

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDOS DE PARÂMETROS TEXTURAIIS DAS AREIAS  
PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO ATRAVÉS DA  
ANÁLISE DE IMAGENS**

**Georgia Serafim Araújo**

**VITÓRIA, 2001**

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDOS DE PARÂMETROS TEXTURAIS DAS AREIAS  
PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO ATRAVÉS DA  
ANÁLISE DE IMAGENS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

**Georgia Serafim Araújo**

**Prof<sup>a</sup> Kátia Vanessa Bicalho, PhD.**

**Prof. Fernando Avancini Tristão, MSc.**

**VITÓRIA, 2001**

# **Estudos de parâmetros texturais das areias para argamassas de revestimento através de análise de imagens**

**Georgia Serafim Araújo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 10/12/2001 por:

---

Prof<sup>a</sup>. Ph.D. Kátia Vanessa Bicalho.

UFES (Orientador)

---

Prof. M.Sc. Fernando Avancini Tristão

UFES (Co-Orientadora)

---

Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Jacqueline Albino.

UFES (Examinador Interno)

---

Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Helena Carasek.

UFG (Examinador Externo)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Araújo, Georgia Serafim, 1969-

A663e        Estudos de parâmetros texturais das areias para argamassas  
de revestimento através da análise de imagens / Georgia Serafim Araújo. –  
2001.

xvi, 104 f. : il.

Orientadora: Kátia Vanessa Bicalho.

Co-Orientador: Fernando Avancini Tristão.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Espírito  
Santo, Centro Tecnológico.

1. Argamassa. 2. Areia. 3. Agregados – Materiais de  
construção. 4. Processamento de imagens – Técnicas digitais. I.  
Bicalho, Kátia Vanessa. II. Tristão, Fernando Avancini. III.  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. IV.  
Título.

CDU: 624

---

À minha mãe, Darcy.

### **AGRADECIMENTOS**

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo, pelo apoio e incentivo, em especial aos meus colegas da Coordenadoria de Construção Civil da Unidade de Ensino Descentralizada de Colatina, por compreenderem a minha ausência durante o período de realização deste trabalho.

A Professora PhD. Kátia Vanessa Bicalho pela orientação e apoio durante a realização da dissertação.

Ao Professor MSc. Fernando Avancini Tristão, pela valiosa orientação, incentivo, suporte e, principalmente, dedicação durante a realização deste mestrado.

A Professora Dra. Maristela Gomes da Silva pelas valiosas dicas.

A Professora Dra. Eliana Zandonade pela análise estatística dos dados.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil que, mesmo indiretamente, contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

A Professora do Departamento de Ecologia e Recursos Naturais Dra. Jacqueline Albino pela realização das análises morfoscópicas das areias ensaiadas e pela indicação de bibliografias.

Ao Professor do Departamento de Ecologia e Recursos Naturais MSc. Luís Machado pelas análises mineralógicas.

Ao Professor Fernando Musso pelas análises dos programas computacionais.

Ao secretário do mestrado Roberto Guimarães, por me salvar, incontáveis vezes, de um ataque de nervos.

Aos técnicos e auxiliares Carlos, Márcio, Sebastião, Loriato e Jorge do Laboratório de Materiais e Miguel do Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Tecnológico da UFES durante a realização dos ensaios.

A todos os amigos do mestrado que se fizeram presentes, em especial Milton e Tatiana pelos momentos sérios, mas principalmente pelos de descontração e Flávio pelo incentivo e por sempre massagear meu ego.

As amigas Márcia, Iene, Flávia e Andréia por participarem de um momento de profundas mudanças em minha vida.

A minha família, por entender minhas constantes ausências e, mesmo assim, me incentivar sempre.

A Deus, pois mesmo sem entender, acato seus desígnios e agradeço os momentos que me foram permitidos conviver com pessoas que marcaram de forma profunda e definitiva minha vida e que deixarão saudades.





## **LISTA DE FIGURAS**

## **LISTA DE QUADROS**

**Quadro 4.1: Resolução das imagens digitalizadas na etapa de aquisição**

**58**

## **LISTA DE TABELAS**

## **LISTA DE FOTOS**

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAD – Desenho Auxiliado por Computador

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISO – International Organization for Standardization

UFBA – Universidade Federal da Bahia

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UFMS – Universidade Federal de Santa Maria

