos parâmetros considerados nos ensaios ambientais para classificar os resíduos;
- analisar diferentes métodos de dimensionamento para diferentes condições de carregamento;
- a construção de um trecho experimental, sob condições conhecidas, seria ideal para poder investigar o comportamento mecânico da areia de fundição incorporada a solos argilosos, assim como o impacto ambiental que o resíduo poderia causar ao longo do tempo.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AASHTO T 307-99 (1999). *Standard Method of Test for determining the resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABIFA, Associação Brasileira de Fundição (2008). <http://www.abifa.com.br>

ALVAREZ NETO, L. (1998). Proposta de um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis para vias de baixo volume de tráfego com a utilização de solos lateríticos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). NBR 10004:2004: Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2004). NBR 10005:2004. Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2004). NBR 10006:2004. Solubilização de resíduos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2004). NBR 10007:2004. Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro.

AYDILEK, H.; GUNNEY, T. (2007). *Laboratory Evaluation of Foundry Sand-Amended Highway Subbases*. Transportation Research Board. Washington D.C.

BARROSO, S.H.A. de. (1996). *Estudo do Comportamento de Solos Artificiais através da Adsorção de Azul de Metileno*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo.

BARROSO, S.H.A. de. (2002). *Estudo dos Solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação em Engenharia Rodoviária*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo.

BERNDT, H. (1989). *Processo Shell: materiais e tecnologia*. Tradução de Herbert Schwarz e outros. ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. São Paulo.

BERNUCCI, L.B. (1997). *Módulo Resiliente de solos lateríticos e sua aplicação ao dimensionamento de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego*. In: 1º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO, 1., Rio de Janeiro, RJ, 1997. *Anais*. Rio de Janeiro, ABPV. v.2.

BERNUCCI, L.L.B. (1995). *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo.

BINA, P.; CASTRO, P.R.F. de; ALVES, J.H. (2003). *Utilização da areia de fundição descartada na pavimentação: como aprovar e transformar resíduo em faturamento*. 34ª Reunião anual de pavimentação – Campinas/SP.

BONET, I.I. (2002). *Valorização do resíduo de areia de fundição (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.* Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina – Santa Catarina.

BRADASCHIA, C. et al. (1981). *Fundição de ligas não ferrosas*. Notas de Aulas. ABM – Associação Brasileira de Metais. 3ª ed. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda.

CAMARGO, M.N.; KLNAT, E.; KAUFFMAN, J.H. (1987). *Classificação de solos usada em levantamento pedológico no Brasil*. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.12, n.1, p.11-33.

CORRÊA, F.C. (1976). *Comportamento de Trechos Experimentais com bases de Solo Arenoso Fino*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo.

CORRÊA, F.C. (1989). *Contribuição à estabilização do Latossolo Roxo*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo.

COSTA, J.H.; MOTTA, L.M.G. (2006). *Estudo da resiliência dos solos finos do litoral de Sergipe*. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 20, Brasília, 2006. Anais. Brasília, ANPET. v.2.

COUTINHO, B.N. (2004). *Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo.

DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. *Manual de Normas: pavimentação*. São Paulo, DER-SP, 1991.

DER-SP – ME 194/88. (1991). *Determinação da Permeabilidade de Solos*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. São Paulo.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Métodos de ensaios*. Rio de Janeiro, DNER, 1987

DNER – ME 093-94. (1994). *Densidade Real dos Solos*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER – ME 51-94. (1994). *Análise Granulométrica de Solos*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER – ME 122-94. (1994). *Determinação do Limite de Liquidez*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER – ME 82-94. (1994). *Determinação do Limite de Plasticidade*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER – ME 258/94. (1994). *Solos Compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER – ME 254/97. (1994). *Solos Compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER – ME 194/88. (1994). *Determinação da Infiltrabilidade de Solos*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER – ME 49-94. (1994). *Determinação do Índice de Suporte Califórnia*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

EMPRAPA. (1999). *Sistema Brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Brasília.

ENCARTA (2006). *Enciclopédia Encarta*. Microsoft Encarta 2006. Microsoft Corporation 2005.

ESPINOSA, V.P. (1987). *Ensaio Triaxiais de Carga Repetida em uma Brita*. Dissertação de Mestrado – PEC, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.

FABBRI, G.T.P. (1994). *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. São Carlos. Tese de Doutorado – EESC/USP. 101p.

F.H.W.A. Federal Highway Administration, Environmental Protection Agency, (2004). *Foundry Sand Facts for Civil Engineers*. U.S. Department of Transportation. Washington.

FERREIRA, J.G.H.M. (2002). *Elaboração e Análise da Base de Dados de Ensaio Triaxiais Dinâmicos da COPPE/UFRJ*. Dissertação (Mestrado) – PEC, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

FERREIRA, J.G.H.M.; MOTTA L.M.G. (2002), *Análise comparativa de modelos de resiliência de solos e materiais não tratados quimicamente*. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 16, Natal, RN, 2002. *Anais*. Natal, ANPET. v.1.

GOÇALVES, R.F.; PARREIRA, A.B. (1999). *Influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso de subleito rodoviário*. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 13. São Carlos, SP, 1999. *Anais*. São Carlos, ANPET. v.1.

Informação Verbal Pama Ltda.

Informação verbal - informações fornecidas por um ex-funcionário da MPL –Motores AS, Anderson Macieira Brame, em março de 2003

JAVED, S.; LOVELL, C.W. (1995). *Uses of Waste Foundry Sands in Civil Engineering*. *Transportation Research Board*, n. 1417, p. 109-116.

KONDIC, V. (1973). *Princípios Metalúrgicos de Fundição*. Tradução de Cláudio Luiz Mariotto e outros. São Paulo: Polígono, Ed. da Universidade de São Paulo.



MACAMBIRA, I.Q. (2002). *Comportamento Hidráulico de alguns solos lateríticos para o uso como barreira impermeável*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo.

MALASYZ, R. (2004). *Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação*. Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, 166p.

MARANGON, M. (2004). *Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para região de Minas Gerais, utilizando Solos Lateríticos locais a partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência*. Tese (Doutorado) – PEC, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MARIOTTO, C.L. (2000). *Regeneração de areias de Fundação*. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de resíduos sólidos industriais – SMA/SP.

MCINTYRE, S.W. et al. (1992). *Beneficiation and Reuse of Foundry Sand Residuals: A Preliminary Report*. *Transactions of the American Foundry men's Society*, vol. 100, p.201-208.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. (2005). *Mecânica dos Pavimentos*. 2ª Edição. Rio de Janeiro.

MOTTA R.S. dos. (2005). *Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – São Paulo.

MOTTA, L.M.G. (1991). *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade de Ensaios de Cargas Repetidas*. Tese (Doutorado) – PEC, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.

MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P. (1986). *Comportamento resiliente de solos arenosos finos*. In: 21a Reunião Anual de Pavimentação. *Anais*. ABPv. Salvador/BA.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1980). *Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitações do método tradicional, apresentação de uma nova sistemática*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 15. Belo Horizonte, 1980. *Separata*.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1981). *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. Rio de Janeiro, 1981. *Separata*.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1985). *Additional considerations about a new geotechnical classification for tropical soils*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1. *Proceedings*. P. 165-174. Brasília, 1985.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo.

OLIVEIRA, C.A.B. de (2003). *Revisão da Correlação Mini-CBR / CBR para Solos do Município de São Carlos – SP*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – São Paulo.

- PABLOS, J.M. (1996). Utilização do Resíduo Sólido Gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila no setor da construção civil. Anais do 12 CBECIMAT, 1996. v.1. p.13-16.
- PARENTE, E.B.; PARREIRA, A.B.; SOARES, J.B. (2002). *Avaliação do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico e de outro Não Laterítico estabilizados com Cimento*. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 16, Natal, RN, 2002. Anais. Natal, ANPET. v.1.
- PARREIRA, A.B.; CAMPO, C.A.T.; CUNTO, F.J.C. (1998). *Estudo do módulo de resiliência de materiais usados em pavimentação*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 31. São Paulo, SP, 1998. Anais. São Paulo, ABPV. v.1, p.233-257.
- PARSONS, A.W. (1976). *The rapid measurement of the moisture condition of earthwork material*. Transportation and Road Research Laboratory, Report, n.750.
- PARTRIDGE, B.K. et al (1999). *Field Demonstration of Highway Embankment Construction Using Waste Foundry Sand*. Transportation Research Record, n. 1670, p. 98-105.
- PRADO, H. do. (2003). *Solos do Brasil*. 3a Edição. Piracicaba, São Paulo, SP.
- RAMOS, C.R. (2003). *Estudo para o Desenvolvimento de um Catalogo de Pavimentos Flexíveis do Município do Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado) – PEC, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.
- ROLIM, M.M. (1999). *Caracterização físico-mecânica de misturas de solo, cal e resíduo “Água-de-Cola”*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Campinas/SP.
- SANTANNA, J.A. (1998). *Estudo do comportamento de solos artificiais em função da variação das características de sua fração grossa*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – São Paulo.
- SCHALCH, V. et al. (2000). *Parecer Técnico – Avaliação das condições ambientais de área com depósito de resíduos industriais pertencente à Companhia Brasileira de Tratores – Município de Ibaté/SP*. FIPAI/EESC.
- SCHALCH, V. et al. (2002). *Prevenção da Poluição, análise de ciclo de vida, redução, reutilização e reciclagem de resíduos sólidos*. Apostila. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo.
- SEED, H. B. & CHAN, C. K. (1959). *Structure and strength characteristics of compacted clays*. Geotech. Testing J., 13(3), p.215-225.
- SEED, H.B., WOODWARD, R.J.; LUNDGREN, R. (1964). *Fundamental aspects of the Atterberg Limits*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division – Proceedings of the American Society of Civil Engineers. SM4 p.75-105.
- SIEGEL, M. et al. (1982). *Fundição*. Notas de Aulas. ABM – Associação Brasileira de Metais. 13ª ed. São Paulo: Édile Serviços gráficos e editora Ltda.

SÓRIA, M.H.A. (1977). *Relatório técnico de apreciação de programa desenvolvido dentro do convênio DER-IPAI 44/77. – “Estudo comparativo das características geotécnicas de solo laterítico e solo residual saprolítico a partir de solos montados em laboratório em função da granulometria”*. São Carlos, 1977.

SÓRIA, M.H.A.; FABBRI, G.T.P. (1981). *O ensaio Mini-MCV – um ensaio de MCV, Moisture Condition Value, com corpos de prova de dimensões reduzidas*. REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO, 15. Belo Horizonte, MG.

SÓRIA, M.H.A.; FABBRI, G.T.P. (1981). *Peculiaridades da fração areia de solos lateríticos utilizados na construção de bases de pavimentos*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. COPPE/UFRJ; CNPq; ABMS. P.261-273.

STRAUSS, K. (1970). *Applied Science in the Casting of Metals*. Oxford: Pergamon Press Ltda.

TAKEDA, M.C. de. (2006). *A Influencia da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – São Paulo.

THULER, R.B. (2005). *Estudo de Solos do Estado de Rio de Janeiro para Aplicação em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*. Dissertação (Mestrado) - PEC, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

TRICHÊS, G.; FARIA, E.R. de.; MACCARINI, M. (2006). *Análise dos aspectos ambientais da utilização de cinzas-pesadas em estruturas de pavimentos*. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 20, Brasília, 2006. *Anais*. Brasília, ANPET. v.2.

VILAR, O. M., ROHM, S. A. (1994). *Comparação entre um Ensaio de Compactação de Solos em Molde de Dimensões Reduzidas e o Ensaio Proctor Normal – X COBRAMSEF - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos de Engenharia de Fundações*, p. 373-380, Fortaleza, CE.

VILIBOR, D.F. (1981). *Pavimentos Econômicos, novas considerações*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – São Paulo.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S.; CINCERRE, J.R.; SERRA, P.R.M.; ZUPPOLINI, A.N.; (2007). *Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas, bases alternativas com solos lateríticos*. São Paulo.

