

ROGÉRIO DIAS DALLA RIVA

**EFEITOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DA FRAÇÃO
AREIA DE SOLOS ARENOSOS E DE AGENTES DE CIMENTAÇÃO
NO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS EMPACOTADOS**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2010**

ROGÉRIO DIAS DALLA RIVA

**EFEITOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DA FRAÇÃO
AREIA DE SOLOS ARENOSOS E DE AGENTES DE CIMENTAÇÃO
NO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS EMPACOTADOS**

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

APROVADA: 21 de maio de 2010.

Dra. Ecidinéia Pinto Soares

Dr. João Herbert Moreira Viana
(Co-Orientador)

Prof. Liovando Marciano da Costa
(Co-Orientador)

Prof. Marco Antonio de Moraes
Alcântara

Prof. Dario Cardoso de Lima
(Orientador)

À minha esposa, Lourdes, aos meus pais,
à minha irmã e aos meus sogros.
Dedico

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo imenso apoio recebido para que pudesse realizar essa pós-graduação tão distante de casa.

À Universidade Federal de Viçosa e, em especial, aos Departamentos de Engenharia Civil e Solos, pela oportunidade de realizar o curso.

À UNEMAT - Universidade do Estado de Mato Grosso, pelo afastamento para qualificação.

Ao Professor Dario Cardoso de Lima pela orientação, sugestões, convívio, apoio, amizade, confiança e respeito.

Ao Professor Sukarno Olavo Ferreira do Departamento de Física da UFV, pela colaboração no desenvolvimento do sistema de aquisição de dados do penetrômetro. Ao Professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa que, sem sua ajuda e experiência, não seria possível planejar e conceber os equipamentos necessários para o desenvolvimento da tese, além de sua amizade e companheirismo. Ao Professor Carlos Alexandre Bráz de Carvalho, pelo convívio e amizade, além da oportunidade de poder ajudá-lo na disciplina de Estradas. Ao Professor Liovando Marciano da Costa, que foi a pessoa que idealizou essa tese, desde a época do Mestrado, onde divido com ele esse momento de glória.

Ao colega João Herbert Moreira Viana, pela co-orientação, amizade, acompanhamento laboratorial e desenvolvimento da tese que, juntamente com

o Professor Liovando Marciano da Costa, foi imprescindível para a execução dessa tese, desde a época do Mestrado

Aos Laboratoristas dos Departamentos de Engenharia Civil e Solos, pela amizade e ajuda prestada.

Aos bolsistas Diego, Halley, Rodrigo e Lucimar, pela ajuda no desenvolvimento da tese.

Aos amigos Flávio Crispim e Fernando Caneschi, pelas sugestões, críticas, ajuda, apoio, amizade e companheirismo.

À Lourdes, pelo amor, companheirismo, incansável apoio, carinho, atenção e paciência.

BIOGRAFIA

ROGÉRIO DIAS DALLA RIVA, filho de Laci Dias Dalla Riva (in memorium) e Cézar Mário Dalla Riva, nasceu em 03 de abril de 1965.

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso, em 1987.

Em março de 1993 ingressou na UNEMAT - Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário de Alta Floresta como professor contratado para a disciplina de Física Geral e Experimental junto ao curso de Licenciatura Plena em Ciências Biológicas.

Prestou concurso público e tornou-se efetivo a partir de março de 1994 para ministrar as disciplinas de Matemática e Física Geral e Experimental na UNEMAT - Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário de Alta Floresta atuando no curso de Licenciatura Plena em Ciências Biológicas.

Em dezembro de 1996 foi eleito Coordenador Regional do Campus Universitário de Alta Floresta e reeleito em agosto de 1998, tendo ocupado o cargo até agosto de 2002.

Em 2002/2 ingressou no Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

Em 2005/1 ingressou no Doutorado em Engenharia Civil, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Geral.....	3
1.2.2 Específicos	3
1.3 Justificativa	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 O solo	5
2.2 Intemperismo e formação do solo.....	5
2.3 Morfologia.....	8
2.3.1 Constituição	8
2.3.1.1 Matéria mineral	9
2.3.1.2 Matéria orgânica	10
2.3.1.3 Água do solo	10
2.3.1.4 Ar do solo	14
2.3.2 Textura	15

2.3.3	Estrutura	16
2.3.4	Porosidade	20
2.4	Solos granulares.....	22
2.4.1	Caracterização da fração areia.....	22
2.5	Densidade relativa	23
2.6	Morfologia de materiais granulares.....	24
2.7	Fenômenos de empacotamento	27
2.7.1	Considerações gerais	27
2.7.2	Fatores que influenciam no empacotamento de partículas	29
2.7.2.1	Estabilidade gravitacional	29
2.7.2.2	Tamanho das partículas.....	30
2.7.2.3	Forma da partícula e rugosidade superficial	30
2.7.2.4	Aglomeração	31
2.7.2.5	Agentes lubrificantes.....	33
2.7.2.6	Porosidade interna.....	33
2.7.2.7	Tamanho do recipiente	34
2.7.2.8	Segregação.....	36
2.7.2.9	Pontes de ligação e vibração	38
2.7.3	Empacotamento de esferas uniformes	39
2.7.3.1	Introdução	39
2.7.3.2	Empacotamento Ordenado	40
2.7.3.3	Empacotamento aleatório de baixa densidade	42
2.7.3.4	Empacotamento aleatório de alta densidade	43
2.7.4	Empacotamento de partículas uniformes não-esféricas	43
2.7.5	Empacotamento binário de esferas uniformes	44
2.7.5.1	Considerações gerais	44
2.7.5.2	Descrição qualitativa	45
2.7.5.3	Efeitos da razão D/d na porosidade	48
2.7.5.4	Efeitos de Homogeneidade	51
2.7.6	Empacotamento binário de partículas irregulares.....	53
2.7.6.1	Considerações gerais	53
2.7.6.2	Misturas de partículas não-esféricas.....	53
2.7.7	Empacotamentos Multimodais.....	57
2.7.7.1	Considerações gerais	57
2.7.7.2	Empacotamentos trimodais.....	58
2.7.7.3	Empacotamentos com distribuição contínua.....	63

2.8	Resistência à Penetração	64
2.9	Condutividade hidráulica em sistemas empacotados	65
2.10	Agentes de cimentação	66
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	68
3.1	Materiais	68
3.1.1	Esferas de vidro	68
3.1.2	Solos	69
3.1.3	Agentes de cimentação	72
3.2	Métodos	72
3.2.1	Fase 1: Coleta e preparação dos solos	72
3.2.2	Fase 2: Pré-tratamentos	73
3.2.2.1	Dispersão mecânica e química	73
3.2.2.2	Remoção de matéria orgânica	73
3.2.2.3	Remoção de óxidos de ferro	74
3.2.2.4	Separação da fração areia em classes	74
3.2.3	Fase 3: Análises preliminares	75
3.2.3.1	Fator f	75
3.2.3.2	Densidade de partículas	76
3.2.4	Fase 4: Análises morfométricas e morfológicas	77
3.2.4.1	Morfometria das partículas	77
3.2.4.2	Avaliação qualitativa da rugosidade	79
3.2.4.3	Tomografia computadorizada	80
3.2.5	Fase 5: Análises físicas e geotécnicas	82
3.2.5.1	Empacotamentos uniformes, binários e ternários	82
3.2.5.2	Resistência à penetração	84
3.2.5.3	Permeabilidade	85
3.2.5.4	Agentes de cimentação	86
3.2.5.4.1	Reações de carbonatação	87
3.2.5.4.2	Precipitação de óxidos de ferro	87
3.2.6	Análises estatísticas	88
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
4.1	Caracterização morfológica quantitativa e qualitativa	89

4.1.1	Caracterização morfométrica das esferas de vidro e da fração areia limpa	92
4.1.2	Caracterização qualitativa da rugosidade superficial das esferas de vidro e da fração areia limpa.....	95
4.2	Efeitos do tamanho do recipiente e segregação em sistemas empacotados	98
4.3	Empacotamentos binários e ternários	99
4.3.1	Empacotamentos binários	99
4.3.2	Empacotamentos ternários.....	108
4.4	Permeabilidade em sistemas binários e ternários	112
4.4.1	Permeabilidade em sistemas binários	112
4.4.2	Permeabilidade em sistemas ternários.....	116
4.5	Resistência à penetração	118
4.5.1	Resistência à penetração em sistemas binários e ternários.....	118
4.5.2	Resistência à penetração sob a ação de agentes cimentantes	125
5.	PROJETOS DOS APARELHOS CONSTRUÍDOS E UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO DA TESE.....	127
5.1	Agitador de Wagner	127
5.2	Empacotador de partículas.....	128
5.3	Penetrômetro	128
5.4	Permeâmetro	130
6.	RESUMO E CONCLUSÕES.....	132
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	134
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
	ÍNDICE DE AUTORES.....	145
	APÊNDICE A	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Perfil típico de alteração, sob o prisma pedológico (Toledo et al., 2000).	6
Figura 2:	Esquema da composição do horizonte A de um solo quando em boas condições para o crescimento das plantas. A proporção de ar e água dos poros é variável (Hillel, 1998).	8
Figura 3:	Formas de água no solo, sendo que a água higroscópica forma uma película fina que envolve as partículas, enquanto que a água capilar preenche os poros menores (poros capilares) e a água gravitativa os poros maiores do solo (Lepsch, 2002).....	11
Figura 4:	Resistência ao cisalhamento de solos não-saturados (Fredlund et al.,1978).....	13
Figura 5:	Diferenças proporcionais entre as frações areia, silte e argila (Hillel, 1998).....	15
Figura 6:	Classificação da estrutura do solo segundo uma visão pedológica baseada na forma dos agregados (Hillel, 1998): (a) laminar; (b) prismática; (c) colunar; (d) bloco angular; (e) bloco subangular; e (f) granular.	17
Figura 7:	Escala de arredondamento (esfericidade) e angularidade (Powers, 1953).	25
Figura 8:	Empacotamento hipotético de partículas em um sistema polidisperso (Hillel, 1998).	28
Figura 9:	Estabilidade gravitacional em empacotamentos aleatórios de esferas de igual tamanho (German, 1989): (a) um contato; (b) dois contatos e, (c) três contatos.	29
Figura 10:	Efeito da (A) forma da partícula e (B) rugosidade superficial na densidade relativa, em empacotamentos aleatórios (Shinohara, 1997).	31

Figura 11:	Esquema mostrando regiões de alta porosidade em empacotamento de esferas de igual tamanho, associadas ao efeito de aglomeração (German, 1989).	33
Figura 12:	Esquema mostrando três diferentes formas de estrutura porosa interna (German, 1989).	34
Figura 13:	Efeito do tamanho do recipiente na densidade relativa de empacotamento (McGeary, 1961).	35
Figura 14:	Empacotamentos aleatórios de baixa e alta densidade de esferas de aço uniformes, mostrando as densidades limites, sem efeito de borda, obtidas por extrapolação (Scott, 1960).	36
Figura 15:	Fenômeno de segregação em empacotamento binário aleatório, devido à agitação (Rosato et. al, 1987).	37
Figura 16:	Fenômeno de pontes de ligação, associado ao elevado atrito entre partículas, formato irregular, ou coesão (German, 1989)..	38
Figura 17:	Tipos de empacotamento: (A) aleatório; (B) ordenado (Aste & Weaire, 2008).	40
Figura 18:	Modelos de empacotamento de esferas uniformes (Deresiewicz, 1958): (a) cúbico simples, (b) cúbico tetraedral, (c) tetragonal esfenoidal, (d) piramidal, e (e) tetraedral.	41
Figura 19:	Densidade relativa em função do arredondamento para partículas de igual tamanho empacotadas aleatoriamente (Tsutsumi, 1973).	44
Figura 20:	Representação bidimensional dos efeitos de combinações de diferentes tamanhos de partículas, onde D_G é o diâmetro da partícula de maior tamanho, D_M é o diâmetro da partícula de tamanho intermediário e D_P é o diâmetro da partícula de menor tamanho (German, 1989).	45
Figura 21:	Variação teórica da porcentagem de vazios em sistemas binários em função da porcentagem de partículas pequenas e grandes (Lade et al., 1998).	46
Figura 22:	Densidade relativa em função do percentual volumétrico de partículas grandes para seis razões D_G/D_P (Yerazunis et al., 1965).	47
Figura 23:	Porosidade em função do percentual de partículas grandes para empacotamentos bimodais, segundo razões D/d variando de 2 a infinito (Furnas, 1931).	49

Figura 24:	Porcentagens de vazios mínimas obtidas em misturas binárias de esferas de aço em função da relação D/d (Lade et al., 1998). ...	50
Figura 25:	Ilustração da maior partícula que pode preencher o poro triangular entre três esferas de igual tamanho (modificado de Lade et al., 1998).	51
Figura 26:	Esquema mostrando um (a) arranjo homogêneo e (b) um arranjo não homogêneo (Messing & Onoda, 1978).	52
Figura 27:	Densidade relativa de empacotamentos binários em função da porcentagem, em volume, de partículas menores em vários níveis de homogeneidade (Messing & Onoda, 1978).	52
Figura 28:	Porosidade em função da porcentagem de arredondamento com partículas de 10 mm de diâmetro (Shergold, 1953).....	54
Figura 29:	Máxima densidade relativa de empacotamento (na composição de 77% de partículas grandes) em função da relação D_G/D_P em misturas binárias de partículas irregulares (Patankar & Mandal, 1980).	55
Figura 30:	Densidade relativa de empacotamento em função do percentual (em volume) de partículas grandes (Yerazunis et al., 1962).	56
Figura 31:	Densidade relativa de empacotamento em função do percentual de partículas irregulares grandes (Standish & Borger, 1979).	56
Figura 32:	Empacotamento trimodal, com a altura indicando a densidade de empacotamento, em uma composição intermediária ótima (German, 1989).	58
Figura 33:	Linhas de isodensidade em um diagrama de composição ternária, com os empacotamentos binários indicados em cada eixo (German, 1989).	59
Figura 34:	Densidade atingida com dois, três ou quatro componentes em função da relação entre o maior e o menor diâmetro das partículas (Furnas, 1931).....	60
Figura 35:	Linhas de contorno de isodensidade para um empacotamento trimodal de esferas (Lee, 1970).....	61
Figura 36:	Densidade relativa na composição ternária de esferas na proporção 4:2:1 (German, 1989).	62
Figura 37:	Densidade relativa na composição ternária de areia na proporção 51:8:1 (Westman & Hugill, 1930).	62

Figura 38:	Densidade relativa na composição ternária de partículas irregulares na proporção 5,2:3,7:2,7 (Standish & Borger, 1979). 63
Figura 39:	Localização dos municípios de coleta situados no Estado de Minas Gerais (GOOGLE, 2009)..... 69
Figura 40:	Ponto de coleta do Solo JP. 70
Figura 41:	Ponto de coleta do Solo VS..... 71
Figura 42:	Ponto de coleta do Solo SL. 71
Figura 43:	Ponto de coleta do Solo CP..... 72
Figura 44:	Dispensador mecânico utilizado para grandes volumes de solo. 73
Figura 45:	Curva de extração de ferro em função da porcentagem de ditonito. 74
Figura 46:	Peneiramento da fração areia em 21 classes de tamanho..... 75
Figura 47:	(A) imagem adquirida em câmera digital: (B) aplicação do comando Limiar do programa Adobe® Photoshop® CS2. 77
Figura 48:	Esquema representativo dos eixos maior e menor..... 78
Figura 49:	(A) Metalizador, modelo Sputter Coater FDU010, Bal-Tec, Balzers. (B) Detalhe do processo de recobrimento da amostra com ouro..... 80
Figura 50:	Microscópio eletrônico de varredura com câmera digital, modelo Leo 1430VP Zeiss, do Núcleo de Microscopia e Microanálise da UFV. 80
Figura 51:	(A) Tomógrafo computadorizado da EMBRAPA/CNPDIA. (B) Detalhe da fixação da amostra no aparelho. 81
Figura 52:	(A) Imagem de empacotamento de esferas de vidro (resolução 34,8 µm). (B) Imagem de esfera de vidro (resolução 2,2 µm). ... 81
Figura 53:	Empacotador de partículas construído para a produção de sistemas uniformes, binários e ternários. 83
Figura 54:	Sistema penetrométrico e amostra: (A) penetrômetro quasi-estático projetado e construído para a determinação da resistência à penetração das amostras de solos; (B) sistema utilizado para ensaios de resistência de cone penetrométrico. .. 85

Figura 55:	Sistema projetado e construído parra a realização dos ensaios de permeabilidade: (A) vista parcial do conjunto de permeâmetros; (B) detalhe da amostra com a proveta graduada em cm.....	86
Figura 56:	Curva granulométrica do solo Cachoeira da Prata (CP).....	90
Figura 57:	Curva granulométrica do solo João Pinheiro (JP).....	90
Figura 58:	Curva granulométrica do solo Sete Lagoas (SL).	91
Figura 59:	Curva granulométrica do solo Vila Secundino (VS).	91
Figura 60:	Índice morfométrico arredondamento em função das classes de tamanho.....	93
Figura 61:	Índice morfométrico alongamento em função das classes de tamanho.....	94
Figura 62:	Índice morfométrico compacidade em função das classes de tamanho.....	94
Figura 63:	Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Esferas de vidro (EV). (B) Imagem ampliada de uma partícula..	95
Figura 64:	Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP). (B) Imagem ampliada de uma partícula.	96
Figura 65:	Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP). (B) Imagem ampliada de uma partícula.	96
Figura 66:	Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL). (B) Imagem ampliada de uma partícula.	97
Figura 67:	Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS). (B) Imagem ampliada de uma partícula.	97
Figura 68:	(A) Empacotamento uniforme de Esferas de Vidro (EV). (B) Empacotamento uniforme da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP).....	98
Figura 69:	Empacotamento binário da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).	99
Figura 70:	Curva de empacotamento binário das Esferas de Vidro (EV). .	100

Figura 71:	Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP).	100
Figura 72:	Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).	101
Figura 73:	Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL).	101
Figura 74:	Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS).	101
Figura 75:	Curva de máxima densidade de empacotamento binário das Esferas de Vidro (EV).	103
Figura 76:	Curva de máxima densidade de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP).	103
Figura 77:	Curva de máxima densidade de empacotamento binário da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).	103
Figura 78:	Curva de máxima densidade de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL).	104
Figura 79:	Curva de máxima densidade de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS).	104
Figura 80:	Imagem de uma esfera de vidro (resolução 2,2 μm) obtida por Tomografia Computadorizada. As regiões em preto mostram a porosidade interna (setas).	104
Figura 81:	Curvas de empacotamento binário ajustadas pelo modelo hiperbólico.	106
Figura 82:	Empacotamento ternário em Esferas de Vidro, onde P representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e G as partículas de maior diâmetro.	109
Figura 83:	Empacotamento ternário na fração areia limpa do Solo CP, onde F representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e C as partículas de maior diâmetro. ...	109
Figura 84:	Empacotamento ternário na fração areia limpa do Solo JP, onde P representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e G as partículas de maior diâmetro. ...	110
Figura 85:	Empacotamento ternário na fração areia limpa do Solo SL, onde P representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e G as partículas de maior diâmetro. ...	110

Figura 86:	Empacotamento ternário na fração areia limpa do Solo VS, onde P representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e G as partículas de maior diâmetro. ...	111
Figura 87:	Curvas de permeabilidade em sistemas binários ajustadas pelo modelo hiperbólico.....	113
Figura 88:	Curvas de resistência de ponta de Esferas de Vidro (EV) ajustadas pelo modelo hiperbólico.....	119
Figura 89:	Curvas de resistência de ponta da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP) ajustadas pelo modelo hiperbólico. ..	119
Figura 90:	Curvas de resistência de ponta da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP) ajustadas pelo modelo hiperbólico.	120
Figura 91:	Curvas de resistência de ponta da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL) ajustadas pelo modelo hiperbólico.	120
Figura 92:	Curvas de resistência de ponta da fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS) ajustadas pelo modelo hiperbólico.....	120
Figura 93:	Agitador mecânico, tipo Wagner.....	127
Figura 94:	Empacotador de partículas.....	128
Figura 95:	Penetrômetro com sistema de cravação hidráulico.	129
Figura 96:	Detalhe da válvula para controle da vazão.....	129
Figura 97:	(A) Interface. (B) Permeâmetro.....	130
Figura 98:	Detalhe da tampa.	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1:	Descrição dos horizontes	7
Quadro 2:	Tamanho das partículas do solo.....	9
Quadro 3:	Tamanho das partículas do solo.....	10
Quadro 4:	Composição do ar do solo e do ar atmosférico.....	14
Quadro 5:	Classificações granulométricas de cunho geotécnico	16
Quadro 6:	Características dos graus de estrutura (Hillel, 1998)	18
Quadro 7:	Classificação do arredondamento de acordo com Russel & Taylor (1937) e Pettijohn (1949)	25
Quadro 8:	Classificação do arredondamento de acordo com Powers (1953)	26
Quadro 9:	Características geométricas de empacotamentos regulares de esferas uniformes	42
Quadro 10:	Exemplos de empacotamentos trimodais de esferas otimizados	60
Quadro 11:	Composição química e física das esferas de vidro.....	68
Quadro 12:	Textura dos solos utilizados no presente trabalho.....	69
Quadro 13:	Peneiras usadas na separação da fração areia limpa e esferas de vidro	75
Quadro 14:	Notação utilizada para as partículas.....	89
Quadro 15:	Classes utilizadas para a determinação dos índices morfométricos arredondamento, alongamento e compacidade	92
Quadro 16:	Equações ajustadas para a determinação da densidade de empacotamento em função da relação D/d	106

Quadro 17:	Coeficientes obtidos por ajuste de regressão linear simples	107
Quadro 18:	Teste de identidade dos coeficientes β_0 e β_1	107
Quadro 19:	Equações ajustadas para a determinação do coeficiente de permeabilidade em função da relação D/d	115
Quadro 20:	Coeficientes obtidos por ajuste de regressão linear simples	115
Quadro 21:	Teste de identidade dos coeficientes β_0 e β_1	115
Quadro 22:	Coeficientes de permeabilidade obtidos em empacotamentos ternários.....	117
Quadro 23:	Condutividade hidráulica obtida em sistemas binários e ternários	118
Quadro 24:	Coeficientes obtidos por ajuste de regressão linear simples	122
Quadro 25:	Teste de identidade dos coeficientes β_0 e β_1	123
Quadro 26:	Resistência de ponta obtida em sistemas binários na razão D/d = 8,0, submetidos a agentes de cimentação	125
Quadro 1A:	Classes utilizadas em empacotamentos binários	148
Quadro 2A:	Densidade da partícula para as diferentes classes das Esferas de Vidro (EV)	149
Quadro 3A:	Densidade da partícula para as diferentes classes da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP)	151
Quadro 4A:	Densidade da partícula para as diferentes classes da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP)	152
Quadro 5A:	Densidade da partícula para as diferentes classes da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL).....	153
Quadro 6A:	Densidade da partícula para as diferentes classes da fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS).....	154
Quadro 7A:	Classes utilizadas em empacotamentos ternários.....	155
Quadro 8A:	Classes utilizadas em ensaios de permeabilidade de sistemas binários	156

RESUMO

DALLA RIVA, Rogério Dias, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2010. **Efeitos das Propriedades Físicas dos Grãos da Fração Areia de Solos Arenosos e de Agentes de Cimentação no Comportamento de Sistemas Empacotados.** Orientador: Dario Cardoso de Lima. Co-orientadores: Cláudio Henrique de Carvalho Silva, Elpídio Inácio Fernandes Filho, João Herbert Moreira Viana e Liovando Marciano da Costa.

Este trabalho teve por objetivo estudar a relação das propriedades morfométricas da fração areia limpa de solos arenosos e esferas de vidro com os sistemas de empacotamento binário e ternário, assim como analisar a influência de fenômenos de cimentação na resistência mecânica destes sistemas. Foram avaliados os seguintes tópicos: (i) sistemas de empacotamentos binários e ternários; (ii) permeabilidade em sistemas binários e ternários; (iii) resistência à penetração em sistemas binários e ternários; (iv) resistência à penetração em sistemas binários sujeitos à ação de agentes de cimentação (cal hidratada e óxido de ferro); e (v) modelagem matemática dos empacotamentos, permeabilidade e resistência à penetração em sistemas empacotados, procurando-se determinar similaridades estatísticas em testes de identidade de modelos. Foram utilizadas esferas de vidro e frações areia limpa de quatro solos coletados no Estado de Minas Gerais. 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 2,000 e 0,053 mm. Os resultados obtidos permitiram concluir que: (i) 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 estudados; (ii) maiores eficiências

de empacotamentos binários ocorreram em relações D/d próximas de 7; (iii) as densidades máximas de empacotamento obtidas em diferentes razões D/d permitiram ajuste dos dados pela utilização de um modelo hiperbólico; (iv) houve similaridade entre empacotamentos ternários realizados com as esferas de vidro e as frações areia dos solos estudados; (v) o coeficiente de permeabilidade foi fortemente influenciado pela natureza das partículas envolvidas nos empacotamentos binário e ternário; (vi) o coeficiente de permeabilidade obtido em diferentes razões D/d permitiu um ajuste dos dados pela utilização de um modelo hiperbólico; (vii) a resistência de ponta obtida em função da profundidade de penetração permitiu um ajuste dos dados pela utilização de um modelo hiperbólico; (viii) a cimentação por cal hidratada elevou significativamente a resistência de ponta em empacotamentos binários, na razão $D/d = 8,0$; e (ix) a cimentação por óxido de ferro elevou significativamente a resistência de ponta em empacotamentos binários, na razão $D/d = 8,0$ para a fração areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP) e Sete Lagoas (SL).

ABSTRACT

DALLA RIVA, Rogério Dias, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2010.
Effects of Physical Properties of the Grains of Sand Fraction of Sandy Soils and Cementation Agents in Packing Systems Behavior. Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-advisors: Claudio Henrique de Carvalho Silva, Elpídio Inácio Fernandes Moreira Filho, John Herbert Viana and Liovando Marciano da Costa.

This work addressed the study of the relationship of morphometric properties of clean sand fraction of sandy soils and glass spheres with binary and ternary packing systems, as well as analyzed the influence of cementing phenomena in the mechanical strength of these systems. The research encompassed the following aspects: (i) binary and ternary packing systems; (ii) permeability in binary and ternary packing systems; (iii) tip penetration resistance in binary and ternary packing systems; (iv) tip penetration resistance in binary systems subject to action of cementation agents (hydrated lime and iron oxide); and (v) mathematical modeling of packing systems and of permeability and tip penetration resistance of packing systems, looking for statistical similarities based on model identity tests. Glass spheres and clean sand fractions of four soils collected in the State of Minas Gerais were used throughout the study. 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 2.000 to 0.053 mm. Results obtained supported the following conclusions: (I) the binary packing systems reached a point of maximum density using approximately 30% of smaller particles of glass spheres and clean sand fractions of the tested soils; (ii) relationships of D/d next to 7 were responsible for greater binary packing systems efficiency; (iii) a hyperbolic model was used to fit the maximum packing

density data obtained from different relationships D/d ; (iv) in ternary packing systems, it was observed behavioral similarity using glass spheres and clean sand fractions of the studied soils; (v) regarding binary and ternary packing systems, the coefficient of permeability was strongly influenced by the nature of the particles; (vi) a hyperbolic model was used to adjust the permeability coefficient obtained using different relationships D/d ; (vii) a hyperbolic model was also used to model the variation of tip penetration resistance with depth; (viii) considering the relationship D/d equal 8, the cementation produced by hydrated lime significantly raised the tip penetration resistance of binary packing systems; and (ix) regarding the clean sand fractions of soils Cachoeira da Prata (CP) and Sete Lagoas (SL) and using the ratio D/d equal 8, the cementation by iron oxide significantly raised the tip penetration resistance of binary packing systems.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O interesse em fenômenos de empacotamentos de partículas advém de diversos campos do conhecimento e atravessa vários séculos, sendo o primeiro estudo atribuído a Kepler, em 1611. Empacotamentos densos são desejáveis, por exemplo, na obtenção de composições otimizadas de concreto, misturas asfálticas, fundações, cerâmicas estruturais, eletrônica e otimização de processos de fundição, enquanto que empacotamentos de baixa densidade são necessários, por exemplo, na produção de revestimentos isolantes térmicos, crescimento radicular de plantas, dentre outras aplicações.

Observa-se, pois, que estudos envolvendo empacotamentos provêm de áreas diversas. Como consequência dessa diversidade, há vários trabalhos dirigidos a empacotamentos de partículas, especialmente de esferas, porém sem a necessária troca de informações entre os pesquisadores sendo que, não raro, pesquisas têm sido direcionadas ao mesmo objetivo, porém, com enfoques diferentes.

O processo de densificação de um solo granular não depende somente da granulometria desta fração, mas também do arranjo das partículas. Na Ciência do Solo, por exemplo, a ação vibratória ocasionada pelo manejo faz com que os grãos maiores oscilem em torno de seu eixo, permitindo que os grãos menores penetrem nos interstícios e, conseqüentemente, reduzam o espaço poroso do sistema, produzindo um melhor rearranjo das partículas. Altas densidades criam problemas em muitos solos agricultáveis, pois solos

compactados podem apresentar baixas taxas de infiltração e incidir em redução no crescimento de raízes e brotos. A susceptibilidade de um dado solo à compactação ou adensamento é dependente de várias propriedades, sendo as mais significantes a distribuição das partículas, o conteúdo de matéria orgânica e o conteúdo de água. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para a predição da densidade de empacotamento baseados em uma ou mais dessas propriedades, como destacam Bodman & Constantin (1965) e Gupta & Larson (1979).

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 poderia ser vista somente em termos de densidade ou densidade relativa, como vinha sendo feito até aquele momento, sendo também necessário considerar o arranjo de partículas e o histórico de tensões desses materiais. Assim, propriedades como resistência ao cisalhamento, condutividade hidráulica e compressibilidade podem ser determinadas pelo tamanho e forma das partículas, seus arranjos e as forças existentes entre elas, sendo que o conhecimento destas propriedades requer estudos mais detalhados destes fatores (Mitchell, 1993).

Comumente, os efeitos ocasionados pela morfologia da partícula não têm sido explicitamente considerados na descrição do comportamento geotécnico dos solos granulares. A utilização de variáveis quantitativas para explicar algumas propriedades físicas e geotécnicas do solo intimamente relacionadas à forma da partícula, tais como densidade, porosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica, curvas de retenção de água e resultados de ensaios de cisalhamento direto e triaxial podem revelar um novo enfoque para a sua explicação.

Seja em aplicações geotécnicas, seja em aplicações agrícolas, o conhecimento básico sobre a compactação de solos arenosos é limitado sendo, primeiro, necessário entender o comportamento físico de sistemas simples, como esferas de vidro e areias, antes que possam ser consideradas as modificações produzidas em resposta a outras variáveis. O entendimento

desses sistemas simplificados auxilia na formação de uma base teórica para a compreensão de sistemas mais complexos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo geral deste projeto de pesquisa foi estudar a relação das propriedades morfométricas da fração areia limpa de solos arenosos e esferas de vidro com os sistemas de empacotamento binário e ternário, assim como analisar a influência de fenômenos de cimentação na resistência mecânica destes sistemas.

1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos foram definidos como segue:

- caracterizar os atributos morfológicos das frações areia de solos arenosos;
- estabelecer curvas de empacotamento para sistemas binários e ternários para as frações areia desses solos e esferas de vidro;
- estudar a influência de agentes de cimentação natural e artificial nos fenômenos de empacotamentos binário e ternário das frações areia desses materiais;
- caracterizar a resistência mecânica e permeabilidade das frações areia sob diferentes condições de empacotamento e cimentação; e
- desenvolver estudos estatísticos, para fins da estimativa de modelos que descrevessem a influência das propriedades físicas e dos agentes de cimentação na estruturação dos materiais considerados.

1.3 Justificativa

Historicamente, nos estudos geotécnicos de solos granulares, especificamente dos solos arenosos, os efeitos ocasionados na estrutura pela morfologia das partículas e fenômenos de cimentação não têm sido explicitamente considerados, podendo o presente estudo revelar novo enfoque para o entendimento do comportamento mecânico destes materiais.

Outra vertente com interesse no fenômeno de empacotamento em solos arenosos é a área agronômica, na qual se tem conhecimento de que o mesmo é afetado significativamente pelas variáveis tamanho e distribuição das partículas, esfericidade, arredondamento e rugosidade da superfície dos grãos de areia. Em solos granulares agricultáveis, por exemplo, materiais compactados podem resultar em baixas taxas de infiltração e redução no crescimento de raízes e parte aérea das plantas.

Assim, tanto na área da Engenharia Civil como na Engenharia Agronômica é de interesse desenvolver estudos sobre sistemas de empacotamento em solos granulares, que foi o objeto do presente trabalho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O solo

O conceito de solo varia em função da sua utilização, sendo intrínseca a cada especialidade do conhecimento. Assim, para o agrônomo, o solo é a superfície não consolidada que recobre as rochas e mantém a vida animal e vegetal da Terra (Vieira, 1988), sendo resultante da ação conjugada de agentes intempéricos sobre os materiais pré-existentes de natureza mineral e orgânica. Para o engenheiro civil, é o material que serve para a base ou fundação de obras civis; para o geólogo, o solo é visto como o produto da alteração das rochas na superfície e, para o arqueólogo, é o material fundamental para as suas pesquisas, por servir de registro de civilizações pretéritas; já para o hidrólogo, o solo é simplesmente o meio poroso que abriga reservatórios de águas subterrâneas (Toledo et al., 2000). Dessa forma, cada uma das especialidades tem uma definição que atende a seus objetivos, ajustando-se conforme a área de conhecimento e de aplicação.

2.2 Intemperismo e formação do solo

O intemperismo é o conjunto de modificações de ordem física e química que as rochas sofrem ao aflorar na superfície da Terra (Lepsch, 2002). Podem ser de natureza física (intemperismo físico ou desintegração), quando agindo no sentido de alterar o tamanho e formato dos minerais, ou de natureza química (intemperismo químico ou decomposição), quando há modificação da composição química. Após ser alterada por processos intempéricos, a rocha denomina-se regolito ou manto de intemperização, formando uma camada que recobre as que estão em vias de decomposição. É na parte mais superficial do

regolito que se dá a formação do solo. Sob a ação de um conjunto de fenômenos biológicos, físicos e químicos, o solo começa a se formar (pedogênese), se organizando em uma série de camadas sobrepostas (perfil de alteração ou perfil de solo) de aspecto e constituição diferentes, sendo aproximadamente paralelas à superfície e denominadas de horizontes. Em uma visão pedológica, a Figura 1 apresenta um perfil de alteração ou perfil de solo típico, constituído, da base para o topo, pela rocha inalterada, saprolito e solum, compreendendo este último os horizontes afetados pela pedogênese (horizontes O, A, E e B); por outro lado, o solo compreende o saprolito (horizonte C) e o solum, segundo Toledo et al. (2000).

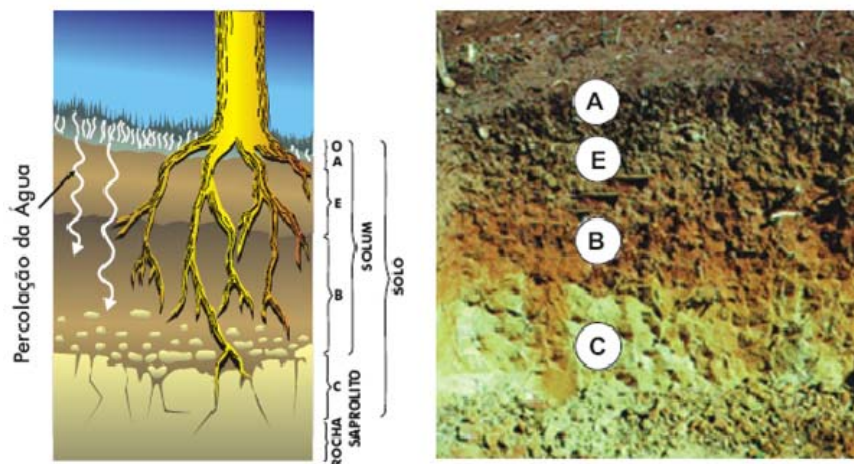


Figura 1: Perfil típico de alteração, sob o prisma pedológico (Toledo et al., 2000).

Segundo Reichardt & Timm (2004), reconhecem-se cinco fatores na formação do solo: material original (rocha matriz) *M*; tempo (idade) *I*; clima *C*; topografia *T*; e organismos vivos *O*. Utilizando-se uma linguagem matemática expressa pela Equação (1), pode-se afirmar que:

$$\text{Solo} = f(M, I, C, T, O) \quad (1)$$

Para Lepsch (2002), o perfil completo de um solo bem desenvolvido possui, basicamente, horizontes principais que são, convencionalmente, identificados pelas letras maiúsculas O, A, E, B e C. No Quadro 1 são apresentadas as descrições desses horizontes.

Quadro 1: Descrição dos horizontes

Horizonte	Descrição
C	Horizonte de rocha alterada (saprolito)
B	Horizonte de acumulação de argila, matéria orgânica e oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio
E	Horizonte mais claro, marcado pela remoção de partículas argilosas, matéria orgânica e oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio
A	Horizonte escuro, com matéria mineral e orgânica e alta atividade biológica
O	Horizonte rico em restos orgânicos em vias de decomposição

Fonte: Toledo et al. (2000).

Por outro lado, geotecnicaamente, é comum se designar os horizontes compreendidos até o B como horizonte superficial ou horizonte pedogenético e o material como solo superficial, como destacam Nogami & Villibor (1995). Esses autores referem-se ao termo solo saprolítico como o material resultante da decomposição e/ou desagregação “*in situ*” do material consolidado da crosta terrestre, a rocha, mas que mantém a estrutura da rocha matriz. Destacam, também, que o solo saprolítico é genuinamente residual, sendo comum o uso da designação de solo residual jovem, bem como que se tem o emprego do termo solo residual maduro para se designar o solo pedogenético sobrejacente ao residual jovem.

Em uma visão genética, Nogami & Villibor (1995) ilustram as ocorrências de solos tropicais, objeto do presente estudo, como estruturas que apresentam grande espessura do horizonte superficial, em geral, com mais de 1 m e podendo ultrapassar uma dezena de metros, e grande espessura do horizonte saprolítico, muitas vezes da ordem de dezenas de metros, bem como presença freqüente de solos transportados cenozóicos de origem fluvial ou flúvio-lacustre, freqüentemente, em locais mais elevados.

2.3 Morfologia

Ao estudo da aparência do solo no meio ambiente natural, descrita segundo características visíveis a olho nu, ou prontamente perceptível, denomina-se morfologia do solo. A identificação do solo é realizada pelo conjunto de suas características morfológicas em conjunto com análises de laboratório destacando-se, constituição, cor, textura, estrutura, cerosidade, porosidade, consistência, cimentação, pedoclima e pedoforma. O conhecimento de algumas dessas propriedades, tais como constituição, textura, estrutura e porosidade é de fundamental importância em estudos de empacotamento de solos.

2.3.1 Constituição

O solo é constituído por sólidos (minerais e matéria orgânica) e poros (ocupados por água e ar). A quantidade dos materiais orgânicos pode variar entre tipos de solo, bem como entre horizontes de um mesmo perfil. A proporção de água e ar varia dependendo das condições às quais os solos estão submetidos. Na Figura 2 se ilustra um croqui esquemático da composição do horizonte A, segundo a visão de Hillel (1998).

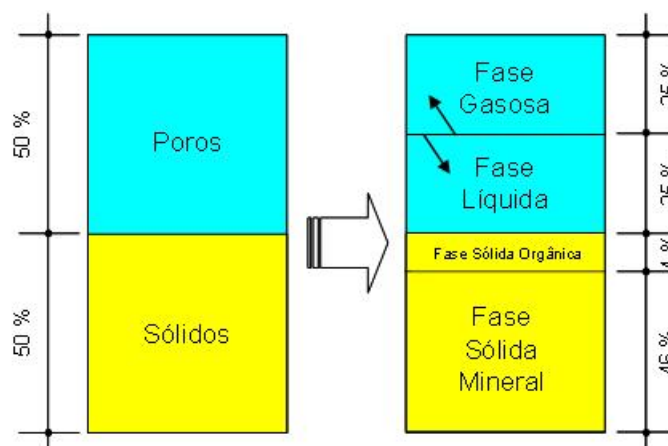


Figura 2: Esquema da composição do horizonte A de um solo quando em boas condições para o crescimento das plantas. A proporção de ar e água dos poros é variável (Hillel, 1998).

2.3.1.1 Matéria mineral

Os minerais do solo, classificados em primários ou secundários, são muito variáveis em termos de tamanho, sendo constituídos de materiais de dimensões variáveis, desde partículas coloidais de argila, visíveis com auxílio de microscopia eletrônica, até fragmentos rochosos.

A areia e o silte, que aparecem nas frações grossa e intermediária do solo, são denominados minerais primários ou minerais originais, pois advêm diretamente de minerais mais resistentes ao intemperismo químico e, por isso, permanecem mais tempo no solo, mantendo sua composição original, mas podendo se fragmentar pela ação do intemperismo físico e químico.

Por outro lado, os minerais formados pelo intemperismo de materiais menos resistentes são denominados de minerais secundários ou pedogênicos, resultantes da decomposição da rocha-mãe, com maior susceptibilidade de alteração e ocupando as frações finas do solo, como as argilas silicatadas e os óxidos de Fe e Al, em composições totalmente distintas da rocha matriz. Segundo Resende et al. (2002), a parte inorgânica do solo é dividida com base no tamanho das partículas conforme disposto no Quadro 2, enquanto que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995) emprega a divisão apresentada no Quadro 3.

Quadro 2: Tamanho das partículas do solo

Partícula	Diâmetro equivalente (mm)
Matacões	> 200
Calhaus	200 – 20
Cascalhos	20 – 2
Areia grossa	2 - 0,20
Areia fina	0,20 - 0,05
Silte	0,05 - 0,002
Argila	< 0,002

Fonte: Resende et al. (2002).

Quadro 3: Tamanho das partículas do solo

Partícula	Diâmetro equivalente (mm)
Pedregulho	Entre 60 e 2
Areia	Entre 2 e 0,06
Silte	Entre 0,06 e 0,002
Argila	Menor que 0,002

Fonte: ABNT (1995).

2.3.1.2 Matéria orgânica

Segundo Lepsch (2002), a matéria orgânica do solo é proveniente da adição de restos de origem vegetal (folhas, raízes, caules, frutas e outros detritos vegetais), além de produtos de origem animal, como os corpos de vermes e de micróbios, bem como esterco, sendo esses os principais tipos de adição. A adição de matéria orgânica pode ser de origem natural (reciclagem dos vegetais), bem como artificial (adição de esterco e palha nos cultivos).

O húmus é o resultado da decomposição dos restos orgânicos, o qual libera nutrientes minerais ao solo, por processos de mineralização. Pequenas quantidades de húmus aumentam significativamente as características dinâmicas do solo, devido à sua maior capacidade de adsorver e ceder nutrientes em relação à argila. Por esse motivo, pedologicamente, o húmus é considerado de vital importância para a vida no solo.

Ressalta-se que certas substâncias provenientes da decomposição dos restos orgânicos servem de agentes de cimentação na formação dos agregados do solo, modificando as suas características físicas, principalmente a permeabilidade, a porosidade e a retenção de água.

2.3.1.3 Água do solo

Também chamada de solução do solo, contém, além da água, diversos íons importantes para a descrição do comportamento geotécnico dos solos e para a nutrição das plantas. A água do solo ocupa parte dos seus

espaços porosos, sendo retida em diferentes níveis, dependendo da quantidade existente e do tamanho dos poros.

