

ROGÉRIO DIAS DALLA RIVA

**DENSIDADE, POROSIDADE, RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E  
RETENÇÃO DE ÁGUA EM RESPOSTA AO ARRANJO E MORFOMETRIA  
DE PARTÍCULAS DA FRAÇÃO AREIA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de “Magister Scientiae”

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2005

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

T

D144d  
2005

Dalla Riva, Rogério Dias, 1965-

Densidade, porosidade, resistência à penetração e retenção de água em resposta ao arranjo e morfometria de partículas da fração areia. / Rogério Dias Dalla Riva. - Viçosa : UFV, 2005.

x, 65f. : il. ; 29cm.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referência bibliográficas : f. 57-62

1. Solos arenosos - Densidade. 2. Solos arenosos - Porosidade. 3. Solos arenosos - Propriedades. 3. Curva de retenção de água. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 631.44

**ROGÉRIO DIAS DALLA RIVA**

**DENSIDADE, POROSIDADE, RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E  
RETENÇÃO DE ÁGUA EM RESPOSTA AO ARRANJO E MORFOMETRIA  
DE PARTÍCULAS DA FRAÇÃO AREIA**

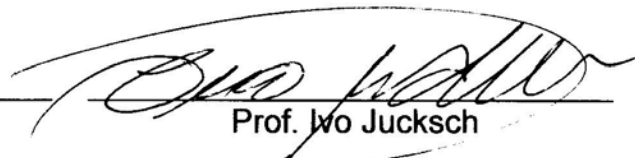
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas para obtenção do Título de *Magister Scientiae*

APROVADA: 04 de março de 2005.



---

Prof. Hugo Alberto Ruiz  
(Conselheiro)



---

Prof. Ivo Jucksch

---

Prof. Walter Antonio Pereira Abrahão



---

Prof. Demetrius David da Silva



---

Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho  
(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, ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realizar o curso.

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

Ao Professor Elpídio Inácio Fernandes Filho pela orientação, sugestões, convívio, apoio, amizade e confiança.

Aos Professores Hugo Alberto Ruiz, Ivo Jucksch, João Luiz Lani, Liovando Marciano da Costa, Maurício Paulo Ferreira Fontes e Walter Antonio Pereira Abrahão, pelas críticas, sugestões, atenção, conselhos e amizade.

Ao Professor José Lino Neto, do Departamento de Biologia Geral, pelo suporte técnico e orientação na obtenção das imagens digitais.

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

Ao Cláudio, João e Benedito pela amizade e ajuda prestada no Laboratório de Física de Solos.

Aos novos amigos que aqui conquistei.

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

## BIOGRAFIA

ROGÉRIO DIAS DALLA RIVA, filho de Laci Dias Dalla Riva (*in memorium*) e César 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 setembro de 2002 ingressou no curso de mestrado em Solos e Nutrição de Plantas no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

## CONTEÚDO

	Página
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	03
2.1. Estrutura do solo .....	03
2.2. Classificação da estrutura do solo .....	04
2.3. Fração areia .....	04
2.4. Empacotamento de materiais não coerentes .....	05
2.4.1. Tipos de empacotamento .....	05
2.5. Empacotamentos de esferas uniformes .....	06
2.6. Empacotamentos binários de esferas .....	08
2.7. Resistência à penetração .....	11
2.8. Curvas de retenção de água .....	13
2.9. Escalas granulométricas .....	14
2.10. Morfologia de partículas .....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	18
3.1. Obtenção e pré-tratamento dos materiais .....	18
3.1.1. Dispersão das amostras .....	18

3.1.2. Remoção de matéria orgânica .....	20
3.1.3. Remoção de óxidos de ferro .....	20
3.1.4. Peneiramento .....	20
3.2. Análises físicas .....	21
3.2.1. Densidade aparente .....	21
3.2.2. Densidade de partículas .....	21
3.2.3. Porosidade total .....	21
3.2.4. Microporosidade e macroporosidade .....	21
3.2.5. Curvas de retenção de água .....	22
3.2.6. Resistência à penetração .....	22
3.2.7. Distribuição do tamanho de partículas .....	23
3.2.8. Curvas de frequência simples .....	23
3.3. Caracterização morfométrica das partículas .....	23
3.4. Empacotamento das esferas de vidro .....	27
3.5. Empacotamento das areias reconstituídas .....	29
3.6. Análises estatísticas .....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1. Morfometria das partículas .....	30
4.2. Distribuição do tamanho de partículas .....	35
4.3. Densidade de partículas das areias reconstituídas .....	38
4.4. Densidade das areias reconstituídas .....	38
4.5. Densidade da partícula das esferas de vidro .....	39
4.6. Porosidade total das areias reconstituídas .....	40
4.7. Resistência à penetração .....	43
4.8. Curvas de retenção de água .....	44
4.9. Empacotamentos binários em esferas de vidro .....	49
4.10. Empacotamentos binários em areias reconstituídas .....	51
4.11. Empacotamentos ternários em esferas de vidro .....	53
5. RESUMO E CONCLUSÕES .....	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
APÊNDICE .....	63

## RESUMO

DALLA RIVA, Rogério Dias, M.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 2005. **Densidade, Porosidade, Resistência à Penetração e Retenção de Água em Resposta ao Arranjo e Morfometria de Partículas da Fração Areia.** Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Conselheiros: Hugo Alberto Ruiz e Liovando Marciano da Costa.

Este trabalho teve por objetivo caracterizar a morfometria de areias reconstituídas (fração areia sem a presença de agentes cimentantes) e esferas de vidro, pela utilização dos índices morfométricos arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compacidade, e analisar a sua correlação com a porosidade total, resistência à penetração e curvas de retenção pelo ajuste de curvas de regressão. Outro propósito desse estudo foi avaliar a elevação da densidade em sistemas binários e ternários de esferas de vidro e sistemas binários de areias reconstituídas sujeitos à ação vibratória controlada, em função da porcentagem das classes envolvidas e das relações entre os seus diâmetros médios. Para isso, foram coletadas 14 amostras de solo/sedimento em diferentes localidades dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e adquiridas esferas de vidro para simulação de empacotamentos binários e ternários. As amostras de solo/sedimento foram submetidas a pré-tratamentos para obtenção da fração areia limpa e posterior peneiramento para separação em 21 classes entre os diâmetros de 2,000 e 0,053 mm. Foram avaliadas a densidade aparente, densidade de partículas, porosidade total, resistência à penetração e curvas de retenção de água das amostras de areias reconstituídas, e a análise morfométrica das esferas de vidro e das amostras de areias reconstituídas com base nos

índices arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compacidade. Para a aquisição das imagens foram utilizados scanner para as frações maiores que 0,250 mm e câmara digital acoplada a microscópio com objetiva 4x para as frações menores que 0,250 mm. Foram obtidas cerca de 2.000 imagens e analisadas 145.000 partículas, aproximadamente. Utilizou-se o programa Adobe® Photoshop® CS para o processamento das imagens e os programas QUANTIPORO e Microsoft® Office Excel 2003 para a geração dos índices morfométricos. A porosidade total foi explicada pelos índices arredondamento, diâmetro de Feret e compacidade. Contudo, o  $R^2$  manteve-se baixo, refletindo a variabilidade morfométrica existente, devido à dureza e ausência de clivagem do quartzo. A resistência à penetração e a microporosidade apresentaram ajuste de regressão com o diâmetro de Feret, não sendo explicados pelos demais índices. Os modelos matemáticos propostos para o ajuste das curvas de retenção apresentaram-se satisfatórios para as amostras analisadas. A elevação da densidade em sistemas binários e ternários apresentou alta dependência da relação entre os diâmetros médios das classes envolvidas e da proporção de material “fino” existente.

## ABSTRACT

DALLA RIVA, Rogério Dias, M.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2005. **Density, Porosity, Resistance to Penetration and Water Retention in Response to the Disposition and Morphometry of Sand Fraction Particles**. Adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Counselors: Hugo Alberto Ruiz and Liovando Marciano da Costa.

The aim of the present paper was to characterize the morphometry of restored sand (sand fraction free from the presence of cementing agents) and glass spheres through the application of morphometric indexes of roundness, elongation, Feret's diameter and compactness, as well as to analyze their correlation with total porosity, resistance to penetration and retention curves by the adjustment of regression curves. Besides, this study also had the objective to evaluate the increase in density in binary and ternary systems of glass spheres and binary systems of restored sand submitted to the vibratory controlled action due to the percentage of the involved classes and the relation among their average diameters. In order to do so, 14 samples of soil/sediment were collected in different areas of the states of Minas Gerais and Espírito Santo, and glass spheres were acquired for the simulation of binary and ternary packing. The samples of soil/sediment were submitted to pre-treatments for the obtainment of the clean sand fraction and posterior screening for the division into 21 classes among the diameters of 2,000 and 0,053 mm. The elements to be evaluated in the process were apparent density, density of particles, total porosity, resistance to penetration and water retention curves of the samples of restored sand as well as the morphometric analysis of the glass spheres and

of the restored sand based on the indexes of roundness, elongation, Feret's diameter and compactness. A scanner was used for the acquisition of images for fractions larger than 0,250 mm and a digital camera connected to a microscope with objective 4x was used for fractions smaller than 0,250 mm. Around 2,000 images were obtained, and approximately 145,000 particles were analyzed. The Adobe® Photoshop® CS program was used for the image processing and the programs QUANTIPORO and Microsoft® Office Excel 2003 were employed for the creation of the morphometric indexes. The total porosity was explained through the indexes of roundness, Feret's diameter and compactness. However,  $R^2$  was kept low reflecting an existing morphometric variability due to the hardness and lack of cleavage presented by quartz. In spite of presenting regression adjustment through Feret's diameter, both resistance to penetration and microporosity could not be explained through the other indexes. The mathematical models proposed to the adjustment of the retention curves proved to be satisfactory for the analyzed samples. The increase in density in binary and ternary systems presented to be highly dependent on the relation between the average diameters of the involved classes and the proportion of the 'fine' existing material.

## 1. INTRODUÇÃO

O empacotamento de solos sem estrutura é influenciado pelo tamanho e distribuição das partículas, esfericidade, arredondamento e rugosidade da superfície dos grãos de areia. Materiais não coerentes podem sofrer acréscimo na sua densidade pelo manejo inadequado do solo. Em solos arenosos, as partículas de areia podem formar camadas encrostadas com densidade de até  $2 \text{ g cm}^{-3}$ , principalmente quando há predominância de areias finas. O processo de densificação de um solo arenoso não depende somente da granulometria da fração areia, mas também do arranjo das partículas. A disposição das partículas em um sistema é fortemente influenciada pela sua distribuição e geometria. 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, permitindo um melhor rearranjo das partículas.

Altas densidades criam problemas em muitos solos. Solos compactados podem resultar em baixas taxas de infiltração e redução no crescimento de raízes e brotos. A susceptibilidade de um dado solo à compactação ou adensamento é dependente de várias propriedades. As mais significantes são distribuição das partículas, conteúdo de matéria orgânica (Gupta & Larson, 1979) e conteúdo de água do solo. Vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para a predição da densidade de empacotamento baseados em uma ou mais dessas propriedades (Bodman & Constantin, 1965; Gupta & Larson, 1979). Os efeitos

ocasionados pela morfologia da partícula não têm sido explicitamente considerados. A utilização de variáveis quantitativas para explicar algumas propriedades físicas do solo intimamente relacionadas à forma da partícula, tais como densidade do solo, porosidade, resistência à penetração e curvas de retenção de água podem revelar um novo enfoque para sua explicação.

O conhecimento básico nessa área 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 à outras variáveis. O entendimento desses sistemas simplificados auxilia na formação de uma base teórica para a compreensão de sistemas mais complexos.

Assim, o objetivo desse trabalho foi caracterizar a morfologia de areias reconstituídas (fração areia sem a presença de agentes cimentantes) e esferas de vidro, pela utilização dos índices morfométricos arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compacidade, e correlacioná-la com a porosidade total, resistência à penetração e curvas de retenção de água. Outro propósito desse estudo foi avaliar a elevação da densidade em sistemas binários de esferas de vidro e areias reconstituídas sujeitos à ação vibratória controlada, em função da porcentagem de material “fino” existente na mistura e da relação entre o maior diâmetro médio e o menor diâmetro médio das classes utilizadas. Também avaliou-se a elevação da densidade em sistemas ternários submetidos à ação vibratória controlada para esferas de vidro, em função da proporção das três classes de diâmetro envolvidas.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Estrutura do solo**

O solo é essencialmente um sistema em que as partículas estão subdivididas. Assim, a fase sólida consiste de partículas de diversos tamanhos, que variam de limites inferiores do estado coloidal até frações mais grosseiras de areia e cascalho.

Estrutura do solo é o arranjo ou ordenação das partículas primárias (areia, argila, silte) e secundárias (agregados) em modelos ou padrões estruturais (Baver, 1956). Devido às diferenças em forma, tamanho e orientação das partículas do solo, aliada às suas diversas associações e interconexões, podem formar padrões 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).

A estrutura do solo interfere no desenvolvimento das plantas, na disponibilidade de água e nutrientes, aeração, atividade microbiana, penetração de raízes, etc. Conseqüentemente, uma estrutura pouco

desenvolvida do solo pode ser um fator indireto limitante ao desenvolvimento de plantas e, em oposição, uma boa estrutura do solo permite que os fatores que influenciam o crescimento de plantas atuem com ótima eficiência.

## **2.2. Classificação da estrutura do solo**

A classificação da estrutura do solo é baseada em aspectos morfológicos. 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 é determinada pelo tipo dos agregados, podendo ser laminar, prismática, em blocos ou granular. 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. Os graus de estrutura levam em consideração as condições de coesão dos agregados, classificando-se como sem estrutura, fraca, moderada e forte.

Um solo “sem estrutura” apresenta-se na condição em que não se observa agregação ou arranjo ordenado definido por linhas naturais de debilidade. São considerados “sem estrutura” os solos com grau de estrutura em grãos simples (não coerente) e maciça (coerente), segundo Lemos & Santos (2002).

## **2.3. Fração areia**

As partículas menores que 2,0 mm são agrupadas em três faixas de tamanho, conhecidas como frações principais, denominadas de areia, silte e argila. A maior fração é denominada areia, cujas partículas têm diâmetro variando de 50  $\mu\text{m}$  a 2000  $\mu\text{m}$ . Os grãos de areia são geralmente constituídos de quartzo, podendo possuir fragmentos de feldspatos e mica e, ocasionalmente, minerais como zircônio, turmalina e hornblenda (Hillel, 1998). Podem ser também nódulos e concreções de diversas naturezas e fragmentos de rochas. A densidade do quartzo situa-se entre 2,5 e 2,8  $\text{g cm}^{-3}$  (Kohnke, 1968) com valor médio de 2,65  $\text{g cm}^{-3}$ . 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. Porém, análises mineralógicas são necessárias para a sua confirmação.

Em muitos casos, os grãos de areia têm dimensões mais ou menos uniformes, podendo ser representados como aproximadamente esféricos, embora não sejam necessariamente lisos, podendo ter uma superfície bastante rugosa.

## **2.4. Empacotamento de materiais não coerentes**

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 dos grãos simples dependem de sua distribuição e de sua forma, bem como a maneira de deposição ou formação no local. Segundo Harris (1971), solos que contêm partículas de vários tamanhos terão maior contato entre partículas que solos com partículas de tamanho uniforme. Há dois casos extremos de possíveis arranjos de empacotamento: um sistema constituído de grãos esféricos de tamanho uniforme em um estado de empacotamento aberto (densidade mínima), e 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 máxima densidade.

### **2.4.1. Tipos de empacotamento**

O estudo do empacotamento dos solos considera o caso hipotético de um sistema constituído inteiramente de esferas uniformes. É um sistema simples que pode ser utilizado para o estudo de partículas não coerentes e estabelece uma estrutura para a compreensão do empacotamento de partículas de menor uniformidade.

Muitos estudos de empacotamento de materiais não coerentes têm sido conduzidos em sistemas constituídos por partículas esféricas uniformes

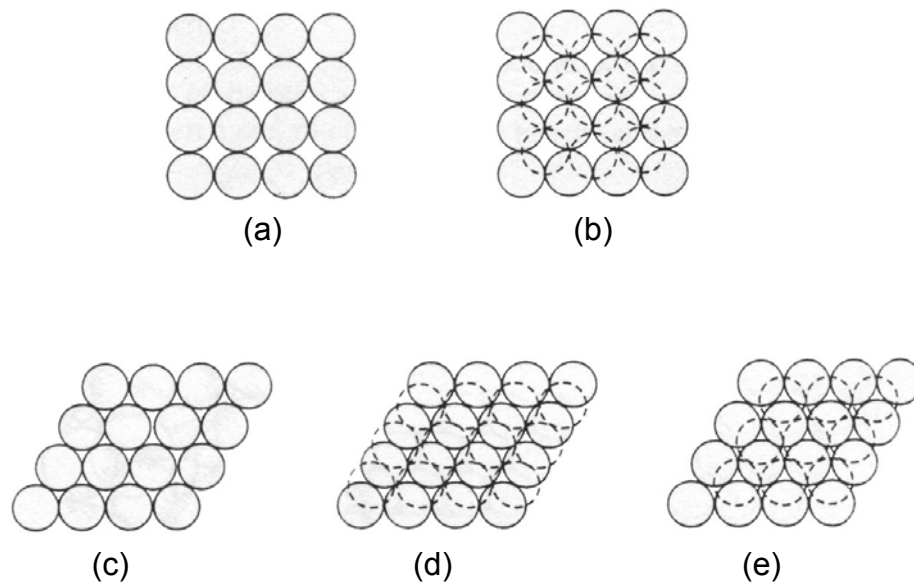
(Westman & Hugill, 1930; Deresiewicz, 1958; McGeary, 1961; Staple, 1975; Lade et al., 1998) em cinco possíveis arranjos geométricos regulares (Figura 1): (a) cúbico simples - apresenta a mínima densidade. Cada partícula tangencia seis outras vizinhas em lados opostos de três eixos ortogonais. Neste arranjo, as partículas são colocadas no topo de outra (centróide sobre centróide), determinando uma estrutura instável; (b) cúbico tetraedral - neste padrão, cada esfera toca seis esferas vizinhas em sua própria camada, e as esferas em diferentes camadas estão posicionadas diretamente no topo de cada outra. Este sistema também é 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. Também recebe a denominação de “double stagger”; (d) piramidal - este arranjo determina a máxima densidade de empacotamento, também conhecido como cúbico de face centrada. Nesse empacotamento, cada esfera da camada superior está assentada na depressão da camada inferior e está em contato com quatro esferas, formando um quadrado na camada abaixo; (e) tetraedral - este arranjo, juntamente com o anterior, também determina a máxima densidade de empacotamento, e é denominado de “close-packed” hexagonal ou tetraedral. Nesse empacotamento, cada esfera da camada superior está assentada na depressão da camada inferior e está em contato com três esferas, formando um triângulo equilátero na camada abaixo.

