

LUCIMAR ARRUDA VIANA

**EFEITOS DA CIMENTAÇÃO E DA MORFOLOGIA NA CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA E NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE EMPACOTAMENTOS
BINÁRIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

V614e
2013

Viana, Lucimar Arruda, 1986-
Efeitos da cimentação e da morfologia na condutividade
hidráulica e na resistência mecânica de empacotamentos
binários / Lucimar Arruda Viana. – Viçosa, MG, 2013.
xviii, 90f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Dario Cardoso de Lima

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 79-83

1. Solos arenosos - Propriedades. 2. Solos arenosos -
Densidade. 3. Solos arenosos - Porosidade. 4. Solos arenosos
- Permeabilidade. 5. Estrutura do solo. 6. Cal. 7. Resistência de
materiais. 8. Areia - Densidade. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 631.44

LUCIMAR ARRUDA VIANA

**EFEITOS DA CIMENTAÇÃO E DA MORFOLOGIA NA CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA E NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE EMPACOTAMENTOS
BINÁRIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 10 abril de 2013.

Prof. Roberto Lopes Ferraz

Prof. Liovando Marciano da Costa
(Co-Orientador)

Prof. Dario Cardoso de Lima
(Orientador)

**Aos meus pais,
José Luiz e Maria José
Aos meus irmãos,
Luizmar, Mariluci, Lucas e Luana (in memoriam)**

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente em todos os momentos. Minha eterna gratidão, por tudo em minha vida.

Aos meus queridos pais, José Luiz e Maria José, pelos ensinamentos, incentivos, conselhos, apoio, dedicação, compreensão, imensurável ajuda e amor. Sou muito grata, também, por tudo em minha vida.

Aos meus irmãos, Luizmar, Mariluci, Lucas e Luana (in memoriam) pelo carinho, incentivo, amizade, conselhos, apoio e pela valiosa ajuda.

À CAPES, pela concessão de bolsa de mestrado, à FAPEMIG e CNPq, pela concessão das bolsas de iniciação científica e dos auxílios financeiros, respectivamente, através dos processos CNPq 304171/2010-7 e TEC PPM 00081-10, necessários para a realização do presente trabalho.

Ao professor Dario Cardoso de Lima, pela orientação, paciência, exemplo de profissionalismo, atenção, ensinamentos, incentivos e apoio. Pelos conselhos e grandiosa ajuda, essenciais para a realização deste trabalho.

Aos professores co-orientadores Liovando Marciano da Costa e Claudio Henrique de Carvalho Silva, pelas sugestões, atenção e ajuda.

Ao professor Carlos Alexandre Braz de Carvalho, pelo incentivo, gentileza e ajuda.

Ao professor Paulo Sergio de Almeida Barbosa pela ajuda, ensinamentos e sugestões.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Civil, pela atenção e conhecimentos proporcionados nesta caminhada.

Aos meus avôs e demais familiares pelo apoio e carinho.

Aos alunos de Iniciação Científica, Weiner Gustavo Silva Costa e Yara Barbosa Franco, pela ajuda e dedicação.

Ao professor Rogério Dalla Riva, da Universidade Federal do Mato Grosso, pela atenção e sugestões.

Ao professor Roberto Lopes Ferraz, da Universidade Federal de Juiz de Fora, por aceitar fazer parte da banca de defesa e pelas sugestões.

A Cristina Beatriz Schemes Costa e Cilene Knauf, do Departamento de Engenharia Civil, pela ajuda, atenção, e presteza.

Ao Julio Carlos dos Santos (Julinho), do Laboratório de Engenharia Civil, pelos incentivos, conselhos, ajuda e gentileza.

Ao Luciano de Almeida Ramos, Paulo Afonso da Silva, Leonício Soares de Assis, Jonatham dos Santos Augusto, José Carlos Ferreira, Jorge Luis Araujo, do Laboratório de Engenharia Civil, pela gentileza e ajuda.

Ao Nicolas Lancaster Justo Novaes, pelo auxílio no desenvolvimento e implantação do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.

A todos os amigos e colegas de curso, pela amizade, convívio, por compartilhar alegrias e dificuldades desta jornada.

A Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realizações dos Cursos de Graduação e Pós-graduação em Engenharia Civil.

Ao Departamento de Engenharia Civil, pela disponibilidade da infra-estrutura necessária à realização da pesquisa.

A todos que não foram aqui citados, mas que diretamente ou indiretamente contribuíram para conclusão dessa dissertação, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Geral.....	3
1.2.2 Específicos	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Introdução	4
2.2 Solos granulares.....	5
2.3 Textura	6
2.4 Estrutura.....	7
2.5 Porosidade	10
2.6 Morfologia.....	11
2.7 Fenômenos de empacotamento	13
2.7.1 Estabilidade gravitacional.....	14
2.7.2 Aglomeração	15
2.7.3 Porosidade interna	15
2.7.4 Forma e rugosidade superficial da partícula.....	16
2.7.5 Segregação	18
2.7.6 Técnica de compactação.....	18
2.7.7 Empacotamentos binários	20
2.7.8 Efeitos da razão D/d.....	21
2.7.9 Efeitos da porcentagem de grãos menores.....	23

2.8	Resistência à penetração	24
2.9	Condutividade hidráulica	26
2.10	Agentes de cimentação	28
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	Materiais.....	29
3.1.1	Solos	29
3.1.2	Esferas de vidro.....	33
3.1.3	Agente de cimentação.....	34
3.2	Métodos.....	34
3.2.1	Preparação das amostras	34
3.2.1.1	Dispersão mecânica e química	34
3.2.1.2	Remoção de matéria orgânica	35
3.2.1.3	Remoção de óxidos de ferro	35
3.2.1.4	Separação da fração areia em classes	35
3.2.2	Caracterização física da fração areia	37
3.2.2.1	Fator f	37
3.2.2.2	Densidade aparente	37
3.2.2.3	Densidade de partículas	38
3.2.2.4	Porosidade total.....	39
3.2.3	Caracterização morfométrica da fração areia.....	39
3.2.3.1	Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia	39
3.2.4	Empacotamentos binários	44
3.2.5	Condutividade hidráulica	46
3.2.6	Resistência à penetração	49
3.2.7	Agente de cimentação.....	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.2	Empacotamentos binários	57
4.2.1	Esferas de vidro.....	57
4.2.2	Solo artificial	58
4.2.3	Comparação com o solo Cachoeira da Prata (Dalla Riva, 2010)	61
4.3	Condutividade hidráulica	62

4.3.1	Condutividade hidráulica do solo artificial.....	62
4.3.2	Comparação com o solo Cachoeira da Prata (Dalla Riva, 2010)	63
4.3.3	Condutividade hidráulica do solo artificial sob a ação da cal hidratada	64
4.4	Resistência à penetração determinada com o cone penetrométrico quase-estático	66
4.4.1	Resistência à penetração do solo artificial	66
4.4.2	Comparação com o solo Cachoeira da Prata (Dalla Riva, 2010)	67
4.4.3	Resistência á penetração do solo artificial sob a ação da cal hidratada	69
5.	DESENVOLVIMENTO, OPERACIONALIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGENS DE GRÃOS DE AREIA.....	71
5.1	Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia	71
5.2	Validação do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.....	73
6.	CONCLUSÕES	76
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS	79
ANEXO	84

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Representação esquemática das estruturas: (a) laminar; (b) prismática; (c) colunar; (d) bloco angular; (e) bloco subangular, e (f) granular (CAPECHE, 2008).8
- Figura 2: Escala de arredondamento (esfericidade) e angularidade (Modificado de Powers, 1953). 12
- Figura 3: Estabilidade gravitacional em empacotamentos aleatórios de esferas de igual tamanho: (a) um contato; (b) dois contatos e, (c) três contatos (Modificado de GERMAN, 1989). 14
- Figura 4: Croqui esquemático apresentando regiões de alta porosidade em empacotamento de esferas de igual diâmetro, associadas ao efeito de aglomeração (Modificado de GERMAN, 1989). 15
- Figura 5: Croqui mostrando três diferentes formas de estrutura porosa interna: (a) sem poros; (b) poros interno fechados; e (c) poros abertos (Modificado de PANZERA, 2007). 16
- Figura 6: Densidade relativa em função do arredondamento para partículas de igual tamanho empacotadas aleatoriamente (TSUTSUMI, apud DALLA RIVA, 2010). 17
- Figura 7: Fenômeno de segregação em empacotamento binário aleatório, devido à agitação: (a) sem segregação e, (b) com segregação (Modificado de ROSATO, 1987). 18
- Figura 8: Modelos esquemáticos que apresentam duas formas de empacotamento para uma mesma distribuição granulométrica (PANZERA, 2007). 19
- Figura 9: Representação bidimensional dos efeitos de combinações de diferentes tamanhos de partículas: (a) empacotamento

	uniforme; (b) e (c) empacotamentos binários. (Modificado de DALLA RIVA, 2010).....	20
Figura 10:	Representação bidimensional do efeito da razão (D/d) no empacotamento binário: (a) partícula menor (d) com tamanho máximo adequado; e (b) partícula menor (d) com tamanho superior aos vazios existentes.	22
Figura 11:	Porcentagens de vazios mínimas obtidas em misturas binárias de esferas de aço em função da relação D/d (LADE et al., 1998).	23
Figura 12:	(a) misturas binárias em que se apresentam as situações de insuficiência de partículas de menor diâmetro; e (b) excesso das mesmas. (Modificado de FORMAGINI, 2005).	24
Figura 13:	Sistema com o cone penetrométrico quase-estático, segundo Dalla Riva (2010): (a) penetrômetro quase-estático para a determinação da resistência à penetração das amostras de solos; e (b) conjunto para a preparação do corpo de prova a ser ensaiado.	26
Figura 14:	Sistema implementado por Dalla Riva (2010) para a realização de ensaios de condutividade hidráulica sob carga constante: (a) vista parcial do conjunto de permeâmetros; e (b) detalhe do permeâmetro, com a proveta graduada em cm.	27
Figura 15:	Fotografia ilustrativa do solo CP (DALLA RIVA, 2010).....	30
Figura 16:	Localização do ponto de coleta do solo CP (GOOGLE, 2013)	30
Figura 17:	Fotografia ilustrativa do solo JP (DALLA RIVA, 2010).....	31
Figura 18:	Localização do ponto de coleta do solo JP (GOOGLE, 2013)	31
Figura 19:	Imagem da fração areia limpa do solo CP obtida através do microscópio óptico do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.	32

Figura 20:	Imagem da fração areia limpa do solo JP obtida através do microscópico óptico do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.	33
Figura 21:	Agitador mecânico utilizado para grandes volumes de solo....	35
Figura 22:	(a) Jogo de peneiras para o peneiramento da fração areia em 21 classes de tamanho; e (b) Imagem do agitador de peneiras empregado.	36
Figura 23:	Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia (vista lateral esquerda).....	40
Figura 24:	(a) Imagem adquirida com a câmera digital; (b) resultado da aplicação do comando Limiar do programa Adobe® Photoshop® CS.....	41
Figura 25:	Esquema representativo dos eixos maior e menor.....	43
Figura 26:	Vibrador de peneiras utilizado para empacotamento das partículas.....	45
Figura 27:	Sistema implementado por Dalla Riva (2010): (a) vista parcial do conjunto de permeâmetros; (b) detalhe do permeâmetro com a amostra; e (c) detalhe da interface.	48
Figura 28:	(a) Corpo de prova utilizada para ensaios de resistência de cone penetrométrico; e (b) sistema de cone penetrométrico quase-estático.	49
Figura 29:	Processo de adição de cal aos corpos de prova: (a) adição de cal ao corpo de prova; e (b) câmara de enriquecimento com CO ² , hermeticamente fechada.	52
Figura 30:	Curvas granulométricas dos solos CP, JP e AR.....	55
Figura 31:	Índice morfométrico arredondamento em função das classes de tamanho.	55
Figura 32:	Índice morfométrico compactação em função das classes de tamanho.	56

Figura 33:	Índice morfométrico alongamento em função das classes de tamanho.	56
Figura 34:	Curvas de empacotamentos binários de EV sob diferentes relações D/d.	58
Figura 35:	Curva de densidade aparente máxima de empacotamento binário das EV.	58
Figura 36:	Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo AR.	59
Figura 37:	Curva de densidade aparente máxima de empacotamento binário do solo AR.	60
Figura 38:	Curva de densidade aparente máxima de empacotamento binário do solo AR ajustadas pelo modelo hiperbólico.	61
Figura 39:	Comparação entre os valores das densidades aparentes máximas de empacotamentos binários do solo AR e do solo CP.	61
Figura 40:	Curva dos coeficientes de condutividade hidráulica do sistema binário do solo AR.	62
Figura 41:	Curva dos coeficientes de condutividade hidráulica do sistema binário do solo AR sob a ação da cal hidratada.	64
Figura 42:	Curvas de resistência de ponta do solo AR ajustadas pelo modelo hiperbólico.	66
Figura 43:	Comparação entre a resistência de ponta do solo AR e do solo CP.	68
Figura 44:	Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia: (a) vista frontal; (b) vista lateral direita.	71
Figura 45:	Tela do software do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.	72
Figura 46:	Comparação entre o índice morfométrico arredondamento dos solos CP e JP obtidos neste trabalho e por Dalla Riva (2010)	73

Figura 47:	Comparação entre o índice morfométrico compacidade dos solos CP e JP obtidos neste trabalho e por Dalla Riva (2010)	73
Figura 48:	Comparação entre o índice morfométrico alongamento dos solos CP e JP obtidos neste trabalho e por Dalla Riva (2010)	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Classificações granulométricas	7
Tabela 2:	Classes de estrutura.....	9
Tabela 3:	Classificação do arredondamento de acordo com Powers (1953)	12
Tabela 4:	Textura dos solos	32
Tabela 5:	Composição química e física das esferas de vidro.....	34
Tabela 6:	Classe de peneiras usadas na separação da fração areia limpa	36
Tabela 7:	Razões D/d utilizadas em empacotamentos binários do solo AR e para as EV.....	46
Tabela 8:	Razões D/d utilizadas em ensaios de condutividade hidráulica do solo AR.....	47
Tabela 9:	Razões D/d utilizadas em ensaios de resistência à penetração do solo AR.....	50
Tabela 10:	Razões D/d utilizadas em ensaios de condutividade hidráulica e resistência a penetração do solo AR sob a ação da cal hidratada	52
Tabela 11:	Notação utilizada para a designação das partículas	53
Tabela 12:	Classes utilizadas para a determinação dos índices morfométricos arredondamento, alongamento e compacidade	54

Tabela 13:	Comparação entre os coeficientes de condutividade hidráulica dos solos AR e CP	63
Tabela 14:	Comparação entre os coeficientes de condutividade hidráulica do solo AR sem a adição de cal hidratada e após a adição da mesma.....	65
Tabela 15:	Coeficientes a_1 e a_2 obtidos por regressão não linear	67
Tabela 16:	Resistência de ponta na profundidade de 3 cm obtida em sistemas binários do solo AR, submetidos à ação da cal hidratada	69
Tabela A.1:	Densidade aparente, densidade da partícula e porosidade total para as diferentes classes da fração areia limpa do solo CP ..	85
Tabela A.2:	Densidade aparente, densidade da partícula e porosidade para as diferentes classes da fração areia limpa do solo JP	86
Tabela A.3:	Densidade de partículas para as diferentes classes das EV ...	87
Tabela A. 4:	Índice morfométrico arredondamento para as diferentes classes dos solos CP e JP	88
Tabela A.5:	Índice morfométrico compactidade para as diferentes classes dos solos CP e JP	89
Tabela A.6:	Índice morfométrico alongamento para as diferentes classes dos solos CP e JP	90

RESUMO

VIANA, Lucimar Arruda, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2013. **Efeitos da cimentação e da morfologia na condutividade hidráulica e na resistência mecânica de empacotamentos binários.** Orientador: Dario Cardoso de Lima. Co-orientadores: Liovando Marciano da Costa e Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

Este trabalho direcionou-se ao estudo da influência das propriedades físicas e de um agente de cimentação na estruturação da fração areia de um solo arenoso, considerando-se sistemas de empacotamentos binários aplicados a esferas de vidro e a um solo artificialmente preparado a partir das frações areias de dois solos naturais. A pesquisa abrangeu os seguintes tópicos: (i) estabelecer curvas de empacotamento para sistemas binários do solo artificial e de esferas de vidro; (ii) caracterizar a resistência mecânica e a condutividade hidráulica dos sistemas binários do solo artificial; (iii) estudar a influência do agente de cimentação cal hidratada nos sistemas de empacotamentos binários do solo artificial; (iv) verificar a influência das propriedades morfológicas através da comparação dos resultados do presente estudo e de trabalho prévio, considerando parâmetros como densidade de empacotamento, resistência à penetração e condutividade hidráulica; e (v) desenvolver e tornar operacional um sistema para a captura de imagens de grãos de areia. As amostras de solo foram submetidas a pré-tratamentos para obtenção da fração areia limpa e posterior peneiramento para separação em vinte e uma classes, entre os diâmetros de 0,053 e 2,000 mm. Sequencialmente, foram realizados ensaios de caracterização morfométrica das suas frações areia, sendo também realizados estudos de empacotamentos binários em esferas de vidro e nas mesmas. Os principais resultados obtidos foram: (i) empacotamentos binários das esferas de vidro e das frações areia limpa do solo artificial atingiram um ponto de máxima densidade em uma composição aproximada de 30% de partículas menores;

(ii) empacotamentos binários das esferas de vidro apresentaram ganhos maiores de densidade até relações entre o diâmetro maior (D) e o diâmetro menor (d) próximas a 6, sendo que acima desse valor, aumentos ocorreram em menor proporção; (iii) empacotamentos binários das frações areia do solo artificial ocorreram de forma similar aos empacotamentos binários de esferas de vidro, mostrando-se mais eficiente em relação à elevação da densidade quando a razão D/d se aproximou de 8; (iv) a condutividade hidráulica e a resistência de ponta à penetração dos empacotamentos binários do solo artificial sofreram reduções à medida que se aumentou a relação D/d; (v) a cimentação por cal hidratada reduziu a condutividade hidráulica e elevou a resistência de ponta à penetração dos empacotamentos binários do solo artificial; (vi) a morfologia das partículas influenciou significativamente a densidade, condutividade hidráulica e resistência de ponta à penetração dos empacotamentos binários da fração areia limpa do solo artificial; e (vii) o sistema desenvolvido para a captura das imagens de grãos de areia funcionou de forma adequada, com praticidade.

ABSTRACT

VIANA, Lucimar Arruda, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April of 2013. **Effects of cementation and morphology in hydraulic conductivity and mechanical strength of binaries packing systems.** Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-advisers: Liovando Marciano da Costa and Claudio Henrique de Carvalho Silva.

The main focus of this work was to study the influence of physical properties and of a cementing agent in structuring the sand fraction of a sandy soil, considering binaries packing systems applied to glass spheres and to a soil artificially prepared from two natural soils sand fractions. The study covered the following topics: (i) to establish packing curves for binary systems of the artificial soil and glass spheres; (ii) to characterize the mechanical strength and hydraulic conductivity of binary systems of the artificial soil; (iii) to study the influence of the cementing agent Hydrated lime in the artificial soil binary packing systems; (iv) to verify the influence of the artificial soil morphological properties through the comparison of the results of the present testing program and previous research including the parameters density, penetration resistance and soil hydraulic conductivity; and (v) to develop and operationalize a system for capturing images of grains of sand. The soil samples were subjected to pre-treatment for obtaining clean sand fractions which were separated by sieving through twenty-one sieve classes encompassing the diameter range of 0.053 to 2.000 mm. Sequentially, morphometric characterization tests were carried out in the sand fractions, as well as binary packing studies were performed in the sand fractions and in the glass spheres. The main results were: (i) binaries packing of glass spheres and artificial soil clean sand fractions reached a point of maximum density in a composition of approximately 30% of smaller particles; (ii) binaries packing of glass spheres showed larger density gains until the

relationship between the larger diameter (D) and the minor diameter (d) was close to 6, and above this value, increases in density occurred to a lesser proportion; (iii) binaries packing of artificial soil sand fractions occurred similarly to binaries packing of glass spheres, but with larger gains until the relationship between the larger diameter (D) and the minor diameter (d) was close to 8; (iv) the hydraulic conductivity and tip penetration resistance of artificial soil binaries packing decreased when increasing the ratio D/d ; (v) the cementation by Hydrated lime reduced hydraulic conductivity and increased the tip penetration resistance of the artificial soil binaries packing; (vi) the morphology of the particles influenced significantly the density, hydraulic conductivity and tip penetration resistance of the artificial soil clean sand fraction binaries packing; and (vii) the system developed for the capture of images of sand grains worked properly, with practicality.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Em Geotecnia, compreende-se o solo como um conjunto de partículas minerais, cujos vazios se encontram preenchidos com água e/ou gases, apresentando um caráter polifásico (VARGAS, 1977). Sabe-se, também, que o comportamento geotécnico de um solo, em especial, em termos de resistência ao cisalhamento, compressibilidade e condutividade hidráulica, é dependente do seu índice de vazios, podendo-se referir que variações induzidas neste parâmetro são responsáveis por mudanças no seu comportamento de engenharia face às solicitações externas que lhe são aplicadas (MITCHELL; SOGA, 2005).

O estudo das propriedades geotécnicas dos solos pode-se processar via uso de modelos, que buscam representá-los como agregados de partículas. Considerando-se a grande diversidade de dimensões e formas das mesmas, Lima (1981) destaca o emprego de dois grupos de modelos na representação dos arranjos estruturais extremos dos solos, como segue: (i) no primeiro, as ações interpartículas são, em primeira aproximação, analisadas sob o ponto de vista de seus efeitos em termos de forças mássicas, podendo-se referir ao modelo de esferas, aplicável aos solos granulares; e (ii) no segundo, há predominância das forças de superfície que agem nas partículas, compondo os ditos modelos estruturais, aplicáveis aos solos coesivos. Porém, como a maioria dos solos situa-se no intervalo desses dois estados, os modelos devem ser encarados como instrumentos que possibilitam visualizar os seus mecanismos e reações a eventuais solicitações externas impostas.

Texturalmente, os solos podem ser classificados como granulares ou coesivos, segundo terminologia empregada por Lambe e Whitman

(1969), apresentando-se no presente texto uma abordagem dirigida exclusivamente aos solos granulares.

Destaca-se, também, que os efeitos ocasionados pela morfologia das partículas e fenômenos de cimentação no comportamento geotécnico dos solos granulares não têm sido explicitamente considerados em pesquisas geotécnicas, como destaca Dalla Riva (2010). Assim, a utilização de variáveis quantitativas para explicar algumas propriedades físicas e geotécnicas do solo, intimamente relacionadas à forma da partícula, tais como densidade relativa, porosidade, condutividade hidráulica, resistência à penetração podem revelar um novo enfoque para o entendimento do comportamento mecânico destes materiais.

Um trabalho abrangente na linha de estudo de fenômenos de empacotamento em solos granulares foi desenvolvido por Dalla Riva (2010) nos Departamentos de Engenharia Civil (DEC) e de Solos (DPS) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), o qual apresentou, dentre outras, as seguintes recomendações finais: (i) dar continuidade à presente pesquisa, com maior detalhamento das razões D/d ; (ii) concentração de estudos em sistemas binários, considerando-se frações areias dos solos; (iii) inclusão de solos artificiais, com índices morfológicos intermediários àqueles do presente trabalho, partindo-se das composições existentes ou gerando-se materiais, por exemplo, com base em produto de jazida de quartzo de angularidade elevada; e (iv) desenvolvimento de nova metodologia para a determinação de índices morfológicos dos solos, através de um sistema automatizado de captura de imagem.

No presente trabalho, propôs-se retomar os estudos de Dalla Riva (2010), com a abordagem de sistemas binários de empacotamento dirigidos ao estudo dos fenômenos de empacotamento em esferas de vidro e em um solo artificial, aumentando-se o número das relações diâmetro maior (D) e diâmetro menor (d), isto é relação D/d , analisando o efeito de agentes de cimentação e tornando operacional novos equipamentos para a determinação de índices morfológicos das frações areias de solos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a influência das propriedades físicas e de agentes de cimentação na estruturação da fração areia de um solo arenoso, considerando-se sistemas de empacotamentos binários aplicados a esferas de vidro e a um solo artificialmente preparado a partir das frações areias de dois solos naturais.