<http://www.rmrc.unh.edu/Partners/mainMenu.htm>

[www.backyardmetalcasting.com](http://www.backyardmetalcasting.com)

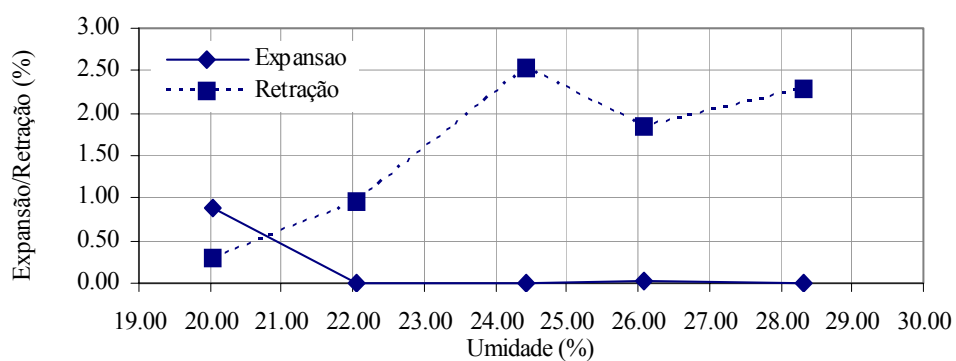
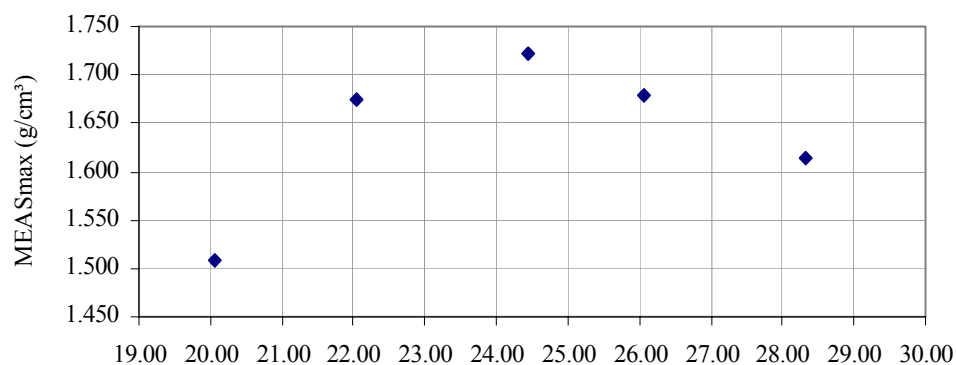
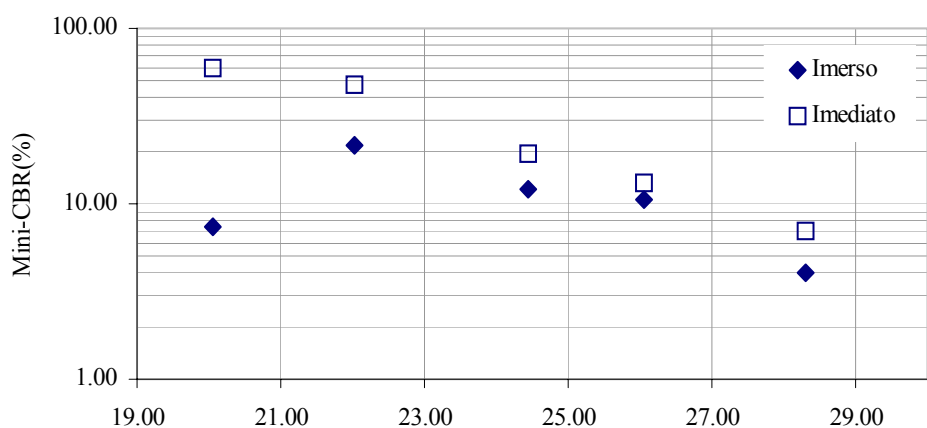
## **APÊNDICES**



## APÊNDICE I – Resultados dos ensaios de mini-CBR, expansão e contração na energia intermediária de compactação.

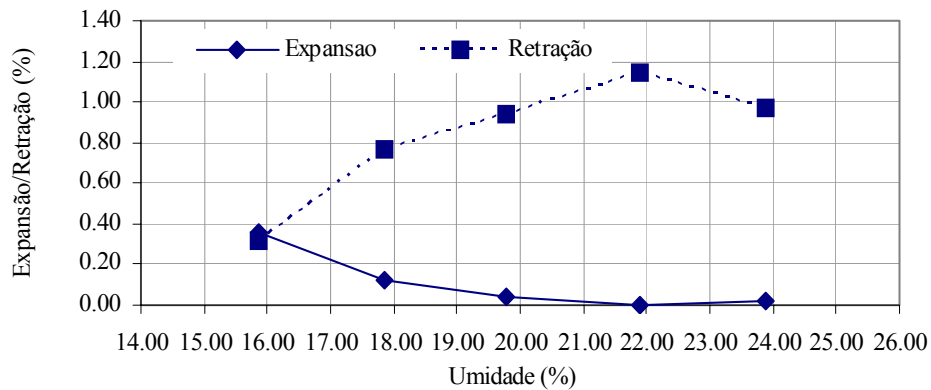
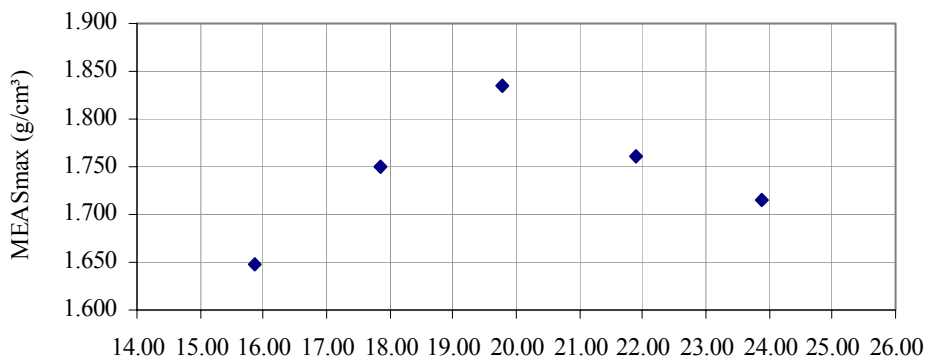
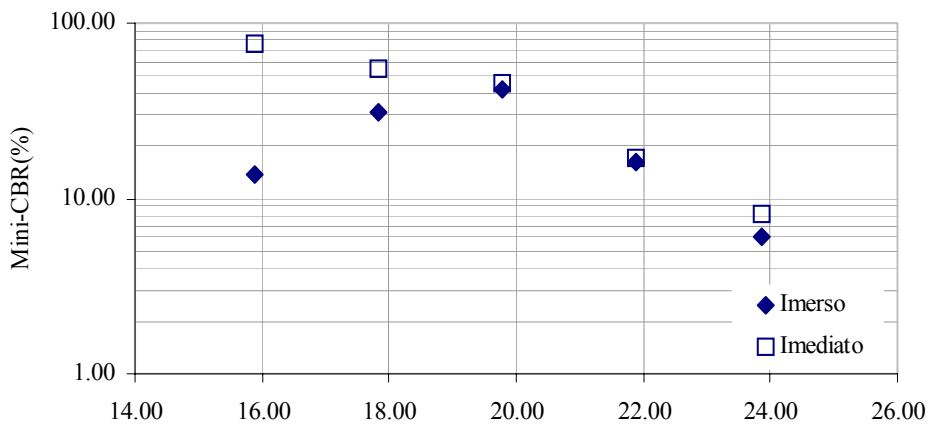
### Solo Jardim Botânico (JB0AF)

umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediato (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
20.05	1.509	58.93	7.43	0.88	0.30
22.04	1.673	47.70	21.47	0.00	0.96
24.44	1.721	19.47	12.11	0.00	2.53
26.07	1.679	13.32	10.47	0.02	1.85
28.31	1.614	6.96	4.10	0.00	2.28



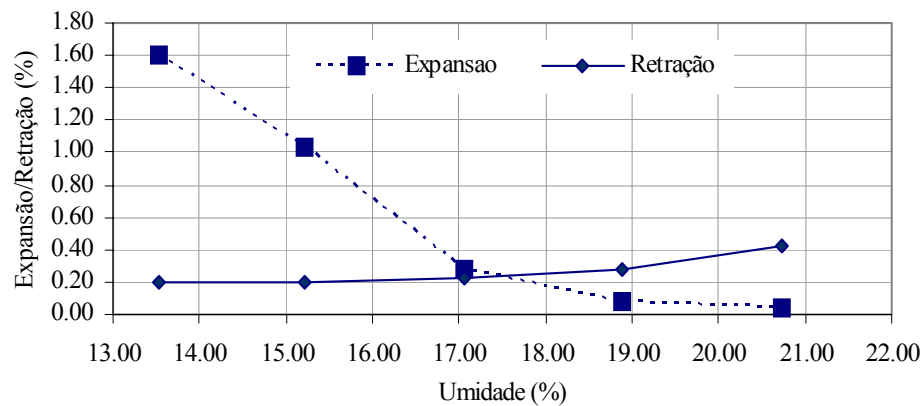
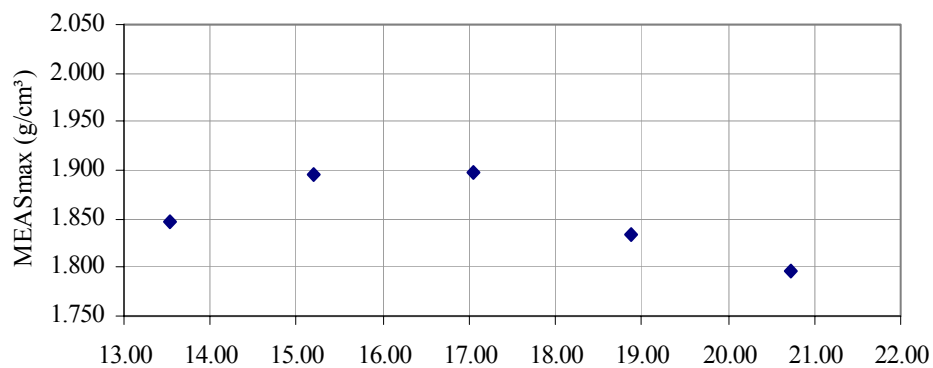
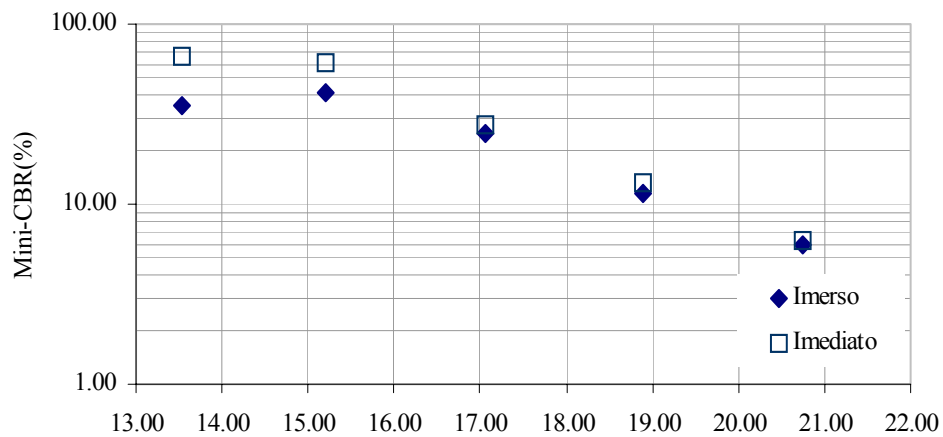
### Solo Jardim Botânico com 20% de Areia de Fundição (JB20AF)

umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediato (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
15.88	1.647	75.90	13.70	0.36	0.32
17.85	1.749	55.00	30.70	0.12	0.77
19.77	1.835	44.90	41.40	0.04	0.94
21.89	1.761	17.10	15.90	0.00	1.15
23.88	1.716	8.20	6.00	0.02	0.97