Sob condições de campo, é altamente improvável que as partículas do solo se apresentem em arranjos instáveis. Sendo assim, é de interesse o estudo do raio da cavidade formada por empacotamentos do tipo piramidal e tetraedral (Gupta & Larson, 1979).

## **2.5. Empacotamentos de esferas uniformes**

A utilização de esferas de vidro em estudos de empacotamento vem sendo realizada por muitos pesquisadores em áreas de conhecimento diversas, tais como concreto, cerâmica, engenharia química e geologia. Estes estudos visam, principalmente, maximizar a capacidade de armazenamento de materiais não coerentes para a obtenção de elevadas densidades. Seu uso na descrição de materiais não coerentes é de caráter

limitado devido à dificuldade de se avaliar influências de fatores de forma (arredondamento, esfericidade, rugosidade, etc.).



**Figura 1. Modelos de empacotamento de esferas de igual tamanho. (a) cúbico simples, (b) cúbico tetraédrico, (c) tetragonal esfenoidal, (d) piramidal, e (e) tetraédrico (Deresiewicz, 1958).**

Embora o modelo de esferas uniformes não seja realístico, é um exercício útil, pois 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 as suposições de: (a) inexistência de forças de atração/repulsão e (b) não influência da densidade do material, as características do empacotamento de esferas uniformes estão apresentadas no Quadro 1.

Quando esferas uniformes são depositadas dentro de um recipiente, as esferas não se arranjam em qualquer padrão regular de empacotamento, havendo, entretanto, a predominância de um dos padrões, sendo este chamado de empacotamento aleatório (Panayiotopoulos, 1989) ou empacotamento normal.

### Quadro 1. Características geométricas de empacotamentos regulares de esferas uniformes

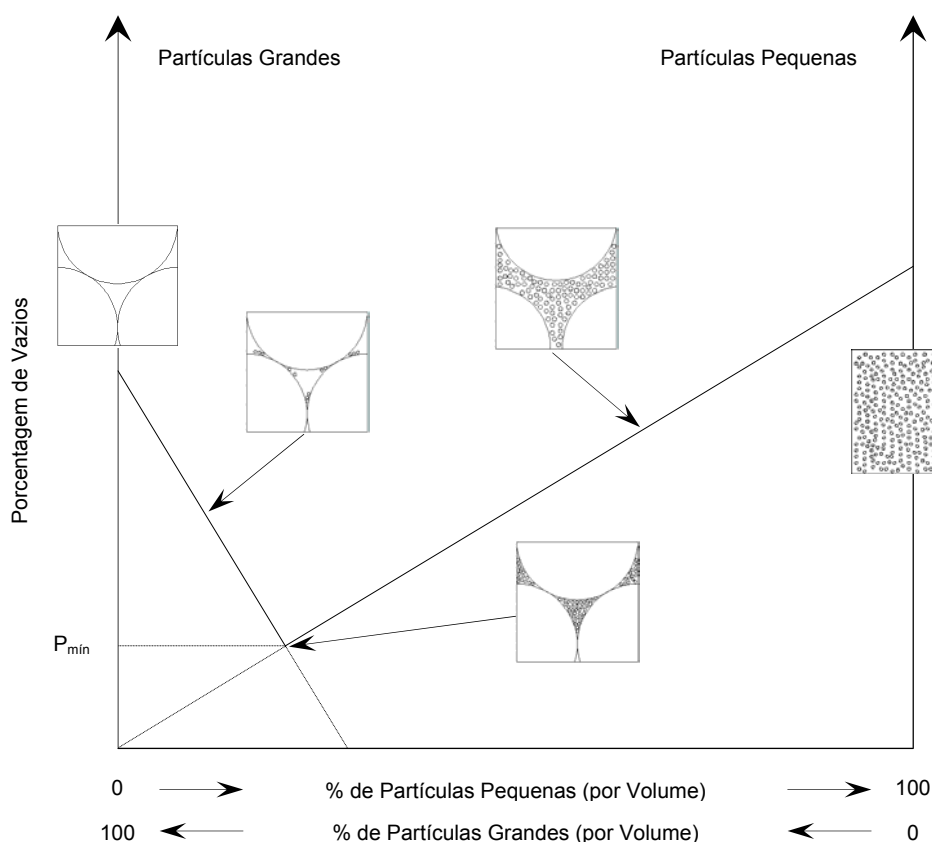
Tipo de Empacotamento	Número de Coordenação	Empacotam. (%)	Vazios (%)
Cúbico Simples	6	52,36	47,64
Cúbico Tetraedral	8	60,46	39,54
Tetragonal Esfenoidal	10	69,81	30,19
Piramidal	12	74,05	25,95
Tetraedral	12	74,05	25,95

### 2.6. Empacotamentos binários de esferas

Densidades e suas variações para misturas de dois tamanhos de grãos têm sido estudados teoricamente e experimentalmente (Fraser, 1935; White & Walton, 1937; McGeary, 1961). Para o estudo de empacotamentos binários, as seguintes suposições fazem-se necessárias: (a) os grãos maiores e os grãos menores são esféricos, (b) a porcentagem de vazio mínima (ou máxima densidade) é independente do diâmetro do grão, isto é, as densidades teóricas são objetos de considerações geométricas e (c) 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) a variação da porcentagem de grãos menores na mistura das partículas, variando de 100% de partículas maiores até 100% de partículas menores e (b) 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 2.

McGeary (1961) encontrou o método mais eficiente para produzir misturas binárias pela deposição inicial das partículas maiores dentro de um recipiente grande até que elas formassem a sua configuração mais densa. Em seguida, procedeu-se à adição das partículas menores enquanto o recipiente estava vibrando. As partículas menores migraram através dos vazios e alcançaram um ponto de saturação no qual posteriores adições de partículas menores não foram mais possíveis sem que houvesse mudança no volume inicial. O autor também verificou, nesse estudo, que misturar as

partículas grandes e pequenas antes do processo de vibração não foi um método efetivo para alcançar as menores proporções de vazios, pois esse procedimento iria ocasionar o fenômeno de segregação das partículas.



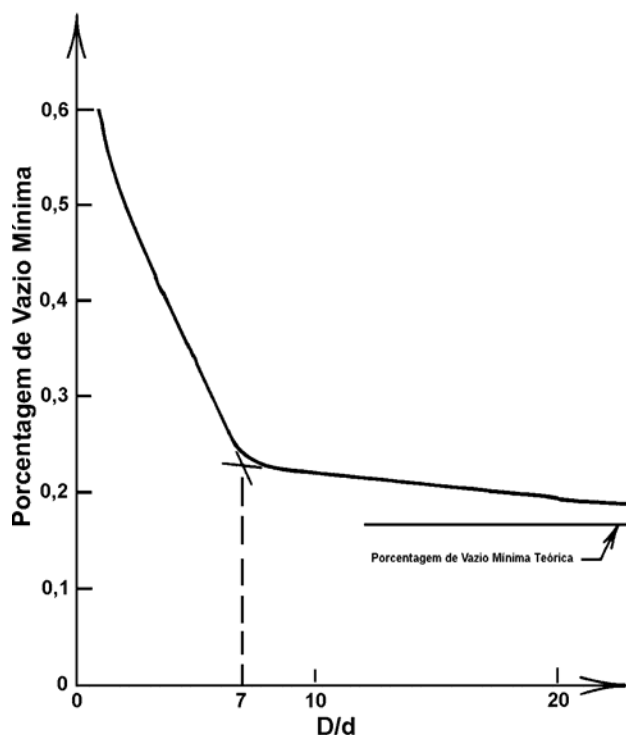
**Figura 2. Variação teórica da porcentagem de vazios em sistemas binários em função da porcentagem de partículas pequenas e grandes (Lade et al., 1998).**

Lade et al. (1998) utilizaram 820 g de areia e um cilindro graduado de 2000 mL na determinação das mínimas proporções 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.

Areia fina e silte têm tamanhos de partículas suficientemente pequenos para permitir que a força de atração de van der Waals concorra com a força gravitacional no controle dos mecanismos de empacotamento e arranjo das partículas. Esta força depende da distância entre as partículas, e torna-se importante para tamanhos de grãos próximo à peneira 0,074 mm.

Isso faz com que à medida que o tamanho da partícula diminua, apareça uma maior tendência à coesão entre as mesmas (Lade et al., 1998), caracterizando uma influência relativa da força de van der Waals em detrimento da força gravitacional.

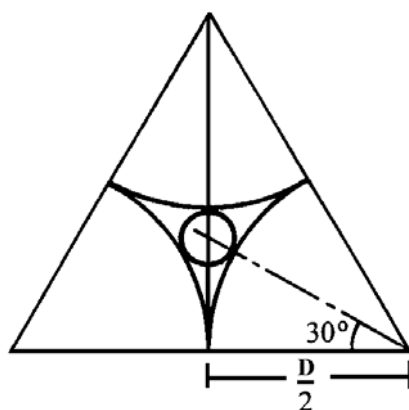
Lade et al. (1998) utilizando-se de dados obtidos de trabalhos com esferas de aço, realizados por McGeary (1961) em proporções de vazios mínimas de misturas binárias, obtiveram um gráfico relacionando a proporção de vazios e a relação entre o diâmetro maior e o diâmetro menor ( $D/d$ ) das esferas utilizadas (Figura 3). Este gráfico mostra que a mínima proporção de vazios decresce acentuadamente no início da curva. Próximo da relação  $D/d = 7$  as reduções adicionais na mínima proporção de vazios, devido a posteriores decréscimos no tamanho dos grãos menores, são muito menos pronunciadas. Portanto, a maior eficiência e maior redução em mínimas proporções de vazios são obtidas para empacotamentos de esferas com razão  $D/d$  próximo de 7. Maiores relações  $D/d$  irão produzir maiores proporções de vazios, mas com menor eficiência.



**Figura 3. Percentagens de vazios mínimas obtidas em misturas binárias de esferas de aço em função da relação  $D/d$  (modificado de Lade et al., 1998).**

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 ajustar-se por intermédio dos caminhos porosos formados entre os grãos maiores.

A seqüência de cálculos a seguir, utilizando 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 (Figura 4).



**Figura 4. Maior partícula que pode preencher o poro triangular entre três esferas de igual tamanho (modificado de Lade et al., 1998).**

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

## 2.7. Resistência à penetração

A degradação das propriedades físicas do solo é um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural e aumento da erosão hídrica. Algumas práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nas referidas propriedades, principalmente na sua estrutura, podendo tais alterações ser de caráter permanente ou temporário. Alterações de propriedades físicas do solo podem manifestar-se de várias maneiras, influenciando o desenvolvimento das plantas e, por conseqüência, a produtividade das culturas. Segundo Klute (1982), a degradação física do solo é função do tipo do solo, do clima, da cultura e de

seu manejo, restringindo o crescimento radicular. Assim, o solo submetido ao cultivo tende a perder a estrutura original, pelo fracionamento dos agregados em unidades menores, com conseqüente redução no volume de macroporos e aumento no volume de microporos e na densidade do solo (Tisdall & Oades, 1980; Carpenedo & Mielniczuk, 1990), acarretando elevação na resistência do solo à penetração.

Entre as características que influenciam a resistência à penetração estão a textura, a porosidade, a estrutura, o conteúdo de água, os agentes cimentantes e a compactação. 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. Valores críticos de resistência à penetração variam 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 (Taylor et al., 1966).

Viehmeyer & Hendrickson, citados por Gavande (1972), estabeleceram que em solos arenosos o crescimento radicular, em geral, cessa a uma densidade de  $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ . Sabe-se, da física básica, que o calor é transmitido com maior intensidade pelo meio sólido do que pelo meio líquido ou gasoso, nessa ordem, devido à maior proximidade do arranjo molecular existente no meio sólido. Altas densidades do solo aumentam a condutividade do calor ao longo do perfil, ao mesmo tempo em que reduz a porosidade do solo. A presença da areia fina, em solos arenosos, pode elevar a densidade a valores de até  $2 \text{ g cm}^{-3}$  em função do arranjo das partículas, dificultando o desenvolvimento radicular (Fontes, 1984). Acréscimos na densidade com a profundidade do perfil do solo podem ocorrer por pressões exercidas pelas camadas sobrejacentes em relação às subjacentes, como também pela translocação das partículas mais finas dos horizontes superiores para os inferiores, aumentando a quantidade de matéria sólida por unidade de volume, reduzindo o espaço poroso total e ocasionando impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular. (Grohmann, 1972; Kiehl, 1979).

A porosidade do solo depende do empacotamento, dentro e entre agregados, assim como a porosidade de muitos solos arenosos depende

inteiramente do empacotamento de partículas primárias. Alguns desses solos podem se compactar quando cultivados em estado úmido e tornarem-se bastante densos, inibindo o crescimento radicular. Por outro lado, em solos muito porosos o menor contato solo/raiz impossibilita o adequado suprimento de água e nutrientes pelas raízes, resultando em menor desenvolvimento e produtividade das plantas, apesar do crescimento radicular não ser afetado (Kopi & Douglas, 1991).

## **2.8. Curvas de retenção de água**

Define-se como potencial total a condição de energia que a água se encontra no solo, sendo definido pela soma de seus componentes gravitacional, de pressão, matricial e osmótico. O potencial matricial, de grande importância para a disponibilidade de água para as plantas (Reichardt, 1985), é medido experimentalmente em mesas de tensão e em aparelhos extratores de placa porosa sendo representado graficamente por uma curva conhecida como curva característica de água do solo. A água retida em baixos valores de tensão (entre 0 e 100 kPa) depende primariamente do efeito de capilaridade e da distribuição do espaço poroso sendo, por isso, fortemente influenciada pela estrutura do solo. A água é retida em maiores faixas de tensão devido à adsorção, sendo influenciada pela textura e superfície específica do material.

A areia grossa apresenta baixo poder de retenção de água, sendo muito permeável e desprovida de plasticidade, apresentando-se solta e pouco coesa quando seca, enquanto que a areia fina apresenta propriedades intermediárias entre a areia grossa e o silte. Por esse motivo, o comportamento físico dos solos arenosos varia de acordo com a granulometria da fração areia.

Medeiros (1977) constatou elevada retenção de água em solos arenosos em tensões de 0,06 atm, em função da predominância da areia fina com diâmetro inferior a 0,2 mm, atribuindo esse fato a um melhor arranjo das partículas.

Não existe uma teoria universal para a predição das relações entre a tensão e a retenção de água, com a textura e a estrutura. A complexidade dos efeitos de adsorção e geometria dos poros torna impraticável a adoção

de um modelo matemático simplificado. Várias equações empíricas existentes aparentemente descrevem a curva característica de retenção de água. Estas equações são aplicáveis a determinados solos apenas e, mesmo assim, dentro de faixas limitadas de tensão (Hillel, 1998). Os modelos existentes têm restrições de aplicabilidade ao conteúdo de água próximo à saturação e, devido à existência de um ponto de inflexão na curva de retenção de água, dividindo a mesma em duas regiões de comportamentos matemáticos distintos, torna-se mais complexa a adoção de um modelo único que descreva o comportamento da curva inteira.

## **2.9. Escalas granulométricas**

Na maioria das análises sedimentológicas os resultados são expressos sob a forma de uma escala de tamanho (que pode ser diâmetro, área ou volume), por conveniência, tanto no prosseguimento das análises como para tabulação dos dados analíticos encontrados. O sistema adotado nos Estados Unidos é a chamada escala logarítmica de Wentworth (1922). Wentworth estabeleceu os limites de suas classes em termos das propriedades físicas envolvidas no transporte dos grãos.

Muitos autores, em vez de darem os valores das granulometrias em medidas absolutas (por exemplo, mm), usam o símbolo  $\Phi$  (fi), introduzido por Krumbein (1934), que é o logaritmo negativo de base 2 da granulometria em milímetro.

$$\Phi = -\log_2 d; \quad d = \text{diâmetro do grão, em mm.}$$













Nesta escala, a granulação 1 mm possui um valor  $\Phi = 0$ , granulações mais finas têm valores  $\Phi$  positivos e granulações mais grosseiras têm valores  $\Phi$  negativos.

## **2.10. Morfologia de partículas**

A morfologia compreende o estudo da forma (esfericidade) e arredondamento das partículas. Estas propriedades têm sido usadas para tentar decifrar os ambientes de sedimentação, que são dependentes do

meio e do modo de transporte, sendo de grande importância em estudos de Sedimentologia. A forma ou as relações de comprimento dos eixos controlam parcialmente o comportamento dos seixos durante o transporte e a deposição. Já o arredondamento, ou angularidade, reflete a distância e o rigor de estágios passados do transporte (Wadell, 1935).

Um dos mais comuns sistemas de classificação geológica de forma é a escala de arredondamento de Powers (1953) para formas de partículas sedimentares (Figura 5). 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.

	Bem Arredondado	Arredondado	Sub-Arredondado	Sub-Angular	Angular	Muito Angular
Baixa Esfericidade						
Alta Esfericidade						

**Figura 5. Escala de arredondamento (esfericidade) e angularidade (Powers, 1953).**

Partículas de areia de maior diâmetro são usualmente mais arredondadas do que partículas de areia de menor diâmetro. Panayiotopoulos & Mullins (1985), encontram valores de arredondamento e esfericidade decrescentes para a fração areia situada entre 2000-710, 500-180, 220-105 e < 125  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Wadell (1935), trabalhando com peneiras 0,500, 0,250, 0,125 e 0,061  $\text{mm}$  também encontrou valores decrescentes para o arredondamento.