1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos foram estabelecidos, como segue: (i) estabelecer curvas de empacotamento para sistemas binários do solo artificial e de esferas de vidro; (ii) caracterizar a resistência mecânica e a condutividade hidráulica dos sistemas binários do solo artificial; (iii) estudar a influência do agente de cimentação cal hidratada nos fenômenos de empacotamentos do solo artificial; (iv) verificar a influência das propriedades morfológicas através da comparação dos resultados de ensaios de densidade de empacotamento, resistência à penetração e de condutividade hidráulica do solo Cachoeira da Prata obtidos por Dalla Riva (2010) e os obtidos no presente estudo para o solo artificial; e (v) desenvolver e tornar operacional um sistema para a captura de imagens de grãos de areia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Introdução

Nos anos 70, pesquisas geotécnicas foram conduzidas com arranjos de partículas em solos granulares, concluindo-se que a caracterização das propriedades de areias e pedregulhos não deveria ser vista apenas em termos de densidade ou densidade relativa, sendo também necessário considerar o arranjo de partículas e o histórico de tensões desses materiais, podendo-se acrescentar a esta visão a necessidade do estudo da influência da morfologia das partículas no comportamento de engenharia dos sistemas granulares.

Uma visão atual é que em aplicações geotécnicas e em outros campos do conhecimento, o entendimento básico sobre a compactação de solos arenosos é ainda limitado, sendo de interesse conhecer o comportamento físico de sistemas relativamente simples, desenvolvendo, por exemplo, estudos comparativos de empacotamentos monodispersos e binários de esferas de vidro, em comparação com aqueles de frações areia de solos granulares, de modo a se formar uma base teórica que possa auxiliar na compreensão de sistemas mais complexos.

No presente projeto da pesquisa, propõe-se estudar a influência das propriedades físicas das frações areia de um solo arenoso artificial em fenômenos de empacotamentos binários, sendo de interesse o detalhamento do modelo de esferas. Nesse modelo, parte-se de arranjos de estruturas equidimensionais, sendo a complexidade do problema ampliada com o aumento no número e no diâmetro das mesmas. A partir desses arranjos, aqui denominados empacotamentos, e de determinadas hipóteses relativas ao contato entre as esferas, é possível estudar os sistemas granulares da

Mecânica dos Solos, elaborando suas equações constitutivas e analisando as suas condições de ruptura, como destacam Farouki e Winterkon (1964).

2.2 Solos granulares

Geotecnicamente, o comportamento mecânico dos solos granulares é governado pela sua estrutura e pela tensão efetiva aplicada, sendo a estrutura função dos arranjos de suas partículas, o que determina a sua densidade relativa. Os principais fatores que a afetam são: tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas.

Com relação aos estudos de sistemas de arranjos de partículas em solos granulares, em Geotecnia é comum partir de arranjos de esferas equidimensionais, sendo a complexidade do problema ampliada pelo aumento no número e diâmetro das esferas utilizadas, e de hipóteses relativas ao contato entre estas, de modo a elaborar equações constitutivas e analisar condições de ruptura (FAROUKI; WINTERKORN, 1964). Segundo Lima (1981), esses modelos possuem limitações, podendo-se destacar, principalmente: dimensões variáveis, casualidade de arranjos, segregação e formas, em geral, não-esférica das partículas; e, atrito superficial entre partículas, que depende fundamentalmente da natureza mineralógica das mesmas e do grau de alteração de seus minerais constituintes.

Ferreira e Dias Júnior (2001) referem que na fração areia, os grãos são geralmente constituídos de quartzo, podendo possuir fragmentos de feldspatos e mica e, ocasionalmente, minerais como zircônio, turmalina e hornblenda. Podem apresentar, também, nódulos e concreções de diversas naturezas, bem como fragmentos de rochas. Vieira (1988) considera que a abundância do quartzo na composição granulométrica do solo, que é também função da natureza mineralógica da rocha matriz, decorre da resistência deste mineral à ação do intemperismo. Destaca-se, também, que, em muitos casos, os grãos de areia têm dimensões mais ou menos uniformes, podendo ser representados como aproximadamente esféricos, embora não sejam necessariamente lisos, apresentando uma superfície rugosa.

Nos solos granulares, é comum adotar-se como critério de classificação o parâmetro geotécnico densidade relativa, que reflete a relação entre o índice de vazios natural destes materiais e os seus índices de vazios mínimo e máximo. Como destaca Melo (1985), nesses solos, relações entre índice de vazios, peso específico seco e porosidade, para uma mesma compacidade, possibilitam relacionar a densidade relativa ao peso específico seco ou à porosidade. Contudo, como entendem Mitchell e Soga (2005), a caracterização das propriedades de areias e pedregulhos não deve ser vista somente em termos de densidade relativa, sendo, também, necessário considerar o arranjo de partículas, o histórico de tensões e a morfologia destes materiais.

2.3 Textura

A textura do solo corresponde à proporção relativa em que se encontram os diferentes tamanhos de partículas, em determinada massa de solo (EMBRAPA, 2003). Refere-se, especificamente, às proporções relativas das partículas ou frações de areia, silte e argila na terra fina seca ao ar (TFSA). Consiste na propriedade física do solo que menos sofre alteração ao longo do tempo.

Segundo o DNIT (2006), a textura é uma das propriedades mais importante para a identificação dos solos, mesmo que não seja suficiente para definir e caracterizar o comportamento geral destes materiais.

A textura do solo é estudada através da análise granulométrica, a qual permite classificar os componentes sólidos do solo em classes de acordo com os seus diâmetros (ROSA, 2010). Os limites convencionais superiores e inferiores das dimensões variam conforme o critério e as necessidades das organizações tecnológicas e normativas (DNIT, 2006).

No Brasil, para fins rodoviários, é comum o emprego da classificação granulométrica adotada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006) e, na Mecânica dos Solos, geralmente é utilizada a classificação granulométrica empregada pela ABNT

(1995). Ambas as classificações granulométricas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Classificações granulométricas

Frações de solo	DNIT (diâmetro equivalente em mm)	ABNT (diâmetro equivalente em mm)
Pedregulho	entre 76 e 2	entre 60 e 2
Areia	entre 2 e 0,075	entre 2 e 0,06
Silte	entre 0,075 e 0,005	entre 0,06 e 0,002
Argila	menor do que 0,005	menor do que 0,002

Fonte: DNIT (2006); ABNT (1995).

2.4 Estrutura

Historicamente, a caracterização da estrutura dos solos tem sido preocupação maior da Ciência dos Solos, sendo que sob o prisma textural estes materiais são compostos por partículas de diferentes formas, tamanhos e orientações, o que possibilita formar padrões estruturais complexos e irregulares. Dalla Riva (2010) refere-se, também, ao caráter da estrutura do solo, que é variável no tempo e no espaço, sendo fortemente influenciada por mudanças no clima, atividade biológica e práticas de manejo, sendo também vulnerável para forças destrutivas de natureza mecânica e físico-química. De modo geral, classifica-se a estrutura de um solo em função das características morfológicas dos agregados individualizados, considerando-se sua forma, grau de desenvolvimento e tamanho. Em uma visão pedológica, a seguir se apresenta uma classificação estrutural de partículas (IBGE, 2007), cuja ilustração se encontra na Figura 1 (CAPECHE, 2008).

- Laminar, onde as partículas do solo estão arranjadas em torno de um plano horizontal, apresentando aspecto de lâminas de espessuras variáveis.
- Prismática, em que as partículas se arranjam preferencialmente ao longo de um eixo vertical, com forma de prisma (com faces e arestas), com as dimensões verticais maiores do que as horizontais.

- Colunar, que é similar à prismática, diferenciando-se em relação ao formato da extremidade superior que é arredondada.
- Blocos angulares, quando as partículas estão arranjadas na forma de polígonos, apresentando faces planas, formando arestas e ângulos aguçados.
- Blocos subangulares, se as partículas estão arranjadas na forma de polígonos, com a ocorrência de mistura de faces planas e arredondadas, com poucas arestas e ângulos suavizados.
- Granular, nas situações em que as partículas se arranjam em torno de um ponto, formando agregados arredondados, cujo contato entre as unidades não se dá através de faces e sim de pontos.

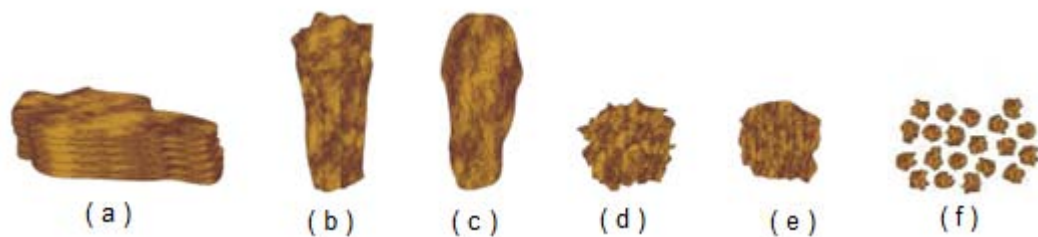


Figura 1: Representação esquemática das estruturas: (a) laminar; (b) prismática; (c) colunar; (d) bloco angular; (e) bloco subangular, e (f) granular (CAPECHE, 2008).

Em pedologia, os graus de estrutura estão relacionados às condições de coesão dentro e fora dos agregados (percentual de agregação das partículas), e estes podem ser classificados como fraco, moderado ou forte (IBGE, 2007), como segue: (i) estrutura fraca quando os agregados são pouco nítidos, de difícil separação, e com proporção inferior a do material não agregado; (ii) estrutura moderada, caso a nitidez seja intermediária, com percentual equivalente de unidades estruturais (agregados) e materiais não agregados; e (iii) estrutura forte, se a agregação for nítida, com separação fácil dos agregados, observando-se, praticamente, a inexistência de material não agregado.

As classes de estrutura são definidas pelo tamanho ou dimensões dos agregados, dividindo-se em muito pequena, pequena, média, grande,

muito grande e extremamente grande, com seus limites variando de acordo com o tipo de estrutura, como se apresenta na Tabela 2. Caso a estrutura seja laminar, colunar, prismática e cuneiforme, deve-se considerar as dimensões do menor eixo, segundo o IBGE (2007).

Tabela 2: Classes de estrutura

Classes	Critérios (mm)		
	Granular e Laminar	Colunar, Prismática e Cuneiforme	Blocos angulares e subangulares
Muito pequena	< 1	< 10	< 5
Pequena	1 a < 2	10 a < 20	5 a < 10
Média	2 a < 5	20 a < 50	10 a < 20
Grande	5 a < 10	50 a < 100	20 a < 50
Muito grande	≥ 10	100 a 500	≥ 50
Extremamente grande	-	≥ 500	-

Fonte: IBGE (2007).

Em Geotecnia, Mitchell e Soga (2005) diferenciam os termos da língua inglesa *fabric* e *structure*, entendendo que o primeiro designa o arranjo de partículas e vazios em uma massa de solo, bem como que o segundo, de modo mais abrangente, refere-se ao efeito combinado do arranjo, da composição e das forças interpartículas.

No Brasil, contudo, muitas vezes o termo arranjo é empregado com o significado de estrutura. Nesse sentido, Senço (1997), por exemplo, define estrutura de um solo como sendo o termo que se utiliza para designar a situação do arranjo das partículas no interior da sua massa; assim, quando se varia o arranjo, se modifica a estrutura do solo.

Geotecnicamente, o estudo das propriedades de engenharia dos solos pode se processar via uso de modelos que buscam representá-los como agregados de partículas (LIMA, 1981). Considerando-se a grande diversidade de dimensões e formas das mesmas, esse autor destaca que se pode referir à criação de dois grupos de modelos extremos que representam seus arranjos estruturais: em um, as ações interpartículas são, em primeira aproximação, analisadas sob o ponto de vista de seus efeitos em termos de

forças mássicas, podendo-se referir ao modelo de esferas, aplicável aos solos granulares; no outro, há predominância das forças de superfície que agem nas partículas, compondo os ditos modelos estruturais aplicáveis aos solos coesivos. No entanto, devido à maioria dos solos situar-se no intervalo desses dois estados, os modelos devem ser encarados como instrumentos que possibilitam visualizar os seus mecanismos e reações a eventuais solicitações externas impostas.

2.5 Porosidade

A porosidade do solo representa a proporção do seu volume não ocupado por partículas sólidas, ou seja, todo o espaço poroso ocupado por ar e água, podendo ser expressa pela Equação (1), com as seguintes definições:

$$P = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_{ar} + V_{\acute{a}gua}}{V_t} \dots\dots\dots(1)$$

- P = porosidade total [L^3L^{-3}];
- V_p = volume do espaço poroso [L^3];
- V_t = volume total [L^3];
- V_{ar} = volume ocupado pela parte gasosa do solo [L^3]; e
- $V_{\acute{a}gua}$ = volume ocupado pela parte líquida do solo [L^3].

A porosidade decorre da estrutura e textura dos solos, sendo os poros determinados pelo arranjo, geometria e forças interpartículas. Segundo Aguiar (2008), eles diferem quanto à forma, comprimento, largura e tortuosidade, ressaltando que os solos arenosos apresentam espaços porosos constituídos por poros de maior diâmetro, os macroporos, bem como que o volume total de poros é menor nestes solos quando comparado, por exemplo, com os solos argilosos, onde a formação de microagregados pelas partículas de argila aumenta a microporosidade.

O conhecimento da porosidade dos solos é importante, por exemplo, em estudos geotécnicos relativos à resistência ao cisalhamento,

deformabilidade e condutividade hidráulica, podendo-se referir, também, às aplicações geoambientais, relativas ao fluxo de calor e movimento de contaminantes e, às pedológicas, relativas ao desenvolvimento radicular de plantas.

Contudo, como destaca Dalla Riva (2010), a determinação da porosidade total, por si só, é de caráter limitado, pois não considera a distribuição dos macroporos (poros com diâmetro maior que 0,05 mm) e dos microporos (poros com diâmetro menor que 0,05 mm).

2.6 Morfologia

A morfologia compreende o estudo da forma das partículas. Sedimentologistas, geralmente, expressam essa forma em função da textura superficial, esfericidade e arredondamento, sendo suas análises realizadas, frequentemente, de maneira visual (ALSHIBLI; ALSALEH, 2004). Devido ao fato dos fragmentos minerais ou rochosos contidos em depósitos sedimentares aproximarem-se muito grosseiramente de sólidos regulares, sua caracterização numérica é bastante aproximada, sendo comum se utilizar a esfera para representar a forma-padrão de comparação, pois ela possui a menor superfície para um dado volume. Historicamente, Dalla Riva (2010) relata que Wadel¹ foi o primeiro a utilizá-la como padrão, em 1935.

Em uma visão geotécnica, Das (2007) considera que a morfologia dos solos granulares é uma consideração de importância similar à distribuição granulométrica, pois têm influência significativa em propriedades, como o índice de vazios máximo e mínimo, parâmetros de resistência ao cisalhamento e compressibilidade. Além do mais, a forma dos grãos de areia pode ser importante indicador das suas origens; por exemplo, partículas de areia localizadas perto de suas origens, na forma, em geral, são muito angulares, enquanto que aquelas carregadas por uma longa distância pelo vento e pela água tendem a ser subangulares a arredondadas.

¹ WADEL, H. Volume, shape, and roundness of quartz particles. *J. Geol.*, 43:250-280, 1935.

Para classificação da forma das partículas, um dos sistemas geológicos comumente empregados é a escala de arredondamento de Powers (1953), como se apresenta na Figura 2. Assim como outras já propostas, essa escala mostra uma diferenciação entre arredondamento ou esfericidade e angularidade, refletindo uma distinção geométrica entre a forma global da partícula e a rugosidade de sua superfície. Na Tabela 3, tem-se o grau de arredondamento introduzido por Powers (1953).

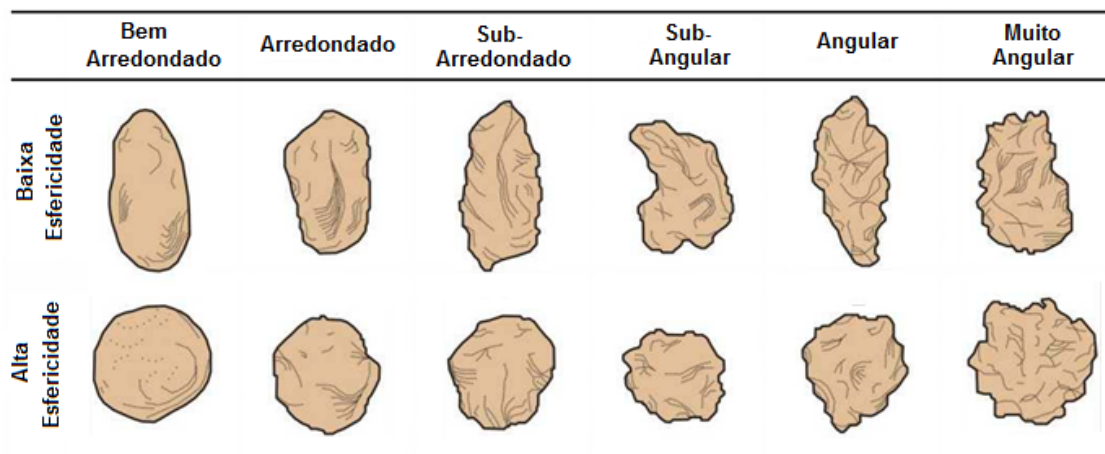


Figura 2: Escala de arredondamento (esfericidade) e angularidade (Modificado de Powers, 1953).

Tabela 3: Classificação do arredondamento de acordo com Powers (1953)

Classificação	Limites da classe	Ponto médio
Muito angular	0,12 - 0,17	0,14
Angular	0,17 - 0,25	0,21
Sub-angular	0,25 - 0,35	0,30
Sub-arredondado	0,35 - 0,49	0,42
Arredondado	0,49 - 0,70	0,59
Bem arredondado	0,70 - 1,00	0,85

Fonte: Dalla Riva (2010).

Quanto à movimentação relativa entre partículas de solos granulares, em geral, partículas angulosas apresentam maior dificuldade de rolar umas sobre as outras, ou seja, necessitam de maior energia para sofrerem rotação. Como refere Neves (2009), quanto mais angulosos forem os grãos desses materiais, maior é a resistência ao movimento relativo dos

mesmos, já que há um grau maior de imbricamento (encaixe) entre eles do que aquele que ocorreria entre grãos arredondados.

Em termos estruturais, Pinto (2000) considera que o formato dos grãos tem muita importância no comportamento geotécnico dos solos granulares, visto que influencia o comportamento mecânico destes materiais, pois determina como as partículas se encaixam, entrosam e deslizam entre si, quando solicitados por forças externas. Contudo, esse autor salienta que apesar da importância do formato dos grãos, em Geotecnia pouca atenção tem sido dada a este aspecto na classificação das areias, devido, principalmente, a não se dispor de índices numéricos simples para expressar o formato dos grãos.

2.7 Fenômenos de empacotamento

Graton e Fraser (1935) definem o empacotamento de partículas como qualquer arranjo em que cada unidade constituinte é mantida e organizada no local pela ação do campo gravitacional terrestre, através do contato tangencial com seus vizinhos.

Em uma visão geral, McGeary (1961) considera que o princípio básico do empacotamento de partículas consiste na seleção de tamanhos adequados e na escolha da quantidade adequada dos mesmos, de modo a se produzir conjuntos compactos com densidade controlada. Dalla Riva (2010) amplia essa visão, destacando que o empacotamento depende não só da forma e distribuição espacial, mas também dos processos de deposição das partículas ou de sua formação no local.

Neves (2009) relata que nos empacotamentos, a denominação do arranjo relaciona-se com o número de contatos de cada partícula (exceto as do contorno). Assim, por exemplo, no arranjo quadrado, cada partícula está em contato com quatro outras vizinhas, bem como que no hexagonal, com seis outras.

Com relação aos tipos de empacotamentos de partículas, pode-se referir a dois casos extremos, a saber: (i) no primeiro, designado de monodisperso, o sistema é constituído de grãos esféricos de tamanho

uniforme em um estado de empacotamento aberto (densidade mínima); e (ii) no segundo, o sistema possui uma distribuição gradual de tamanho de grãos, onde os grãos menores preenchem os espaços vazios entre os grãos maiores em uma sucessão ideal, que irá conduzir a um estado de densidade máxima, denominado de polidisperso. Segundo esta visão, solos que possuem partículas de tamanho uniforme apresentarão menor número de contatos entre estas do que aqueles constituídos por partículas de vários tamanhos.

Com relação aos fatores que influenciam o empacotamento de partículas, citam-se a estabilidade gravitacional, aglomeração, porosidade interna, forma e rugosidade superficial das partículas, segregação e técnica de compactação empregada.

2.7.1 Estabilidade gravitacional

Associa-se a estabilidade gravitacional à posição que uma partícula ocupa no espaço, considerando-se que uma posição de equilíbrio estável relaciona-se com o fato de que perturbações na mesma fazem com que apareçam forças, ou momentos, que tendem a retornar a partícula à sua posição inicial. Por outro lado, para que uma partícula adquira uma estabilidade gravitacional, ela deve estar em contato com pelo menos três outras, conforme ilustrado na Figura 3.

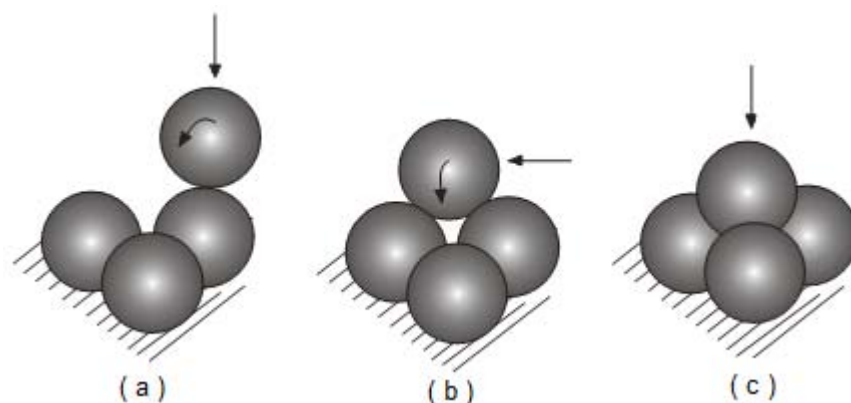


Figura 3: Estabilidade gravitacional em empacotamentos aleatórios de esferas de igual tamanho: (a) um contato; (b) dois contatos e, (c) três contatos (Modificado de GERMAN, 1989).

2.7.2 Aglomeração

A aglomeração ocorre, principalmente, entre partículas de menores dimensões, em virtude do possível aumento das forças coesivas interpartículas, podendo causar uma dificuldade adicional na obtenção de altas densidades de empacotamento. Nesse sentido, sabe-se que à medida que a área superficial das partículas aumenta e a quantidade de massa do sistema diminui, as forças de atração aumentam e, apesar de favorecerem o agrupamento entre partículas, podem ocasionar a formação de regiões de alta porosidade, como se ilustra na Figura 4.

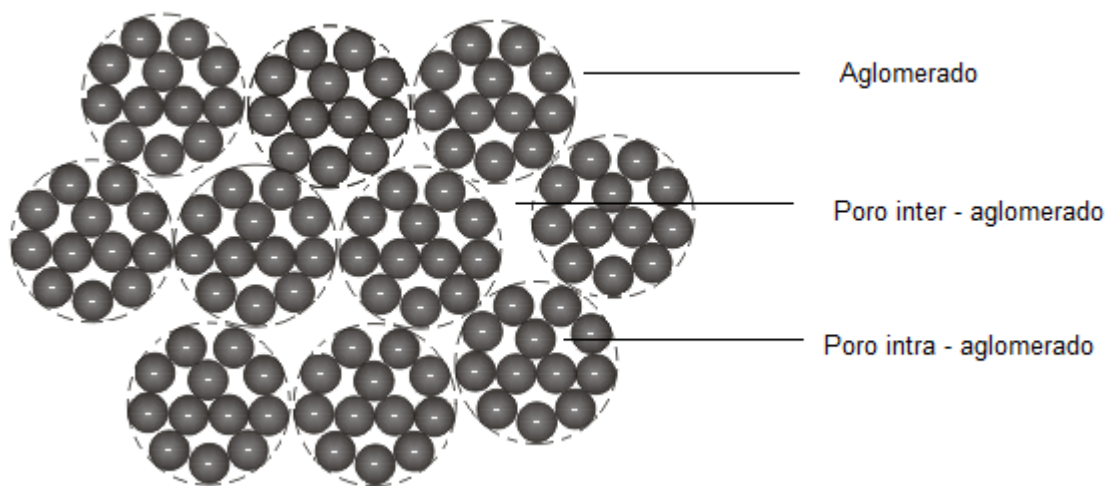


Figura 4: Croqui esquemático apresentando regiões de alta porosidade em empacotamento de esferas de igual diâmetro, associadas ao efeito de aglomeração (Modificado de GERMAN, 1989).