Segundo Lepsch (2002), de acordo com o conteúdo e a natureza da retenção de água, sob o prisma da Ciência do Solo se reconhecem três estados de água do solo, denominados molhado, úmido e seco, como se apresenta na Figura 3.

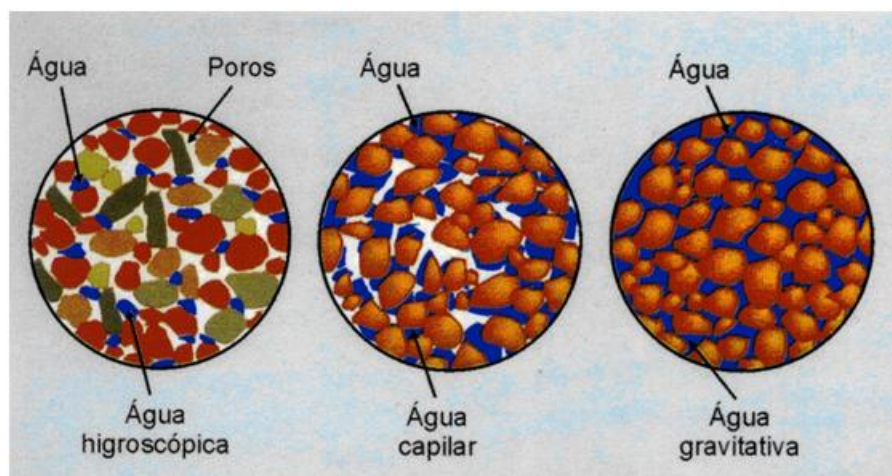


Figura 3: Formas de água no solo, sendo que a água higroscópica forma uma película fina que envolve as partículas, enquanto que a água capilar preenche os poros menores (poros capilares) e a água gravitativa os poros maiores do solo (Lepsch, 2002).

No solo saturado, todos os poros são preenchidos com água e o ar está praticamente ausente. Nessa condição, o líquido que está contido nos poros maiores drena para baixo, ou lateralmente, juntando-se aos lençóis d'água. Essa água é denominada gravitativa, porque se infiltra no solo sob a ação da gravidade.

Cessado o processo de infiltração da água gravitativa, o solo recebe a denominação de úmido (ou não saturado), no qual os poros maiores que 0,05 mm, denominados de macroporos, são compostos de ar e os poros menores que 0,05 mm, denominados de microporos, ficam com água retida. Esses poros menores funcionam como tubos finos, sendo chamados de capilares, referindo-se ao líquido contido neles como água capilar. Como a

água capilar fica retida no solo por mais tempo, ela pode ser extraída pelas raízes, representando um armazenamento à disposição das plantas, sendo por isso denominada de água disponível. A capacidade de armazenamento é alterada em função de algumas características, tais como textura, tipo de argila, estrutura e conteúdo de matéria orgânica. Solos arenosos, em geral, e com pouco húmus têm menor capacidade de armazenar água disponível do que os argilosos ou de textura média, ricos em húmus.

Mesmo depois de seco, o solo pode conter ainda certa quantidade de água, mas sob a forma de películas extremamente finas, ao redor das partículas coloidais. Essa água é retida com força superior à capacidade de extração das raízes e das plantas e, por essa razão, é denominada água inativa ou água higroscópica.

Geotecnicamente, os solos podem ser subdivididos em saturados e não saturados. Os solos saturados são abordados pela Mecânica dos Solos Clássica ou Mecânica dos Solos dos Estados Críticos que, segundo Leroueil (1997), encontra os seus fundamentos nas contribuições originais de Terzaghi, Casagrande e Hvorslev, com visualização da significância do parâmetro índice de vazios no comportamento geotécnico e do fato de que a compressão ao longo da linha de compressão normal é basicamente irreversível, enquanto que as deformações são reversíveis ao longo das linhas de expansão e recompressão do solo. Segundo esse autor, entretanto, no final das décadas de 50 e 60, já se havia mostrado, também, que existem aspectos importantes do comportamento do solo que não podem ser descritos apenas pelos conceitos de estado crítico, como as componentes de resistência e rigidez que não podem ser explicadas unicamente à luz dos conceitos de porosidade inicial e histórico de tensões em que se fundamenta a Mecânica dos Solos Clássica.

Em geral, solos não saturados têm uma resistência ao cisalhamento maior que aquela do mesmo solo saturado. Fredlund (1987) entende que a resistência ao cisalhamento desses solos pode ser expressa como uma função linear da tensão normal líquida, designada por $(\sigma_n - u_a)$, e da sucção matricial, designada por $(u_a - u_w)$, conforme a Equação (2). Esta equação é,

esquemáticamente, representada na Figura 4, onde o termo $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ surge na forma de uma coesão devido à sucção.

$$\tau' = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

Nesta equação: τ' : resistência ao cisalhamento do solo em termos de tensões efetivas; c' : coesão efetiva do solo; σ_n : tensão normal total; u_a : pressão do ar nos poros do solo; ϕ' : ângulo de atrito efetivo do solo; u_w : poro-pressão; $\tan \phi^b$: parâmetro de resistência associado com a matriz de sucção; ϕ^b : ângulo que indica a taxa de crescimento de τ' em relação à sucção matricial; $(\sigma_n - u_a)$: tensão normal líquida; e $(u_a - u_w)$: sucção matricial.

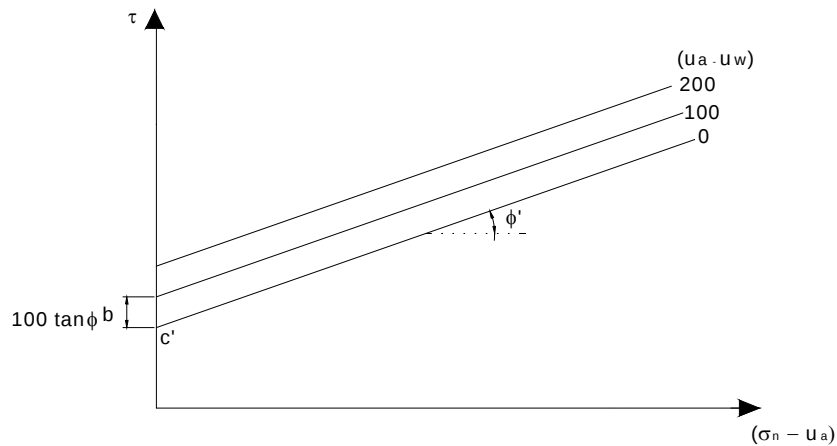


Figura 4: Resistência ao cisalhamento de solos não-saturados (Fredlund et al., 1978).

Segundo Leroueil (1997), evidências experimentais mostram que a Equação (2) é válida para uma gama significativa de solos não-saturados, geralmente, nos intervalos limites de $(u_a - u_w)$ e de $(\sigma_n - u_a)$. Exemplos de abordagens relativamente recentes sobre a previsão da resistência ao cisalhamento dos solos não saturados a partir, também, de informações obtidas nas curvas características dos solos são Fredlund et al. (1995a e 1995b) e Vanapalli et al. (1996).

2.3.1.4 Ar do solo

Denomina-se ar do solo à mistura gasosa que preenche o volume não ocupado por sólidos e líquidos. O ar situa-se nos macroporos e microporos e pode ser encontrado na forma livre ou subdividido em pequenas bolhas dissolvidas na água, existindo uma relação dinâmica entre as fases líquida e gasosa do solo. À medida que o volume de água aumenta, há um decréscimo no volume de ar, variando a sua quantidade em função do tempo.

A composição do ar depende das condições de aeração, ou seja, da troca gasosa entre o ar do solo e o ar atmosférico. Assim sendo, a renovação da composição do ar do solo tende a se igualar à composição do ar atmosférico. A velocidade de aeração depende fundamentalmente do diâmetro e da continuidade dos poros no solo, sendo sua composição influenciada pela forma e dimensões do sistema poroso. Qualitativamente, a composição do ar do solo é semelhante à composição do ar atmosférico; contudo, a composição destas duas atmosferas pode ser bastante diferente, conforme se apresenta no Quadro 4 .

Quadro 4: Composição do ar do solo e do ar atmosférico

Atmosfera	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O (umidade relativa)
	%			
Livre	20,90	0,03	78,90	Variável
do Solo	19,60	0,90	79,50	≈ 100

Fonte: Adaptado de Reichardt & Timm (2004).

A aeração pode ser por fluxo de massa em resposta à chuva e à irrigação, mudanças de temperatura do ar do solo, variação na velocidade do vento na superfície do solo e flutuações na pressão barométrica, sendo por isto considerado um processo esporádico, ou por difusão, de forma contínua, por diferença de pressão entre o ar do solo e o ar atmosférico.

2.3.2 Textura

O termo textura refere-se à distribuição das partículas do solo tão somente quanto ao seu tamanho, como destaca Mitchell (1993). Para que possam ser convenientemente estudadas, essas partículas são agrupadas em classes de tamanhos, denominadas de frações do solo. Por exemplo, em Pedologia as partículas do solo são divididas em três frações de tamanho, chamadas frações texturais, como se ilustra na Figura 5 (Hillel, 1998).

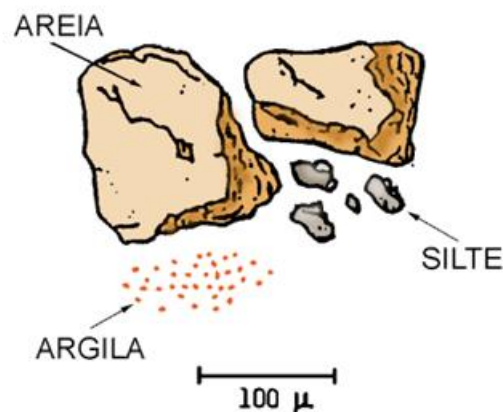


Figura 5: Diferenças proporcionais entre as frações areia, silte e argila (Hillel, 1998).

Assim, cada solo recebe uma designação referente à sua textura, fornecendo uma idéia do tamanho das partículas constituintes mais freqüentes. Diversos sistemas de classificação já foram propostos, baseados em limites arbitrários de separação entre as frações. Contudo, eles seguem determinados princípios básicos, especialmente quanto à capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica, movimento capilar e mineralogia.

No Brasil, geotecnicaamente, é comum o emprego da classificação granulométrica adotada pela ABNT, de cunho da Mecânica dos Solos, e pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT, 2006), de cunho rodoviário, como se apresenta no Quadro 5.

Quadro 5: Classificações granulométricas de cunho geotécnico

Partícula	ABNT	DNIT
	(diâmetro equivalente em mm)	(diâmetro equivalente em mm)
Pedregulho	Entre 60 e 2	Entre 76 e 2
Areia	Entre 2 e 0,06	Entre 2 e 0,075
Silte	Entre 0,06 e 0,002	Entre 0,075 e 0,005
Argila	Menor do que 0,002	Menor do que 0,005

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

2.3.3 Estrutura

Pedologicamente, a estrutura de um solo é o arranjo ou ordenação das suas partículas primárias (areia, argila, silte) e secundárias (agregados) em modelos ou padrões estruturais incluindo, necessariamente, o espaço poroso acompanhante (Baver, 1956). Devido às diferenças em forma, tamanho e orientação das partículas, aliada às suas diversas associações e interconexões, podem-se formar padrões estruturais complexos e irregulares, dificultando a caracterização geométrica da estrutura do solo (Hillel, 1998). Além disso, devido à natureza dinâmica da estrutura do solo, ela 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. Como os espaços porosos têm importância no solo, assim como as partículas sólidas, a estrutura do solo pode também ser definida como o arranjo de poros pequenos, médios e grandes dentro de um padrão estrutural (Kohnke, 1968). Pode-se referir à estrutura do solo em função da agregação das suas partículas primárias em unidades compostas ou agrupamentos de partículas primárias, que são separadas de agregados adjacentes por superfícies de fraca resistência. Comumente, classifica-se a estrutura de um solo em função das características morfológicas dos agregados individualizados, considerando-se o tipo, classe e grau de estrutura. A estrutura pode ser laminar, prismática, em blocos ou granular, como se apresenta na Figura 6 (Hillel, 1998).

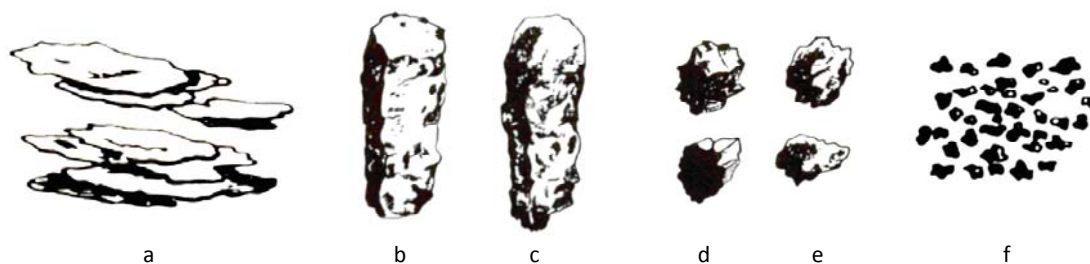


Figura 6: Classificação da estrutura do solo segundo uma visão pedológica baseada na forma dos agregados (Hillel, 1998): (a) laminar; (b) prismática; (c) colunar; (d) bloco angular; (e) bloco subangular; e (f) granular.

Na Figura 6, definições são como segue:

- a: estrutura laminar, com partículas arranjadas em torno de um plano horizontal, apresentando aspecto de lâminas de espessura variável;
- b: partículas arranjadas em torno de uma linha vertical dominante, com estrutura alongada, formada geralmente de agregados menores em blocos, com o topo apresentando quinas vivas;
- c: forma similar à prismática, diferenciando-se em relação à parte superior, que é arredondada;
- d: as três dimensões da unidade estrutural são, aproximadamente, iguais, com faces planas e maioria dos vértices com ângulos vivos;
- e: estrutura semelhante à anterior, com mistura de faces arredondadas e planas e muitos vértices arredondados; e
- f: partículas arranjadas em torno de um ponto, como na estrutura em blocos, diferenciando-se por apresentar forma arredondada, sem faces de contato; denomina-se estrutura granular se as unidades estruturais não apresentarem porosidade, sendo que em caso contrário, tem-se uma estrutura grumosa.

As classes de estrutura são determinadas em função do tamanho ou das dimensões dos agregados, medindo-os de maneira individualizada, ou comparando-os com padrões de referência. Dividem-se em cinco classes: muito pequena, pequena, média, grande e muito grande, com seus limites

variando de acordo com o tipo de estrutura, podendo ir de 1 mm até 100 mm (Fontes, 1992).

Os graus de estrutura levam em consideração as condições de coesão dentro e fora dos agregados, como se mostra no Quadro 6 (Hillel, 1998), relacionando-se com a resistência mecânica que o solo apresenta à individualização dos agregados. Classificam-se como sem estrutura e com estrutura.

Quadro 6: Características dos graus de estrutura (Hillel, 1998)

Grau de estrutura	Definição
Sem estrutura:	Não se observa qualquer agregação entre as partículas do solo
a) Grão simples	Partículas não coerentes, isoladas
b) Maciça	Partículas reunidas, formando uma massa, com coesão uniforme
Com estrutura:	Constatam-se agregados mais ou menos distintos ao se destorroar o solo
a) Fraca	Agregados indistintos e fracamente formados
b) Moderada	Unidades bem formadas, moderadamente resistentes, mas não muito distintas
c) Forte	Agregados firmes, bem distintos na parede do perfil e que aderem fracamente uns aos outros

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. Texturalmente, os solos podem ser classificados como granulares ou coesivos, segundo terminologia empregada por Lambe & Whitman (1969).

Segundo Lima (1981), dada a enorme desproporção entre as massas das partículas e de água nos solos granulares, é comum desprezar-se o efeito desta última na sua resistência ao cisalhamento ou considerá-lo de segunda ordem; nos solos coesivos, a fração líquida é considerável em relação à massa total do sistema e passa a ser, pelo seu potencial eletroquímico, um elemento

significativo para a definição do comportamento mecânico destes materiais. Sobre esse tema, Melo (1985) considera que os solos granulares apresentam partículas com geometrias diferentes da forma lamelar em consequência de que, em suas redes iônicas, os planos de menor resistência, que condicionam os fenômenos de fraturação, não são mais paralelos, como no caso das argilas decrescendo, pois, a influência dos fenômenos elétricos de superfície. Assim, o comportamento desses materiais passa a ser, majoritariamente, governado por aspectos regidos pelo peso próprio diferenciando-os, significativamente, do comportamento dos solos coesivos.

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, pode-se referir à criação de dois grupos de modelos extremos que representam os 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; e no outro, 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 mecanismos e reações a eventuais solicitações impostas aos solos.

Destaca-se que Mitchell (1993) faz uma distinção entre os termos *fabric*, definido como o arranjo das partículas de um solo, designando assim a organização espacial das partículas, grupos de partículas e espaço poroso em um solo, e *estrutura*, que representa o efeito combinado desse arranjo, da composição e do sistema de forças interpartículas. Segundo esse autor, algumas vezes ambos os termos são usados de forma intercambiável, embora seja preferível empregá-los para designarem aspectos distintos dos solos.

2.3.4 Porosidade

A porosidade do solo, também denominada de porosidade total, é a proporção do volume do solo não ocupado por partículas sólidas, incluindo todo o espaço poroso ocupado pelo ar e água, podendo ser expressa pela Equação (3).

$$P = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_{ar} + V_{água}}{V_t} \quad (3)$$

Nesta equação: P = porosidade total [$L^3 L^{-3}$]; 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 $V_{água}$ = volume ocupado pela parte líquida do solo [L^3].

Segundo Ferreira & Dias Júnior (2001), o arranjo ou a geometria das partículas do solo determinam a quantidade e a natureza dos poros existentes. Como as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, os poros diferem, consideravelmente, quanto à forma, comprimento, largura e tortuosidade.

A importância da caracterização de sistemas porosos se dá em estudos que envolvem armazenamento e movimento de água e gases, desenvolvimento radicular de plantas, fluxo e retenção de calor e em investigações da resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade dos solos. Contudo, a determinação da porosidade total, por si só, é de caráter limitado, pois não considera a distribuição dos microporos (poros com diâmetro < 0,05 mm) e macroporos (poros com diâmetro > 0,05 mm) do solo.

Em um determinado solo, a distribuição de poros por tamanho é função da textura e da estrutura do solo. Os solos arenosos, por não apresentarem agregados, possuem predominância de macroporos. Contudo, quando há predominância de areias muitas finas, de granulometria uniforme, próxima à região limite entre as frações areia e silte, o comportamento pode diferir do esperado para a fração areia, em geral. Portanto, qualquer análise

quanto ao comportamento de solos arenosos deve ser feita com cautela, pois partículas situadas próximas à região de transição entre a fração areia e a fração silte podem-se comportar ora com características de areias, ora com características de silte.

Métodos baseados na retenção de água em tubos capilares são utilizados para a distribuição de poros por tamanho, fazendo uso da Equação (4):

$$h = \frac{2\tau \cos \theta}{\rho g r} \quad (4)$$

Nesta equação: h = altura de ascensão da água no tubo capilar [L]; τ = tensão superficial da água [MT^{-2}]; θ = ângulo de contato da água com a parede do capilar; ρ = densidade da água [L^{-3}M]; g = aceleração da gravidade [LT^{-2}]; e r = raio do tubo capilar [L].

Admitindo-se a constância dos fatores τ , θ , ρ e g , pode-se reescrever a Equação (4) na forma abaixo, expressa pela Equação (5):

$$h = \frac{0,3}{d} \quad (5)$$

Nesta equação: h = altura da coluna d'água [L]; e d = diâmetro do tubo capilar ou do poro [L].

Substituindo-se na Equação (5) d por 0,05 mm, que é o limite arbitrado entre a macroporosidade e a microporosidade, chega-se ao valor de h igual a 60 cm, que determina a altura de sucção em uma amostra de solo para a retirada de água dos macroporos, sendo esta a metodologia empregada, por exemplo, em laboratórios de física dos solos para a determinação da distribuição de poros por tamanho.

2.4 Solos granulares

Pedologicamente, Kohnke (1968) denomina a estrutura de um solo granular de grãos simples, em que há pouca tendência dos grãos para adesão e formação de agregados. A estrutura denominada grãos simples ocorre normalmente somente em areias e siltes de baixa quantidade de matéria orgânica.

Com relação aos estudos de sistemas de arranjos de partículas em solos granulares, em geotecnia é comum se 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 se elaborarem equações constitutivas e analisar condições de ruptura (Farouki & Winterkorn, 1964). Segundo Lima et al. (1993), 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. Por outro lado, Mitchell (1993) refere-se à modelagem numérica dos solos granulares com base na distorsão elástica, escorregamento e rolamento de partículas, usualmente assumindo-se formas esféricas ou de disco para as mesmas, o que tem permitido avanços na análise do comportamento destes materiais.

2.4.1 Caracterização da fração areia

Segundo Ferreira & Dias Júnior (2001), a fração areia é solta, com grãos simples, não plástica, indeformável, não pegajosa, não higroscópica, com predominância de grandes poros em sua massa, sem coesão, com pequena superfície específica e capacidade de troca de cátions praticamente ausente. Os grãos são geralmente constituídos de quartzo, podendo possuir, segundo Hillel (1998), 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. O quartzo, ao contrário de outros minerais, praticamente não se decompõe, apenas se fragmenta e, por ser um mineral resistente, se encontra nas frações mais grosseiras do solo, em especial na fração arenosa. A densidade do quartzo situa-se entre 2,5 e 2,8 g cm⁻³ (Kohnke, 1968), com valor médio de 2,65 g cm⁻³; a possibilidade de inclusões no quartzo pode explicar essa variabilidade. Segundo Suguio (1980), as inclusões apresentam-se, geralmente, como vacúolos isolados ou fileiras de vacúolos preenchidos por líquido e/ou gás. Inclusões minerais são pouco comuns, sendo que análises mineralógicas são necessárias para a sua confirmação. 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.

2.5 Densidade relativa

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 desses 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.

Segundo Mitchell (1993), nos anos 70 pesquisas foram conduzidas com arranjos de partículas em solos granulares, concluindo-se que a caracterização das propriedades de areias e pedregulhos não devia ser vista somente em termos de densidade relativa sendo, também, necessário considerar o arranjo de partículas e o histórico de tensões destes materiais. Crescia, então, o entendimento de que determinadas propriedades, tais como resistência ao cisalhamento, permeabilidade e compressibilidade, podiam ser

determinadas pelo tamanho e forma das partículas, seus arranjos e as forças existentes entre elas. Assim sendo, o entendimento dessas propriedades requer o conhecimento mais detalhado desses fatores, trazendo à tona a importância de estudos morfológicos em solos granulares.

2.6 Morfologia de materiais granulares

A morfologia compreende o estudo da forma das partículas. Sedimentologistas, geralmente, expressam a forma da partícula em função da textura superficial, esfericidade e arredondamento, sendo suas análises realizadas, freqüentemente, 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, Wadel (1935) foi o primeiro a utilizá-la como padrão.

Quanto à textura superficial, esta é utilizada para descrever a superfície das partículas: polida, fosca, etc. Com relação à esfericidade, para muitos geólogos ela é conceitualmente definida como o “grau de aproximação” da área de uma partícula qualquer à área superficial de uma esfera com o mesmo volume da partícula (Suguio, 1980); por outro lado, o arredondamento é uma medida do grau de agudez ou curvatura dos cantos e arestas de uma partícula. Grãos de várias formas podem ter o mesmo grau de arredondamento sendo, por isto, um coeficiente mais ou menos independente da forma.

Um dos sistemas geológicos mais comuns de classificação de forma é a escala de arredondamento de Powers (1953), para formas de partículas sedimentares, como se apresenta na Figura 7. Assim como diversas escalas propostas, a escala de Powers 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.

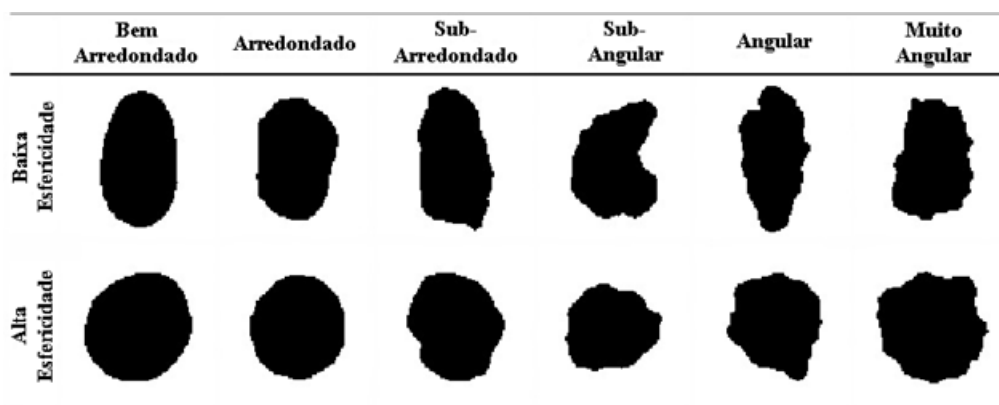


Figura 7: Escala de arredondamento (esfericidade) e angularidade (Powers, 1953).

Pettijohn (1949) definiu classes de arredondamento com descrições detalhadas para que as partículas pudessem ser classificadas visualmente. Usando como referência os trabalhos de Russel & Taylor (1937) e Pettijohn (1949), Powers (1953) introduziu uma nova escala para partículas sedimentares. O Quadro 7 mostra o grau de arredondamento proposto por Russel & Taylor (1937) e Pettijohn (1949) e o Quadro 8 mostra o grau de arredondamento introduzido por Powers (1953).

Quadro 7: Classificação do arredondamento de acordo com Russel & Taylor (1937) e Pettijohn (1949)

Classificação	Limites da classe			
	Russel & Taylor	Ponto médio	Pettijohn	Ponto médio
Angular	0,00 - 0,15	0,075	0,00 - 0,15	0,125
Sub-angular	0,15 - 0,30	0,225	0,15 - 0,25	0,200
Sub-arredondado	0,30 - 0,50	0,400	0,25 - 0,40	0,315
Arredondado	0,50 - 0,70	0,600	0,40 - 0,60	0,500
Bem arredondado	0,70 - 1,00	0,850	0,60 - 1,00	0,800

Fonte: Pettijohn (1949).

Quadro 8: 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: Alshibli & Alsaleh (2004).

Em geral, a forma de partículas granulares é descrita por muitos fatores de forma (Bouwman et al., 2004). Um fator de forma é um número que caracteriza a forma da partícula, podendo ser obtido, em muitos casos, de uma imagem capturada com o auxílio de um microscópio, câmara digital, ou uma combinação de ambos ou, ainda, por outros meios. Os fatores de forma têm em comum a variação entre 0 e 1, sendo que a unidade representa a esfera.

Vale lembrar que as imagens obtidas com auxílio de microscópio são bidimensionais, podendo ser utilizadas para inferir sobre aspectos tridimensionais da partícula. Contudo, como as partículas tendem a ficar na posição planar mais estável, a imagem obtida mostra a maior área projetada, que é utilizada para a obtenção dos fatores de forma. Segundo Friedman & Robinson (2002), quando se lida com materiais granulares que apresentam similaridade com a forma esférica, é sensato assumirmos que a imagem bidimensional projetada seja uma aproximação confiável de sua forma tridimensional.

Em termos estruturais, Pinto (2002) considera que o formato dos grãos de areia tem muita importância no comportamento mecânico dos solos granulares, pois determina como eles se encaixam e se entrosam e, em contrapartida, como eles deslizam entre si, quando estes materiais são solicitados por forças externas. Contudo, a importância da forma do grão no comportamento mecânico das areias ainda não é bem reconhecida (Yudhbir & Abedinzadeh, 1991), sendo dada pouca atenção a este aspecto na

identificação e classificação das areias, por não se dispor de índices numéricos simples para expressar o formato. Tal fato reside na aparente dificuldade de se observar o aspecto superficial dos grãos e na ausência de metodologia padronizada para a obtenção desses índices, pois é um trabalho que envolve numerosas leituras para a validação estatística da caracterização da forma, juntamente com o tempo gasto no procedimento de captura das imagens.

A título de ilustração, destaca-se que na engenharia civil, tecnologias de imageamento foram implementadas na detecção e análise de defeitos de pavimentos, avaliação de condições estruturais, transporte de sedimentos, transporte de contaminantes em meio poroso, deformação do solo, distribuição granulométrica de partículas, análises de forma de partículas e simulação de agrupamentos de materiais granulares (Masad & Sivakumar, 2004).

2.7 Fenômenos de empacotamento

2.7.1 Considerações gerais

O empacotamento pode ser definido como qualquer arranjo das unidades sólidas, no qual cada unidade constituinte é mantida e organizada no local pela ação do campo gravitacional terrestre por meio do contato tangencial com seus vizinhos (Graton & Fraser, 1935).

O arranjo e o modo de empacotamento das partículas dependem de suas distribuições espaciais e de suas formas, bem como da maneira de deposição ou formação no local. Segundo Harris (1971), solos que contêm partículas de vários tamanhos (bem graduados) terão maior contato entre estas que solos com partículas de tamanho uniforme. Há dois casos extremos de possíveis empacotamentos, podendo-se referir a um sistema constituído de grãos esféricos de tamanho uniforme em um estado de empacotamento aberto (densidade mínima), denominado de monodisperso, e a um sistema possuindo 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, como se ilustra na Figura 8.

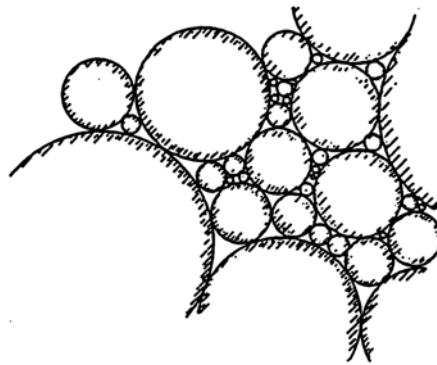


Figura 8: Empacotamento hipotético de partículas em um sistema polidisperso (Hillel, 1998).

Há dois tipos de estruturas empacotadas, denominadas aleatória e ordenada. O empacotamento aleatório é construído por uma seqüência de eventos que não possuem correlação entre si, ou seja, não é possível a sua reprodução. Uma estrutura ordenada ocorre quando objetos são colocados de forma sistemática, em posições periódicas, que podem ser expressas por equações matemáticas. Estruturas aleatórias têm uma menor densidade de empacotamento quando comparadas com estruturas ordenadas.

Muitos problemas de empacotamento são considerados em três dimensões. A forma esférica da partícula é a mais utilizada em empacotamentos tridimensionais, pois somente um parâmetro, o diâmetro, é necessário para especificar a sua dimensão (German, 1989). Em três dimensões, uma esfera é definida como o locus de um ponto em uma distância constante, que é o seu raio, enquanto que o limite da esfera é a sua superfície. Além disso, as esferas têm menor atrito quando comparadas com outras formas de partículas.

Embora esferas não sejam eficientes no preenchimento de espaços, elas constituem a base dos estudos de empacotamento. Outras formas poliedrais, como o cubo, por exemplo, requerem mais do que um parâmetro para especificar o seu tamanho e forma. Além disso, o uso de formas poliedrais

pode ocasionar o contato entre faces (não pontual), resultando em estruturas que podem ocupar todo o espaço existente.

Mitchell (1993) ressalta a importância do arranjo das partículas para a caracterização geotécnica de areias e pedregulhos. Dessa forma, torna-se necessário um conhecimento mais aprofundado dos fatores que influenciam o empacotamento de partículas, tanto em sistemas uniformes, binários e ternários.

2.7.2 Fatores que influenciam no empacotamento de partículas

2.7.2.1 Estabilidade gravitacional

A análise dos fatores que influenciam o empacotamento de partículas pressupõe a existência de um arranjo estável entre as mesmas. Para que uma partícula obtenha uma estabilidade gravitacional, ela deve estar em contato com pelo menos três outras partículas. A Figura 9 ilustra a adição de uma nova partícula em uma camada de partículas previamente existente. Nota-se que o ponto inicial de contato na situação (a) é instável quando comparado com a situação (b), pois este se apresenta em uma região de menor energia; refere-se que uma menor energia pode ser alcançada pelo rolamento da partícula em direção à região de depressão entre três esferas estacionárias, como se indica na situação (c). Em empacotamentos aleatórios de esferas de igual tamanho, comumente, o número de coordenação situa-se entre seis e sete contatos por partícula.

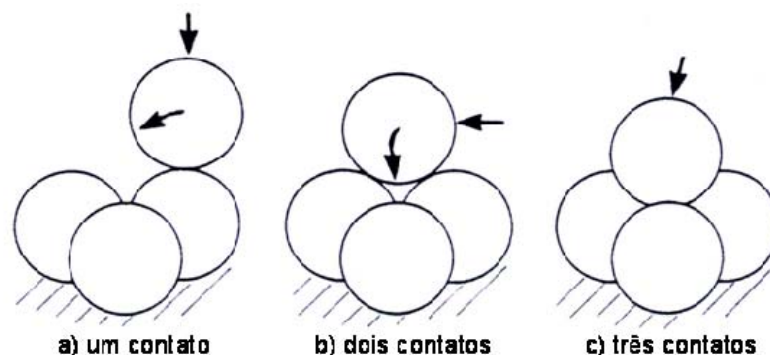


Figura 9: Estabilidade gravitacional em empacotamentos aleatórios de esferas de igual tamanho (German, 1989): (a) um contato; (b) dois contatos e, (c) três contatos.

2.7.2.2 Tamanho das partículas

Para empacotamentos compostos de partículas grandes, o tamanho da partícula não interfere na densidade obtida pelo empacotamento. Contudo, quando o tamanho médio da partícula encontra-se próxima de 100 μm há uma maior influência do atrito entre as mesmas, aumentando-se a probabilidade de ocorrência de pontes de ligação. Decréscimos observados na densidade de empacotamento devem-se ao incremento de área superficial, ocasionando uma maior significância das forças de curto alcance, tais como campos eletrostáticos e fenômenos de adsorção. Como a coesão entre partículas aumenta quando elas encontram-se próximas de 100 μm , há possibilidade da ocorrência de aglomerados, diminuindo a densidade do empacotamento (German, 1989).

2.7.2.3 Forma da partícula e rugosidade superficial

Outra forma de atrito entre partículas advém da irregularidade superficial inerente aos materiais granulares. A densidade do empacotamento torna-se maior à medida que a partícula aproxima-se da forma esférica e torna-se menor com o aumento da rugosidade superficial. A Figura 10 mostra um esquema dos efeitos da forma geral da partícula e da rugosidade superficial na densidade do empacotamento (Shinohara, 1997). Observa-se que maiores densidades de empacotamento ocorrem quando há o efeito combinado do formato esférico com superfície lisa. A utilização de vibração ou lubrificantes podem ajudar a aumentar a densidade de empacotamento em materiais granulares, mas podem ocorrer problemas de aglomeração ou segregação de partículas.

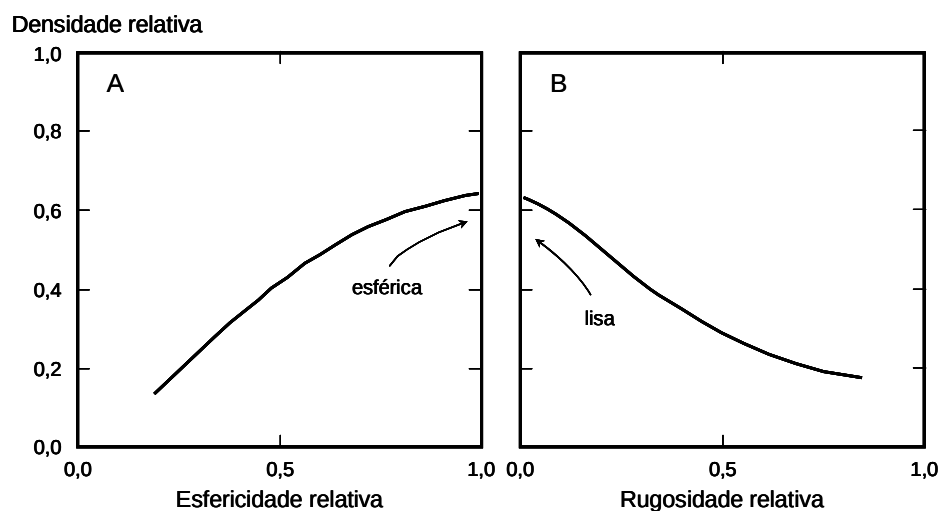


Figura 10: Efeito da (A) forma da partícula e (B) rugosidade superficial na densidade relativa, em empacotamentos aleatórios (Shinohara, 1997).

Para partículas de mesmo tamanho, mas com formatos diferentes, a densidade do empacotamento é reduzida, à medida que elas se afastam da forma esférica. Tem-se que a densidade pode ser aumentada pela mistura de diferentes tamanhos de partículas, independentemente de suas formas; contudo, a densidade inicial é menor quando se utilizam partículas de formas irregulares, como destacam Ridgway & Tarbuck (1968a).

2.7.2.4 Aglomeração

A aglomeração ocorre principalmente pela ação de ligações fracas existentes entre as partículas menores, devido ao acréscimo da área superficial. As ligações mais comuns são as forças de van de Waals, forças eletrostáticas, forças resultantes da ação capilar ou forças magnéticas (Coelho & Harnby, 1978). Segundo Gray, citado por German (1989), as forças de van de Waals tornam-se significantes em partículas com diâmetro inferior a 50 μm , enquanto que German (1989), Yu et al. (1997) e Yu et al. (2003) afirmam que, em partículas próximas a 100 μm , a gravidade não é a força dominante e as forças interpartículas de curto alcance (van der Waals e eletrostáticas) tornam-se mais importantes, formando aglomerados. Como consequência, as partículas não se comportam individualmente no nível macroscópico. O decréscimo na densidade do empacotamento ocorre devido ao volume do

aglomerado, que desloca as partículas da matriz granular (partículas de maior diâmetro), além de resultar em uma massa final menor.

Tipicamente, as partículas granulares se aglomeram devido a filmes de água adsorvidos na sua superfície, especialmente durante períodos de agitação, sendo dependente da umidade relativa do ambiente, entre 65% e 80%, aproximadamente, e da curvatura da superfície (Coelho & Harnby, 1978).

Partículas menores podem dificultar a obtenção de densidades de empacotamento maiores, devido ao efeito de aglomeração ocasionado pela coesão entre elas. As forças de atração tornam-se maiores à medida que a área superficial aumenta e a quantidade de massa do sistema diminui. Além disso, partículas menores têm uma tendência maior para condensar vapor nos contatos inter-partículas, com a formação de ligações pendulares. Segundo Messing & Onoda (1978) e Fedors & Landel (1979), estas ligações favorecem o agrupamento entre partículas, como se ilustra na Figura 11, mas reduzem a densidade do empacotamento em função da formação de regiões de alta porosidade, dificultando as misturas entre partículas. Na busca de se atingir densidade maior, uma alternativa é criar condições para aumentar as forças de repulsão entre partículas; por exemplo, pelo uso de camadas finas de moléculas polares, haja vista que o uso de forças repulsivas contribui para aumentar a densidade do empacotamento pela redução do atrito entre as partículas que apresentam forças coesivas.

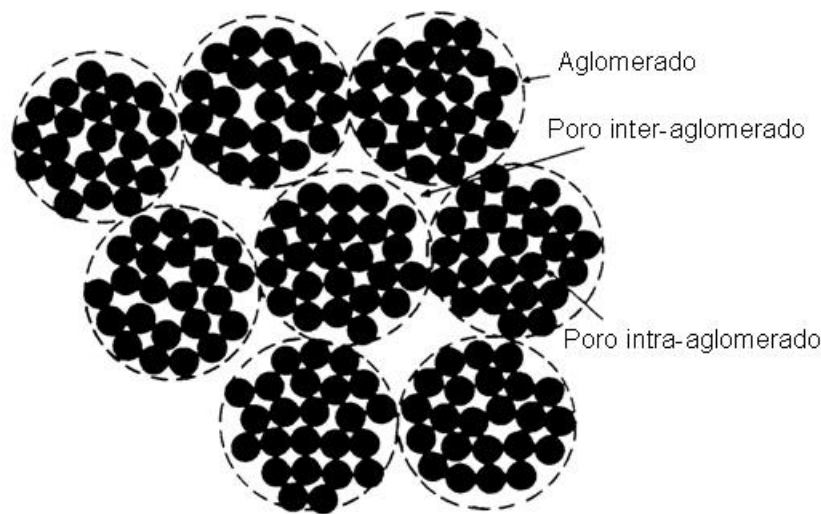


Figura 11: Esquema mostrando regiões de alta porosidade em empacotamento de esferas de igual tamanho, associadas ao efeito de aglomeração (German, 1989).

2.7.2.5 Agentes lubrificantes

Aditivos, tais como glicerina, álcool, etc., podem ser adicionados às partículas para alterar as suas condições de empacotamento, pois reduzem o atrito entre as partículas, pela ação de forças repulsivas de curto alcance. Geralmente, o fluxo e o empacotamento de partículas apresentam melhores resultados na presença de agentes lubrificantes apropriados, devendo-se destacar que à medida que há decréscimo no tamanho das partículas, o empacotamento sofre limitações pelo acréscimo do atrito entre as mesmas, aliado à tendência natural à aglomeração. Nesse caso, os agentes lubrificantes podem ser de grande utilidade.

2.7.2.6 Porosidade interna

Muitas partículas possuem porosidade interna, sendo algumas vezes totalmente isolada da superfície da mesma. A Figura 12 mostra a secção transversal de partículas com diferentes estruturas porosas, ressaltando-se que as leis de empacotamento ignoram a porosidade interna das partículas, sendo focadas exclusivamente nos poros entre as partículas, assumindo-se a ocorrência de empacotamentos com partículas densas. Se uma partícula possui poros internos, então a sua porosidade interna reduz a densidade do

empacotamento. Além de reduzir a densidade do empacotamento, podendo, também, aumentar a sua área superficial e acarretar a formação de poros ainda menores do que os vazios existentes entre as partículas. Conseqüentemente, fenômenos de adsorção e retenção de fluidos podem ocorrer nesses poros menores.

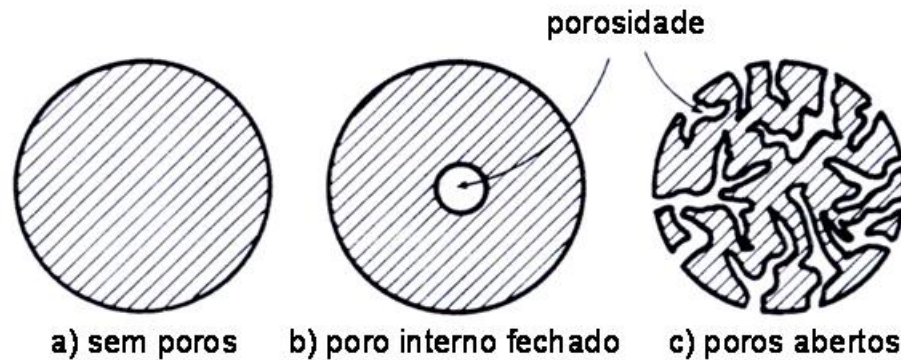


Figura 12: Esquema mostrando três diferentes formas de estrutura porosa interna (German, 1989).