USBS – United States Bureau of Soils

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

$C_u$  - coeficiente de uniformidade

$E_A$  – módulo de deformação

$R_a$  – resistência de aderência à tração

$MF$  – módulo de finura

$S$  – área

$P$  – perímetro

$d$  – diâmetro

$F_f$  – fator de forma

$A_f$  – arredondamento

$M$  – massa

$V$  – volume

$A_v$  – área específica em volume

$A_M$  – área específica em massa

$\psi$  - máxima projeção de esfericidade  
 $l$  - maior dimensão do grão  
 $i$  - dimensão intermediária do grão  
 $s$  - menor dimensão do grão  
 $\delta$  - massa específica dos grãos  
 $A$  - porcentagem, em massa da fração menor que 80  $\mu\text{m}$   
 $B$  - porcentagem, em massa, da fração entre 80  $\mu\text{m}$  e 0,315 mm  
 $C$  - porcentagem, em massa, da fração entre 0,315 e 0,50 mm  
 $n$  - número de grãos  
 $\rho$  - densidade dos grãos  
 $v_i$  - volume parcial de grãos de mesmo diâmetro  
 $V_r$  - volume total dos grãos  
 $m_1$  - escala da abcissa  
 $m_2$  - escala da ordenada  
 $k$  - constante do aparelho  
 $\varepsilon$  - porosidade da camada  
 $t$  - tempo  
 $\eta$  - viscosidade dinâmica do ar  
 $(P_{N_{od1}} - P_{N_{od2}})$  - porcentagem da fração  
 $L$  - distância entre dois pontos  
 $N$  - número de segmentos  
 $y$  - tamanho dos segmentos  
 $f$  - fração do segmento  
 $D_f$  - dimensão fractal  
 $m$  - coeficiente angular ou inclinação da reta  
 $D_R$  - dimensão fractal de rugosidade  
 $L_f$  - leitura do frasco  
 $h$  - umidade  
 $AJ$  - areia de jazida  
 $AR$  - areia de rio  
 $p$  - probabilidade de igualdade dos valores  
 $z$  - intervalo de confiança  
 $\sigma$  - desvio padrão

E - precisão

# ESTUDOS DE PARÂMETROS TEXTURAIS DAS AREIAS PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE IMAGENS<sup>1</sup>

Georgia Serafim Araújo<sup>2</sup>

## RESUMO

A forma e a textura dos agregados miúdos influenciam de forma profunda as propriedades das argamassas de revestimento e assentamento. Entretanto, a maioria dos trabalhos científicos contempla apenas a influência da granulometria no desempenho das argamassas

No presente trabalho analisa-se, através dos diversos métodos disponíveis na literatura, a área específica, que depende da forma e da rugosidade das areias, utilizando a técnica de análise de imagens digitais para obtenção dos parâmetros necessários.

Em função da necessidade de análise de areias de diferentes formas e graus de arredondamento, foram escolhidas areias de duas procedências. Uma proveniente de leito de rio e a outra de jazida próxima ao cordão litorâneo. Inicialmente as partículas de areia foram lavadas, peneiradas e separadas em várias frações de tamanhos entre 4,8 e 0,075 mm.

As amostras das duas procedências analisadas foram preparadas contendo aproximadamente 400 grãos para cada fração, sendo então, fotografadas, digitalizadas e armazenadas na memória do computador, para posterior processamento e obtenção dos parâmetros requeridos.

No que se refere à forma, analisaram-se e compararam-se os graus de esfericidade das duas areias. Já com relação à rugosidade, o parâmetro analisado foi o grau de arredondamento das partículas.

Os resultados experimentais mostram que a caracterização de agregados através da técnica de imagens digitais é muito mais precisa do que o ensaio de peneiramento atualmente utilizado, pois os valores médios das dimensões dos grãos foram muito superiores às aberturas de malha da fração correspondente, sendo que essas diferenças foram extremamente significativas no cálculo das áreas específicas das areias analisadas.

Constata-se que a análise de imagens, em função do grande avanço tecnológico, é uma poderosa ferramenta para caracterização dos agregados miúdos, com amplas possibilidades de automação.

---

<sup>1</sup> Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, sob orientação da Prof<sup>a</sup> Kátia Vanessa Bicalho, PhD e Prof. Fernando Avancini Tristão, MSc.

<sup>2</sup> Engenheira Civil, Professora da Coordenadoria de Construção Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – CEFETES, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES. e-mail: georgia@unedcol.cefetes.br

## **ABSTRACT**

The particle texture and shape characteristics of fine aggregate used are directly related to the properties of the mortars produced. However, the majority of the existing studies consider that the performance of the mixture is affected only by the particle size.

The purpose of this work is to investigate, through different methods available in literature, the specific surface of sands, that depends of shape and texture, by using the image analysis technique.