Como destaca Panzera (2007), via de regra, o problema de aglomeração torna-se efetivo nas partículas inferiores a 1 μm , embora partículas maiores possam, também, apresentar tal comportamento.

2.7.3 Porosidade interna

Com relação à porosidade interna, podem-se classificar as partículas como totalmente densas (Figura 5a), com porosidade interna fechada (Figura 5b) ou com porosidade aberta (Figura 5c). Considerando-se uma determinada distribuição granulométrica, para se obter um

empacotamento com densidade máxima é necessário que se utilizem partículas totalmente densas; mas, nem sempre é possível alcançar esta condição.

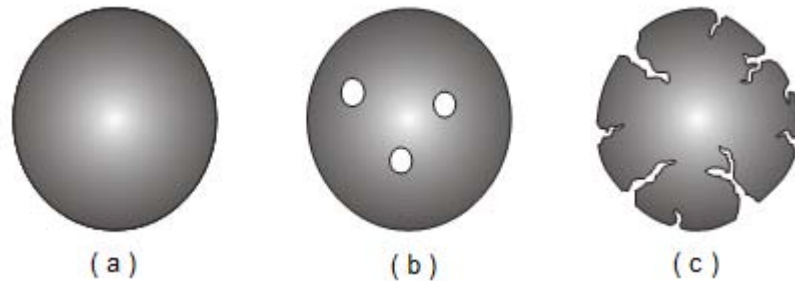


Figura 5: Croqui mostrando três diferentes formas de estrutura porosa interna: (a) sem poros; (b) poros interno fechados; e (c) poros abertos (Modificado de PANZERA, 2007).

Para efeito de distribuição granulométrica, as partículas que apresentam porosidade interna fechada são semelhantes às densas; porém, devido à presença de poros, levam à ocorrência de misturas com densidades menores. Com relação às partículas que apresentam porosidade aberta, estas provocam alteração no empacotamento, uma vez que apresentam formato irregular, produzindo misturas com menores densidades.

2.7.4 Forma e rugosidade superficial da partícula

A morfologia das partículas pode alterar a condição de empacotamento, haja vista que partículas mais afastadas do formato esférico e mais rugosas tendem a reduzir a densidade de empacotamento devido ao atrito entre as partículas, que surge pelo contato das suas superfícies irregulares. Segundo Panzera (2007), quanto menores as dimensões das partículas irregulares, maior esse efeito, em função da maior área superficial específica.

A Figura 6 ilustra a densidade de empacotamento relativa de partículas irregulares, mas de mesmas dimensões. Observa-se que acréscimos no arredondamento relativo das partículas induzem aumentos na densidade relativa do sistema empacotado. Assim, conclui-se que partículas

esféricas são mais recomendadas em aplicações que requerem altas densidades de empacotamento. Refere-se que o índice morfométrico arredondamento expressa o grau de agudez ou curvatura dos cantos e arestas de uma partícula. Seu resultado situa-se entre 0 e 1. Quanto maior o valor, mais arredondado é o objeto. Se o valor for 1, o objeto é um círculo perfeito.

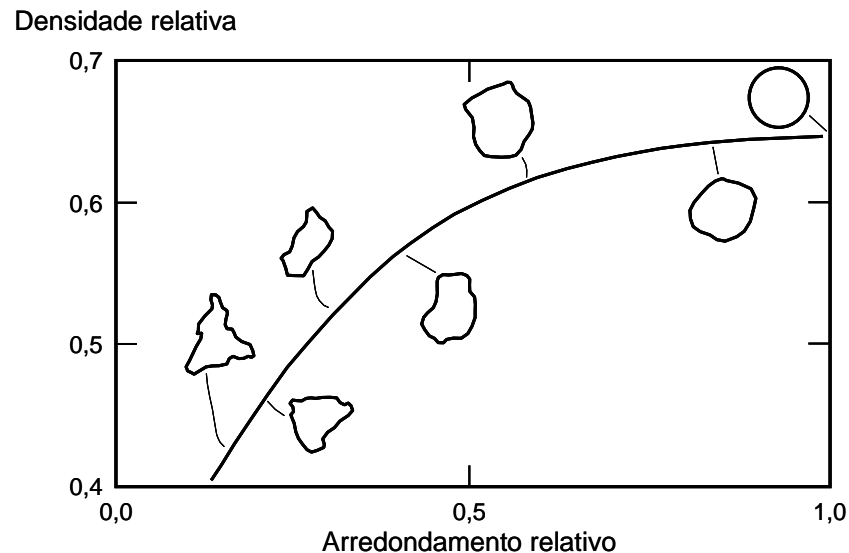


Figura 6: Densidade relativa em função do arredondamento para partículas de igual tamanho empacotadas aleatoriamente (TSUTSUMI², apud DALLA RIVA, 2010).

Dalla Riva (2010) relata que partículas pequenas de forma irregular, que representam concentrações menores do que 10% em relação às outras de um sistema, podem ser misturadas com esferas sem alterar de forma significativa a densidade do empacotamento. Contudo, para concentrações maiores, altera-se a estrutura do empacotamento, fenômeno este que se agrava quando estas apresentam tamanho próximo ao da esfera e, por consequência, a densidade diminui proporcionalmente com a concentração de partículas irregulares.

² TSUTSUMI, Y. Arrangements of uniformly sized particles in a powder bed. **Powder Technol.** 7:181-188, 1973.

2.7.5 Segregação

Segregação é a perda de uniformidade na distribuição dos componentes de uma mistura, atribuindo-se à diferença de tamanho entre partículas como a sua principal causa. Dentre os fatores que podem contribuir para a ocorrência da segregação, destaca-se o processo de agitação.

Em um sistema de empacotamento com partículas de diferentes dimensões, a agitação faz com que os poros existentes entre as mesmas se abram, permitindo que partículas menores possam se deslocar sob a ação gravitacional para regiões de maior estabilidade posicional. Como consequência, as partículas maiores migram para o topo do recipiente, causando a segregação, como se ilustra na Figura 7.

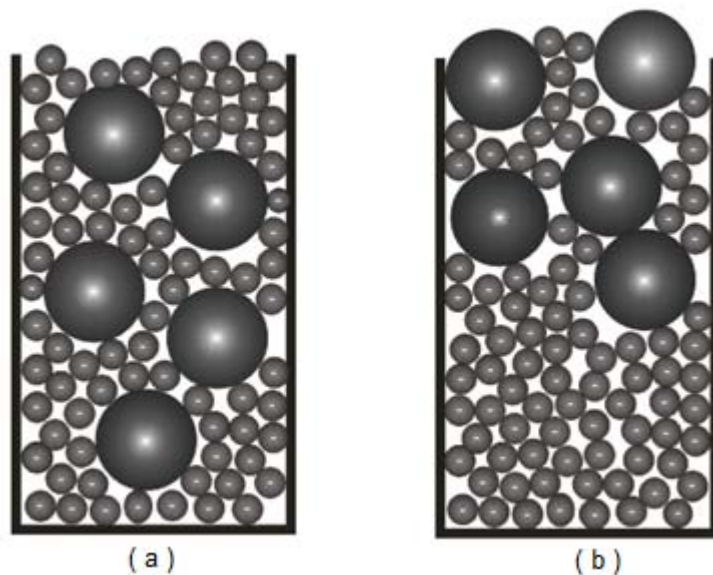


Figura 7: Fenômeno de segregação em empacotamento binário aleatório, devido à agitação: (a) sem segregação e, (b) com segregação (Modificado de ROSATO, 1987).

2.7.6 Técnica de compactação

Podem-se produzir empacotamentos distintos, a partir de uma mesma distribuição de partículas, dependendo da técnica de compactação empregada. Segundo Panzera (2007), para que um sistema atinja uma condição de empacotamento máximo, é necessário considerar como essas

partículas se organizam espacialmente, otimizando-se o empacotamento quando aquelas menores ocupam os espaços vazios entre as maiores, fazendo com que a porosidade do sistema diminua.

A Figura 8 mostra um sistema de partículas esféricas distribuídas de maneiras distintas em dois recipientes, como segue: (a) no primeiro, as partículas foram depositadas de modo a formar camadas sucessivas de partículas de um único diâmetro, sendo que esta deposição iniciou-se com as partículas de menor diâmetro; e (b) no segundo, as partículas foram depositadas aleatoriamente e o recipiente foi submetido à vibração, possibilitando o movimento relativo de umas em relação às outras, de modo a se atingir uma posição de equilíbrio no empacotamento. Nessa representação, a faixa preta superior em (b) representa a redução no espaço ocupado pelas partículas devido ao melhor empacotamento.

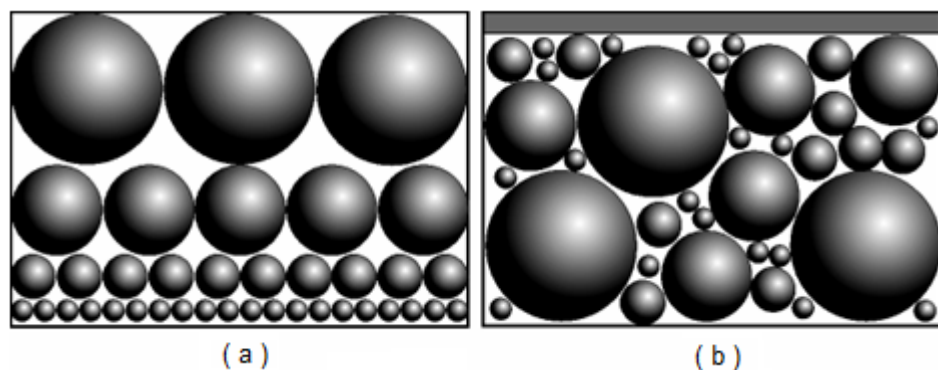


Figura 8: Modelos esquemáticos que apresentam duas formas de empacotamento para uma mesma distribuição granulométrica (PANZERA, 2007).

Destaca-se que a técnica da compactação por vibração pode ser utilizada, também, para se eliminar regiões de porosidade elevada associadas ao fenômeno de pontes de ligação entre partículas, fazendo com que se alcancem maiores densidades de empacotamento. A formação de pontes de ligação entre partículas é comumente associada aos agrupamentos de partículas não esféricas e, em especial, aquelas de forma angular, onde se favorece a formação de regiões de grandes poros. Dalla Riva (2010) refere que, comumente, a forma de se eliminar a ocorrência

desse fenômeno consiste no emprego de vibração ao recipiente com as partículas de solo, mas sem pressão externa aplicada às partículas.

2.7.7 Empacotamentos binários

Um empacotamento uniforme de partículas (sistema monodisperso) deixa vazios entre as mesmas e, na maioria dos casos, pode-se aumentar a densidade deste sistema com a adição aleatória de partículas menores, de tal modo que elas preencham os interstícios entre as maiores, sem causar, com isto, aumento do volume total, conforme ilustrado na Figura 9, onde é representado um sistema de empacotamento binário. Nessa Figura, observa-se que inicialmente as esferas estão empacotadas em um arranjo ordenado uniforme (Figura 9a); posteriormente, são selecionadas esferas menores, em proporção adequada de modo a preencher os poros existentes entre as esferas com diâmetro maior, aumentando-se a densidade, porém sem alterar o volume inicial (Figuras 9b e 9c).

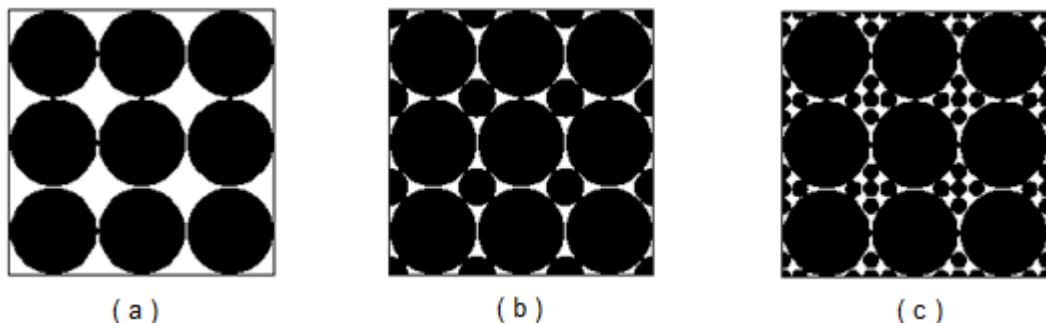


Figura 9: Representação bidimensional dos efeitos de combinações de diferentes tamanhos de partículas: (a) empacotamento uniforme; (b) e (c) empacotamentos binários. (Modificado de DALLA RIVA, 2010).

Segundo Dalla Riva (2010), a máxima densidade relativa de empacotamento para esferas de igual tamanho é 0,64, sendo que empacotamentos binários podem elevar este valor para até 0,86, resultando em um ganho relativo da ordem de 34% na densidade relativa. Esse autor relata, também, que nesses empacotamentos é essencial considerar como aspectos básicos o efeito da razão entre o tamanho dos grãos (D/d) na

variação da porcentagem de vazios (ou densidade) e a variação da porcentagem de grãos menores na mistura das partículas, sendo comum fazerem-se as seguintes hipóteses: (i) os grãos maiores e menores são esféricos; (ii) a porcentagem mínima de vazios independe do diâmetro dos grãos; e (iii) as diferenças de densidade das partículas entre os grãos maiores e os grãos menores são desprezíveis, no caso de composições mineralógicas diferentes dos grãos.

Tem-se conhecimento de que a metodologia considerada mais eficiente para se produzir misturas binárias é aquela proposta por McGeary (1961). Esse procedimento consiste na deposição inicial, sob vibração, das partículas maiores dentro do molde de compactação, até que elas atinjam a sua configuração mais densa e, na sequência, adicionar as partículas menores, ainda sob o efeito da vibração aplicada. Como consequência, as partículas menores migram através dos vazios e alcançam um ponto de saturação, até que posteriores adições das mesmas não seja mais possível, sem que se altere o volume inicial.

2.7.8 Efeitos da razão D/d

O princípio fundamental para melhoria dos empacotamentos é a razão entre os diâmetros das partículas envolvidas. No caso de empacotamentos binários, as partículas menores, de diâmetro d , devem ser selecionadas de tal modo que elas preencham os vazios entre as partículas maiores, de diâmetro D , sem causar, com isto, deslocamento na matriz formada pelas últimas, como se ilustra na Figura 10a. Nesse contexto, Panzera (2007) cita que a introdução de partículas maiores que os vazios existentes, em geral, provoca o surgimento de novos vazios pelo deslocamento das partículas maiores de suas posições originais, o que leva a um aumento na porosidade e diminuição na eficiência do empacotamento, conforme ilustrado na Figura 10b.

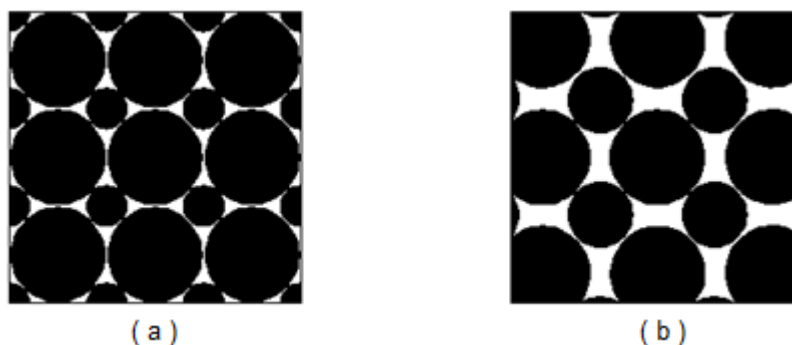


Figura 10: Representação bidimensional do efeito da razão (D/d) no empacotamento binário: (a) partícula menor (d) com tamanho máximo adequado; e (b) partícula menor (d) com tamanho superior aos vazios existentes.

Segundo Dalla Riva (2010), a densidade de empacotamentos binários, geralmente, se eleva à medida que a razão D/d torna-se maior, desde que exista em torno de 20% de diferença nos tamanhos das partículas, sendo que, em muitos casos, a composição com a maior densidade de empacotamento requer, pelo menos, 50% de partículas maiores.

A maior eficiência e a maior redução em mínimas proporções de vazios são obtidas para empacotamentos binários de esferas com razão D/d próximo de 7. Dalla Riva (2010) considera que acima desse valor não há elevação significativa da densidade relativa e salienta que o motivo da transição na eficiência do empacotamento ocorrer em uma relação D/d próxima a 7 é que os grãos menores podem ainda migrar e se ajustarem por intermédio dos caminhos porosos formados entre os grãos maiores.

Na Figura 11, tem-se o resultado de um estudo apresentado por Lade et al. (1998) com esferas de vidro, onde os autores relacionam a proporção de vazios e a relação D/d das esferas utilizadas. Os dados apresentados nessa figura indicam que a porcentagem mínima de vazios decresce acentuadamente para razões D/d inferiores a 7, após o que reduções adicionais tornam-se de pequena monta, o que indica que, para fins práticos, a maior redução é obtida com razão D/d próxima de 7. Confirmando este resultado, dados de Dalla Riva (2010) obtidos em estudo realizado com esferas de vidro e quatro solos arenosos do estado de Minas

Gerais, adotando-se como critério técnico a produção de frações areia na faixa granulométrica entre 2,000 mm e 0,053 mm, mostraram que os empacotamentos binários atingiram um ponto de máxima densidade em uma composição aproximada de 30% de partículas menores, para as esferas de vidro e as frações areia limpa dos solos, bem como que maior eficiência dos empacotamentos binários ocorreu para razões D/d próximas de 7.

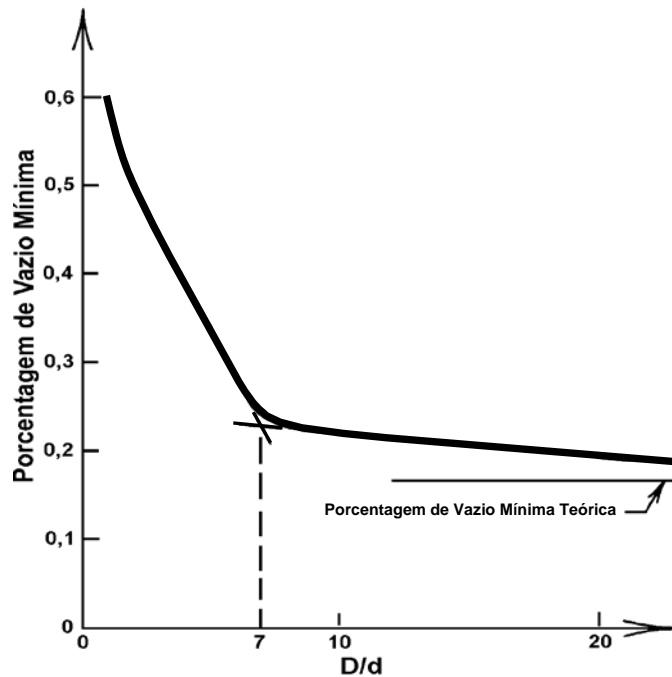


Figura 11: Porcentagens de vazios mínimas obtidas em misturas binárias de esferas de aço em função da relação D/d (LADE et al., 1998).

2.7.9 Efeitos da porcentagem de grãos menores

Como já se referiu, um fator relevante na interferência da densidade de empacotamento de misturas binárias é a porcentagem das partículas menores, como destaca Fonseca (2007), haja vista que uma quantidade insuficiente de partículas menores nas misturas impossibilita obter a densidade de empacotamento máxima, já que estas preenchem apenas uma porcentagem dos vazios existente entre as partículas de maior diâmetro, como se ilustra na Figura 12a. Por outro lado, qualquer excesso das mesmas tende a provocar um aumento na distância entre as partículas maiores e, por consequência, decréscimo na densidade de empacotamento, como se ilustra na Figura 12b.

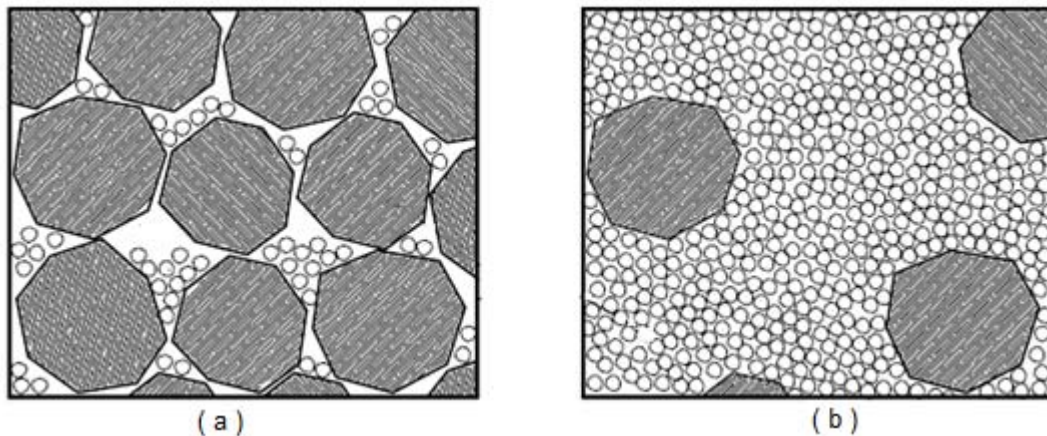


Figura 12: (a) misturas binárias em que se apresentam as situações de insuficiência de partículas de menor diâmetro; e (b) excesso das mesmas. (Modificado de FORMAGINI, 2005).

Geralmente, os estudos sobre a influência da relação D/d e proporção de partículas menores em relação às maiores em sistemas bimodais têm por base resultados de estudos realizados com esferas. Contudo, Panzera (2007) destaca que o comportamento de sistemas binários de partículas não esféricas, em relação à densidade de empacotamento, é semelhante ao empacotamento de partículas esféricas, mas com valores inferiores de densidades, sendo que quanto maior é a rugosidade superficial ou mais irregular é a partícula, menor é a densidade relativa do sistema.

2.8 Resistência à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração de ponteiros de dimensões padronizadas tem sido utilizada em diversas áreas de interesse geotécnico, envolvendo a caracterização de camadas compactadas e a estimativa de propriedades de engenharia dos solos, para fins de projeto. Entre as características que influenciam a resistência à penetração dos solos, pode-se referir à estrutura, textura, porosidade, teor de umidade e presença de agentes de cimentação. Contudo, como destaca Dalla Riva (2010), há uma carência substantiva de estudos básicos envolvendo a resistência à penetração de sistemas empacotados, em especial nos binários formados por sistemas de esferas e de partículas irregulares.

Aos níveis nacional e internacional, é comum empregarem sistemas baseados no cone penetrométrico quase-estático (CPT) para a determinação de parâmetros geotécnicos de projeto e acompanhamento da qualidade das obras de engenharia. No Brasil, esta modalidade de ensaio, na forma de ensaio de campo, está padronizada pela ABNT (1991), através da NBR 12069. Nessa norma, se determina o método para obtenção da resistência do solo à penetração contínua de uma ponteira padronizada, com elementos para a medida das resistências de ponta e de atrito lateral, que possibilitam estimar as propriedades geotécnicas dos solos. Elementos básicos desse ensaio, na modalidade campo, são: (i) ângulo de ponta do cone de 60°; (ii) área de ponta projetada do cone de 10 cm²; e (iii) velocidade de penetração de 20 mm/s ± 5 mm/s.

Recentemente, Dalla Riva (2010) projetou e implementou um sistema para a realização de ensaios de laboratório de penetração quase-estática, conforme apresentado na Figura 13a, com as seguintes características: (i) sistema de cravação hidráulico, com curso de até 60 cm; (ii) célula de carga de capacidade variável (20, 50, 100 e 200 kgf), em função do material a ser ensaiado; (iii) haste de penetração de cone penetrométrico com diâmetro igual a 6,2 mm; (iv) sistema de aquisição de dados; e (v) computador. Nesse sistema, a resistência de ponta (R_p) é calculada como a razão entre a força necessária para se produzir a penetração da haste de penetração (F) e a área projetada da base do cone penetrométrico (A). Complementarmente, o sistema é constituído por uma base e dois cilindros, ambos em acrílico, com 10 cm de altura e 6 cm de diâmetro interno para a preparação de corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 13b.