2.7.2.7 Tamanho do recipiente

Segundo McGeary (1961), Susskind & Becker (1966), Bernal & Finney (1967), Ridgway & Tarbuck (1968b), Pillai (1977) e Gotoh et al. (1978), o recipiente usado para colocar a amostra propicia a formação de uma região de ordenação situada na extremidade do mesmo (efeito de borda). Observa-se que o efeito torna-se mais pronunciado em paredes lisas, fazendo com que apareçam regiões de baixa e de alta porosidade nas partículas próximas à parede. Dependendo do tamanho e forma da partícula, além da forma do recipiente, é necessária uma distância da parede equivalente de um a dez diâmetros da mesma para que se estabeleça, por exemplo, um empacotamento do tipo aleatório (McGeary, 1961, Ridgway & Tarbuck, 1968b, Pillai, 1977 e Gotoh et al., 1978).

À medida que se aumenta a relação entre o diâmetro do recipiente e o diâmetro da partícula, a aleatoriedade predomina e a densidade do empacotamento aproxima-se de uma assíntota. A Figura 13 mostra os dados obtidos por McGeary (1961), onde se evidencia o comportamento assintótico

existente em relações entre o diâmetro do recipiente e o diâmetro da partícula quando estas situam-se acima de dez.

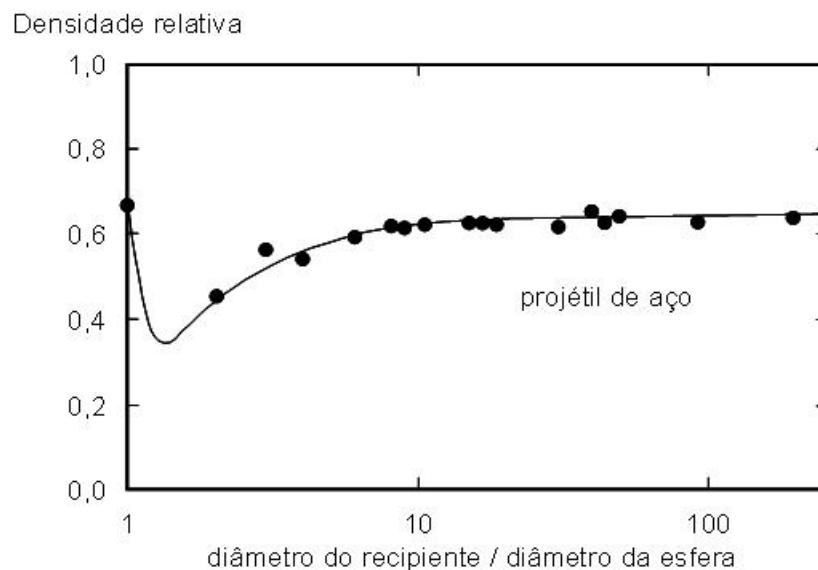


Figura 13: Efeito do tamanho do recipiente na densidade relativa de empacotamento (McGeary, 1961).

Os experimentos realizados por Scott (1960) constituem-se numa demonstração clássica da influência das dimensões do recipiente no empacotamento. A Figura 14 mostra a densidade do empacotamento de esferas de aço uniformes como função do inverso do diâmetro do recipiente cilíndrico, obtendo-se o valor da densidade de empacotamento sem efeito de parede. Recipientes maiores têm menor efeito na densidade de empacotamento. Porém, quanto maior o tamanho da partícula, maior deverá ser o tamanho do recipiente para obter-se um efeito equivalente (Brown & Hawksley, 1946; Verman & Banerjee, 1946; Bernal & Finney, 1967). Em partículas não esféricas, refere-se que a aleatoriedade no empacotamento é mais pronunciada, fazendo com que o efeito de parede seja menor na borda do recipiente, bem como que misturas de partículas de tamanhos diferentes minimizam as variações de porosidade junto à parede do recipiente e quanto mais distribuída for a amostra, menor é a influência do efeito de borda (Leva & Grummer, 1947).

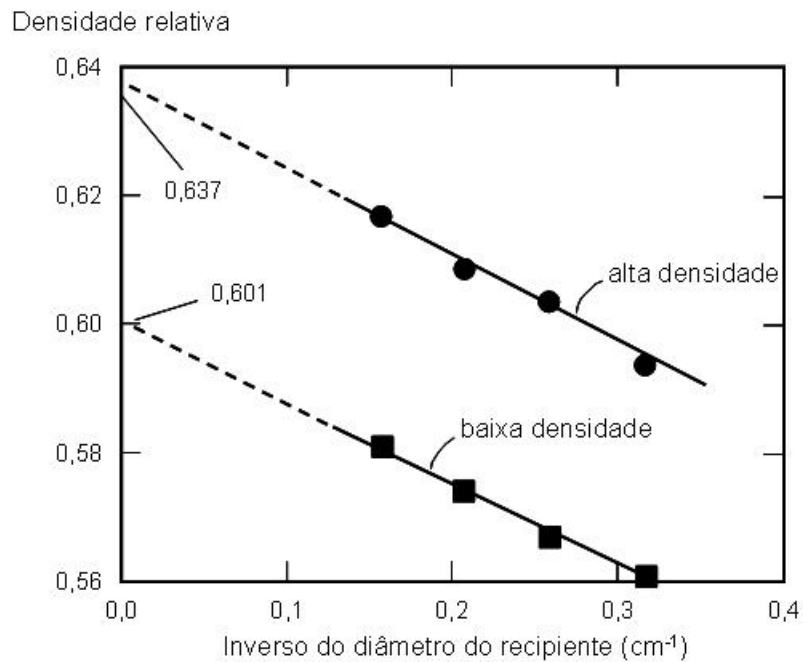


Figura 14: Empacotamentos aleatórios de baixa e alta densidade de esferas de aço uniformes, mostrando as densidades limites, sem efeito de borda, obtidas por extrapolação (Scott, 1960).

2.7.2.8 Segregação

Segundo Williams & Shields (1967) e Williams (1976), há três causas possíveis para a manifestação do fenômeno da segregação de partículas, relacionadas às suas diferenças de tamanho, densidade e forma. Dessas três, a diferença de tamanho entre partículas é a característica dominante.

Em empacotamentos binários, onde a razão entre o diâmetro da partícula maior (D) e o diâmetro da partícula menor (d) é inferior a, aproximadamente, seis vezes, existe a possibilidade de segregação quando as partículas menores passam entre os vazios formados pelas partículas de maior tamanho, reduzindo a densidade do empacotamento, além de torná-la variável dentro do recipiente (Messing & Onoda, 1978). Assim, a densidade em qualquer ponto da matriz formada pelas partículas depende da distribuição local das mesmas no recipiente.

Uma causa comum da ocorrência da segregação é a agitação, destacando-se que em um empacotamento aleatório com diferentes tamanhos de partículas, as partículas maiores migram para o topo do recipiente durante a aplicação deste efeito, sendo o fenômeno mais pronunciado quando há um componente vertical de agitação.

Sabe-se que a agitação faz com que os poros existentes entre as partículas abram-se, permitindo que as partículas menores possam deslocar-se 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 ilustrado na Figura 15. Esse fenômeno ocorre quando a diferença de tamanho entre as partículas é pequena; quando o diâmetro das partículas maiores é cerca de seis vezes aquele das partículas menores, o poro intersticial existente na matriz formada pelas partículas maiores é de tamanho suficiente para permitir que as partículas menores passem por ele.

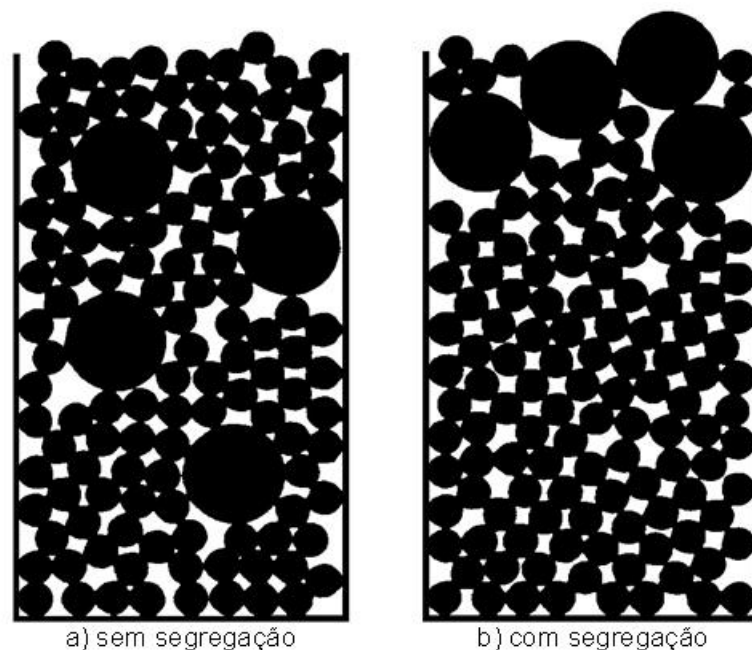


Figura 15: Fenômeno de segregação em empacotamento binário aleatório, devido à agitação (Rosato et. al, 1987).

Embora a segregação devida a diferenças entre tamanho de partículas seja prevalente, há uma fraca dependência da densidade da partícula e da sua forma. Partículas irregulares reduzem o fenômeno de

segregação, por causa do atrito entre as mesmas. Procedimentos de manipulação podem ser adotados em empacotamentos para minimizar a segregação. Segundo Ripple et. al (1973), a melhor prática é a vibração controlada das partículas simultaneamente com a deposição das mesmas.

2.7.2.9 Pontes de ligação e vibração

Baixas densidades encontradas em muitos empacotamentos de partículas de tamanho pequeno são atribuídas ao fenômeno denominado de ponte de ligação, com a formação de regiões de grandes poros, como se ilustra na Figura 16. Partículas não esféricas, em especial as de forma angular, aumentam a tendência à formação de pontes de ligação. À medida que há decréscimo no diâmetro da partícula, há redução na sua massa e maior atrito superficial. Ambos os fatores contribuem para a redução da densidade de empacotamento (Haughey & Beveridge, 1969). Segundo Ridgway & Tarbuck (1967), esse fenômeno é mais aparente próximo às paredes do recipiente, onde há a formação de grandes vazios.

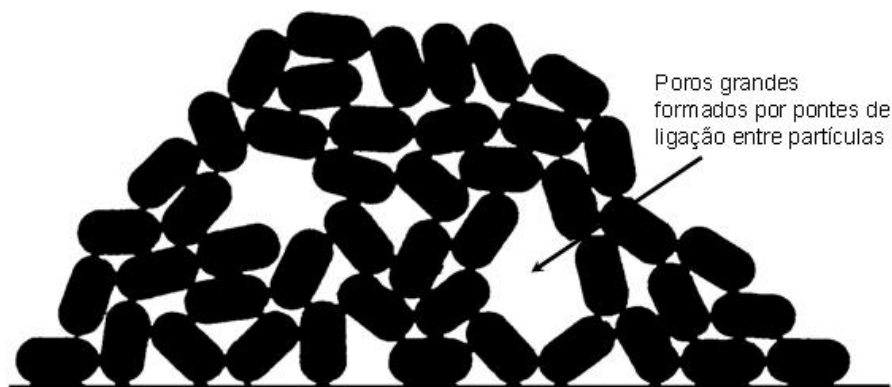


Figura 16: Fenômeno de pontes de ligação, associado ao elevado atrito entre partículas, formato irregular, ou coesão (German, 1989).

Para eliminar regiões de porosidade elevada associadas ao fenômeno de pontes de ligação, na obtenção de densidades de empacotamento elevadas, faz-se necessária a vibração do recipiente, sem pressão externa aplicada às partículas. Essa densidade, obtida com o uso de vibração, é geralmente aceita como a máxima densidade atingida sob vibração ou agitação. Segundo McGeary (1961) e Williams & Shields (1967), sua

intensidade depende do material, amplitude da vibração, direção de vibração, pressão aplicada, frequência de vibração, densidade da partícula e aparato utilizado.

No que se refere a esferas de vidro, quando estas são submetidas à vibração, apresentam menor ganho no processo de densificação. Entretanto, de uma forma geral, observa-se que quanto maior é a irregularidade da partícula, maior é o acréscimo na elevação da densidade, bem como que quanto maior é a sua esfericidade, juntamente com a redução de atrito entre partículas, mais facilmente se atinge a densidade de empacotamento máxima.

Destaca-se que para qualquer partícula, há uma condição ótima para se atingir mais rapidamente a máxima densidade de empacotamento. O ângulo, tipo, amplitude e frequência de vibração devem ser consideradas, pois seus efeitos são variáveis, e dependentes da morfologia da partícula. Geralmente, o empacotamento ocorre mais rapidamente com uma amplitude próxima de 1 mm, sendo que muitos sistemas utilizam uma frequência específica na obtenção de maiores densidades de empacotamento (McGeary, 1961; Van Brakel & Heertjes, 1974). Melhores empacotamentos são obtidos com frequências entre 100 e 200 Hz para partículas com diâmetro superior a 100 μm . Por causa da dependência da frequência de vibração, vibrações de frequência variável são utilizadas quando se misturam partículas de diferentes tamanhos, observando-se que partículas pequenas e de forma irregular requerem mais tempo para atingirem a mais alta densidade de empacotamento quando sujeitas à vibração.

2.7.3 Empacotamento de esferas uniformes

2.7.3.1 Introdução

Os empacotamentos podem ser divididos, inicialmente, nas modalidades de caráter ordenado e aleatório, como se ilustra respectivamente Figuras 17A e 17B. Contudo, a divisão comumente aceita admite a existência de três tipos de empacotamento, com esferas de igual tamanho, denominados ordenado, aleatório de baixa densidade e aleatório de alta densidade. Um

empacotamento ordenado tem uma estrutura periódica, podendo ser representada por expressões matemáticas que determinam a posição relativa de qualquer um de seus componentes. Os empacotamentos aleatórios de baixa densidade são representados por partículas depositadas em um recipiente sem agitação. Empacotamentos aleatórios de alta densidade podem ser alcançados por agitação ou vibração de empacotamentos aleatórios de baixa densidade para atingir a máxima densidade possível.

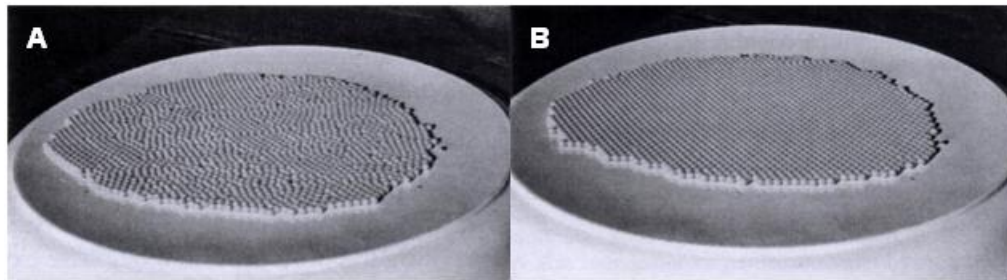


Figura 17: Tipos de empacotamento: (A) aleatório; (B) ordenado (Aste & Weaire, 2008).

2.7.3.2 Empacotamento Ordenado

Na análise de empacotamento de esferas uniformes, uma primeira atenção deve ser dada para empacotamentos ordenados. Apesar de não serem comuns na natureza, na escala macroscópica, são sistemas simplificados que auxiliam na compreensão do empacotamento de partículas de menor uniformidade.

Muitos estudos de empacotamento de materiais granulares têm sido conduzidos em sistemas constituídos por partículas esféricas uniformes (Westman & Hugill, 1930; Deresiewicz, 1958; McGeary, 1961; Staple, 1975; Lade et al., 1998), em cinco possíveis arranjos geométricos regulares, como se mostra na Figura 18, a saber: (a) cúbico simples - este sistema apresenta a densidade mínima, com cada partícula tangenciando seis outras vizinhas em lados opostos de três eixos ortogonais. Neste arranjo, uma partícula é colocada no topo de outra (centróide sobre centróide), determinando-se uma estrutura instável; (b) cúbico tetraedral - neste padrão, cada esfera toca quatro esferas vizinhas em sua própria camada e as esferas em diferentes camadas se

posicionam diretamente no topo de cada outra; refere-se que este sistema é também denominado de *single stagger* ou ortorrômbo; (c) tetragonal esfenoidal - é similar ao padrão anterior, mas difere pelo deslizamento da camada superior para produzir dois contatos na camada inferior, recebendo a denominação de *double stagger*; (d) piramidal - este arranjo determina a densidade de empacotamento máxima, também conhecido como cúbico de face centrada, com cada esfera da camada superior assentada na depressão da camada inferior e em contato com quatro esferas, formando um quadrado na camada abaixo; (e) tetraedral - este arranjo, juntamente com o anterior, determina também a densidade de empacotamento máxima, sendo denominado de *close-packed*, hexagonal ou tetraedral. Nesse empacotamento, cada esfera da camada superior assenta-se na depressão da camada inferior e está em contato com três esferas, formando um triângulo equilátero na camada abaixo.

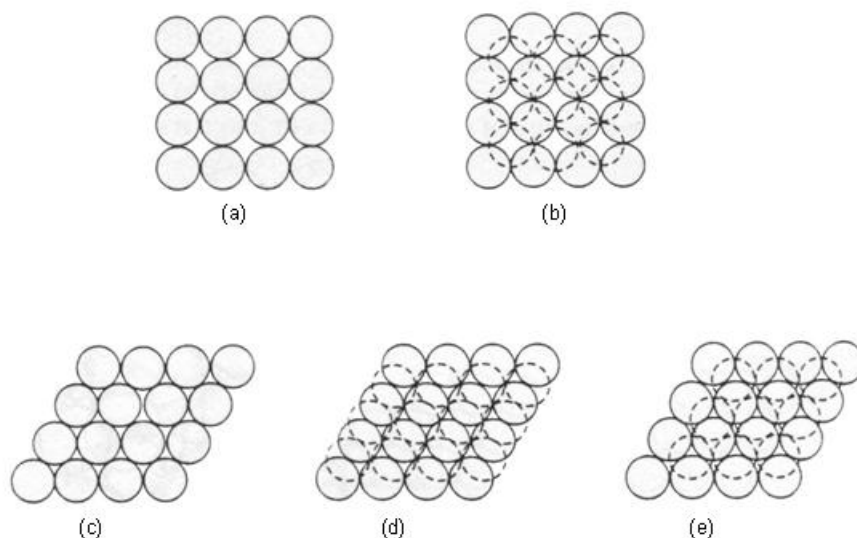


Figura 18: Modelos de empacotamento de esferas uniformes (Deresiewicz, 1958): (a) cúbico simples, (b) cúbico tetraedral, (c) tetragonal esfenoidal, (d) piramidal, e (e) tetraedral.

Como já se referiu, a forma esférica da partícula é a mais utilizada em empacotamentos tridimensionais, pois somente um parâmetro, o diâmetro, é necessário para especificar a sua dimensão. Embora o modelo de esferas uniformes não seja realístico, o seu uso retrata um exercício útil, pois se pode

estabelecer limites teóricos de porosidade para posterior avaliação de sistemas reais. As proporções de vazios são independentes do diâmetro do grão, e podem ser calculadas por geometria tridimensional (White & Walton, 1937), considerando-se as suposições de inexistência de forças de atração/repulsão e não influência da densidade do material. No Quadro 9 apresentam-se as características do empacotamento de esferas uniformes.

Quadro 9: Características geométricas de empacotamentos regulares de esferas uniformes

Tipo de empacotamento	Número de coordenação	Empacotamento	Vazios
		%	
Cúbico Simples	6	52,36	47,64
Cúbico Tetraedral	8	60,46	39,54
Tetragonal Esfenoidal	10	69,81	30,19
Piramidal	12	74,05	25,95
Tetraedral	12	74,05	25,95

Fonte: Panayiotopoulos (1989).

Outro aspecto de interesse é que quando esferas uniformes são depositadas dentro de um recipiente, elas não se arranjam em qualquer padrão regular de empacotamento, havendo, entretanto, a predominância de um dos padrões, sendo este chamado de empacotamento aleatório, como refere Panayiotopoulos (1989).

2.7.3.3 Empacotamento aleatório de baixa densidade

Pesquisas envolvendo empacotamentos aleatórios de baixa densidade em esferas uniformes utilizam-se do conceito de densidade relativa, que varia de 0 a 1. Contudo, este tipo de empacotamento é muito sensível à técnica utilizada no procedimento experimental, ocasionando considerável variação entre medidas realizadas por diversos pesquisadores.

Segundo German (1989), os valores encontrados na literatura para a densidade relativa situam-se entre 0,560 e 0,625, com dois terços destes situados entre 0,580 e 0,606. Scott (1960) estimou a densidade relativa em

0,601, obtido por extrapolação, considerando-se um recipiente de dimensões infinitas, para se eliminar o efeito de parede.

2.7.3.4 Empacotamento aleatório de alta densidade

A densidade relativa para um empacotamento aleatório de alta densidade é melhor definida quando comparada com um empacotamento aleatório de baixa densidade, dado a existência de uma condição onde as esferas limítrofes estão em contato. Um empacotamento aleatório de alta densidade para esferas uniformes corresponde à sua máxima densidade possível sem ordenação ou deformação.

Segundo German (1989), os valores encontrados na literatura, para a densidade relativa, variam entre 0,610 a 0,665, com 2/3 dos valores situados entre 0,636 e 0,644. Segundo Scott (1960), o valor máximo para empacotamentos aleatórios de alta densidade é 0,637. Este valor é amplamente aceito pelos pesquisadores da área, pois é baseado em medidas acuradas realizadas por Scott (1960) e Scott & Kilgour (1969), utilizando-se de tamanhos diferentes de recipientes, sendo estes resultados extrapolados para um recipiente de dimensões infinitas, para eliminação de efeitos de parede.

2.7.4 Empacotamento de partículas uniformes não-esféricas

Partículas com rugosidade superficial são mais susceptíveis a efeitos de adsorção ou aglomeração. Quanto maior a rugosidade superficial das partículas, maior será o atrito entre elas, ocasionando redução na densidade de empacotamento. Devido ao maior atrito entre as partículas, menor é a densidade de empacotamento aleatória, em comparação com sistemas com partículas esféricas.

A Figura 19 mostra a densidade de empacotamento relativa para várias formas de partículas irregulares de tamanhos iguais. À medida que a partícula torna-se mais arredondada, há um acréscimo na densidade relativa de empacotamento; em oposição, quanto menor o arredondamento, menor a densidade relativa de empacotamento (Tsutsumi, 1973). Assim, partículas

esféricas são mais utilizadas em aplicações que requerem altas densidades de empacotamento. Há vários fatores que alteram a densidade de empacotamento mas, indubitavelmente, a forma da partícula exerce um papel dominante neste processo.

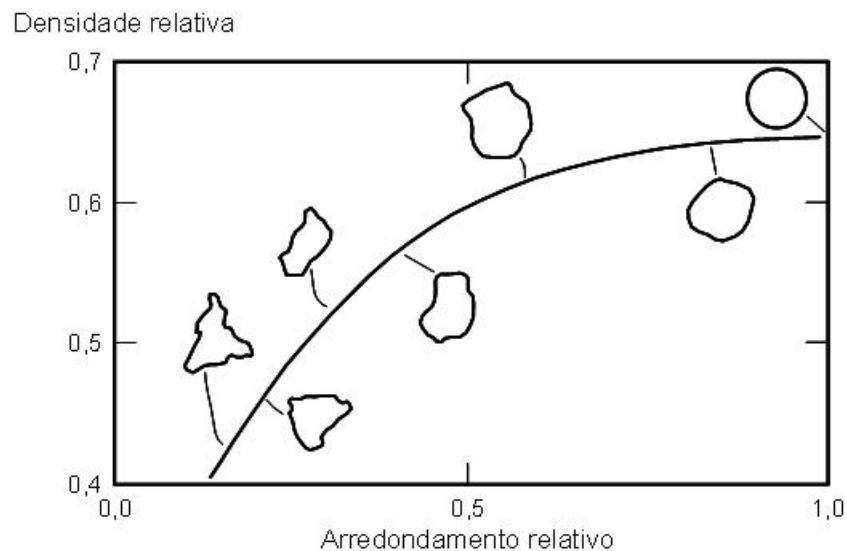


Figura 19: Densidade relativa em função do arredondamento para partículas de igual tamanho empacotadas aleatoriamente (Tsutsumi, 1973).

2.7.5 Empacotamento binário de esferas uniformes

2.7.5.1 Considerações gerais

Melhorias no empacotamento são explicadas pela razão entre os diâmetros das partículas envolvidas. As partículas menores são selecionadas de tal forma que elas preencham os interstícios entre as partículas maiores, sem causar, com isto, deslocamento na matriz formada pelas partículas maiores. Esse processo pode ser continuado, com a adição de partículas ainda menores para preencher o próximo nível de poros, fazendo com que a massa total do sistema aumente e, conseqüentemente, haja acréscimo na densidade final. A Figura 20 ilustra esse conceito básico usando um empacotamento ordenado bidimensional para representar um empacotamento tridimensional de esferas. Inicialmente, os discos estão empacotados em um arranjo ordenado bidimensional, como se ilustra na Figura 20A. Em seguida, discos de tamanho menor são selecionados para preencher os poros entre os discos maiores

(Figura 20B), sem alteração do empacotamento inicial. Na sequência, um empacotamento ternário pode ser criado pelo uso de discos ainda menores que preenchem os poros do sistema binário (Figura 20C). Contudo, a seleção inapropriada dos discos não aumenta a densidade de empacotamento, pois pode ocorrer deslocamento da estrutura primária (Figura 20D).

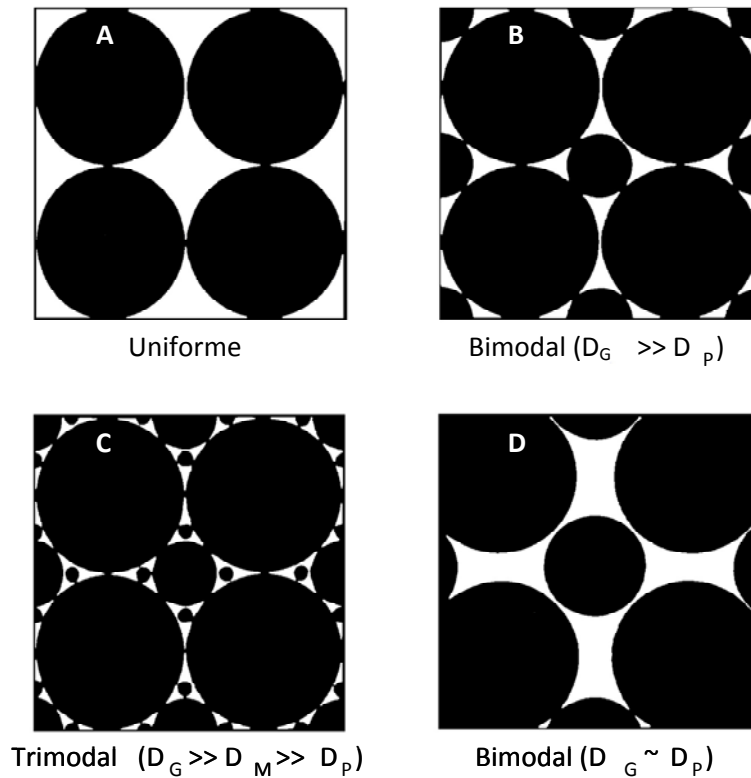


Figura 20: Representação bidimensional dos efeitos de combinações de diferentes tamanhos de partículas, onde D_G é o diâmetro da partícula de maior tamanho, D_M é o diâmetro da partícula de tamanho intermediário e D_P é o diâmetro da partícula de menor tamanho (German, 1989).

2.7.5.2 Descrição qualitativa

Vários autores citam que há uma composição para a máxima densidade de empacotamento (Westman & Hugill, 1930; Mangeldorf & Washington, 1960 e Yerazunis et al., 1962) e, segundo Furnas (1928), a máxima composição do empacotamento binário ocorre com um volume maior de partículas grandes, sendo que o acréscimo na densidade do empacotamento depende da razão entre os diâmetros das partículas grandes e pequenas (D_G/D_P). Dentro de uma faixa limitada, quanto maior a razão D_G/D_P ,

maior a densidade de empacotamento máxima, até o limite aproximado de 20:1, requerendo uma diferença aproximada de 20%, em tamanho, entre as partículas (Epstein & Young, 1962; Ridgway & Tarbuck, 1968a).

Densidades e suas variações para misturas de dois tamanhos de grãos têm sido estudadas teórica e experimentalmente (Fraser, 1935; White & Walton, 1937; McGeary, 1961). Para o estudo de empacotamentos binários, as seguintes suposições fazem-se necessárias: (i) os grãos maiores e os grãos menores são esféricos; (ii) a porcentagem de vazio mínima é independente do diâmetro do grão, isto é, as densidades teóricas são objetos de considerações geométricas; e (iii) as diferenças de densidade das partículas entre os grãos maiores e os grãos menores são desprezíveis.

Dois aspectos tornam-se importantes em estudos de empacotamentos binários: a variação da porcentagem de grãos menores na mistura das partículas, variando de 100% de partículas maiores até 100% de partículas menores; e, o efeito da razão entre o tamanho dos grãos na variação da porcentagem de vazios (ou densidade). A variação teórica da porcentagem de vazios com a porcentagem de grãos menores é mostrada esquematicamente na Figura 21, segundo a visão de Lade et al. (1998).

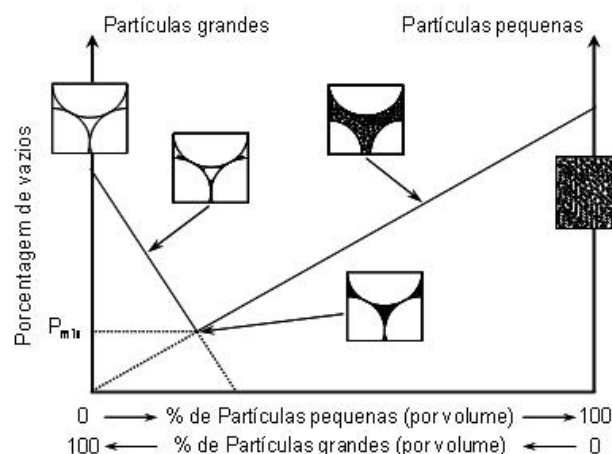


Figura 21: Variação teórica da porcentagem de vazios em sistemas binários em função da porcentagem de partículas pequenas e grandes (Lade et al., 1998).

Quanto maior a razão entre as partículas grandes e as pequenas (D_G/D_P), maior é a densidade de empacotamento. A Figura 22 mostra a densidade relativa em função do percentual de partículas grandes em diferentes razões (Yerazunis et al., 1965).

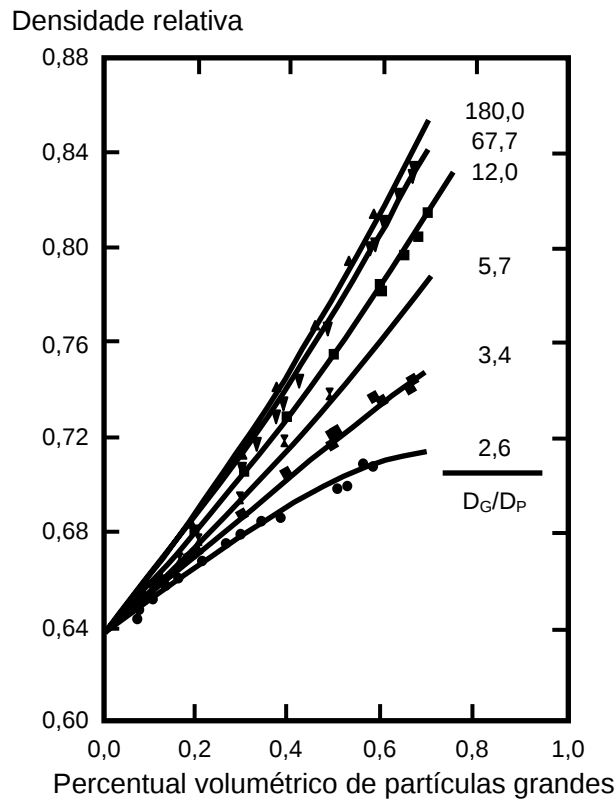


Figura 22: Densidade relativa em função do percentual volumétrico de partículas grandes para seis razões D_G/D_P (Yerazunis et al., 1965).

McGeary (1961) determinou a metodologia mais eficiente para produzir misturas binárias, pela deposição inicial das partículas maiores dentro de um recipiente grande até que elas atingissem a sua configuração mais densa. Na seqüência, procedeu à adição das partículas menores, enquanto o recipiente estava vibrando. Como consequência, as partículas menores migraram através dos vazios e alcançaram um ponto de saturação, até que posteriores adições de partículas menores não fossem mais possíveis sem que houvesse mudança no volume inicial. Nesse estudo, o autor verificou que misturar as partículas grandes e pequenas antes do processo de vibração não era um método efetivo para se alcançar as menores proporções de vazios, pois este procedimento poderia ocasionar o fenômeno de segregação.

Lade et al. (1998) utilizaram 820 g de areia e um cilindro graduado de 2.000 mL, na determinação das proporções mínimas de vazios em sistemas binários com areias. O procedimento consistiu em colocar três porções de aproximadamente 50 g de areia dentro do cilindro graduado e bater 8 vezes com o cabo de borracha de uma chave de fenda, duas vezes em lados opostos, continuando o procedimento até que toda a areia tivesse sido depositada dentro do menor volume possível.

Por outro lado, o procedimento, descrito por Dalla Riva (2005), consistiu na deposição inicial da partícula de maior diâmetro em quantias aproximadas de 50 mL, colocadas em proveta de 1000 mL, com auxílio de um funil, para se evitar que as partículas caíssem de uma única vez e pudessem perturbar o ajuste anteriormente efetuado. Com auxílio de um martelo de borracha foram produzidas vibrações de frequência e amplitude controlada, para permitir que as partículas pudessem ajustar-se e atingir a configuração mais densa possível (menor volume) dentro da proveta. A frequência e a amplitude foram determinadas empiricamente de modo a permitir que as partículas vibrassem em torno de seu eixo, sem ocasionar deslocamentos que pudessem aumentar o volume total. Esse procedimento foi repetido até que a totalidade das partículas de maior diâmetro fosse depositada na proveta. Na sequência, as partículas de menor diâmetro foram introduzidas na proveta conforme descrito anteriormente. Utilizando-se do martelo de borracha e vibrações de frequência e amplitude controlada possibilitou-se que as partículas de menor diâmetro pudessem migrar entre os caminhos porosos formados pela matriz das partículas de maior diâmetro até atingir a maior profundidade possível dentro da proveta. Segundo Lade et al. (1998), dessa forma garante-se a mais densa configuração possível do empacotamento binário.

2.7.5.3 Efeitos da razão D/d na porosidade

A Figura 23 mostra a porosidade em função do percentual de partículas grandes, para diferentes razões entre o maior e o menor diâmetro

das partículas (D/d), assumindo-se que as partículas envolvidas tenham a mesma densidade relativa de 0,5 (Furnas, 1931).

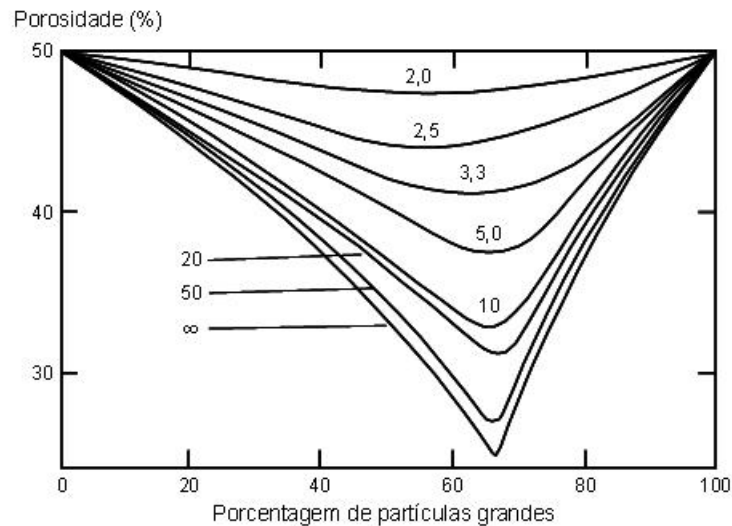


Figura 23: Porosidade em função do percentual de partículas grandes para empacotamentos bimodais, segundo razões D/d variando de 2 a infinito (Furnas, 1931).

Na Figura 23, observa-se que uma porosidade mínima ocorre para cada mistura em uma dada composição com maior quantidade de partículas grandes, bem como nota-se que à medida que aumenta a razão D/d a porosidade mínima desloca-se em direção ao eixo horizontal. Nota-se que não há elevação na densidade de empacotamento se a diferença entre os diâmetros das partículas envolvidas tenham, aproximadamente, o mesmo tamanho. Em contrapartida, maiores valores na densidade são obtidos à medida que se aumenta a razão D/d .

Utilizando-se de dados obtidos de trabalhos com esferas de aço realizados por McGeary (1961) em proporções de vazios mínimas de misturas binárias, Lade et al. (1998) apresentam um gráfico relacionando a proporção de vazios e a relação D/d das esferas utilizadas, como se apresenta na Figura 24.

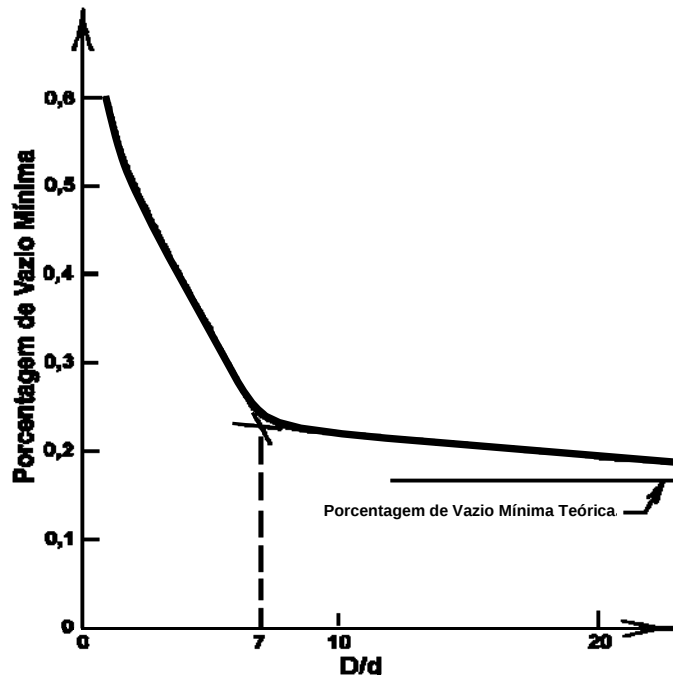


Figura 24: Porcentagens de vazios mínimas obtidas em misturas binárias de esferas de aço em função da relação D/d (Lade et al., 1998).

Os dados apresentados na Figura 24 mostram que a proporção de vazios mínima decresce acentuadamente no início da curva, sendo que próximo da relação $D/d = 7$ as reduções adicionais são muito menos pronunciadas, devido a posteriores decréscimos no tamanho dos grãos menores. Portanto, a maior eficiência e a maior redução em mínimas proporções de vazios são obtidas para empacotamentos de esferas com razão D/d próximo de 7. Tal fato também foi observado por Dalla Riva (2005) em empacotamentos binários de esferas de vidro em diferentes relações D/d . Maiores relações D/d produzem maiores proporções de vazios, mas com eficiência reduzida. 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. Experimentos conduzidos por Ayer & Soppet (1965) mostram que a densidade de empacotamento não é modificada para razões D/d maiores do que 20.

A seqüência de cálculos apresentada na Equação (6), utilizando-se relações trigonométricas num triângulo retângulo, mostra a obtenção do

diâmetro de um grão esférico que pode preencher o espaço vazio entre três esferas de igual tamanho, como se apresenta na Figura 25.

$$d = \frac{(1 - \cos 30^\circ)}{\cos 30^\circ} D = \frac{1 - \sqrt{3}/2}{\sqrt{3}/2} D = \frac{2 - \sqrt{3}}{\sqrt{3}} D = 0,15470 D = \frac{1}{6,464} D \cong \frac{D}{7} \quad (6)$$

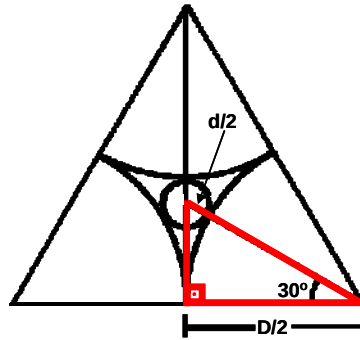


Figura 25: Ilustração da maior partícula que pode preencher o poro triangular entre três esferas de igual tamanho (modificado de Lade et al., 1998).

2.7.5.4 Efeitos de Homogeneidade

A homogeneidade de uma mistura tem uma grande influência na densidade de empacotamento (Rose & Robinson, 1965; Messing & Onoda, 1978). Ao se considerar que existem misturas não homogêneas no empacotamento, algumas regiões apresentam mais esferas grandes do que outras e, conseqüentemente, ocorrem variações na densidade relativa dentro do recipiente. Muitos dos modelos matemáticos divulgados na literatura assumem um posicionamento ordenado das partículas, sendo este um estado difícil de atingir. A estrutura típica de misturas de partículas é a de um empacotamento aleatório que, quando associada a fenômenos de segregação e flutuações locais na composição, resulta em variações na densidade. Por causa dessa influência, modelos matemáticos que expressam a densidade de empacotamento para misturas bimodais superestimam a densidade atingível.

Quando as misturas são formadas sem vibração, as esferas pequenas podem causar uma dilatação no arranjo inicial, como se mostra na Figura 26. As misturas bimodais com elevada densidade de empacotamento

assumem que as esferas menores estejam situadas nos interstícios formados pelas esferas maiores.

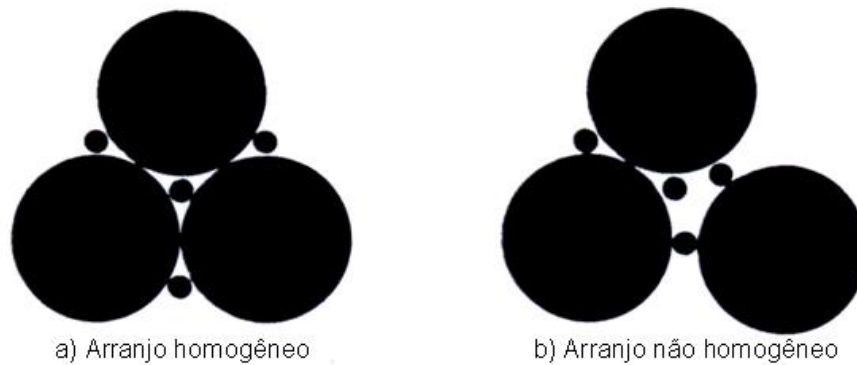


Figura 26: Esquema mostrando um (a) arranjo homogêneo e (b) um arranjo não homogêneo (Messing & Onoda, 1978).

A Figura 27 mostra a densidade relativa de empacotamento em função do percentual (em volume) de partículas menores para diferentes níveis de homogeneidade da mistura. A densidade aumenta com a homogeneidade, onde o limite superior é baseado numa mistura ideal, enquanto que o limite inferior assume uma mistura com elevada segregação.