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. O uso de uma esfera para representar a forma-padrão de comparação reside no fato dela possuir a menor superfície para um dado volume. Além disso, a esfera

possui a maior velocidade de decantação que qualquer outra forma de sólido com volume e densidade iguais, sendo facilmente separada de outras formas de partículas com mesmo tamanho e densidade, porém de forma menos esférica, sob condições de transporte por suspensão.

Para muitos geólogos, a esfericidade 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). 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 isso, um coeficiente mais ou menos independente de sua forma.

A definição da forma da partícula em termos de esfericidade e arredondamento é amplamente aceita, sendo que suas análises são freqüentemente visuais. 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 2 mostra o grau de arredondamento proposto por Russel & Taylor (1937) e Pettijohn (1949) e o Quadro 3 mostra o grau de arredondamento introduzido por Powers (1953).

**Quadro 2. Classificação do arredondamento de acordo com Russel & Taylor (1937) e Pettijohn (1949)**

Classificação	Limites da classe	
	Russel & Taylor	Pettijohn
Angular	0,00 - 0,15	0,00 - 0,15
Sub-angular	0,15 - 0,30	0,15 - 0,25
Sub-arredondado	0,30 - 0,50	0,25 - 0,40
Arredondado	0,50 - 0,70	0,40 - 0,60
Bem arredondado	0,70 - 1,00	0,60 - 1,00

Vários pesquisadores têm procurado definir o significado geométrico do arredondamento e forma de partículas sedimentares relacionando-os aos ambientes deposicionais. Contudo, a forma e o arredondamento de grãos arenosos não têm sido utilizados como chave na obtenção direta dos

ambientes deposicionais. Entretanto, ajudam a caracterizar um determinado corpo arenoso (Suguio, 1980).

**Quadro 3. Classificação do arredondamento de acordo com Powers (1953)**

<b>Classificação</b>	<b>Limites da classe</b>	<b>Ponto médio</b>
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

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Obtenção e pré-tratamento dos materiais**

Foram coletadas amostras de solo ou sedimento em 14 localidades dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, considerando-se a presença diferenciada de partículas grossas, médias e finas, e de atributos morfométricos. Em função de sua origem, as amostras foram subdivididas em quatro grupos, assim denominados: Grupo A - solo; Grupo B - sedimento; Grupo C - veio de rocha e Grupo D - veio de cascalho (Quadro 4). As amostras foram secas ao ar e passadas em peneiras de malha de 2,0 mm. Esse material foi submetido à pré-tratamentos para a eliminação de silte e argila, matéria orgânica e óxidos de ferro pobremente cristalizados.

Foram adquiridas esferas de vidro para a simulação de empacotamentos realizados nesse estudo. Esse material não sofreu qualquer tipo de pré-tratamento.

##### **3.1.1. Dispersão das amostras**

Foram utilizadas garrafas plásticas de 600 mL, sendo colocados 100 g de amostra de solo/sedimento acrescidos de 100 mL de NaOH 0,5 mol/L e completados com 200 mL de água deionizada. Na seqüência, o conjunto foi colocado em dispersor mecânico da marca Marconi, modelo MA 160/24, durante 16 h, a 50 rpm. Ao final do processo, as amostras foram passadas

em peneira de 0,053 mm e lavadas em água corrente, para eliminar as frações silte e argila.

**Quadro 4. Descrição das amostras de solo/sedimento e localidade de coleta**

<b>Amostra</b>	<b>Descrição</b>	<b>Município</b>
A1	Material de solo arenoso (banco de solos do DPS/UFV)	João Pinheiro/MG
A2	Material de solo arenoso (banco de solos do DPS/UFV)	-
A3	Material de solo arenoso (horizonte A)	Brasilândia de Minas/MG
A4	Material de argissolo	Aracruz/ES
A5	Sedimento areno-quartzoso sob mata (Grupo Barreiras), material do horizonte A	Aracruz/ES
A6	Sedimento areno-quartzoso (Grupo Barreiras), material do horizonte A	Aracruz/ES
B1	Sedimento areno-quartzoso sob mata (Grupo Barreiras), material do horizonte B	Aracruz/ES
B2	Sedimento areno-quartzoso (Grupo Barreiras), material do horizonte B	Aracruz/ES
B3	Areia de sedimento de escoamento superficial sob solo derivado do arenito urucuia	Brasilândia de Minas/MG
B4	Arenito capacete	Três Marias/MG
B5	Areia lavada de draga (sedimento aluvial do rio Paracatu)	Brasilândia de Minas/MG
C	Quartzo de veio coletado em cascalheira	Sete Lagoas/MG
D1	Quartzo de veio	Viçosa/MG
D2	Quartzo de veio	Viçosa/MG

### **3.1.2. Remoção de matéria orgânica**

Foram colocados 100 g de amostra de solo/sedimento em becker de 500 mL, acrescentando NaClO a pH 9,5 até obter-se um volume de 50 mL acima da superfície livre da amostra (adaptado de Anderson, 1963). Em seguida, o conjunto foi colocado em banho-maria a 70 °C durante 6 h. Ao final do processo, as amostras foram passadas em peneira de 0,053 mm e lavadas em água corrente.

### **3.1.3. Remoção de óxidos de ferro**

Foram colocados 100 g de amostra de solo/sedimento em becker de 500 mL, acrescentando solução de citrato de sódio e ácido acético, com pH ajustado entre 4,6 e 4,8, até obter-se um volume de 50 mL acima da superfície livre da amostra. Em seguida, as amostras foram colocadas em banho-maria durante 15 min à temperatura de 75 °C. Decorrido esse período, foi adicionada a quantia aproximada de 20 g de ditionito de sódio, agitando-se a solução vigorosamente e deixando-se o conjunto em banho-maria por mais 1 h. Ao final do processo, as amostras foram passadas em peneira de 0,053 mm e lavadas em água corrente. Essa operação foi repetida por três vezes (adaptado de Mehra & Jackson, 1960).

### **3.1.4. Peneiramento**

Amostras de solo/sedimento foram colocadas de 100 em 100 g em peneira de 0,053 mm sendo, em seguida, colocadas em agitador tipo Rotap, de velocidade controlada e movimentos rotatórios com vibração, pelo período de 15 min. Foi utilizado este procedimento para a separação de partículas existentes abaixo do limite inferior da fração areia, observadas quando da aplicação dos pré-tratamentos anteriores, pela presença de partículas sobrenadantes.

## **3.2. Análises físicas**

A partir deste momento denominou-se a fração areia do solo/sedimento em areia reconstituída, tendo em vista os pré-tratamentos efetuados para a obtenção de sua unidade básica.

### **3.2.1. Densidade aparente**

Determinada utilizando-se o método da proveta (Brasil, 1949).

### **3.2.2. Densidade de partículas**

Utilizou-se o método do balão volumétrico tendo álcool etílico como líquido penetrante (Brasil, 1949) para as areias reconstituídas e esferas de vidro.

### **3.2.3. Porosidade total**

Foi calculada pela expressão  $P = 1 - \frac{D_s}{D_p}$

onde  $P$  = Porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ );

$D_s$  = Densidade da areia reconstituída ( $kg m^{-3}$ );

$D_p$  = Densidade da partícula ( $kg m^{-3}$ ).

### **3.2.4. Microporosidade e macroporosidade**

A microporosidade foi determinada em amostras de areias reconstituídas, utilizando-se unidade de sucção a 60 cm de altura de coluna d'água, em mesa de tensão. A porcentagem de água retida nas amostras, após atingir o equilíbrio, corresponde à microporosidade (poros  $< 50 \mu m$ ), sendo a macroporosidade (poros  $\geq 50 \mu m$ ) obtida por diferença (Grohmann, 1960).

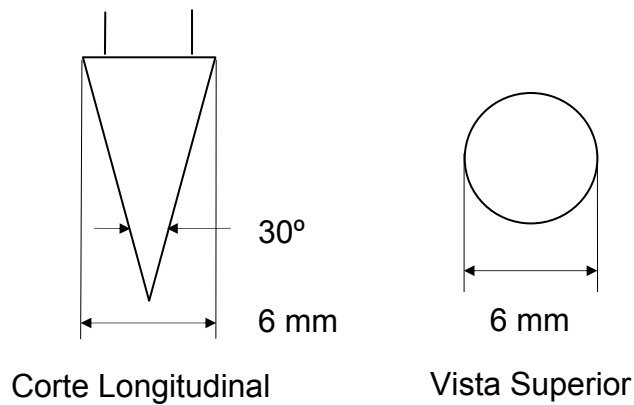
### **3.2.5. Curvas de retenção de água**

Inicialmente foi estabelecido um protocolo para as amostras de areia reconstituídas que foram submetidas à mesa de tensão utilizando-se, para tanto, de seis amostras-teste, com três repetições, na tensão de 10 kPa. As pesagens das amostras ocorreram nos seguintes períodos de aplicação da tensão: 1, 2, 3, 4, 5, 12, 18, 24, 30, 38, 46, 58, 70 e 82 h. Verificou-se que nas primeiras 18 h, todas as amostras perderam pelo menos 98% de umidade. Essas amostras foram colocadas em anéis de PVC com 75 mm de diâmetro e 30 mm de altura, no qual foram colocados papel de filtro quantitativo - filtração rápida, e tela de nylon, sendo fixadas com elástico e esparadrapo e, posteriormente, saturadas por capilaridade. A retenção de água das amostras de areia reconstituídas foi calculada em base volumétrica, em três repetições, nas tensões de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 kPa, utilizando-se a mesa de tensão, pelo período de 24 h e, para tensões maiores, utilizou-se o aparelho extrator de placa porosa nas pressões de 10, 30, 50, 100, 500 e 1500 kPa pelo período de 48 h.

As curvas de retenção de água foram ajustadas com a forma logarítmica ( $pF$ ) do módulo da carga ou altura hidráulica, expressa em cm.

### **3.2.6. Resistência à penetração**

As amostras de areia reconstituídas foram submetidas a ensaios de resistência à penetração, em três repetições, com penetrômetro de cone da marca Marconi, acoplado à célula de carga, após saturação por capilaridade e posterior aplicação de tensão de 10 kPa em mesa de tensão pelo período de 24h. Essas amostras foram colocadas em anéis de PVC com 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura, tendo o fundo fechado com papel de filtro tipo 30, fixado com elástico, e assentados em suporte de borracha. O cone utilizado foi confeccionado em aço, possuindo ângulo de cone de 30° e diâmetro da base com 6 mm (Figura 6), conforme recomendações da ASAE Standard: ASAE S313.1 - Soil Cone Penetrometer (1979). O aparelho teve sua velocidade ajustada para 0,015 m/s, valor este obtido a partir de testes preliminares de calibração.



**Figura 6. Corte longitudinal e vista superior do cone utilizado.**

### 3.2.7. Distribuição do tamanho de partículas

As amostras de areia reconstituídas e esferas de vidro foram separadas em classes de diâmetro (Apêndice). A separação foi feita em agitador tipo Rotap, de velocidade controlada e movimentos rotatórios. O conjunto de peneiras foi agitado mecanicamente pelo período de 180 s, depois agitou-se manualmente por mais 90 s, seguida de mais uma agitação mecânica de 180 s, conforme recomendado por Suguio (1973).

### 3.2.8. Curvas de freqüência simples

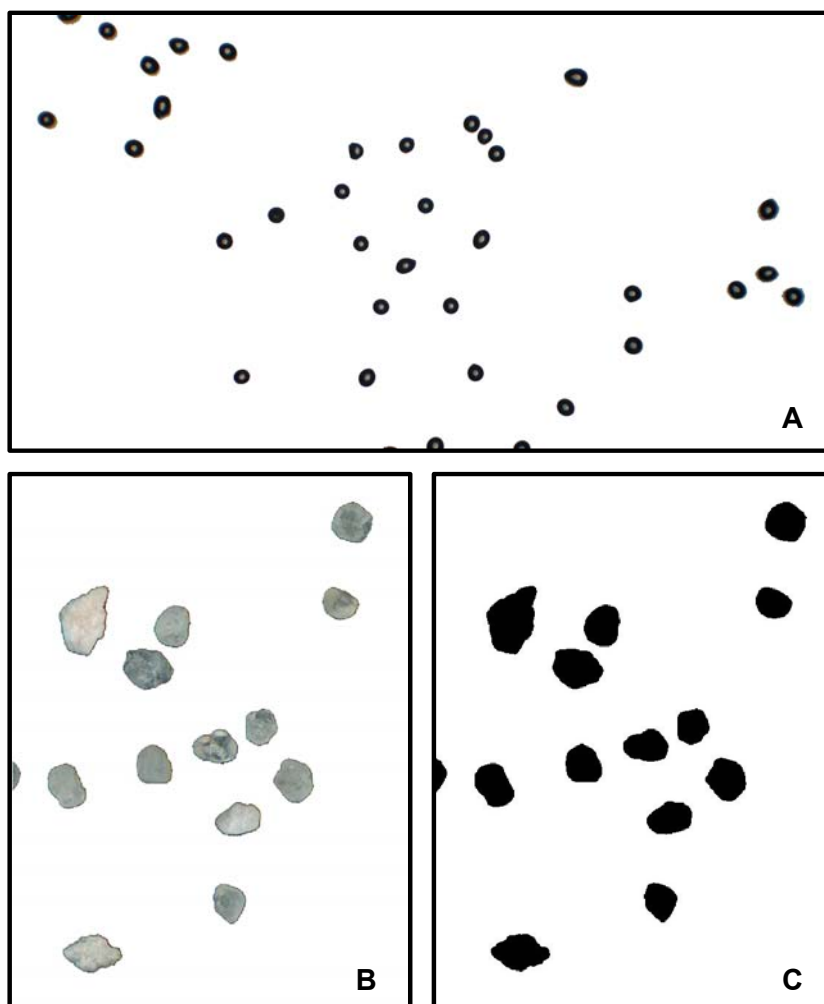
As amostras foram representadas por meio de curvas de freqüência simples para uma melhor visualização da distribuição textural. Foi utilizado um sistema de coordenadas cartesianas onde, no eixo vertical estão representadas as distribuições percentuais de cada classe e, no eixo horizontal, a escala  $\Phi$ , definido como

$$\Phi = -\log_2 d \quad d = \text{diâmetro médio da classe (mm)}$$

### 3.3. Caracterização morfométrica das partículas

As frações menores que 0,250 mm foram colocadas em placa de Petri e fotografadas em câmera digital Nikon Coolpix 4500 com CCD de 4.0 Megapixel (2272 x 1074 dpi) acoplada a um Microscópio Olympus CH30

com objetiva 4x (Figura 7A), e as frações maiores que 0,250 mm foram colocadas sobre transparência e digitalizadas na resolução de 1200 dpi utilizando-se scanner HP Scanjet 8200 (Figura 7B). Para evitar a influência da luminosidade do ambiente, confeccionou-se uma caixa em papel cartão fosco, aberta em um dos lados, de modo que a mesma cobrisse a região imageada no scanner. Para o processamento das imagens utilizou-se o programa Adobe® Photoshop® CS. Nas imagens obtidas utilizando-se câmera digital aplicou-se o comando “Limiar” para converter os valores de pixel das imagens em valores de preto ou branco (imagens binárias) e, nas imagens capturadas pelo scanner, utilizou-se o filtro “Mediana” para a redução de pixels isolados e, na seqüência, aplicação do filtro “Limiar” (Figura 7C).



**Figura 7. Imagem parcial de uma amostra de esfera de vidro, obtida em câmara digital (A); Imagem parcial de uma amostra de areia reconstituída, obtida em scanner (B); Imagem parcial processada de uma amostra de areia reconstituída (C).**

Foi feita a remoção, após processamento, das partículas que apresentavam contatos com outras partículas e que haviam sofrido corte por estarem situadas nas bordas da imagem. Esse procedimento revelou-se mais prático do que a separação manual das partículas, devido ao elevado número de imagens utilizadas (cerca de 2.000) e da quantidade de partículas analisadas (145.000, aproximadamente).

Com as imagens processadas, utilizou-se o programa QUANTIPORO (Fernandes Filho & Viana, 2001) para a geração dos atributos morfométricos utilizados no trabalho (área, perímetro, arredondamento, maior eixo e menor eixo). Com o auxílio do processador de planilhas Microsoft® Office Excel 2003 complementou-se, com os atributos alongamento, diâmetro de Feret e compacidade, as tabelas geradas com o uso do QUANTIPORO. Esses atributos foram definidos por Wilcox et al., 1997.

As imagens obtidas por microscópio foram calibradas com barras de calibração, e as imagens obtidas pelo scanner já continham informações de calibração.

Os atributos morfométricos são assim definidos:

- 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 é 1, o objeto é um círculo perfeito. É calculado pela expressão:

$$Ar = \frac{4\pi A}{P^2}$$

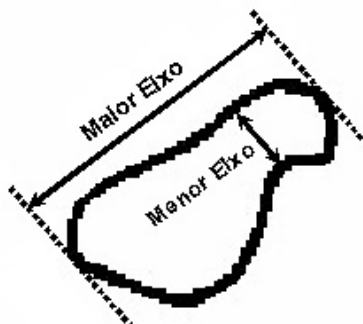
onde Ar = arredondamento (adimensional);

A = área do objeto (em pixels);

P = perímetro do objeto (em pixels).

- Maior Eixo: é o comprimento da maior linha, em pixels, que pode ser traçada através do objeto (Figura 8).

- Menor Eixo: é o comprimento da menor linha, em pixels, que pode ser traçada através da perpendicular ao maior eixo do objeto (Figura 8).



**Figura 8. Esquema representativo do maior e menor eixo.**

- 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 afasta-se de 1 o objeto torna-se mais alongado. É calculado pela expressão:

$$Al = \frac{Me}{Ma}$$

onde Al = Alongamento (adimensional);

Me = menor eixo (em pixels);

Ma = maior eixo (em pixels).

- Diâmetro de Feret: é o diâmetro de um círculo que tem a mesma área do objeto. É calculado pela expressão:

$$DF = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

onde DF = diâmetro de Feret (em pixel);

A = área (em pixels);

- Compacidade: fornece a medida da circularidade do objeto. Seu valor situa-se entre 0 e 1. 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. É obtida pela expressão:

$$Co = \frac{\sqrt{\frac{4A}{\pi}}}{Ma}$$

onde Co = compacidade (adimensional);

A = área (em pixels);

Ma = maior eixo (em pixels).