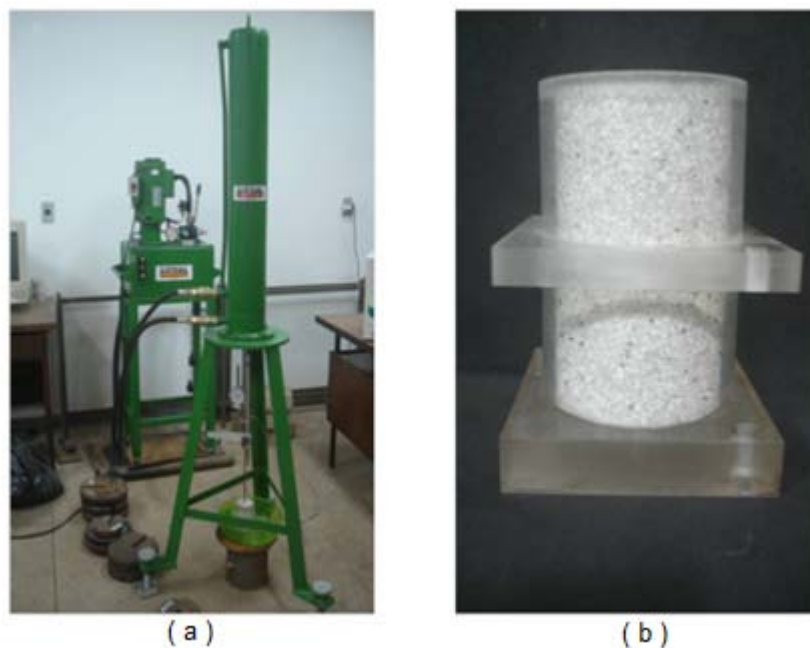


Figura 13: Sistema com o cone penetrométrico quase-estático, segundo Dalla Riva (2010): (a) penetrômetro quase-estático para a determinação da resistência à penetração das amostras de solos; e (b) conjunto para a preparação do corpo de prova a ser ensaiado.

2.9 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica (k) pode ser interpretada como a facilidade (ou dificuldade) que o meio oferece à passagem de um fluido pelos seus poros ou vazios do solo (CRUZ, 1996). No caso do fluido ser a água, emprega-se o termo condutividade hidráulica, que é um parâmetro de grande importância para a caracterização geotécnica de maciços em solos.

Vários fatores afetam a condutividade hidráulica de um solo, sendo que dentre eles destacam-se as dimensões das suas partículas, estrutura, grau de saturação e índice de vazios, os quais são estreitamente relacionados. Assim, quanto menores as partículas do solo, menores serão as dimensões dos canais de fluxo e, portanto menor será a condutividade hidráulica. Por outro lado, solos com estrutura interna floculada, via de regra, exibem grandes canais para fluxo e, quanto maiores forem estes, maior será a condutividade hidráulica do sistema, como destaca Alonso (2005). Martinello (2006) refere, também, que solos com índices de vazios elevados têm mais espaços vazios no seu interior que, no caso dos mesmos estarem

preenchidos com água, constituem canais de fluxo em presença de um gradiente hidráulico. Segundo esse autor, quando se reduz o grau de saturação de um solo, sua sucção matricial aumenta, fazendo com que o meio líquido passe a dar espaço ao ar, reduzindo-se, progressivamente, os canais de fluxo de água e diminuindo, bruscamente, a condutividade hidráulica.

Uma característica peculiar dos solos granulares é apresentarem condutividade hidráulica elevada, em comparação com a maioria dos solos argilosos. Contudo, há que se considerar a influência das dimensões das suas partículas, pois aqueles com predominância de areia fina, por exemplo, tendem a apresentar vazios relativamente pequenos, resultando em condutividade hidráulica relativamente baixa, enquanto que os que apresentam fração areia grossa expressiva tendem a exibir condutividade hidráulica elevada, como refere Alonso (2005). Por outro lado, como destaca German (1989), as partículas irregulares de um solo exibem maior área superficial, o que contribui para aumentar a resistência ao fluxo e, conseqüentemente, reduzir a condutividade hidráulica.

O Laboratório de Engenharia Civil da UFV dispõe de um sistema de carga constante para a determinação da condutividade hidráulica de solos granulares com trinta permeâmetros, que foi implementado por Dalla Riva (2010), como se ilustra na Figura 14.



Figura 14: Sistema implementado por Dalla Riva (2010) para a realização de ensaios de condutividade hidráulica sob carga constante: (a) vista parcial do conjunto de permeâmetros; e (b) detalhe do permeâmetro, com a proveta graduada em cm.

2.10 Agentes de cimentação

Cruz (1996) ressalta que a presença de cimentação entre as partículas dos solos pode decorrer, entre outros processos, da presença de carbonatos, óxido de ferro, silicatos, aluminatos e alguns materiais orgânicos, que garantem a estes materiais condições diferenciadas de comportamento mecânico, em especial no que tange à resistência mecânica e à compressibilidade.

A cimentação das partículas pelos óxidos de ferro e alumínio e pelos carbonatos, que se precipitam em torno de pontos de contato, contribui para o aumento da parcela de resistência mecânica devido à coesão. Por outro lado, nos solos residuais, a coesão pode resultar da cimentação do grão por produtos remanescentes da rocha de origem ou precipitações ocorridas no perfil do solo.

Segundo Rotta (2005), nas areias naturais a cimentação pode ocorrer através de diferentes processos. Em alguns casos, o agente de cimentação é depositado logo após a sedimentação quando o solo está à pequena profundidade, sendo comum, por exemplo, em areias calcárias depositadas com carbonato de cálcio em ambiente saturado formando calcarenitos, que são rochas areníticas constituídas por grãos de areia de carbonatos calcínicos; em outros casos, a cimentação pode ocorrer, também, a pequenas profundidades, através do óxido de ferro como agente de cimentação, como no caso de arenitos.

Um produto comercial que pode ser utilizado para a formação de estruturas granulares cimentadas é a cal hidratada, na busca de simular condições de formação de solos arenosos no campo, como destaca Dalla Riva (2010). Com relação a esse produto, em geral, a cal é produzida com base em calcário com elevado teor de cálcio ou de magnésio, sendo que, em geral, a cal com elevado teor de cálcio tem menos de 5% de MgO e recebe o nome de cal cálcica; por outro lado, quando a cal se origina de um calcário com elevado teor de magnésio, o produto é conhecido por cal dolomítica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se os materiais utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como a metodologia para a realização do programa experimental.

3.1 Materiais

3.1.1 Solos

No presente estudo, empregou-se um solo artificial (solo AR) composto pela fração areia limpa de dois dos solos naturais analisados por Dalla Riva (2010), a saber: (i) João Pinheiro (solo JP); e (ii) Cachoeira da Prata (solo CP). Apresenta-se a seguir, uma descrição destes solos e dos locais de coleta das amostras, bem como, figuras ilustrativas destes materiais.

- Solo CP: sedimento aluvial de várzeas (areia de dragas). O mineral predominante na fração areia é o quartzo. A amostra foi coletada em um local de dragagem de areia de rio localizado no lado direito da MG 238 que liga Sete Lagoas/MG a Cachoeira da Prata/MG, no município de Cachoeira da Prata/MG, no ponto de coordenadas 19°29'59.06"S; 44°29'42.25"W, como ilustrado nas figuras 15 e 16.



Figura 15: Fotografia ilustrativa do solo CP (DALLA RIVA, 2010).



Figura 16: Localização do ponto de coleta do solo CP (GOOGLE, 2013).

- Solo JP: Horizonte B de um Latossolo Amarelo distrófico de textura franco-arenosa, originário do arenito Urucuia, sendo o mineral predominante na fração areia o quartzo. A amostra foi coletada em um talude de corte localizado no lado direito da MG 181, que liga as cidades de João Pinheiro/MG e Brasilândia de Minas/MG, no ponto de coordenadas $17^{\circ}25'48.65''S$ e $46^{\circ}04'37.27''W$, conforme apresentado nas figuras 17 e 18.



Figura 17: Fotografia ilustrativa do solo JP (DALLA RIVA, 2010).



Figura 18: Localização do ponto de coleta do solo JP (GOOGLE , 2013).

A Tabela 4 apresenta as texturas dos solos CP e JP. Ressalta-se que para o presente estudo, adotou-se como critério técnico, a produção de frações de solo na faixa granulométrica entre 2,000 mm e 0,053 mm. Refere-se que se incorporou a peneira de abertura nominal 0,053 mm ao estudo, embora ela já abranja a parte superior da fração silte, segundo escala granulométrica da ABNT (1995).

Tabela 4: Textura dos solos

Solo	Classificação ABNT (1995)		
	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Cachoeira da Prata (CP)	3	4	93
João Pinheiro (JP)	16	4	80

Com relação à morfologia dos grãos de areia destes solos, estudos de caracterização morfológica e qualitativa das partículas realizada por Dalla Riva (2010) nos solos CP e JP constataram que os mesmos possuem aspectos morfológicos bem diferenciados. As partículas da fração areia limpa do solo CP possuem superfície rugosa, sem reentrâncias aparentes, não apresentando planos de ruptura, bem arestadas, com baixo grau de arredondamento, alongamento e compacidade, como pode ser visualizado na Figura 19.

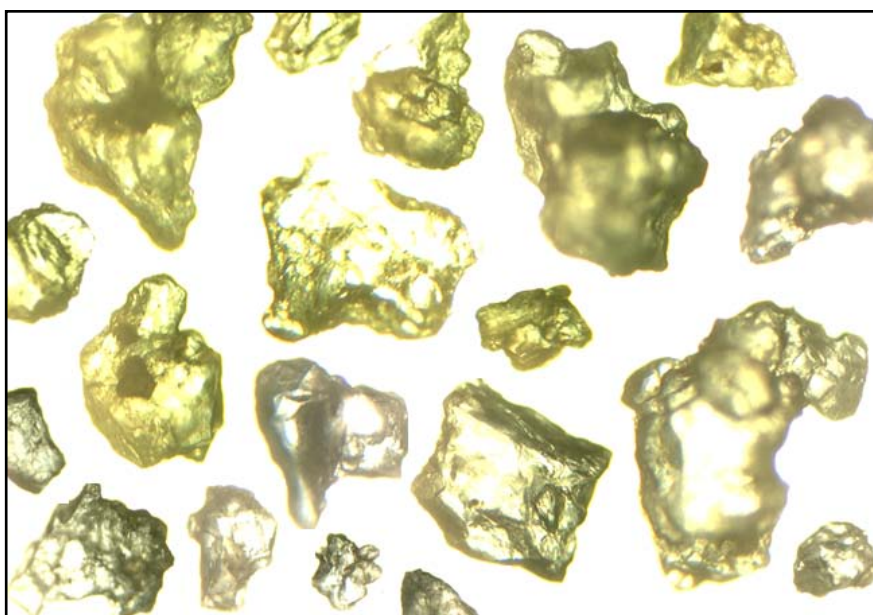


Figura 19: Imagem da fração areia limpa do solo CP obtida através do microscópico óptico do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.

As partículas características da fração areia limpa do solo JP, no geral, apresentam superfícies lisas, sem reentrâncias aparentes,

apresentando elevado grau de arredondamento, alongamento e compacidade, conforme ilustrado na Figura 20.

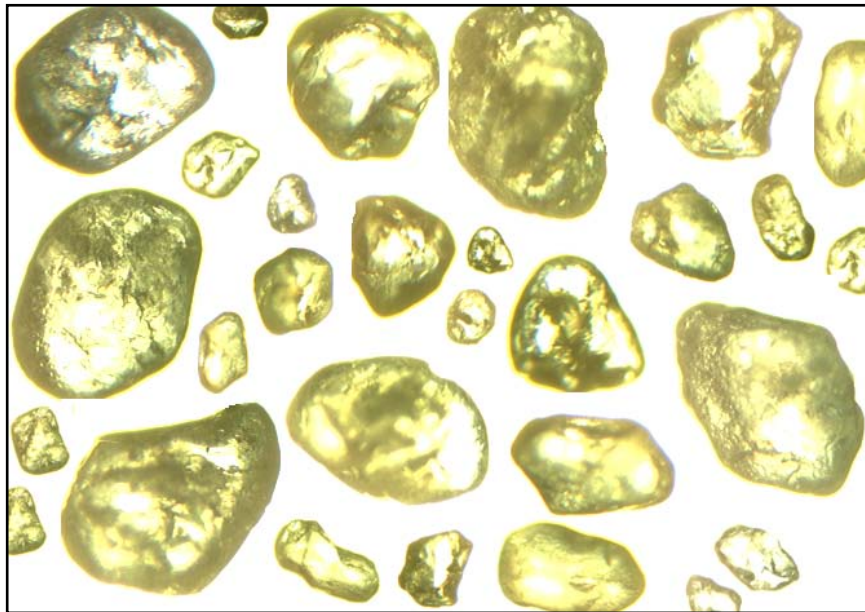


Figura 20: Imagem da fração areia limpa do solo JP obtida através do microscópico óptico do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.

3.1.2 Esferas de vidro

Nesta pesquisa empregou-se um conjunto de esferas de vidro (material EV), a fim de se estudar os empacotamentos binários.

As EV podem gerar sistemas simplificados para o estudo de solos granulares, estabelecendo-se uma estrutura para a compreensão do empacotamento de partículas de menor grau de uniformidade. Além disso, têm baixa fricção quando comparadas com outras formas de partícula e, para especificar a sua dimensão, é necessário somente um parâmetro, o diâmetro.

As EV foram adquiridas na empresa TECHNOGLASS, cujas propriedades químicas e físicas encontram-se dispostas na Tabela 5.

Tabela 5: Composição química e física das esferas de vidro

Composição	
Química	Físicas
Vidrado soda cal	Densidade 2,5 (g cm ⁻³)
Nenhuma Sílica Livre	Dureza entre 5 e 6 (Mohs)

3.1.3 Agente de cimentação

Empregou-se como agente de cimentação uma cal hidratada do tipo CHIII, comercialmente denominada Supercal, com o intuito de reproduzir as reações de carbonatação com a fração areia do solo, o que reflete parte dos processos de formação de certos depósitos arenosos no campo.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação das amostras

No Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal de Viçosa, após secagem ao ar, as amostras de solo foram passadas na peneira de abertura nominal 2,0 mm, para a retirada da fração pedregulho.

O material que passou na peneira referida recebeu os seguintes tratamentos: (i) dispersão mecânica e química; (ii) remoção de matéria orgânica, (iii) remoção de óxido de ferro; e (iv) separação da fração areia em classes.

3.2.1.1 Dispersão mecânica e química

Foi realizada por intermédio de agitador mecânico, tipo Wagner, como ilustrado na Figura 21, funcionando durante 16 h, a 50 rpm, e por dispersão química utilizando-se NaOH 0,5 mol L⁻¹ e água deionizada. Ao final do processo, as amostras foram lavadas em peneira de 0,053 mm, visando separar a fração areia das frações silte e argila.



Figura 21: Agitador mecânico utilizado para grandes volumes de solo.

3.2.1.2 Remoção de matéria orgânica

Utilizou-se o hipoclorito de sódio, com pH ajustado a 9,5, em banho-maria a 50 °C durante 6 h e, na sequência, lavagem em água na peneira de abertura nominal 0,053 mm para retirada da matéria orgânica das amostras.

3.2.1.3 Remoção de óxidos de ferro

Para remoção do óxido de ferro, empregou-se uma solução de ditionito-citrato em banho-maria a 75 °C por 1 h, em três extrações sequenciais e, na sequência, lavagem da amostra em água na peneira 0,053 mm.

3.2.1.4 Separação da fração areia em classes

Foram utilizadas para a separação dos diversos tamanhos de partículas da fração areia, peneiras certificadas distribuídas em vinte e uma classes de tamanho, como ilustrado na Figura 22a e Tabela 6, fazendo-se uso de um agitador de peneiras do tipo Rotap, com controle de velocidade e tempo, e movimentos rotatórios, conforme apresentada na Figura 22b.



Figura 22: (a) Jogo de peneiras para o peneiramento da fração areia em 21 classes de tamanho; e (b) Imagem do agitador de peneiras empregado.

Tabela 6: Classe de peneiras usadas na separação da fração areia limpa

Item	Classe (mm)	Item	Classe (mm)	Item	Classe (mm)
1	2,000 - 1,680	8	0,590 - 0,500	15	0,177 - 0,149
2	1,680 - 1,410	9	0,500 - 0,420	16	0,149 - 0,125
3	1,410 - 1,190	10	0,420 - 0,350	17	0,125 - 0,105
4	1,190 - 1,000	11	0,350 - 0,297	18	0,105 - 0,088
5	1,000 - 0,840	12	0,297 - 0,250	19	0,088 - 0,074
6	0,840 - 0,710	13	0,250 - 0,210	20	0,074 - 0,062
7	0,710 - 0,590	14	0,210 - 0,177	21	0,062 - 0,053

3.2.2 Caracterização física da fração areia

3.2.2.1 Fator f

Para expressar os resultados das análises de solo feitas em terra fina seca ao ar (TFSA) e para a terra fina seca em estufa a 105 °C (TFSE), determinou-se o fator f, conforme a metodologia da EMBRAPA (1997) apresentada a seguir:

- pesar aproximadamente 20 g de terra fina seca ao ar, com sensibilidade de 0,001 g, em recipiente previamente tarado com sensibilidade de 0,001 g;
- colocar a amostra em estufa a 105 °C, durante 24 h;
- após esse período, retirar a amostra e colocar em dessecador, para que a mesma atinja a temperatura ambiente;
- proceder à pesagem, com sensibilidade de 0,001 g; e
- calcular o fator f pela Equação (2).

$$f = \frac{M_{TFSA}}{M_{TFSE}} \dots\dots\dots(2)$$

3.2.2.2 Densidade aparente

Empregou-se o método da proveta, segundo metodologia da EMBRAPA (1997) descrita a seguir:

- pesar uma proveta de 100 mL, com sensibilidade de 0,1 g [$M_{(Proveta)}$];
- acrescentar à proveta aproximadamente 35 cm³ de TFSA, deixando cair de uma só vez, e, em seguida, compactar o solo por meio de dez batidas sucessivas do fundo da proveta em uma superfície de borracha de 5 mm de espessura, com altura de queda de aproximadamente 10 cm;
- repetir esta operação por mais duas vezes, até que o nível da amostra fique nivelado com o traço do aferimento da proveta, correspondente a 100 mL;

- pesar a proveta com a amostra com sensibilidade de 0,1 g [$M_{(TFSA+Proveta)}$]; e
- calcular a densidade aparente pela Equação 3, com as seguintes definições:

$$D_S = \frac{(M_{(TFSA+Proveta)} - M_{(Proveta)}) \cdot \frac{1}{f}}{V_{(Proveta)}} \dots\dots\dots(3)$$

- D_S = densidade aparente [ML^{-3}];
- $M_{(TFSA+Proveta)}$ = massa de terra fina seca ao ar mais a massa da proveta [M];
- $M_{(Proveta)}$ = massa da proveta [M];
- $V_{(Proveta)}$ = volume da proveta [L^3]; e
- f = fator de correção dos resultados de análises do solo feitas em TFSA em TFSE a 105 °C [MM^{-1}].

3.2.2.3 Densidade de partículas

A determinação da Densidade de Partículas (D_P) dos solos foi realizada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997), tendo o álcool etílico como líquido penetrante, de acordo com o seguinte procedimento:

- pesar, aproximadamente, 20 g TFSA, com sensibilidade de 0,01 g (M_S), transferindo-a para um recipiente de alumínio de massa conhecida;
- transferir a amostra para o balão volumétrico aferido de 50 ml, com sensibilidade de 0,05 mL;
- adicionar álcool etílico, agitando cuidadosamente para se eliminação das bolhas de ar que ocupam o sistema poroso;
- prosseguir com a operação, vagarosamente, até a ausência de bolhas e completar o volume do balão (V_G);
- registrar o volume total de álcool gasto; e

- calcular a densidade de partículas a partir da Equação (4), com as seguintes definições:

$$D_p = \frac{M_s \cdot \frac{1}{f}}{V_B - V_G} \dots\dots\dots(4)$$

- D_p = densidade de partículas [ML⁻³];
- M_s = massa da amostra [M];
- V_B = volume do balão volumétrico [L³];
- V_G = volume de álcool etílico necessário para completar o balão volumétrico [L³]; e
- f = fator de correção dos resultados de análises do solo feitas em TFSA em TFSE a 105 °C [MM⁻¹].

3.2.2.4 Porosidade total

A porosidade total, foi calculada a partir das determinações de Densidade do Solo (D_s) e Densidade de Partículas (D_p), empregando-se a Equação 5 (EMBRAPA, 1997), com as seguintes definições:

$$P = 1 - \frac{D_s}{D_p} \dots\dots\dots(5)$$

- P = porosidade total [L³L⁻³];
- D_s = densidade do solo [ML⁻³]; e
- D_p = densidade de partículas [ML⁻³].

3.2.3 Caracterização morfométrica da fração areia

3.2.3.1 Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia

Os estudos foram realizados a partir da comparação dos resultados obtidos com o emprego da metodologia de Dalla Riva (2010) e

com o uso de um equipamento denominado Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia, que foi especialmente desenvolvido para esta pesquisa.

As frações areia limpa dos solos CP e JP foram fotografadas em câmera digital MDCE 5A com resolução de 1.3 Megapixels (1280 x 1024 dpi) acoplada ao microscópio ótico do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia, conforme apresentado na Figura 23.

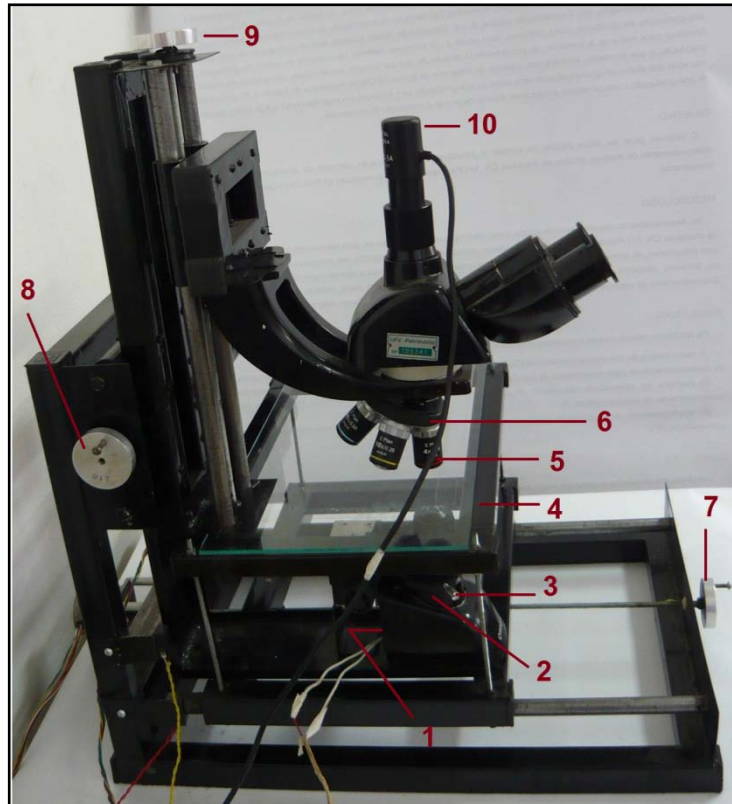


Figura 23: Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia (vista lateral esquerda).

Onde:

1. Fonte luminosa: uma lâmpada, com tensão de entrada 110V/ 220V;
2. Condensador: conjunto de duas lentes convergentes que orientam e espalham regularmente a luz emitida pela fonte luminosa;
3. Diafragma: regula a intensidade da luz;
4. Mesa mecânica: função semelhante à Platina do microscópio. A parte superior é constituída por vidro temperado com dimensões 200 x 320 mm;

5. Objetivas: 5x, 10x, 40x, e 100x. Amplia a imagem do objeto a ser observado, através do sistema de lentes que as compõem;
6. Revólver: peça giratória para 4 objetivas;
7. Engrenagem y: sua rotação é responsável por movimentos horizontais da mesa mecânica, na direção y;
8. Engrenagem x: sua rotação permite movimentos horizontais da parte ótica, na direção x;
9. Engrenagem z: sua rotação é responsável por movimentos verticais na estrutura que contem as Objetivas. É indispensável para fazer a focagem; e
10. Câmera digital MDCE 5A com resolução de 1.3 Megapixels.