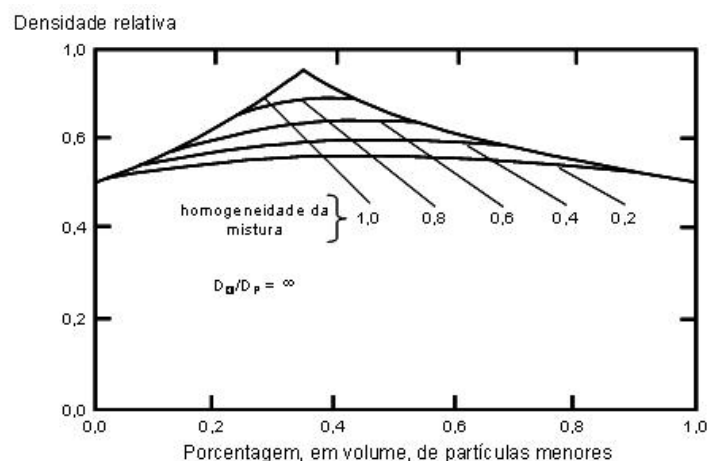


Figura 27: Densidade relativa de empacotamentos binários em função da porcentagem, em volume, de partículas menores em vários níveis de homogeneidade (Messing & Onoda, 1978).

2.7.6 Empacotamento binário de partículas irregulares

2.7.6.1 Considerações gerais

Analogamente ao comportamento das esferas, há um aumento na densidade associado com misturas de diferentes tamanhos de partículas de formas similares. Contudo, a diferença principal entre formas esféricas e não-esféricas é que o empacotamento inicial é maior nas primeiras. Por outro lado, quanto maior é a rugosidade superficial ou mais irregular é a partícula, menor é a densidade relativa do sistema.

Sabe-se que assim como no empacotamento binário de esferas, há aumento na densidade de empacotamento à medida que a relação D/d torna-se maior. É necessário que exista em torno de 20% de diferença entre os diâmetros das partículas, para que haja acréscimo na densidade relativa, sendo que em muitos casos, a composição com a maior densidade de empacotamento requer pelo menos 50%, em proporção, de partículas maiores. Segundo Ridgway & Tarbuck (1968a) e Dalla Riva (2005), assim como em esferas, o acréscimo relativo na densidade de empacotamento de partículas é dependente da composição das mesmas e da relação D/d .

2.7.6.2 Misturas de partículas não-esféricas

Partículas pequenas de forma irregular que apresentem concentrações menores do que 10% no sistema podem ser misturadas com esferas sem se alterar de forma significativa a densidade do empacotamento (Parrish, 1961). Contudo, quando há altas concentrações de partículas irregulares, a estrutura do empacotamento é alterada, principalmente quando estas apresentam tamanho próximo ao da esfera. Conseqüentemente, a densidade diminui proporcionalmente com a concentração de partículas irregulares, quando as mesmas possuem tamanhos similares, conforme a Figura 28.

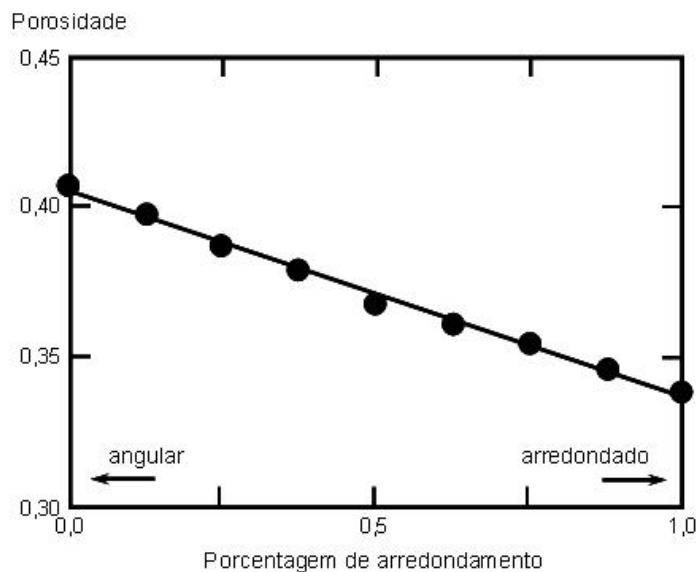


Figura 28: Porosidade em função da porcentagem de arredondamento com partículas de 10 mm de diâmetro (Shergold, 1953).

Segundo Karlsson & Spring (1970), freqüentemente é observada a expansão do volume em empacotamentos de partículas irregulares. Em geral, a densidade de empacotamento aumenta com relações D/d maiores. Worthington (1953), Ridgway & Tarbuck (1968a) e Patankar & Mandal (1980) observaram que em menores relações D/d não é observada elevação na densidade.

A Figura 29 mostra a densidade relativa em função da relação entre as partículas de maior e menor diâmetro (D_G/D_P), para partículas irregulares compostas de quartzo e feldspato. Observa-se que há um crescimento acentuado na densidade relativa em razões D_G/D_P situadas abaixo de, aproximadamente, 8. Acima desse valor, não há elevação significativa da densidade relativa. Condições de empacotamento ótimo ocorrem em uma composição aproximada de 25 a 30% de partículas pequenas, notando-se que este comportamento é similar ao empacotamento binário observado em esferas.

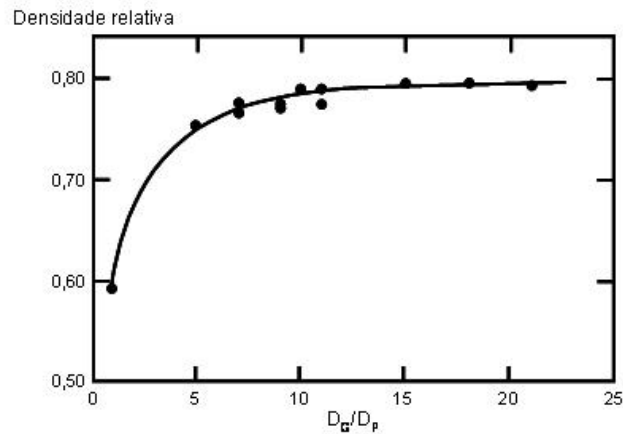


Figura 29: Máxima densidade relativa de empacotamento (na composição de 77% de partículas grandes) em função da relação D_G/D_P em misturas binárias de partículas irregulares (Patankar & Mandal, 1980).

A Figura 30 mostra o comportamento do empacotamento em esferas de vidro trituradas em função do percentual de partículas grandes, na razão D_G/D_P igual a 3,4 (Yerazunis et al., 1962). No mesmo gráfico é apresentado o empacotamento binário de esferas, na razão D_G/D_P igual a 3,8. Observa-se que o empacotamento binário de esferas apresenta maiores densidades relativas de empacotamento quando comparadas com esferas de vidro trituradas. O pico no empacotamento ocorre, aproximadamente, na mesma composição de partículas grandes e pequenas, independente da forma da partícula. Contudo, a mudança na taxa de crescimento da densidade relativa de empacotamento é maior para partículas irregulares, embora as esferas tenham uma maior densidade de empacotamento em todas as composições.

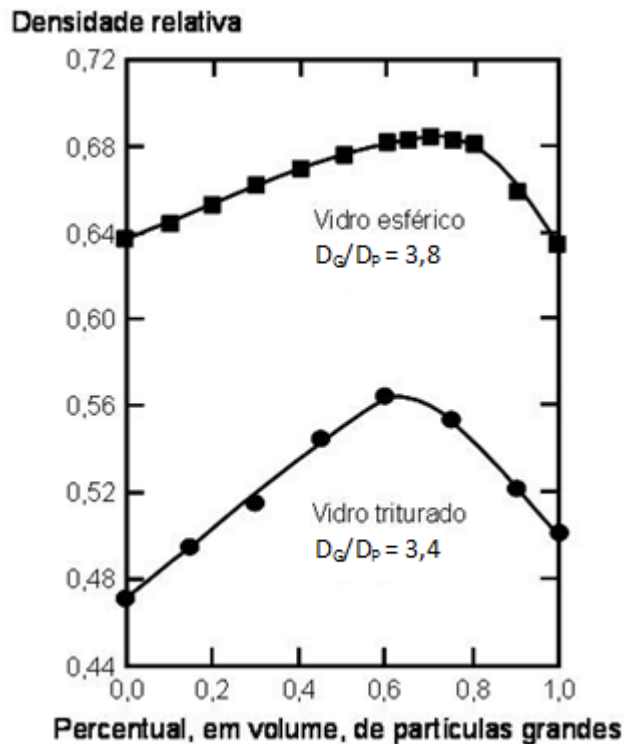


Figura 30: Densidade relativa de empacotamento em função do percentual (em volume) de partículas grandes (Yerazunis et al., 1962).

Dependendo da forma da partícula e da relação D_G/D_P , o pico na densidade de empacotamento pode ocorrer sob várias composições, como se mostra na Figura 31, ocorrendo com maior frequência em partículas esféricas (Standish & Borger, 1979).

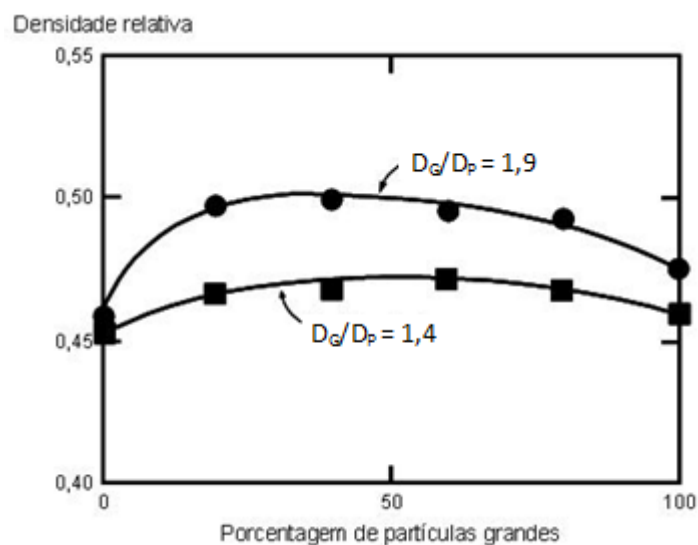


Figura 31: Densidade relativa de empacotamento em função do percentual de partículas irregulares grandes (Standish & Borger, 1979).

Devido à existência de uma ampla faixa de combinações de forma, é difícil prever um comportamento específico para misturas bimodais envolvendo partículas não-esféricas. Contudo, os princípios gerais associados com empacotamentos bimodais de esferas são observados. Segundo German (1989), o estudo de misturas de partículas não-esféricas de diferentes tamanhos e formas constitui-se em uma área empírica. Contudo, os padrões observados são similares a estes encontrados em empacotamentos de esferas.

2.7.7 Empacotamentos Multimodais

2.7.7.1 Considerações gerais

Em sistemas multimodais, assim como em sistemas binários, é necessário uma relação de 7:1 entre as partículas, para a obtenção de empacotamento otimizado. Para um empacotamento trimodal, isto corresponde a uma relação entre as partículas de 49:7:1. Considerando que a máxima densidade relativa de empacotamento para esferas de igual tamanho é 0,64 e que para empacotamentos binários pode-se chegar a 0,86, há um ganho relativo de, no máximo, 34% na densidade relativa. Para um empacotamento ternário, a máxima densidade relativa é, aproximadamente, 0,95, correspondendo a um acréscimo de, aproximadamente, 10% na densidade, quando comparado com sistemas bimodais, referindo-se que a adição de mais componentes pode reduzir a densidade relativa de empacotamento, pois problemas práticos podem surgir na formação das misturas. Esse fato mostra a utilidade de estudos de empacotamentos binários, pois o ganho relativo na densidade relativa é maior, sendo fácil encontrar tamanhos diferentes na relação 7:1. Além disso, misturas formadas com mais componentes podem causar problemas de coesão, pontes de ligação, etc., reduzindo a densidade de empacotamento.

Por outro lado, apesar de não haver ganho significativo na densidade de empacotamento, o estudo de empacotamentos trimodais é útil, pois possibilita a formação de uma base para o entendimento das distribuições contínuas.

2.7.7.2 Empacotamentos trimodais

Estudos de empacotamentos ternários geralmente são focados em partículas esféricas, embora outras formas dêem resultados similares. Um empacotamento trimodal tem alta dependência das relações entre seus constituintes, como refere German (1989), sendo na prática considerado como a combinação de três misturas binárias possíveis, pela combinação de seus constituintes envolvidos, como se representa na Figura 32.

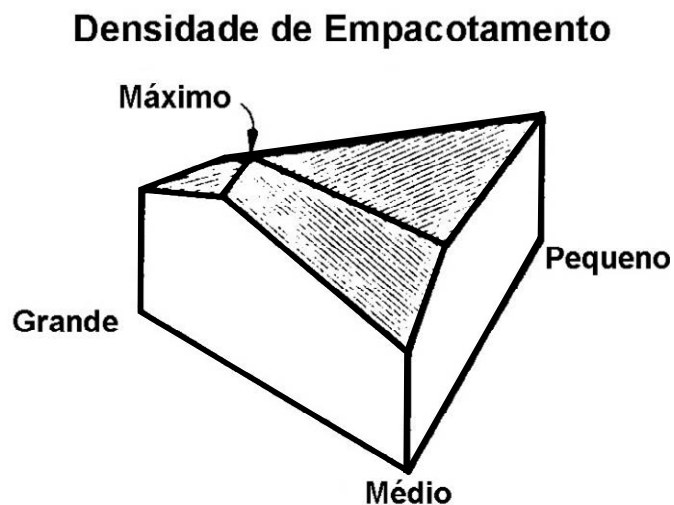


Figura 32: Empacotamento trimodal, com a altura indicando a densidade de empacotamento, em uma composição intermediária ótima (German, 1989).

Segundo German (1989), a Figura 32 é análoga a um diagrama ternário de fase, onde linhas de isodensidade são projetadas em um triângulo equilátero, sendo o comportamento de cada sistema binário representado nos lados desse triângulo. Nota-se que a mais alta densidade de empacotamento ocorre no sistema binário envolvendo as maiores e menores partículas, conforme se apresenta na Figura 33. Vale ressaltar que, dependendo da relação entre seus constituintes, um empacotamento ternário pode ter uma maior densidade de empacotamento do que um empacotamento binário.

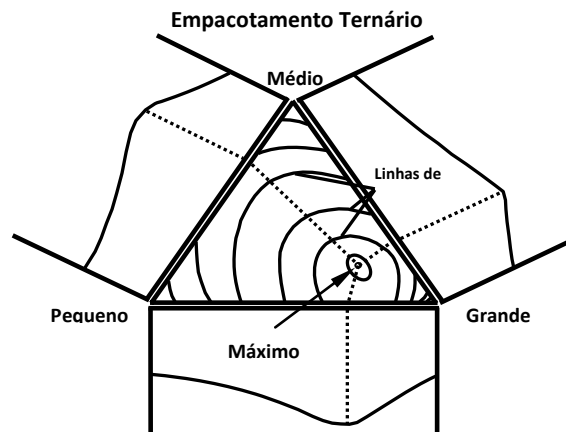


Figura 33: Linhas de isodensidade em um diagrama de composição ternária, com os empacotamentos binários indicados em cada eixo (German, 1989).

A chave para o entendimento de misturas de ordem superior é que grandes diferenças no tamanho das partículas ajudam no processo de empacotamento, como destaca Furnas (1931). Como pode se observar na Figura 34, quanto maior a razão entre os diâmetros das partículas envolvidas no empacotamento, maior é a densidade atingida. Sistemas que envolvem três ou quatro componentes podem ter densidades menores que sistemas binários, dependendo da diferença entre os tamanhos de partículas envolvidas no empacotamento. Verifica-se, também, que o aumento na densidade em sistemas empacotados com mais do que três componentes envolvidos no processo é relativamente pequeno. Isso mostra a importância de estudos limitados até três componentes, haja vista que em composições com número superior o acréscimo na densidade do empacotamento é pouco significativo.

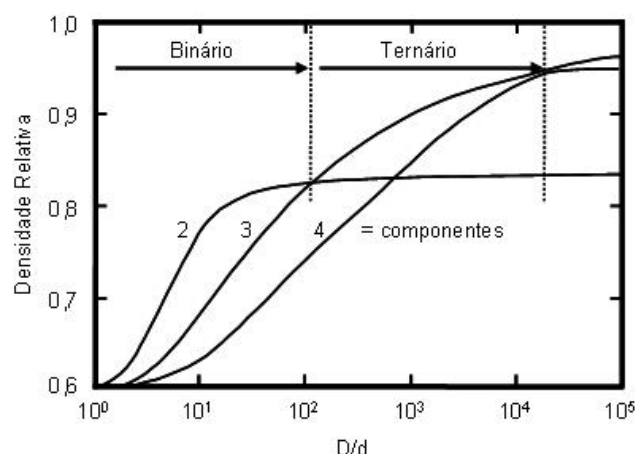


Figura 34: Densidade atingida com dois, três ou quatro componentes em função da relação entre o maior e o menor diâmetro das partículas (Furnas, 1931).

O Quadro 10 mostra várias composições correspondendo à máxima densidade de empacotamento. Fica evidente que, em empacotamentos trimodais, existe uma maior dependência, em percentual, das partículas grandes. Na proporção abaixo da relação ótima (1:7:49), verifica-se que as partículas grandes e pequenas têm peso maior na densidade de empacotamento, enquanto que nas relações acima da composição ótima os três componentes têm contribuições significativas na densidade de empacotamento.

Quadro 10: Exemplos de empacotamentos trimodais de esferas otimizados

$D_G:D_M:D_P$	% Pequenas	% Médias	% Grandes	Densidade Relativa
1:5:25	21,6	9,2	69,2	0,850
1:7:49	13,2	20,7	66,1	0,878
1:7:49	11,0	14,0	75,0	0,950
1:7:77	10,0	23,0	67,0	0,900
1:10:100	11,2	22,5	66,3	0,892
1:100:10000	10,0	23,4	66,6	0,916

Fonte: McGeary (1961); Lee (1970)

A densidade máxima de empacotamento obtida por Lee (1970), foi 0,926, na composição de 8,7%, 24,2% e 67,1 % de partículas pequenas, médias e grandes, respectivamente. Westman & Hugill (1930) obtiveram uma

máxima densidade com uma composição de 9%, 25% e 66% com as relações entre as partículas tendendo ao infinito. A Figura 35 mostra um gráfico ternário com os dados obtidos por Lee (1970), num empacotamento ternário de esferas na proporção de 1:5:25. O valor máximo obtido para o empacotamento foi 0,850, em um volume aproximado de 22%, 9% e 69% para as partículas pequenas, médias e grandes, respectivamente.

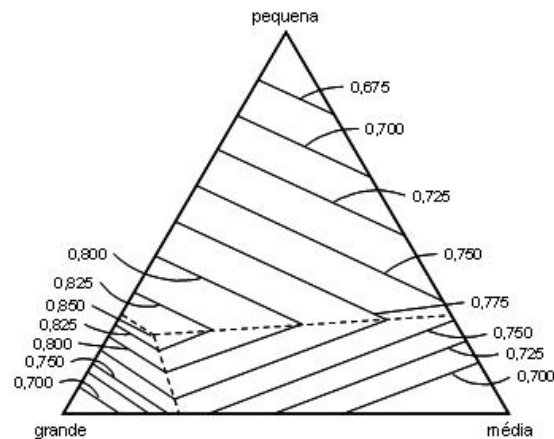


Figura 35: Linhas de contorno de isodensidade para um empacotamento trimodal de esferas (Lee, 1970).

Empacotamentos trimodais envolvendo baixas relações entre as partículas não aumentam a densidade de empacotamento, como pode ser observado na Figura 34. Empacotamentos binários frequentemente excedem a densidade de empacotamento de todas as possíveis misturas ternárias. A Figura 36 ilustra esse problema em um empacotamento ternário de esferas com 7, 14 e 28 mm de diâmetro, que corresponde a uma relação de 4:2:1. Observa-se que o empacotamento ótimo ocorre no sistema binário constituído pelas esferas grande e pequenas (28 e 7 mm), na composição aproximada de 60 a 70% de partículas grandes, sendo que todas as composições trimodais apresentam valores inferiores de densidade.

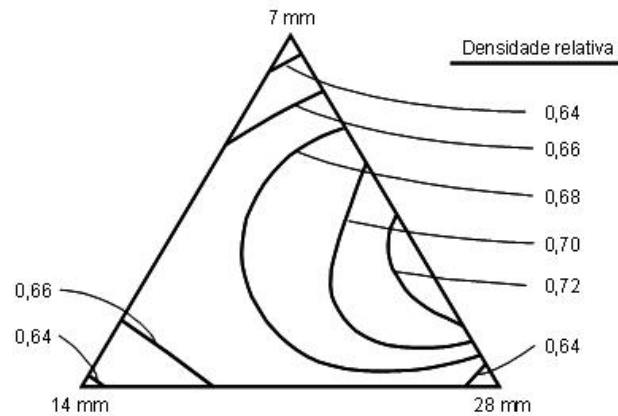


Figura 36: Densidade relativa na composição ternária de esferas na proporção 4:2:1 (German, 1989).

Entretanto, em proporções suficientemente maiores, a densidade de empacotamento máxima ocorre em uma composição que envolve as três partículas, como mostra a Figura 34. A Figura 37 mostra os resultados de um estudo de empacotamento ternário na relação 51:8:1 (Westman & Hugill, 1930), observando-se a ocorrência de uma densidade de empacotamento máxima dentro do diagrama ternário.

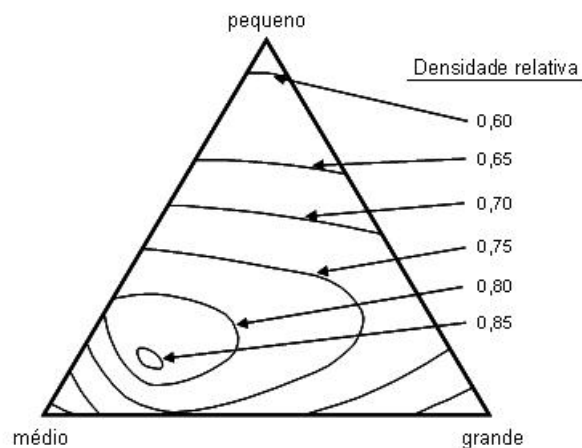


Figura 37: Densidade relativa na composição ternária de areia na proporção 51:8:1 (Westman & Hugill, 1930).

Empacotamentos trimodais envolvendo partículas não esféricas apresentam menor densidade, quando comparadas com partículas esféricas, sendo menos susceptíveis à composição das partículas envolvidas (Standish & Borger, 1979 e Yu & Standish, 1987). Contudo, nota-se similaridade entre

empacotamentos ternários esféricos e não esféricos (Standish & Borger, 1979), como pode ser observado na Figura 38.

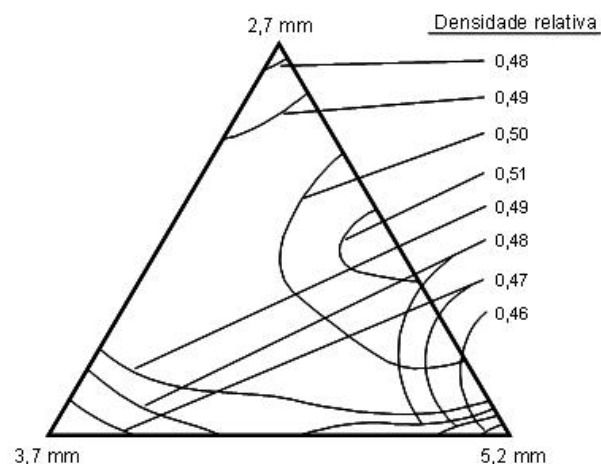


Figura 38: Densidade relativa na composição ternária de partículas irregulares na proporção 5,2:3,7:2,7 (Standish & Borger, 1979).

Além da influência da proporção dos três constituintes no empacotamento ternário, há que se considerar, também, os efeitos do atrito existente entre partículas irregulares. Partículas que exibem coesão entre si tendem a ter uma menor densidade de empacotamento. Para contornar esse problema, maior tempo de vibração é necessário, para que as partículas atinjam a maior densidade de empacotamento, por causa do elevado número de partículas pequenas existentes em um empacotamento trimodal ótimo.

2.7.7.3 Empacotamentos com distribuição contínua

Pesquisas com distribuição contínua de partículas visando empacotamento ótimo foram realizadas por Fuller & Thompson (1907), no desenvolvimento de um concreto cuja resistência e densidade ótimas ocorreram em misturas contendo altas concentrações de partículas grandes e arredondadas. Resultados similares foram encontrados por Sohn & Moreland (1968), trabalhando com areias, para várias distribuições gaussianas e dois níveis de esfericidade. Furnas (1931), utilizando-se de partículas peneiradas, variando em tamanho por um fator constante de 1,414, encontrou empacotamento ótimo ocorrendo quando a fração peneirada tivesse 1,10 vezes a quantia da fração peneirada imediatamente inferior. Trabalhos posteriores

realizados por Anderegg (1931) confirmaram o comportamento ótimo desse tipo de distribuição.

2.8 Resistência à Penetração

Há várias pesquisas focando a resistência entre partículas em empacotamentos de baixa densidade e em partículas compactadas. A atenção é direcionada para as forças coesivas e de adesão, em empacotamentos de baixa densidade, e em partículas compactadas, para as relações entre a tensão aplicada e a densidade relativa. Contudo, há carência de estudos básicos envolvendo a resistência à penetração em sistemas binários e ternários em sistemas simplificados, ou seja, em esferas de vidro e areias limpas. Comumente, entre as características que influenciam a resistência à penetração dos solos estão a textura, a porosidade, a estrutura, o conteúdo de água, a presença de agentes de cimentação e a compactação.

De acordo com a visão agrônômica, a resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas diretamente relacionadas com o crescimento das plantas (Letey, 1985), servindo como um dos indicadores de problemas de compactação/adensamento. Nessa área do conhecimento, valores críticos de resistência à penetração estão na faixa de 1,5 a 4,0 MPa (Arshad et al., 1996; Rosolem et al., 1999), variando em função do tipo de solo e espécie cultivada (Genro Júnior et al., 2004). Muitos pesquisadores, contudo, utilizam o valor de 2 MPa como limite crítico ao crescimento radicular, por exemplo (Taylor et al., 1966).

Em geotecnia, é comum trabalhar-se com cones penetrométricos mecânicos e, principalmente, eletrônicos (CPT) de dimensões padronizadas, sob condições de campo e de laboratório. Essa modalidade de ensaio de campo está padronizada pela ABNT, através da NBR 12069 (ABNT, 1991), onde se descreve o método para se determinar a resistência do solo à penetração estática e 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, para fins de projeto e

construção de obras de terra e de engenharia de fundações. Elementos básicos deste ensaio, na modalidade de campo, são ângulo de ponta do cone de 60° , área de ponta projetada do cone de 10 cm^2 e velocidade de penetração de $20 \text{ mm/s} \pm 5 \text{ mm/s}$. Valores de resistência de ponta são variáveis, podendo se situar, por exemplo, na faixa de 0 a 60 MN/m^2 (Meigh, 1987), englobando desde argilas moles até areias densas cimentadas.

2.9 Condutividade hidráulica em sistemas empacotados

O estudo do fluxo de fluidos por entre partículas estruturadas é importante em várias situações como, por exemplo, na infiltração da água através do solo, lubrificação de rolamentos, fluxo em tubos de calor, entre outros. Por causa desse interesse generalizado, o estudo do fluxo por entre poros de sistemas com partículas empacotadas se torna imprescindível.

De acordo com German (1989) o tratamento matemático do fluxo dos fluidos em sistemas empacotados, envolve algumas variáveis dependentes, como o tamanho das partículas, densidade de empacotamento, rugosidade, área e forma da superfície dos grãos, viscosidade e compressibilidade do fluido, pressão e velocidade do escoamento, temperatura do sistema e saturação da amostra. Tem-se, também, que a principal diferença entre os dois tipos fundamentais de fluidos, gases e líquidos, é a compressibilidade. Com isso, pode-se inferir que a utilização de um líquido, que possa ser considerado incompressível, é de interesse para o estudo em questão, já que torna evidente uma das variáveis a ser considerada.

As características de permeabilidade dependem da partícula e do tipo de empacotamento. Um sistema empacotado que possui estrutura aleatória, ou seja, sem ordem preferencial, possui uma permeabilidade isotrópica. Já um sistema empacotado que possui uma estrutura organizada, não tem permeabilidade isotrópica, e esta depende da direção do fluxo. A permeabilidade é muito sensível à porosidade e ao tamanho dos poros, pois pequenas mudanças nestas características poderão induzir grandes variações na permeabilidade.

2.10 Agentes de cimentação

Um elemento importante na estruturação dos solos, em especial aqueles formados em ambientes tropicais, é a presença de agentes de cimentação de várias características químicas, podendo-se referir a óxidos e carbonatos, dentre outros, que garantem às massas de solos condições diferenciadas de comportamento mecânico, em especial de resistência mecânica e compressibilidade.

Considerando esses aspectos, será dada ênfase no presente trabalho à caracterização do comportamento mecânico de frações areias dos solos de quando da adição às mesmas de agentes de cimentação natural (óxido de ferro) e artificial (cal hidratada). Com relação à importância dos óxidos de ferro na estruturação dos solos tropicais ela é notória, pois funcionam como agregantes das partículas primárias (argila, silte e areia), podendo dar origem a camadas cimentadas que restringem a movimentação de água. (Resende et. al, 2002) Quanto à cal, é de interesse apresentar algumas considerações sobre o seu emprego em trabalhos de estabilização.

Segundo Lima (1981), a cal é um dos produtos que podem ser utilizados para melhorar as qualidades do solo como material para a construção civil. Nessas aplicações, o termo cal, na etimologia, refere-se ao óxido de cálcio, mas, em geral, é empregado para designar este óxido e seus derivados. A cal é comercialmente produzida pela calcinação de calcário britado, na qual o carbonato de cálcio presente na rocha é reduzido a óxido de cálcio. Calcina-se, também, o dolomito, ou calcário dolomítico, que é uma rocha em cuja composição tem-se presente os carbonatos de cálcio e magnésio. O óxido de cálcio produzido recebe o nome de cal cálcica, e o produto contendo este óxido e o óxido de magnésio é denominado cal dolomítica, sendo ambos os tipos conhecidos como cal viva. A adição controlada de água à cal viva produz a cal hidratada, que é, por exemplo, o produto de maior uso para fins rodoviários no Brasil.

De modo geral, como destaca Lima (1981), todos os solos de granulometria fina reagem com a cal, ocorrendo trocas catiônicas, floculações, reações de carbonatação e reações pozolânicas, que afetam, benéficamente, a trabalhabilidade, plasticidade, caráter expansivo e resistência mecânica dos solos. Esse autor também destaca que: (i) as reações pozolânicas entre os solos e a cal, responsáveis por ganhos elevados de resistência mecânica, nem sempre ocorrem, sendo influenciadas pelas propriedades naturais dos solos (presença de sílica e alumina na fração argila), pelos tipos e teores de cal empregados, pelas condições de cura e pelas características de compactação; (ii) na carbonatação, a cal reage com o dióxido de carbono do ar atmosférico para formar agentes de cimentação relativamente fracos, os carbonatos de cálcio e magnésio, dependendo do tipo de cal utilizada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Esferas de vidro

Empregou-se um conjunto de esferas de vidro neste trabalho devido ao fato de se poder gerar sistemas simplificados úteis para o estudo de solos granulares, estabelecendo-se uma estrutura para a compreensão do empacotamento de partículas de menor grau de uniformidade. Justifica-se seu uso, como segue: (i) pelo reduzido atrito quando comparada com outras formas de partícula e, (ii) para especificar a sua dimensão, é necessário somente um parâmetro, o diâmetro.

As esferas de vidro foram adquiridas na Empresa TECHNOGLASS (<http://www.technoglass.com.br>), cujas propriedades químicas e físicas encontram-se dispostas no Quadro 11 e disponíveis no endereço eletrônico <http://mfabricatori.vilabol.uol.com.br/home.htm>.

Quadro 11: Composição química e física das esferas de vidro

Propriedades Químicas	
Composição química	Vidrado soda-cal
Sílica livre	Nenhuma
Propriedades Físicas	
Densidade (g cm^{-3})	2,5
Dureza (Mohs)	5 – 6

3.1.2 Solos

O trabalho foi realizado com o emprego de quatro solos arenosos, localizados no 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, perfazendo um total de 800 kg para cada solo. No Quadro 12 apresentam-se as texturas dos solos em estudo e na Figura 39 apresentam-se os locais de coleta das amostras de solos, a partir de uma vista aérea.

Quadro 12: Textura dos solos utilizados no presente trabalho

Solo	Classificação EMBRAPA (1997)			Classificação ABNT (1995)		
	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Cachoeira da Prata (CP)	1	2	97	3	4	93
João Pinheiro (JP)	18	2	80	16	4	80
Sete Lagoas (SL)	9	21	70	7	18	75
Vila Secundino (VS)	7	25	68	6	27	67

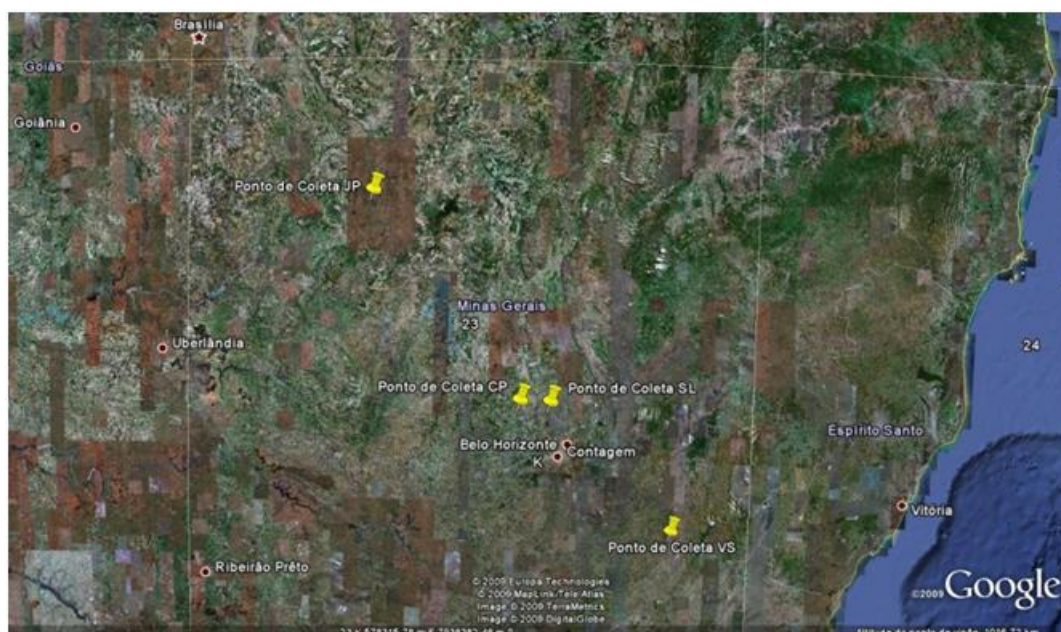


Figura 39: Localização dos municípios de coleta situados no Estado de Minas Gerais (GOOGLE, 2009).

As amostras de solos selecionados para o presente trabalho foram, como segue:

- Solo JP: Horizonte B de Latossolo Amarelo distrófico de textura franco-arenosa, originário do arenito Urucuia. O local de coleta da amostra de coordenadas 17°25'48.65"S e 46°04'37.27"W foi um talude de corte localizado no lado direito da MG 181, que liga as cidades de João Pinheiro/MG e Brasilândia de Minas/MG. A Figura 40 mostra o ponto de coleta do solo JP;



Figura 40: Ponto de coleta do Solo JP.

- Solo VS: solo residual jovem, classificado pedologicamente como Argissolo Câmbico (Horizonte C, saprolito), oriundo de um perfil de intemperismo de solos desenvolvidos de gnaiss do Pré-Cambriano, que apresenta coloração acinzentada, textura areno-silto-argilosa. Apresenta uma curva granulométrica bem graduada, que se aproxima da faixa determinada a partir da equação de Fuller-Talbot, para misturas densas. O local de coleta da amostra de coordenadas 20°45'48.06"S e 42°51'29.16"W foi um talude de corte localizado na Vila Secundino, no Campus da Universidade Federal de Viçosa, na cidade de Viçosa-MG. A Figura 41 mostra o ponto de coleta do solo VS;



Figura 41: Ponto de coleta do Solo VS.

- Solo SL: Horizonte C (saprolito) de Argissolo Vermelho distrófico de textura argilo-areno-siltosa, oriundo de um perfil de intemperismo de solos desenvolvidos de gnaiss. O local de coleta da amostra de coordenadas $19^{\circ}30'31.14''\text{S}$ e $44^{\circ}10'31.77''\text{W}$ foi um talude de corte localizado no lado direito de uma estrada vicinal do município de Prudente de Moraes/MG, próximo ao município de Sete Lagoas/MG, cujo acesso se dá pela MG 424 que liga Sete Lagoas a Prudente de Moraes. A Figura 42 mostra o ponto de coleta do solo VS;



Figura 42: Ponto de coleta do Solo SL.

- Solo CP: sedimento aluvial de várzea (areia de draga). O local de coleta da amostra de coordenadas 19°29'59.06"S; 44°29'42.25"W foi 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. A Figura 43 mostra o ponto de coleta do solo CP.



Figura 43: Ponto de coleta do Solo CP.

3.1.3 Agentes de cimentação

Foram utilizados dois diferentes agentes de cimentação, a saber: (i) cal hidratada, para simular as reações de carbonatação presentes no processo de formação de depósitos arenosos; e (ii) $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (nitrato férrico) e KOH (hidróxido de potássio) e hematita sintética (Pó Xadrez®), para a formação de óxidos de ferro.

3.2 Métodos

3.2.1 Fase 1: Coleta e preparação dos solos

Foram coletados em torno de 800 kg de cada solo, com auxílio de pá e picareta, e acondicionados em sacos de coleta com, aproximadamente, 50 kg cada um. Os solos foram transportados para o Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, onde foram colocados em bandejas

metálicas para secagem ao ar e, posteriormente, passados na peneira de abertura nominal 2,000 mm, para a retirada de material grosseiro.

3.2.2 Fase 2: Pré-tratamentos

As amostras de solo receberam os seguintes pré-tratamentos: (i) dispersão mecânica e química; (ii) remoção de matéria orgânica; (iii) remoção de óxidos de ferro e, (iv) separação da fração areia em classes.

3.2.2.1 Dispersão mecânica e química

Foi realizada por meio de dispersor mecânico (Agitador do tipo Wagner), como se mostra na Figura 44, especialmente projetado e construído para esta pesquisa e com capacidade de produção de grandes volumes de solo (48 garrafas plásticas de 2 L, com 300 g de solo em cada garrafa), 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 44: Dispersor mecânico utilizado para grandes volumes de solo.

3.2.2.2 Remoção de matéria orgânica

Empregou-se o hipoclorito de sódio, com pH ajustado a 9,5, em banho-maria a 50°C durante 6 h para retirada da matéria orgânica das

amostras e, na seqüência, lavagem em água corrente na peneira de abertura nominal 0,053 mm, em procedimento adaptado de Anderson (1963).

3.2.2.3 Remoção de óxidos de ferro

Utilizou-se uma solução de ditionito-citrato em banho-maria a 75°C por 1 h, em três extrações seqüenciais e, na seqüência, lavagem da amostra em água corrente na peneira 0,053 mm, segundo procedimento adaptado de Mehra & Jackson (1960). A quantidade de ditionito empregada foi calculada em função de experimento prévio realizada com o solo VS. Nesse experimento procedeu-se à extração de óxidos de ferro com a massa do ditionito determinada em percentuais, relativos à massa da amostra, de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Baseado na Figura 45, determinou-se a maior eficiência na extração de ferro (em três extrações sucessivas), que foi fixada em 6%, sendo esse valor adotado como referência para os demais solos.

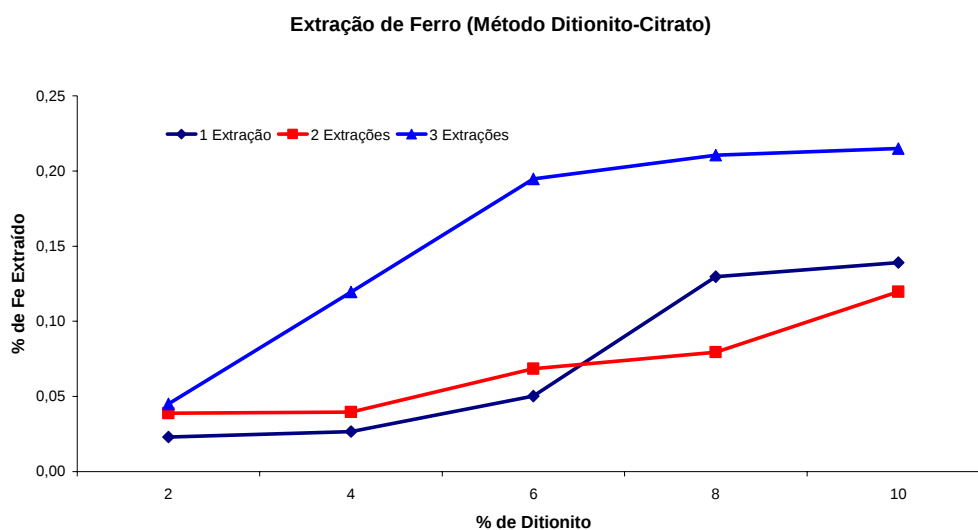


Figura 45: Curva de extração de ferro em função da porcentagem de ditionito.

3.2.2.4 Separação da fração areia em classes

Para a separação dos diversos tamanhos de partículas da fração areia e das esferas de vidro, foram utilizadas peneiras certificadas, distribuídas em vinte e uma classes de tamanho, como se ilustra na Figura 46, fazendo-se uso de um agitador eletromagnético de ação vibratória vertical e horizontal, com controle de intensidade, tempo e modo de peneiramento, como se informa no Quadro 13.



Figura 46: Peneiramento da fração areia em 21 classes de tamanho.

Quadro 13: Peneiras usadas na separação da fração areia limpa e esferas de vidro

Item	Abertura da peneira (mm)	Item	Abertura da peneira (mm)
1	2,000	12	0,297
2	1,680	13	0,250
3	1,410	14	0,210
4	1,190	15	0,177
5	1,000	16	0,149
6	0,840	17	0,125
7	0,710	18	0,105
8	0,590	19	0,088
9	0,500	20	0,074
10	0,420	21	0,062
11	0,350	22	0,053

3.2.3 Fase 3: Análises preliminares

3.2.3.1 Fator f

Para se expressar os resultados das análises de solo feitas em terra fina seca ao ar (TFSA) para 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 0,0001 g, em recipiente previamente tarado com sensibilidade de 0,0001 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 0,0001 g; e
- calcular o fator f pela Equação (6).

$$f = \frac{M_{TFSA}}{M_{TFSE}} \quad (6)$$

3.2.3.2 Densidade de partículas

Empregou-se o método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997), tendo álcool etílico como líquido penetrante, segundo o procedimento:

- pesar, aproximadamente, 20 g da amostra, com sensibilidade de 0,01 g (M_S), transferindo-a para um recipiente de alumínio de massa conhecida;
- aferir um balão volumétrico de 50 mL, de forma a determinar seu volume (V_B) com sensibilidade de 0,05 mL;
- transferir a amostra para o balão volumétrico;
- adicionar um volume conhecido de álcool etílico, de forma a cobrir a amostra (aproximadamente 1 cm), agitando cuidadosamente para se eliminar as bolhas de ar que ocupam o sistema poroso;
- deixar a amostra, aproximadamente, 30 min em repouso;
- nos próximos 30 min, agitar, periódica e vagarosamente, para eliminar possíveis bolhas de ar remanescentes;
- completar o volume do balão (V_C), registrando o volume total de álcool gasto; e
- a partir da Equação (7), calcular a densidade de partículas.

$$D_P = \frac{M_S \cdot \frac{1}{f}}{V_B - V_G} \quad (7)$$

Na Equação (7), tem-se: D_P = densidade de partículas [ML^{-3}]; M_S = massa da amostra [M]; V_B = volume do balão volumétrico [L^3]; V_G = volume de álcool etílico necessário para completar o balão volumétrico [L^3]; e f = fator de correção dos resultados de análises do solo feitas em TFSA em TFSE a 105°C [MM^{-1}].