Os atributos arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compacidade foram determinados por média ponderada, com base na estimativa do número de partículas existentes em cada classe, sendo o diâmetro de Feret apresentado em milímetros para corrigir diferenças decorrentes da resolução das imagens adquiridas.

### **3.4. Empacotamento das esferas de vidro**

Para o ajuste de sistemas binários utilizaram-se provetas de vidro de 1000 mL e 400 g de esferas de vidro de cada classe para a determinação do empacotamento. As classes, com seus respectivos pontos médios e suas relações entre o diâmetro maior (D) e o diâmetro menor (d), encontram-se dispostas no Quadro 5. Foram utilizadas somente as classes de esferas de vidro que apresentaram 80% ou mais de arredondamento.

As misturas 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 produzida 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.

**Quadro 5. Classes de esferas utilizadas em empacotamentos de sistemas binários**

<b>Classes utilizadas (mm)</b>	<b>Ponto médio D (mm)</b>	<b>Ponto médio d (mm)</b>	<b>D/d</b>
1,000 - 0,840 0,350 - 0,297	0,920	0,324	2,844
0,500 - 0,420 0,149 - 0,125	0,460	0,137	3,358
2,000 - 1,680 0,500 - 0,420	1,840	0,460	4,000
2,000 - 1,680 0,250 - 0,210	1,840	0,230	8,000
2,000 - 1,680 0,177 - 0,149	1,840	0,163	11,288
2,000 - 1,680 0,149 - 0,125	1,840	0,137	13,431

O procedimento consistiu na deposição inicial da partícula de maior diâmetro em quantias aproximadas de 50 mL, colocadas na proveta com auxílio de um funil, para 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 controladas 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 fossem depositadas na proveta.

Na seqüência, as partículas de menor diâmetro foram introduzidas na proveta conforme descrito anteriormente. Utilizando-se do martelo de borracha e vibrações de frequência e amplitude controladas 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. Dessa forma, garantiu-se a mais densa configuração possível do empacotamento binário (Lade et al., 1998).

Para a produção de empacotamentos ternários, o procedimento é o mesmo utilizado nos sistemas binários, bastando para tal a adição de outra partícula, que obrigatoriamente tenha menor diâmetro.

### 3.5. Empacotamento das areias reconstituídas

Para o ajuste de sistemas binários utilizaram-se provetas plásticas de 100 mL e 30 g de areias reconstituídas de cada classe para a determinação do empacotamento. As classes utilizadas, com seus respectivos pontos médios e suas relações entre o diâmetro maior (D) e o diâmetro menor (d), encontram-se dispostas no Quadro 6. O procedimento de ajuste de partículas foi o mesmo do item anterior, diferenciando-se apenas no volume depositado no funil para simulação do empacotamento, que nesse caso foi de 5 mL.

**Quadro 6. Classes e amostras de areias reconstituídas utilizadas em empacotamentos de sistemas binários**

Amostra	Classes utilizadas (mm)	Ponto médio D (mm)	Ponto médio d (mm)	D/d
1	0,350 - 0,297 0,074 - 0,062	0,324	0,068	4,765
2	0,710 - 0,590 0,149 - 0,125	0,650	0,137	4,745
4	0,710 - 0,590 0,149 - 0,125	0,650	0,137	4,745
5	0,350 - 0,297 0,074 - 0,062	0,327	0,068	4,809
11	0,710 - 0,590 0,149 - 0,125	0,650	0,137	4,745
13	0,710 - 0,590 0,149 - 0,125	0,650	0,137	4,745

### 3.6. Análises estatísticas

Foram utilizados os programas SAEG (Sistema para Análises Estatísticas) e Statistica 6.0 da StatSoft, Inc. Na comparação entre médias, utilizou-se o teste de Tukey (5% de probabilidade). Para as curvas de regressão os coeficientes foram significativos a 5% pelo teste F.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Morfometria das partículas

Para facilitar a compreensão dos índices arredondamento, alongamento e compacidade, foi elaborado quadro explicativo para melhor percepção entre a definição e a sua correspondência com figuras geométricas (quadrado, círculo, retângulo e elipse) e partículas de forma aproximada (Quadro 7).

O índice arredondamento apresenta maiores valores para as figuras geométricas regulares do que para a sua partícula correspondente. Isso se deve ao fato da existência de maior rugosidade na superfície externa da partícula (perímetro) em relação à sua figura geométrica similar.









Os maiores valores encontrados para o índice alongamento foram para as figuras geométricas 1 e 3, enquanto que os menores valores foram para as figuras geométricas 5 e 6. Percebe-se, nesse índice, a dependência da relação entre o menor eixo e o maior eixo da figura.

O índice compacidade é uma medida que reflete a circularidade do objeto. Como pode observar-se, os maiores valores desse índice estão nas figuras geométricas 1, 2, 3 e 4, enquanto que os menores são os das figuras geométricas 5, 6, 7 e 8.

Como já descrito anteriormente, foram calculadas as medidas de área, perímetro, comprimento do maior e menor eixo e os índices arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compacidade. O

Quadro 8 mostra os valores desses índices para as amostras analisadas de areia reconstituídas.

**Quadro 7. Representação de figuras geométricas regulares e de partículas de forma aproximada, com seus respectivos valores de arredondamento (Ar), alongamento (Al) e compacidade (Co)**

Figura	Forma Geométrica	Ar	Al	Co
1		0,79	1,00	1,00
2		0,78	0,90	0,93
3		1,00	1,00	1,00
4		0,88	0,87	0,92
5		0,60	0,43	0,73
6		0,59	0,43	0,62
7		0,80	0,54	0,73
8		0,35	0,55	0,50

Para agrupar as areias reconstituídas com características similares, foi usada a classificação do arredondamento de Powers (1953), onde observa-se a presença de dois grupos distintos quanto ao grau de arredondamento. As amostras A4, A5, D2 e C foram classificadas como arredondadas e as demais como bem arredondadas (Quadro 9). Essa classificação também está de acordo com Russel & Taylor (1937) e Pettijohn (1949).

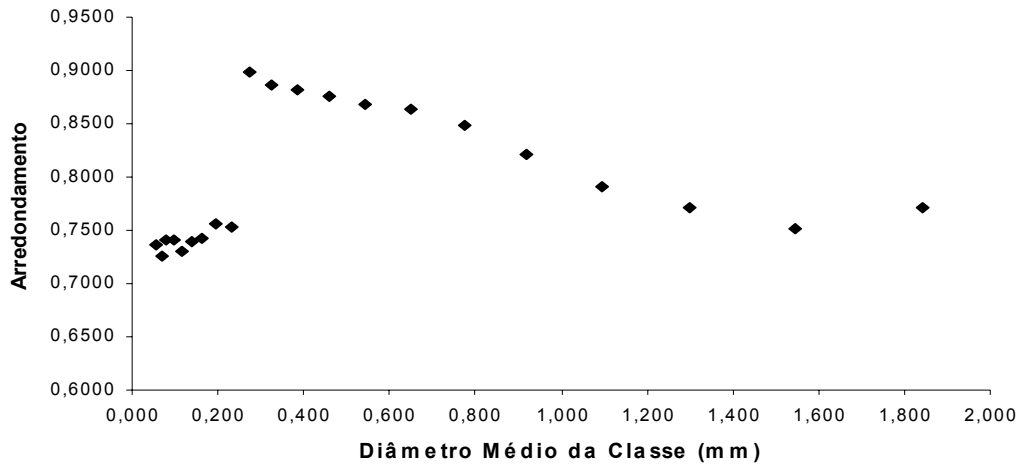
**Quadro 8. Índices de arredondamento (Ar), alongamento (AI), diâmetro de Feret (DF) e compacidade (Co) para as amostras de areia reconstituídas**

<b>Amostra</b>	<b>Ar</b>	<b>AI</b>	<b>DF (mm)</b>	<b>Co</b>
A1	0,7526	0,8302	0,2200	0,8433
A2	0,7510	0,8411	0,3899	0,8497
A3	0,7377	0,8329	0,2393	0,8416
A4	0,6892	0,8109	0,6190	0,8142
A5	0,6876	0,8065	0,5820	0,8056
A6	0,7300	0,8194	0,5539	0,8296
B1	0,7212	0,8253	0,6734	0,8244
B2	0,7283	0,8157	0,5007	0,8294
B3	0,7632	0,8388	0,3459	0,8523
B4	0,7620	0,8399	0,5112	0,8428
B5	0,7582	0,8464	0,4687	0,8522
C	0,6578	0,7898	1,3011	0,7927
D1	0,7295	0,8305	0,7560	0,8195
D2	0,6899	0,8107	1,8518	0,8125

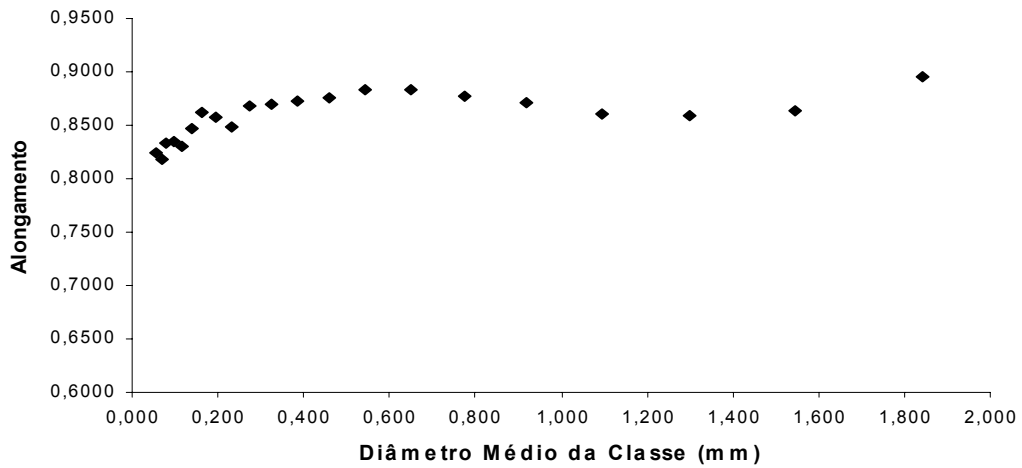
**Quadro 9. Amostras de areias reconstituídas segundo o sistema de classificação**

<b>Amostras</b>	<b>Sistema de classificação</b>	<b>Classificação</b>
A4, A5, D2 e C	Russel & Taylor (1937) e Pettijohn (1949)	Arredondado
A1, A2, A3, A6, B1, B2, B3, B4, B5 e D1	Powers (1953)	Bem arredondado

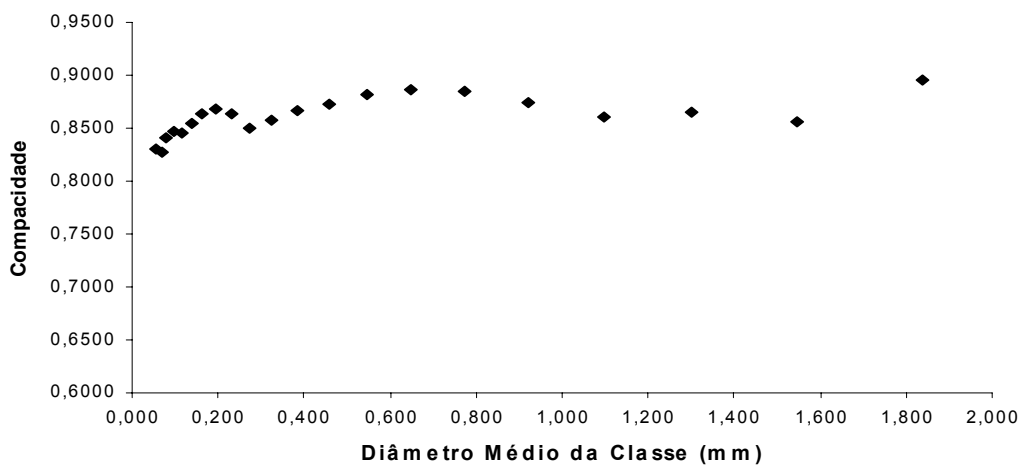
As Figuras 9, 10 e 11 mostram a variação dos índices arredondamento, alongamento e compacidade ao longo das 21 classes obtidas por peneiramento para a amostra A3. O mesmo padrão de comportamento foi observado para todas as outras amostras. As peneiras estão representadas, no eixo horizontal, pelo ponto médio da classe.



**Figura 9. Variação do índice arredondamento em função do tamanho da partícula para a amostra A3.**



**Figura 10. Variação do índice alongamento em função do tamanho da partícula para a amostra A3.**



**Figura 11. Variação do índice compacidade em função do tamanho da partícula para a amostra A3.**

Observou-se que, para o alongamento e a compacidade, houve um comportamento não proporcional em relação às classes. Não se encontrou na literatura disponível qualquer referência quanto ao comportamento desses índices em função da granulometria. Contudo, para o índice arredondamento, diferentemente do esperado, houve um acréscimo no seu valor até a peneira 0,250 mm. A partir desse ponto, a tendência foi invertida, apresentando uma brusca descontinuidade (“degrau”). Esse fato pode ser explicado pela diferença de resolução nas imagens obtidas em areias reconstituídas com diâmetro acima de 0,250 mm (1200 dpi obtidas por scanner) e abaixo desse valor (19558 dpi obtidas em máquina digital acoplada a microscópio com objetiva 4x, após calibração). Dos índices obtidos para a caracterização morfométrica, o arredondamento apresenta uma forte influência do perímetro na sua expressão matemática, em função de ser uma potência de segunda ordem. As imagens de alta resolução produzem um maior detalhamento da borda da partícula, aumentando significativamente o valor do perímetro em relação às imagens de menor resolução. Verificou-se, também, a existência de pequena descontinuidade (“degrau”) nos índices alongamento e compacidade, mostrando que nestes casos, o uso de diferentes resoluções não afetou expressivamente a análise.

O Quadro 10 apresenta os índices arredondamento, alongamento e compacidade para as 22 classes de esferas de vidro obtidas após peneiramento. Os elevados índices de arredondamento evidenciam a baixa rugosidade das esferas de vidro e a sua aproximação com relação à forma circular. O índice alongamento evidencia a semelhança entre o eixo maior e o eixo menor, enquanto que o índice compacidade reflete a circularidade das esferas.

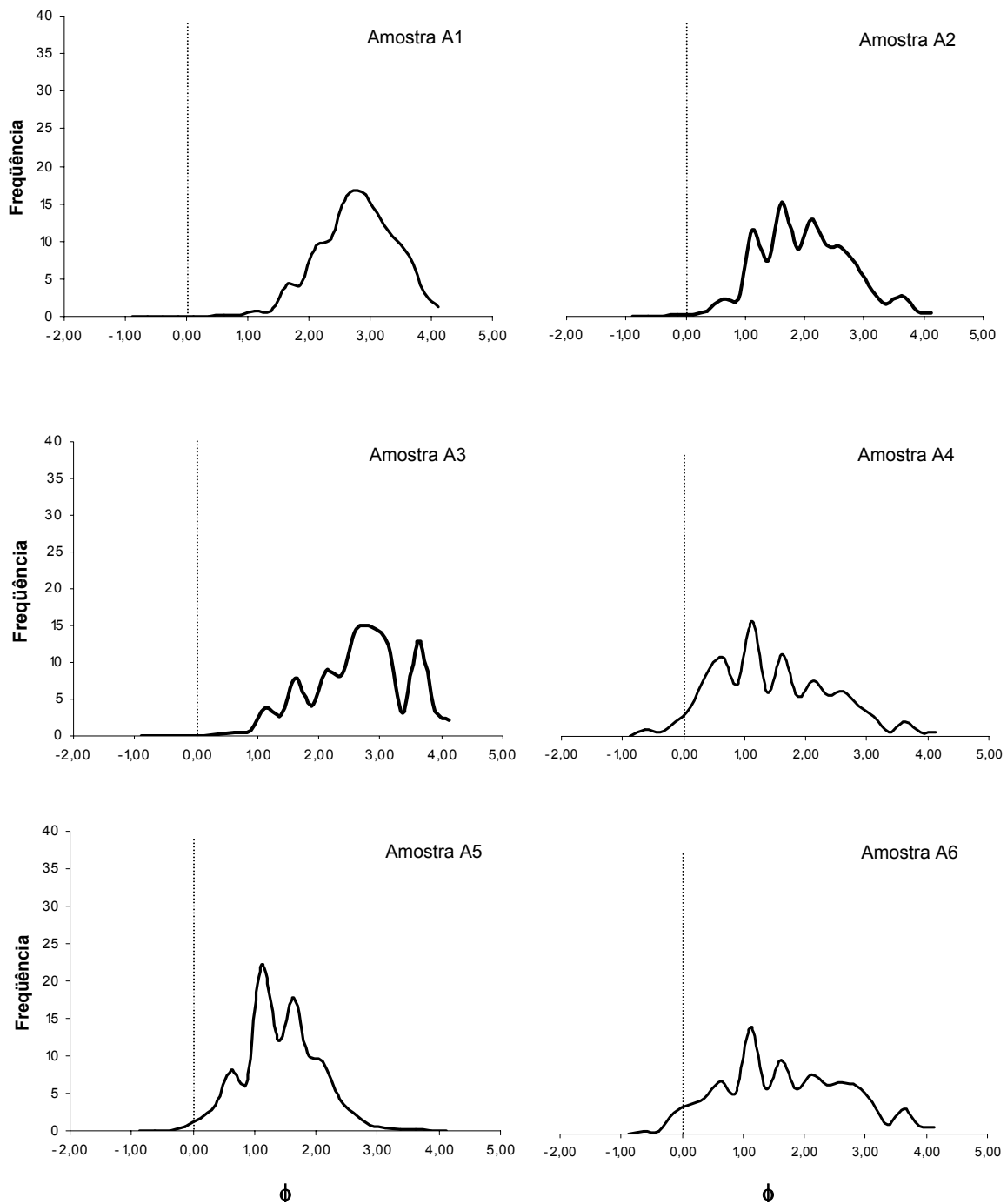
Das 14 amostras de areias reconstituídas, apenas três (B1, B4, D1) apresentaram elevados percentuais de partículas acima da peneira 0,250 mm (36,95%, 30,54% e 84,54%, respectivamente). Esses valores foram calculados com base na estimativa de partículas existentes em cada classe. As demais apresentaram percentuais inferiores a 15%.