Para o processamento das imagens, utilizou-se o programa Adobe® Photoshop® CS. Nas imagens obtidas, aplicou-se o filtro Limiar, para converter todos os valores de pixels da imagem para valores de preto e branco como exemplificado pelas figuras 24a e 24b.

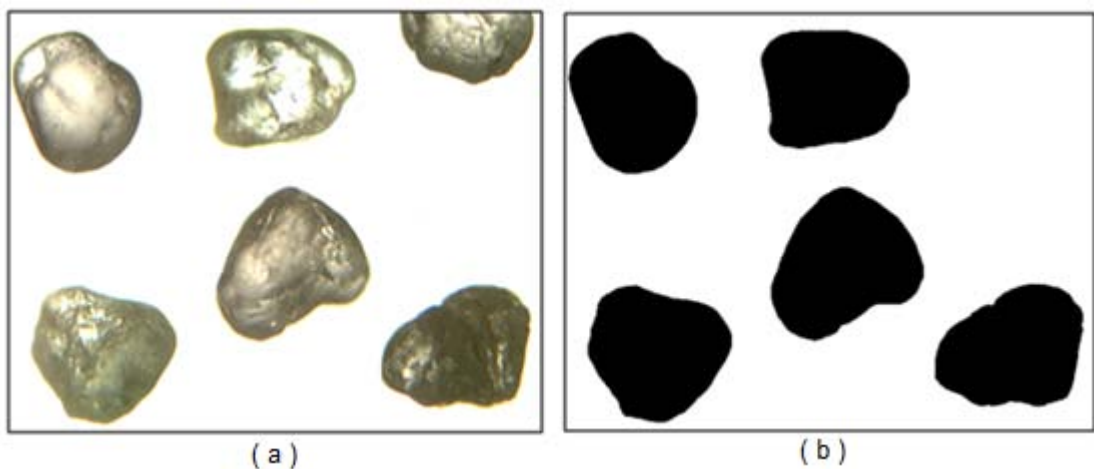


Figura 24: (a) Imagem adquirida com a câmera digital; (b) resultado da aplicação do comando Limiar do programa Adobe® Photoshop® CS.

Após processamento, foi feita a remoção das partículas que apresentavam contatos com outras e que haviam sofrido cortes, por estarem situadas nas bordas da imagem. As imagens foram calibradas com auxílio de uma barra micrométrica e do programa ImageJ.

Com as imagens processadas e calibradas, utilizou-se o programa QUANTIPORO (FERNANDES FILHO; VIANA, 2001) para a geração dos seguintes atributos morfométricos:

- área: as medidas de área correspondem ao número de pixels do polígono. A contagem é feita automaticamente pelo programa na barra de ferramentas (*Resultados*). As medidas de áreas são influenciadas pela resolução utilizada nos processos de digitalização. Se a imagem for calibrada, então a área será computada na unidade de calibração; caso contrário será em pixels;
- perímetro: as medidas de perímetro são efetuadas de forma análoga às de área, por contagem do número de pixels presente no contorno do objeto. Para fazer esta contagem utilizou-se um filtro específico, denominado *detector de bordas*. O perímetro é uma medida muito afetada pela resolução utilizada nos processos de digitalização. Se a imagem for calibrada, então o perímetro será computado na unidade de calibração; caso contrário será em pixels;
- arredondamento: o valor do resultado varia de 0 a 1. Quanto mais próximo o valor de 1, mais arredondado é o objeto. Se o valor for 1, o objeto é um círculo perfeito. Esse parâmetro também pode ser calculado através da Equação (6), com as seguintes definições:

$$Ar = \frac{4\pi A}{P^2} \dots\dots\dots(6)$$

- Ar = arredondamento [L^2L^{-2}];
 - A = área do objeto [L^2];
 - P = perímetro do objeto [L];
- maior eixo e menor eixo: o eixo maior e o eixo menor são, respectivamente, o comprimento da maior linha, em pixels, que pode ser traçada através do objeto e da menor linha, em pixels,

que pode ser traçada através da perpendicular ao maior eixo do objeto, como ilustrado na Figura 25;

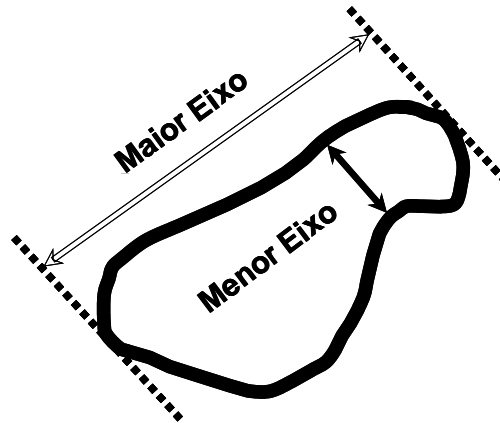


Figura 25: Esquema representativo dos eixos maior e menor.

Os atributos alongamento, diâmetro de Feret e compactidade foram calculados com o auxílio do processador de planilhas Microsoft® Office Excel 2007. As definições e expressões destes atributos são apresentadas a seguir:

- alongamento: é o quociente entre o menor eixo e o maior eixo. Seu valor está situado entre 0 e 1. Se o valor for igual a 1, o objeto é aproximadamente circular ou quadrado. Quando mais afastado o valor de 1, mais alongado é o objeto. Calcula-se este parâmetro através da Equação (7), com as seguintes definições:

$$Al = \frac{Me}{Ma} \dots\dots\dots(7)$$

- Al = alongamento [LL^{-1}];
 - Me = comprimento do menor eixo [L]; e
 - Ma = comprimento do maior eixo [L].
- diâmetro de Feret: consiste no diâmetro de um círculo que tem a mesma área do objeto, sendo calculado pela Equação (8);

$$DF = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \dots\dots\dots(8)$$

- DF = diâmetro de Feret [L]; e
- A = área [L²].
- compacidade: este parâmetro fornece a medida da circularidade do objeto. O resultado situa-se entre 0 e 1. Caso o valor seja igual a 1, o objeto é aproximadamente circular. Conforme o valor distanciar de 1, o objeto torna-se menos circular. Este parâmetro é calculado pela Equação (9), com as seguintes definições:

$$Co = \frac{\sqrt{\frac{4A}{\pi}}}{Ma} \dots\dots\dots(9)$$

- Co = compacidade [LL⁻¹];
- A = área [L²]; e
- Ma = maior eixo [L].

3.2.4 Empacotamentos binários

Na preparação dos corpos de prova das misturas binárias do solo artificial, empregaram-se as partículas de maior diâmetro (D) da fração areia limpa do solo CP e aquelas de menor diâmetro (d) da fração areia limpa do solo JP.

Os empacotamentos foram realizados conforme metodologia estabelecida por Dalla Riva (2010), mas empregando-se um vibrador de peneiras, apresentado na Figura 26, com as seguintes características: (i) vibrador eletromagnético com frequência constante a 3600 rpm; (ii) controle da intensidade das vibrações e (iii) timer eletromecânico de 60 minutos.

As misturas binárias foram produzidas na base de volume real (WESTMAN; HUGILL, 1930), definido como a relação entre a massa da partícula e a sua densidade. A composição das misturas foi realizada em termos percentuais de volume real, variando-se os percentuais de 0 a 100%, com incremento de 10% das partículas de maior diâmetro, e de 100 a 0%, com variação de 10%, para as partículas de menor diâmetro.



Figura 26: Vibrador de peneiras utilizado para empacotamento das partículas.

O procedimento consistiu na deposição inicial das partículas de maior diâmetro em quantidades aproximadas de 50 mL, colocadas no aparato de acrílico com auxílio de um funil, para evitar que as partículas caíssem de uma única vez e perturbassem o ajuste anteriormente efetuado. Com o auxílio do vibrador de peneiras, foram produzidas vibrações de frequência (3600 rpm) e intensidade (reostato na posição 2) controlada, de modo a permitir que as partículas pudessem vibrar em torno de seu eixo e se ajustassem, sem ocorrência de deslocamentos que produzissem aumentos do volume total, atingindo-se a configuração mais densa possível (menor volume) dentro do molde de compactação. Esse procedimento foi repetido, até que a totalidade das partículas de maior diâmetro fossem depositadas no aparato de acrílico. Na sequência, as partículas de menor diâmetro foram introduzidas no aparato de acrílico, conforme descrito anteriormente, possibilitando que estas pudessem migrar entre os caminhos porosos formados pela matriz das partículas de maior diâmetro, até que fosse atingida a maior profundidade possível dentro do molde de

compactação e, conseqüentemente, a configuração mais densa possível nos empacotamentos binários.

Na Tabela 7, têm-se as classes utilizadas nos empacotamentos binários, para o estudo da densidade de empacotamento, com a apresentação dos seus respectivos pontos médios e relações entre o diâmetro maior (D) e o diâmetro menor (d).

Tabela 7: Razões D/d utilizadas em empacotamentos binários do solo AR e para as EV

Razão (D/d)	Classes utilizadas - (Ponto médio)	
	D (mm)	d (mm)
3,4	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,590 - 0,500 - (0,545)
4,0	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,500 - 0,420 - (0,460)
5,7	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,350 - 0,297 - (0,324)
6,7	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,297 - 0,250 - (0,274)
8,0	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,250 - 0,210 - (0,230)
9,5	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,210 - 0,177 - (0,194)
11,3	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,177 - 0,149 - (0,163)
13,4	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,149 - 0,125 - (0,137)
16,0	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,125 - 0,105 - (0,115)

3.2.5 Condutividade hidráulica

Nestas determinações, os corpos de prova de empacotamentos binários do solo AR foram preparadas em cilindros de acrílico com 5 cm de altura e 6 cm de diâmetro interno e submetidos a ensaios de permeabilidade, com nove repetições para cada razão (D/d).

As classes utilizadas nos empacotamentos binários do solo AR para o estudo da sua condutividade hidráulica, com os respectivos pontos médios e relações D/d empregadas, estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Razões D/d utilizadas em ensaios de condutividade hidráulica do solo AR

Razão (D/d)	Classes utilizadas do solo AR - (Ponto médio)	
	D (mm)	d (mm)
3.4	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,590 - 0,500 - (0,545)
4.0	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,500 - 0,420 - (0,460)
4.8	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,420 - 0,350 - (0,545)
5,7	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,350 - 0,297 - (0,324)
6,7	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,297 - 0,250 - (0,274)
8,0	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,250 - 0,210 - (0,230)
9,5	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,210 - 0,177 - (0,194)
11,3	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,177 - 0,149 - (0,163)
13,4	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,149 - 0,125 - (0,137)
16.0	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,125 - 0,105 - (0,115)
19.1	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,105 - 0,088 - (0,097)

Para a realização dos trabalhos, empregou-se o sistema implementado por Dalla Riva (2010), trabalhando-se com ensaios de carga constante, conforme ilustrado na Figura 27a. Os permeâmetros (Figura 27b) deste sistema possuem as seguintes características: (i) duas tampas com canalículos, com a função de distribuir uniformemente o fluxo, e um tubo de acrílico, para a formação do corpo de prova; (ii) dispositivo na tampa superior que permite a retirada do excesso de ar; (iii) alimentação a partir da parte inferior do sistema, com a água emergindo na parte superior, em uma proveta graduada (em cm) onde se realiza a leitura de nível de água; e (iv) vedação por intermédio de anéis O-ring. As interfases (Figura 27c) são compostas por: (i) duas tampas; (ii) um tubo de acrílico; e (iii) dispositivo que permite despressurizar o reservatório, em casos de necessidade. A alimentação da célula é feita pela parte superior e as vedações se dão por meio de anéis O-ring. Na parte inferior, encontra-se o ponto de saída do líquido, que caminha pelo tubo em direção ao permeâmetro.

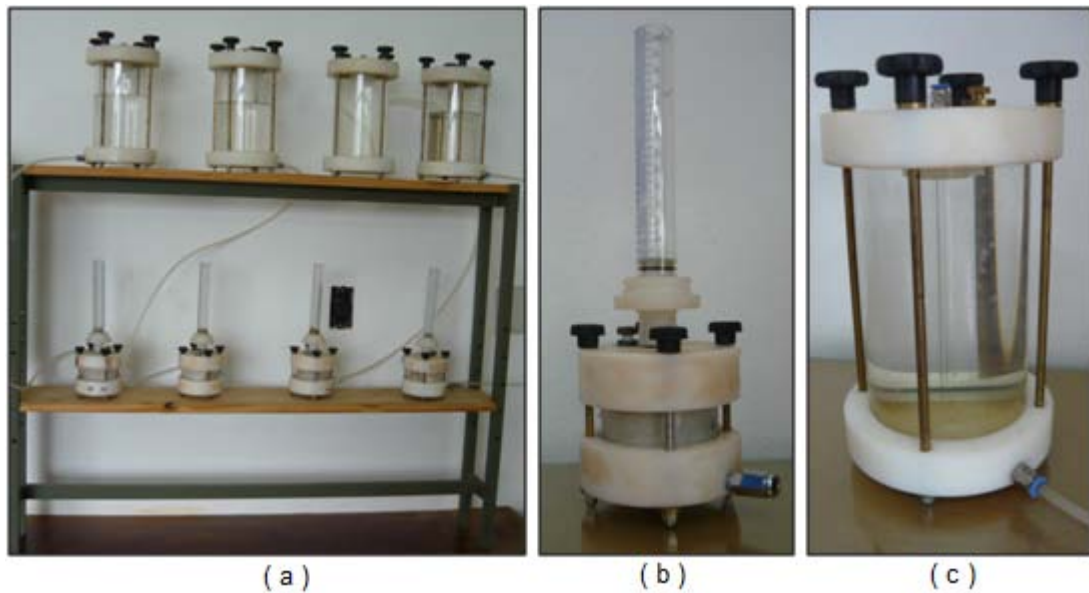


Figura 27: Sistema implementado por Dalla Riva (2010): (a) vista parcial do conjunto de permeômetros; (b) detalhe do permeômetro com a amostra; e (c) detalhe da interface.

Os seguintes procedimentos foram adotados para a realização dos ensaios:

- verificação do tempo gasto na percolação das amostras, por meio de leituras efetivadas, em triplicata, em seis distâncias pré-definidas na proveta graduada (em cm); e
- cálculo do coeficiente de condutividade hidráulica ou de permeabilidade (k) pela equação de Darcy (HEAD, 1982), Equação 10.

$$k = \frac{QL}{Aht} \dots\dots\dots(10)$$

- k = coeficiente de condutividade hidráulica [LT^{-1}];
- Q = quantidade de água que passa em uma distância pré-definida na proveta graduada [L^3];
- L = altura do corpo de prova [L];
- A = área da secção transversal do corpo de prova [L^2];
- h = carga hidráulica [L]; e

- t = tempo gasto para a água percorrer uma distância pré-definida na proveta graduada [T].

3.2.6 Resistência à penetração

Os corpos de prova foram preparados em um sistema constituído por uma base e dois cilindros, ambos em acrílico, com 10 cm de altura e 6 cm de diâmetro interno, conforme ilustrado na Figura 28a. Atendo-se à recomendação de Dalla Riva (2010), a avaliação da resistência de ponta foi realizada até à profundidade de 6 cm, devido ao fato de que a partir desta profundidade se verifica interferência pronunciada do efeito da borda inferior nesta medida.

Resistências de ponta foram determinadas nos corpos-de-prova, empregando-se um sistema baseado no cone penetrométrico quase-estático desenvolvido e implementado por Dalla Riva (2010), como mostrado na figura 28b. Trabalhou-se com seis repetições para cada razão (D/d).



Figura 28: (a) Corpo de prova utilizada para ensaios de resistência de cone penetrométrico; e (b) sistema de cone penetrométrico quase-estático.

A razão da escolha desse equipamento e da técnica de ensaio para a caracterização mecânica dos materiais em estudo se justifica pela simplicidade, precisão e capacidade de detectar pequenas variações de

resistência mecânica que venham a ocorrer. Para a realização dos ensaios, foram adotados os seguintes procedimentos:

- determinação da curva de calibração da(s) célula(s) de carga com pesos aferidos;
- calibração da velocidade de deslocamento da haste para que a mesma situe-se entre 15 ± 5 mm/min;
- calculo da tensão pela Equação (11), com as seguintes definições:

$$R_p = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(11)$$

- R_p = resistência de ponta [$L^{-1}MT^{-2}$];
- F = resistência à penetração [LMT^{-2}]; e
- A = área da base do cone penetrométrico [L^2].

Informa-se que na Tabela 9, se encontram as classes utilizadas nos empacotamentos binários do solo AR, com os seus respectivos pontos médios e relações D/d empregadas, para avaliação da resistência à penetração com o cone penetrométrico quase-estático.

Tabela 9: Razões D/d utilizadas em ensaios de resistência à penetração do solo AR

Razão (D/d)	Classes utilizadas do solo AR - (Ponto médio)	
	D (mm)	d (mm)
5,7	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,350 - 0,297 - (0,324)
6,7	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,297 - 0,250 - (0,274)
8,0	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,250 - 0,210 - (0,230)
9,5	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,210 - 0,177 - (0,194)
11,3	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,177 - 0,149 - (0,163)
13,4	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,149 - 0,125 - (0,137)

3.2.7 Agente de cimentação

Para estudar a influência da cal hidratada nos sistemas de empacotamentos binários e caracterizar a resistência mecânica e a condutividade hidráulica das frações areia limpa do solo AR sob a ação deste agente de cimentação, medida respectivamente via ensaios de penetração dinâmica e ensaios de permeabilidade, foram utilizados empacotamentos binários nas seguintes razões (D/d): 5,7; 6,7; 8,0; 9,5; 11,3; e 13,4. Os empacotamentos binários foram realizados em cilindro de acrílico com 5 cm de altura e 6 cm de diâmetro interno, tendo em sua base papel filtro, como apresentado na figura 29a.

Adotou-se um teor de cal hidratada de 2% em relação à massa de solo seco, com o intuito de se produzir sistemas de cimentação que se inserem no que o DNIT (2006) define como solos melhorados com cal. A adição da cal hidratada às amostras se deu com o auxílio do vibrador de peneiras, sendo depositada em pequenas quantidades para que esta pudesse migrar entre os vazios existentes e atingir a maior profundidade possível dentro do cilindro. A deposição foi interrompida quando a cal hidratada atingiu o nível superior do cilindro; assim, foi possível preencher os vazios existentes nas amostras. Após a adição da cal hidratada, os corpos de prova foram saturados por capilaridade, pelo período de 24 h. Para acelerar o processo de cimentação, os corpos de prova saturados foram colocadas em uma câmara hermeticamente fechada, com 14 cm de altura e 30 cm de diâmetro interno (Figura 29b), que foi em seguida submetida a vácuo, seguido de enriquecimento com CO₂ na pressão de 100 kPa, durante 7 dias. Decorrido esse tempo, os corpos de prova foram colocados em estufa a 105 °C, pelo período de 24 h.

Posteriormente à adição do agente de cimentação aos corpos de prova, estes foram submetidos aos ensaios de condutividade hidráulica e de resistência à penetração com o emprego do sistema penetrométrico descrito no subitem 3.2.6.

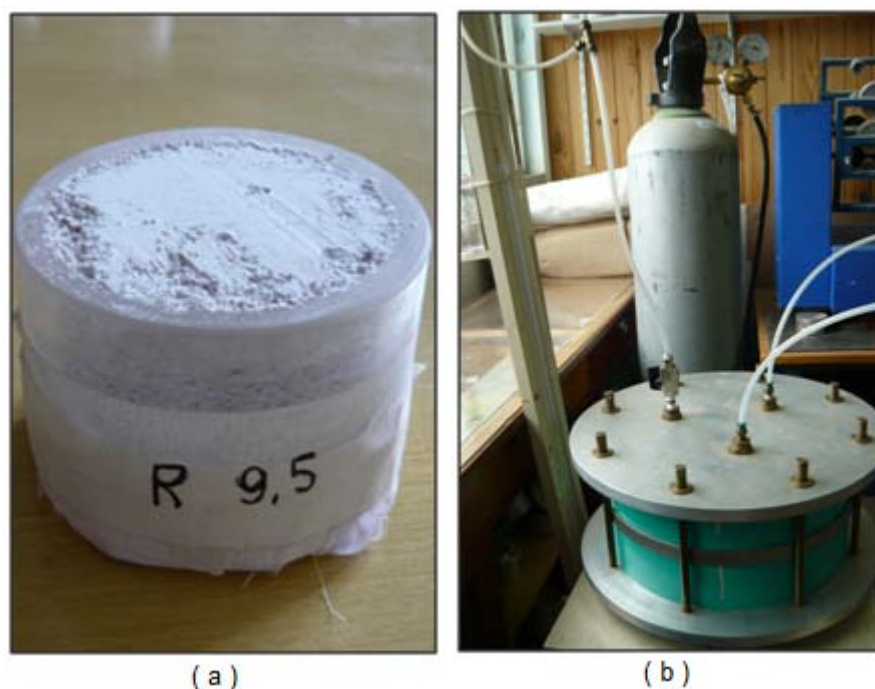


Figura 29: Processo de adição de cal aos corpos de prova: (a) adição de cal ao corpo de prova; e (b) câmara de enriquecimento com CO_2 , hermeticamente fechada.

Na Tabela 10, se encontram as classes utilizadas nos empacotamentos binários do solo AR sob ação da cal hidratada, com os respectivos pontos médios e relações D/d, empregadas para ensaios de condutividade hidráulica e para avaliação da resistência à penetração com o cone penetrométrico quase-estático.

Tabela 10: Razões D/d utilizadas em ensaios de condutividade hidráulica e resistência a penetração do solo AR sob a ação da cal hidratada

Razão (D/d)	Classes utilizadas do solo AR - (Ponto médio)	
	D (mm)	d (mm)
5,7	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,350 - 0,297 - (0,324)
6,7	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,297 - 0,250 - (0,274)
8,0	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,250 - 0,210 - (0,230)
9,5	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,210 - 0,177 - (0,194)
11,3	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,177 - 0,149 - (0,163)
13,4	2,000 - 1,680 - (1,840)	0,149 - 0,125 - (0,137)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentam-se os resultados experimentais e suas respectivas análises, envolvendo os itens: (i) caracterização morfométrica da fração areia; (ii) empacotamentos binários do solo AR e das esferas de vidro; (iii) condutividade hidráulica do solo AR sem e com a adição de cal hidratada; (iv) resistência à penetração do solo AR sem e com a adição de cal hidratada; (v) comparação dos resultados de ensaios de empacotamentos binários, resistência à penetração e condutividade hidráulica do solo CP obtidos por Dalla Riva (2010) e aqueles determinados na presente pesquisa para o solo AR, a fim de se verificar a influência das propriedades morfológicas no processo em estudo. É importante ressaltar que embora o vibrador de peneiras empregado nesta pesquisa gere resultados semelhantes ao empacotador de partículas utilizado por Dalla Riva (2010), no presente caso, o tempo necessário para a produção dos corpos de prova ensaiados foi consideravelmente superior.

Na Tabela 11, tem-se a notação utilizada para designar as partículas no presente trabalho.

Tabela 11: Notação utilizada para a designação das partículas

Item	Descrição
EV	Esferas de vidro
CP	Fração areia limpa do solo denominado Cachoeira da Prata
JP	Fração areia limpa do solo denominado João Pinheiro
AR	Solo Artificial – composto pelas frações areia limpa dos solos CP e JP

4.1 Caracterização morfométrica da fração areia limpa

Neste estudo, trabalhou-se com doze classes para cada um dos solos analisados, cujas frações areia limpa são compostas por quartzo. Na obtenção dos índices morfométricos de arredondamento, alongamento e compacidade foram utilizadas, no mínimo, duzentas partículas em cada uma das classes, conforme procedimento adotado por Dalla Riva (2010).

A Tabela 12 expõe as diferentes classes consideradas, onde o primeiro número da classe representa a peneira onde as partículas passam e o segundo a peneira onde as partículas ficam retidas. As curvas granulométricas dos solos CP, JP e AR estão apresentados na Figura 30.