3.2.4 Fase 4: Análises morfométricas e morfológicas

3.2.4.1 Morfometria das partículas

As diversas classes que compõem a fração areia foram fotografadas em câmera digital Nikon Coolpix 4500 com CCD de 4.0 Megapixel acoplada a um Microscópio Olympus CH30. Para o processamento das imagens, foi utilizado o programa Adobe® Photoshop® CS2. Nas imagens obtidas, aplicou-se o comando “Limiar”, para converter os valores de pixel das imagens em valores de preto ou branco, como exemplificado pelas Figuras 47A e 47B.

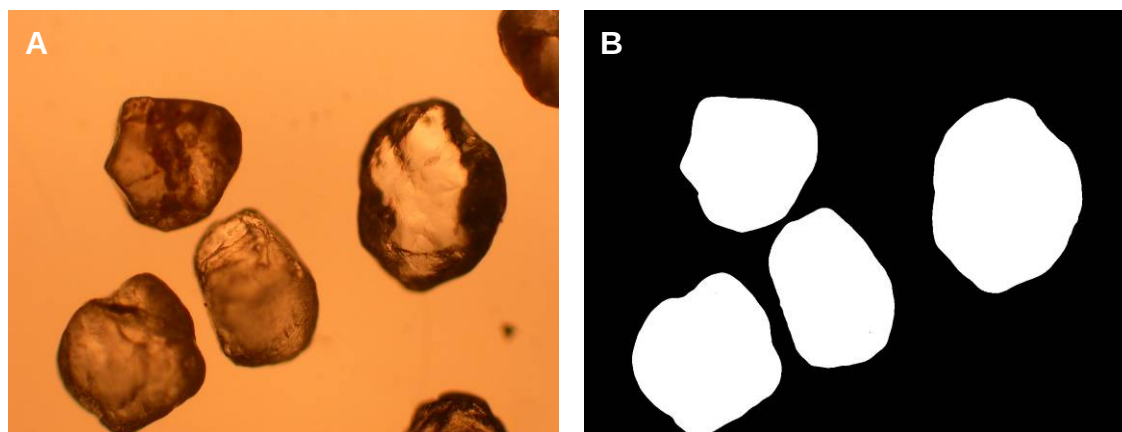


Figura 47: (A) imagem adquirida em câmera digital: (B) aplicação do comando Limiar do programa Adobe® Photoshop® CS2.

Com as imagens processadas e calibradas com auxílio de uma barra micrométrica, utilizou-se o programa QUANTIPORO (Fernandes Filho & Viana, 2001), para a geração dos atributos morfométricos área, perímetro,

arredondamento, maior eixo e menor eixo e, com auxílio de planilha eletrônica, foram calculados os atributos alongamento, diâmetro de Feret e compacidade (Wilcox et al., 1997), cujas definições e expressões são apresentadas a seguir:

- área: é o número de pixels do polígono. Se a imagem for calibrada, então a área será computada na unidade de calibração; caso contrário será em pixels;
- perímetro: é o comprimento do lado externo do objeto. É uma medida fortemente influenciada 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: 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. É calculado pela Equação (8), onde Ar é o arredondamento [L^2L^{-2}], A é a área do objeto [L^2] e P é o perímetro do objeto [L];

$$Ar = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (8)$$

- maior eixo e menor eixo: são, respectivamente, os comprimentos da maior linha [L] que pode ser traçada através do objeto e da menor linha [L], que pode ser traçada através da perpendicular ao maior eixo do objeto, como se apresenta na Figura 48;

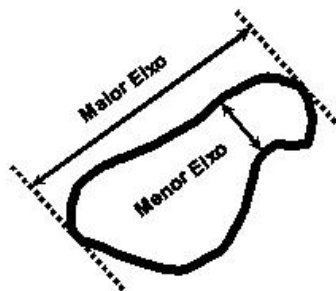


Figura 48: Esquema representativo dos eixos maior e menor.

- alongamento: é o quociente entre o menor eixo e o maior eixo. O resultado é um valor entre 0 e 1. Se o valor for igual a 1, o objeto é aproximadamente circular ou quadrado. À medida que o valor do alongamento afastar-se de 1, o objeto torna-se mais alongado. É

calculado pela Equação (9), onde Al é o alongamento [LL^{-1}], Me é o comprimento do menor eixo [L] e Ma é o comprimento do maior eixo [L];

$$Al = \frac{Me}{Ma} \quad (9)$$

- diâmetro de Feret: é o diâmetro de um círculo que tem a mesma área do objeto, sendo calculado pela Equação (10), onde DF é o diâmetro de Feret [L] e A é a área do objeto [L^2];

$$DF = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (10)$$

- compacidade: fornece a medida da circularidade do objeto. Seu valor situa-se entre 0 e 1, sendo que se o valor for igual a 1, o objeto é aproximadamente circular. À medida que o valor afasta-se de 1, o objeto torna-se menos circular. Emprega-se a Equação (11) para o cálculo desse parâmetro, onde Co é a compacidade [LL^{-1}] e Ma é o comprimento do maior eixo [L].

$$Co = \frac{\sqrt{\frac{4A}{\pi}}}{Ma} \quad (11)$$

3.2.4.2 Avaliação qualitativa da rugosidade

Para a análise qualitativa da rugosidade das amostras, as mesmas foram afixadas em suportes (*stubs*) e recobertas com ouro, utilizando-se o metalizador modelo Sputter Coater FDU010, Bal-Tec, Balzers, como se ilustra nas Figuras 49A e 49B, para posterior utilização em microscópio eletrônico de varredura com câmera digital (modelo Leo 1430VP, Zeiss), conforme a Figura 50, do Núcleo de Microscopia e Microanálise da UFV.

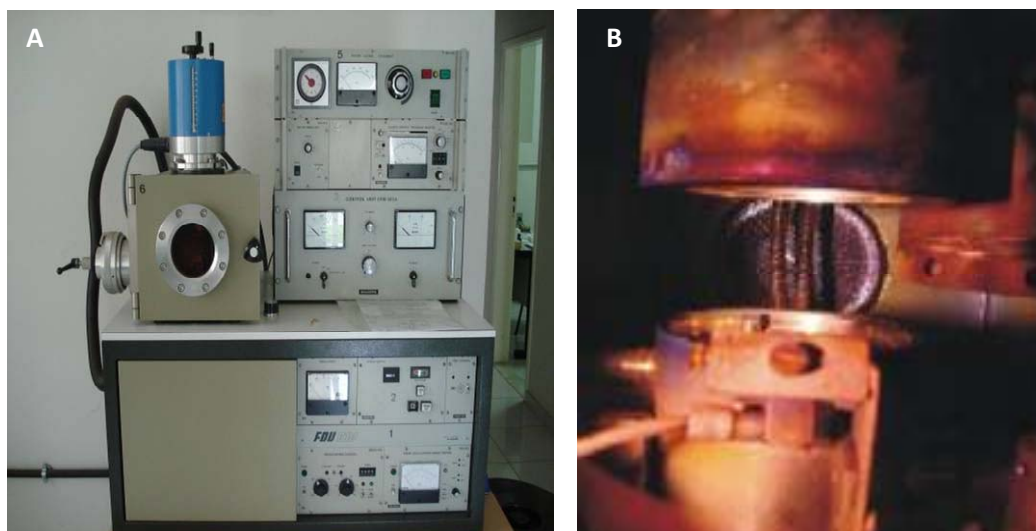


Figura 49: (A) Metalizador, modelo Sputter Coater FDU010, Bal-Tec, Balzers. (B) Detalhe do processo de recobrimento da amostra com ouro.



Figura 50: Microscópio eletrônico de varredura com câmera digital, modelo Leo 1430VP Zeiss, do Núcleo de Microscopia e Microanálise da UFV.

3.2.4.3 Tomografia computadorizada

Foram preparadas amostras empacotadas em cilindros de PVC com 20 mm de diâmetro e 25 mm de altura, realizando-se os ensaios de tomografia computadorizada na EMBRAPA/CNPDIA, em São Carlos/SP, para avaliação do empacotamento das partículas. Utilizou-se o tomógrafo SkyScan 1172, como se apresenta nas Figuras 51A, 51B, 52A e 52B.

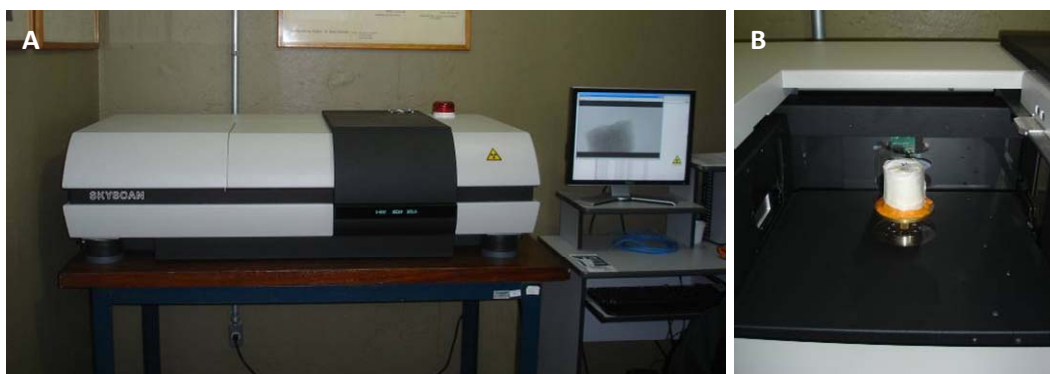


Figura 51: (A) Tomógrafo computadorizado da EMBRAPA/CNPDI. (B) Detalhe da fixação da amostra no aparelho.

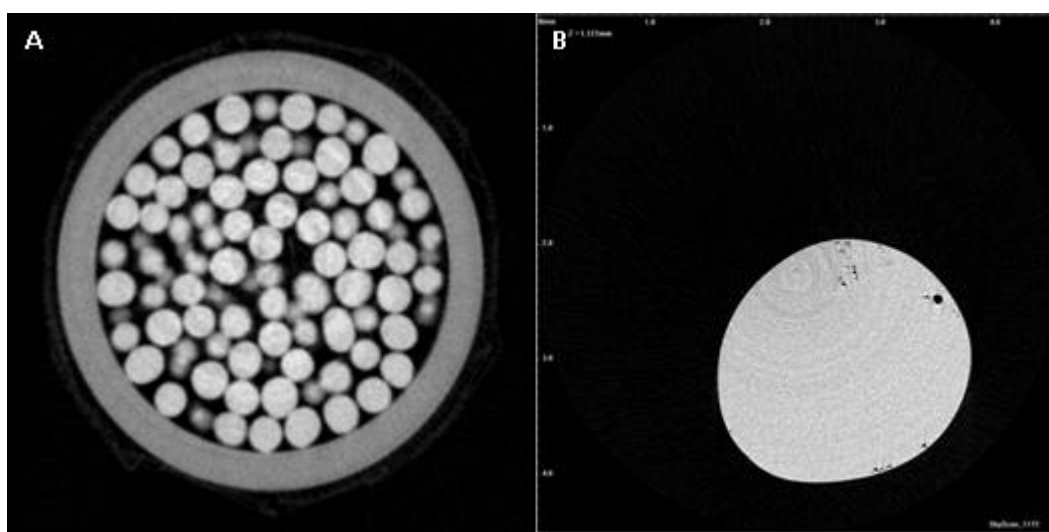


Figura 52: (A) Imagem de empacotamento de esferas de vidro (resolução 34,8 μm). (B) Imagem de esfera de vidro (resolução 2,2 μm).

Esta técnica permitiu observar seções transversais do interior de amostras, em alta resolução, sem que fosse necessário cortá-las ou fazer qualquer outro tipo de invasão, utilizando-se o princípio da atenuação da radiação nos meios materiais. A idéia básica na tomografia computadorizada é reconstruir a imagem de uma seção da amostra, através de suas projeções em várias direções. Essas projeções são obtidas varrendo-se a amostra com um feixe de radiação e contando-se os fótons que a atravessam. Formou-se, assim, uma matriz de dados, que foi processada em um microcomputador, obtendo-se, em uma tela de monitor, a figura da seção no plano do feixe. A utilização dessa técnica permite a obtenção de imagens não-destrutivas de

amostras com alta resolução (em escala micrométrica), além da possibilidade de substituição de técnicas que envolvam impregnação com resina e preparação de lâminas para posterior obtenção de imagens em fotomicroscópio.

3.2.5 Fase 5: Análises físicas e geotécnicas

3.2.5.1 Empacotamentos uniformes, binários e ternários

Para a produção de amostras ou corpos-de-prova nos empacotamento de sistemas uniformes, binários e ternários, empregou-se um equipamento denominado empacotador de partículas, que foi projetado e construído para uso na presente pesquisa, com o objetivo de simular os procedimentos de empacotamento estabelecidos por Dalla Riva (2005), com as seguintes características: sistema dotado de base giratória com controle de velocidade de rotação (em rpm); controle da frequência de batidas pelo uso de um solenóide (em Hz), com possibilidade de movimento vertical; e, sensor de deslocamento vertical, utilizando-se de um potenciômetro. A Figura 53 ilustra o equipamento.

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 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.

O procedimento consistiu na deposição inicial da partícula de maior diâmetro em quantias aproximadas de 50 mL, colocadas no aparato de acrílico com auxílio de um funil, para se evitar que as partículas caíssem de uma única vez e perturbassem o ajuste anteriormente efetuado. Com o auxílio do empacotador de partículas, foram produzidas vibrações de frequência estipulada em 10 Hz e amplitudes controladas, para permitir que as partículas pudessem se ajustar e atingir a configuração mais densa possível (menor volume) dentro da proveta. A frequência e a amplitude foram determinadas

empiricamente, de modo a se permitir que as partículas vibrassem em torno de seu eixo, sem ocasionar deslocamentos que pudessem aumentar o volume total. Esse procedimento foi repetido, até que a totalidade das partículas de maior diâmetro fosse depositada na proveta.



Figura 53: Empacotador de partículas construído para a produção de sistemas uniformes, binários e ternários.

Na seqüência, as partículas de menor diâmetro foram introduzidas na proveta, conforme descrito anteriormente, possibilitando que as partículas de menor diâmetro pudessem migrar entre os caminhos porosos formados pela matriz das partículas de maior diâmetro, até se atingir a maior profundidade possível dentro do aparato de acrílico. Dessa forma, obteve-se a configuração mais densa possível do empacotamento binário (Lade et al., 1998).

Para a produção de empacotamentos ternários, o procedimento empregado foi o mesmo utilizado nos sistemas binários, haja vista que para tal basta apenas a adição de outra partícula que, obrigatoriamente, tenha menor diâmetro.

3.2.5.2 Resistência à penetração

As amostras foram preparadas em cilindros de acrílico, e submetidas a ensaio de resistência de cone penetrométrico, com três repetições. Para a realização dos trabalhos, foi projetado e construído um penetrômetro quasi-estático, como se apresenta na Figura 54A, com as seguintes características: sistema de cravação hidráulico, com curso de até 60 cm; célula de carga de capacidade variável (20, 50, 100 e 200 kgf), em função do material a ser ensaiado; haste de penetração de cone penetrométrico com diâmetro igual a 6,2 mm; sistema de aquisição de dados; e, computador. O sistema é constituído por uma base e dois cilindros, ambos em acrílico, com 10 cm de altura e diâmetro interno igual a 6 cm, conforme a Figura 54B.

Para a execução 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;
- determinada a curva de calibração, converte-se o sinal recebido pelo sistema de aquisição de dados (mV) em resistência à penetração (kgf); e
- calcular a tensão pela Equação (12), onde R_p é a resistência de ponta [$L^{-1}MT^{-2}$], F é a resistência à penetração [LMT^{-2}] e A é a área da base do cone penetrométrico [L^2].

$$R_p = \frac{F}{A} \quad (12)$$



Figura 54: Sistema penetrométrico e amostra: (A) penetrômetro quasi-estático projetado e construído para a determinação da resistência à penetração das amostras de solos; (B) sistema utilizado para ensaios de resistência de cone penetrométrico.

3.2.5.3 Permeabilidade

As amostras foram preparadas em cilindros de acrílico e submetidas a ensaios de permeabilidade. Para a realização dos trabalhos, foi projetado e construído um conjunto com trinta permeâmetros, trabalhando-se com carga constante, como se ilustram nas Figuras 55A e 55B.



Figura 55: Sistema projetado e construído para a realização dos ensaios de permeabilidade: (A) vista parcial do conjunto de permeômetros; (B) detalhe da amostra com a proveta graduada em cm.

Para a execução dos ensaios, foram adotados os seguintes procedimentos:

- leituras em triplicata em seis distâncias pré-definidas na proveta graduada (em cm), para a verificação do tempo gasto na percolação das amostras; e
- após a verificação da constância de fluxo, o coeficiente de percolação (k) foi calculado pela equação de Darcy (Head, 1982), conforme Equação (13), onde k é o coeficiente de permeabilidade [LT^{-1}], Q é o volume de água que passa em uma distância pré-definida na proveta graduada [L^3], L é a altura do corpo de prova [L], A é a área da seção transversal do corpo de prova [L^2], h é a carga hidráulica [L] e t é o tempo gasto para a água percorrer uma distância pré-definida na proveta graduada [T].

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad (13)$$

3.2.5.4 Agentes de cimentação

Foram utilizados empacotamentos binários na razão D/d igual a 8,0, para avaliar possíveis variações estruturais nas frações areia limpa dos solos em estudo, medidas via ensaios de penetração dinâmica. Os empacotamentos

binários foram realizados em cilindro de aço inox com 5 cm de altura e diâmetro interno igual a 6 cm, tendo em sua base uma chapa quadrada em aço inox com 7 cm de lado, com rebaixo no centro da chapa, para a acomodação do cilindro.

3.2.5.4.1 Reações de carbonatação

A adição da cal hidratada às amostras nos empacotamentos binários se deu com o auxílio do sistema empacotador de partículas, sendo depositada em pequenas quantidades para que 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. Dessa forma, foi possível o preenchimento dos vazios existentes nas amostras.

Após a adição da cal hidratada, as amostras foram saturadas, por capilaridade, pelo período de 24 h e, na sequência, acondicionadas em câmara hermeticamente fechada. Posteriormente, a câmara foi submetida à vácuo, seguida de enriquecimento com CO₂ na pressão de 100 kPa, pelo período de 7 dias. Transcorrido esse tempo, as amostras foram colocadas em estufa a 105°C, pelo período de 24 h, após o qual foram submetidas a ensaios de penetração dinâmica.

3.2.5.4.2 Precipitação de óxidos de ferro

Para o preenchimento dos poros das amostras, utilizou-se um produto na cor vermelha, conhecido popularmente como Pó Xadrez®, que é um pigmento inorgânico atóxico à base de hematita. A adição do Pó Xadrez® nos empacotamentos binários se deu com o auxílio do sistema empacotador de partículas, sendo depositada em pequenas quantidades para que pudesse migrar entre os vazios existentes e atingir a maior profundidade possível dentro do cilindro. A deposição foi interrompida quando o Pó Xadrez® atingiu o nível superior do cilindro. Dessa forma, foi possível o preenchimento dos vazios existentes nas amostras.

Após a adição do Pó Xadrez®, as amostras foram saturadas em solução de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ a 1 mol.L^{-1} preparada com água deionizada (80°C), por capilaridade, com auxílio de bomba de vácuo, sendo em seguida colocadas em mufla a 350°C , por 24 h. Após esse período, as amostras foram saturadas em solução de KOH a $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$, sendo em seguida colocadas em estufa a 60°C , por 24 h. Decorrido esse tempo, as amostras foram imersas, por 24 h, em água deionizada, sendo posteriormente colocadas em estufa a 60°C (Chan et al., 2007). Esse procedimento foi repetido por quatro vezes, com as saturações sendo realizadas nas duas bases do cilindro. Na sequência, as amostras foram submetidas aos ensaios de penetração quasi-estática.

3.2.6 Análises estatísticas

Para gerar os modelos matemáticos das máximas densidades de empacotamento em função da razão D/d , do coeficiente de permeabilidade em função da razão D/d e da resistência de ponta em função da profundidade, foram utilizados modelos hiperbólicos, cujos coeficientes foram obtidos por estimação não linear ao nível de confiança de 95%, utilizando-se o software STATISTICA 7.0

Os gráficos de empacotamento ternário foram gerados pelo software STATISTICA 7.0, utilizando-se um modelo de preenchimento quadrático.

Os ajustes de regressão linear simples, bem como os testes de identidade de modelos, foram calculados pelo software GENES (Cruz, 2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização morfológica quantitativa e qualitativa

A seguir, são apresentadas algumas características morfométricas das partículas em estudo, que irão subsidiar discussões posteriores. Pretende-se comparar as frações areias dos solos com esferas de vidro, pois elas constituem a base de estudos relativos aos fenômenos de empacotamento. A notação utilizada para designar as partículas, neste estudo, está exposta no Quadro 14, juntamente com o mineral predominante na fração areia. As curvas granulométricas dos solos Cachoeira da Prata (JP), João Pinheiro (JP), Sete Lagoas (SL) e Vila Secundino (VS) estão apresentadas nas Figuras 56 a 59.

Quadro 14: Notação utilizada para as partículas

Item	Descrição	Mineral predominante
EV	Esferas de vidro	-
CP	Fração areia limpa do solo denominado Cachoeira da Prata	Quartzo
JP	Fração areia limpa do solo denominado João Pinheiro	Quartzo
SL	Fração areia limpa do solo denominado Sete Lagoas	Quartzo e feldspato
VS	Fração areia limpa do solo denominado Vila Secundino	Quartzo

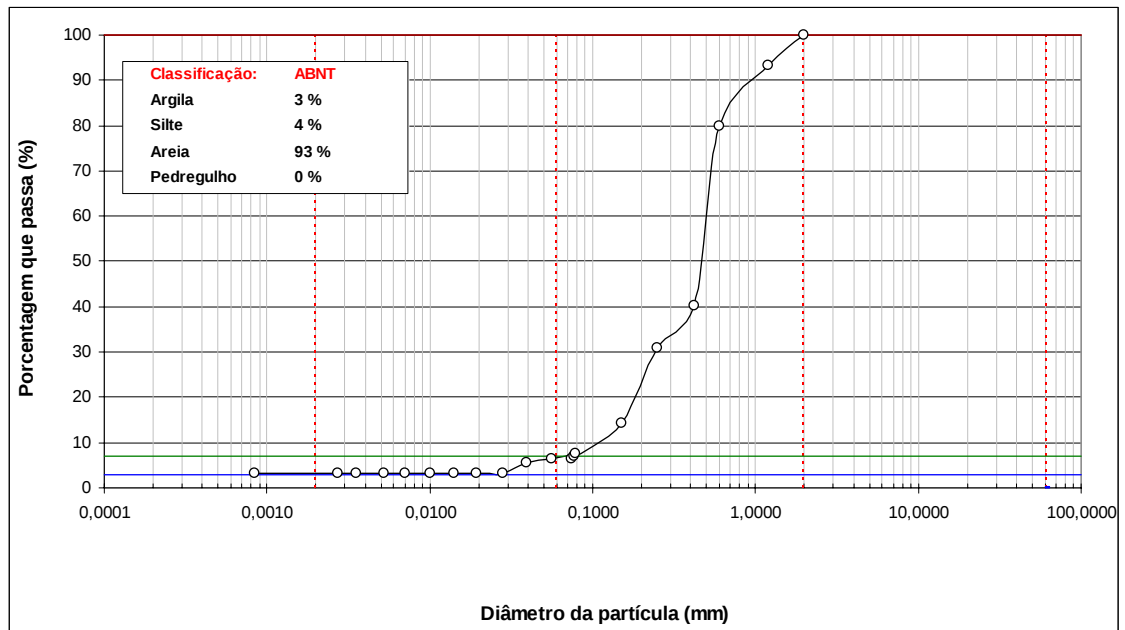


Figura 56: Curva granulométrica do solo Cachoeira da Prata (CP).

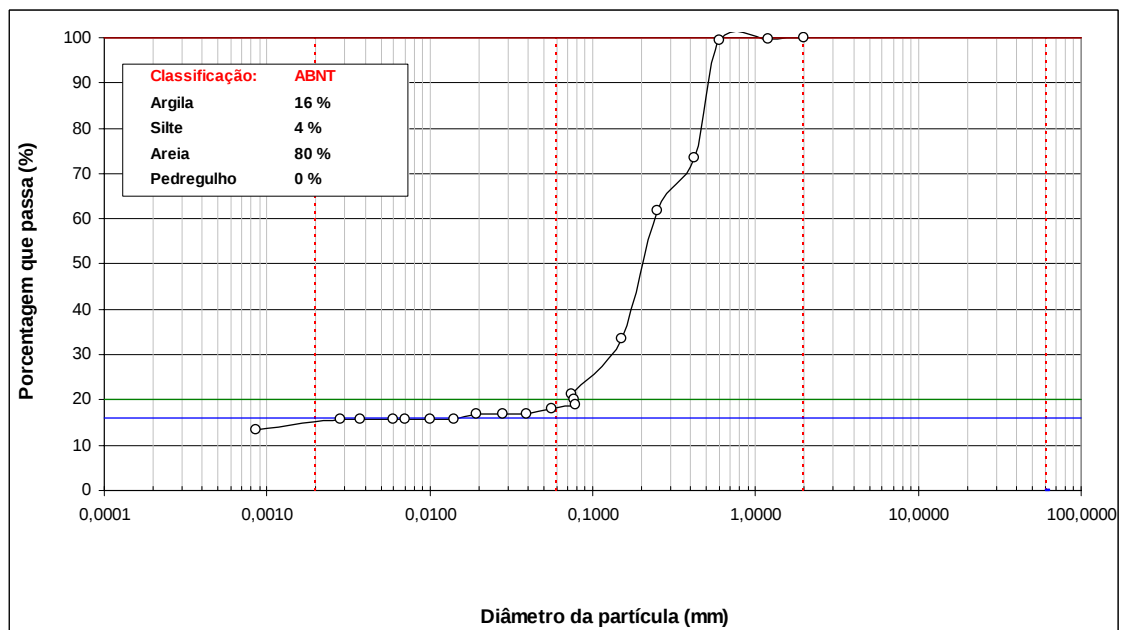


Figura 57: Curva granulométrica do solo João Pinheiro (JP).

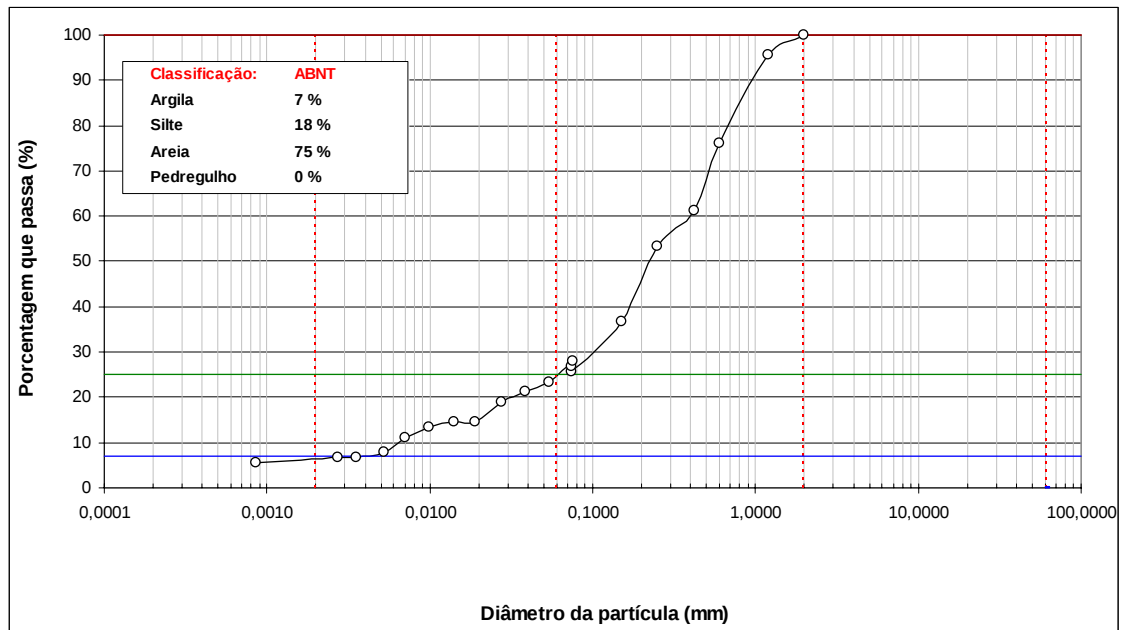


Figura 58: Curva granulométrica do solo Sete Lagoas (SL).

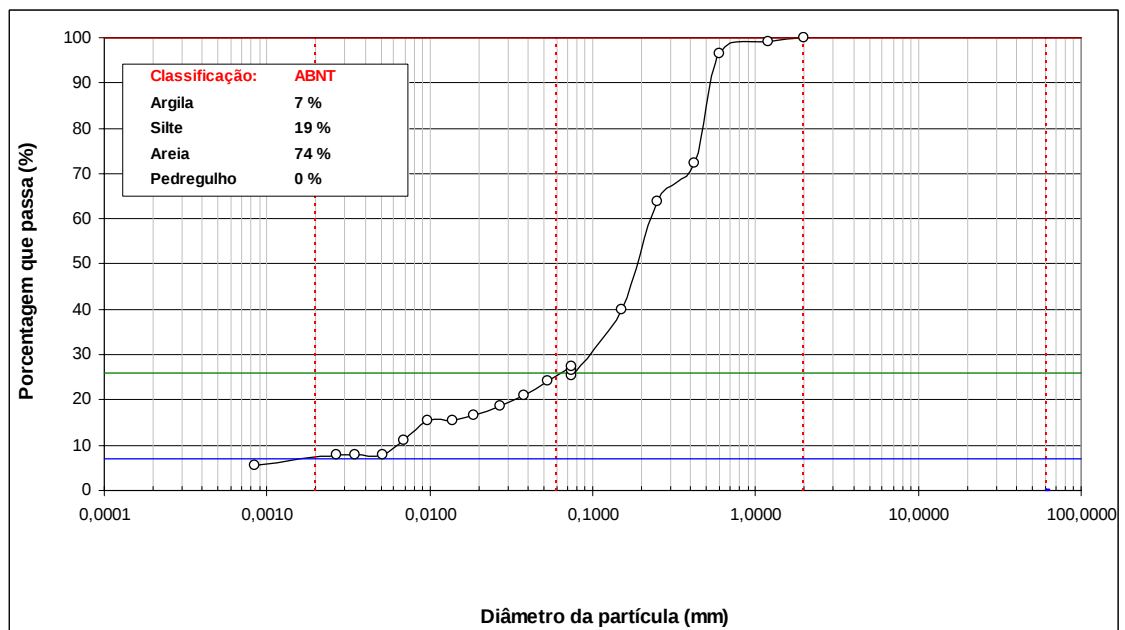


Figura 59: Curva granulométrica do solo Vila Secundino (VS).

4.1.1 Caracterização morfométrica das esferas de vidro e da fração areia limpa

O quartzo, mineral mais abundante na fração areia, possui maior resistência ao intemperismo físico e químico, pois é composto de Si e O com ligações covalentes, e não apresenta um plano preferencial de fraturação no mineral. Diante disso, a caracterização morfométrica não pode basear-se na análise de poucas partículas, pois elas podem não refletir o comportamento global de um índice morfométrico. Para a obtenção dos índices morfométricos arredondamento, alongamento e compacidade, foram utilizadas, no mínimo, 200 partículas em cada uma das 21 classes existentes. Para facilitar a visualização das diferentes classes, apresenta-se o Quadro 15 com o primeiro número da classe representando as partículas que passam pela respectiva peneira e, o segundo, as partículas retidas na mesma.

Quadro 15: Classes utilizadas para a determinação dos índices morfométricos arredondamento, alongamento e compacidade

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

A Figura 60 possibilita a visualização de três regiões distintas com relação ao índice morfométrico arredondamento. A primeira região é caracterizada pelas esferas de vidro (EV), onde o arredondamento variou de 0,83 a 0,94. Sua variabilidade é, provavelmente, decorrente do processo de fabricação das mesmas. A segunda região é relativa à fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP), onde o arredondamento situou-se entre 0,78 e 0,85. Observa-se que, quanto maior o diâmetro da partícula, maior o

arredondamento. Esse fato pode estar relacionado ao processo de formação do arenito, onde o transporte das partículas faz com que elas sofram um processo de desgaste de suas arestas. O arredondamento é uma medida do grau de agudez ou curvatura dos cantos e arestas de uma partícula. Portanto, reflete características relacionadas ao transporte das mesmas. A terceira região é composta pela fração areia limpa dos solos denominados de Sete Lagoas (SL) e Vila Secundino (VS), juntamente com a areia de dragagem de rio, denominada de Cachoeira da Prata (CP), onde os mesmos situaram-se entre 0,69 e 0,75, apresentando similaridade gráfica.

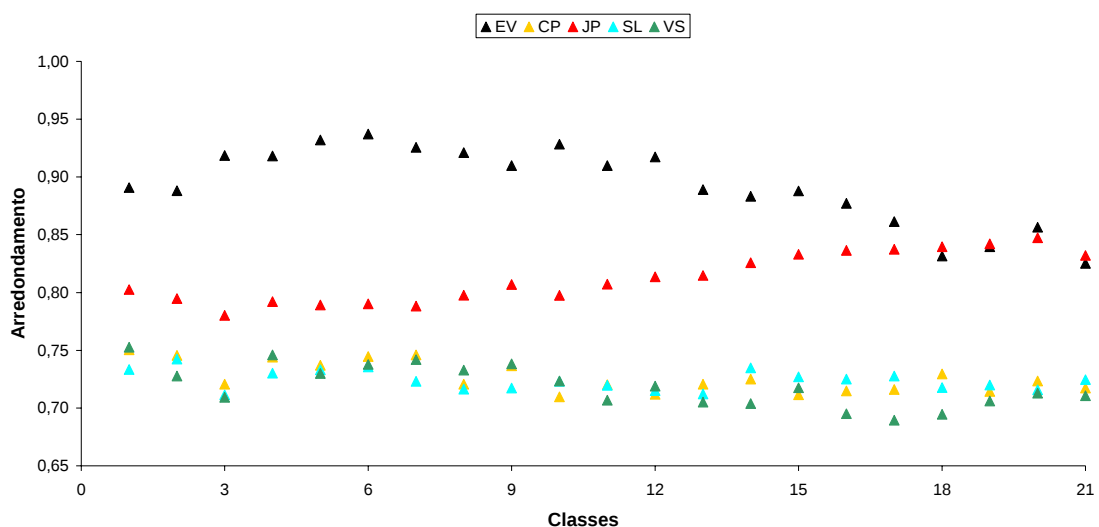


Figura 60: Índice morfométrico arredondamento em função das classes de tamanho.

Na Figura 61 observa-se o índice morfométrico alongamento, que expressa a razão entre o maior e o menor eixo de uma partícula. Quanto menor o seu valor, mais plana será a partícula. Seu valor pode expressar a presença de materiais que possuam planos de fraturação definidos.

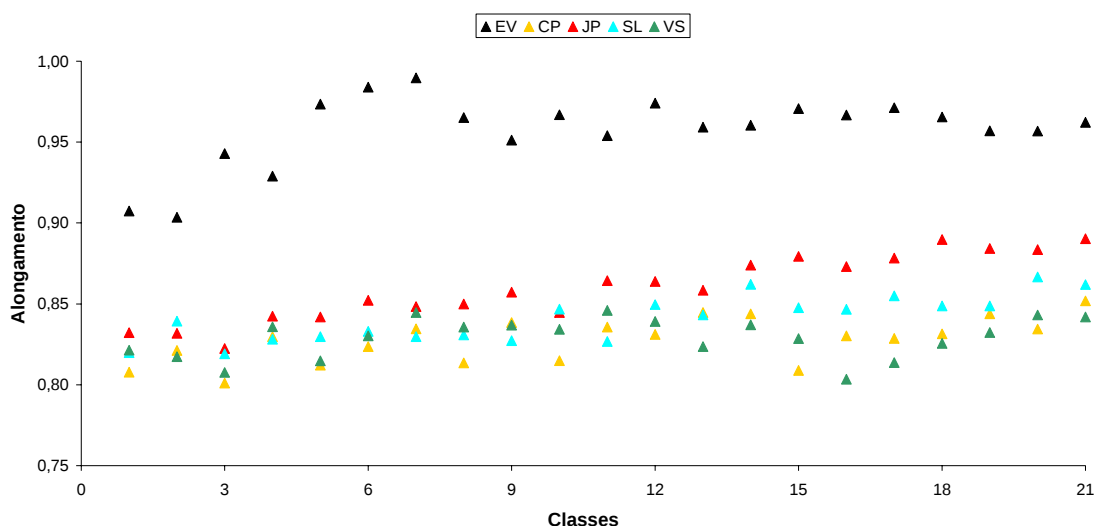


Figura 61: Índice morfométrico alongamento em função das classes de tamanho.

Na Figura 62 observa-se o índice morfométrico compacidade, que expressa o grau de aproximação de uma partícula para a forma circular. Assim, como no arredondamento, aqui se observa a ocorrência de três regiões bem distintas. Como era de se esperar, as esferas têm um elevado grau de aproximação circular (0,85 a 0,96), com a fração areia limpa do solo JP, em menor grau, aproximando-se da forma circular (0,84 a 0,92). Os demais diferem significativamente dessa forma (0,81 a 0,87).

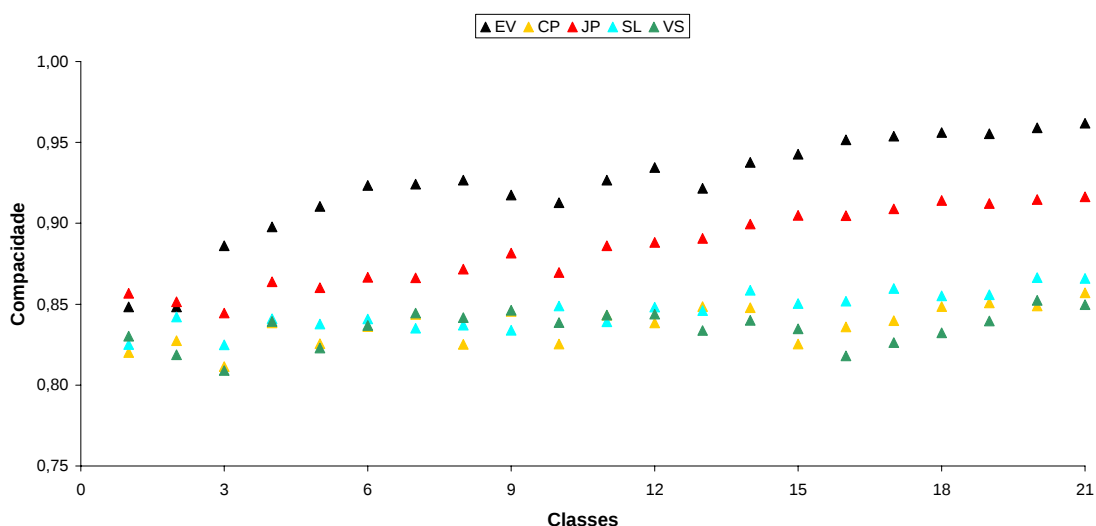


Figura 62: Índice morfométrico compacidade em função das classes de tamanho.

Os índices morfométricos aqui apresentados não refletem o sistema de classificação de Russel & Taylor (1937), Pettijohn (1949) ou Powers (1953),

baseados em comparações visuais com formas pré-definidas. A variabilidade de formas, característica de partículas que não têm plano de fratura definido (quartzo) inviabilizam a comparação visual. Porém, os valores aqui apresentados, bem como a sua representação gráfica, permitem fazer a comparação relativa entre os índices morfométricos das esferas de vidro e a fração areia limpa dos demais solos.

4.1.2 Caracterização qualitativa da rugosidade superficial das esferas de vidro e da fração areia limpa

As figuras, com imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura, mostram detalhes da rugosidade superficial das partículas utilizadas neste estudo. A Figura 63A mostra as Esferas de Vidro (EV) e a Figura 63B apresenta uma esfera de vidro ampliada. Nota-se que a superfície é lisa, não apresentando reentrâncias, com elevado grau de arredondamento, alongação e compacidade.

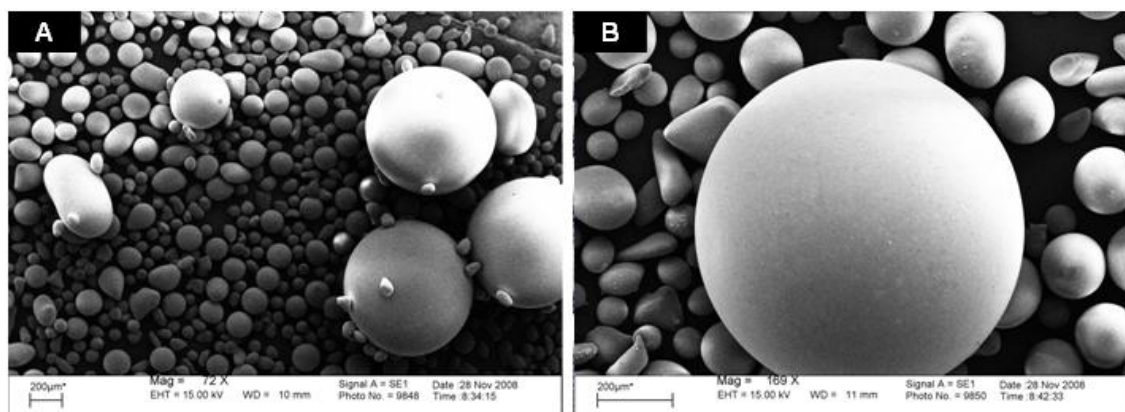


Figura 63: Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Esferas de vidro (EV). (B) Imagem ampliada de uma partícula.

A Figura 64A mostra a fração areia limpa da areia de dragagem de rio, denominado solo Cachoeira da Prata (CP) e a Figura 64B mostra a ampliação de uma partícula característica. Tem-se que a superfície é rugosa, sem reentrâncias aparentes, não apresentando planos de ruptura, bem arestada, com baixo grau de arredondamento, alongamento e compacidade.

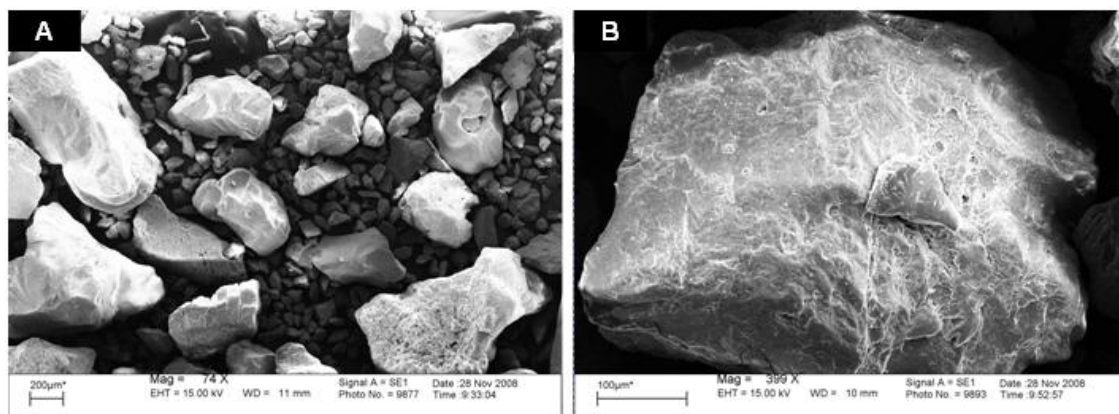


Figura 64: Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP). (B) Imagem ampliada de uma partícula.