### Solo Jardim Botânico com 40% de Areia de Fundação (JB40AF)

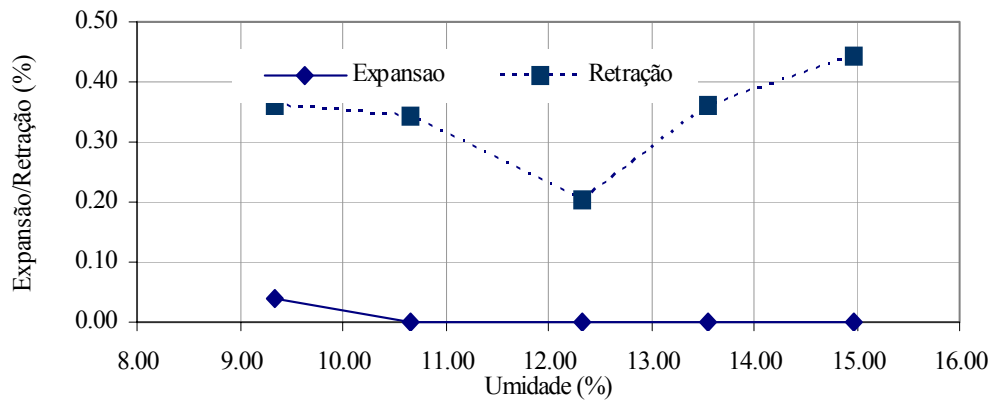
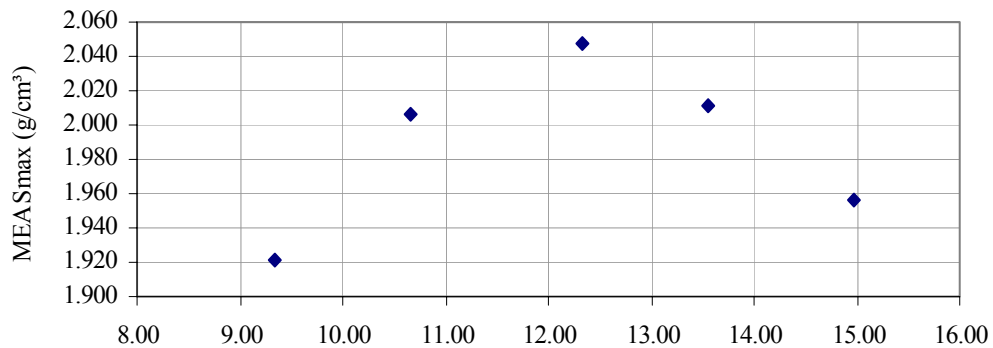
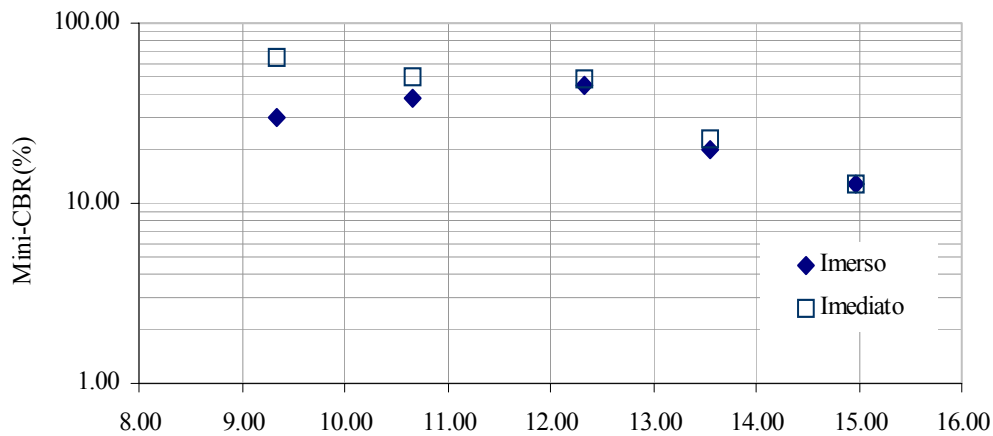
umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediato (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
13.54	1.846	65.90	35.00	0.00	0.50
15.21	1.896	61.60	41.40	0.12	0.67
17.05	1.898	27.60	24.80	0.02	0.89
18.88	1.833	13.00	11.40	0.06	1.33
20.74	1.795	6.30	6.00	0.00	1.13





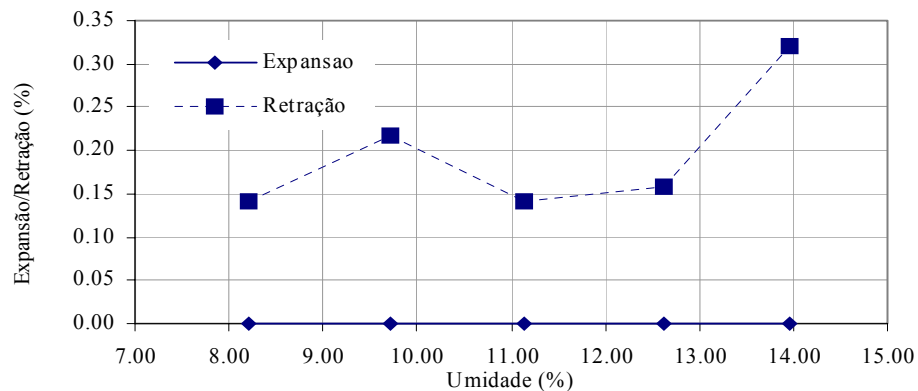
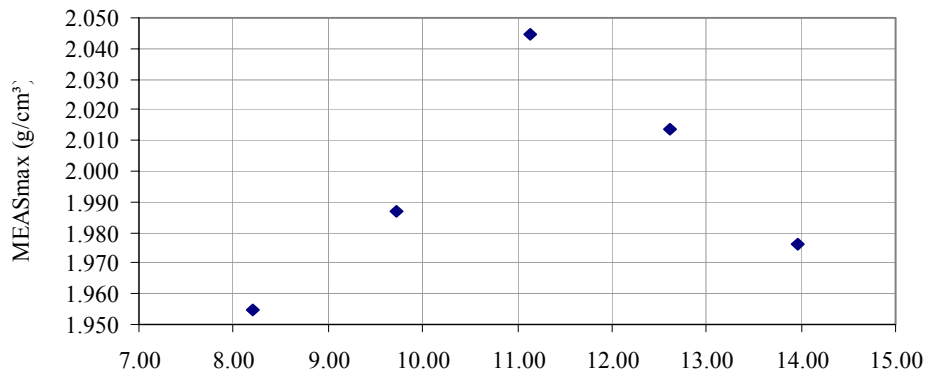
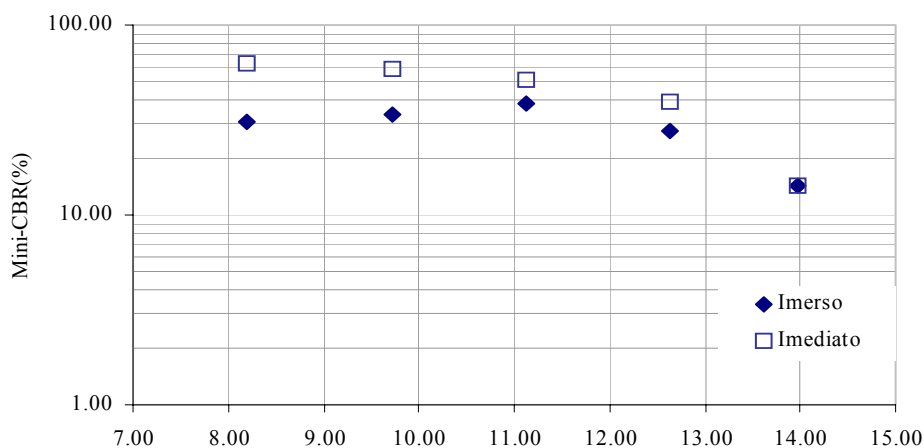
### Solo Jardim Botânico com 60% de Areia de Fundação (JB60AF)

umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediate (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
9.33	1.921	64.30	29.90	0.04	0.36
10.65	2.006	50.50	37.90	0.00	0.34
12.33	2.047	49.10	45.60	0.00	0.20
13.56	2.011	22.60	19.70	0.00	0.36
14.97	1.956	12.90	12.90	0.00	0.44



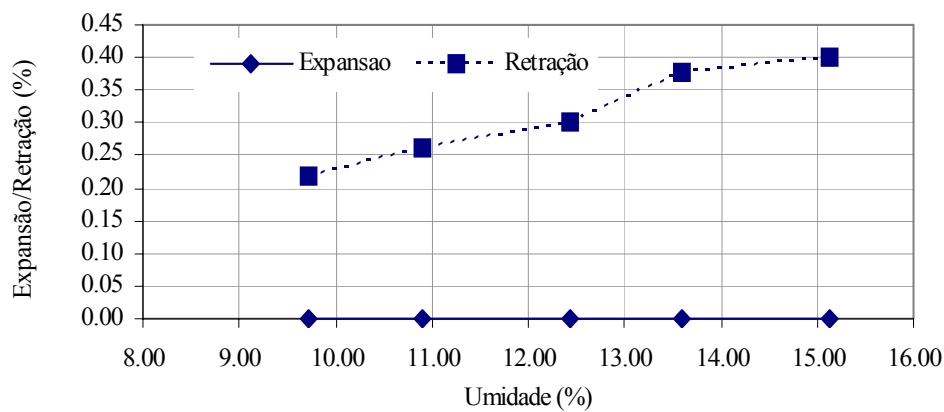
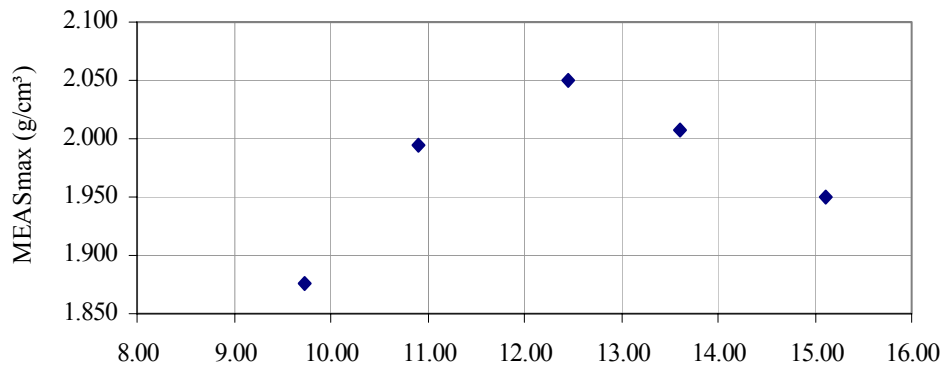
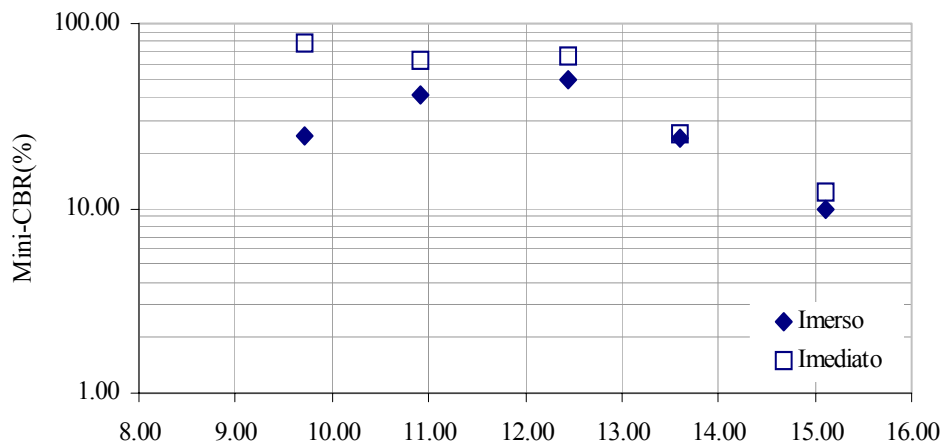
### Solo Jardim Botânico com 70% de Areia de Fundição (JB70AF)

umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediato (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
8.20	1.954	62.9	30.6	0	0.14
9.71	1.987	58.7	33.6	0	0.21
11.13	2.044	51.2	38.9	0	0.14
12.62	2.013	39.3	27.9	0	0.15
13.96	1.976	14.4	14.4	0	0.32