**Quadro 10. Índices de arredondamento (Ar), alongamento (Al), diâmetro de Feret (DF) e compacidade (Co) para as 22 classes de esferas de vidro**

<b>Classe (mm)</b>	<b>Ponto Médio (mm)</b>	<b>Ar</b>	<b>Al</b>	<b>DF (mm)</b>	<b>Co</b>
4,000 - 1,680	2,840	0,8399	0,9596	2,5296	0,9650
2,000 - 1,680	1,840	0,8252	0,9622	2,1483	0,9619
1,680 - 1,410	1,545	0,8564	0,9568	1,7469	0,9591
1,410 - 1,190	1,300	0,8397	0,9570	1,5900	0,9555
1,190 - 1,000	1,095	0,8317	0,9656	1,3802	0,9561
1,000 - 0,840	0,920	0,8614	0,9712	1,0633	0,9539
0,840 - 0,710	0,775	0,8771	0,9667	0,9596	0,9516
0,710 - 0,590	0,650	0,8879	0,8907	0,7541	0,9019
0,590 - 0,500	0,545	0,8833	0,8804	0,6891	0,8913
0,500 - 0,420	0,460	0,8890	0,8793	0,5712	0,8823
0,420 - 0,350	0,385	0,9173	0,8941	0,4622	0,8889
0,350 - 0,297	0,324	0,9097	0,8741	0,4061	0,8646
0,297 - 0,250	0,274	0,9283	0,8870	0,3405	0,8650
0,250 - 0,210	0,230	0,8099	0,8712	0,2677	0,9010
0,210 - 0,177	0,194	0,8211	0,8852	0,2275	0,9128
0,177 - 0,149	0,163	0,8256	0,9098	0,1814	0,9243
0,149 - 0,125	0,137	0,8371	0,9039	0,1457	0,9234
0,125 - 0,105	0,115	0,8319	0,8936	0,1161	0,9106
0,105 - 0,088	0,097	0,8181	0,8489	0,1043	0,8820
0,088 - 0,074	0,081	0,8185	0,8629	0,0914	0,8862
0,074 - 0,062	0,068	0,7881	0,8236	0,0818	0,8483
0,062 - 0,053	0,058	0,7909	0,8274	0,0695	0,8484

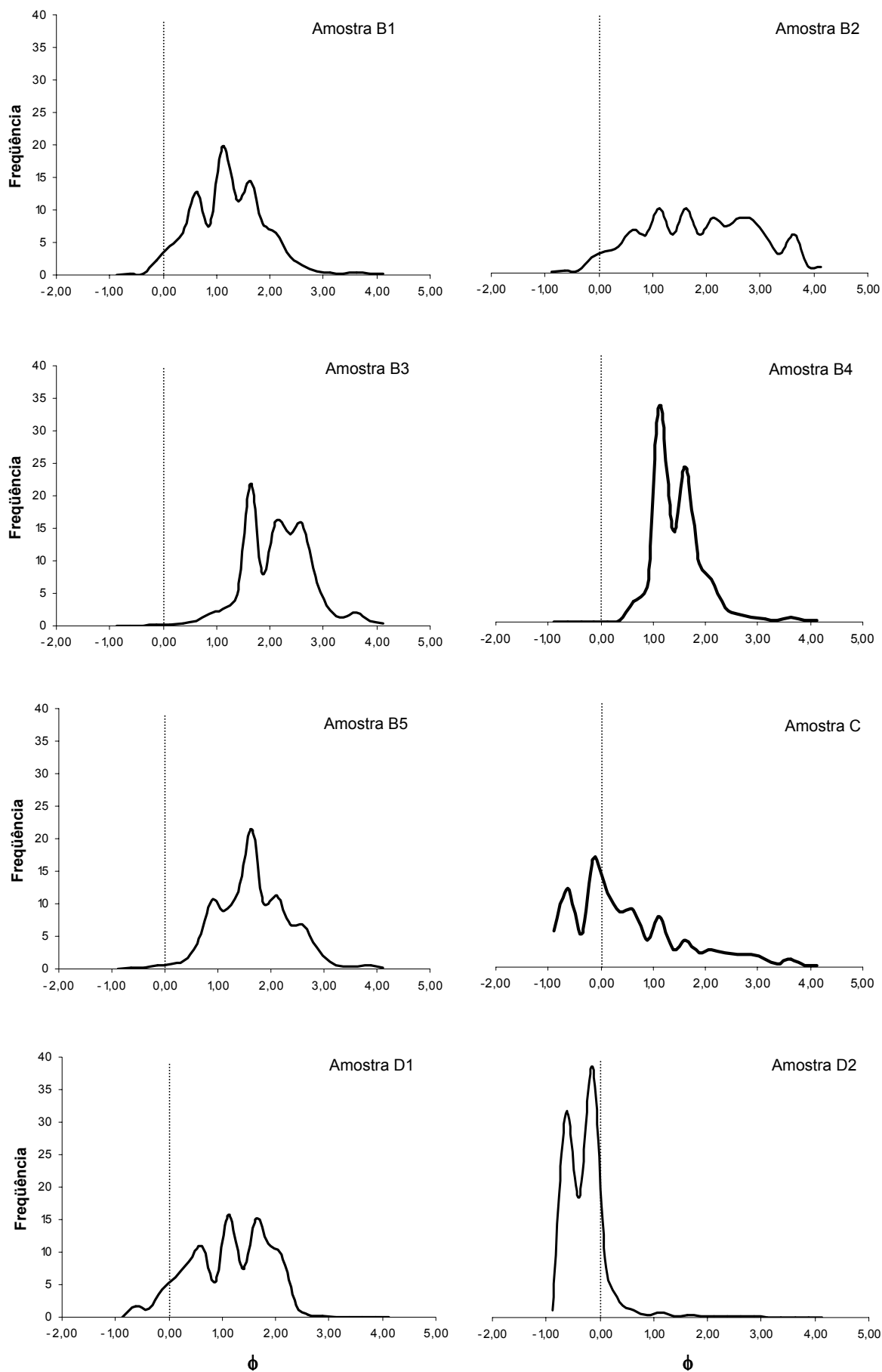
#### **4.2. Distribuição do tamanho de partículas**

Para facilitar a discussão acerca da distribuição granulométrica das amostras de areias reconstituídas, foram elaborados gráficos de distribuição de frequência do material retido em cada peneira em função da escala  $\Phi$ , (Figuras 12 e 13), onde  $\Phi = -\log_2 d$  e  $d$  = diâmetro médio da classe.



**Figura 12. Gráficos de distribuição de frequências das amostras A1 a A6 de areias reconstituídas.**

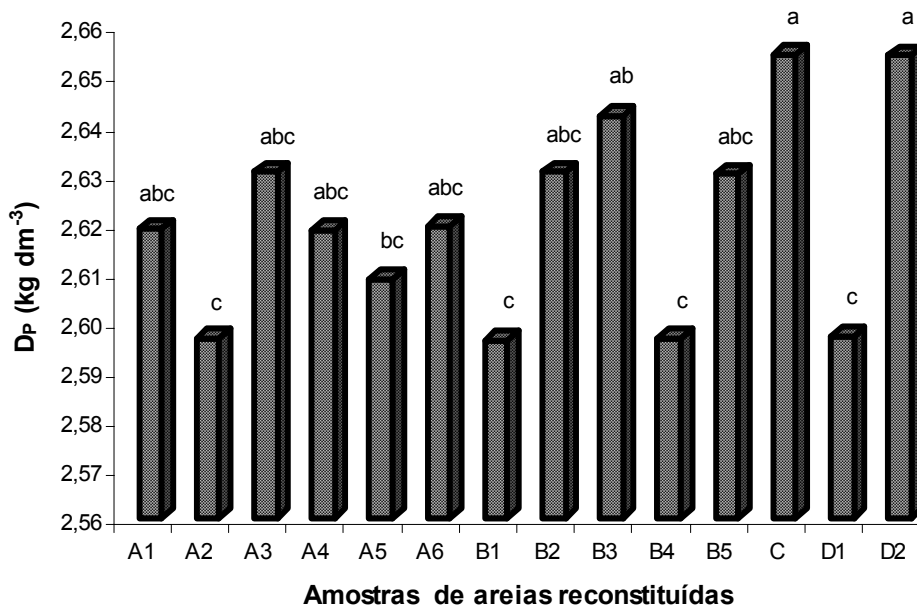
O valor  $\Phi = 0$  representa a granulção correspondente a 1 mm. Acima desse valor estão representadas as granulções mais finas e, abaixo, as mais grosseiras. As distribuições granulométricas das amostras de areia reconstituídas estão apresentadas no Apêndice. Observando a Figura 13, verifica-se que a amostra D2 apresenta a maior parte da sua distribuição granulométrica à esquerda de  $\Phi = 0$  (material grosseiro), enquanto que a amostra A5 apresenta a maior parte à direita de  $\Phi = 0$  (material mais fino).



**Figura 13. Gráficos de distribuição de freqüências das amostras B1 a B5, C, D1 e D2 de areias reconstituídas.**

### 4.3. Densidade de partículas das areias reconstituídas

Os resultados da média de três repetições da densidade de partículas das amostras de areia reconstituídas estão apresentados na Figura 14. As amostras C e D2, apresentaram a maior densidade de partícula, sugerindo a ausência de vacúolos, o que explicaria os valores encontrados.



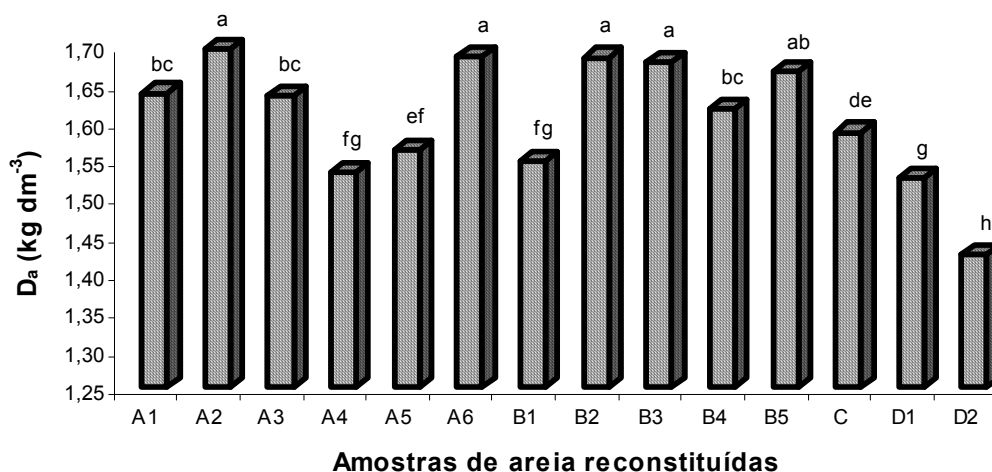
**Figura 14. Densidade de partículas das amostras de areias reconstituídas.**

Apesar da constatação da existência de três grupos de densidade de partícula, as mesmas tiveram pequena variação, situando-se entre 2,60 e 2,65 kg dm<sup>-3</sup>. Esses valores estão de acordo com as observações de Kohnke (1968) que cita variações de 2,5 a 2,8 kg dm<sup>-3</sup> para a densidade do quartzo. A possibilidade da existência de inclusões no quartzo pode explicar essa variabilidade (Suguio, 1980).

### 4.4. Densidade das areias reconstituídas

Os dados médios de densidade das amostras de areias reconstituídas estão dispostos em gráfico de barras na Figura 15. Pode-se explicar os resultados sob diferentes pontos de vista. Sob a ótica morfométrica, houve uma grande variação na densidade das amostras de areias reconstituídas, fato esse esperado devido à diferença existente entre

classes de arredondamento e possíveis valores alterados pelo método de aquisição das imagens. As amostras A4, A5, D2 e C são as que possuem menor arredondamento, o que explicaria maiores diferenças na densidade calculada pelo método da proveta. Com relação às amostras B1 e D1, existe a possibilidade do arredondamento estar classificado de forma incorreta, já que as mesmas possuíram elevado percentual de partículas nas classes superiores a 0,250 mm.



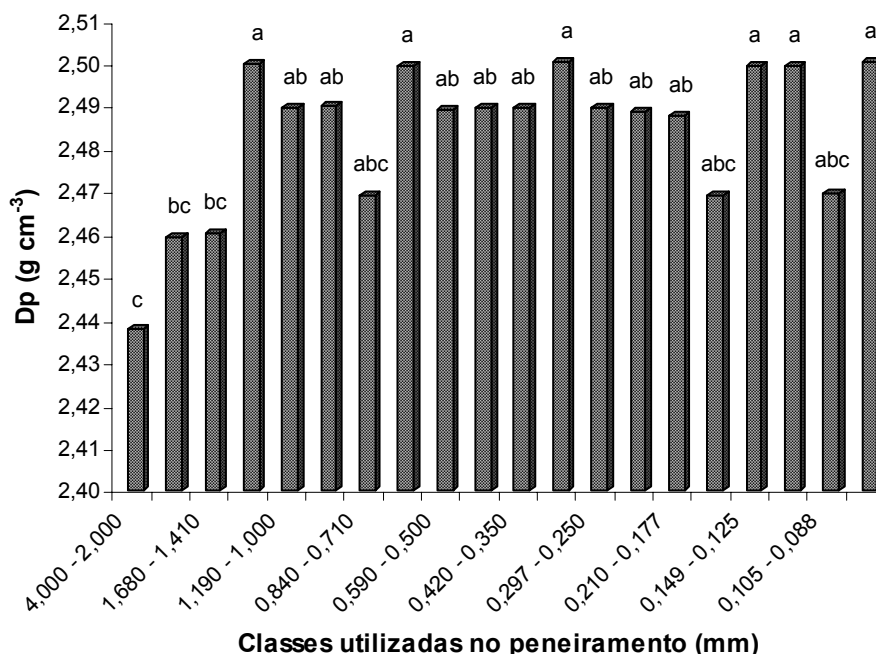
**Figura 15. Densidade das amostras de areias reconstituídas.**

Quanto ao aspecto da distribuição granulométrica (Figuras 12 e 13), os menores valores da densidade das amostras C e D2 refletem a presença de maiores concentrações de material grosseiro, sendo que a densidade da amostra C é mais elevada devido à maior presença de material fino na amostra, permitindo um melhor empacotamento das partículas. As amostras A2, A6, B2, B3 e B5 apresentaram as maiores densidades em função de uma distribuição mais equilibrada entre as classes de diâmetro, propiciando um melhor ajuste das partículas.

#### 4.5. Densidade da partícula das esferas de vidro

Os resultados médios da densidade da partícula das esferas de vidro estão apresentados na Figura 16. Como pode-se constatar, os valores são ligeiramente inferiores aos das amostras de areias reconstituídas. Além disso, as partículas das três primeiras classes (maiores diâmetros) apresentam valores ligeiramente menores que as demais. Isso

possivelmente reflita o processo de fabricação das mesmas, onde há grande possibilidade da entrada de pequenas bolhas de ar no seu interior. Pela impossibilidade de reprodução da densidade das partículas em três análises sucessivas, foram omitidas as classes 0,074-0,062 e 0,062-0,053.



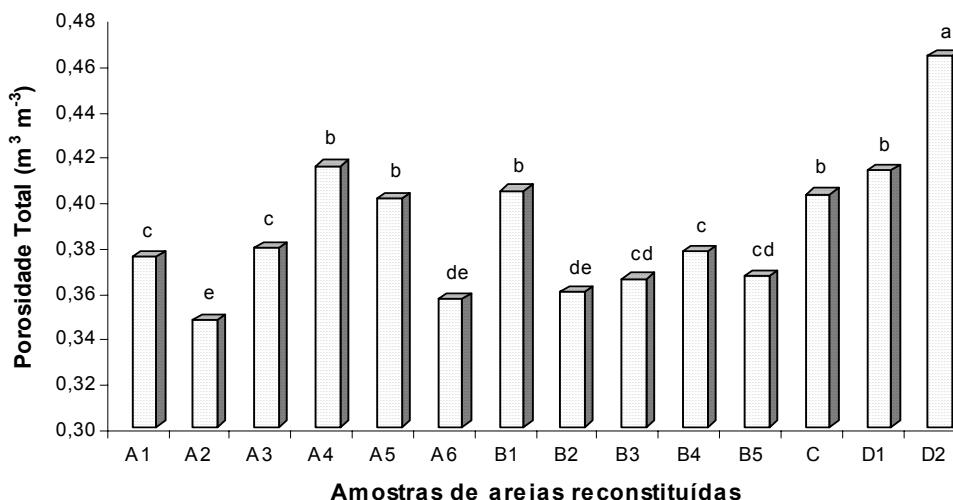
**Figura 16. Densidade da partícula das esferas de vidro.**

#### 4.6. Porosidade total das areias reconstituídas

A Figura 17 mostra a porosidade total para as amostras de areias reconstituídas. A maior porosidade calculada é a da amostra D2, refletindo a maior presença de material grosseiro e a pouca disponibilidade de material fino, determinando uma maior quantidade de poros de tamanho grande, como pode ser observado na Figura 13. As menores porosidades encontram-se nas amostras A2, A6 e B2, mostrando a sua dependência em relação a uma melhor distribuição das partículas, que facilitam o empacotamento dos grãos (Figuras 12 e 13).