A Figura 65A mostra a fração areia limpa do solo denominado João Pinheiro (JP) e a Figura 65B mostra a ampliação de uma partícula característica. Observa-se que a superfície é lisa, sem reentrâncias aparentes, com baixo grau de arestamento, apresentando elevado grau de arredondamento, alongamento e compacidade.

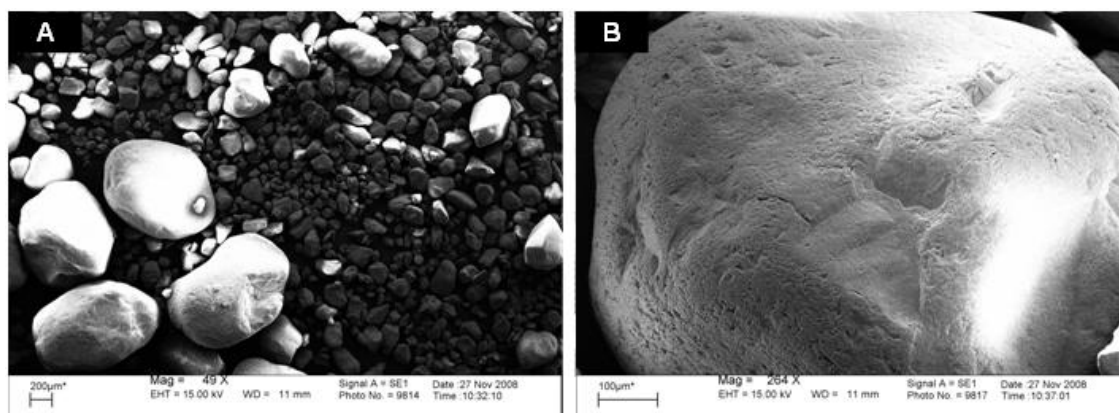


Figura 65: Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP). (B) Imagem ampliada de uma partícula.

A Figura 66A mostra a fração areia limpa do solo denominado Sete Lagoas (SL) e a Figura 66B mostra a ampliação de uma partícula característica. Nota-se que a superfície é rugosa, com reentrâncias aparentes, elevado grau de arestamento, apresentando baixo grau de arredondamento, alongamento e compacidade. Nota-se a existência de uma estrutura porosa interna, podendo apresentar problemas quanto à condutividade hidráulica,

devido à elevada capacidade de retenção de água. Apresenta planos de fraqueza bem definidos, sugerindo a presença de feldspatos.

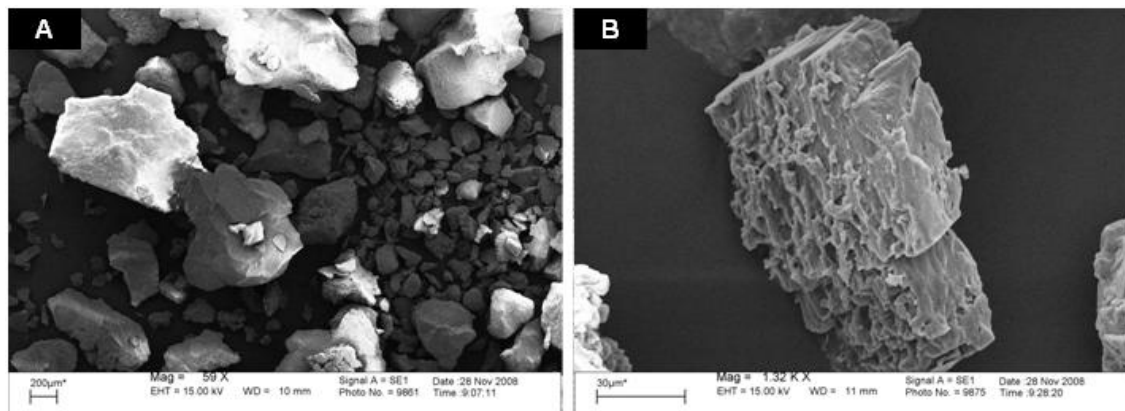


Figura 66: Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL). (B) Imagem ampliada de uma partícula.

A Figura 67A mostra a fração areia limpa do solo denominado Vila Secundino (VS) e a Figura 67B mostra a ampliação de uma partícula característica. Observa-se que a superfície é rugosa, sem reentrâncias aparentes, elevado grau de arestamento, apresentando baixo grau de arredondamento, alongamento e compacidade.

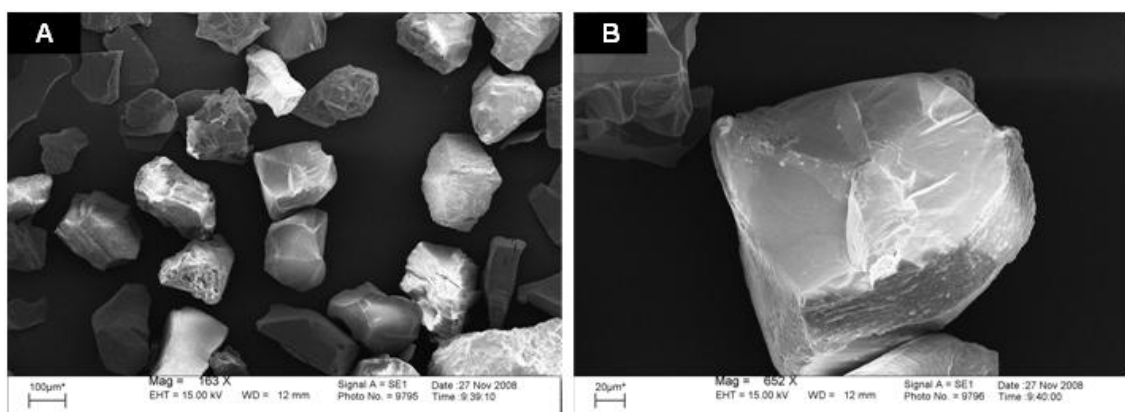


Figura 67: Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (A) Fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS). (B) Imagem ampliada de uma partícula.

4.2 Efeitos do tamanho do recipiente e segregação em sistemas empacotados

Em empacotamentos do tipo uniforme foram observadas regiões de ordenação situadas na extremidade do recipiente, oriundas de efeito de borda. Esse efeito foi mais pronunciado em empacotamentos de Esferas de Vidro (EV), quando comparado com a fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP), como se observa nas Figuras 68A e 68B.

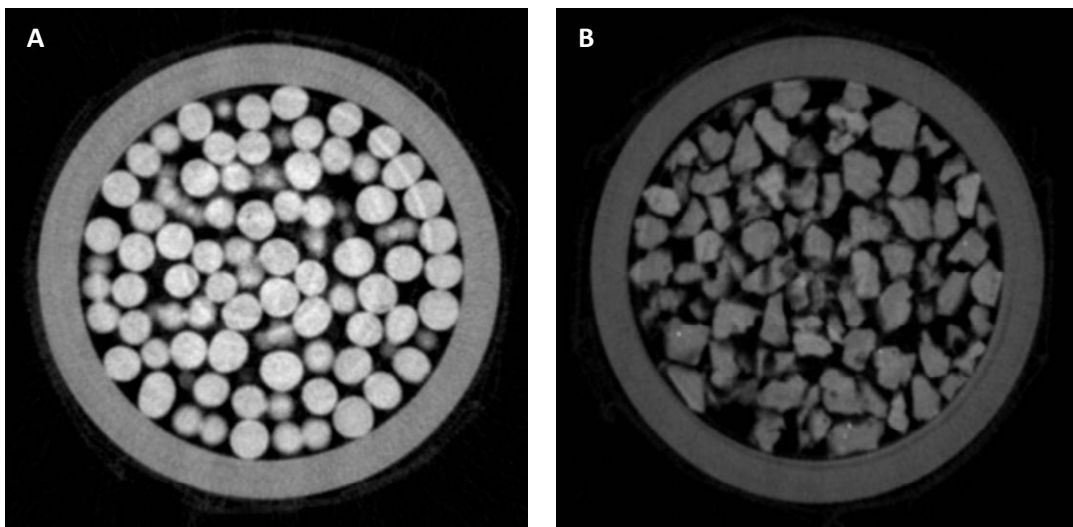


Figura 68: (A) Empacotamento uniforme de Esferas de Vidro (EV). (B) Empacotamento uniforme da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP).

McGeary (1961), Susskind & Becker (1966), Bernal & Finney (1967), Ridgway & Tarbuck (1968b), Pillai (1977) e Gotoh et al. (1978) afirmam que o recipiente usado para colocar a amostra propicia a formação de uma região de ordenação situada na extremidade do mesmo (efeito de borda), tornando-se mais pronunciado em paredes lisas, fazendo com que apareçam regiões de baixa e de alta porosidade nas partículas próximas à parede. Leva & Grummer (1947) entendem que em partículas não esféricas, a aleatoriedade no empacotamento é mais pronunciada, fazendo com que o efeito de parede seja menor na borda do recipiente, bem como que misturas de partículas de tamanhos diferentes minimizam as variações de porosidade junto à parede do

recipiente, como se observa na Figura 69 em empacotamento binário da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).

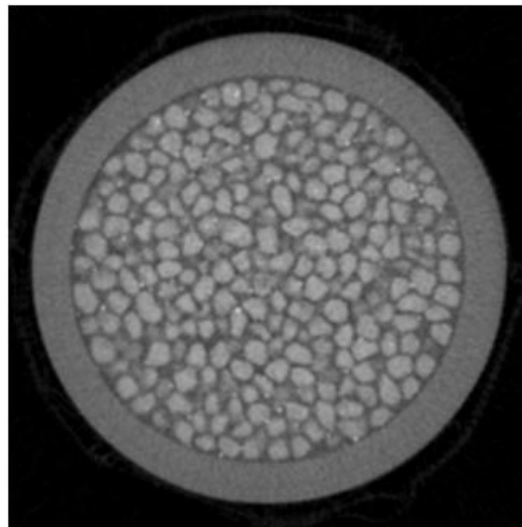


Figura 69: Empacotamento binário da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).

Não foram observados efeitos de segregação nos empacotamentos realizados, pois a metodologia utilizada baseou-se nos trabalhos de Ripple et. al (1973) e Dalla Riva (2005), pelo uso de vibração controlada das partículas, simultaneamente com a deposição das mesmas.

4.3 Empacotamentos binários e ternários

Na Mecânica dos Solos, interessa a avaliação do parâmetro densidade do solo. Dessa forma, os resultados dos empacotamentos binários e ternários das esferas de vidro e da fração areia limpa dos solos em estudo serão apresentados avaliando-se a densidade obtida experimentalmente em função da composição das partículas.

4.3.1 Empacotamentos binários

Os empacotamentos binários foram produzidos 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 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. As Figuras 70, 71, 72, 73 e 74 mostram as curvas de empacotamentos binários obtidas para as esferas de vidro, onde se relacionam as densidades obtidas em função da proporção, em volume real, das partículas de menor diâmetro.

As classes utilizadas em empacotamentos binários, com seus respectivos pontos médios e suas relações entre o diâmetro maior (D) e o diâmetro menor (d), encontram-se localizadas no Apêndice, dispostas no Quadro 1A.

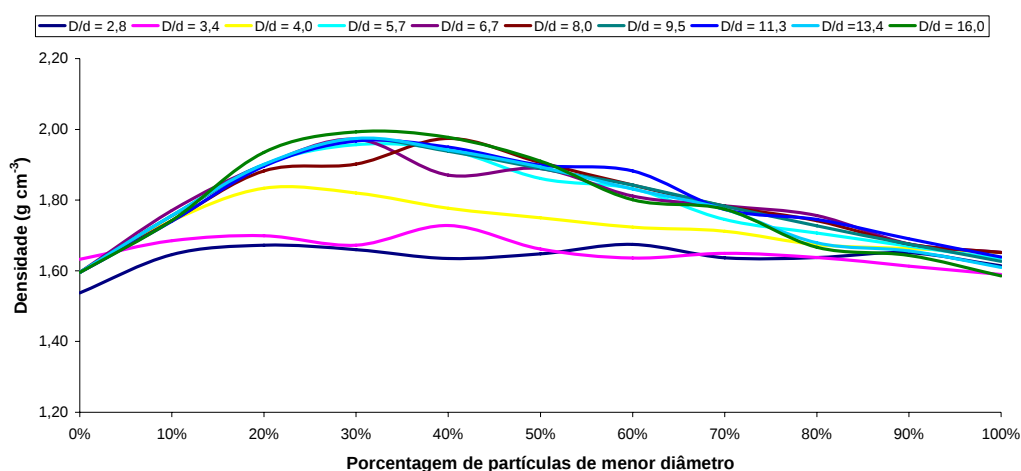


Figura 70: Curva de empacotamento binário das Esferas de Vidro (EV).

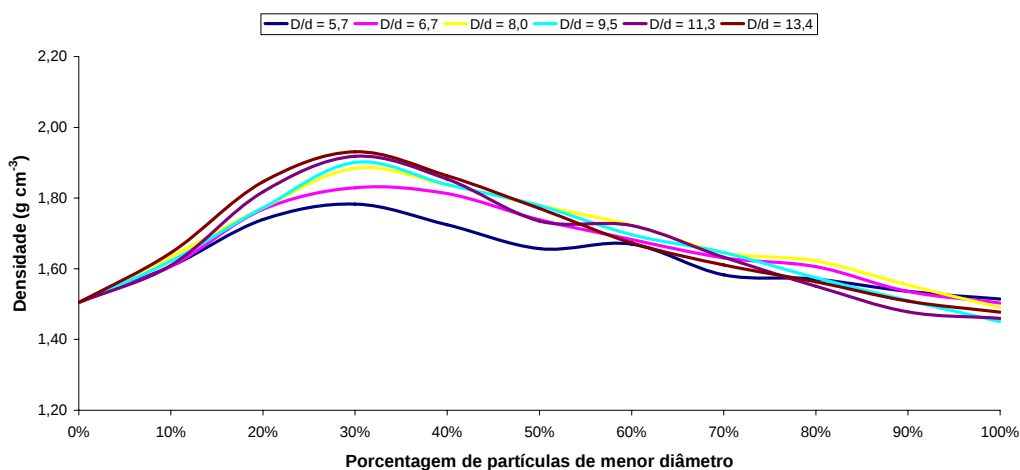


Figura 71: Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP).

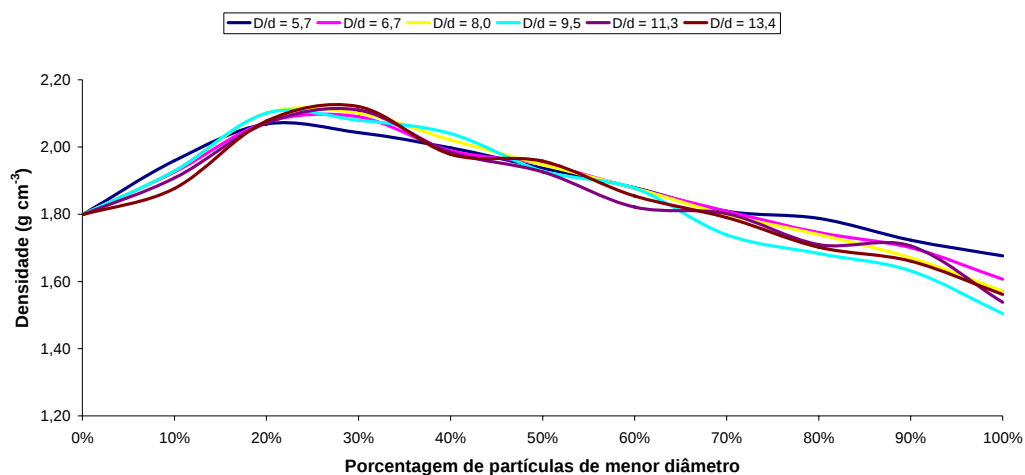


Figura 72: Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).

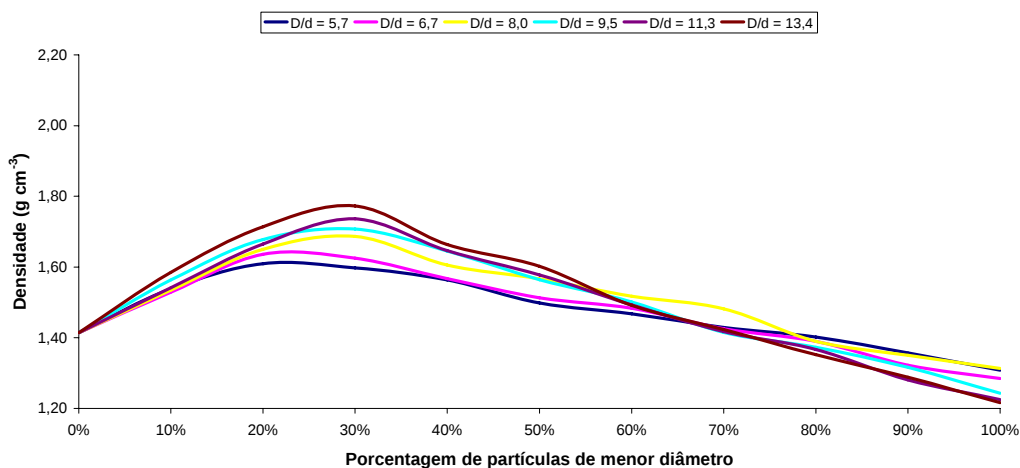


Figura 73: Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL).

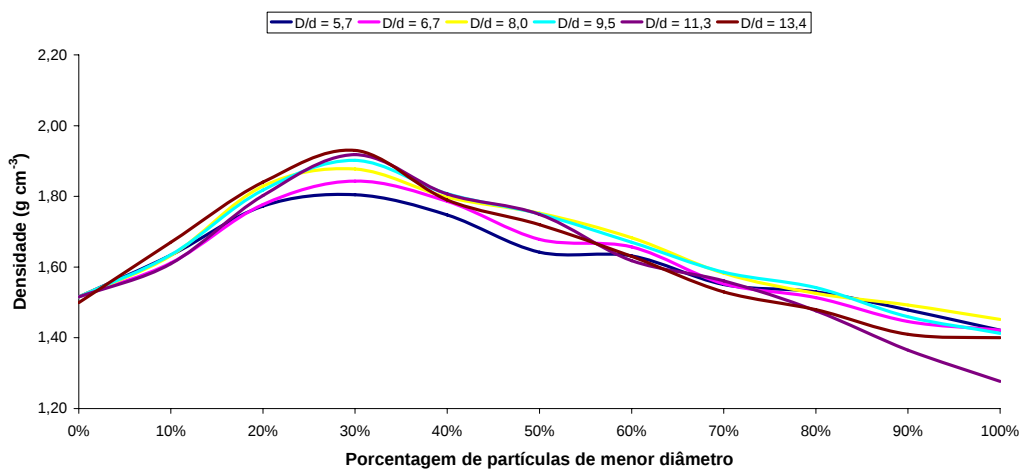


Figura 74: Curva de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS).

Analisando a forma dos gráficos, verifica-se que, em geral, independente do solo analisado, os empacotamentos binários atingiram um ponto de máxima densidade em uma composição aproximada de 30% de partículas de menor diâmetro. Também foi observado o mesmo comportamento para as esferas de vidro. Vários pesquisadores (Worthington, 1953; Parrish, 1961; Yerazunis et. al, 1962; Ridgway & Tarbuck, 1968a; Karlsson & Spring, 1970; Standish & Borger, 1979; Patankar & Mandal, 1980; Dalla Riva, 2005) relataram o mesmo comportamento, tanto em esferas de vidro, quanto em partículas não-esféricas, numa composição entre 25% e 30% de partículas pequenas. Para as esferas de vidro, nas relações binárias 2,8 e 3,4 não foi observada elevação de densidade. Esse fenômeno, em relações binárias menores, também foi observado por Worthington (1953), Ridgway & Tarbuck (1968a) e Patankar & Mandal (1980).

As Figuras 75, 76, 77, 78 e 79 mostram as máximas densidades de empacotamento obtidas nas relações D/d apresentadas nas Figuras 70, 71, 72, 73 e 74. Analisando essas figuras sob o ponto de vista morfológico, verificou-se que a fração areia limpa do Solo JP apresentou a maior densidade de empacotamento ($2,12 \text{ g cm}^{-3}$), seguida das esferas de vidro ($2,02 \text{ g cm}^{-3}$), fração areia limpa dos Solos CP e VS ($1,93 \text{ g cm}^{-3}$), e fração areia limpa do Solo SL ($1,77 \text{ g cm}^{-3}$). Esses valores expressam a influência dos índices morfométricos arredondamento e compacidade, que são maiores na esfera de vidro e na fração areia limpa do Solo JP. Esperava-se que as esferas de vidro apresentassem maiores valores para a densidade de empacotamento. Entretanto, quando se analisam os Quadros 2A, 3A, 4A, 5A e 6A, observa-se que as esferas de vidro apresentam os menores valores para a densidade da partícula, com média de $2,49 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto que para as demais partículas as médias foram de 2,64, 2,70, 2,65 e $2,67 \text{ g cm}^{-3}$ para as frações areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP), João Pinheiro (JP), Sete Lagoas (SL) e Vila Secundino (VS), respectivamente. A menor densidade da partícula apresentada pelas esferas de vidro reflete a presença de bolhas de ar no seu interior (Figura 80), fazendo com que as mesmas apresentem porosidade interna, o que reduz a densidade do empacotamento. O menor valor de empacotamento encontrado na fração areia limpa do Solo SL está associado à

presença de feldspato em sua composição mineralógica, que possui elevada rugosidade superficial, aumentando o atrito entre as partículas.

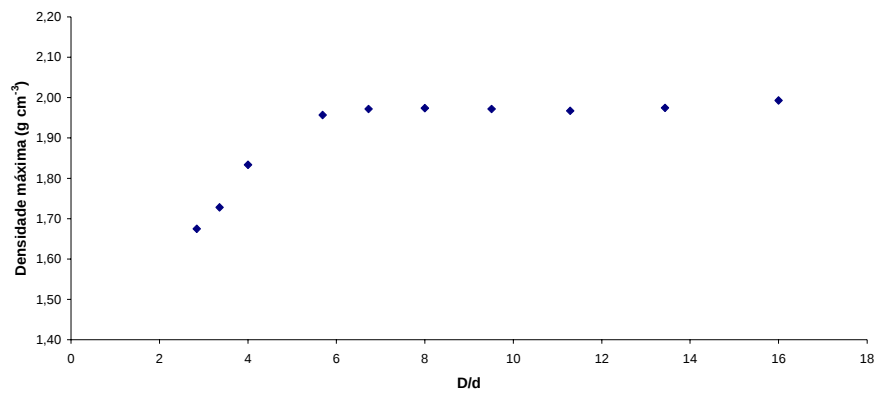


Figura 75: Curva de máxima densidade de empacotamento binário das Esferas de Vidro (EV).

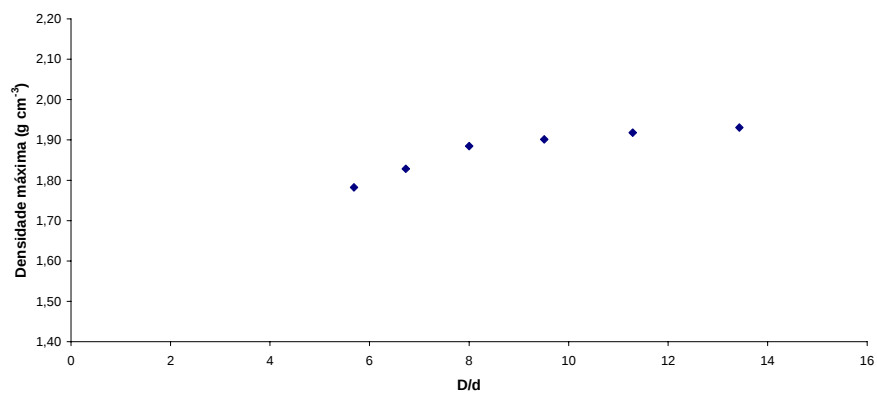


Figura 76: Curva de máxima densidade de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP).

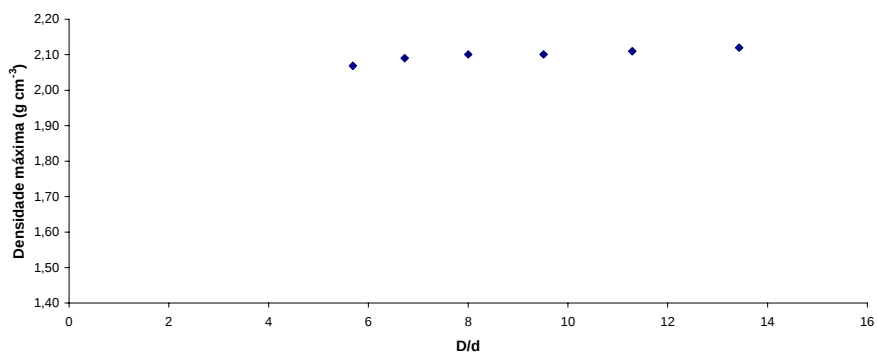


Figura 77: Curva de máxima densidade de empacotamento binário da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).

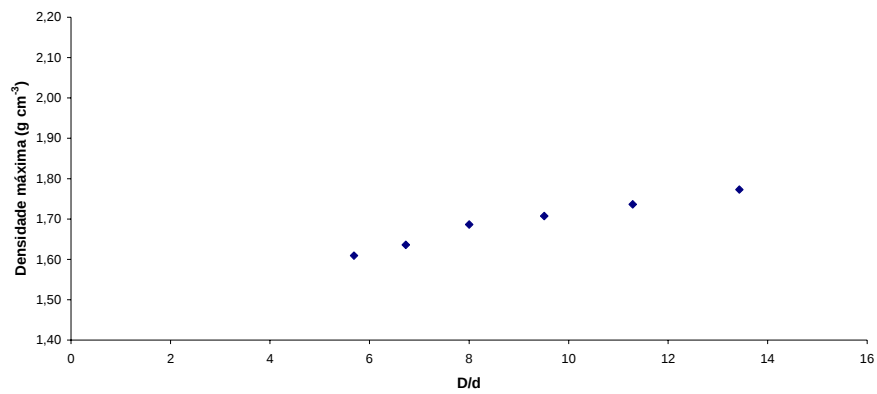


Figura 78: Curva de máxima densidade de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL).

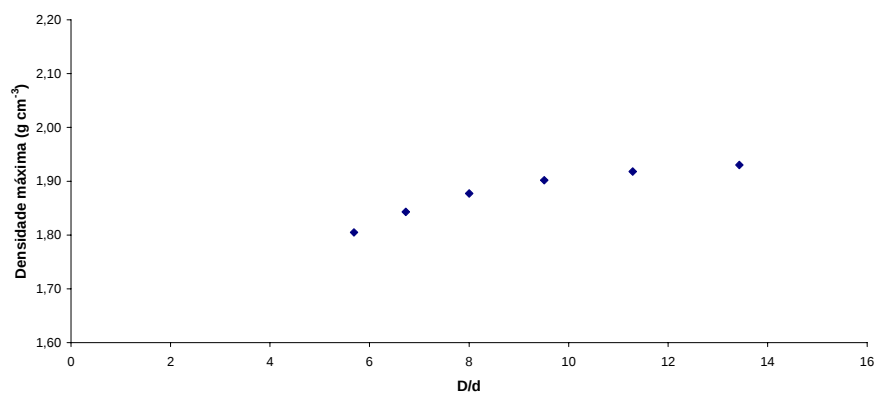


Figura 79: Curva de máxima densidade de empacotamento binário da fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS).

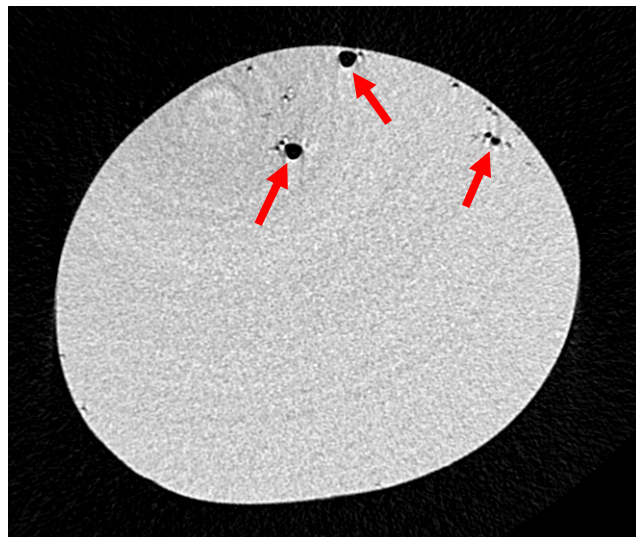


Figura 80: Imagem de uma esfera de vidro (resolução 2,2 μm) obtida por Tomografia Computadorizada. As regiões em preto mostram a porosidade interna (setas).

Verificou-se que, em geral, maiores eficiências de empacotamento ocorreram em relações D/d próximas de 7, com crescimento acentuado da curva para relações abaixo desse valor. Esse fato foi constatado por Dalla Riva (2005), em experimento conduzido com esferas de vidro, e por Patankar & Mandal (1980), em misturas de partículas irregulares compostas de quartzo e feldspato, na composição de 77% de partículas grandes.

À medida que se aumenta a relação entre o diâmetro do recipiente e o diâmetro da partícula, há predominância da aleatoriedade, com a densidade do empacotamento aproximando-se de uma assíntota. Com os dados obtidos nas curvas 75, 76, 77, 78 e 79, foi possível ajustar as densidades máximas de empacotamento em função das relações D/d , utilizando um modelo hiperbólico, expresso pela Equação (14).

$$Densidade = \frac{(D / d)}{a_1 + a_2 \cdot (D / d)} \quad (14)$$

No Quadro 16 apresentam-se as equações ajustadas, que possibilitam estimar a densidade de empacotamento em função da relação D/d , sendo os coeficientes a_1 e a_2 obtidos por regressão não linear.

A Figura 81 mostra as curvas ajustadas pelo modelo hiperbólico. Pode-se observar que a fração areia limpa dos solos CP e VS apresentaram curvas praticamente coincidentes, porém apresentando densidades menores que a fração areia limpa do solo JP e as esferas de vidro (EV). A fração areia limpa do solo SL apresentou os menores valores para a densidade de empacotamento, devido à elevada rugosidade apresentada pela presença de feldspato.

Quadro 16: Equações ajustadas para a determinação da densidade de empacotamento em função da relação D/d

Item	Equação ajustada
EV	$densidade = \frac{D/d}{0,310665^{(*)} + 0,474427^{(*)} \cdot D/d}$
CP	$densidade = \frac{D/d}{0,421064^{(*)} + 0,483558^{(*)} \cdot D/d}$
JP	$densidade = \frac{D/d}{0,102702^{(*)} + 0,464291^{(*)} \cdot D/d}$
SL	$densidade = \frac{D/d}{0,566708^{(*)} + 0,524071^{(*)} \cdot D/d}$
VS	$densidade = \frac{D/d}{0,355828^{(*)} + 0,489866^{(*)} \cdot D/d}$

(*) Significativo a 5% de probabilidade.

Para se verificar similaridades de comportamento em função da morfologia da partícula, as curvas foram ajustadas por um modelo de regressão linear simples, onde o coeficiente β_0 determina o intercepto e o coeficiente β_1 determina a inclinação da reta. Os coeficientes estão apresentados no Quadro 17 e, os testes de identidade dos coeficientes estão apresentados no Quadro 18.

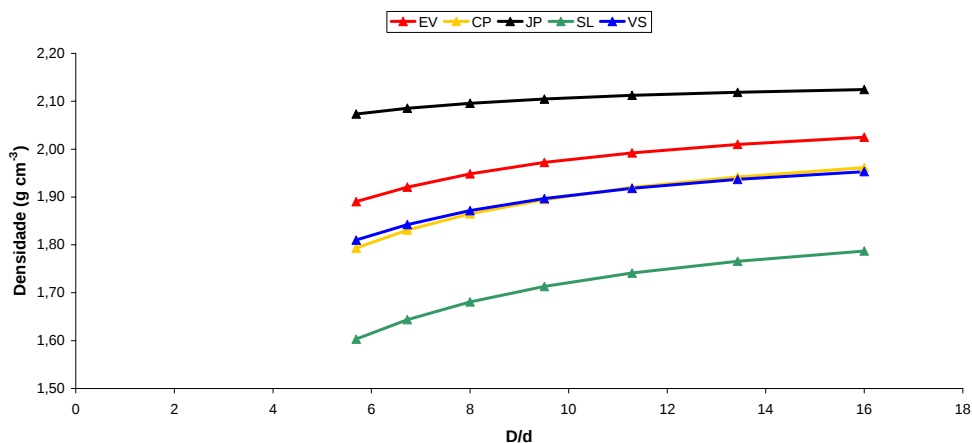


Figura 81: Curvas de empacotamento binário ajustadas pelo modelo hiperbólico.

Quadro 17: Coeficientes obtidos por ajuste de regressão linear simples

Item	β_0	β_1
Esferas de Vidro (EV)	1,8186915 ^(*)	0,149653 ^(*)
Cachoeira da Prata (CP)	1,7030728 ^(*)	0,186928 ^(*)
João Pinheiro (JP)	2,04776627 ^(*)	0,055631 ^(*)
Sete Lagoas (SL)	1,4954896 ^(*)	0,213552 ^(*)
Vila Secundino (VS)	1,7287765 ^(*)	0,166028 ^(*)

^(*) Significativo a 5% de probabilidade

Quadro 18: Teste de identidade dos coeficientes β_0 e β_1

Parâmetros	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1
Solo	EV		CP		JP		SL		VS	
EV	-	-	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	*
CP	-	-	-	-	ns	ns	ns	*	*	*
JP	-	-	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns
SL	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	*

^(*) Significativo a 5% de probabilidade

A taxa de variação da densidade pode ser estimada pelo coeficiente β_1 , enquanto que o coeficiente β_0 exprime a densidade inicial do empacotamento. Observa-se, no Quadro 17, que quanto maior for a irregularidade da partícula, maior é a taxa de elevação da densidade. Como consequência, a densidade inicial para partículas não-esféricas é menor, como pode ser verificado pelo coeficiente β_0 .

Entretanto, quando se analisamos dados apresentados no Quadro 18, observa-se que não há diferença estatística com relação à taxa de variação da densidade quando se comparam as Esferas de Vidro (EV), com as frações areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP), Sete lagoas (SL) e Vila Secundino (VS). O mesmo acontece na comparação da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP) com as frações areia limpa do solo Sete Lagoas (SL) e Vila Secundino (VS), e na comparação da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL) com a fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS). Os resultados obtidos estão de acordo com as observações de German (1989), onde se afirma que o acréscimo na densidade de empacotamento é similar para partículas esféricas e não-esféricas. Contudo, com relação à fração areia

limpa do solo João Pinheiro (JP), não foi observado o mesmo fenômeno. Isso está associado ao fato de que a máxima densidade de empacotamento foi atingida mais facilmente, como pode ser constatado pelo menor valor encontrado para o coeficiente β_1 .

4.3.2 Empacotamentos ternários

Partindo de um empacotamento binário, procedeu-se à adição de uma terceira partícula, de menor tamanho, seguindo o mesmo procedimento estabelecido para misturas binárias.

As classes utilizadas em empacotamentos ternários, com seus respectivos pontos médios e suas relações entre o diâmetro maior (D_G), diâmetro intermediário (D_M) e o diâmetro menor (D_P), encontram-se localizadas no Apêndice, dispostas no Quadro 7A.

As Figuras 82, 83, 84, 85 e 86 representam linhas de isodensidade obtidas em composições ternárias. Os lados do triângulo representam os empacotamentos binários D_G/D_P , D_G/D_M e D_M/D_P . O interior do triângulo é formado por combinações ternárias entre as partículas.

Assim como nos empacotamentos binários, verificou-se que a fração areia limpa do Solo JP apresentou maiores densidades de empacotamento ternária (entre $2,00 \text{ g cm}^{-3}$ e $2,05 \text{ g cm}^{-3}$), seguida das esferas de vidro (entre $1,90 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,95 \text{ g cm}^{-3}$), fração areia limpa dos Solos CP e VS (entre $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,80 \text{ g cm}^{-3}$), e fração areia limpa do Solo SL (entre $1,60 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,65 \text{ g cm}^{-3}$). Contudo, seus valores foram inferiores aos obtidos nos empacotamentos binários. Para obter-se uma mistura otimizada, em empacotamentos ternários, é necessária uma relação entre as partículas na proporção de 49:7:1. Não é possível obter-se essa composição na faixa da fração areia (2,000 mm a 0,053 mm).

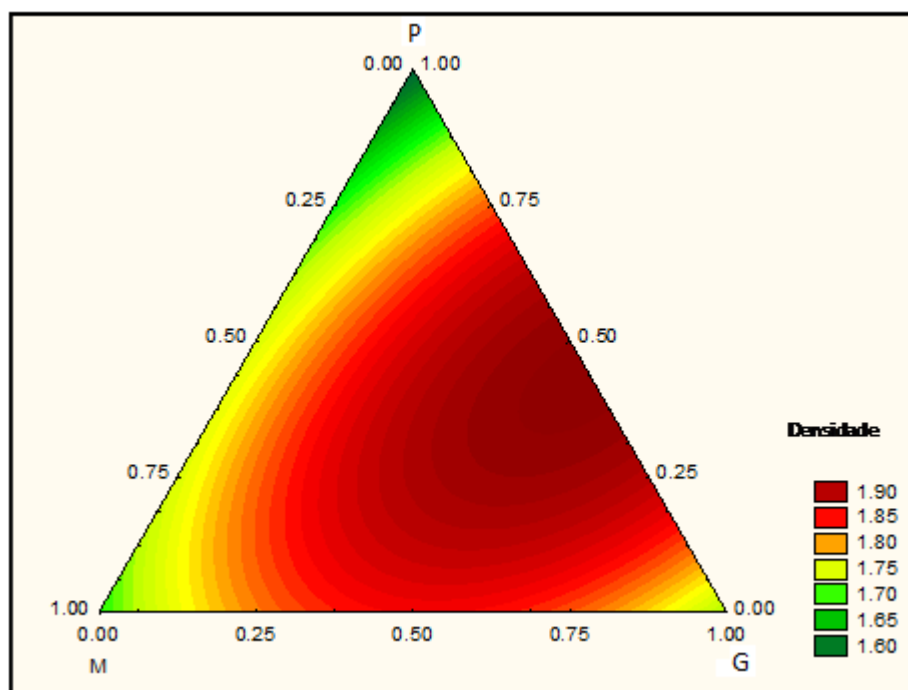


Figura 82: Empacotamento ternário em Esferas de Vidro, onde P representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e G as partículas de maior diâmetro.

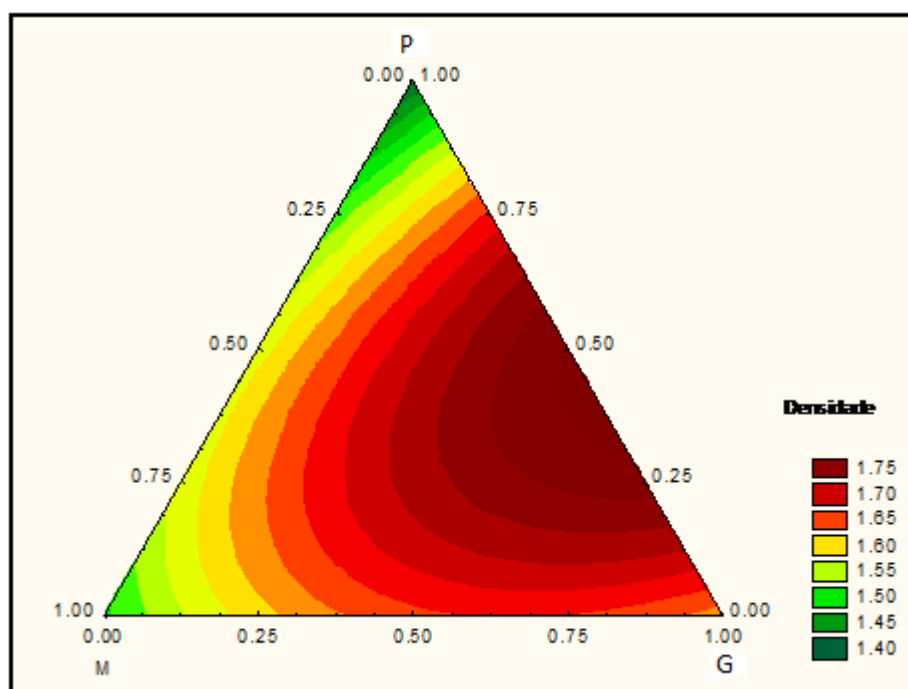


Figura 83: Empacotamento ternário na fração areia limpa do Solo CP, onde F representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e C as partículas de maior diâmetro.

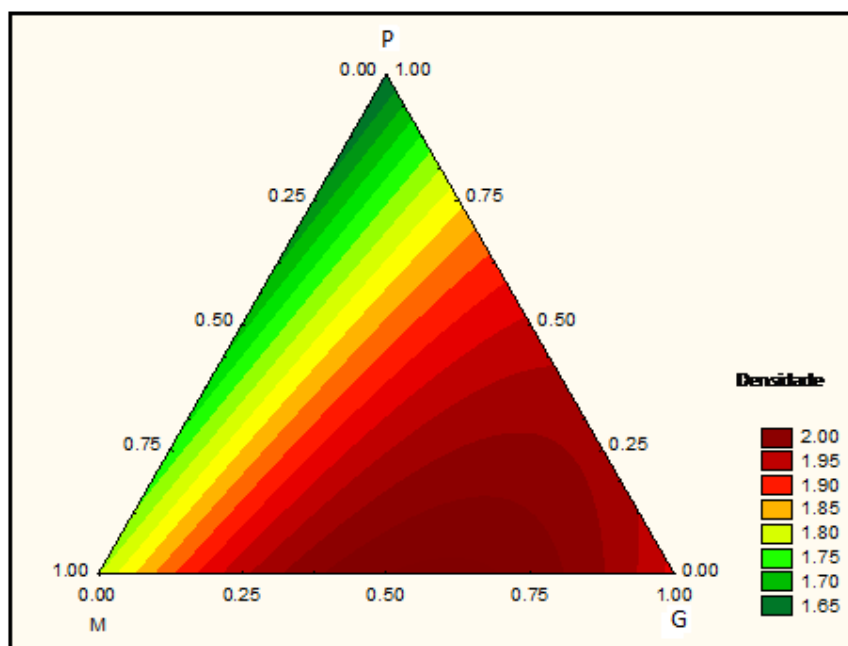


Figura 84: Empacotamento ternário na fração areia limpa do Solo JP, onde P representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e G as partículas de maior diâmetro.