Two different sands that cover a typical range of sands encountered in practice were used in this study. The aggregate was sieved and separated in six fractions for particle sizes ranging from 4,8 to 0,075 mm. The sample containing 400 grains approximately of each fraction was photographed, digitized and stored in a personal computer. The images are then analysed to obtain the required parameters. The main particle shape characteristics measured was esphericity and the particle texture was roundness.

Experimental results show that the characterization of grain-size by the digital image processing is much more accurate than the sieve analysis. In conclusion, the results achieved lend confidence to the overall approach adopted.



## **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO**

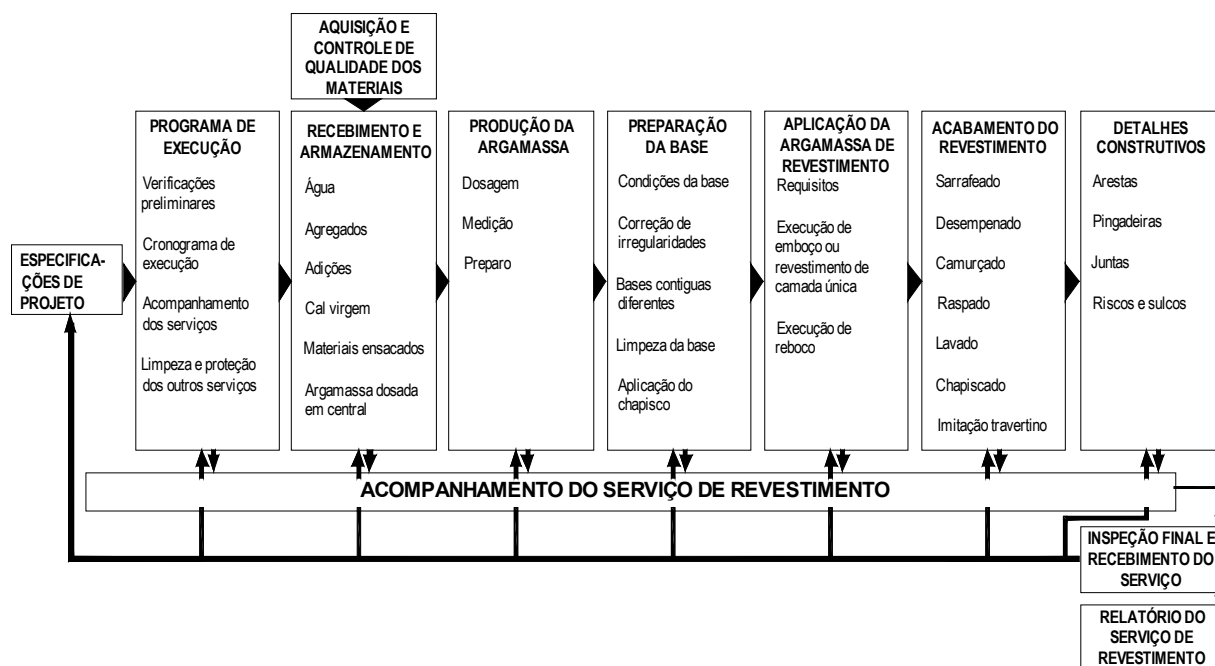
Ainda é prática construtiva no Brasil o emprego de alvenarias de blocos cerâmicos ou de concreto nas vedações verticais, que recebem como acabamento final, tanto externa como internamente, os revestimentos de argamassa. Apesar da ampla utilização, a falta de especificações técnicas ocasiona um alto índice de desperdício, além do aparecimento de diversas manifestações patológicas que irão, certamente, comprometer a eficiência dos revestimentos.

CARNEIRO (1993), através de um estudo estatístico, concluiu que 15% do total de falhas encontradas em edificações são devidos à falta de critério na mistura da argamassa. Esse fator pode estar associado à carência de estudos que norteiem a produção das argamassas no canteiro de obras. A NBR 7200 (ABNT, 1998) afirma que a etapa de execução do revestimento argamassado é a principal responsável pelos fenômenos patológicos observados, posteriormente, em uma edificação.

MACIEL & MELHADO (1997) apontam a falha no projeto como uma das causas para a ocorrência de manifestações patológicas e desperdícios na fase de revestimento das edificações, uma vez que os revestimentos de argamassa ainda são executados sem orientação de projetos baseados na tecnologia construtiva. Essa afirmativa se justifica pelo fato de que o revestimento com argamassa ainda é considerado apenas como acabamento final decorativo e como forma de esconder as imperfeições da base, sendo desvalorizada sua real importância.