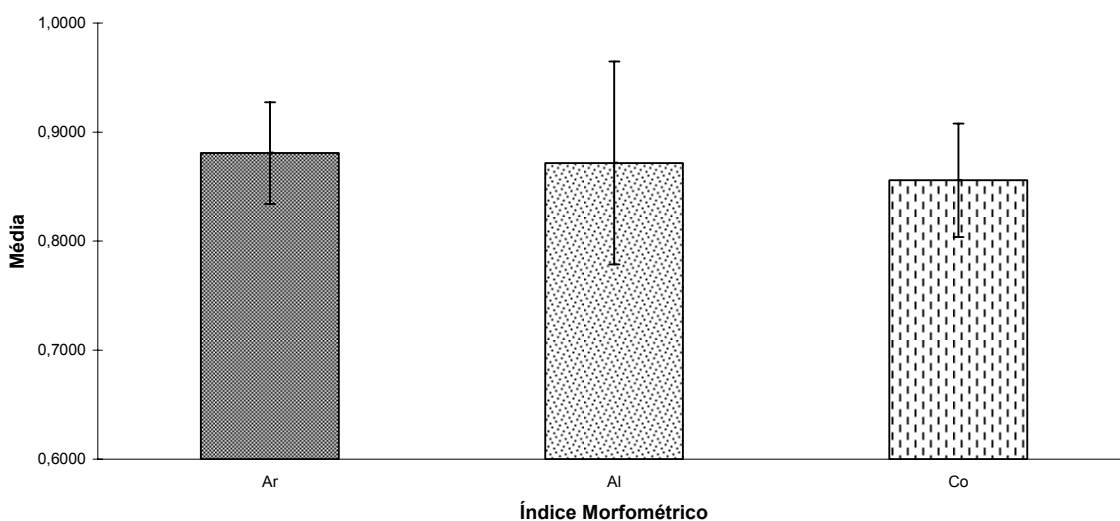
Para explicar a porosidade total das amostras de areias reconstituídas em função dos índices morfométricos, foram ajustadas regressões lineares em função do alongamento, diâmetro de Feret e compacidade. Os resultados foram significativos a 5% pelo teste F para uma

equação de primeiro grau. Todavia, o valor do  $R^2$  foi baixo para esses índices, refletindo a diversidade inerente às partículas estudadas.



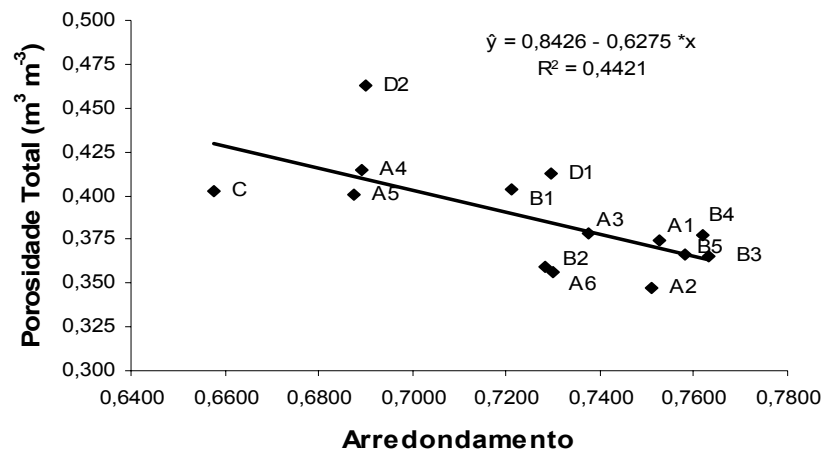
**Figura 17. Porosidade total das amostras de areias reconstituídas.**

Esse fato está de acordo com as observações de Suguio (1980), que afirma que grãos de quartzo possuem elevado desvio padrão do arredondamento em um único intervalo granulométrico (associação de grãos bem arredondados e partículas angulosas de dimensões similares), como pode ser observado na Figura 18. O quartzo é um dos minerais mais abundantes na fração areia porque é resistente ao intemperismo e não apresenta clivagem, o que explica a diversidade morfométrica observada.



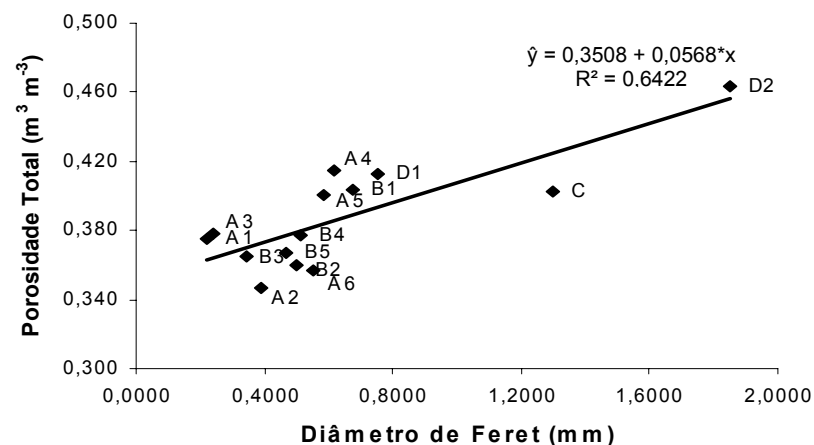
**Figura 18. Média e desvio padrão dos índices morfométricos arredondamento (Ar), alongamento (Al) e compacidade (Co).**

As Figuras 19, 20 e 21 mostram os ajustes de regressão linear da porosidade em função dos índices arredondamento, diâmetro de Feret e compactidade. A porosidade total decresce com o arredondamento da partícula (Figura 19), refletindo a maior facilidade que as partículas mais arredondadas têm em se ajustar do que as partículas menos arredondadas, resultando em um menor espaço poroso. Fraser (1935) concluiu que sedimentos compostos de grãos esféricos têm porosidade menor que os compostos de grãos menos esféricos. O autor atribuiu o fato ao empacotamento mais firme (fechado) dos primeiros em relação aos últimos.

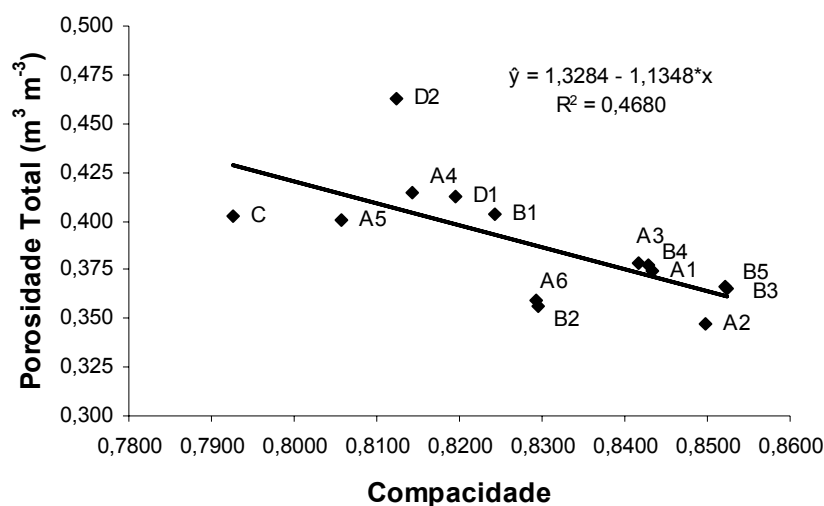


**Figura 19. Porosidade total das amostras de areias reconstituídas, em relação ao índice morfométrico arredondamento.**

À medida que o diâmetro de Feret aumenta, há uma clara tendência de elevação na porosidade total, refletindo o aumento da macroporosidade (Figura 20). A compactidade segue a mesma tendência observada com relação ao arredondamento, conforme mostra a Figura 21.



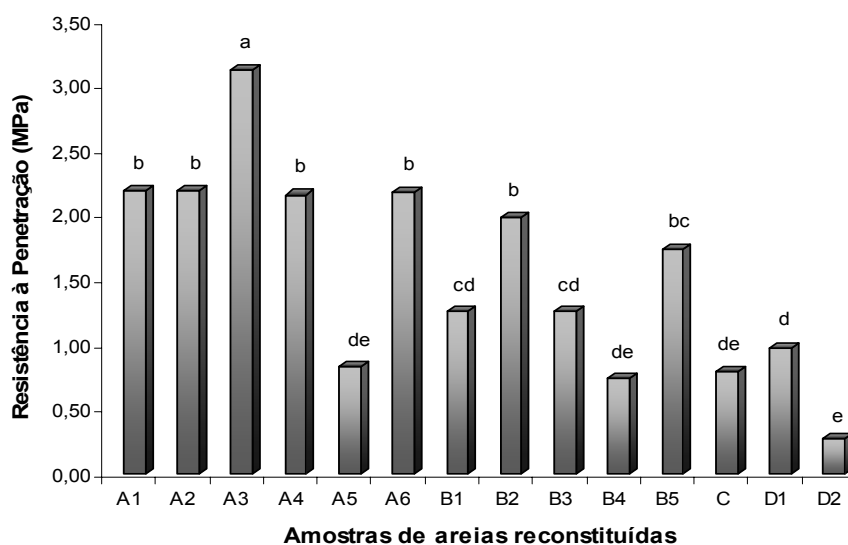
**Figura 20. Porosidade total das amostras de areias reconstituídas, em relação ao índice morfométrico diâmetro de Feret.**



**Figura 21.** Porosidade total das amostras de areias reconstituídas, em relação ao índice morfométrico compacidade.

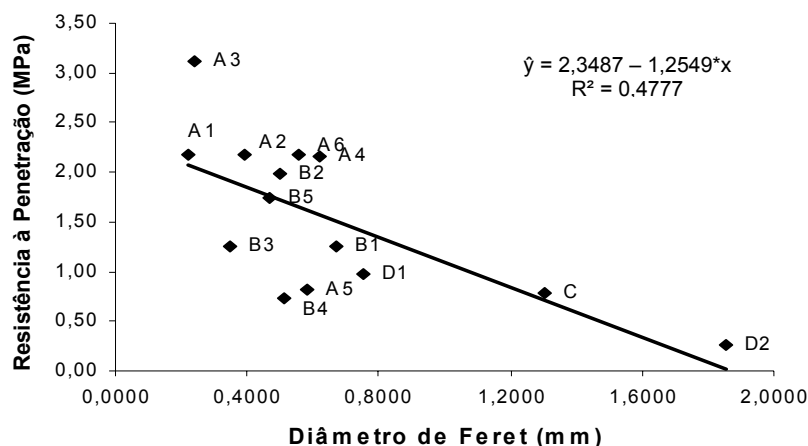
#### 4.7. Resistência à penetração

A Figura 22 mostra a média de três repetições dos valores máximos da resistência à penetração das amostras de areias reconstituídas. Assim como a porosidade, o empacotamento de materiais não coerentes afeta a resistência do solo. Para explicar a resistência à penetração das amostras de areias reconstituídas em função dos índices morfométricos, tentou-se ajustar curvas de regressão em função do arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compacidade. Todavia, somente houve significância, a 5% pelo teste F, para o índice diâmetro de Feret (Figura 23).



**Figura 22.** Resistência à penetração das amostras de areias reconstituídas obtidas em penetrômetro de cone de mesa.

Na Figura 23 observa-se que à medida que o diâmetro de Feret aumenta, há uma clara tendência de decréscimo na resistência à penetração, refletindo a maior facilidade de ajuste das partículas. Isso se deve ao fato de existir poros de maior diâmetro entre esferas maiores em relação a partículas de menor diâmetro, onde há predominância de poros menores.



**Figura 23. Resistência à penetração das amostras de areias reconstituídas, em relação ao índice morfométrico diâmetro de Feret.**

Sob o ponto de vista da distribuição granulométrica, as amostras A1, A2, A4, A6, B2 e B5 apresentam uma distribuição mais uniforme entre as classes, permitindo um melhor arranjo das partículas, o que explica a similaridade da resistência à penetração. A amostra D2 obteve menor resistência à penetração em função de seu maior diâmetro de Feret, que é da mesma ordem de grandeza do diâmetro do cone utilizado. Isso permite que as partículas se desloquem facilitando a passagem do cone do penetrômetro.

#### 4.8. Curvas de retenção de água

Foram ajustadas equações de regressão relacionando a retenção de água, em base gravimétrica, à tensão, em pF (Figuras 24 e 25). As amostras A1 e A3 apresentam maior poder de retenção de água. A amostra A1 possui uma distribuição mais homogênea entre as classes, o que propicia um maior número de contato entre partículas, favorecendo o aparecimento de poros menores. A amostra A3 possui uma maior

quantidade de material fino em sua composição, o que possibilita o aparecimento de lentes de água entre as partículas. As amostras C e D2 apresentam maiores proporções de material grosseiro, além de uma distribuição heterogênea entre as classes, contribuindo para a baixa retenção de água observada na Figura 25.

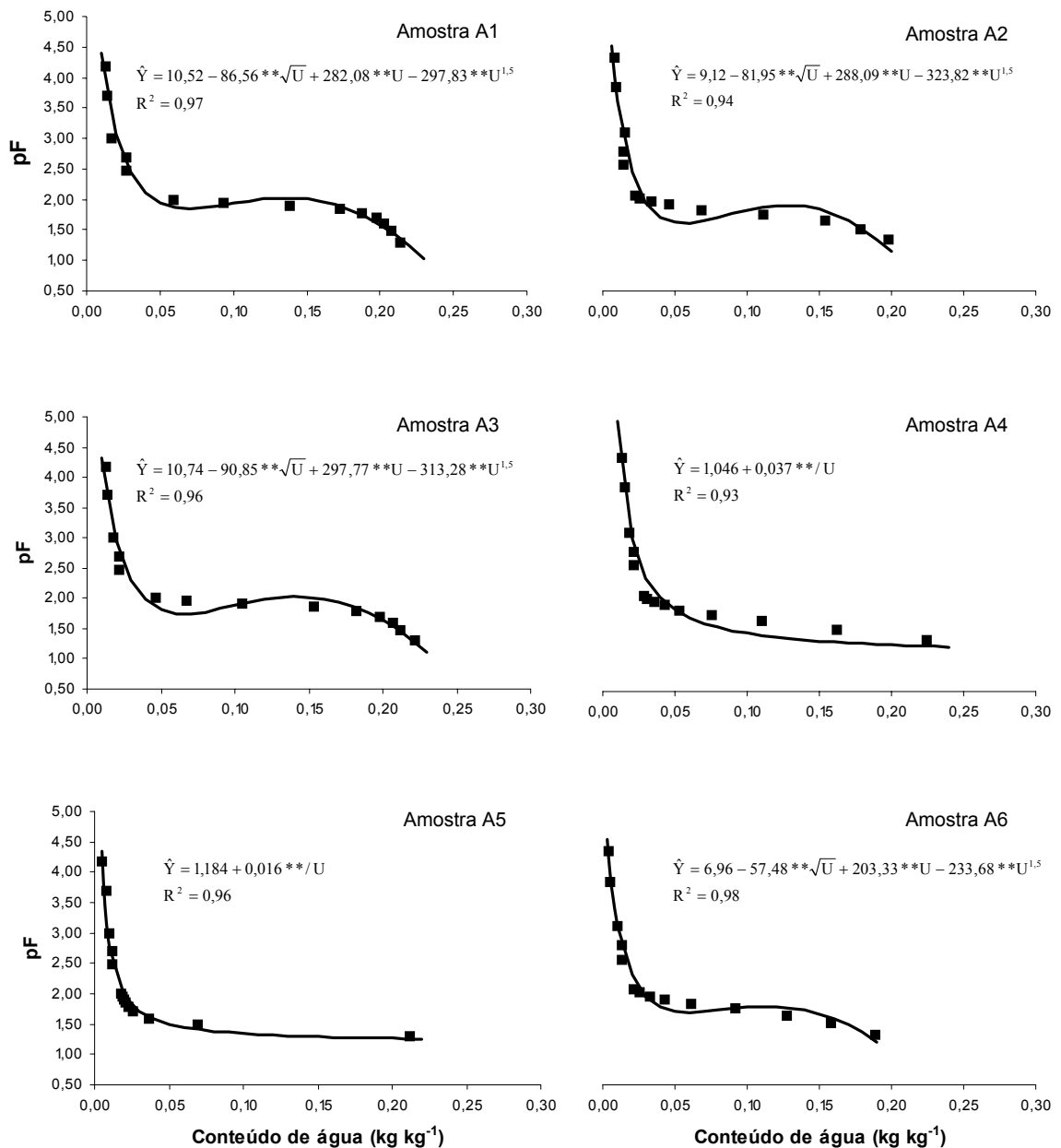
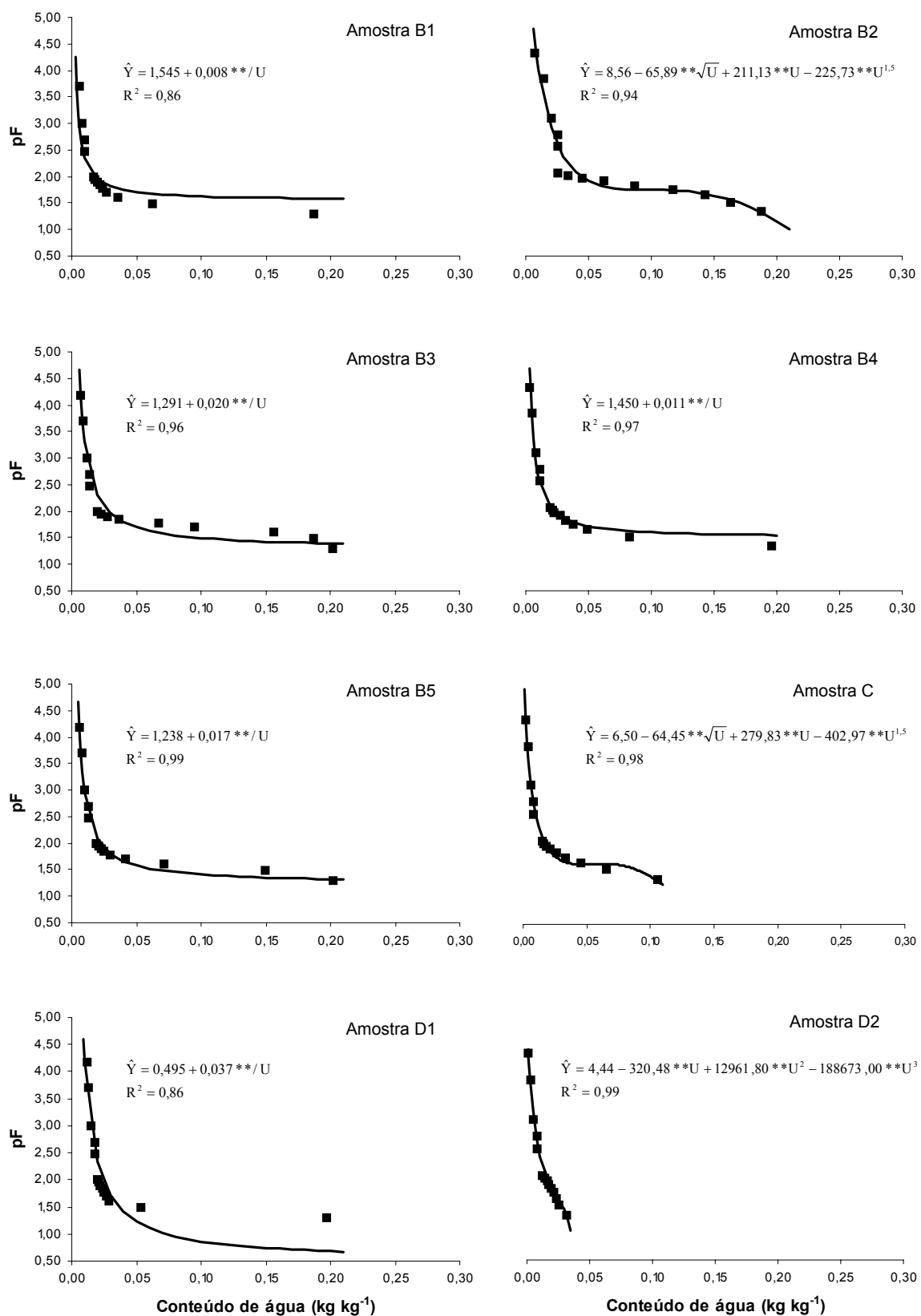


Figura 24. Curvas de retenção de água das amostras A1 a A6.