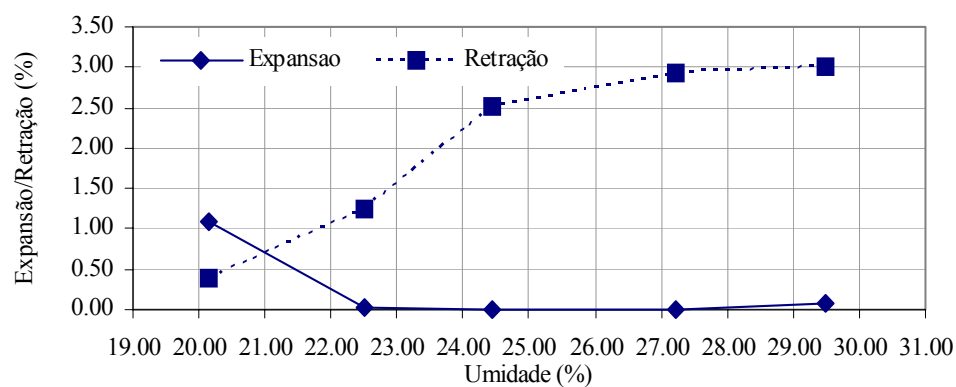
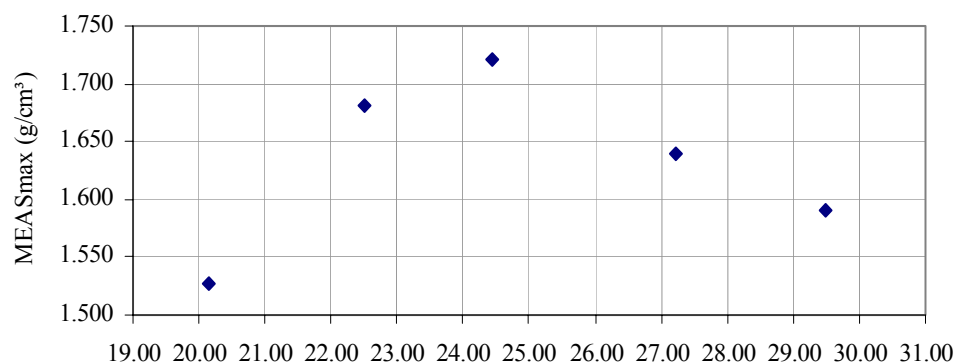
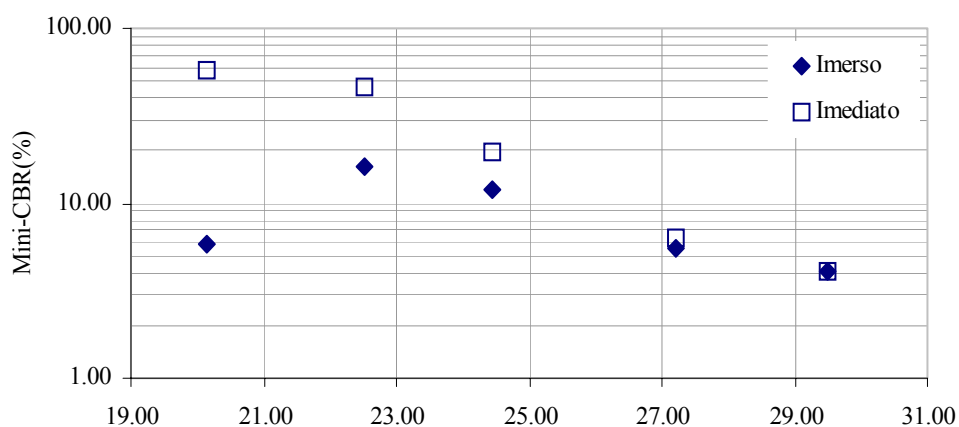
### Solo Jardim Botânico com 60% de Areia Virgem (JB60AV)

umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediato (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
9.73	1.876	78.00	24.70	0.00	0.22
10.91	1.995	63.60	40.80	0.00	0.26
12.44	2.050	67.60	50.00	0.00	0.30
13.61	2.007	25.00	24.10	0.00	0.38
15.12	1.951	12.20	9.80	0.00	0.40



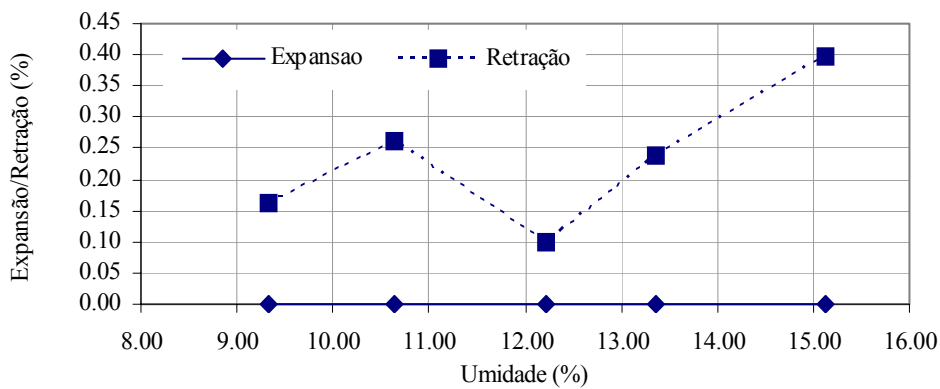
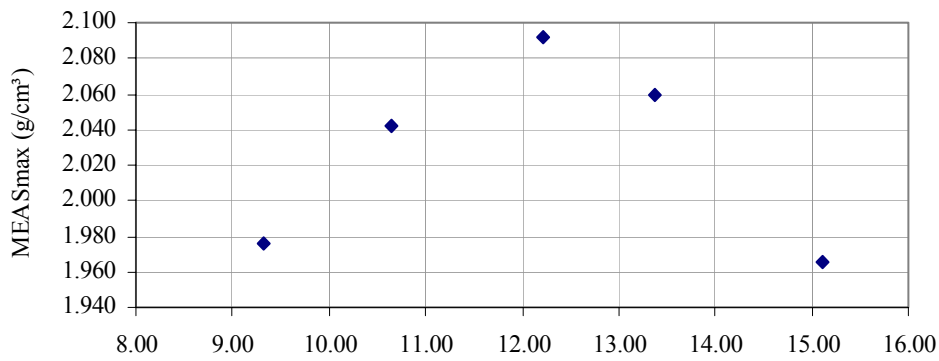
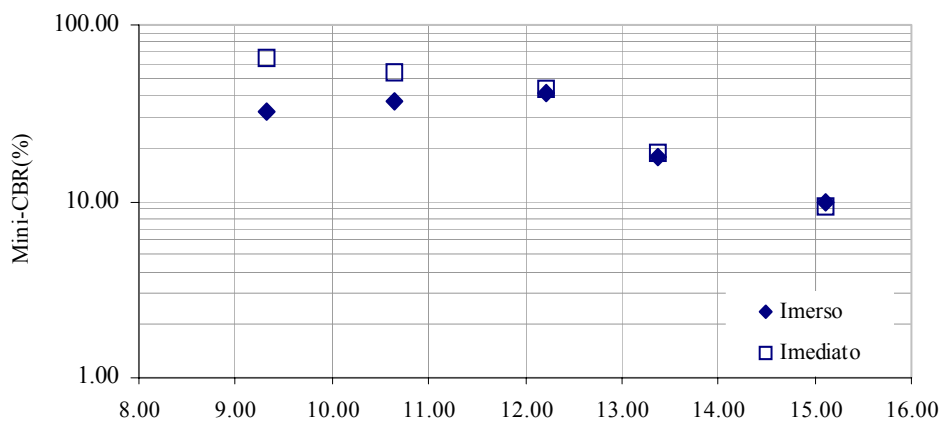
## Solo Nova Aliança (NV0AF)

umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediato (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
20.16	1.527	57.41	5.89	1.08	0.40
22.52	1.682	45.60	16.40	0.02	1.24
24.44	1.721	19.92	12.11	0.00	2.51
27.21	1.640	6.32	5.51	0.00	2.94
29.48	1.591	4.10	4.10	0.08	3.02



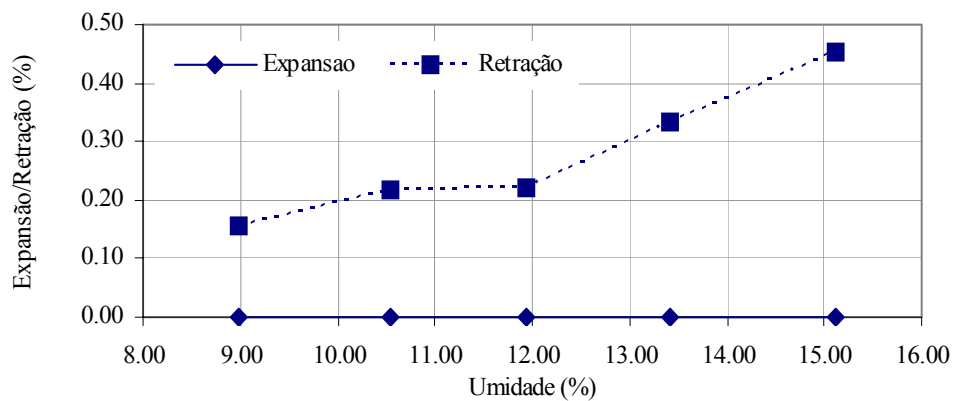
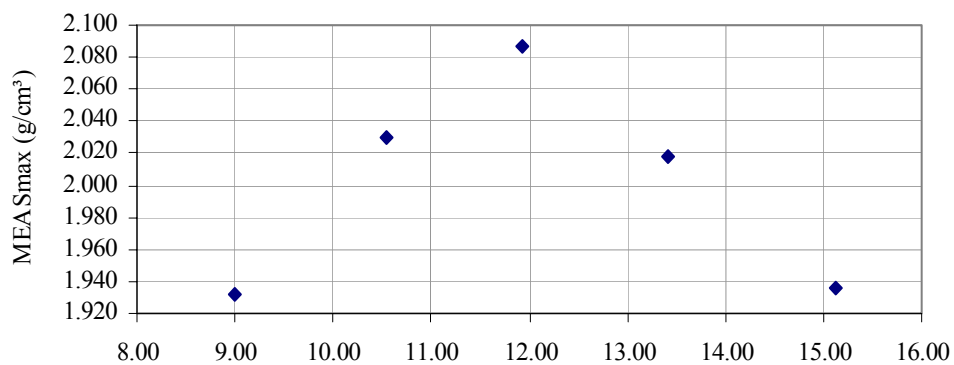
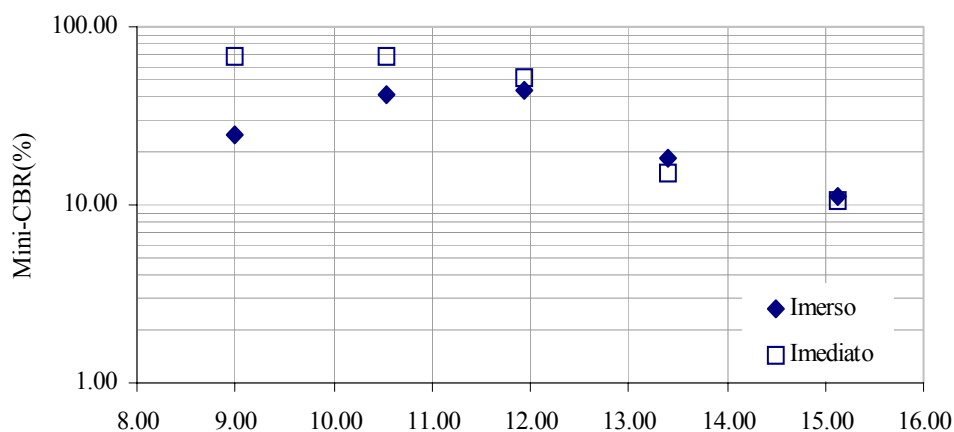
### Solo Nova Aliança com 60% de Areia de Fundição (NV60AF)

umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediato (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
9.33	1.975	64.60	32.40	0.00	0.16
10.64	2.042	54.20	37.20	0.00	0.26
12.22	2.092	43.70	41.60	0.00	0.10
13.36	2.059	18.70	17.70	0.00	0.24
15.12	1.966	9.30	9.90	0.00	0.40