Mesmo diante de toda a preocupação com a racionalização dos processos construtivos e com a qualidade do produto final na construção civil, impulsionados pelo crescente nível de exigência dos consumidores ao adquirirem um imóvel, prevalecem, até os dias de hoje, o empirismo e o senso comum na dosagem dos materiais constituintes dos revestimentos de argamassa.

Para o acompanhamento do processo produtivo dos revestimentos de argamassa no canteiro de obras, a NBR 7200 (ABNT, 1998) sugere o fluxo das etapas constantes na Figura 1.1. VALENTIN (1998) afirma que tal procedimento é uma valiosa ferramenta, facilitando a inspeção e a identificação de possíveis falhas.



**Figura 1.1: Etapas para controle de execução dos revestimentos, segundo a NBR 7200 (ABNT, 1998)**

Se comparados às pesquisas dedicadas ao concreto, os estudos de argamassas no Brasil ainda são muito recentes e incipientes. Apesar disso, alguns pesquisadores, tais como OLIVEIRA (1959), já manifestavam sua preocupação com a falta de técnica usada na aplicação das argamassas, levando-o a se dedicar à elaboração de um trabalho científico, que visa ao emprego racional da mistura.

Para reverter esse quadro, a Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC) criou, em 1988, o Grupo de Trabalho de Argamassa, objetivando a ampliação e a divulgação das pesquisas nessa área. A partir de então, tem-se verificado um crescente número de pesquisadores e estudos sobre o tema, inclusive com a ocorrência de simpósios nacionais relacionados à tecnologia das argamassas.

Tendo em vista o panorama nacional acima exposto, faz-se necessário avaliar o desempenho do revestimento de argamassa através não só das condições de aplicação e exposição como também da dosagem racional dos materiais constituintes, uma vez que o desempenho desses elementos na mistura irá ditar o comportamento e a manutenção das propriedades requeridas.

### 1.1 Justificativa

A areia tem a função de reduzir a proporção de aglomerantes na argamassa, permitindo um maior rendimento e reduzindo os efeitos indesejáveis do cimento. O agregado miúdo participa com, aproximadamente, 80% em massa da massa total da mistura, tornando-se evidente a importância do estudo de sua influência nas propriedades das argamassas (CINCOTTO & CARNEIRO, 1999).

Apesar do expressivo percentual de agregado miúdo presente na mistura, as pesquisas para verificação da contribuição do material ainda são muito modestas. Os estudos da influência da areia nas propriedades das argamassas restringiu-se, até agora, à análise granulométrica, na qual forma e características geométricas de caráter textural das partículas, tais como esfericidade e grau de arredondamento dos grãos, não têm sido considerados como fatores que influenciam o desempenho da mistura.

A carência de trabalhos científicos nesse sentido motivou o desenvolvimento desta pesquisa, pois é sabido que não só a granulometria, mas principalmente a forma dos grãos e, conseqüentemente, a área específica dos agregados (área superficial pela unidade de volume ou massa), têm grande influência no desempenho das argamassas de revestimento.

Segundo SINGH (1957), já nos idos de 1918, os estudos de Edwards indicavam que a área específica dos agregados influenciava algumas propriedades do concreto, tais como a consistência e a trabalhabilidade. Entretanto, essa linha de pesquisa ficou desacreditada quando ABRAMS (1925) afirmou que os fatores que influenciavam a resistência e a consistência do concreto eram a relação água/cimento e o módulo de finura do agregado, não fazendo qualquer relação entre módulo de finura e área específica.

Apesar disso, trabalhos posteriores de SINGH (1958) e de SHACKLOCK & WALKER (1958) relacionaram a resistência à compressão e à flexão e a trabalhabilidade do concreto à área específica dos agregados. Nessa mesma época, SINGH (1959) apresenta um método de proporcionamento do concreto baseado nas características de área específica dos agregados.

Para COUTINHO (1973) a resistência de um concreto é tanto maior quanto menor for a área superficial do agregado a ligar. Além disso, para se obter uma argamassa com a mesma resistência do concreto e para propiciar a ligação entre os grãos, é necessária uma quantidade maior de pasta de cimento.

Os estudos acima relatados são válidos para argamassas de concreto que possuem cerca de 40% em massa de agregado miúdo na mistura. Como esse percentual é de praticamente o dobro nas argamassas de revestimento e assentamento, é de se esperar que a influência da forma dos agregados nas suas propriedades seja ainda mais expressiva.

Devido ao grande avanço nas pesquisas de argamassas para concreto, é comum se estenderem os resultados obtidos para as argamassas de assentamento e revestimento. Entretanto é preciso ter cautela nessa prática, pois as solicitações impostas, as condições de exposição e as propriedades requeridas são diferentes.