Tabela 12: Classes utilizadas para a determinação dos índices morfométricos arredondamento, alongamento e compacidade

Representação	Classe (mm)	Representação	Classe (mm)
1	0,177 - 0,149	7	0,500 - 0,420
2	0,210 - 0,177	8	0,590 - 0,500
3	0,250 - 0,210	9	0,710 - 0,590
4	0,297 - 0,250	10	0,840 - 0,710
5	0,350 - 0,297	11	1,000 - 0,840
6	0,420 - 0,350	12	1,190 - 1,000

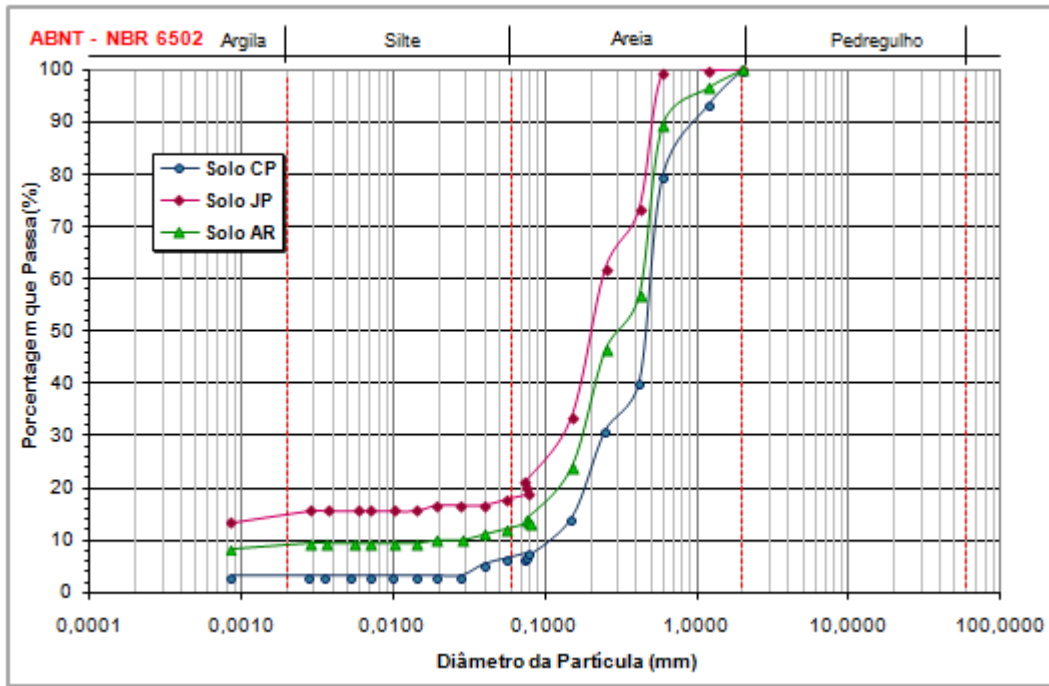


Figura 30: Curvas granulométricas dos solos CP, JP e AR.

Para fins de verificação do funcionamento do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia desenvolvido no presente trabalho, destaca-se que se compararam os resultados de parâmetros morfométricos obtidos nos solos JP e CP com a utilização do mesmo com aqueles determinados por Dalla Riva (2010) com o emprego de um procedimento tradicional. Essa comparação é apresentada no Capítulo 5.

Nas Figuras 31, 32, e 33, encontram-se, respectivamente, os resultados dos índices morfométricos arredondamento, compacidade e alongamento, para os solos em estudo.

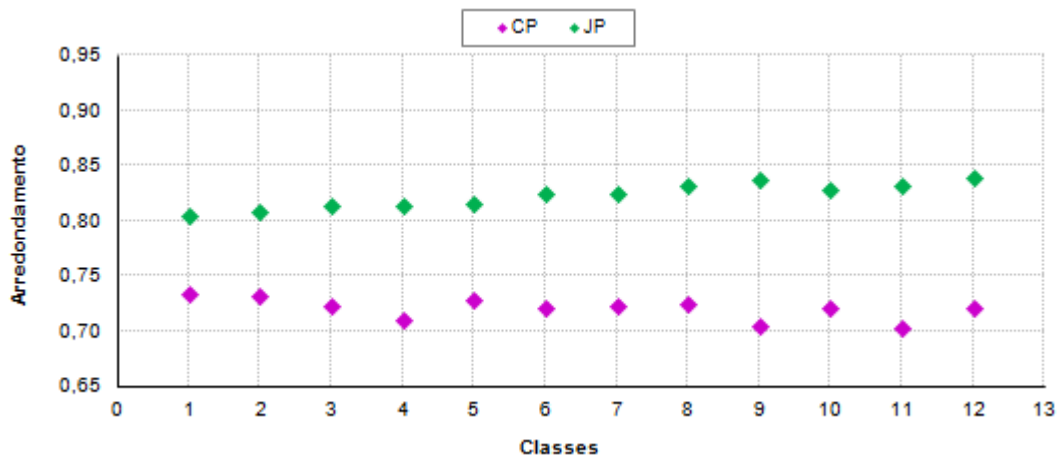


Figura 31: Índice morfométrico arredondamento em função das classes de tamanho.

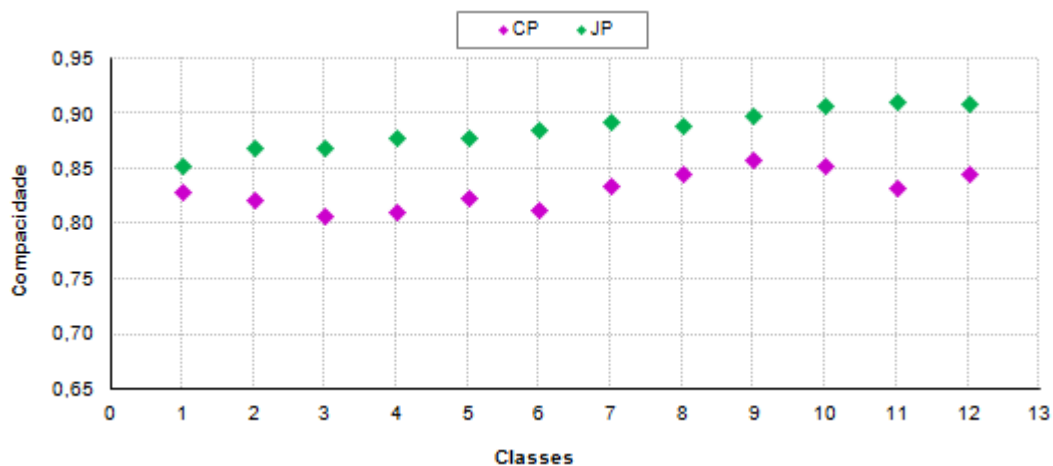


Figura 32: Índice morfométrico compacidade em função das classes de tamanho.

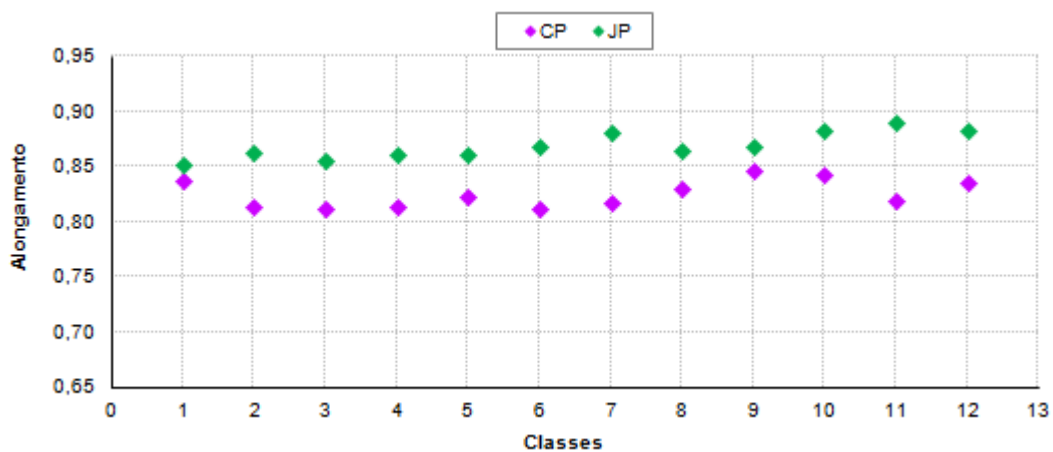


Figura 33: Índice morfométrico alongamento em função das classes de tamanho.

Na Figura 31 observa-se o índice morfométrico arredondamento, que expressa o grau de agudez ou curvatura dos cantos e arestas de uma partícula. Como era de se esperar, a fração areia limpa do solo JP têm um índice de arredondamento na faixa de 0,81 a 0,84, portanto, maior do que a da fração areia limpa do solo CP que está entre 0,70 e 0,73, o que evidencia a rugosidade relativamente baixa do primeiro.

Da análise da Figura 32, nota-se que o índice de compacidade, que reflete a circularidade do objeto, da fração areia limpa do solo JP situou-se entre 0,85 e 0,91, aproximando-se da forma circular. Já, na fração areia limpa do solo CP, o arredondamento variou de 0,81 a 0,86.

Refere-se que o índice morfométrico alongamento evidencia a semelhança entre o eixo maior e o eixo menor, sendo que quanto menor o seu valor, mais planificada será a partícula. Conforme ilustra a Figura 33, o índice de alongamento da fração areia limpa do solo CP variou de 0,81 a 0,85 e da fração areia limpa do solo JP se situou entre 0,85 e 0,89.

4.2 Empacotamentos binários

Nos solos granulares é comum a avaliação do parâmetro densidade, já que este interfere no comportamento mecânico e hidráulico desses materiais. Assim, no presente trabalho apresentam-se os resultados dos empacotamentos binários avaliando-se a densidade aparente obtida experimentalmente em função da composição das partículas.

As misturas binárias foram produzidas na base de volume real (WESTMAN; HUGILL, 1930), adotando-se a variação de 0 a 100%, com incremento de 10% das partículas de maior diâmetro, e de 100 a 0%, com variação de 10% para as partículas de menor diâmetro.

4.2.1 Esferas de vidro

Na Figura 34 apresentam-se as curvas de densidade aparente para empacotamentos binários para diferentes relações D/d para as EV, produzidas na base de volume real definido como a relação entre a massa da partícula e a sua densidade, observando-se a ocorrência de maiores densidades para relações da ordem de 30% de partículas de menor diâmetro.

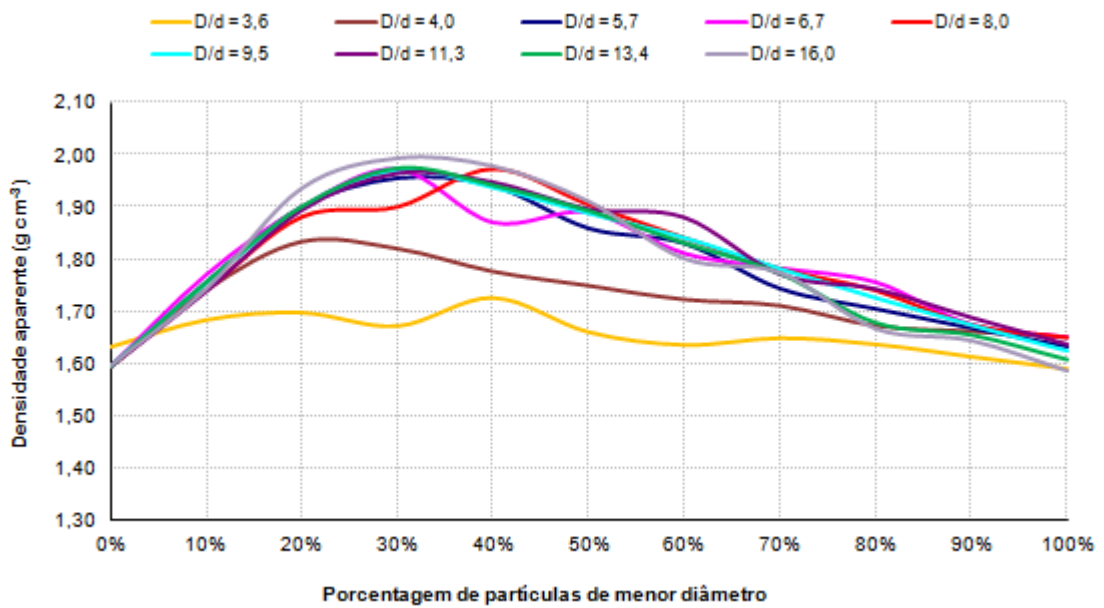


Figura 34: Curvas de empacotamentos binários de EV sob diferentes relações D/d.

Na Figura 35 tem-se a curva de densidade aparente máxima de empacotamento binário das EV, observando-se uma condição de máximo para relações D/d próximas a 6.

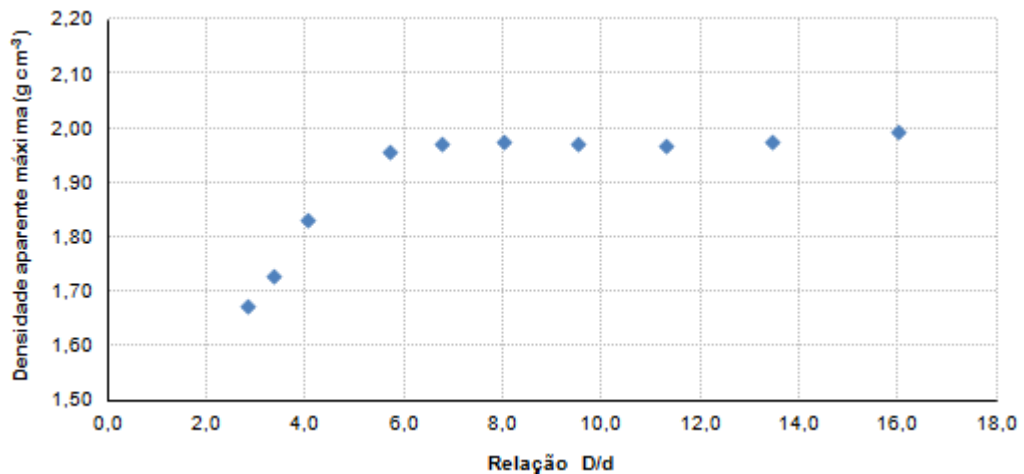


Figura 35: Curva de densidade aparente máxima de empacotamento binário das EV.

4.2.2 Solo artificial

A Figura 36 mostra as curvas de empacotamentos binários do solo AR, onde se relacionam as densidades aparentes obtidas em função da

proporção, em volume real, das partículas de menor diâmetro, para distintas razões D/d.

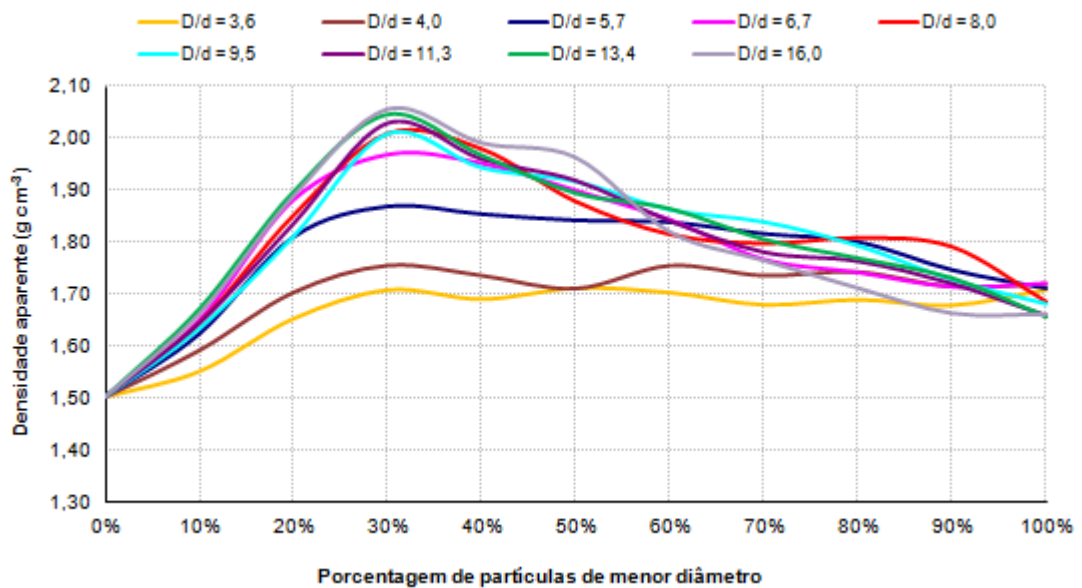


Figura 36: Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo AR.

A partir do gráfico mostrado na Figura 36, percebe-se que a densidade aparente máxima ocorreu em uma composição aproximada de 30% de partículas de menor diâmetro, sendo mais nitidamente observado nas razões maiores do que 5,7. Nas razões menores do que esse valor, o aumento na densidade aparente de empacotamento foi relativamente baixo, levando a concluir que caso a diferença entre os diâmetros das partículas envolvidas seja pequena, não há elevação significativa na densidade aparente de empacotamento.

Na Figura 37 têm-se as densidades aparentes máximas de empacotamento obtidas nas relações D/d consideradas no presente estudo.

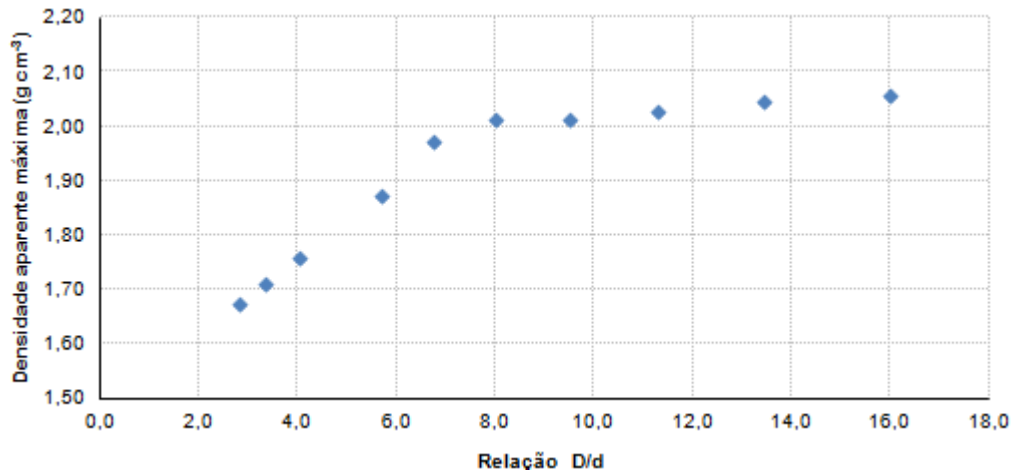


Figura 37: Curva de densidade aparente máxima de empacotamento binário do solo AR.

A análise dos resultados apresentados na Figura 37 permite inferir que houve uma maior eficiência no empacotamento quando a relação D/d se aproximou de 8. Abaixo desta razão, houve um decréscimo acentuado da densidade máxima, fato que pode ser explicado pela constatação de que nas relações D/d inferiores a 8 os diâmetros das partículas menores são superiores aos dos vazios existentes; logo, deslocam as partículas maiores de suas posições originais, provocando o surgimento de novos vazios, e, por consequência, diminuição da densidade máxima. Todavia, acima da relação (D/d) igual a 8 os grãos menores ainda podem migrar e se ajustar por intermédio dos caminhos porosos formados entre os grãos maiores, possibilitando crescimento na densidade aparente, mas com eficiência reduzida. Refere-se que os resultados apresentados na Figura 37 se aproximam daqueles obtidos para esferas de vidro ilustrados na Figura 35.

A partir dos resultados apresentados na Figura 37, foi possível ajustar as densidades aparentes máximas de empacotamento em função das relações D/d , utilizando-se o modelo hiperbólico apresentado na Equação (12). Os valores dos coeficientes a_1 e a_2 obtidos por regressão não linear foram, respectivamente, 0,442022 e 0,451769, utilizando-se o programa LAB Fit. A Figura 38 apresenta a curva ajustada pelo referido modelo hiperbólico e a curva de densidades aparentes máximas do solo AR sem ajuste, ilustrada na Figura 37, observando boa concordância entre os dados experimentais e o modelo.

$$Densidade = \frac{D/d}{a_1 + a_2 \cdot D/d} \dots\dots\dots(12)$$

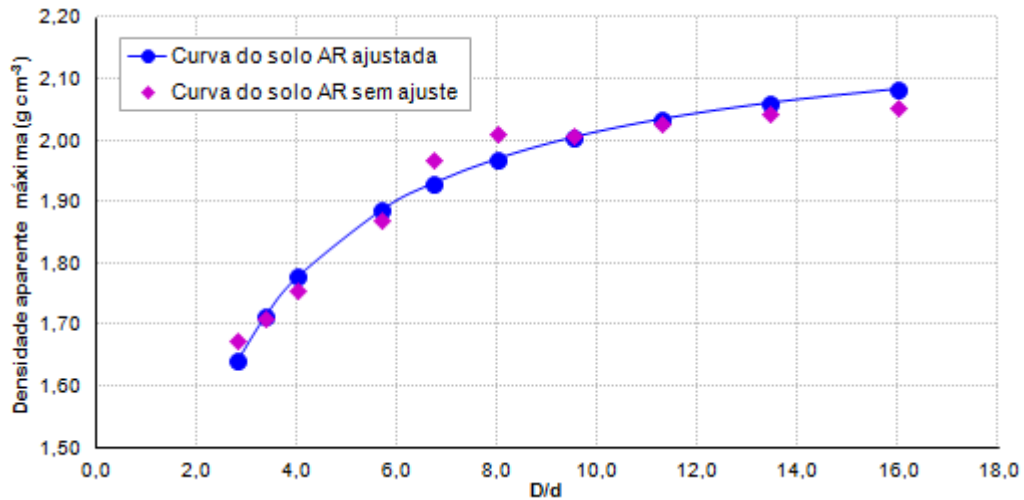


Figura 38: Curva de densidade aparente máxima de empacotamento binário do solo AR ajustadas pelo modelo hiperbólico.

4.2.3 Comparação com o solo Cachoeira da Prata (Dalla Riva, 2010)

Na Figura 39 apresenta-se a comparação dos resultados, sem ajuste, das densidades aparentes máximas de empacotamentos binários do solo CP obtidas por Dalla Riva (2010) e do solo AR empregado no presente estudo.

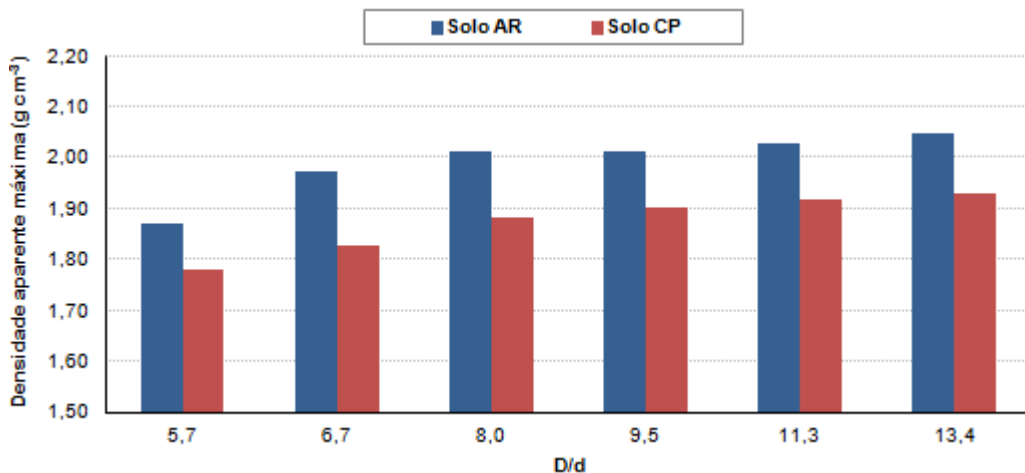


Figura 39: Comparação entre os valores das densidades aparentes máximas de empacotamentos binários do solo AR e do solo CP.