### Solo Nova Aliança com 60% de Areia Virgem (NV60AV)

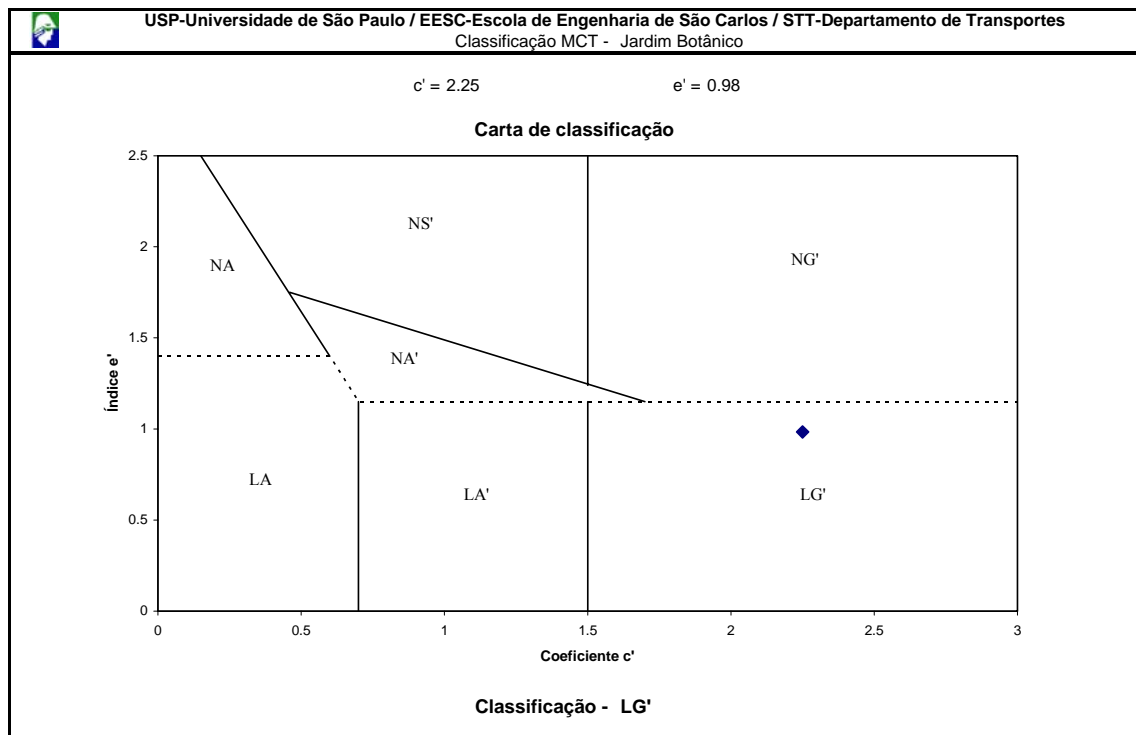
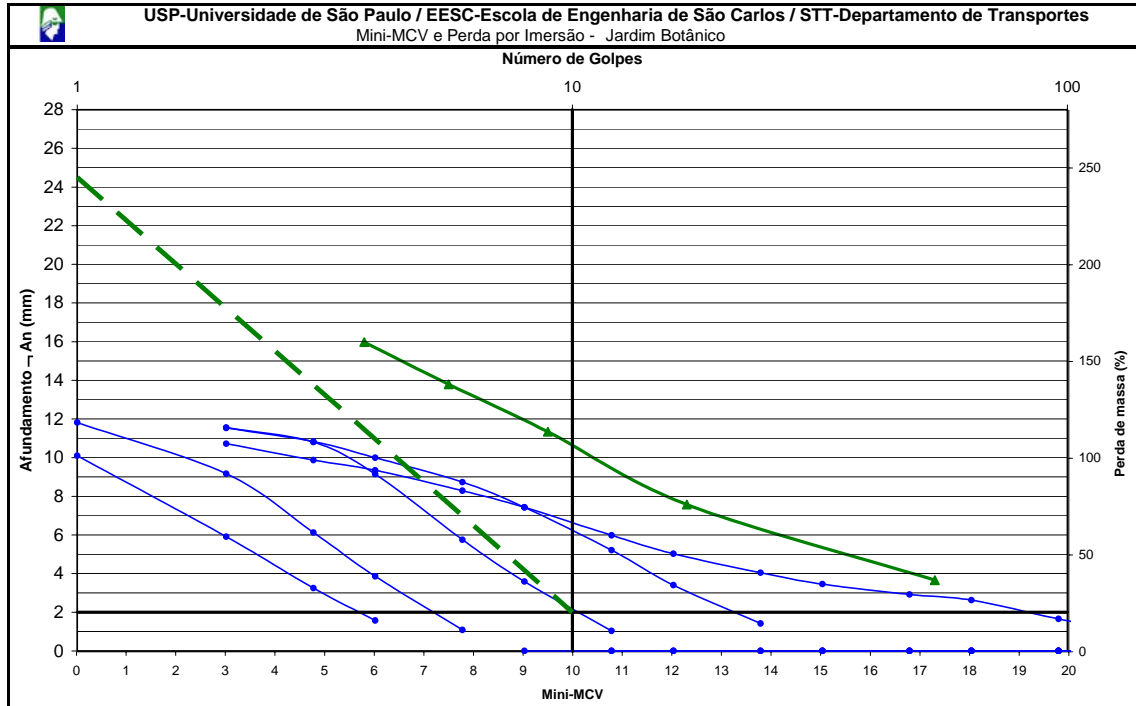
umidade (%)	MEASmax (g/cm <sup>3</sup> )	mini-CBR imediato (%)	mini-CBR 24h (%)	Expansão (%)	Retração (%)
8.99	1.932	67.60	24.70	0.00	0.16
10.54	2.029	69.00	41.60	0.00	0.22
11.94	2.087	51.20	44.00	0.00	0.22
13.41	2.018	15.20	18.40	0.00	0.33
15.12	1.936	10.60	11.30	0.00	0.45





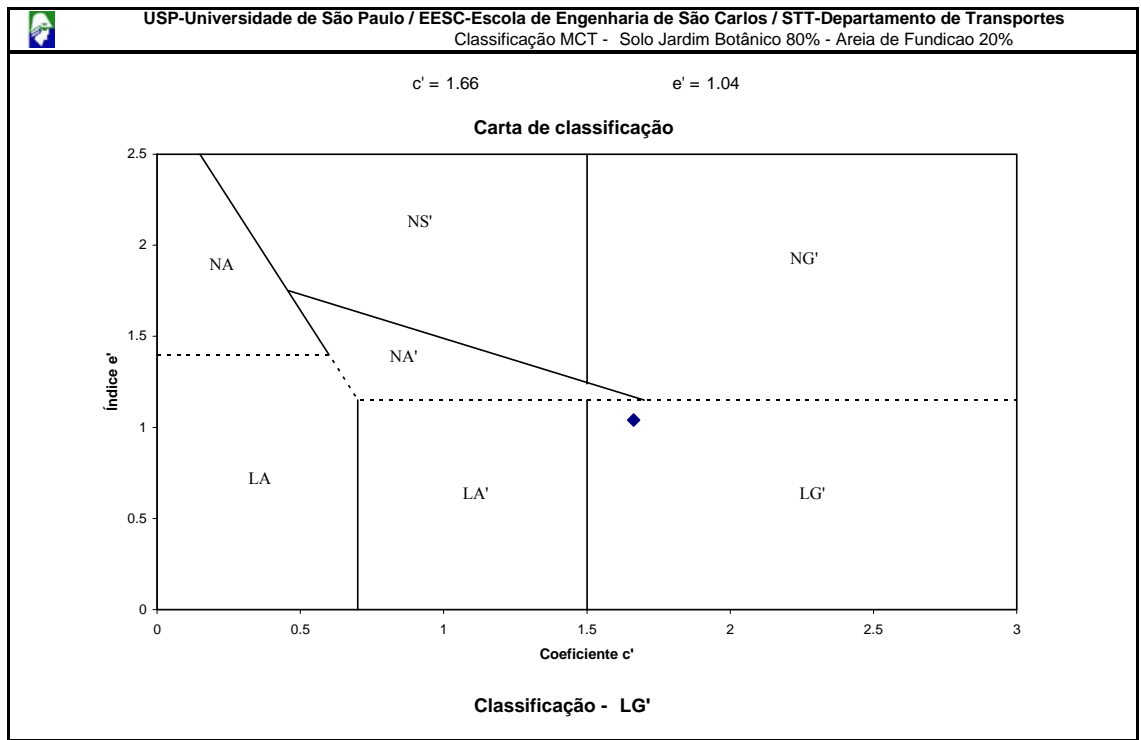
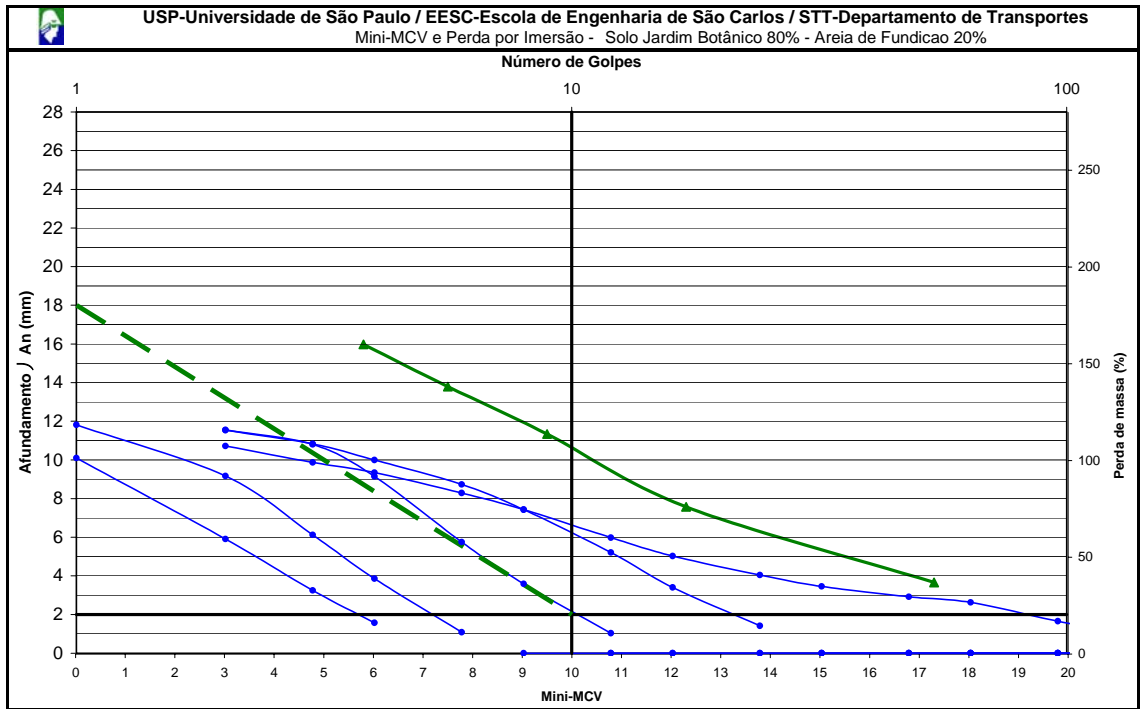
## APÊNDICE II - Resultados dos ensaios de mini-MCV.