Mais especificamente para argamassas de revestimento, SELMO (1989) considera que a área específica é diretamente proporcional ao consumo de aglomerantes e água de amassamento, o que influenciaria todas as demais características dos revestimentos.

Devido à facilidade de execução e ao fato de não necessitar de equipamentos sofisticados, o peneiramento tem sido o ensaio mais utilizado para caracterização da granulometria dos agregados. Entretanto, os resultados obtidos para tamanhos de grãos através desse ensaio não condizem com a realidade.

As exigências de prazos reduzidos e de maior precisão de medidas têm levado pesquisadores a utilizar técnicas alternativas, como a análise de imagens que, em função dos avanços tecnológicos recentes, da rápida expansão da informática e da indústria eletrônica, do desenvolvimento de computadores pessoais e do progresso na aquisição e no armazenamento das imagens digitais, permitem que essa técnica seja rápida e com amplas possibilidades de automação e melhor reprodutibilidade.

CHERMANT *et al.* (2001) apresentam as aplicações da técnica de análise de imagens nos diversos campos da engenharia civil, a saber: investigação da morfologia do cimento, do concreto e do concreto reforçado com fibras, além das argamassas.

Mais especificamente na área de agregados e argamassas, podemos citar os trabalhos de WERNER & LANGE (1999), que analisaram a microestrutura de argamassas de assentamento, e os de BRZEZICKI & KASPERKIEWICZ (1999), que avaliaram a forma dos agregados graúdos para concreto. Já MARTÍNEZ & RUBIERA (1995) utilizaram as imagens digitais para avaliar a microestrutura de granitos usados como agregados para concretos.

Baseado nas considerações expostas acima, este trabalho pretende analisar a área específica dos agregados miúdos para uso em argamassas de revestimento através da técnica de análise de imagens, comparando-a a outras metodologias constantes na literatura de determinação da área específica dos agregados miúdos.

## **1.2 Objetivos da pesquisa**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O principal objetivo desta pesquisa é analisar a área específica dos agregados miúdos para as argamassas de revestimento, fornecendo subsídios para trabalhos futuros que venham correlacionar esta variável e sua influência nas propriedades dos revestimentos de argamassa.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Comparar as áreas específicas das areias obtidas através da análise de imagens, onde são consideradas a forma e a textura superficial das partículas, aos métodos apontados na literatura, em cujos cálculos somente o tamanho do grão é considerado;
- Comparar as áreas específicas de areias de duas procedências diferentes;
- Obter o grau de esfericidade e arredondamento das duas areias analisadas.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

As atividades desenvolvidas foram divididas em 6 Capítulos.

O Capítulo 1 teve por objetivo justificar a motivação para o estudo que deu origem a esta dissertação, além de apresentar os objetivos a serem alcançados ao término da pesquisa.

Uma revisão da literatura, no que se refere às propriedades das argamassas de revestimento nos estados fresco e endurecido e no período de uso, enfatizando a influência das características físicas da forma e da textura superficial do agregado miúdo no desempenho dos revestimentos de argamassa, é feita no Capítulo 2.

No Capítulo 3 são analisados os métodos e técnicas disponíveis na literatura para obtenção da forma e da área específica dos agregados miúdos, dando-se ênfase à análise de imagens, uma vez que esta foi a técnica escolhida para obtenção dos parâmetros de dimensões requeridos.

O Capítulo 4 apresenta a descrição da metodologia do trabalho experimental. É feita a caracterização do material através da granulometria (peneiramento), massa específica e análise mineralógica. Também são abordados os procedimentos adotados para a obtenção da forma e da textura superficial do agregado miúdo, através da morfoscopia e da análise de imagens, pelas várias etapas descritas no Capítulo 3.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados dos ensaios de forma e textura das areias estudadas, obtidos na análise morfoscópica (graus de esfericidade e de arredondamento), e dimensões máximas, dimensões mínimas, arredondamento, grau de esfericidade e diâmetros equivalentes obtidos na análise de imagens. Em seguida são calculadas as diversas áreas específicas em massa e em volume através das metodologias apresentadas no Capítulo 3, utilizando-se os parâmetros obtidos na análise de imagens

No Capítulo 6 constam as principais conclusões obtidas do programa experimental e comparados os diversos métodos, estabelecendo-se aquele que se apresentou como o de melhor caracterização do agregado miúdo no que se refere a forma e a textura superficial, além da área específica.