Na Figura 39, observa-se que os valores das densidades aparentes máximas de empacotamento binários do solo AR foram

superiores às do solo CP, para diferentes relações D/d. Atribui-se este comportamento ao fato das partículas do solo JP (grãos menores dos empacotamentos binários do solo AR) serem mais arredondadas e com menos rugosidade, possibilitando que pudessem se deslocar e se arranjar com relativa facilidade, entre as partículas maiores do solo CP (grãos maiores dos empacotamentos binários do solo AR), proporcionando aumento significativo na densidade aparente, inclusive se aproximando do comportamento das esferas de vidro.

4.3 Condutividade hidráulica

4.3.1 Condutividade hidráulica do solo artificial

Na determinação da condutividade hidráulica (k) do solo AR, trabalhou-se com permeâmetros de carga constante, sendo que os coeficientes de condutividade hidráulica ou permeabilidade foram calculados pela equação de Darcy, com posterior ajuste para a temperatura de 20 °C (k_{20}).

Na Figura 40 apresentam-se os coeficientes de condutividade hidráulica obtidos em função das relações D/d.

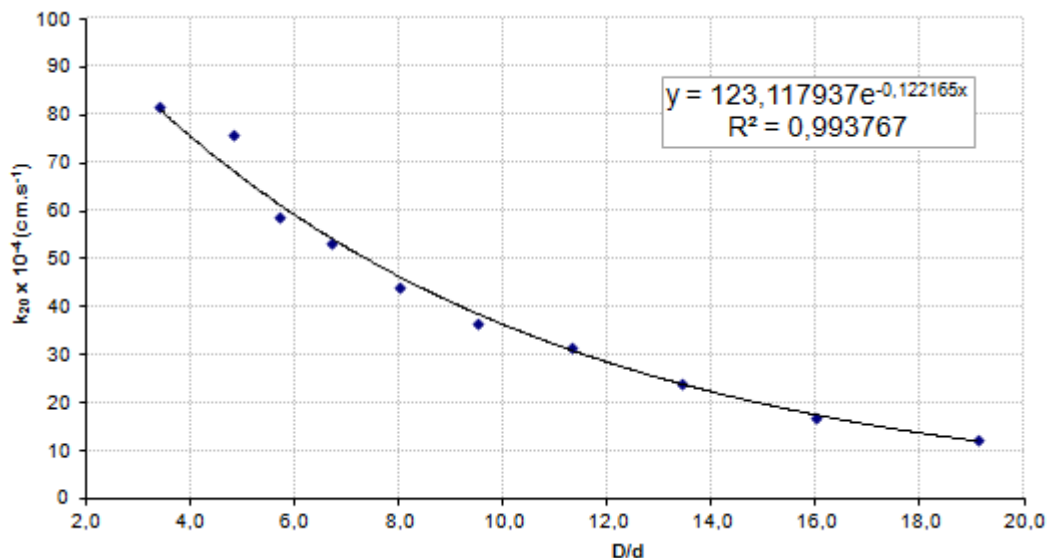


Figura 40: Curva dos coeficientes de condutividade hidráulica do sistema binário do solo AR.

Na Figura 40, observa-se que o aumento da relação D/d produziu decréscimo na condutividade hidráulica dos empacotamentos binários. À medida que se aumentou a razão D/d, a densidade do sistema tornou-se maior, implicando em índice de vazio menor e, por consequência, diminuição na condutividade hidráulica. Além disso, quanto maior a relação D/d, menor é o diâmetro médio das partículas menores (d) e, portanto, maior é a quantidade destas no empacotamento, o que eleva a área superficial do sistema, ocasionando maior resistência ao fluxo.

4.3.2 Comparação com o solo Cachoeira da Prata (Dalla Riva, 2010)

A Tabela 13 mostra a comparação entre os coeficientes de condutividade hidráulica, para diferentes razões, dos empacotamentos binários dos solos AR obtidos no presente trabalho e aqueles determinados por Dalla Riva (2010) para o solo CP.

Tabela 13: Comparação entre os coeficientes de condutividade hidráulica dos solos AR e CP

Razão (D/d)	Solo CP	Solo AR	Variação Percentual
	k ₂₀ x 10 ⁻⁴ (cm.s ⁻¹)		
5,7	100,67	58,80	41,59 (-)
6,7	91,28	53,51	41,37 (-)
8,0	80,07	44,30	44,68 (-)
9,5	56,68	36,48	35,64 (-)
11,3	43,06	31,71	26,36 (-)
13,4	28,55	24,29	14,92 (-)

Considerando os dados apresentados na Tabela 13, nota-se que os empacotamentos binários do solo em estudo, para todas as relações (D/d), apresentaram menores valores para o coeficiente de condutividade hidráulica em comparação com os resultados de empacotamentos binários do solo CP obtidos por Dalla Riva (2010).

Nota-se que nos empacotamentos binários do solo AR a morfologia das partículas presentes conciliou alguns dos mecanismos de

percolação de água. Assim, tem-se que os grãos de diâmetro menor (d), devido ao maior grau de arredondamento e menor rugosidade, se arranjaram melhor, proporcionando com isso aumento na densidade de empacotamento e redução no índice de vazios e, por consequência, diminuição do fluxo de água. Em equivalência, a maior rugosidade e irregularidade presente nos grãos maiores (D) elevaram a área superficial do sistema, dificultando a percolação de água. Já nos empacotamentos binários do solo CP, a irregularidade dos grãos elevou a área superficial do sistema, sendo que em contrapartida, a angulosidade das mesmas ocasionou maior porosidade no interior do empacotamento.

4.3.3 Condutividade hidráulica do solo artificial sob a ação da cal hidratada

Para verificar a possível redução no coeficiente de condutividade hidráulica em sistemas empacotados sob a ação de agente de cimentação, foram realizados empacotamentos binários nas razões (D/d); 5,7; 6,7; 8,0; 9,5; 11,3 e 13,4, considerando-se resultados obtidos anteriormente. Tais sistemas foram submetidos à cimentação com cal hidratada, sendo os resultados apresentados na Figura 41. O teor de cal hidratada utilizado nos empacotamentos binários foi de 2% em relação à massa de solo seco.

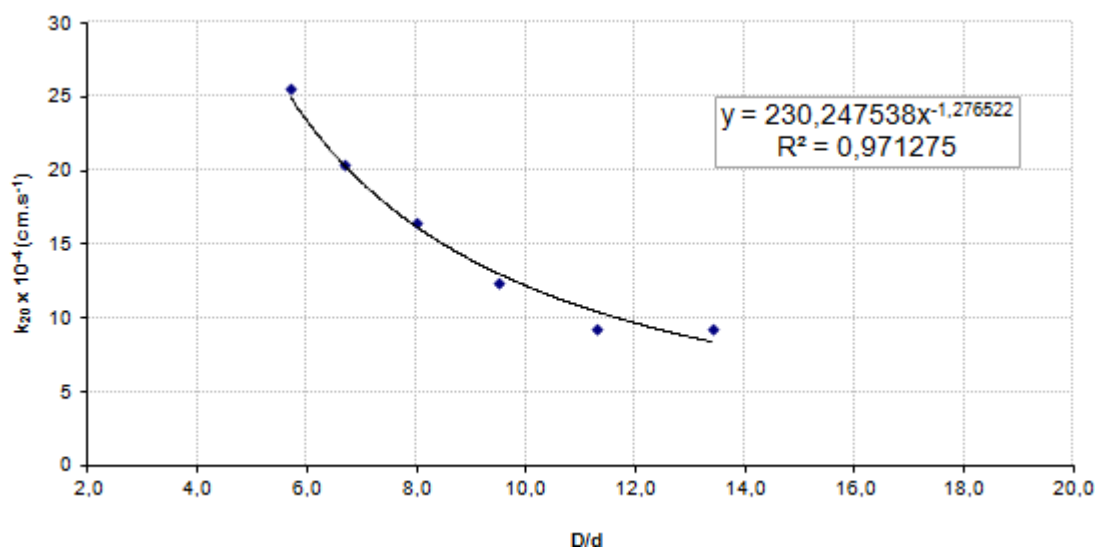


Figura 41: Curva dos coeficientes de condutividade hidráulica do sistema binário do solo AR sob a ação da cal hidratada.

Da análise da Figura 14, nota-se que, os empacotamentos binários sob a ação da cal hidratada, também, apresentaram redução no coeficiente de condutividade hidráulica com o aumento da relação D/d. Observa-se, também, que a curva de condutividade hidráulica do solo AR sob a ação da cal hidratada a partir da razão (D/d) igual a 11,3 tendeu a se estabilizar. Isso se deve, provavelmente, ao fato dos empacotamentos binários nas relações (D/d) maiores que 11,3 possuírem poros com tamanhos muito pequenos, o que dificulta as partículas da cal hidratada migrarem entre os caminhos porosos formados pela matriz dos grãos de areia e distribuírem-se homogeneamente nestes corpos de prova.

A Tabela 14 sintetiza a comparação entre os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica apresentados na Figura 41 e aqueles ilustrados na Figura 40 para os empacotamentos binários sem cimentação.

Tabela 14: Comparação entre os coeficientes de condutividade hidráulica do solo AR sem a adição de cal hidratada e após a adição da mesma

Razão (D/d)	Sem cal hidratada	Após cimentação com cal hidratada	Variação Percentual
	----- $k_{20} \times 10^{-4} \text{ (cm.s}^{-1}\text{)}$		
5,7	58,80	25,58	56,50 (-)
6,7	53,51	20,42	61,84 (-)
8,0	44,30	16,46	62,84 (-)
9,5	36,48	12,47	65,84 (-)
11,3	31,71	9,36	70,48 (-)
13,4	24,29	9,30	61,71 (-)

Comparando os resultados apresentados na Tabela 14, verificou-se que, os sistemas binários sob a ação da cal hidratada levaram a menores valores para os coeficientes de condutividade hidráulica, sendo que estas reduções variaram de 56,50% a 70,48%. A diminuição do fluxo de água deve-se ao fato das partículas finas da cal hidratada reduzirem o índice de vazios e realizarem ligações de cimentação entre partículas nos empacotamentos binários, para todas as relações D/d estudadas.

4.4 Resistência à penetração determinada com o cone penetrométrico quase-estático

4.4.1 Resistência à penetração do solo artificial

Na Figura 42 tem-se as curvas de resistência à penetração de ponta determinadas nos sistemas binários das frações areia do solo AR, em função da profundidade, para diferentes relações D/d, e ajustadas pelo modelo hiperbólico expresso pela Equação (13). Na Tabela 15 apresentam-se os valores dos coeficientes a_1 e a_2 obtidos por regressão não linear, utilizando-se o software LAB Fit.

$$R_p = \frac{a_1 \cdot h}{1 - a_2 \cdot h} \dots\dots\dots(13).$$

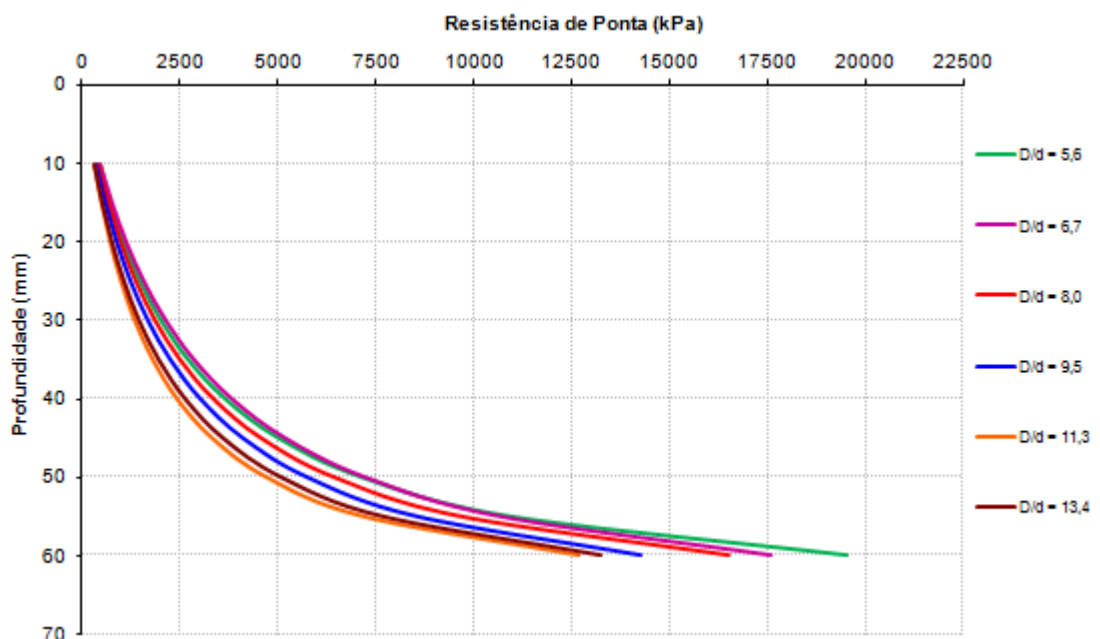


Figura 42: Curvas de resistência de ponta do solo AR ajustadas pelo modelo hiperbólico.

Tabela 15: Coeficientes a_1 e a_2 obtidos por regressão não linear

D/d	a_1	a_2
5,7	37,602515	0,014760
6,7	40,775910	0,014345
8,0	34,993360	0,014545
9,5	32,103920	0,014425
11,3	24,764435	0,014713
13,4	27,493360	0,014600

A partir dos dados apresentados na Figura 42, observa-se que ocorreu um aumento da resistência à penetração com o aumento da profundidade e com o decréscimo na relação D/d. Conforme discutido por Dalla Riva (2010), à medida que aumenta a quantidade de finos nos empacotamentos binários ($> D/d$), há uma redução na resistência de ponta devido à possibilidade de deslocamento destes grãos menores dentro dos interstícios formados pela matriz das partículas de maior diâmetro, quando solicitados por forças externas. Por outro lado, quanto menor é a relação D/d, maior é o entrosamento das partículas, resultando em maiores valores de resistência de ponta.

4.4.2 Comparação com o solo Cachoeira da Prata (Dalla Riva, 2010)

A Figura 43 exibe a comparação entre os valores de resistência de ponta dos empacotamentos binários dos solos CP obtidos por Dalla Riva (2010) e AR do presente trabalho, para diferentes relações (D/d).

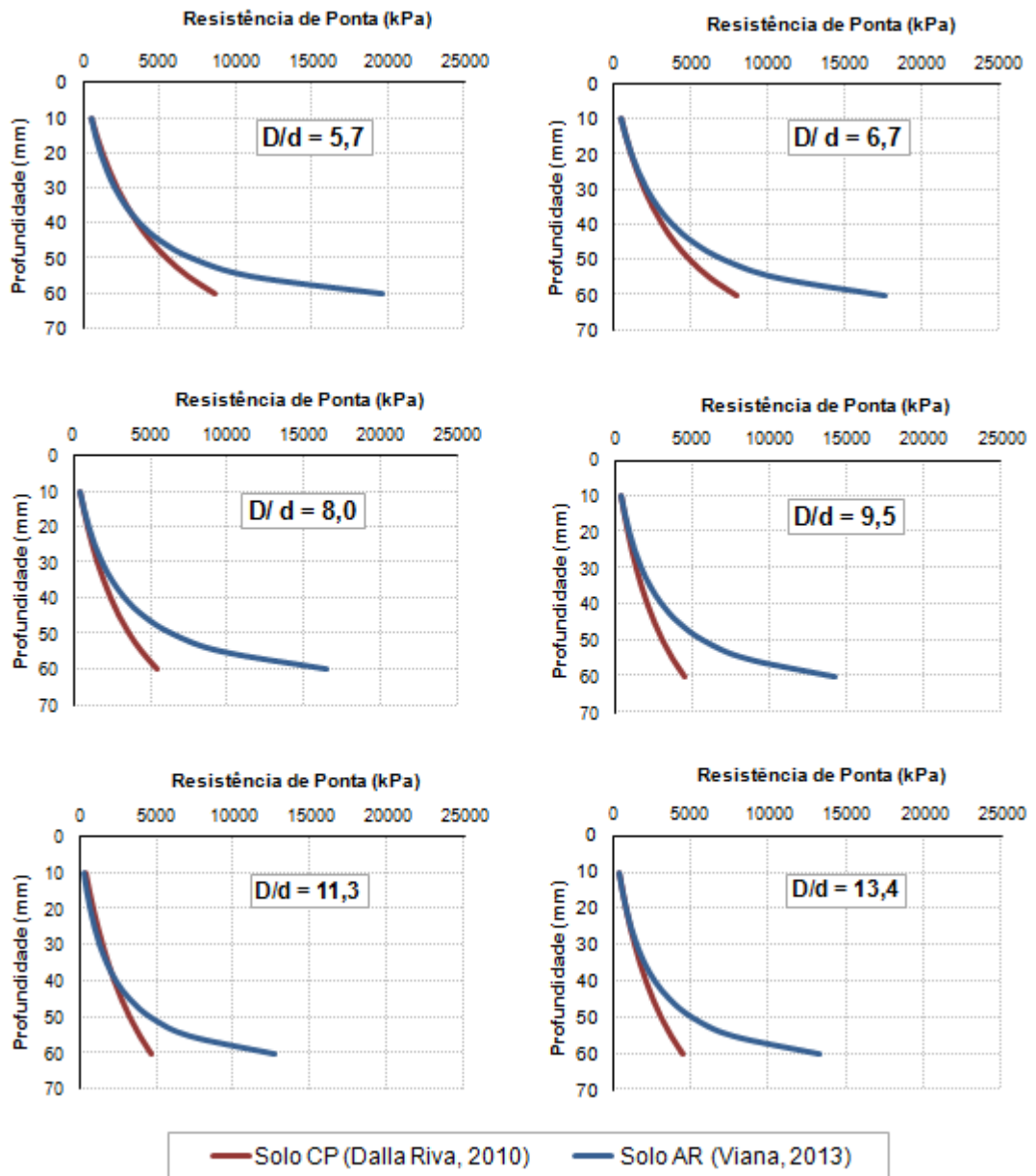


Figura 43: Comparação entre a resistência de ponta do solo AR e do solo CP.

Com base nos dados apresentados na Figura 43, observa-se que os empacotamentos binários do solo AR, para as distintas relações D/d, apresentaram maiores valores de resistência à penetração de ponta em comparação com os resultados obtidos por Dalla Riva (2010) para os empacotamentos binários do solo CP. Pode-se associar esse comportamento às constatações anteriormente apresentadas relativas à maior compacidade alcançada nos empacotamentos binários do solo AR.

Destaca-se que embora as partículas menores, mais arredondadas e menos rugosas do solo AR estejam mais propensas aos

processos de deslizamento e rolamento, o que poderia facilitar a passagem do cone penetrométrico por entre elas, as mesmas se encontram dentro dos interstícios formados pela matriz das partículas maiores (D), angulares e mais rugosas, o que dificulta a ocorrência de movimentos relativos entre elas e resulta no aumento da resistência dos sistemas binários.

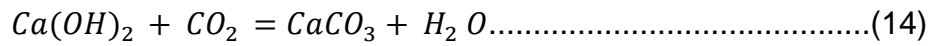
4.4.3 Resistência á penetração do solo artificial sob a ação da cal hidratada

Na Tabela 16 tem-se os resultados do estudo, considerando-se a resistência de ponta em sistemas binários cimentados com 2% de cal hidratada, nas razões D/d estudadas, para uma profundidade de 3 cm.

Tabela 16: Resistência de ponta na profundidade de 3 cm obtida em sistemas binários do solo AR, submetidos à ação da cal hidratada

Razão (D/d)	Sem cal hidratada	Após cimentação com cal hidratada	Variação Percentual
	R _P (kPa)		
5,7	2920,00	8691,93	197,67 (+)
6,7	2728,03	7400,03	171,26 (+)
8,0	2458,24	7823,17	218,24 (+)
9,5	2423,74	6299,30	159,90 (+)
11,3	2180,75	6634,67	204,24 (+)
13,4	2437,47	6376,63	161,61 (+)

Comparativamente, observa-se que a cimentação com cal hidratada elevou a resistência de ponta, para todas as relações (D/d). Entende-se que os ganhos na resistência de ponta são decorrentes do preenchimento do volume de vazios com a cal hidratada e pelas reações desta com o CO₂ do ar. Esta reação transforma a cal hidratada em um material sólido semelhante à rocha original (o calcário) utilizada para fabricar o produto. A equação química que ilustra esse processo é apresentada a seguir.



- $Ca(OH)_2$ = cal hidratada;
- CO_2 = dióxido de carbono;
- $CaCO_3$ = carbonato de cálcio; e
- H_2O = água

Além disso, a cal hidratada, por ser um aglomerante, une os grãos de areia e com isso reduz a ocorrência de movimento relativo entre partículas, dificultando a passagem do cone penetrométrico. É importante frisar que os valores elevados encontrados para a resistência de ponta podem estar relacionados, também, com a alta concentração de CO_2 utilizada na produção das reações de carbonatação do presente estudo.

5. DESENVOLVIMENTO, OPERACIONALIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGENS DE GRÃOS DE AREIA

5.1 Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia

O Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia, como se ilustra nas Figuras 44a e 44b, destinado para análise morfológica de areias e demais objetos que necessite de ampliação, conjuga as capacidades de um microscópio ótico e de uma câmara digital.

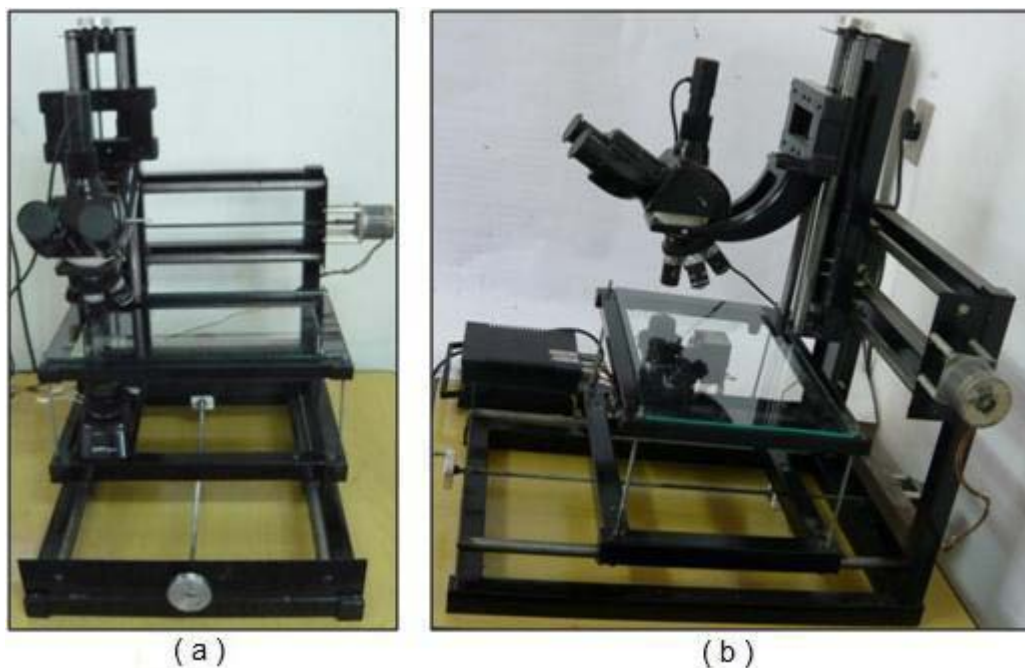


Figura 44: Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia: (a) vista frontal; (b) vista lateral direita.

O equipamento associado a um computador permite visualizar o objeto analisado, posicionar a câmara e monitorar a quantidade de fotografias, com a câmara parada ou a mesma em movimento.

O posicionamento adequado da câmera, para realizar as fotografias dos grãos de areia, ou outro objeto que esteja sobre a placa de vidro da mesa mecânica, depende da posição correta da parte ótica e da mesa mecânica. A parte ótica do equipamento pode se movimentar na direção X, enquanto que a mesa mecânica, na direção Y. Essa movimentação é realizada de forma automática, por meio de dispositivos motorizados acoplados nas engrenagens X e Y, e controlada através de hardware e software específicos (inclusos no equipamento). O uso do software permite ajustar a frequência de acionamento e a velocidade dos motores.

A Figura 45 apresenta a tela do software do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.