### Solo Jardim Botânico (JB0AF)

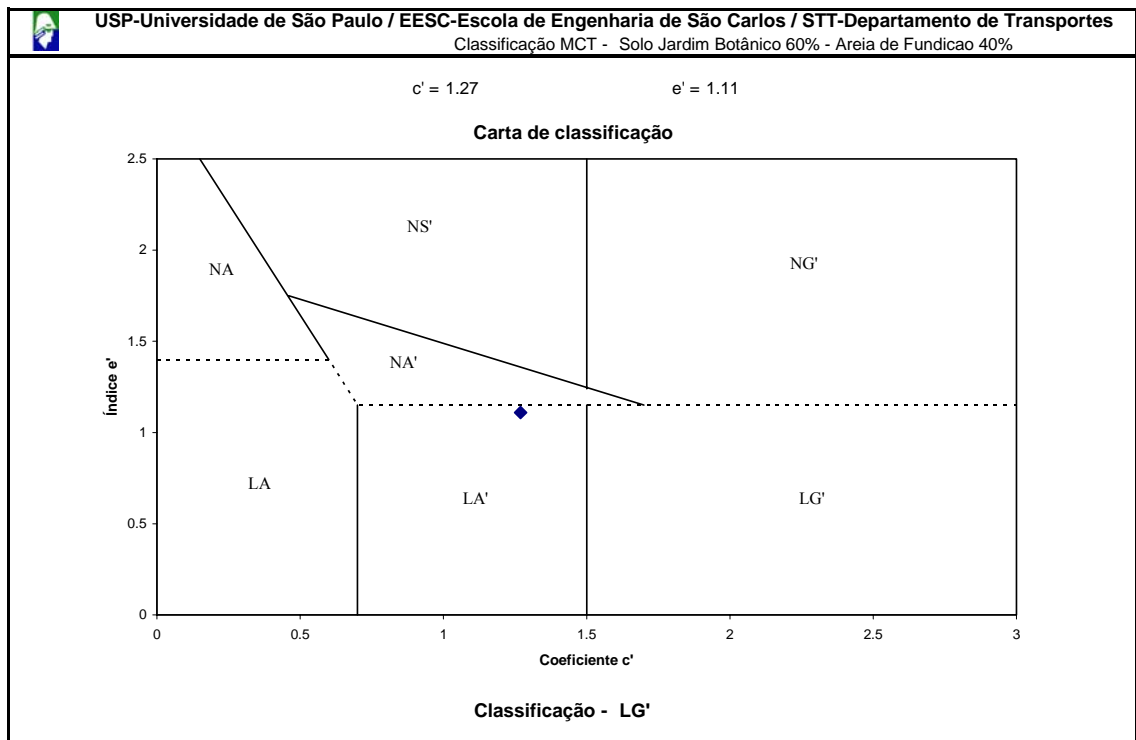
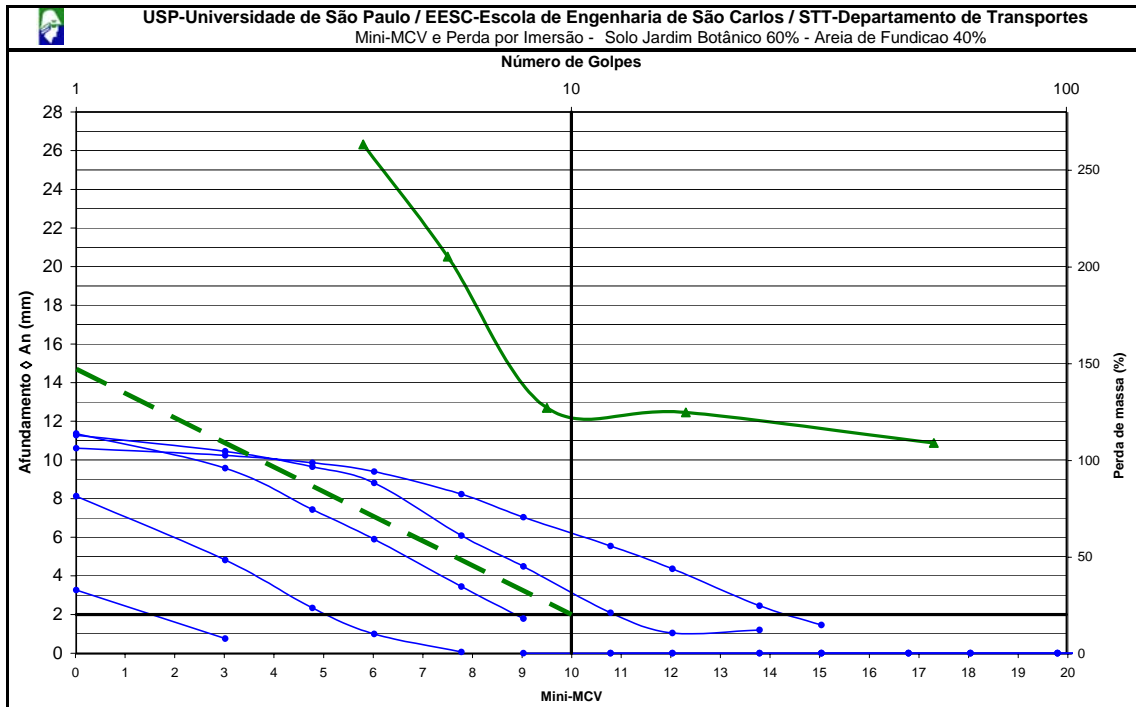




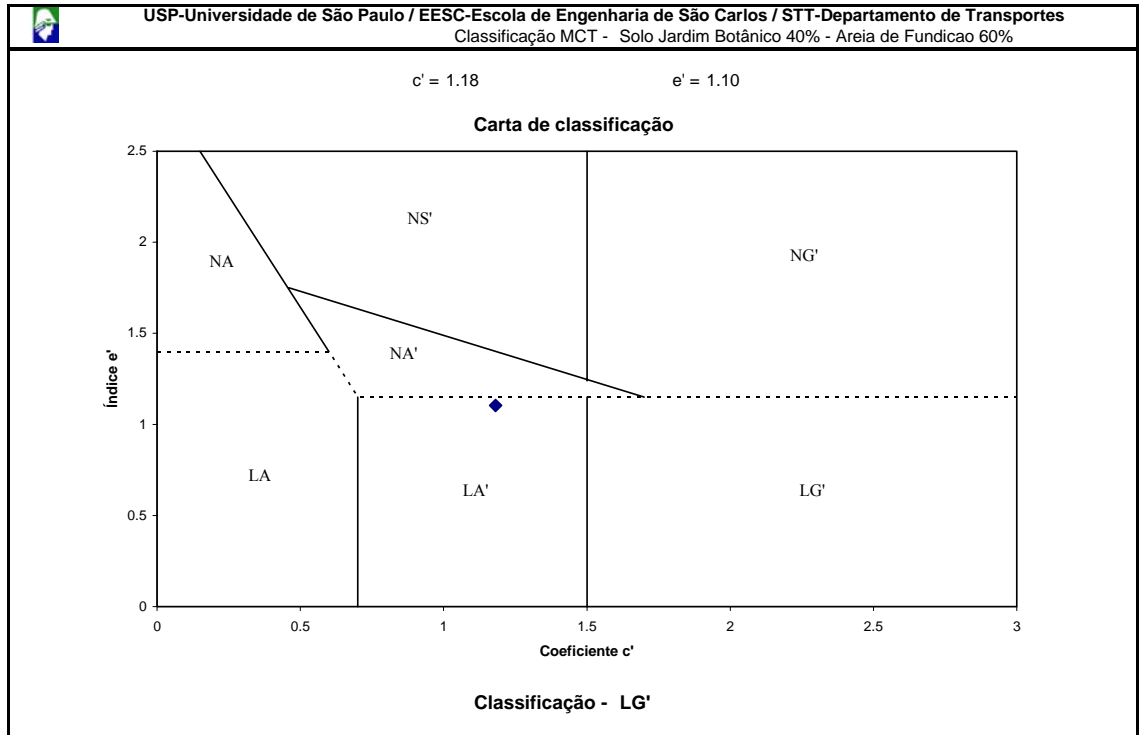
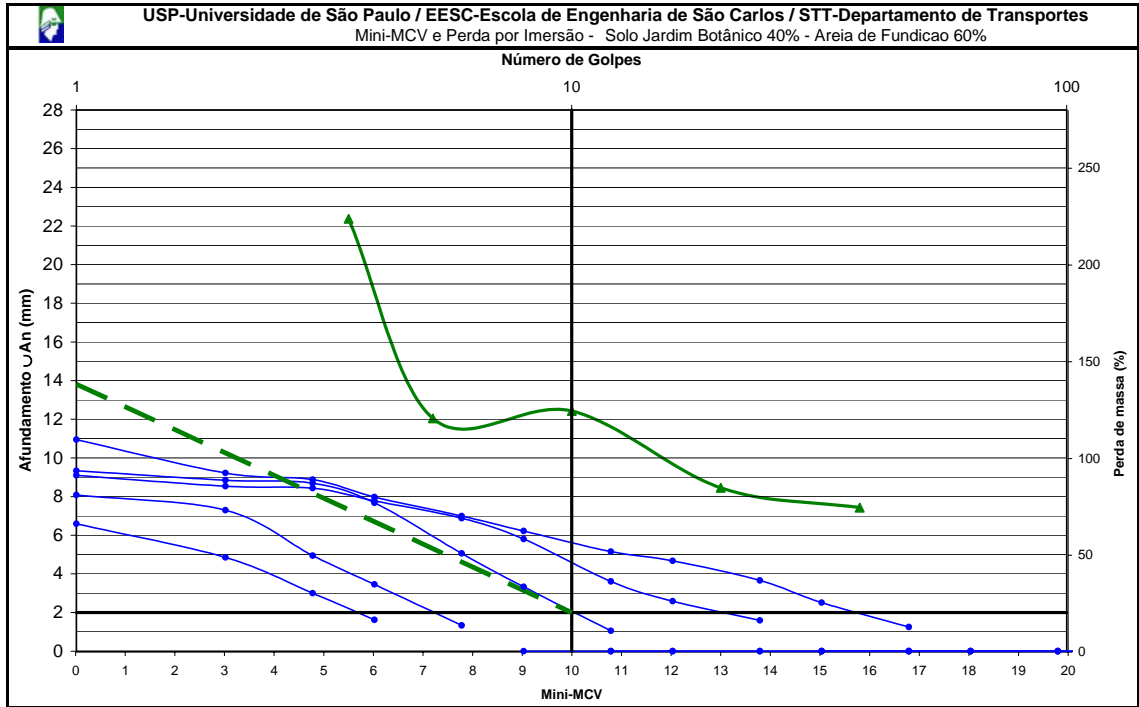
**Solo Jardim Botânico com 20% de Areia de Fundição (JB20AF)**