## **CAPÍTULO 2. ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

### **2.1 Conceitos**

A NBR 13529 (ABNT, 1995) define argamassa de revestimento como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento. Devido ao fato de esta definição ser muito ampla, as argamassas podem ser classificadas quanto à natureza do aglomerante, o tipo de aglomerante, o número de aglomerantes, as propriedades específicas, a sua função no revestimento e a forma de preparo ou fornecimento (TRISTÃO, 1995<sub>a</sub>).

O revestimento de argamassa é definido, segundo a NBR 13529 (ABNT, 1995), como o revestimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa apta a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final.

No que se refere aos agregados, a NBR 6502 (ABNT, 1995) define a areia como sendo solo não coesivo e não plástico, formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. Na NBR 7225 (ABNT, 1993) a areia tem a seguinte definição: material natural, de propriedades adequadas, de dimensão nominal máxima inferior a 2,00 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm.

Neste trabalho adotou-se a definição da NBR 7211 (ABNT, 1983), segundo o qual o agregado miúdo é areia de origem natural ou resultante de britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam na peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm.

No que se refere aos parâmetros texturais dos agregados, define-se textura como o conjunto de características físicas de tamanho, forma e aspecto ótico dos grãos, onde a forma é obtida pelos graus de arredondamento e de esfericidade e o aspecto ótico é função da textura superficial das partículas.

### **2.2 Função e desempenho das argamassas de revestimento**

A NBR 13749 (ABNT, 1996) especifica que os revestimentos de argamassa devem satisfazer algumas condições: serem compatíveis com o acabamento decorativo; terem resistência decrescente ou uniforme, a partir da primeira camada em contato com a base, sem comprometer a sua durabilidade ou acabamento final; serem constituídos por uma ou mais camadas superpostas de argamassas contínuas e uniformes; terem propriedade hidrofugante, em caso de revestimento externo sem pintura e base porosa; terem propriedade impermeabilizante, em caso de revestimento externo de superfícies em contato com o solo e resistirem à ação de variações normais de temperatura e umidade do meio, quando externos.

A ISO 6241 (1984) apresenta as necessidades dos usuários no que se refere ao desempenho das edificações. Desses critérios de desempenho do ponto de vista dos usuários finais, podem-se destacar a segurança estrutural, a estanqueidade, o conforto acústico e tátil, a adaptação ao uso, a durabilidade e a economia que se aplicam na avaliação dos revestimentos de argamassa. Além das exigências na fase de uso acima citadas, RAGO *et al.* (1994) apresentam algumas necessidades do ponto de vista do usuário construtor que são a adesão da argamassa fresca ao substrato, a facilidade de produção e o acabamento da argamassa, o tempo de aplicação e o desempenhamento, o risco de fissuração, o tempo disponível entre a mistura e a aplicação, o desperdício de material durante a aplicação e a adequação à estrutura produtiva da obra. Independente do material ou do uso dado, o revestimento deve se comportar de forma a atender às funções básicas de resistir, unir, vedar, regularizar e proteger (MARTINELLI & HELENE, 1991).

É importante ressaltar que não só as características das argamassas influenciam no comportamento dos revestimentos, mas também o substrato sobre o qual o revestimento será aplicado, bem como as condições de exposição. Essas variáveis estão fora da abrangência deste trabalho, devendo ser analisadas separadamente.

### 2.3 Propriedades das argamassas de revestimento

Diversos trabalhos científicos têm abordado as propriedades das argamassas para a análise do desempenho dos revestimentos.

TRISTÃO (1995<sub>b</sub>) apresenta uma listagem com as principais propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido, reproduzidas no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1: Principais propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido (TRISTÃO, 1995<sub>b</sub>)**

Propriedades no estado fresco	Propriedades no estado endurecido
Consistência e retenção de consistência	Resistência mecânica a compressão, tração e abrasão
Coesão	Resistência ao fogo
Tixotropia	Resistência a ataques químicos
Plasticidade	Capacidade de deformação
Retenção de água	Retração
Massa específica	Aderência
Teor de ar	Permeabilidade
Adesão inicial	Condutibilidade térmica
Trabalhabilidade	

CINCOTTO *et al.* (1995) citam que, para o completo entendimento das propriedades que determinam o desempenho das argamassas de revestimento, é preciso analisar o modo e as condições de produção, de exposição e de ação dos usuários e que a avaliação de algumas propriedades só pode ser feita em conjunto com a base de aplicação.

No Quadro 2.2 são apresentados os requisitos básicos de desempenho e as propriedades do revestimento e da base, de acordo com sua função.