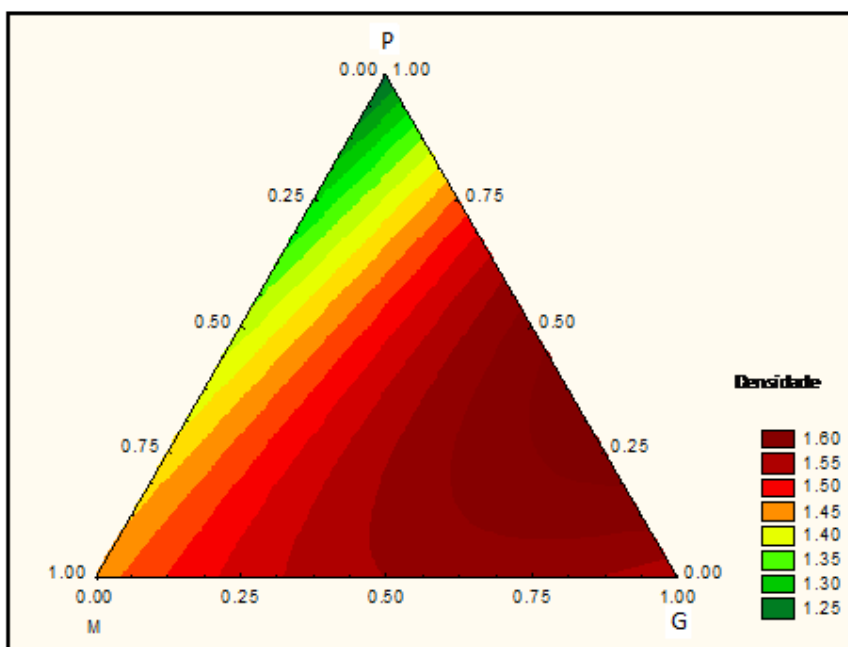


Figura 85: Empacotamento ternário na fração areia limpa do Solo SL, onde P representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e G as partículas de maior diâmetro.

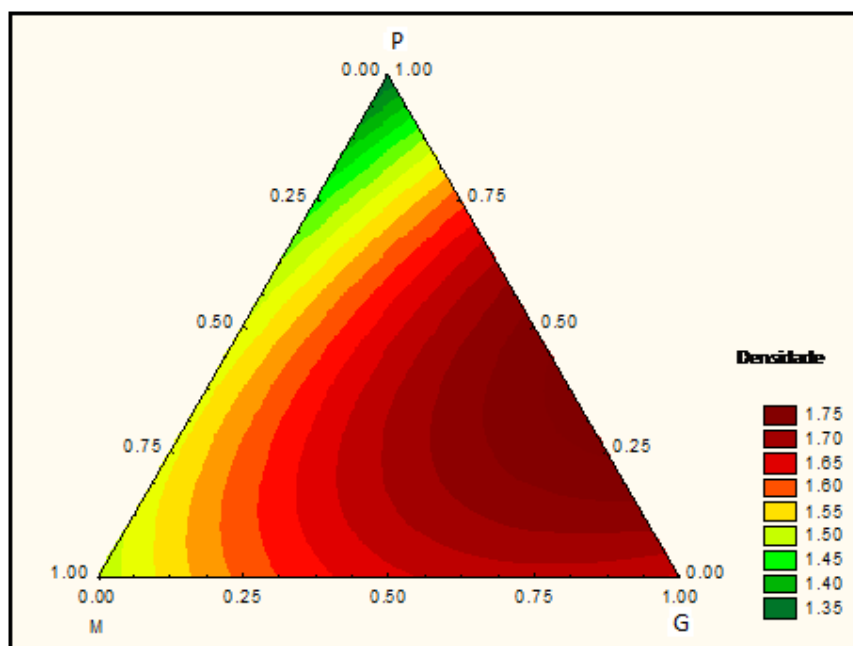


Figura 86: Empacotamento ternário na fração areia limpa do Solo VS, onde P representa as partículas de menor diâmetro, M as partículas de diâmetro intermediário e G as partículas de maior diâmetro.

Dalla Riva (2005), em estudo de empacotamento ternário de esferas, envolvendo relações menores do que 7 entre as partículas, verificou que o empacotamento ótimo ocorreu no sistema binário constituído pelas partículas de maior e menor tamanho. Standish & Borger (1979) verificaram que há similaridade entre empacotamentos ternários esféricos e não esféricos. Isso ficou evidente nos empacotamentos ternários das esferas de vidro (EV) e nas frações areia limpa dos solos CP, SL e VS.

Diferente do esperado, o empacotamento ternário da fração areia limpa do solo JP apresentou-se diferente dos demais, apresentando maiores densidades no lado do triângulo que representa o empacotamento binário entre as partículas de maior tamanho e de tamanho intermediário. O Quadro 7A mostra que a classe 0,149 mm - 0,125 mm foi utilizada para representar a partícula de menor diâmetro para as Esferas de Vidro (EV) e frações areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP), Sete Lagoas (SL) e Vila Secundino(VS) e, a classe 0,088 mm - 0,074 mm foi utilizada para a fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).

O uso de partículas próximas a 100 μm pode dificultar a obtenção de maiores densidades de empacotamento devido ao efeito de aglomeração ocasionado pela coesão entre elas, em função do aumento da área superficial, que propicia a formação de ligações fracas entre as partículas. Segundo Gray, citado por German (1989), as forças de van de Waals tornam-se significantes em partículas com diâmetro inferior a 50 μm . German (1989), Yu et al. (1997) e Yu et al. (2003) afirmam que, em partículas próximas a 100 μm , a gravidade não é a força dominante, e as forças interpartículas de curto alcance (van der Waals e eletrostáticas) tornam-se mais importantes, formando aglomerados. Acredita-se que as partículas de menor diâmetro utilizadas no empacotamento ternário tenham se aglomerado, possibilitando a formação de um agrupamento de partículas com um diâmetro efetivo maior que os das partículas de diâmetro intermediário. Devido à formação desses aglomerados, as partículas de menor diâmetro passaram a se comportar como partículas de tamanho intermediário, e as de tamanho intermediário passaram a se comportar como as partículas de menor tamanho. Assim sendo, as regiões de maior densidade estão representadas na linha que liga as partículas de maior tamanho, com as partículas de tamanho intermediário.

4.4 Permeabilidade em sistemas binários e ternários

Os coeficientes de permeabilidade foram calculados pela equação de Darcy, em permeâmetro de carga constante, sendo posteriormente ajustados à temperatura de 20°C (k_{20}).

4.4.1 Permeabilidade em sistemas binários

Os coeficientes de permeabilidade (k_{20}) obtidos variaram de $115,03 \times 10^{-4}$ a $56,94 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$, para as Esferas de Vidro (EV), de $100,67 \times 10^{-4}$ a $28,55 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ para a fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP), de $78,16 \times 10^{-4}$ a $31,92 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ para a fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS), de $66,36 \times 10^{-4}$ a $10,32 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ para a fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP), e de $1,05 \times 10^{-4}$ a $0,42 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ para a fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL). Sendo a permeabilidade dependente das características do empacotamento, ajustaram-se as mesmas a

partir das relações D/d para cada tipo de solo (Figura 87), pelo modelo hiperbólico expresso pela Equação (15).

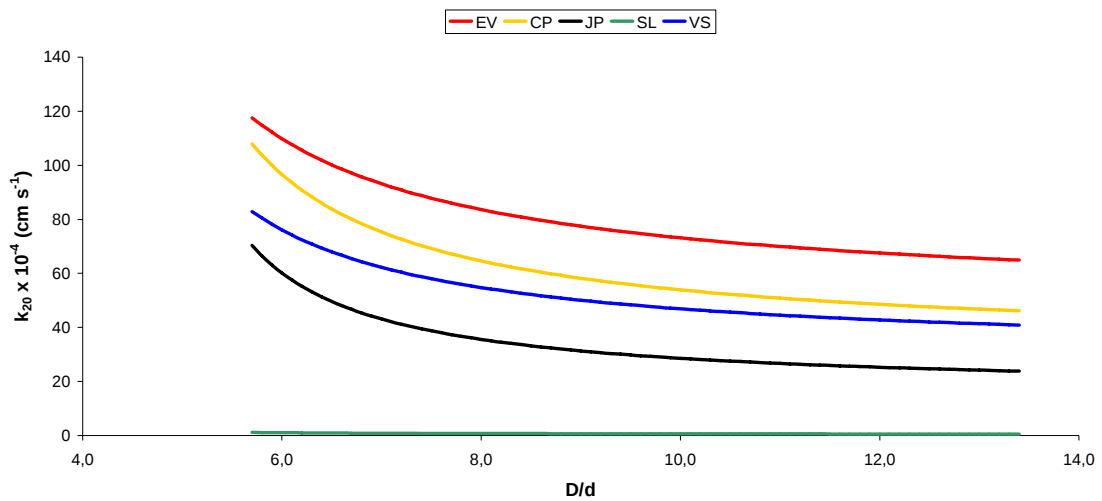


Figura 87: Curvas de permeabilidade em sistemas binários ajustadas pelo modelo hiperbólico.

$$k_{20} = \frac{(D/d)}{a_1 + a_2 \cdot (D/d)} \quad (15)$$

Pode-se observar que as esferas de vidro (EV) apresentaram maiores valores para o coeficiente de permeabilidade, quando comparadas com os demais solos. Esse fato está relacionado à sua menor rugosidade superficial, pois possui superfície extremamente lisa. Observa-se que a fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL) diferiu do comportamento observado nos demais solos, apresentando pequena variação no coeficiente de permeabilidade. Tal fato pode ser devido à presença de grandes quantidades de feldspato, material que possui elevada área superficial rugosa, com presença de poros abertos, além da possibilidade de encapsulamento de ar e de fragmentação devido ao peneiramento, devido à presença de planos de fraqueza bem definidos, como pode ser observado na Figura 66. Segundo German (1989), partículas irregulares têm maior área superficial, contribuindo para aumentar a resistência ao fluxo e, conseqüentemente, reduzindo a permeabilidade. A associação de partículas de maior irregularidade, com partículas de menor tamanho, faz com que a fração areia limpa do solo Sete

Lagoas (SL) apresente os menores valores de permeabilidade, quando comparados com os demais solos.

A fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP) apresentou menores valores para o coeficiente de permeabilidade, quando comparada com as frações areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP) e Vila Secundino (VS). Esperava-se que a sua curva de permeabilidade ficasse ligeiramente inferior à curva das Esferas de Vidro (EV) e acima das citadas anteriormente, pois apresenta uma rugosidade superficial ligeiramente inferior à das esferas de vidro. Entretanto, quando se observa o Quadro 8A, verifica-se que foram utilizadas partículas de menor diâmetro para os ensaios, quando comparadas com as frações areia limpa dos demais solos e esferas de vidro. Isso faz com que haja acréscimo na área superficial e, conseqüentemente, aumente a resistência ao fluxo. Contudo, a permeabilidade da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP) é superior à da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL), devido à sua menor rugosidade superficial.

No Quadro 19 apresentam-se as equações ajustadas, que possibilitam estimar o coeficiente de permeabilidade (k_{20}) em função da relação D/d , sendo os coeficientes a_1 e a_2 obtidos por regressão não linear.

Para se verificar similaridades de comportamento em função da morfologia da partícula, as curvas foram ajustadas por um modelo de regressão linear simples, com os dados relativos ao coeficiente de permeabilidade transformados para a função logaritmo natural, onde o coeficiente β_0 determina o intercepto e o coeficiente β_1 determina a inclinação da reta. Os coeficientes estão apresentados no Quadro 20 e, os testes de identidade dos coeficientes estão apresentados no Quadro 21.

Quadro 19: Equações ajustadas para a determinação do coeficiente de permeabilidade em função da relação D/d

Item	Equação ajustada
EV	$k_{20} = \frac{D/d}{-0,068490^{(*)} + 0,020519^{(*)} \cdot D/d}$
CP	$k_{20} = \frac{D/d}{-0,122969^{(*)} + 0,030844^{(*)} \cdot D/d}$
JP	$k_{20} = \frac{D/d}{-0,275284^{(*)} + 0,062514^{(*)} \cdot D/d}$
SL	$k_{20} = \frac{D/d}{-9,57403^{(*)} + 2,57678^{(*)} \cdot D/d}$
VS	$k_{20} = \frac{D/d}{-0,122889^{(*)} + 0,033620^{(*)} \cdot D/d}$

(*) Significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 20: Coeficientes obtidos por ajuste de regressão linear simples

Item	β_0	β_1
Esferas de Vidro (EV)	5,011507 ^(*)	-0,0679564 ^(*)
Cachoeira da Prata (CP)	4,9870416 ^(*)	-0,0941538 ^(*)
João Pinheiro (JP)	4,592648 ^(*)	-0,1164603 ^(*)
Sete Lagoas (SL)	0,3891228 ^(*)	-0,082185 ^(*)
Vila Secundino (VS)	4,6925737 ^(*)	-0,0797416 ^(*)

(*) Significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 21: Teste de identidade dos coeficientes β_0 e β_1

Parâmetros	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1
Solo	EV		CP		JP		SL		VS	
EV	-	-	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CP	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns
JP	-	-	-	-	-	-	ns	ns	*	ns
SL	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	*

(*) Significativo a 5% de probabilidade.

A taxa de variação da permeabilidade pode ser estimada pelo coeficiente β_1 , enquanto que o coeficiente β_0 exprime a permeabilidade inicial

do empacotamento. Observa-se, no Quadro 20, que a fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP) apresentou uma maior taxa de variação, quando comparado com as esferas de vidro e, os demais solos. Esse fato está associado a uma maior resistência ao fluxo ocasionado pelo uso de partículas de menor tamanho no empacotamento (Quadro 8A). As Esferas de Vidro (EV) apresentaram a menor taxa de variação, pois não há acréscimo significativo na área superficial em maiores relações D/d , quando comparada com os demais solos, que têm formato mais irregular.

Entretanto, quando se analisa o Quadro 21, observa-se que, em geral, não há diferenças estatísticas entre os solos e as esferas de vidro. Torna-se difícil a inferência sobre a permeabilidade em sistemas empacotados, pois, segundo German (1989), o tratamento matemático do fluxo de fluidos nesses sistemas é dependente do tamanho das partículas, da densidade de empacotamento, da rugosidade, e da área e forma da superfície dos grãos. A associação desses fatores aumenta a complexidade de se estimar a permeabilidade.

4.4.2 Permeabilidade em sistemas ternários

Um sistema ternário possibilita várias combinações entre as partículas de tamanho grande, médio e pequeno. Após a obtenção do gráfico de empacotamento ternário, procedeu-se à análise da permeabilidade em uma combinação que estivesse situada na região de maior densidade deste sistema. Assim sendo, não foi possível utilizar as mesmas combinações entre as partículas de tamanho grande (C), médio (M) e pequeno (F). Os percentuais utilizados, bem como o coeficiente de permeabilidade (k_{20}) obtido nesse sistema, estão dispostos no Quadro 22, onde C representa a proporção de partículas de maior tamanho, M representa a proporção de partículas de tamanho intermediário e F representa a proporção de partículas de menor diâmetro. As classes utilizadas para a determinação do coeficiente de permeabilidade estão dispostas no Quadro 7A.

Quadro 22: Coeficientes de permeabilidade obtidos em empacotamentos ternários

Item	Composição (%)			$k_{20} (x 10^{-4})$ (cm s ⁻¹)
	C	M	F	
Esferas de Vidro (EV)	50	20	30	32,86
Cachoeira da Prata (CP)	60	10	30	16,80
João Pinheiro (JP)	60	30	10	34,13
Sete Lagoas (SL)	70	20	10	0,54
Vila Secundino (VS)	60	10	30	28,88

Quando a análise da permeabilidade é baseada sob o aspecto da rugosidade superficial da partícula, verifica-se que quanto mais lisa é a superfície, maior é o coeficiente de permeabilidade do sistema ternário. Contudo, quando se comparam as Esferas de Vidro (EV) e a fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP), que tem maior rugosidade superficial, esse fato não é observado. Entretanto, quando se observa o Quadro 7A, verifica-se que foram utilizadas partículas de menor diâmetro para os ensaios da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP), quando comparadas com as frações areia limpa dos demais solos e esferas de vidro. Isso faz com que haja acréscimo na área superficial e, conseqüentemente, aumente a resistência ao fluxo. Entretanto, as Esferas de Vidro (EV) apresentaram maior percentual de partículas de menor diâmetro (30%) quando comparadas com a fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP), que apresentou 10% de partículas de menor diâmetro. Isso explica a maior permeabilidade encontrada para a fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP).

No Quadro 23 mostra-se a comparação entre a condutividade hidráulica obtida em empacotamentos binários na razão $D/d = 13,4$, com a condutividade hidráulica obtida em empacotamentos ternários. Para as Esferas de Vidro (EV) e as frações areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP) e Vila Secundino (VS), observou-se redução na permeabilidade de 42,29%, 41,16% e 9,52%, respectivamente. Entretanto, para as frações areia limpa dos solos João Pinheiro (JP) e Sete Lagoas (SL), houve acréscimo na permeabilidade de 230,72% e 28,57%, respectivamente. As reduções na permeabilidade são explicadas pela maior proporção de partículas pequenas no empacotamento

(30%), que eleva a área superficial do sistema, ocasionando maior resistência ao fluxo, enquanto que os acréscimos observados são decorrentes da maior proporção de partículas de tamanho grande e intermediário (90%).

Quadro 23: Condutividade hidráulica obtida em sistemas binários e ternários

Item	Binário		Ternário		Variação Percentual
	Coeficiente de Permeabilidade	Densidade	Coeficiente de Permeabilidade	Densidade	
	$k_{20} (x 10^{-4}) \text{ cm s}^{-1}$	g cm^{-3}	$k_{20} (x 10^{-4}) \text{ cm s}^{-1}$	g cm^{-3}	
Esferas de Vidro (EV)	56,94	1,99	32,86	1,98	42,29 (-)
Cachoeira da Prata (CP)	28,55	1,93	16,80	1,81	41,16 (-)
João Pinheiro (JP)	10,32	2,12	34,13	2,02	230,72 (+)
Sete Lagoas (SL)	0,42	1,77	0,54	1,63	28,57 (+)
Vila Secundino (VS)	31,92	1,93	28,88	1,79	9,52 (-)

4.5 Resistência à penetração

A seguir são apresentados os resultados de resistência à penetração em sistemas binários e ternários, comparando-os com os obtidos após a adição de agentes de cimentação.

4.5.1 Resistência à penetração em sistemas binários e ternários

As Figuras 88, 89, 90, 91 e 92 mostram as curvas de resistência de ponta ajustadas pelo modelo hiperbólico expresso pela Equação (16).

$$R_p = \frac{a_1 \cdot h}{1 - a_2 \cdot h} \quad (16)$$

O critério de escolha utilizado na determinação dos percentuais das partículas de tamanho grande, médio e pequeno foi baseado na análise do

gráfico de empacotamento ternário, escolhendo-se uma combinação que estivesse situada na região de maior densidade desse sistema. As classes utilizadas para a determinação da resistência de ponta estão dispostas no Quadro 7A.

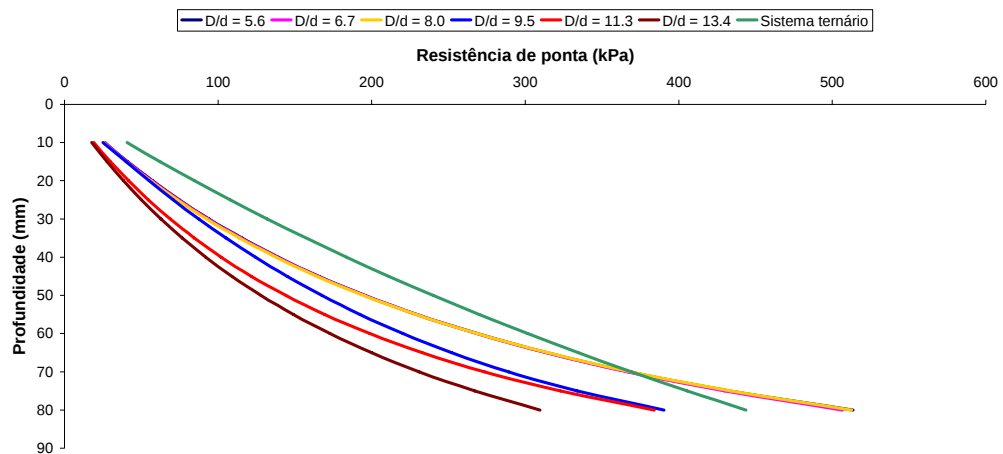


Figura 88: Curvas de resistência de ponta de Esferas de Vidro (EV) ajustadas pelo modelo hiperbólico.

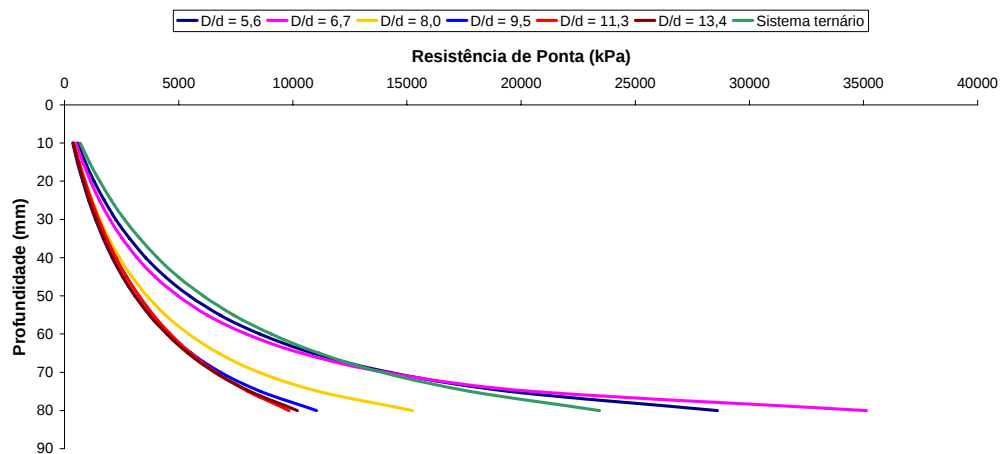


Figura 89: Curvas de resistência de ponta da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP) ajustadas pelo modelo hiperbólico.

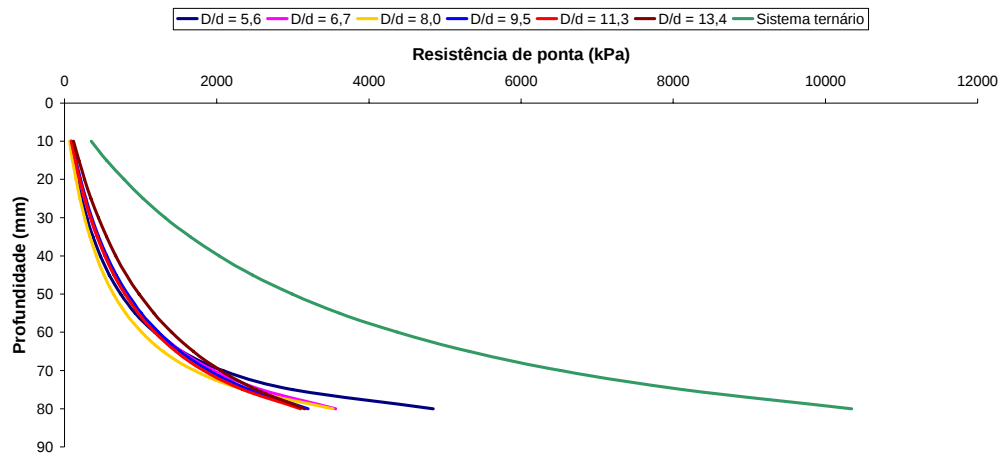


Figura 90: Curvas de resistência de ponta da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP) ajustadas pelo modelo hiperbólico.

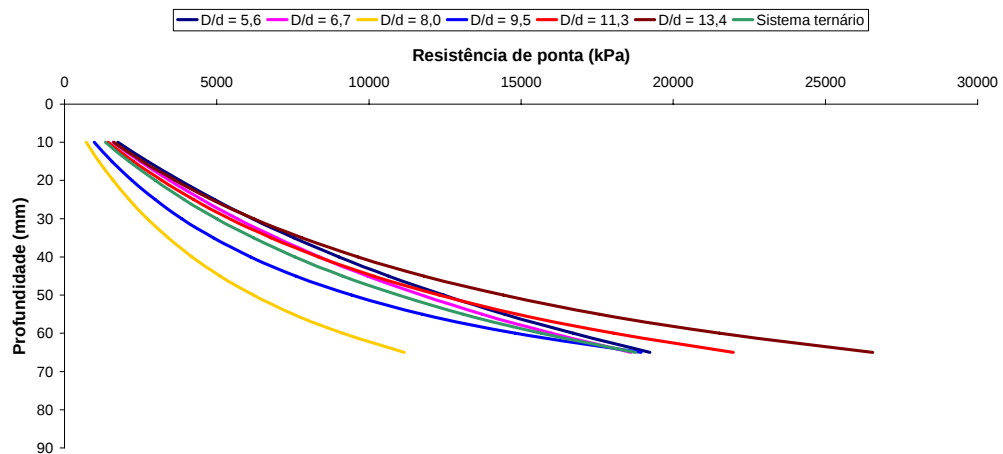


Figura 91: Curvas de resistência de ponta da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL) ajustadas pelo modelo hiperbólico.

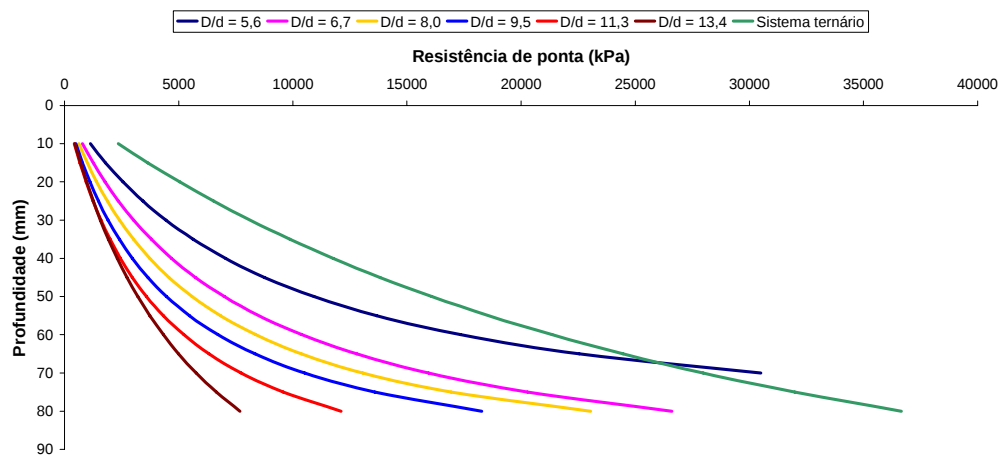


Figura 92: Curvas de resistência de ponta da fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS) ajustadas pelo modelo hiperbólico.

Os menores valores de resistência de ponta estão associados às Esferas de Vidro (EV), seguida pela fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP) e, na mesma ordem de grandeza, as frações areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP), Sete Lagoas (SL) e Vila Secundino (VS). Por terem superfície lisa, as Esferas de Vidro (EV) possibilitaram que suas partículas se deslocassem com relativa facilidade durante o ensaio. A mesma situação foi observada durante o ensaio de penetração da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP), que possui elevado grau de arredondamento. Contudo, devido à sua rugosidade superficial, apresentou valores significativamente maiores.

Para as Esferas de Vidro (EV) e frações areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP) e Vila Secundino (VS), observou-se que, à medida que aumentou a razão D/d , houve redução na resistência de ponta. Esse fato está associado à possibilidade de deslocamento dos grãos menores, quando solicitados por forças externas, dentro dos interstícios formados pela matriz das partículas de maior diâmetro. Em equivalência, quanto menor a relação D/d , maior é o entrosamento das partículas, tendo como consequência maiores valores para a resistência de ponta. Entretanto, esse comportamento não foi observado para os demais solos.

Para verificar similaridade na resistência à penetração em função da morfologia da partícula, as curvas foram ajustadas por um modelo de regressão linear simples, com os dados relativos à resistência de ponta transformados para a função logaritmo natural, onde o coeficiente β_0 determina o intercepto e o coeficiente β_1 determina a inclinação da reta. Os coeficientes estão apresentados no Quadro 24 e, os testes de identidade dos coeficientes estão apresentados no Quadro 25.

Quadro 24: Coeficientes obtidos por ajuste de regressão linear simples

Item	D/d	β_0	β_1
Esferas de Vidro (EV)	5,7	3,2335075 ^(*)	0,0391936 ^(*)
	6,7	3,2263713 ^(*)	0,0392343 ^(*)
	8,0	3,2037776 ^(*)	0,0396401 ^(*)
	9,5	3,2633124 ^(*)	0,0354191 ^(*)
	11,3	2,909482 ^(*)	0,0395806 ^(*)
	13,4	2,8712146 ^(*)	0,0377177 ^(*)
Cachoeira da Prata (CP)	5,7	6,0740732 ^(*)	0,0509612 ^(*)
	6,7	5,8543937 ^(*)	0,0542853 ^(*)
	8,0	5,7996107 ^(*)	0,0475078 ^(*)
	9,5	5,7289272 ^(*)	0,0452668 ^(*)
	11,3	5,9106921 ^(*)	0,0422298 ^(*)
	13,4	5,784843 ^(*)	0,0439106 ^(*)
João Pinheiro (JP)	5,7	3,9575178 ^(*)	0,0538939 ^(*)
	6,7	4,2474331 ^(*)	0,0486371 ^(*)
	8,0	3,9094602 ^(*)	0,0515941 ^(*)
	9,5	4,3601339 ^(*)	0,0465394 ^(*)
	11,3	4,3122484 ^(*)	0,0466886 ^(*)
	13,4	4,6680071 ^(*)	0,0432321 ^(*)
Sete Lagoas (SL)	5,7	7,3625417 ^(*)	0,0408992 ^(*)
	6,7	7,2458364 ^(*)	0,0420876 ^(*)
	8,0	6,3723495 ^(*)	0,0470974 ^(*)
	9,5	6,6208232 ^(*)	0,0508099 ^(*)
	11,3	7,070158 ^(*)	0,0468215 ^(*)
	13,4	7,1751717 ^(*)	0,0479531 ^(*)
Vila Secundino (VS)	5,7	6,6831444 ^(*)	0,0535016 ^(*)
	6,7	6,5054729 ^(*)	0,0462677 ^(*)
	8,0	6,2503896 ^(*)	0,0471482 ^(*)
	9,5	6,0108097 ^(*)	0,0474114 ^(*)
	11,3	5,9217441 ^(*)	0,0442614 ^(*)
	13,4	6,0935731 ^(*)	0,0376446 ^(*)

^(*) Significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 25: Teste de identidade dos coeficientes β_0 e β_1

Parâmetros		β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1
Solo	D/d	6,7		8,0		9,5		11,3		13,4	
EV	5,6	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	*
	6,7	-	-	*	*	*	*	ns	*	ns	*
	8,0	-	-	-	-	*	*	ns	*	ns	*
	9,5	-	-	-	-	-	-	ns	*	ns	*
	11,3	-	-	-	-	-	-	-	-	*	*
CP	5,6	ns	*	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns
	6,7	-	-	*	ns	*	ns	*	ns	*	ns
	8,0	-	-	-	-	*	*	*	ns	*	*
	9,5	-	-	-	-	-	-	*	*	*	*
	11,3	-	-	-	-	-	-	-	-	*	*
JP	5,6	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	6,7	-	-	ns	*	*	*	*	*	ns	ns
	8,0	-	-	-	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	9,5	-	-	-	-	-	-	*	*	ns	*
	11,3	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	*
SL	5,6	*	*	ns	*	ns	ns	ns	*	*	ns
	6,7	-	-	ns	*	ns	ns	*	*	*	*
	8,0	-	-	-	-	ns	*	ns	*	ns	*
	9,5	-	-	-	-	-	-	ns	*	ns	*
	11,3	-	-	-	-	-	-	-	-	*	*
VS	5,6	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	6,7	-	-	ns	*	ns	*	ns	*	ns	ns
	8,0	-	-	-	-	ns	*	ns	*	*	ns
	9,5	-	-	-	-	-	-	*	*	*	ns
	11,3	-	-	-	-	-	-	-	-	*	ns

(*) Significativo a 5% de probabilidade.

O teste de identidade de modelos aplicado às Esferas de Vidro (EV) mostrou que, para as razões D/d iguais a 5,6, 6,7, 8,0 e 9,5, houve similaridade estatística nos coeficientes β_0 e β_1 . Portanto, podem ser reescritas sob a forma de uma única equação. Também foi verificada similaridade estatística entre as razões D/d iguais a 11,3 e 13,4. Os resultados nos permitem concluir que a resistência de ponta não foi modificada para razões menores do que 9,5. Em superfícies lisas e arredondadas não há entrosamento entre as partículas, possibilitando o deslocamento das mesmas durante o ensaio de penetração, o que explica a similaridade estatística encontrada. Para as demais razões, a presença de partículas de menor diâmetro (d) nos interstícios da matriz formada pelas partículas de maior diâmetro (D), reduziu a resistência de ponta. Na medida em que há redução no diâmetro, maior a possibilidade de

ocorrência dos processos de deslizamento e rolamento das partículas de menor diâmetro, facilitando, dessa maneira, a passagem do cone penetrométrico quasi-estático, o que pode explicar os menores valores encontrados para a resistência de ponta e a similaridade estatística entre as razões D/d iguais a 11,3 e 13,4.

Para a fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP), houve similaridade estatística entre as razões D/d iguais a 9,5, 11,3 e 13,4. Apesar da maior irregularidade superficial de suas partículas, ainda é possível a ocorrência de deslizamento e rolamento em razões D/d maiores do que 8,0, não alterando estatisticamente a resistência de ponta. Para as razões 5,6, 6,7 e 8,0, houve diferença estatística entre as equações, refletindo os diferentes graus de entrosamento entre as partículas.

Para a fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP), houve similaridade estatística entre as razões 6,7 e 9,5, 6,7 e 11,3, bem como 11,3 e 13,4. Para a fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL), houve similaridade estatística entre as razões 5,6 e 6,7, assim como 6,7 e 11,3. Para a fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS) não foi observada nenhuma similaridade estatística entre as razões.

Fatores tais como, tamanho da partícula, efeitos de aglomeração e presença de fedspatos, podem ter contribuído para a não observação dos padrões de similaridade estatística nas frações areia limpa dos solos João Pinheiro (JP), Sete Lagoas (SL) e Vila Secundino (VS). Outros fatores, associados aos anteriormente citados, tais como deformação/fragmentação de grãos, aliados aos efeitos de moagem dos grãos pela ponteira, também podem explicar a falta de padrão observada nas relações D/d nesses solos. Acredita-se que um maior número de repetições nos ensaios seja necessário para reduzir a variabilidade experimental observada nas frações areia limpa desses solos.

Em geral, os empacotamentos ternários resultaram em maiores valores de resistência de ponta. Tal fato pode estar associado à presença de

grãos de diferentes tamanhos, resultando em um melhor entrosamento entre as partículas. Os maiores valores de resistência de ponta observados na fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP) estão associados ao uso de partículas de menor tamanho nos empacotamentos ternários, que resultam em uma quantidade maior de contatos entre as mesmas. Segundo Pinto (2002), as forças são transmitidas pelo contato entre as partículas. A redução nos valores de resistência de ponta, observada na fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL), está associada à presença de feldspato alterado em sua composição mineralógica, cujos grãos têm menor resistência quando comparadas com grãos de quartzo.

4.5.2 Resistência à penetração sob a ação de agentes cimentantes

Para avaliar possíveis ganhos de resistência de ponta em sistemas empacotados sob a ação de agentes de cimentação, foram realizados empacotamentos binários na razão $D/d = 8,0$. Esses sistemas foram submetidos à cimentação com cal hidratada e com óxidos de ferro, sendo os resultados apresentados no Quadro 26. A avaliação da resistência de ponta foi realizada na profundidade de 3 cm.

Quadro 26: Resistência de ponta obtida em sistemas binários na razão $D/d = 8,0$, submetidos a agentes de cimentação

Item	Sem agentes de cimentação	Cimentação com cal hidratada	Variação Percentual	Cimentação com óxido de ferro	Variação Percentual
	R_p (kPa)	R_p (kPa)		R_p (kPa)	
Esferas de Vidro (EV)	92,55	630,12	580,84 (+)	128,32	38,65 (+)
Cachoeira da Prata (CP)	1.549,40	12.547,87	709,85 (+)	15.330,42	889,44 (+)
João Pinheiro (JP)	262,64	2.686,72	922, 97 (+)	136,74	47,94 (-)
Sete Lagoas (SL)	2.720,50	15.253,23	460,68 (+)	13.726,47	404,56 (+)
Vila Secundino (VS)	2.407,25	8.962,95	272,33 (+)	1.919,99	20,25 (-)

Os ganhos de resistência de ponta variaram de 272,33% a 922,97% para a cimentação com cal hidratada. O maior ganho da resistência de ponta, encontrado para a fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP), possivelmente reflete a presença de areia de granulação fina. Os elevados valores

encontrados para a resistência de ponta possivelmente refletem a alta concentração de CO_2 utilizada nas reações de carbonatação.

Para as frações areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP) e Sete Lagoas (SL) foram encontrados valores similares de resistência de ponta quando submetidos à cimentação por cal hidratada e por óxido de ferro. Contudo, para as Esferas de Vidro (EV) a cimentação por óxido de ferro apresentou ganho inferior à cimentação por cal hidratada. Para os demais solos, houve redução na resistência de ponta. Essas reduções na resistência de ponta indicam a necessidade de aperfeiçoamentos na metodologia, devido à aplicação de vácuo para a percolação da solução. A aplicação do vácuo reside no fato de que as reações se processam rapidamente, com a criação de camadas encrostadas nas bases, impedindo que a reação se realize no interior do sistema empacotado.

5. PROJETOS DOS APARELHOS CONSTRUÍDOS E UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO DA TESE

A seguir são apresentados os projetos desenvolvidos em CAD dos aparelhos utilizados para a condução dos trabalhos da tese.

5.1 Agitador de Wagner

Agitador mecânico, tipo Wagner, com capacidade de produção de grandes volumes de solo (48 garrafas plásticas de 2 L, com 300 g de solo em cada garrafa), tendo painel frontal com controle de tempo, rotação (em rpm) e sistema de pausa. Possui monitor para visualização do tempo decorrido e rotação. A base é compatível com as dimensões de uma garrafa PET de 2 L e a parte superior encaixa-se na tampa da mesma. A base é rosqueável, para permitir o encaixe de diferentes tipos de base. O ajuste do topo é feito por molas, para o ajuste da altura.

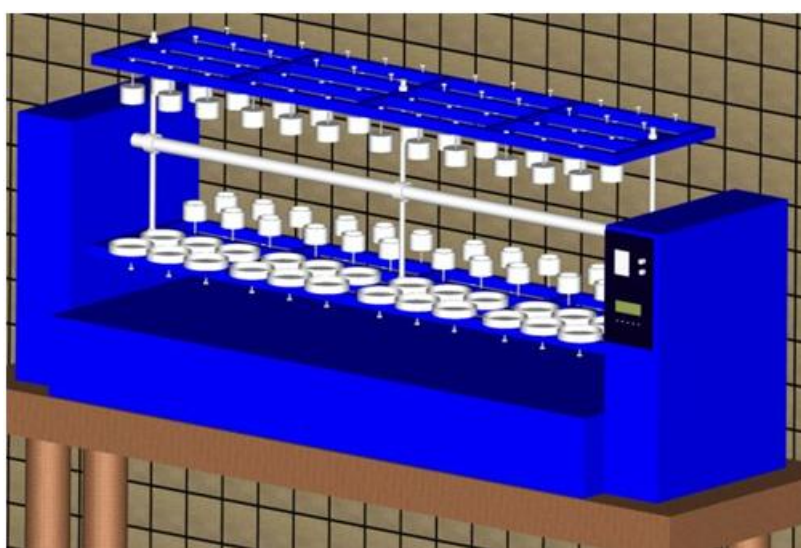


Figura 93: Agitador mecânico, tipo Wagner.

5.2 Empacotador de partículas

Empacotador de partículas (Figura 94), construído para simular os procedimentos de empacotamento estabelecidos por Dalla Riva (2005), com as seguintes características: sistema dotado de base giratória com controle de velocidade de rotação (em rpm); controle da frequência de batidas pelo uso de um solenóide (em Hz), com possibilidade de movimento vertical; e, sensor de deslocamento vertical, utilizando-se de um potenciômetro. O equipamento, associado a um computador, permite visualizar, em forma gráfica, quando o sensor se encontra estabilizado, determinando, dessa forma, o volume da amostra.

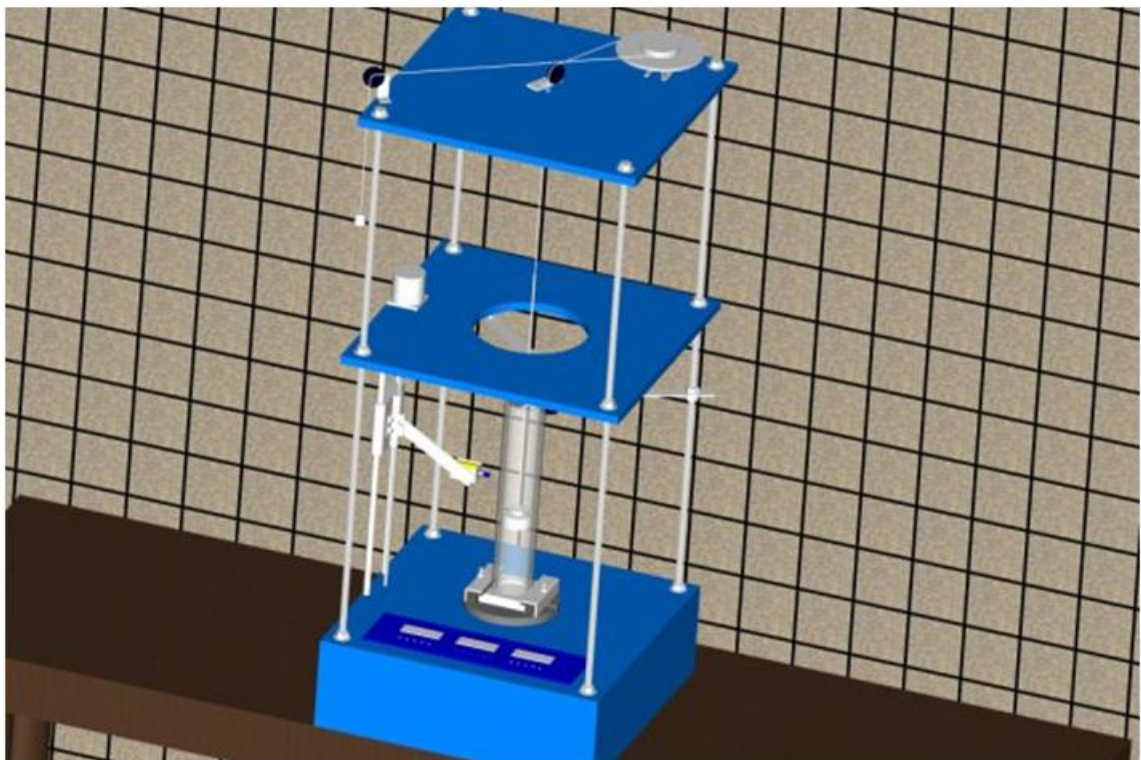


Figura 94: Empacotador de partículas.

5.3 Penetrômetro

Penetrômetro, com sistema de cravação hidráulico (Figura 95) e curso de até 60 cm, podendo adaptar-se células de carga de capacidade variável, em função do material a ser ensaiado; possui uma haste de penetração de cone penetrométrico, podendo-se variar o diâmetro do cone. A célula de carga é ligada a um sistema de aquisição de dados conectado a um

computador. O sistema de cravação possui válvula para controle de pequenas vazões (Figura 96), permitindo pequenos deslocamentos. Também pode ser utilizado para maiores deslocamentos, abrindo-se totalmente a válvula. Possui sistema de nivelamento e reação.