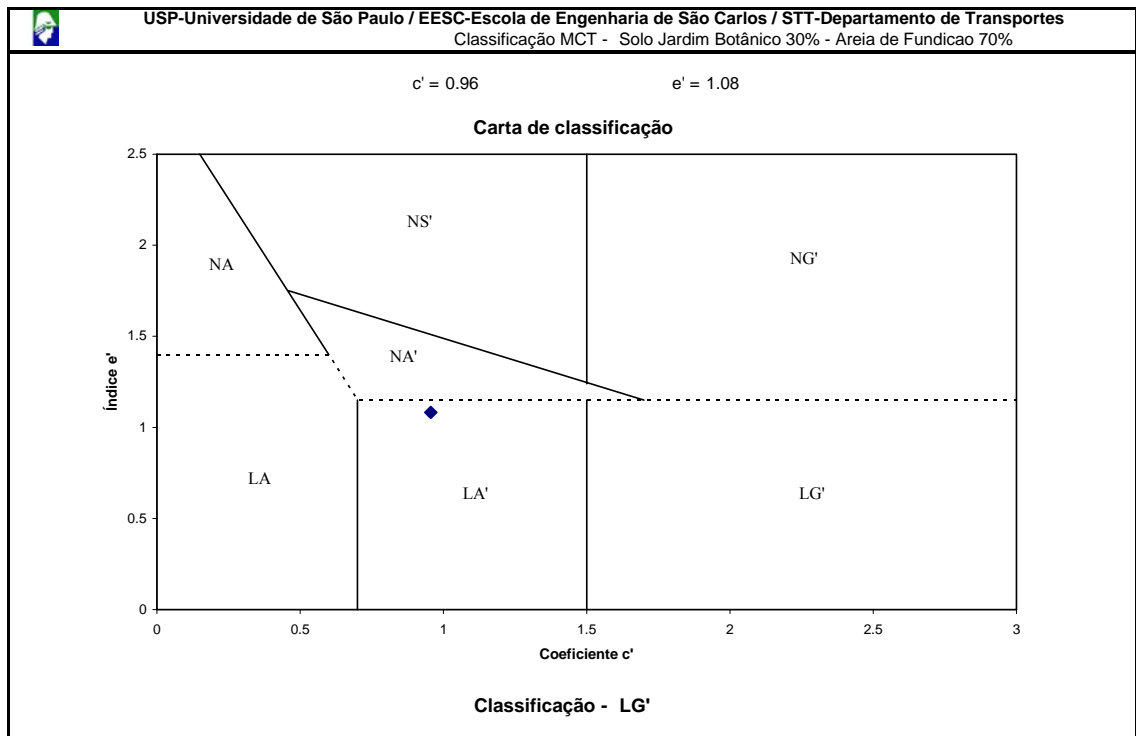
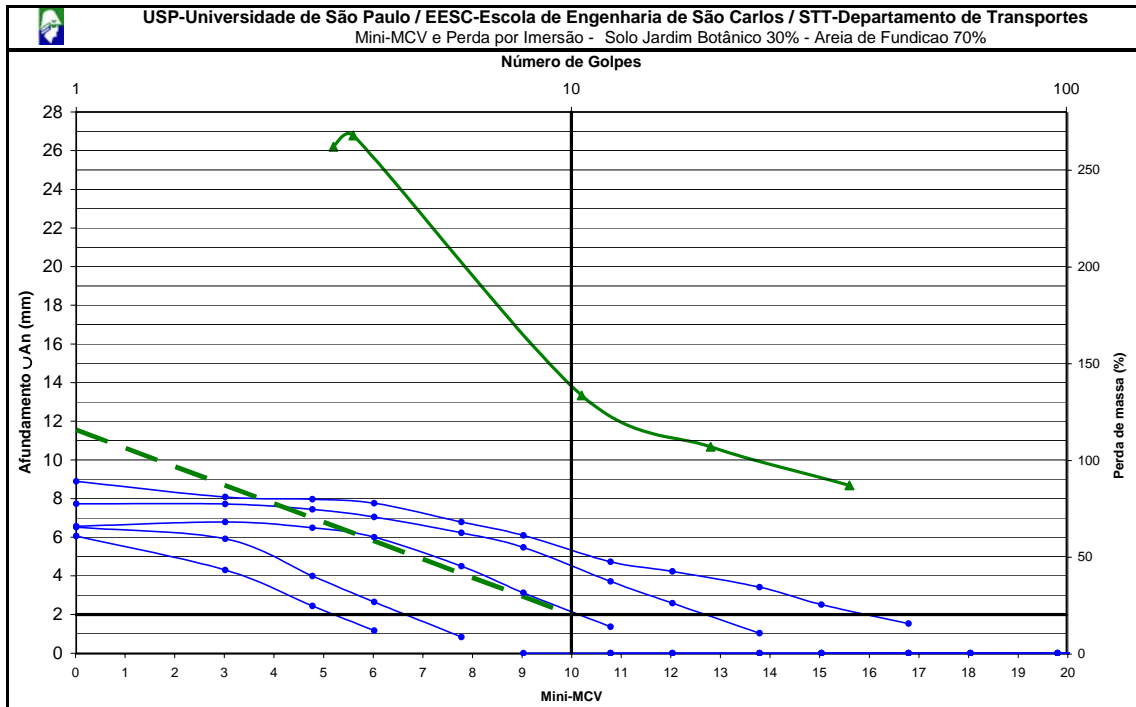
### Solo Jardim Botânico com 40% de Areia de Fundição (JB40AF)



**Solo Jardim Botânico com 60% de Areia de Fundição (JB60AF)**



**Solo Jardim Botânico com 70% de Areia de Fundição (JB70AF)**





**APENDICE III – Resultados do Modelo Universal da AASHTO (Teta-Tau), Modelo Composto, Modelo em Função da Tensão de Confinamento e Modelo em Função da Tensão Desvio.**

SOLO	MODELO TETA-TAU			MODELO COMPOSTO			MODELO TENSÃO DE CONFINAMENTO			MODELO TENSÃO DESVIO					
	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
JB0AF	4.663	0.087	-0.195	0.864	400.717	0.066	-0.020	0.916	385.998	0.055	0.133	411.027	0.037	0.524	
	5.290	0.097	-0.414	0.741	548.492	0.086	-0.099	0.909	499.276	0.001	0.000	591.855	-0.038	0.341	
	5.323	0.079	-0.776	0.917	672.353	0.051	-0.143	0.956	531.787	-0.036	0.059	747.257	-0.120	0.873	
JB20AF	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
	4.436	0.027	-0.843	0.933	869.358	0.034	-0.242	0.930	457.276	-0.069	0.137	908.204	-0.220	0.906	
	4.576	-0.090	-0.437	0.929	943.216	-0.046	-0.174	0.940	656.534	-0.145	0.583	909.643	-0.209	0.907	
JB40AF	5.021	-0.055	-0.813	0.859	1109.161	0.037	-0.293	0.968	768.060	-0.184	0.395	1161.903	-0.269	0.960	
	5.027	-0.024	-0.650	0.866	948.530	0.033	-0.231	0.968	689.247	-0.137	0.401	978.188	-0.208	0.957	
	4.993	-0.016	-0.640	0.958	987.922	0.010	-0.217	0.986	680.291	-0.135	0.435	996.548	-0.210	0.985	
JB60AF	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
	1.974	0.445	-2.071	0.621	215.155	0.444	-0.499	0.906	107.967	0.079	0.523	324.056	-0.187	0.249	
	1.860	0.306	-1.383	0.620	193.460	0.303	-0.332	0.910	123.282	0.058	0.454	276.039	-0.138	0.284	
JB60AF	2.162	0.293	-1.429	0.715	253.239	0.285	-0.348	0.952	136.354	0.064	0.496	331.344	-0.148	0.290	
	1.819	0.510	-1.912	0.878	174.884	0.418	-0.417	0.877	70.720	0.197	0.255	305.594	-0.148	0.119	
	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
1.597	0.658	-1.498	0.805	75.303	0.555	-0.320	0.928	43.490	0.343	0.682	107.272	0.112	0.062		
1.360	0.755	-1.497	0.893	67.038	0.574	-0.320	0.939	28.994	0.425	0.762	112.214	0.097	0.024		
2.349	0.414	-1.852	0.758	253.699	0.356	-0.404	0.903	127.279	0.093	0.119	286.397	-0.103	0.114		
1.640	0.692	-2.082	0.756	86.206	0.597	-0.422	0.925	40.540	0.331	0.540	134.629	0.029	0.004		
1.558	0.814	-2.175	0.926	112.021	0.629	-0.493	0.949	28.358	0.424	0.721	0.829	0.150	0.037		



SOLO	MODELO TETA-TAU				MODELO COMPOSTO						MODELO TENSÃO DE CONFINAMENTO				MODELO TENSÃO DESVIO			
	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
JB70AF	0.825	1.157	-1.496	0.950	10.055	0.851	-0.173	0.971	6.798	0.760		0.946	29.907	0.392	0.946	29.907	0.392	0.349
	0.761	1.242	-1.724	0.959	7.837	0.945	-0.224	0.984	5.000	0.813		0.954	14.912	0.516	0.954	14.912	0.516	0.289
	0.790	1.169	-1.538	0.964	8.961	0.877	-0.183	0.982	6.085	0.775		0.960	17.534	0.488	0.960	17.534	0.488	0.278
	1.072	1.165	-1.969	0.922	19.792	0.897	-0.346	0.971	9.881	0.687		0.898	22.642	0.447	0.898	22.642	0.447	0.260
	1.201	1.078	0-1.843	0.906	34.189	0.839	-0.395	0.959	12.589	0.649		0.858	41.841	0.338	0.858	41.841	0.338	0.128
JB60AV	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
	1.410	0.961	-2.090	0.947	39.675	0.722	-0.333	0.967	17.967	0.559		0.847	67.573	0.222	0.847	67.573	0.222	0.085
	1.995	0.661	-1.830	0.871	113.692	0.550	-0.381	0.966	49.137	0.348		0.685	138.816	0.087	0.685	138.816	0.087	0.027
	2.134	0.692	-2.098	0.787	109.778	0.602	-0.424	0.945	46.950	0.358		0.555	214.774	-0.007	0.555	214.774	-0.007	0.000
	1.845	0.644	-2.078	0.761	101.933	0.570	-0.419	0.946	45.774	0.319		0.511	188.335	-0.019	0.511	188.335	-0.019	0.002
1.533	0.736	-2.004	0.851	70.110	0.615	-0.390	0.957	32.125	0.390		0.705	91.502	0.124	0.705	91.502	0.124	0.050	
NV0AF	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
	2.719	0.218	-2.046	0.930	651.876	0.211	-0.511	0.974	283.936	-0.136		0.154	716.646	-0.339	0.154	716.646	-0.339	0.807
	3.858	0.228	-1.379	0.831	656.258	0.187	-0.350	0.838	280.309	0.016		0.005	709.643	-0.195	0.005	709.643	-0.195	0.435
	3.301	0.381	-4.388	0.877	919.196	0.421	-0.878	0.884	135.633	0.088		0.882	1644.812	-0.582	0.882	1644.812	-0.582	0.607
	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
1.245	1.015	-1.941	0.952	36.642	0.762	-0.352	0.972	13.813	0.614		0.887	39.805	0.277	0.887	39.805	0.277	0.119	
1.447	0.909	-1.633	0.907	43.467	0.683	-0.287	0.947	22.833	0.527		0.830	89.512	0.194	0.830	89.512	0.194	0.086	
1.115	1.021	-1.593	0.932	23.724	0.735	-0.230	0.955	14.852	0.600		0.877	65.957	0.223	0.877	65.957	0.223	0.116	
1.255	0.942	-1.582	0.930	33.841	0.688	-0.255	0.936	18.617	0.559		0.867	54.708	0.290	0.867	54.708	0.290	0.149	
1.018	1.055	-1.711	0.964	21.333	0.766	-0.256	0.966	11.317	0.644		0.891	64.337	0.225	0.891	64.337	0.225	0.082	
NA60AV	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
	1.465	0.823	-1.736	0.936	65.751	0.625	-0.348	0.955	24.721	0.485		0.821	83.803	0.178	0.821	83.803	0.178	0.053
	1.384	0.851	-1.552	0.921	44.864	0.660	-0.291	0.957	24.128	0.497		0.848	64.716	0.243	0.848	64.716	0.243	0.140
	1.095	0.888	-1.388	0.951	33.131	0.673	-0.262	0.977	16.787	0.556		0.909	43.279	0.306	0.909	43.279	0.306	0.152
	1.341	0.899	-1.592	0.844	34.719	0.786	-0.351	0.966	19.340	0.546		0.850	42.041	0.324	0.850	42.041	0.324	0.238
2.331	0.638	-1.650	0.852	112.021	0.629	-0.493	0.962	54.554	0.376		0.838	179.386	0.079	0.838	179.386	0.079	0.262	