**Quadro 2.2: Requisitos de desempenho e propriedades das argamassas de revestimento (CINCOTTO *et al.*, 1995)**

Requisitos básicos	Propriedades ou características da argamassa e da base imediatamente relacionadas
Segurança	Resistência mecânica (resistência à tração e compressão, resistência ao desgaste superficial - abrasão, resistência ao impacto, resistência ao fogo)
Habitabilidade	Estanqueidade à água, isolamento térmico e acústico
Compatibilidade com a base	Consistência, plasticidade, trabalhabilidade, aderência, permeabilidade
Compatibilidade entre materiais	Durabilidade

Nos itens que se seguem, apresentam-se as principais propriedades das argamassas no estado fresco, endurecido e no período de uso, enfatizando a influência das características do agregado miúdo naquelas.

## 2.4 Propriedades das argamassas no estado fresco

### 2.4.1 Consistência e retenção de consistência

Entende-se por consistência da argamassa no estado fresco a capacidade de resistir às deformações.

De acordo com a consistência, as argamassas podem ser classificadas em secas, plásticas ou fluidas. Na argamassa seca, devido à pouca presença de água na mistura, existe um maior contato entre os grãos de areia e entre estes e o aglomerante, resultando, assim, em um aumento do atrito entre os constituintes. Na argamassa considerada plástica, a pasta atua como lubrificante dos grãos, facilitando a sua movimentação relativa. Na argamassa fluida, há uma imersão dos grãos na pasta (CINCOTTO *et al.*, 1995). Argamassas nos estados plástico e fluido podem apresentar exsudação da água, influenciando a adesão à base e a trabalhabilidade (SELMO, 1989).

CINCOTTO *et al.* (1995) afirmam que os fatores que influenciam a consistência são a relação água/aglomerante, a relação aglomerante/areia, a granulometria da areia, a natureza e a qualidade do aglomerante.



No que diz respeito à influência do agregado sobre a consistência, pode-se dizer que esta relaciona-se com as dimensões, a distribuição granulométrica e a forma dos grãos, sendo particular a cada tipo de areia empregada (CINCOTTO *et al.*, 1995). Porém, não existem trabalhos conclusivos que quantifiquem a interferência da textura dos grãos nas propriedades das argamassas, exceto quanto à distribuição granulométrica.

Retenção de consistência é a mudança ocorrida na consistência da argamassa após perda de parte da água de amassamento, o que afeta a trabalhabilidade (TRISTÃO, 1995<sub>a</sub>).

Em seus estudos, TRISTÃO (1995<sub>a</sub>) verificou a retenção de consistência das argamassas nos traços 1:1:6 e 1:1:9 em volume, de acordo com o coeficiente de uniformidade<sup>2,1</sup> das areias utilizadas. Quando produzida com areia muito uniforme, a argamassa 1:1:6 apresentou maior retenção de consistência que a 1:2:9. Já no uso de areias com uniformidade média, observou-se uma inversão dessa relação, o que sugere que nas argamassas essa propriedade é muito influenciada pelo agregado. Ainda no que diz respeito à retenção de consistência, CARNEIRO (1999) concluiu que essa propriedade está relacionada ao aumento da continuidade da distribuição granulométrica das argamassas.

É importante mencionar que a distribuição granulométrica do agregado vai influenciar os volumes de vazios máximo e mínimo da areia, causando, uma variação da quantidade de aglomerantes requeridos na mistura.

#### **2.4.2 Coesão**

A coesão refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e às ligações químicas da pasta aglomerante. Essas forças internas se ampliam com o aumento dos teores de aglomerantes nas argamassas, sendo fortemente influenciadas pela finura dos aglomerantes (CALHAU, 2000). É essa coesão interna, resultante da tensão superficial dos materiais, que não permite a ocorrência de segregação dos agregados e o escorrimento da mistura quando aplicada à base, além de manter as deformações impostas pela execução.

#### **2.4.3 Tixotropia**

A tixotropia é a mudança da viscosidade do material quando se promove a agitação da massa, provocando o rompimento das ligações iônicas, fazendo com que haja uma mudança do estado sólido ou de pasta para o estado de gel. É o controle dessa propriedade que evita que a argamassa escoe quando lançada ao substrato.

---

<sup>2,1</sup> Quanto ao coeficiente de uniformidade, CAPUTO (1983) classifica as areias em muito uniformes ( $C_u < 5$ ), de uniformidade média ( $5 < C_u < 15$ ) e desuniformes ( $C_u > 15$ ).

Os fatores que influenciam a tixotropia são o teor de finos do cimento, da cal e as partículas finas da areia, juntamente com a quantidade de água empregada (BAUER *et al.*, 1997).