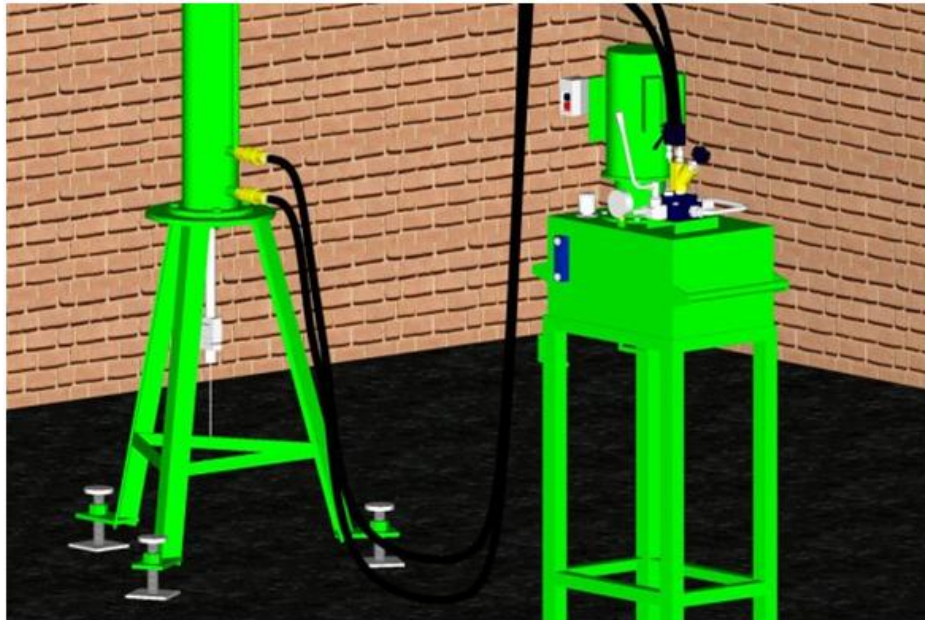


Figura 95: Penetrômetro com sistema de cravação hidráulico.

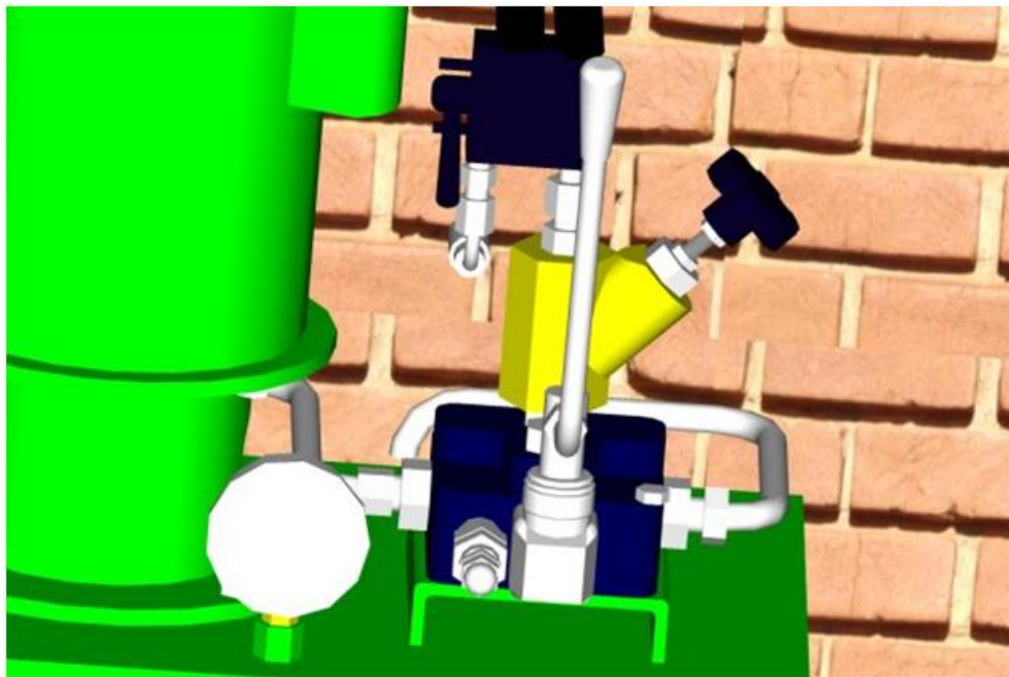


Figura 96: Detalhe da válvula para controle da vazão.

5.4 Permeâmetro

A interface (Figura 97A) é composta por duas tampas, uma superior e outra inferior; (ii) um tubo de acrílico; e (iii) um dispositivo que permite despressurizar o reservatório, em caso de necessidade, e respectivas conexões, sendo que todas as vedações foram feitas por intermédio de anéis O-ring. A alimentação da célula por ar água é feita pela parte superior. Na parte inferior, encontra-se o ponto de saída do líquido, que caminha pelo tubo em direção ao permeâmetro.

O permeâmetro (Figura 97B) é constituído, semelhantemente à interface, por duas tampas, uma superior e outra inferior, e por um tubo de acrílico, nas quais se coloca o corpo-de-prova durante a realização do ensaio. A alimentação se dá na parte inferior, com o líquido emergindo na parte superior em tubo de vidro graduado, onde é realizada a leitura. Da mesma forma que a interface, o permeâmetro possui um dispositivo na tampa superior que permite a retirada do excesso de ar, aqui denominado de purgador. Nos permeâmetros, as tampas possuem na parte interna canalículos (Figura 98), com a finalidade de distribuir mais uniformemente possível o fluxo. Da mesma forma que a interface, as vedações se dão por meio de anéis O-ring.

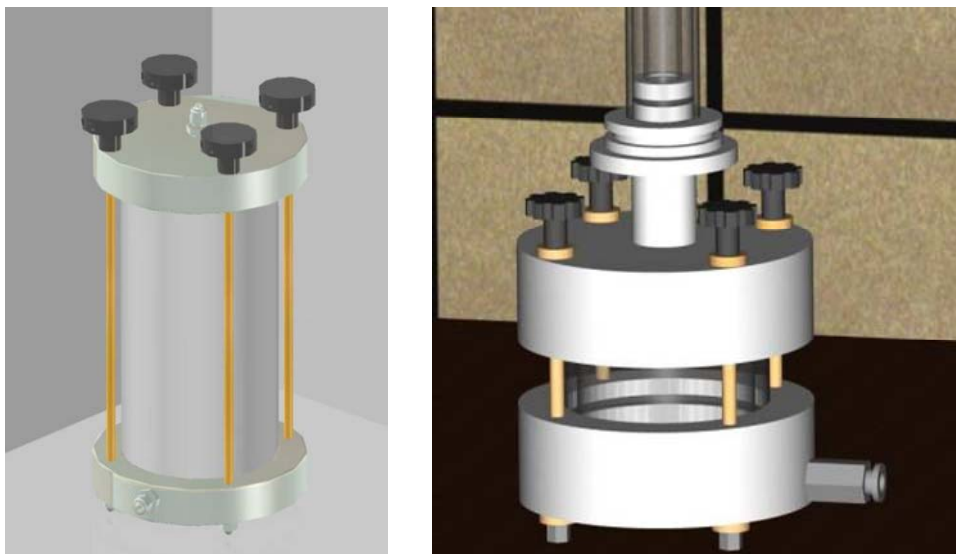


Figura 97: (A) Interface. (B) Permeâmetro



Figura 98: Detalhe da tampa.

6. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo estudar a influência das propriedades físicas e de agentes de cimentação na estruturação de esferas de vidro e na fração areia de solos arenosos, considerando-se sistemas de empacotamentos binários e ternários. Foram avaliados (i) sistemas de empacotamentos binários e ternários; (ii) permeabilidade em sistemas binários e ternários; (iii) resistência à penetração em sistemas binários e ternários; (iv) resistência à penetração em sistemas binários sujeitos à ação de agentes de cimentação (cal hidratada e óxido de ferro). Outro propósito desse estudo foi a modelagem matemática dos empacotamentos, permeabilidade e resistência à penetração em sistemas empacotados, procurando similaridades estatísticas em testes de identidade de modelos. Os resultados obtidos permitiram concluir 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 estudados;
- maiores eficiências de empacotamentos binários ocorreram em relações entre o maior e o menor diâmetro (D/d) próximas de 7;
- as densidades máximas de empacotamento obtidas em diferentes razões D/d permitiram ajuste dos dados pela utilização de um modelo hiperbólico;
- há similaridade entre empacotamentos ternários realizados com as esferas de vidro e as frações areia dos solos estudados;
- o coeficiente de permeabilidade é fortemente influenciado pela natureza das partículas envolvidas nos empacotamentos binário e ternário;

- o coeficiente de permeabilidade obtido em diferentes razões D/d permitiu um ajuste dos dados pela utilização de um modelo hiperbólico;
- a resistência de ponta obtida em função da profundidade de penetração permitiu um ajuste dos dados pela utilização de um modelo hiperbólico;
- a cimentação por cal hidratada elevou significativamente a resistência de ponta em empacotamentos binários na razão $D/d = 8,0$; e
- a cimentação por óxido de ferro elevou significativamente a resistência de ponta em empacotamentos binários na razão $D/d = 8,0$ para a fração areia limpa dos solos Cachoeira da Prata (CP) e Sete Lagoas (SL) .

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos no presente trabalho, tem-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- continuidade da presente pesquisa, com maior detalhamento das razões D/d ;
- concentração de estudos em sistemas binários, considerando-se frações areias dos solos;
- desenvolvimento de estudos de permeabilidade no solo natural, para fins de comparação com os sistemas empacotados;
- inclusão de estudo dirigido à determinação das curvas características das frações areia dos solos analisados;
- inclusão de solos artificiais, com índices morfométricos 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;
- estudos de cimentação, com abordagem da influência do tempo de cura na resistência mecânica e na permeabilidade das misturas;
- inclusão de estudos de resistência ao cisalhamento determinada em ensaios triaxiais convencionais, para determinação de envoltórias de ruptura dos solos em sistemas empacotados e suas misturas com agentes de cimentação; e
- desenvolvimento de nova metodologia para a determinação de índices morfométricos dos solos, através de um sistema automatizado de captura de imagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Solo-Ensaio de penetração de cone in situ (CPT)**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 11 p., 1991.
- ABNT. **Rochas e solos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 18 p., 1995.
- ALSHIBLI, K.A.; ALSALEH, M.I. Characterizing surface roughness and shape of sands using digital microscopy. **J. Comput. Civil Eng.**, 18:36-45, 2004.
- ANDEREGG, F.O. Grading aggregates II - The application of mathematical formulas to mortars. **Ind. Eng. Chem.**, 23:1058-1064, 1931.
- ANDERSON, J.U. An improved pretreatment for mineralogical analysis of samples containing organic matter. **Clays Clay Miner.**, 10:380-388, 1963.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. e JONES, A.J. (eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.123-141 (SSSA Special publication 49).
- ASTE, T.; WEAIRE, D. **The pursuit of perfect packing**. 2. ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2008. 200p.
- AYER, J.; SOPPET, F.E. Vibratory compaction: I, compaction of spherical shapes. **J. Am. Ceram. Soc.**, 48:180-183, 1965.
- BAVER, L.D. **Soil physics**. 3. ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1956. 489p.
- BERNAL, J.D.; FINNEY, J.L. Random packing of spheres in non-rigid containers. **Nature**, 214:265-266, 1967.
- BODMAN, G.B.; CONSTANTIN, G.K. Influence of particle size distribution in soil compaction. **Hilgardia**, 36:567-591, 1965.

- BOUWMAN, A.M.; BOSMA, J.C.; VONK, P.; WESSELINGH, J.A.; FRIJLINK, H.W. Which shape factor(s) best describe granules? **Powder Technol.**, 146:66-72, 2004.
- BROWN, R.L.; HAWKSLEY, P.G.W. Effect of container walls on packing density of particles. **Nature**, 157:585, 1946.
- CHAN, M.A.; ORMÖ, J.; PARK, A.J.; STICH, M.; SOUZA-EGIPSY, V.; KOMATSU, G. Models of iron oxide concretion formation: field, numerical, and laboratory comparisons. **Geofluids**, 7:356-368, 2007.
- COELHO, M.C.; HARNBY, N. Moisture bonding in powders. **Powder Technol.**, 20:201-205, 1978.
- CRUZ, C.D. **Programa Genes. Versão Windows**. Editora UFV. Viçosa, MG, Brasil, 2006.
- DALLA RIVA, R.D. **Densidade, porosidade, resistência à penetração e retenção de água em resposta ao arranjo e morfometria de partículas da fração areia**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 76p. (Dissertação de Mestrado).
- DERESIEWICZ, H. Mechanics of granular matter. **Adv. Appl. Mech.**, 5:233-306, 1958.
- 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. Manual de métodos de análise de solo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EPSTEIN, N.; YOUNG, M.J. Random loose packing of binary mixtures of spheres. **Nature**, 196:885-886, 1962.
- 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.
- FEDORS, R.F.; LANDEL, R.F. Effect of surface adsorption and agglomeration on the packing of particles. **Powder Technol.**, 23:219-223, 1979.

- 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.
- FONTES, L.E.F. Estrutura do solo. In: FONTES, L.E.F., SANS, L.M.A., FONTES, M.P.F. **Física do solo - princípios básicos.** Departamento de Solos - UFV, Viçosa, 1992. 287p.
- FRASER, H.J. Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. **J. Geol.**, 43:910-1010, 1935.
- FREDLUND, D.G. **Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction.** New York: John Willey & Sons Ltd., p. 113-144, 1987.
- FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R.; WIDGER, R.A. The shear strength of unsaturated soils. **Can. Geot. Journal**, vol. 15, no. 3, pp. 313-321, 1978.
- FREDLUND, D.G.; VANAPALLI, S.; XING, A.; PUFAHL, D.E. **Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve.** 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris: 63-69, 1995a.
- FREDLUND, D.G.; XING, A.; FREDLUND, M.D.; BARBOUR, S.L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. 32(3): 440-448, 1995b.
- FRIEDMAN, S.P.; ROBINSON, D.A. Particle shape characterization using angle of repose measurements for predicting the effective permittivity and electrical conductivity of saturated granular media. **Water Resour. Res.**, 38:1236, 2002.
- FULLER, W.B.; THOMPSON, S.E. The laws of proportioning concrete. **Trans. Am. Soc. Civ. Eng.**, 59:67-143, 1907.
- FURNAS, C.C. Grading aggregates I - Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. **Ind. Eng. Chem.**, 23:1052-1058, 1931.
- GENRO JUNIOR, S.A; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob

- semeadura direta com rotação de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:477-484, 2004.
- GERMAN, R.M. **Particle Packing Characteristics**. Metal Powder Industries Federation, Princeton, 1989. 443p.
- GOOGLE. **Software Google Earth**. Versão 4.2 (beta). Disponível em <<http://earth.google.com/intl/pt/>>. Acesso em: 11 de março de 2009.
- GOTOH, K.; JODREY, W.S.; TORY, E.M. Variation in the local packing density near the wall of a randomly packed bed of equal spheres. **Powder Technol.**, 20:257-260, 1978.
- GRATON, L.C.; FRASER, H.J. Systematic packing of spheres - with particular relation to porosity and permeability. **J. Geol.**, 43:785-909, 1935.
- GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. A model for predicting packing density of soils using particle-size distribution. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 43:758-764, 1979.
- HARRIS, W.L. The soil compaction process. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, G.E. (eds.) **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p. 7-44, 1971.
- HAUGHEY, D.P.; BEVERIDGE, G.S.G. Structural properties of packed beds - a review. **Can. J. Chem. Eng.**, 47:130-140, 1969.
- 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.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. Academic Press, San Diego, 1998. 771p.
- KARLSSON, K.; SPRING, L. Packing of irregular particles. **J. Mater. Sci.**, 5: 340-344, 1970.
- KOHNKE, H. **Soil Physics**. McGraw-Hill, Inc, New York, 1968. 224p.
- 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.
- LEE, D.I. Packing of spheres and its effect on the viscosity of suspensions. **J. Paint Technol.**, 42:579-587, 1970.

- LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. Oficina de Textos, São Paulo, 2002. 178p.
- LEROUÉIL, S. **Critical state soil mechanics and the behavior of real soils**. In: SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, Rio de Janeiro, p.27-33, 1997.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv. Soil Sci.**, 1:277-294, 1985.
- LEVA, M.; GRUMMER, M. Pressure drop through packed tubes, part III, prediction of voids in packed tubes. **Chem. Eng. Prog.**, 43:713-718, 1947.
- 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).
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos solos I: os solos**. Editora Universidade Federal de Viçosa, publicação nº 337, Viçosa, 1993. 38p.
- MANGELDORF, P.C.; WASHINGTON, E.L. Packing of mixtures of hard spheres. **Nature**, 187:930, 1960.
- MASAD, E.; SIVAKUMAR. Advances in the characterization and modeling of civil engineering materials using imaging techniques. **J. Comput. Civil Eng.**, 18:1-1, 2004.
- McGEARY, R.K. Mechanical packing of spherical particles. **J. Am. Ceram. Soc.**, 44:513-522, 1961.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from clays by dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Miner.**, 7:317-327, 1960.
- MEIGH, A.C. **Cone penetration testing – methods and interpretation**. Butterworths, London, 141 p, 1987.
- MELO, G. **Compactação de aterros de barragens de terra**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 1985. 107 p.
- MESSING, G.L.; ONODA, G.Y. Inhomogeneity-packing density relations in binary powders – experimental studies. **J. Am. Ceram. Soc.**, 61:363-366, 1978.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. 2. ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993. 437p.

- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995, 213 p.
- PANAYIOTOPOULOS, K.P. Packing of sands - a review. **Soil Till. Res.**, 13:101-121, 1989.
- PARRISH, J.R. Packing of spheres. **Nature**, 190:800, 1961.
- PATANKAR, A.N.; MANDAL, G. The packing of some non-spherical solid particles. **Brit. Ceram. Trans. J.**, 79: 59-66, 1980.
- PETTIJOHN, F. J. **Sedimentary rocks**. Harper & Row, Publishers, Inc., New York, 1949. 526p.
- PILLAI, K.K. Voidage variation at the wall of a packed bed of spheres. **Chem. Eng. Sci.**, 32:59-61, 1977.
- PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2. ed., Oficina de Textos, São Paulo, 2002. 355p.
- POWERS, M.C. A new roundness scale for sedimentary particles. **J. Sediment. Petrol.**, 23:117-119, 1953.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Editora Manole, Barueri, 2004. 478p.
- RESENDE, M., CURI, N., REZENDE, S.B., CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4. ed., NEPUT, Viçosa, 2002. 338p.
- RIDGWAY, K.; TARBUCK, K.J. The random packing of spheres. **Br. Chem. Eng.**, 12:384-388, 1967.
- RIDGWAY, K.; TARBUCK, K.J. Particulate mixture bulk densities. **Chem. Process Eng.**, 49(2):103-105, 1968a.
- RIDGWAY, K.; TARBUCK, K.J. Voidage fluctuations in randomly-packed beds of spheres adjacent to a containing wall. **Chem. Eng. Sci.**, 23:1147-1155, 1968b.
- RIPPLE, C.D.; JAMES, R.V.; RUBIN, J. Radial particle size segregation during packing of particulates into cylindrical containers. **Powder Technol.**, 8:165-175, 1973.
- 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.
- ROSE, H.E.; ROBINSON, D.J. The density of packing of two component powder mixtures. **Powder Metall.**, 8:20-37, 1965.

- ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesq. Agropec. Bras.**, 34:821-828, 1999.
- RUSSEL, R.D.; TAYLOR, R.E. Roundness and shape of Mississippi river sands. **J. Geol.**, 45:225-267, 1937.
- SHERGOLD, F.A. The percentage voids in compacted gravel as a measure of its angularity. **Mag. Concrete Res.**, 13:3-10, 1953.
- SHINOHARA, K. Rheological property of particulate solids. In: FAYED, M.E., OTTEN, L. (eds.). **Handbook of Powder Science e Technology**. Chapman & Hall, New York, 1997. 914p.
- SCOTT, G.D. Packing of equal spheres. **Nature**, 188:908-909, 1960.
- SCOTT, G.D.; KILGOUR, D.M. The density of random close packing of spheres. **Br. J. Appl. Phys.**, 2:863-866, 1969.
- SONH, H.Y.; MORELAND, C. The effect of particle size distribution on packing density. **Can. J. Chem. Eng.**, 46:162-167, 1968.
- STANDISH, N.; BORGER, D.E. The porosity of particulate mixtures. **Powder Technol.**, 22:121-125, 1979.
- STAPLE, W.J. The influence of size distribution on the bulk density of uniformly packed glass particles. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 39:404-414, 1975.
- SUGUIO, K. **Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica**. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1980. 500 p.
- SUSSKIND, H.; BECKER, W. Random packing of spheres in non-rigid containers. **Nature**, 212:1564-1565, 1966.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Sci.**, 102:18-22, 1966.
- TECHNOGLASS. **Tecnologia em esferas de vidro**. Disponível em: <<http://www.technoglass.com.br>>. Acesso em: 15/05/2010.
- TOLEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, S.M.B.; MELFI, A.J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W. TOLEDO, M.C.M., FAIRCHILD, T.R., TAIOLI, F. (Organizadores). **Decifrando a terra**. Oficina de Textos, São Paulo, 2000. 558p.
- TSUTSUMI, Y. Arrangements of uniformly sized particles in a powder bed. **Powder Technol.**, 7:181-188, 1973.

- VAN BRAKEL, J.; HEERTJES, P.M. Homogeneous particle packings and porous masses. Some experimental techniques. **Powder Technol.**, 9:263-271, 1974.
- VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E.; CLIFTON, A.W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, 33(3): 379-392, 1996.
- VERMAN, L.C.; BANERJEE, S. Effect of container walls on packing density of particles. **Nature**, 157:584, 1946.
- VIEIRA, L.S. **Manual da ciência do solo com ênfase aos solos tropicais**. 2. ed., Editora Agronômica Ceres Ltda, São Paulo, 1988. 464p.
- YERAZUNIS, S.; BARTLETT, J.W.; NISSAN, A.H. Packing of binary mixtures of spheres and irregular particles. **Nature**, 195:33-35, 1962.
- YERAZUNIS, S.; CORNELL, S.W.; WINTNER, B. Dense random packing of binary mixtures of spheres. **Nature**, 207:835-837, 1965.
- YU, A.B.; BRIDGWATER, J.; BURBIDGE, A. On the modeling of the packing of fine particles. **Powder Technol.**, 92:185-194, 1997.
- YU, A.B.; FENG, C.L.; ZOU, R.P.; YANG, R.Y. On the relationship between porosity and interparticle forces. **Powder Technol.**, 130:70-76, 2003.
- YU, A.B.; STANDISH, N. Porosity calculations of multi-component mixtures of spherical particles. **Powder Technol.**, 52:233-241, 1987.
- YUDHBIR; ABEDINZADEH, R. Quantification of particle shape and angularity using the image analyzer. **Geotech. Test. J.**, 14:296-308, 1991.
- WADEL, H. Volume, shape, and roundness of quartz particles. **J. Geol.**, 43:250-280, 1935.
- WESTMAN, A.E.R.; HUGILL, H.R. The packing of particles. **J. Am. Ceram. Soc.**, 13:767-779, 1930.
- WILCOX, C.D.; DOVE, S.B; McDAVID, W.D.; GREER, D.B. **UTHSCSA Image Tool: help on-line**. San Antonio, Texas, Universidade de San Antonio, 1997. não paginado.
- WILLIAMS, J.C. The segregation of particulate materials. A review. **Powder Technol.**, 15:245-251, 1976.
- WILLIAMS, J.C.; SHIELDS, G. The segregation of granules in a vibrated bed. **Powder Technol.**, 1:134-142, 1967.

- WHITE, H.E.; WALTON, S.F. Particle packing and particle shape. **J. Am. Ceram. Soc.**, 20:155-166, 1937.
- WORTHINGTON, P.M. An experiment on the theory of voids in granular materials. **Mag. Concrete Res.**, 4(12):121-126, 1953.

ÍNDICE DE AUTORES

A

Abedinzadeh, 27
ABNT, 9, 10, 16, 64, 69
Alsaleh, 24, 26
Alshibli, 24, 26
Anderegg, 64
Anderson, 74
Arshad, 64
Aste, 40
Ayer, 50

B

Banerjee, 35
Baver, 16
Becker, 34, 98
Bernal, 34, 35, 98
Beveridge, 38
Bodman, 2
Borger, 56, 62, 63, 102, 111
Bouwman, 25
Brown, 35
Bueno, 22

Ch

Chan, 88

C

Coelho, 31, 32
Constantin, 2
Cruz, 88

D

Dalla Riva, 48, 50, 53, 82, 99, 102, 105, 111, 128
Deresiewicz, 40, 41
Dias Júnior, 20, 23
DNIT, 15, 16

E

EMBRAPA, 69, 76
Epstein, 46

F

Farouki, 22
Fedors, 32
Fernandes Filho, 77
Ferreira, 20, 23
Finney, 34, 35, 98
Fontes, 18
Fraser, 27, 46
Fredlund, 12, 13
Friedman, 26
Fuller, 63
Furnas, 45, 48, 49, 59, 60, 63

G

Genro Júnior, 64
German, 28, 30, 31, 33, 34, 38, 42, 43, 45, 57, 58, 59, 62, 65, 107, 112, 113, 116
GOOGLE, 69, 70, 71, 72
Gotoh, 34, 98
Graton, 27
Grummer, 35, 98
Gupta, 2

H

Harnby, 31, 32
Harris, 27
Haughey, 38
Hawksley, 35
Head, 86
Heertjes, 39
Hillel, 8, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 28
Hugill, 40, 45, 60, 62, 82, 99

J

Jackson, 74

K

Karlsson, 54, 102
Kilgour, 43
Kohnke, 16, 22, 23

L

Lade, 40, 46, 48, 49, 50, 51, 84
Lambe, 18
Landel, 32
Larson, 2
Lee, 60, 61
Lepsch, 5, 6, 10, 11
Leroueil, 12, 13
Letey, 64
Leva, 35, 98
Lima, 19, 22, 66, 67

M

Mandal, 54, 55, 102, 105
Mangeldorf, 45
Masad, 27
McGeary, 34, 35, 38, 39, 40, 46, 47, 49, 60, 98
Mehra, 74
Meigh, 65
Melo, 19, 23
Messing, 32, 36, 51, 52
Mitchell, 2, 15, 19, 22, 24, 29
Moreland, 63

N

Nogami, 7

O

Onoda, 32, 36, 51, 52

P

Panayiotopoulos, 42
Parrish, 53, 102
Patankar, 54, 55, 102, 105
Pettijohn, 25, 26, 94
Pillai, 34, 98
Pinto, 27, 125
Powers, 25, 26, 94

R

Reichardt, 6, 14
Resende, 9, 66
Ridgway, 31, 34, 38, 46, 53, 54, 98, 102
Ripple, 38, 99
Robinson, 26, 51
Rosato, 37
Rose, 51
Rosolem, 64
Russel, 25, 26, 94

S

Scott, 35, 36, 42, 43
Shergold, 54
Shields, 36, 38
Shinohara, 30, 31
Sivakumar, 27
Sohn, 63
Soppet, 50
Spring, 54, 102

Standish, 56, 62, 63, 102, 111
Staple, 40
Suguio, 23, 24
Susskind, 34, 98

T

Tarbuck, 31, 34, 38, 46, 53, 54, 98, 102
Taylor, 25, 26, 64, 94
TECHNOGLASS, 68
Thompson, 63
Timm, 6, 14
Toledo, 5, 6, 7
Tsutsumi, 43, 44

V

Van Brakel, 39
Vanapalli, 13
Verman, 35
Viana, 77
Vieira, 5, 23
Villibor, 7, 140

W

Wadell, 24
Walton, 42, 46
Washington, 45
Weaire, 40
Westman, 40, 45, 60, 62, 82, 99
White, 42, 46
Whitman, 18
Wilcox, 78
Williams, 36, 38
Winterkorn, 22
Worthington, 54, 102

Y

Yerazunis, 45, 47, 55, 56, 102
Young, 46
Yu, 31, 62, 112
Yudhbir, 27

APÊNDICE A

Quadro 1A: Classes utilizadas em empacotamentos binários

	Classes utilizadas (mm)	D (mm)	d (mm)	D/d
Esferas de Vidro (EV)	2,000 - 1,680 0,710 - 0,590	1,840	0,650	2,8
	2,000 - 1,680 0,590 - 0,500	1,840	0,545	3,4
	2,000 - 1,680 0,500 - 0,420	1,840	0,460	4,0
	2,000 - 1,680 0,350 - 0,297	1,840	0,324	5,7
	2,000 - 1,680 0,297 - 0,250	1,840	0,274	6,7
	2,000 - 1,680 0,250 - 0,210	1,840	0,230	8,0
	2,000 - 1,680 0,210 - 0,177	1,840	0,194	9,5
	2,000 - 1,680 0,177 - 0,149	1,840	0,163	11,3
	2,000 - 1,680 0,149 - 0,125	1,840	0,137	13,4
	2,000 - 1,680 0,125 - 0,105	1,840	0,115	16,0
Cachoeira da Prata (CP)	2,000 - 1,680 0,350 - 0,297	1,840	0,324	5,7
	2,000 - 1,680 0,297 - 0,250	1,840	0,274	6,7
	2,000 - 1,680 0,250 - 0,210	1,840	0,230	8,0
	2,000 - 1,680 0,210 - 0,177	1,840	0,194	9,5
	2,000 - 1,680 0,177 - 0,149	1,840	0,163	11,3
	2,000 - 1,680 0,149 - 0,125	1,840	0,137	13,4

João Pinheiro (JP)	1,190 - 1,000 0,210 - 0,177	1,095	0,194	5,7
	1,190 - 1,000 0,177 - 0,149	1,095	0,163	6,7
	1,190 - 1,000 0,149 - 0,125	1,095	0,137	8,0
	1,190 - 1,000 0,125 - 0,105	1,095	0,115	9,5
	1,000 - 0,840 0,088 - 0,074	0,920	0,081	11,3
	1,190 - 1,000 0,088 - 0,074	1,095	0,081	13,4
Sete Lagoas (SL)	2,000 - 1,680 0,350 - 0,297	1,840	0,324	5,7
	2,000 - 1,680 0,297 - 0,250	1,840	0,274	6,7
	2,000 - 1,680 0,250 - 0,210	1,840	0,230	8,0
	2,000 - 1,680 0,210 - 0,177	1,840	0,194	9,5
	2,000 - 1,680 0,177 - 0,149	1,840	0,163	11,3
	2,000 - 1,680 0,149 - 0,125	1,840	0,137	13,4
Vila Secundino (VS)	2,000 - 1,680 0,350 - 0,297	1,840	0,324	5,7
	2,000 - 1,680 0,297 - 0,250	1,840	0,274	6,7
	2,000 - 1,680 0,250 - 0,210	1,840	0,230	8,0
	2,000 - 1,680 0,210 - 0,177	1,840	0,194	9,5
	2,000 - 1,680 0,177 - 0,149	1,840	0,163	11,3
	2,000 - 1,680 0,149 - 0,125	1,840	0,137	13,4

Quadro 2A: Densidade da partícula para as diferentes classes das Esferas de Vidro (EV)

Classe	R1	R2	R3	Média	Desvio Padrão
g cm^{-3}					
2,000 - 1,680	2,44	2,47	2,47	2,46	0,02
1,680 - 1,410	2,44	2,47	2,47	2,46	0,02
1,410 - 1,190	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00
1,190 - 1,000	2,47	2,50	2,50	2,49	0,02
1,000 - 0,840	2,47	2,50	2,50	2,49	0,02
0,840 - 0,710	2,47	2,47	2,47	2,47	0,00
0,710 - 0,590	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00
0,590 - 0,500	2,47	2,50	2,50	2,49	0,02
0,500 - 0,420	2,47	2,50	2,50	2,49	0,02
0,420 - 0,350	2,47	2,50	2,50	2,49	0,02
0,350 - 0,297	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00
0,297 - 0,250	2,47	2,50	2,50	2,49	0,02
0,250 - 0,210	2,47	2,50	2,50	2,49	0,02
0,210 - 0,177	2,47	2,50	2,50	2,49	0,02
0,177 - 0,149	2,47	2,47	2,47	2,47	0,00
0,149 - 0,125	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00
0,125 - 0,105	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00
0,105 - 0,088	2,47	2,47	2,47	2,47	0,00
0,088 - 0,074	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00
0,074 - 0,062	2,46	2,56	2,67	2,57	0,11
0,062 - 0,053	2,39	2,73	2,82	2,65	0,23
Média				2,49	

Quadro 3A: Densidade da partícula para as diferentes classes da fração areia limpa do solo Cachoeira da Prata (CP)

Classe	R1	R2	R3	Média	Desvio Padrão
g cm ⁻³					
2,000 - 1,680	2,63	2,63	2,63	2,63	0,00
1,680 - 1,410	2,63	2,63	2,66	2,64	0,01
1,410 - 1,190	2,63	2,63	2,63	2,63	0,00
1,190 - 1,000	2,67	2,66	2,66	2,66	0,00
1,000 - 0,840	2,70	2,70	2,70	2,70	0,00
0,840 - 0,710	2,63	2,63	2,63	2,63	0,00
0,710 - 0,590	2,62	2,62	2,63	2,62	0,00
0,590 - 0,500	2,63	2,63	2,63	2,63	0,00
0,500 - 0,420	2,60	2,59	2,59	2,59	0,00
0,420 - 0,350	2,63	2,64	2,63	2,64	0,01
0,350 - 0,297	2,63	2,63	2,63	2,63	0,00
0,297 - 0,250	2,63	2,63	2,63	2,63	0,00
0,250 - 0,210	2,67	2,66	2,66	2,66	0,00
0,210 - 0,177	2,66	2,66	2,67	2,66	0,01
0,177 - 0,149	2,66	2,66	2,66	2,66	0,00
0,149 - 0,125	2,63	2,64	2,64	2,64	0,01
0,125 - 0,105	2,68	2,68	2,66	2,67	0,01
0,105 - 0,088	2,66	2,66	2,66	2,66	0,00
0,088 - 0,074	2,63	2,62	2,61	2,62	0,01
0,074 - 0,062	2,63	2,63	2,63	2,63	0,01
0,062 - 0,053	2,63	2,63	2,65	2,63	0,01
Média				2,64	

Quadro 4A: Densidade da partícula para as diferentes classes da fração areia limpa do solo João Pinheiro (JP)

Classe	R1	R2	R3	Média	Desvio Padrão
g cm ⁻³					
2,000 - 1,680	2,73	2,73	2,73	2,73	0,00
1,680 - 1,410	2,67	2,67	2,66	2,66	0,00
1,410 - 1,190	2,70	2,70	2,70	2,70	0,00
1,190 - 1,000	2,70	2,70	2,70	2,70	0,00
1,000 - 0,840	2,74	2,74	2,74	2,74	0,00
0,840 - 0,710	2,67	2,67	2,69	2,67	0,01
0,710 - 0,590	2,70	2,70	2,70	2,70	0,00
0,590 - 0,500	2,74	2,73	2,72	2,73	0,01
0,500 - 0,420	2,74	2,74	2,74	2,74	0,00
0,420 - 0,350	2,70	2,70	2,70	2,70	0,00
0,350 - 0,297	2,70	2,70	2,69	2,70	0,00
0,297 - 0,250	2,73	2,73	2,72	2,73	0,01
0,250 - 0,210	2,65	2,65	2,67	2,66	0,01
0,210 - 0,177	2,65	2,65	2,67	2,66	0,01
0,177 - 0,149	2,70	2,69	2,69	2,69	0,01
0,149 - 0,125	2,74	2,74	2,74	2,74	0,00
0,125 - 0,105	2,70	2,70	2,69	2,70	0,01
0,105 - 0,088	2,74	2,73	2,72	2,73	0,01
0,088 - 0,074	2,69	2,68	2,67	2,68	0,01
0,074 - 0,062	2,67	2,66	2,67	2,67	0,01
0,062 - 0,053	2,70	2,69	2,68	2,69	0,01
Média				2,70	

Quadro 5A: Densidade da partícula para as diferentes classes da fração areia limpa do solo Sete Lagoas (SL)

Classe	R1	R2	R3	Média	Desvio Padrão
g cm ⁻³					
2,000 - 1,680	2,63	2,62	2,62	2,62	0,01
1,680 - 1,410	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
1,410 - 1,190	2,66	2,66	2,66	2,66	0,00
1,190 - 1,000	2,65	2,65	2,65	2,65	0,00
1,000 - 0,840	2,67	2,66	2,66	2,66	0,00
0,840 - 0,710	2,63	2,63	2,62	2,62	0,00
0,710 - 0,590	2,67	2,66	2,67	2,66	0,01
0,590 - 0,500	2,67	2,66	2,65	2,66	0,01
0,500 - 0,420	2,63	2,63	2,62	2,63	0,00
0,420 - 0,350	2,67	2,69	2,68	2,68	0,01
0,350 - 0,297	2,63	2,62	2,65	2,63	0,01
0,297 - 0,250	2,65	2,65	2,64	2,65	0,01
0,250 - 0,210	2,57	2,57	2,56	2,56	0,01
0,210 - 0,177	2,69	2,67	2,66	2,67	0,01
0,177 - 0,149	2,67	2,69	2,68	2,68	0,01
0,149 - 0,125	2,65	2,64	2,64	2,64	0,00
0,125 - 0,105	2,70	2,72	2,71	2,71	0,01
0,105 - 0,088	2,66	2,63	2,64	2,64	0,01
0,088 - 0,074	2,63	2,64	2,64	2,64	0,01
0,074 - 0,062	2,67	2,67	2,66	2,66	0,01
0,062 - 0,053	2,62	2,64	2,64	2,63	0,01
Média				2,65	

Quadro 6A: Densidade da partícula para as diferentes classes da fração areia limpa do solo Vila Secundino (VS)

Classe	R1	R2	R3	Média	Desvio Padrão
g cm ⁻³					
2,000 - 1,680	2,64	2,63	2,63	2,64	0,01
1,680 - 1,410	2,64	2,64	2,63	2,64	0,00
1,410 - 1,190	2,67	2,68	2,67	2,67	0,00
1,190 - 1,000	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
1,000 - 0,840	2,71	2,71	2,71	2,71	0,00
0,840 - 0,710	2,66	2,67	2,67	2,67	0,00
0,710 - 0,590	2,68	2,68	2,68	2,68	0,01
0,590 - 0,500	2,66	2,67	2,67	2,67	0,01
0,500 - 0,420	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
0,420 - 0,350	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
0,350 - 0,297	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
0,297 - 0,250	2,70	2,71	2,70	2,70	0,00
0,250 - 0,210	2,63	2,64	2,64	2,64	0,00
0,210 - 0,177	2,67	2,67	2,68	2,67	0,01
0,177 - 0,149	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
0,149 - 0,125	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
0,125 - 0,105	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
0,105 - 0,088	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
0,088 - 0,074	2,70	2,70	2,70	2,70	0,00
0,074 - 0,062	2,61	2,60	2,60	2,60	0,01
0,062 - 0,053	2,67	2,67	2,67	2,67	0,00
Média				2,67	

Quadro 7A: Classes utilizadas em empacotamentos ternários

	Classes utilizadas (mm)	D (mm)	d (mm)	D/d
Esferas de Vidro (EV)	2,000 - 1,680 (C) 0,500 - 0,420 (M)	1,840	0,460	4,0
	2,000 - 1,680 (C) 0,149 - 0,125 (F)	1,840	0,137	13,4
	0,500 - 0,420 (M) 0,149 - 0,125 (F)	0,460	0,137	3,4
Cachoeira da Prata (CP)	2,000 - 1,680 (C) 0,500 - 0,420 (M)	1,840	0,460	4,0
	2,000 - 1,680 (C) 0,149 - 0,125 (F)	1,840	0,137	13,4
	0,500 - 0,420 (M) 0,149 - 0,125 (F)	0,460	0,137	3,4
João Pinheiro (JP)	1,190 - 1,000 (C) 0,297 - 0,250 (M)	1,095	0,274	4,0
	1,190 - 1,000 (C) 0,088 - 0,074 (F)	1,095	0,081	13,5
	0,297 - 0,250 (M) 0,088 - 0,074 (F)	0,274	0,081	3,4
Sete Lagoas (SL)	2,000 - 1,680 (C) 0,500 - 0,420 (M)	1,840	0,460	4,0
	2,000 - 1,680 (C) 0,149 - 0,125 (F)	1,840	0,137	13,4
	0,500 - 0,420 (M) 0,149 - 0,125 (F)	0,460	0,137	3,4
Vila Secundino (VS)	2,000 - 1,680 (C) 0,500 - 0,420 (M)	1,840	0,460	4,0
	2,000 - 1,680 (C) 0,149 - 0,125 (F)	1,840	0,137	13,4
	0,500 - 0,420 (M) 0,149 - 0,125 (F)	0,460	0,137	3,4

Quadro 8A: Classes utilizadas em ensaios de permeabilidade de sistemas binários

	Classes utilizadas (mm)	D (mm)	d (mm)	D/d
Esferas de Vidro (EV)	2,000 - 1,680 0,350 - 0,297	1,840	0,324	5,7
	1,680 - 1,410 0,250 - 0,210	1,545	0,230	6,7
	2,000 - 1,680 0,250 - 0,210	1,840	0,230	8,0
	2,000 - 1,680 0,210 - 0,177	1,840	0,194	9,5
	2,000 - 1,680 0,177 - 0,149	1,840	0,163	11,3
	2,000 - 1,680 0,149 - 0,125	1,840	0,137	13,4
Cachoeira da Prata (CP)	2,000 - 1,680 0,350 - 0,297	1,840	0,324	5,7
	2,000 - 1,680 0,297 - 0,250	1,840	0,274	6,7
	2,000 - 1,680 0,250 - 0,210	1,840	0,230	8,0
	2,000 - 1,680 0,210 - 0,177	1,840	0,194	9,5
	2,000 - 1,680 0,177 - 0,149	1,840	0,163	11,3
	2,000 - 1,680 0,149 - 0,125	1,840	0,137	13,4
João Pinheiro (JP)	1,190 - 1,000 0,210 - 0,177	1,095	0,194	5,7
	1,000 - 0,840 0,149 - 0,125	0,920	0,137	6,7
	1,190 - 1,000 0,149 - 0,125	1,095	0,137	8,0
	1,190 - 1,000 0,125 - 0,105	1,095	0,115	9,5
	1,000 - 0,840 0,088 - 0,074	0,920	0,081	11,3
	1,000 - 0,840 0,074 - 0,062	0,920	0,068	13,4

Sete Lagoas (SL)	2,000 - 1,680 0,350 - 0,297	1,840	0,324	5,7
	2,000 - 1,680 0,297 - 0,250	1,840	0,274	6,7
	2,000 - 1,680 0,250 - 0,210	1,840	0,230	8,0
	2,000 - 1,680 0,210 - 0,177	1,840	0,194	9,5
	2,000 - 1,680 0,177 - 0,149	1,840	0,163	11,3
	2,000 - 1,680 0,149 - 0,125	1,840	0,137	13,4
Vila Secundino (VS)	2,000 - 1,680 0,350 - 0,297	1,840	0,324	5,7
	1,410 - 1,190 0,210 - 0,177	1,300	0,194	6,7
	1,680 - 1,410 0,210 - 0,177	1,545	0,194	8,0
	2,000 - 1,680 0,210 - 0,177	1,840	0,194	9,5
	1,680 - 1,410 0,149 - 0,125	1,545	0,137	11,3
	1,680 - 1,410 0,125 - 0,105	1,545	0,115	13,4