# **ANEXOS**



**ANEXO A – ENSAIOS AMBIENTAIS REALIZADOS NA BIOAGRI AMBIENTAL  
LTDA.**

Tabela A.01. Resultados Analíticos de ensaios de solubilização, lixiviação e massa bruta da **Areia de Fundição** utilizada na pesquisa. FONTE: BIOAGRI Ambiental Ltda.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>LQ*</b>	<b>Resultados Analíticos</b>	<b>VMP - NBR 1004:2004</b>
<b>1. SOLUBILIZADO</b>				
Alumínio	mg/L	0.01	0.021	0.2
Arsênio	mg/L	0.01	<0.01	0.01
Bário	mg/L	0.01	0.014	0.7
Cádmio	mg/L	0.001	<0.001	0.005
Chumbo	mg/L	0.01	<0.01	0.01
Cianeto	mg/L	0.017	0.017	0.07
Cloreto	mg/L	1.0	1.4	250
Cobre	mg/L	0.005	<0.005	2.0
Cromo	mg/L	0.01	<0.01	0.05
Ferro	mg/L	0.01	<0.01	0.3
Fluoreto	mg/L	0.1	0.6	1.5
Índice de Fenóis	mg/L	0.002	0.06	0.01
Manganês	mg/L	0.01	0.114	0.1
Mercurio	mg/L	0.0001	<0.0001	0.001
Nitrato (como N)	mg/L	0.1	<0.1	10.0
Prata	mg/L	0.005	<0.005	0.05
Selênio	mg/L	0.008	<0.008	0.01
Sódio	mg/L	0.5	1.1	200
Sulfato	mg/L	1.0	<1	250
Surfactantes	mg/L	0.1	<0.1	0.5
Zinco	mg/L	0.01	<0.01	5.0
pH inicial			6.5	
pH final			7.23	
<b>2. LIXIVIADO</b>				
Arsênio	mg/L	0.05	<0.05	1.0
Bário	mg/L	0.05	0.136	70.0
Cádmio	mg/L	0.005	<0.005	0.5
Chumbo	mg/L	0.05	0.586	1.0
Cromo	mg/L	0.05	<0.05	5.0
Fluoreto	mg/L	0.1	0.4	150.0
Mercurio	mg/L	0.0001	<0.0001	0.1
Prata	mg/L	0.025	<0.025	5.0
Selênio	mg/L	0.04	<0.04	1.0
Índice de Fenóis	mg/L	0.005	0.5	
pH inicial			6.5	

pH final			5.42	
Tempo de Lixiviação	h		18	16-20
<b>3. MASSA BRUTA</b>				
Ponto de Fulgor	oC		>60	60(a,d)
pH (Suspensão 1:1)		0-14	6.5	2.0-12.5 (b)
Sulfeto (como H <sub>2</sub> S)	mg/kg	1	<1	0.5 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0.05	99.9	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0.2	<0.2	250 (c)
Índice de Fenóis	mg/kg	1	<1	

LQ\* Limite de Quantificação VMP\*\* - Valor Máximo Permitido pela Norma ABNT NBR 1004.

(a) = Avaliação da Inflamabilidade - Item "a" do tópico 4.2.1.1 da NBR 10004:2004

(b) = Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 da NBR 10004:2004

(c) = Avaliação da Reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004

(d) = Valor Máximo para Resíduos Líquidos

A análise química efetuada na amostra **Areia de Fundição** pela BIOAGRI Ambiental Ltda. (Boletim de Análise N<sup>o</sup> 2047/2066-1), cujos resultados analíticos estão mostrados na Tabela A.01 demonstram que:

- Para o ensaio de lixiviação os resultados obtidos satisfazem os limites permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo F.
- Para o Ensaio de massa bruta os resultados obtidos satisfazem os limites permitidos pela NBR 10004:2004.
- Para o ensaio de solubilização, os parâmetros Índice de Fenóis, Manganês ultrapassam os limites máximos permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G.

Segundo o Boletim de Análise N<sup>o</sup> 2047/2066-1 emitido pela BIOAGRI Ambiental Ltda. o resíduo de **Areia de Fundição** deve ser considerado como Classe II A – Resíduo Não Inerte.

Tabela A.02 Resultados Analíticos de ensaios de solubilização, lixiviação e massa bruta do **Solo Jardim Botânico**. FONTE: BIOAGRI Ambiental Ltda.

Parâmetros	Unidade	LQ*	Resultados Analíticos	VMP - NBR 1004:2004
<b>1. SOLUBILIZADO</b>				
Alumínio	mg/L	0.01	0.087	0.2
Arsênio	mg/L	0.01	<0.01	0.01
Bário	mg/L	0.01	0.038	0.7
Cádmio	mg/L	0.001	<0.001	0.005
Chumbo	mg/L	0.01	<0.01	0.01
Cianeto	mg/L	0.017	0.018	0.07
Cloreto	mg/L	1.0	<1	250
Cobre	mg/L	0.005	<0.005	2.0
Cromo	mg/L	0.01	<0.01	0.05
Ferro	mg/L	0.01	0.035	0.3
Fluoreto	mg/L	0.1	<0.1	1.5
Índice de Fenóis	mg/L	0.002	0.04	0.01
Manganês	mg/L	0.01	<0.01	0.1
Mercúrio	mg/L	0.0001	<0.0001	0.001

Nitrato (como N)	mg/L	0.1	0.8	10.0
Prata	mg/L	0.005	<0.005	0.05
Selênio	mg/L	0.008	<0.008	0.01
Sódio	mg/L	0.5	<0.5	200
Sulfato	mg/L	1.0	2.9	250
Surfactantes	mg/L	0.1	<0.1	0.5
Zinco	mg/L	0.01	<0.01	5.0
pH inicial			6.7	
pH final			7.17	

## 2. LIXIVIADO

Arsênio	mg/L	0.05	<0.05	1.0
Bário	mg/L	0.05	1.5	70.0
Cádmio	mg/L	0.005	<0.005	0.5
Chumbo	mg/L	0.05	<0.05	1.0
Cromo	mg/L	0.05	<0.05	5.0
Fluoreto	mg/L	0.1	<0.1	150.0
Mercúrio	mg/L	0.0001	<0.0001	0.1
Prata	mg/L	0.025	<0.025	5.0
Selênio	mg/L	0.04	<0.04	1.0
Índice de Fenóis	mg/L	0.005	<0.005	
pH inicial			6.5	
pH final			5.4	
Tempo de Lixiviação	h		18	16-20

## 3. MASSA BRUTA

Ponto de Fulgor	oC		>60	60(a,d)
pH (Suspensão 1:1)		0-14	6.7	2.0-12.5 (b)
Sulfeto (como H <sub>2</sub> S)	mg/kg	1	<1	0.5 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0.05	92.6	
Cianteo (como HCN)	mg/kg	0.2	<0.2	250 (c)
Índice de Fenóis	mg/kg	0.54	<0.54	

LQ\* Limite de Quantificação VMP\*\* - Valor Máximo Permitido pela Norma ABNT NBR 1004.

(a) = Avaliação da Inflamabilidade - Item "a" do tópico 4.2.1.1 da NBR 10004:2004

(b) = Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 da NBR 10004:2004

(c) = Avaliação da Reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004

(d) = Valor Máximo para Resíduos Líquidos

A análise química efetuada na amostra de solo **Jardim Botânico** pela BIOAGRI Ambiental Ltda. (Boletim de Análise N° 2047/2066-1), cujos resultados analíticos estão mostrados na Tabela A.01 demonstram que:

- Para o ensaio de lixiviação os resultados obtidos satisfazem os limites permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo F.
- Para o Ensaio de massa bruta os resultados obtidos satisfazem os limites permitidos pela NBR 10004:2004.
- Para o ensaio de solubilização, o parâmetro Índice de Fenóis ultrapassa os limites máximos permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G.

Segundo o Boletim de Análise N° 2047/2066-1 emitido pela BIOAGRI Ambiental Ltda. o solo **Jardim Botânico** deve ser considerado como Classe II A – Resíduo Não Inerte.

Tabela A.03 Resultados Analíticos de ensaios de solubilização, lixiviação e massa bruta da **Mistura Areia de Fundição (52%) e Solo Jardim Botânico (48%)** utilizada na pesquisa. FONTE: BIOAGRI Ambiental Ltda.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>LQ*</b>	<b>Resultados Analíticos</b>	<b>VMP - NBR 1004:2004</b>
<b>1. SOLUBILIZADO</b>				
Alumínio	mg/L	0.01	0.176	0.2
Arsênio	mg/L	0.01	<0.01	0.01
Bário	mg/L	0.01	0.023	0.7
Cádmio	mg/L	0.001	<0.001	0.005
Chumbo	mg/L	0.01	<0.01	0.01
Cianeto	mg/L	0.017	<0.017	0.07
Cloreto	mg/L	1.0	1.6	250
Cobre	mg/L	0.005	<0.005	2.0
Cromo	mg/L	0.01	<0.01	0.05
Ferro	mg/L	0.01	0.134	0.3
Fluoreto	mg/L	0.1	<0.1	1.5
Índice de Fenóis	mg/L	0.002	0.06	0.01
Manganês	mg/L	0.01	<0.01	0.1
Mercúrio	mg/L	0.0001	<0.0001	0.001
Nitrato (como N)	mg/L	0.1	0.5	10.0
Prata	mg/L	0.005	<0.005	0.05
Selênio	mg/L	0.008	<0.008	0.01
Sódio	mg/L	0.5	0.584	200
Sulfato	mg/L	1.0	2.2	250
Surfactantes	mg/L	0.1	<0.1	0.5
Zinco	mg/L	0.01	<0.01	5.0
pH inicial			7.2	
pH final			7.1	
<b>2. LIXIVIADO</b>				
Arsênio	mg/L	0.05	<0.05	1.0
Bário	mg/L	0.05	1.1	70.0
Cádmio	mg/L	0.005	<0.005	0.5
Chumbo	mg/L	0.05	<0.05	1.0
Cromo	mg/L	0.05	<0.05	5.0
Fluoreto	mg/L	0.1	<0.1	150.0
Mercúrio	mg/L	0.0001	<0.0001	0.1
Prata	mg/L	0.025	<0.025	5.0
Selênio	mg/L	0.04	<0.04	1.0
Índice de Fenóis	mg/L	0.005	0.02	
pH inicial			7.2	
pH final			5.44	

Tempo de Lixiviação	h		18	16-20
<b>3. MASSA BRUTA</b>				
Ponto de Fulgor	oC		>60	60(a,d)
pH (Suspensão 1:1)		0-14	7.2	2.0-12.5 (b)
Sulfeto (como H <sub>2</sub> S)	mg/kg	1	<1	0.5 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0.05	96.3	
Cianteo (como HCN)	mg/kg	0.2	<0.2	250 (c)
Índice de Fenóis	mg/kg	0.52	<0.52	

LQ\* Limite de Quantificação      VMP\*\* - Valor Máximo Permitido pela Norma ABNT NBR 1004.

(a) = Avaliação da Inflamabilidade - Item "a" do tópico 4.2.1.1 da NBR 10004:2004

(b) = Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 da NBR 10004:2004

(c) = Avaliação da Reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004

(d) = Valor Máximo para Resíduos Líquidos

A análise química efetuada na **Mistura Areia de Fundição (52%) e Solo Jardim Botânico (48%)** pela BIOAGRI Ambiental Ltda. (Boletim de Análise N<sup>o</sup> 2047/2066-1), cujos resultados analíticos estão mostrados na Tabela A.03 demonstram que:

- Para o ensaio de lixiviação os resultados obtidos satisfazem os limites permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo F.
- Para o Ensaio de massa bruta os resultados obtidos satisfazem os limites permitidos pela NBR 10004:2004.
- Para o ensaio de solubilização, o parâmetro Índice de Fenóis ultrapassa os limites máximos permitidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G.

Segundo o Boletim de Análise N<sup>o</sup> 2047/2066-1 emitido pela BIOAGRI Ambiental Ltda. a mistura de **Areia de Fundição (52%) e Solo Jardim Botânico (48%)** deve ser considerada como Classe II A – Resíduo Não Inerte.



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)