**Figura 25. Curvas de retenção de água das amostras B1 a B5, C, D1 e D2.**

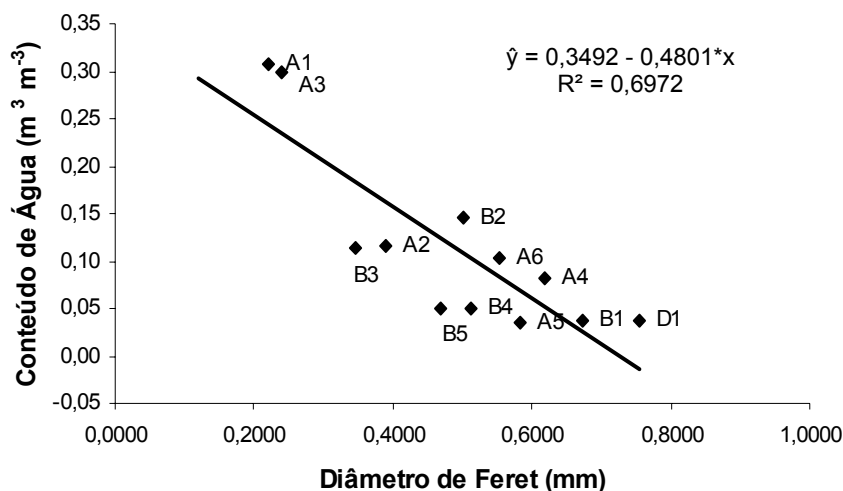
O Quadro 11 apresenta a microporosidade e macroporosidade das amostras de areias reconstituídas e seu percentual em relação à porosidade total. Como pode observar-se, as amostras A1 e A3 apresentam os menores valores para o diâmetro de Feret e os maiores valores de relação microporosidade/porosidade total, indicando uma relação entre a presença de material fino com maior retenção de água.

**Quadro 11. Diâmetro de Feret, microporosidade, macroporosidade e relação microporosidade/porosidade total das amostras de areia reconstituídas**

<b>Amostra</b>	<b>Diâmetro de Feret (mm)</b>	<b>Micropor. (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Macropor. (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Relação Microp./Poros.</b>
A1	0,2200	0,3072	0,3865	0,5008
A2	0,3899	0,1161	0,4117	0,1973
A3	0,2393	0,2983	0,3812	0,4820
A4	0,6190	0,0819	0,3643	0,1288
A5	0,5820	0,0355	0,3735	0,0567
A6	0,5539	0,1036	0,3991	0,1724
B1	0,6734	0,0366	0,3749	0,0586
B2	0,5007	0,1462	0,3943	0,2414
B3	0,3459	0,1137	0,3877	0,1857
B4	0,5112	0,0509	0,3900	0,0835
B5	0,4687	0,0494	0,3894	0,0809
C	1,3011	0,0414	0,3617	0,0648
D1	0,7560	0,0381	0,3705	0,0605
D2	1,8518	0,0276	0,3401	0,0418

Para explicar a retenção de água das amostras de areias reconstituídas em função dos índices morfométricos, tentou-se ajustar curvas de regressão em função do arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compacidade. Todavia, somente houve significância, a 5% pelo teste F, para o índice diâmetro de Feret. O ajuste das curvas de retenção ( $h = 60$  cm) em relação ao índice morfométrico diâmetro de Feret está apresentado na Figura 26. Foram excluídos os índices de Feret relativos às amostras C e D2, pois essas amostras retêm pouca água, devido à

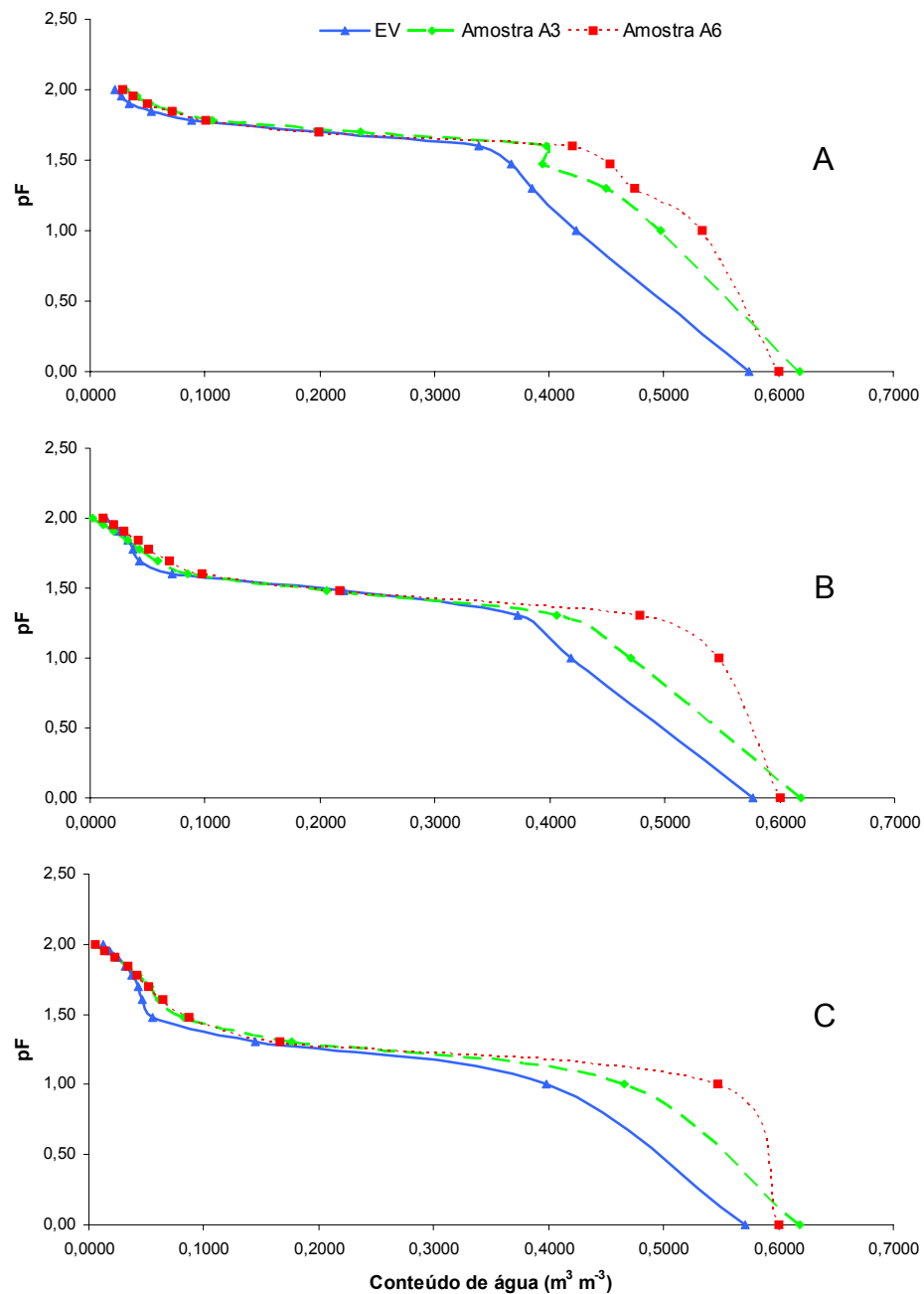
presença de poros de maior diâmetro, comprometendo o ajuste de regressão.



**Figura 26. Microporosidade das amostras de areias reconstituídas, em relação ao índice morfométrico diâmetro de Feret.**

Com a finalidade de verificar o comportamento da retenção de água em função da rugosidade da partícula, foram comparadas curvas de retenção de duas amostras de areias reconstituídas em três classes distintas, em três repetições, com esferas de vidro (Figura 27). Para melhor visualização do comportamento inicial da curva, são apresentados os gráficos para as tensões até 10 kPa ( $pF = 2,0$ ). Verificou-se que, em geral, independentemente da classe analisada, as amostras de areia retiveram mais água do que as esferas de vidro. A rugosidade permite que uma maior quantidade de água fique retida em micro depressões e/ou fissuras existentes na partícula. Além disso, a rugosidade também eleva a área superficial da partícula, permitindo uma maior quantidade de água aderida a ela. Isso não é observado em esferas de vidro, pois elas apresentam superfície mais lisa do que as amostras de areias reconstituídas, o que explica a sua menor retenção de água. Comparando as amostras A6 e A3, percebe-se que, qualquer que seja a classe analisada, a amostra A6 sempre reteve mais água do que a amostra A3. A amostra A6 tem uma melhor distribuição granulométrica do que a amostra A3, implicando em melhor ajuste entre as partículas (empacotamento) e, conseqüentemente, uma maior quantidade de contatos entre os grãos. Esse maior número de

contatos acarreta a formação de maior número de lentes de água entre partículas.

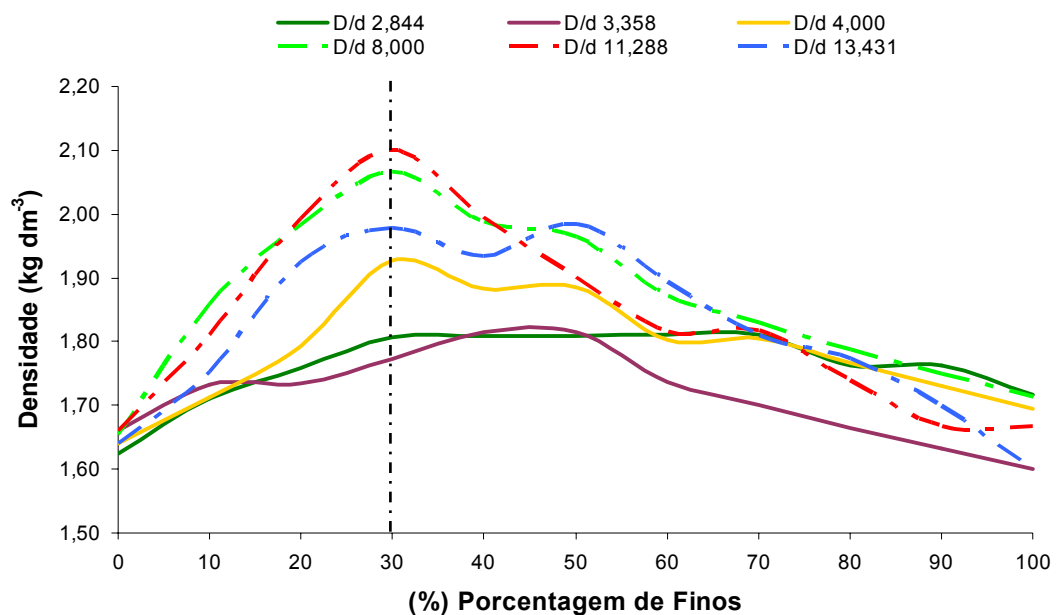


**Figura 27. Curvas de retenção de areias reconstituídas e esferas de vidro para as classes 0,177-0,149 mm (A); 0,297-0,250 mm (B); 0,500-0,420 mm (C). EV - Esfera de Vidro.**

#### 4.9. Empacotamentos binários em esferas de vidro

A Figura 28 mostra o efeito simultâneo da composição e da razão entre as classes utilizadas (diâmetro médio da maior classe dividido pelo diâmetro médio da menor classe) na densidade do empacotamento. Uma

densidade máxima ocorreu para cada mistura em uma determinada composição de partículas finas (partículas de menor diâmetro), sendo mais nitidamente observada nas razões 4,000, 8,000, 11,288 e 13,431. Mullin & Raven (1962) encontraram valor máximo de densidade em uma composição de 26,5% de esferas de menor diâmetro presentes na mistura, estando este valor bem próximo dos valores encontrados no presente estudo. Para razões maiores que 7, os espaços vazios são preenchidos pelas esferas de menor diâmetro sem dilatação do volume inicial atingido pelas esferas maiores. Em razões menores que 7, houve acréscimos na densidade do empacotamento, mas não tão efetivo como em taxas superiores a esse valor. Isso se deve ao fato de, em taxas menores, haver deslocamento das partículas de maior diâmetro de sua posição original, contribuindo na elevação do volume final. Em contrapartida, também houve um acréscimo, em maior proporção, na quantidade de massa final, contribuindo para que a relação entre a massa e o volume fosse maior.

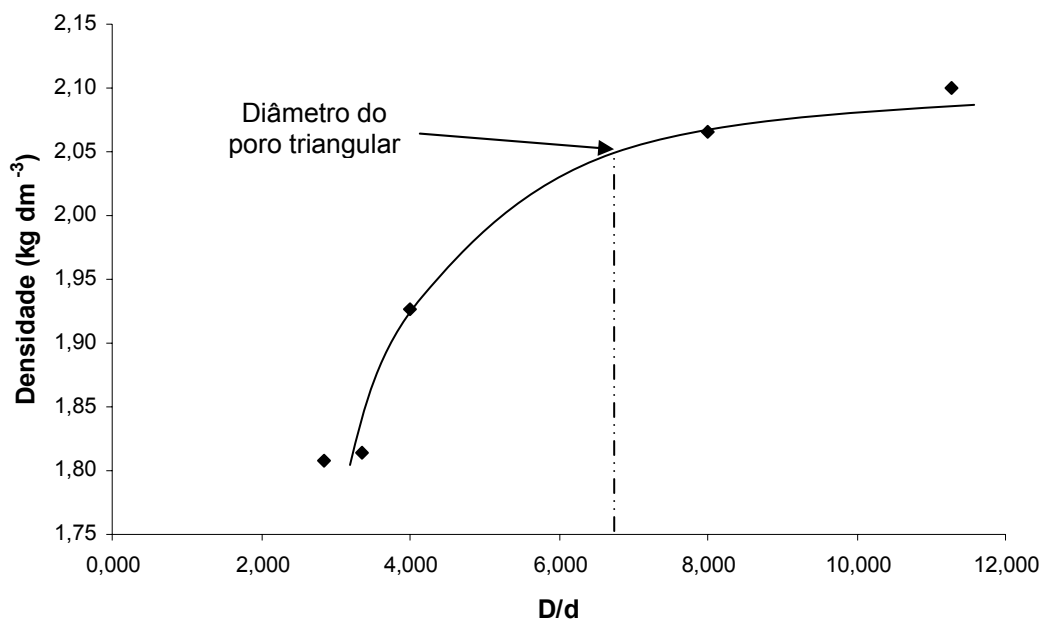


**Figura 28. Densidade em empacotamentos binários de esferas de vidro em função da porcentagem de “finos”, para diferentes relações D/d.**

Diferentemente do esperado, a razão 13,431 mostrou uma densidade de empacotamento menor do que as razões 8,000 e 11,288. Para a razão 13,431 utilizou-se a classe 0,149 - 0,125 mm. 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 é devido ao volume do aglomerado, que desloca as partículas da matriz grosseira (partículas de maior diâmetro), além de resultar em uma massa final menor.

Na Figura 29 estão representadas as máximas densidades obtidas em empacotamentos binários experimentais em função da relação  $D/d$ . Foi excluída a relação  $D/d = 13,431$ , devido à presença de partículas próximas a  $100 \mu\text{m}$ . A mudança de curvatura acontece próxima da relação  $D/d = 7$ . Abaixo desse valor a eficiência do empacotamento decresce rapidamente. Este valor está bem próximo do poro triangular formado pelo empacotamento de três esferas de igual tamanho. Empacotamentos, embora ineficientes, puderam ocorrer em relações  $D/d$  menores que 7. Acima desse valor, aumentos na densidade ocorrem em menor proporção.