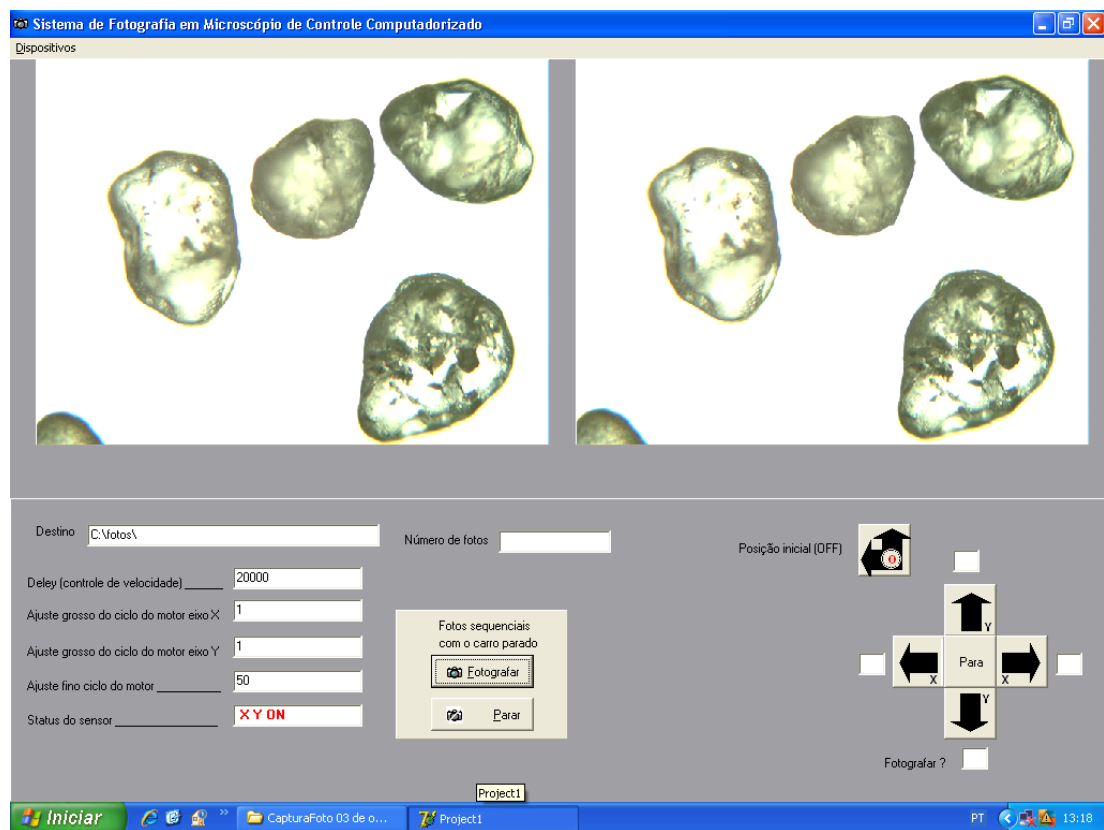


Figura 45: Tela do software do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia.

5.2 Validação do Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia

As figuras 46, 47 e 48 mostram a comparação entre os resultados dos índices morfométricos arredondamento, compacidade e alongamento, em função das classes de tamanho (Tabela 8), obtidos no presente trabalho e aqueles determinados por Dalla Riva (2010), empregando um sistema tradicional de análise de imagens, com base em uma câmera digital Nikon Coolpix 4500 com CCD de 4.0 Megapixel acoplada a um Microscópio Olympus CH30.

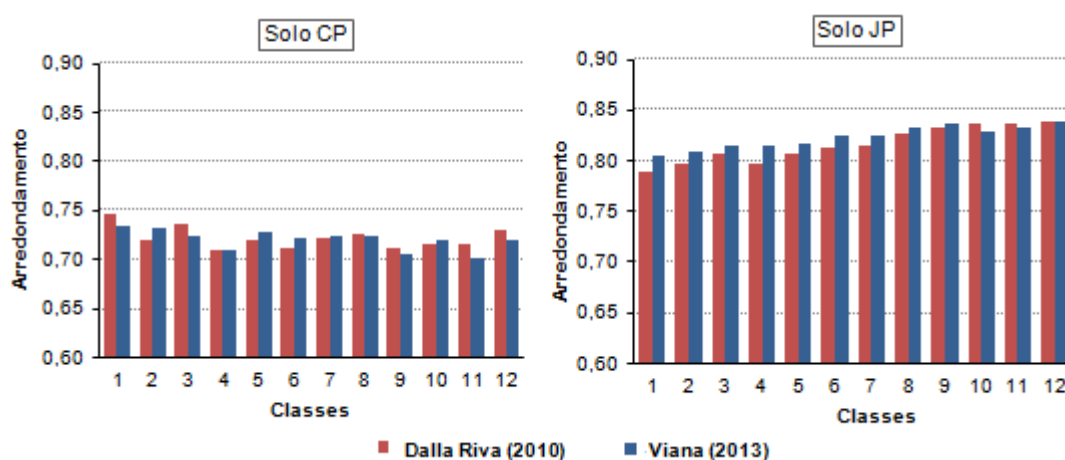


Figura 46: Comparação entre o índice morfométrico arredondamento dos solos CP e JP obtidos neste trabalho e por Dalla Riva (2010).

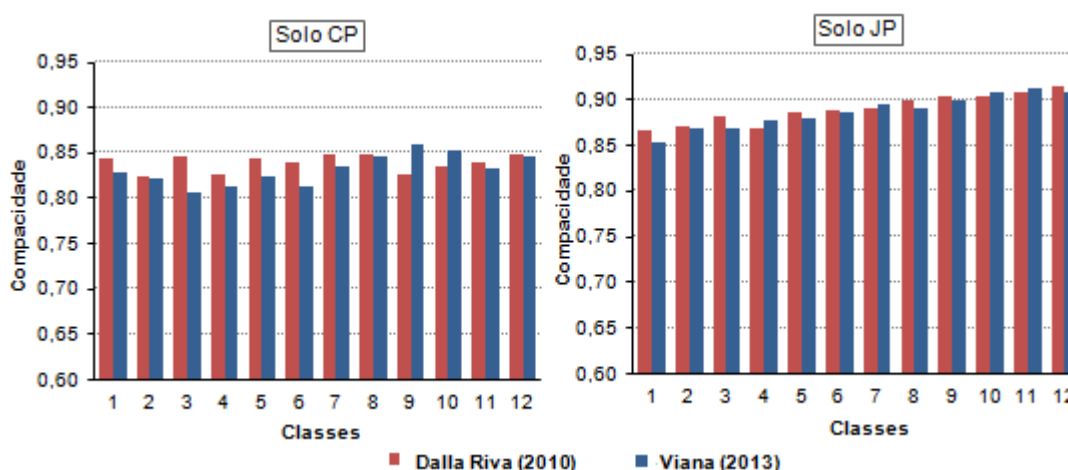


Figura 47: Comparação entre o índice morfométrico compacidade dos solos CP e JP obtidos neste trabalho e por Dalla Riva (2010)

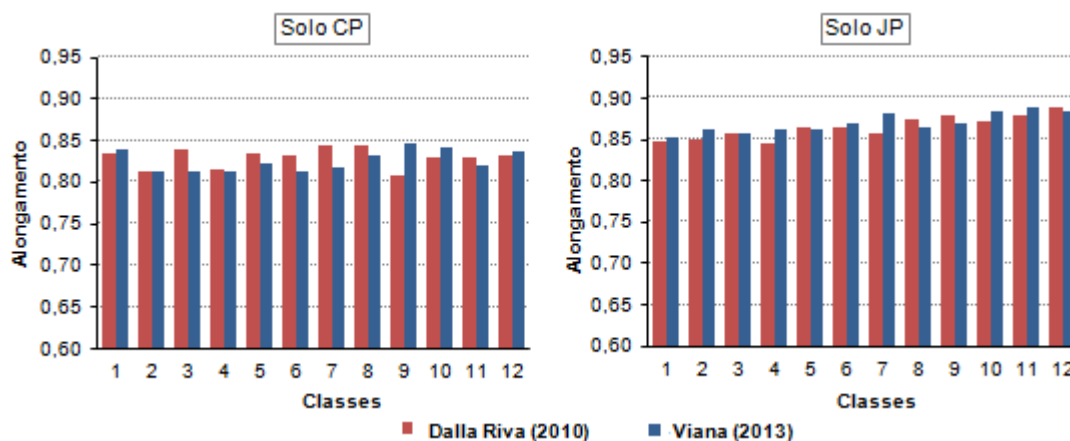


Figura 48: Comparação entre o índice morfométrico alongamento dos solos CP e JP obtidos neste trabalho e por Dalla Riva (2010).

Comparativamente, observa-se que, ocorreu uma pequena variação entre os resultados dos índices morfométricos arredondamento, alongamento e compacidade obtidos por Dalla Riva (2010) e aqueles determinados no presente estudo. Esta inconstância é comum, haja vista as constatações anteriormente apresentadas relativas à diversidade de formas e características de partículas que não têm plano de fratura definido (quartzo). Além disso, a diferença de resolução nas imagens obtidas nas areias por Dalla Riva, com base em resolução de 4,0 Megapixel, e nesta pesquisa, empregando-se resolução de 1,3 Megapixel, certamente contribuiu, também, para a variação dos resultados, haja vista que as imagens de alta resolução produzem um maior detalhamento das bordas de uma partícula, aumentando o valor do perímetro em relação às imagens de menor resolução. O índice arredondamento é o que apresenta maior influência da resolução, pois o perímetro na sua expressão matemática é uma potência de segunda ordem.

Nesta pesquisa, constatou-se que a interferência da resolução foi mais evidente em partículas rugosas, com tamanho inferior a 0,125 mm. Por ter-se trabalhado com classes acima deste tamanho, esta influência foi relativamente pequena. Caso os grãos de areia não apresentassem diversidade de forma, para o índice de arredondamento e para todas as classes dos dois solos, os resultados obtidos na presente pesquisa deveriam ser maiores do que aqueles obtidos por Dalla Riva (2010), embora sendo a

diferença também pequena. Convém frisar que, caso se necessite de imagens com maior resolução (por exemplo, acima de 1,3 megapixels), é possível substituir a câmera atual do microscópio do Sistema para a Captura de Imagens de Grãos de Areia por uma de maior resolução.

Para fins práticos de engenharia, em virtude da pequena diferença entre os resultados dos índices morfométricos arredondamento, alongamento e compacidade obtidos por Dalla Riva (2010) e aqueles determinados neste trabalho, considera-se que o Sistema para a Captura de Imagens de Grãos de Areia funcionou de forma adequada, permitindo a caracterização morfométrica da fração areia limpa do solo CP e solo JP, com redução de tempo e praticidade consideráveis. Como limitações do sistema de captura de imagens desenvolvido, destaca-se que imagens obtidas de grãos com tamanhos menores do que 0,125 mm ficaram embaçadas, mesmo mudando-se a objetiva do microscópio e fazendo-se os ajustes necessários; por outro lado, as partículas com tamanhos maiores do que 1,119 mm produziam imagens maiores do que a tela, saindo apenas parte desta na imagem.

6. CONCLUSÕES

A análise dos resultados do programa experimental desenvolvido no presente trabalho levou às seguintes conclusões:

- os empacotamentos binários das esferas de vidro e das frações areia limpa do solo artificial atingiram um ponto de máxima densidade em uma composição aproximada de 30% de partículas menores;
- os empacotamentos binários das esferas de vidro apresentaram ganhos maiores de densidade até relações D/d próximas a 6, sendo que acima desse valor os aumentos ocorreram em menor proporção;
- os empacotamentos binários das frações areia do solo artificial ocorreram de forma similar aos empacotamentos binários de esferas de vidro, observando-se, porém, maior eficiência na elevação da densidade quando a razão D/d se aproximou de 8;
- a condutividade hidráulica e a resistência à penetração dos empacotamentos binários do solo artificial apresentaram decréscimos à medida que a relação D/d aumentou;
- a cimentação por cal hidratada reduziu a condutividade hidráulica e elevou a resistência de ponta dos empacotamentos binários do solo artificial;
- a morfologia das partículas influenciou significativamente as propriedades de densidade, condutividade hidráulica e resistência à penetração dos empacotamentos binários da fração areia limpa;

- o equipamento Sistema de Captura de Imagens de Grãos de Areia funcionou de forma adequada, com economia de tempo e praticidade.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, recomendações para trabalhos futuros são, como segue:

- dar continuidade à presente pesquisa, com maior detalhamento das razões D/d ;
- incluir novos solos artificiais, com índices morfométricos diferentes dos considerados no presente trabalho;
- analisar a influência do período de cura na cimentação com cal hidratada e adicionar o emprego de óxidos de ferro ao presente estudo;
- ampliar o campo de análise dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos sistemas empacotados, com a incorporação, por simplicidade, de ensaios de cisalhamento direto; e
- desenvolver compactador de amostras de areia por vibração radial, com capacidade de trabalho para sistemas mais complexos de empacotamento de partículas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12069:**
Solo - Ensaio de penetração de cone in situ (CPT). Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502:**
Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais.**
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2008, 91p
(Dissertação de Mestrado).
- ALONSO, T. P. **Condutibilidade hidráulica de solos compactados em ensaios com parâmetros de parede flexível.** Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2005, 113p
- ALSHIBLI, K. A., ALSALEH, M. I. Characterizing surface roughness and shape of sands using digital microscopy. **J. Comput. Civil Eng.**, 18:36-45, 2004.
- CAPECHE, C. L. **Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista.** Embrapa Solos - Comunicado Técnico 51. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. Disponível em < <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/> /> Acesso em: 10 de outubro de 2012.
- CRUZ, P.T. "**100 Barragens Brasileiras - Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto**". Oficina de Textos, São Paulo, SP, 1996, 647p.
- DALLA RIVA, R.D. **Efeito das Propriedades Físicas dos grãos e Agente de Cimentação na estruturação da Fração Areia de Solos Arenosos.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2010. 157p. (Tese de doutorado).

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Thomson Learning, São Paulo, SP, 2007. 562 p.

DNIT-DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR - Publicação 719. Rio de Janeiro, RJ, 274 p., 2006.

EMBRAPA **Cultivo de Algodão Irrigado**. 2003. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoIrrigado/solos.htm>

EMBRAPA **Manual de métodos de análise de solo**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FAROUKI, O. T.; WINTERKORN, H. F. Mechanical properties of granular systems. **Highway Research Record**, No. 52, Highway Research Board, Washington, p. 10-58, USA, 1964.

FERNANDES FILHO, E.I. & VIANA, J.H.M. **QUANTIPORO**: um novo programa para tratamento e quantificação de imagens digitais para aplicações em ciência do solo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 28., Londrina, 2001. Resumos. Londrina, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2001. p.224.

FERREIRA, M. M., DIAS JÚNIOR, M. S. **Física do solo**. UFLA/FAEPE, Lavras, 2001. 117p.

FONSECA, S. T. **Processamento e caracterização de pós e de cerâmicas de alumina total e parcialmente nanoestruturadas** / Solange Tamara da Fonseca. São José dos Campos: INPE, 2007. 89 p. (INPE-15153-TDI/1285).

- FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 259 p. (Tese de Doutorado)
- GERMAN, R. M. **Particle Packing Characteristics**. Metal Powder Industries Federation, Princeton, 1989. 443p.
- GRATON, L. C.; FRASER, H. J. Systematic packing of spheres - with particular relation to porosity and permeability. **J. Geol.**, 43:785-909, 1935.
- GOOGLE. **Software Google Earth**. Versão 4.2 (beta). Disponível em <<https://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=wl> /> Acesso em: 03 de janeiro de 2013.
- HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing - Volume 2: Permeability, shear strength and compressibility tests**. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 335-747, 1982.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. Manuais técnicos em geociências, n. 4. Rio de Janeiro, 2007. 316 p.
- LADE, P. V.; LIGGIO, C. D., Jr.; YAMAMURO, J.A. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. **Geotech. Test. J.**, 21:336-347, 1998.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969. 553 p.
- LIMA, D. C. **Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal**. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1981, 171 p. (Dissertação de Mestrado).

- MARTINELLO, I. A. **Estudo das condicionantes hidráulicas de uma ruptura de talude em São Vendelino (RS)**. Universidade Federal DO Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. 160p.
- McGEARY, R.K. **Mechanical packing of spherical particles**. *J. Am. Ceram. Soc.*, 44:513-522, 1961.
- MELO, G. **Compactação de aterros de barragens de terra**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 1985. 107 p.
- MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2005, 577 p.
- NEVES, C. E. V. **Comportamento de Materiais Granulares usando o Método dos Elementos Discretos**. Publicação G. DM-173/09, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009, 166 p (Dissertação de Mestrado).
- PANZERA, T. H. **Desenvolvimento de um material compósito cerâmico para aplicação em mancais porosos**. Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007, 220p. (Tese de doutorado).
- PINTO, C.S. Propriedades dos solos. In: HACHICH, W. et al. **Fundações – teoria e prática**. 2ª edição, São Paulo: Pini, 2000. Cap 2.
- POWERS, M. C. A new roundness scale for sedimentary particles. *J. Sediment. Petrol.*, 23:117-119, 1953.
- ROSA, S.R. **Propriedades físicas e químicas de um solo arenoso sob o cultivo de Eucalyptus spp**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010, 94p. (Dissertação de Mestrado).
- ROSATO, A.; STRANDBURG, K.J.; PRINZ, F.; SWENDSEN, R.H. Why the Brazil nuts are on top: size segregation of particulate matter by shaking. *Phys. Rev. Lett.*, 58:1038-1040, 1987.

ROTTA, G.V. **Plastificação de um Solo Cimentado Curado sob Tensão.**
Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005, 154p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**, volume I, São Paulo:
Pini, 1997. 750p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** MacGraw Hill do Brasil,
São Paulo, 1977. 510 p.

VIEIRA, L.S. **Manual da ciência do solo com ênfase aos solos tropicais.**
2. ed., Editora Agronômica Ceres Ltda, São Paulo, 1988. 464p.

WESTMAN, A.E.R.; HUGILL, H.R. The packing of particles. **J. Am. Ceram.
Soc.**, 13:767-779, 1930.

ANEXO

Tabela A.1: Densidade aparente, densidade da partícula e porosidade total para as diferentes classes da fração areia limpa do solo CP

Classe	Densidade Aparente (g/cm³)	Densidade de Partícula (g/cm³)	Porosidade Total
2,000 - 1,680	1,37	2,63	0,48
1,680 - 1,410	1,38	2,64	0,48
1,410 - 1,190	1,39	2,63	0,47
1,190 - 1,000	1,38	2,66	0,48
1,000 - 0,840	1,39	2,70	0,48
0,840 - 0,710	1,39	2,63	0,47
0,710 - 0,590	1,39	2,62	0,47
0,590 - 0,500	1,39	2,63	0,47
0,500 - 0,420	1,37	2,59	0,47
0,420 - 0,350	1,37	2,64	0,48
0,350 - 0,297	1,36	2,63	0,48
0,297 - 0,250	1,34	2,63	0,49
0,250 - 0,210	1,38	2,66	0,48
0,210 - 0,177	1,36	2,66	0,49
0,177 - 0,149	1,33	2,66	0,50
0,149 - 0,125	1,31	2,64	0,50
0,125 - 0,105	1,28	2,67	0,52
0,105 - 0,088	1,25	2,66	0,53
0,088 - 0,074	1,26	2,62	0,52
0,074 - 0,062	1,23	2,63	0,53
0,062 - 0,053	1,24	2,63	0,53
Média	1,34	2,64	0,49

Tabela A.2: Densidade aparente, densidade da partícula e porosidade para as diferentes classes da fração areia limpa do solo JP

Classe	Densidade Aparente (g/cm³)	Densidade de Partícula (g/cm³)	Porosidade Total
1,190 - 1,000	1,67	2,70	0,38
1,000 - 0,840	1,66	2,74	0,39
0,840 - 0,710	1,65	2,67	0,38
0,710 - 0,590	1,66	2,70	0,39
0,590 - 0,500	1,63	2,73	0,40
0,500 - 0,420	1,62	2,74	0,41
0,420 - 0,350	1,63	2,70	0,40
0,350 - 0,297	1,62	2,70	0,40
0,297 - 0,250	1,60	2,73	0,41
0,250 - 0,210	1,59	2,66	0,40
0,210 - 0,177	1,57	2,66	0,41
0,177 - 0,149	1,54	2,69	0,43
0,149 - 0,125	1,52	2,74	0,44
0,125 - 0,105	1,49	2,70	0,45
0,105 - 0,088	1,47	2,73	0,46
0,088 - 0,074	1,48	2,68	0,45
0,074 - 0,062	1,45	2,67	0,45
0,062 - 0,053	1,45	2,69	0,46
Média	1,57	2,70	0,42

Tabela A.3: Densidade de partículas para as diferentes classes das EV

Classe	Densidade de Partícula (g/cm³)	Classe	Densidade de Partícula (g/cm³)
2,000 - 1,680	2,44	0,350 - 0,297	2,50
1,680 - 1,410	2,46	0,297 - 0,250	2,49
1,410 - 1,190	2,46	0,250 - 0,210	2,49
1,190 - 1,000	2,50	0,210 - 0,177	2,49
1,000 - 0,840	2,49	0,177 - 0,149	2,47
0,840 - 0,710	2,49	0,149 - 0,125	2,50
0,710 - 0,590	2,47	0,125 - 0,105	2,50
0,590 - 0,500	2,50	0,105 - 0,088	2,47
0,500 - 0,420	2,49	0,088 - 0,074	2,50
0,420 - 0,350	2,49	0,074 - 0,062	2,57
Média			2,49

Tabela A. 4: Índice morfométrico arredondamento para as diferentes classes dos solos CP e JP

Classe	Índice morfométrico - Arredondamento			
	Solo CP		Solo JP	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0,177 - 0,149	0,733	0,080	0,806	0,061
0,210 - 0,177	0,732	0,089	0,808	0,050
0,250 - 0,210	0,724	0,099	0,815	0,050
0,297 - 0,250	0,710	0,079	0,814	0,058
0,350 - 0,297	0,728	0,064	0,816	0,048
0,420 - 0,350	0,721	0,083	0,825	0,053
0,500 - 0,420	0,723	0,066	0,824	0,051
0,590 - 0,500	0,724	0,079	0,832	0,065
0,710 - 0,590	0,705	0,053	0,837	0,067
0,840 - 0,710	0,720	0,049	0,829	0,033
1,000 - 0,840	0,702	0,066	0,833	0,034
1,190 - 1,000	0,721	0,104	0,839	0,045
Média	0,720	0,076	0,823	0,051

Tabela A.5: Índice morfométrico compacidade para as diferentes classes dos solos CP e JP

Classe	Índice morfométrico - Compacidade			
	Solo CP		Solo JP	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0,177 - 0,149	0,829	0,065	0,854	0,055
0,210 - 0,177	0,823	0,090	0,870	0,047
0,250 - 0,210	0,807	0,076	0,869	0,052
0,297 - 0,250	0,812	0,078	0,878	0,061
0,350 - 0,297	0,824	0,084	0,880	0,059
0,420 - 0,350	0,813	0,076	0,887	0,052
0,500 - 0,420	0,836	0,072	0,894	0,059
0,590 - 0,500	0,846	0,063	0,890	0,061
0,710 - 0,590	0,859	0,056	0,899	0,054
0,840 - 0,710	0,854	0,044	0,908	0,049
1,000 - 0,840	0,833	0,066	0,913	0,051
1,190 - 1,000	0,845	0,078	0,909	0,510
Média	0,8318	0,0707	0,887	0,093

Tabela A.6: Índice morfométrico alongamento para as diferentes classes dos solos CP e JP

Classe	Índice morfométrico - Alongamento			
	Solo CP		Solo JP	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0,177 - 0,149	0,838	0,114	0,852	0,099
0,210 - 0,177	0,814	0,132	0,863	0,078
0,250 - 0,210	0,812	0,125	0,856	0,090
0,297 - 0,250	0,813	0,136	0,862	0,096
0,350 - 0,297	0,822	0,123	0,862	0,098
0,420 - 0,350	0,812	0,132	0,868	0,089
0,500 - 0,420	0,818	0,104	0,881	0,096
0,590 - 0,500	0,831	0,094	0,865	0,097
0,710 - 0,590	0,848	0,092	0,868	0,088
0,840 - 0,710	0,842	0,080	0,883	0,087
1,000 - 0,840	0,819	0,114	0,890	0,084
1,190 - 1,000	0,836	0,117	0,883	0,083
Média	0,8256	0,1136	0,870	0,090