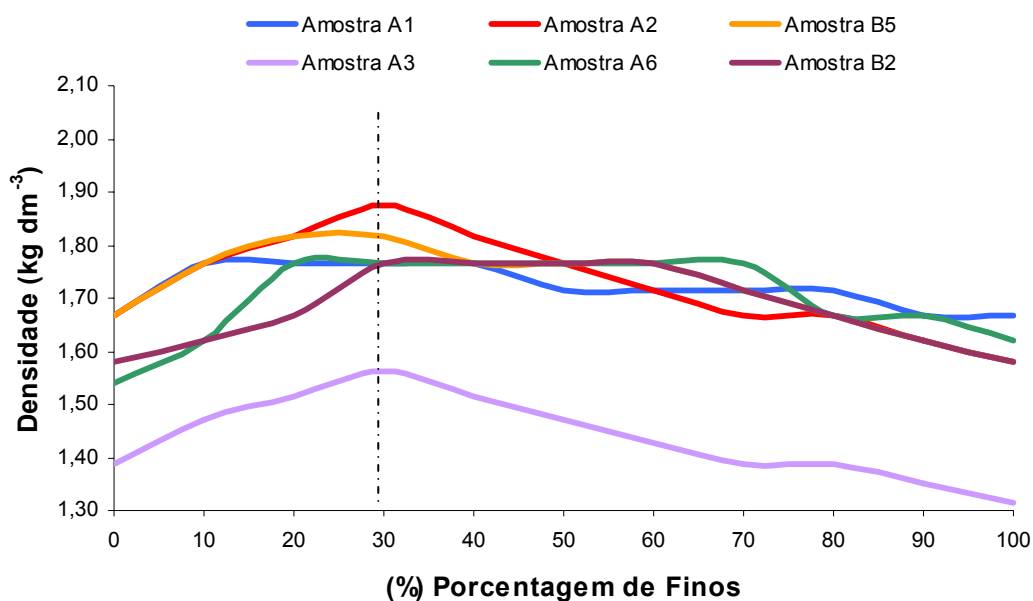


**Figura 29. Densidade de empacotamento máxima observada em misturas binárias de esferas de vidro para diferentes valores de  $d/D$ .**

#### 4.10. Empacotamentos binários em areias reconstituídas

Os empacotamentos binários em amostras de areias reconstituídas estão representados na Figura 30. Uma densidade máxima ocorreu nas

amostras A2, A3 e B5, em uma determinada composição de partículas finas, assim como no empacotamento de esferas de vidro. O mesmo não foi observado com relação às amostras A1, A5 e B2. Yu et al. (1993) relatam que o comportamento do empacotamento de partículas não esféricas é similar ao de partículas esféricas. Considera-se que o experimento não permite maiores inferências devido à baixa quantidade de material disponível para a simulação do empacotamento, não permitindo o uso de maiores razões  $D/d$ , necessárias em função da variabilidade morfométrica das partículas. Outro fato importante a se relatar é quanto ao uso de partículas muito finas no processo de ajuste de partículas, mas que foram utilizadas devido à não disponibilidade de material mais grosseiro em maior quantidade. Segundo German (1989), é muito comum a aglomeração de partículas devido a filmes de água adsorvidas na superfície, especialmente durante períodos de agitação, dependendo da umidade relativa e da curvatura da superfície. Essa maior agitação (maiores amplitude e frequência no processo de ajuste das partículas) foi necessária em amostras de areias reconstituídas devido à existência de relações  $D/d$  abaixo de 7, aliada às imperfeições superficiais dos grãos. Isso pode explicar a ausência de um único ponto de densidade máxima nas amostras A1, A6 e B2.



**Figura 30. Empacotamentos binários em amostras de areias reconstituídas em função da porcentagem de finos.**

#### 4.11. Empacotamentos ternários em esferas de vidro

Como se pode observar na Figura 31, o empacotamento de sistemas ternários de esferas de vidro apresenta uma região de máxima densidade situada na linha que une as partículas de maior diâmetro com as partículas de menor diâmetro, mostrando uma maior dependência das relações entre a matriz grosseira e a matriz fina. A análise de regressão linear múltipla mostra a dependência da densidade com as combinações entre as matrizes grosseira e média, grosseira e fina, média e fina, e da presença de material fino, expressa pela equação abaixo:

$$D = 1,699462 + 1,200683*CF + 0,603561*CM + 0,419727*MF - 0,134410*F$$
$$R^2 = 0,81$$

Onde: D = densidade do empacotamento ternário

C = porcentagem de material grosseiro (classe 2,000 - 1,680)

M = porcentagem de material médio (classe 0,500 - 0,420)

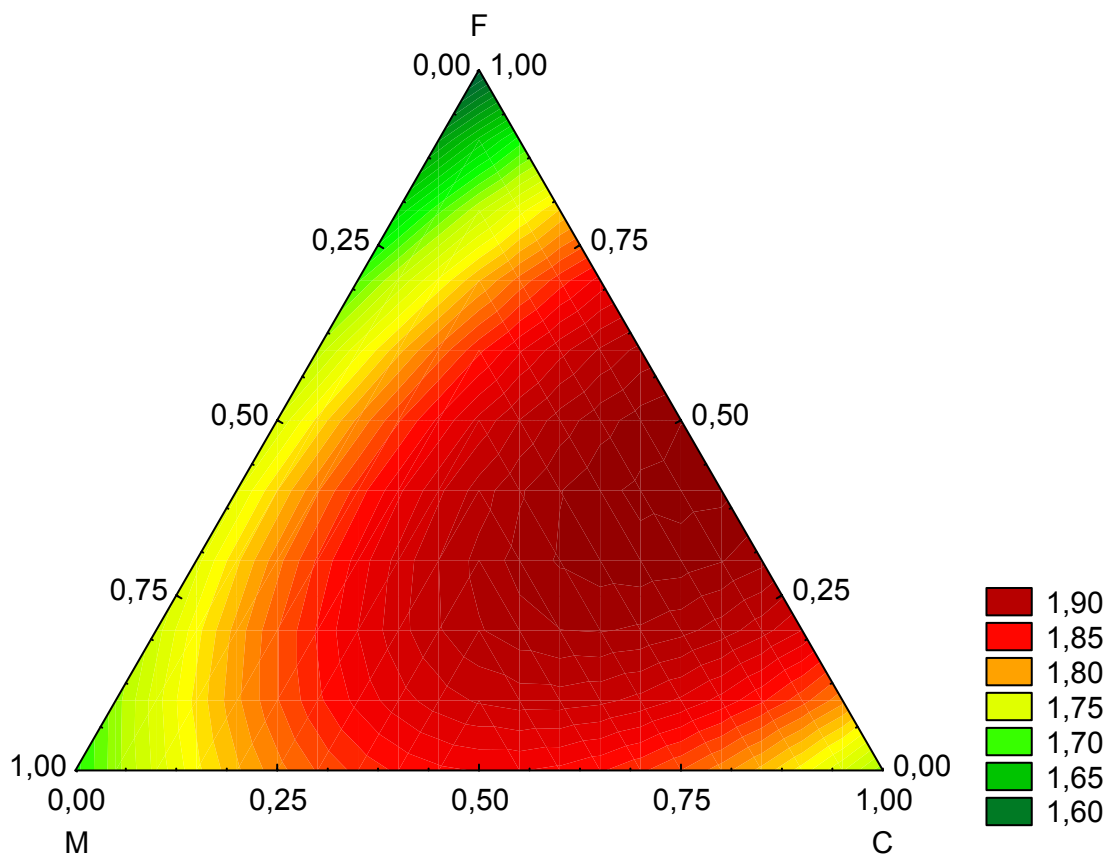
F = porcentagem de material fino (classe 0,149 - 0,125)

Yu & Zou (1998) observando resultados de trabalhos de outros pesquisadores, verificaram que a mudança de tamanhos de partícula em sistemas ternários pode resultar em diferentes padrões de porosidade/densidade. Conseqüentemente, é difícil obter uma completa noção do comportamento de empacotamentos ternários. Apesar disto, os autores observaram que houve uma mínima porosidade (máxima densidade) para cada sistema ternário analisado, localizado ou dentro do triângulo ou na linha ligando as partículas menores e maiores. O presente trabalho corrobora-se com a última observação dos autores.

Não foi possível realizar estudos de sistemas ternários em areias reconstituídas porque não havia material suficiente para a simulação de empacotamentos. Contudo, esse estudo serve como guia para a compreensão de sistemas ternários (ou de maior grau) em ajustes de partículas não esféricas (areias reconstituídas).

$$D = 1,699462 + 1,200683*CF + 0,603561*CM + 0,419727*MF - 0,134410*F$$

$$R^2 = 0,8090$$



## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo caracterizar a morfologia de areias reconstituídas (fração areia sem a presença de agentes cimentantes) e esferas de vidro, pela utilização dos índices morfométricos arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compacidade, e analisar a sua correlação com a porosidade total, resistência à penetração e curvas de retenção pelo ajuste de curvas de regressão. Outro propósito desse estudo foi avaliar a elevação da densidade em sistemas binários e ternários de esferas de vidro e sistemas binários de areias reconstituídas sujeitos à ação vibratória controlada, em função da composição, em porcentagem, e das relações entre os diâmetros médios das classes envolvidas. Para isso, foram coletadas 14 amostras de solo/sedimento em diferentes localidades dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e adquiridas esferas de vidro para simulação de empacotamentos binários e ternários. Os resultados obtidos permitiram concluir que:

1) O índice morfométrico arredondamento é fortemente influenciado pela resolução utilizada na obtenção das imagens, devido a um maior detalhamento da borda da partícula.

2) A resistência à penetração foi influenciada pelo índice morfométrico diâmetro de Feret quando este estava na mesma ordem de grandeza do diâmetro do cone.

3) A porosidade total apresentou ajuste de regressão com os índices morfométricos arredondamento, diâmetro de Feret e compacidade. A resistência à penetração e a microporosidade apresentaram ajuste de

regressão com o índice morfométrico diâmetro de Feret. Em todos os casos, o valor do  $R^2$  foi baixo, porém significativo.

4) A retenção de água de areias reconstituídas em amostras com maior proporção de partículas finas é maior do que em areias com maior diâmetro, mostrando que o comportamento da curva nas proximidades da região teórica da fração silte difere do padrão geral esperado para a fração areia.

5) As amostras de areia reconstituídas retiveram mais água do que as esferas de vidro.

6) A densidade de um sistema binário ou ternário atinge um valor máximo que depende da proporção de seus constituintes, e da razão entre os diâmetros envolvidos no empacotamento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer (ASAE Standard S313.1). **Agricultural engineers yearbook**. Saint Joseph: ASAE, 1979. p.269-270.

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).

BAVER, L.D. **Soil Physics**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1956. 489p.

BODMAN, G.B.; CONSTANTIN, G.K. Influence of particle size distribution in soil compaction. **Hilgardia**, 36:567-591, 1965.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Instituto de Química Agrícola. **Métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: IQA. Boletim Técnico, 11, 1949. 66p.

- CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 14:99-105, 1990.
- DERESIEWICZ, H. Mechanics of granular matter. **Adv. Appl. Mech.**, 5:233-306, 1958.
- 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.
- FONTES, H.R. **Efeitos de sistemas de manejo de solo sobre o desenvolvimento de coqueiros (*Cocos nucifera* L.) em areia quartzosa marinha**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 81p. (Dissertação de Mestrado).
- FRASER, H.J. Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. **J. Geol.**, 43:910-1010, 1935.
- GAVANDE, S.A. **Física de suelos. Principios y aplicaciones**. México: Limusa-Wiley, 1972. 351p.
- 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**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989. 443p.
- GRATON, L.C.; FRASER, H.J. Systematic packing of spheres - with particular relation to porosity and permeability. **J. Geol.**, 43:785-909, 1935.

- GROHMANN, F. Distribuição do tamanho de poros em três tipos de solo do estado de São Paulo. **Bragantia**, 19:319-328, 1960.
- GROHMANN, F. Compacidade. In: MUNIZ, A.C. (ed.) **Elementos de Pedologia**. São Paulo: Polígono, 1972. 93-99p.
- 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, 1971. 7-44p.
- HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.
- KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.
- KLUTE, A. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: VAN DOREN, D.M.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; WHISLER, F.D. (eds.) **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison, ASA, 1982. p.29-43.
- KOHNKE, H. **Soil Physics**. New York: McGraw-Hill, Inc., 1968. 224p.
- KOPI, A.J.; DOUGLAS, J.T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use Manag.**, 7:52-56, 1991.
- KRUMBEIN, W.C. Size frequency distribution of sediments. **Journal of Sed. Petrol.**, 4:65-77, 1934.

- 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.
- LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 4. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 83p.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv. Soil Sci.**, 1:277-294, 1985.
- McGEARY, R.K. Mechanical packing of spherical particles. **J. Am. Ceram. Soc.**, 44:513-522, 1961.
- MEDEIROS, L.A.R. **Caracterização e gênese de solos derivados de calcário e de sedimentos terciários na região de Jaíba, norte de Minas Gerais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1977. 107p. (Dissertação de Mestrado).
- 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.
- MULLIN, J.W.; RAVEN, K.D. Influence of mechanical agitation on the nucleation of some aqueous salt solutions. **Nature**, 195:33-35, 1962.
- PANAYIOTOPOULOS, K.P. Packing of sands - a review. **Soil Till. Res.**, 13:101-121, 1989.
- PANAYIOTOPOULOS, K.P.; MULLINS, C.E. Packing of sands. **J. Soil Sci.**, 36:129-139, 1985.
- PETTIJOHN, F. J. **Sedimentary rocks**. New York: Harper & Row, 1949. 526p.

- POWERS, M.C. A new roundness scale for sedimentary particles. **J. Sediment. Petrol.**, 23:117-119, 1953.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 3. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445p.
- 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.
- 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. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. 317p.
- SUGUIO, K. **Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 500p.
- 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.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth. **J. Soil Sci.**, 33:141-163, 1980.
- WADEL, H. Volume, shape, and roundness of quartz particles. **J. Geol.**, 43:250-280, 1935.
- WENTWORTH, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **J. Geol.**, 30:377-392, 1922.

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

WHITE, H.E.; WALTON, S.F. Particle packing and particle shape. **J. Am. Ceram. Soc.**, 20:155-166, 1937.

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.

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, AB.; STANDISH, N.; McLEAN, A. Porosity calculation of binary mixtures of nonspherical particles. **J. Am. Ceram. Soc.**, 76:2813-2816, 1993.

YU, A.B.; ZOU, R.P. Prediction of the porosity of particle mixtures. **Kona Powder Part.**, 16:68-81, 1998.

## **APÊNDICE**

**Quadro 1. Classes utilizadas na distribuição do tamanho de partículas**

<b>Classe (mm)</b>	<b>Diâmetro Médio (mm)</b>	<b><math>\Phi</math> (Phi)</b>
2,000 - 1,680	1,840	-0,88
1,680 - 1,410	1,545	-0,63
1,410 - 1,190	1,300	-0,38
1,190 - 1,000	1,095	-0,13
1,000 - 0,840	0,920	0,12
0,840 - 0,710	0,775	0,37
0,710 - 0,590	0,650	0,62
0,590 - 0,500	0,545	0,88
0,500 - 0,420	0,460	1,12
0,420 - 0,350	0,385	1,38
0,350 - 0,297	0,324	1,63
0,297 - 0,250	0,274	1,87
0,250 - 0,210	0,230	2,12
0,210 - 0,177	0,194	2,37
0,177 - 0,149	0,163	2,62
0,149 - 0,125	0,137	2,87
0,125 - 0,105	0,115	3,12
0,105 - 0,088	0,097	3,37
0,088 - 0,074	0,081	3,63
0,074 - 0,062	0,068	3,88
0,062 - 0,053	0,058	4,12

**Quadro 2 - Distribuição granulométrica das areias reconstituídas**

Classes	Peso das amostras (em g)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2,000 - 1,680	0,00	0,03	0,01	0,34	0,06	0,01	0,30	0,73	10,23	0,00	0,03	0,05	0,85	49,63
1,680 - 1,410	0,00	0,64	0,15	2,83	0,11	0,01	7,44	14,83	290,69	0,06	2,16	1,51	2,52	106,17
1,410 - 1,190	0,08	0,29	0,10	1,90	0,03	0,00	4,19	10,90	171,00	0,18	2,76	2,15	1,69	44,45
1,190 - 1,000	0,31	2,64	1,26	10,27	0,25	0,08	16,31	35,72	356,79	4,27	20,83	21,68	13,45	146,75
1,000 - 0,840	0,47	4,31	1,91	12,04	0,35	0,13	31,61	52,09	72,28	14,98	28,81	41,31	18,37	99,85
0,840 - 0,710	0,69	10,13	3,01	20,45	1,05	1,11	66,93	72,79	21,35	31,94	36,38	61,99	22,96	76,01
0,710 - 0,590	1,66	34,54	6,01	62,13	4,20	22,48	87,03	92,56	10,65	75,01	53,58	121,29	37,53	78,04
0,590 - 0,500	1,52	34,75	14,40	172,12	6,01	38,23	56,76	45,44	4,19	57,52	40,81	71,61	33,68	36,73
0,500 - 0,420	9,11	168,98	21,15	143,87	29,18	239,73	127,34	133,81	6,28	204,62	107,56	188,21	56,66	68,86
0,420 - 0,350	10,05	107,76	38,80	192,28	22,21	101,58	48,20	63,53	2,15	110,32	45,18	109,23	33,88	24,41
0,350 - 0,297	51,77	225,20	173,72	349,25	60,04	171,11	91,29	128,74	3,07	163,88	74,68	137,46	56,25	35,74
0,297 - 0,250	51,03	131,99	63,50	161,02	31,64	65,00	44,50	96,58	1,35	94,87	45,23	74,49	33,31	20,34
0,250 - 0,210	114,47	191,25	127,84	181,75	67,73	47,90	60,89	82,34	2,13	85,26	59,14	60,94	47,91	23,86
0,210 - 0,177	124,70	141,12	112,01	112,24	65,16	14,93	44,59	15,49	1,51	39,52	49,52	25,56	40,21	19,24
0,177 - 0,149	195,19	134,81	125,13	107,64	112,11	8,30	49,38	3,36	1,94	22,02	51,81	13,70	48,17	17,97
0,149 - 0,125	202,70	101,26	52,90	53,39	113,46	5,10	33,77	1,39	1,40	6,93	47,74	5,81	46,24	16,83
0,125 - 0,105	169,35	52,61	19,80	17,45	95,69	3,78	22,30	0,51	0,77	2,71	32,06	3,40	31,51	10,67
0,105 - 0,088	129,92	22,49	10,27	4,77	24,86	1,84	4,12	0,24	0,44	1,23	9,16	1,18	16,83	3,52
0,088 - 0,074	99,83	39,99	16,84	4,66	98,87	4,91	16,21	0,33	0,62	1,66	25,03	2,97	32,96	10,43
0,074 - 0,062	38,99	10,19	5,43	8,99	26,01	2,23	4,93	0,13	0,29	0,57	8,09	1,02	6,37	2,80
0,062 - 0,053	15,97	6,74	3,48	1,97	15,78	1,31	3,94	0,23	0,15	0,46	6,23	0,90	5,66	1,89