#### 2.4.4 Plasticidade

A plasticidade de uma argamassa pode ser definida como a propriedade de manter a deformação causada pela ação de forças externas, mesmo após cessadas essas cargas, permitindo que a argamassa deforme-se sem ruptura. Ao lado da consistência, é a principal propriedade, no estado fresco, capaz de expressar a trabalhabilidade da argamassa (RAGO & CINCOTTO, 1997).

Segundo SELMO (1989), a plasticidade das argamassas é função do teor de finos (inclusive aglomerantes) com dimensão inferior a 0,075 mm. São as partículas finas que melhoram a coesão interna da mistura, permitindo que a argamassa mantenha as deformações impostas pela execução, pois grãos menores apresentam maior força de tensão superficial.

CINCOTTO *et al.* (1995) apresentam uma classificação da plasticidade das argamassas (rica, média e pobre) de acordo com o conteúdo de finos menores do que 0,075 mm na mistura seca, conforme Quadro 2.3.

**Quadro 2.3: Plasticidade das argamassas em relação ao conteúdo de finos da mistura seca < 0,075 mm (Vargas e Comba *apud* CINCOTTO *et al.*, 1995)**

Plasticidade	% mínima de finos na mistura seca de uma argamassa	
	sem aditivo plastificante	com aditivo plastificante
Rica	> 25	> 20
Média	25 a 15	20 a 10
Pobre	< 15	< 10

#### 2.4.5 Retenção de água

Segundo TRISTÃO (1995<sub>a</sub>), a retenção de água é a capacidade da argamassa de reter a água de amassamento quando colocada em contato com uma superfície absorvente. Essa propriedade influencia algumas características do revestimento de argamassa, não só no estado fresco, como também no estado endurecido, como a evolução do endurecimento.

A retenção de água também influenciará a resistência de aderência e a resistência à penetração de umidade no revestimento (OLIVEIRA, 1989).

Segundo CARASEK (1996), os estudos sobre a influência da retenção de água das argamassas na aderência ainda não são conclusivos. Intuitivamente espera-se que para se obter bons resultados de resistência de aderência com tijolos de alta taxa de sucção de água (IRA), deve-se empregar argamassas com alta retenção de água, permitindo assim que a execução do serviço possa ser realizada de forma adequada durante um determinado período, propiciando extensão de aderência, bem como a suficiente hidratação do aglomerante.

### 2.4.6 Massa específica

Um material com determinada massa específica, tem sua massa unitária dependente do adensamento conferido ao material e, portanto, depende da forma e da distribuição de tamanho das partículas, que, por sua vez, está relacionada com a distribuição granulométrica da areia (CINCOTTO *et al.*, 1995).

A distribuição granulométrica, juntamente com a forma dos grãos e a composição mineralógica, determina o índice de vazios e a área específica (área superficial na unidade de massa) dos agregados miúdos (SELMO, 1986). Quanto mais uniformes forem as areias empregadas nas argamassas, maiores serão os índices de vazios máximo e mínimo e, conseqüentemente, menor será o valor da massa específica da mistura. Isso é comprovado pelos resultados obtidos por TRISTÃO (1995<sub>a</sub>), segundo os quais as argamassas produzidas com areias muito uniformes apresentaram menores massas específicas. A areia bem graduada (coeficiente de uniformidade = 18,92) apresentou uma massa específica de 2,222 kg/dm<sup>3</sup>, enquanto na areia uniforme (coeficiente de uniformidade = 1,4) a massa específica foi 1,967 kg/dm<sup>3</sup>. Além disso, argamassas produzidas com as mesmas areias, mas com traços diferentes, não apresentaram diferenças significativas.

Esses resultados são confirmados pelos ensaios feitos por CARNEIRO (1999), segundo os quais as massas específicas das argamassas ensaiadas aumentaram com o aumento da continuidade da distribuição granulométrica e do coeficiente de uniformidade.

### 2.4.7 Adesão inicial

O termo adesão denomina a união inicial da argamassa no estado plástico ao substrato e está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta (CARASEK, 1996). A maneira como ocorre a adesão inicial depende tanto da trabalhabilidade da argamassa quanto das características da base, como rugosidade, porosidade ou tratamento prévio que aumente a superfície de contato entre os materiais (CINCOTTO *et al.*, 1995).

### 2.4.8 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é difícil de ser definida, uma vez que envolve conceitos muito mais subjetivos do que físicos. Além das características que são inerentes à mistura, ela também está condicionada à preferência pessoal do pedreiro, à tradição construtiva e às propriedades do substrato (OLIVEIRA, 1989). Como é uma propriedade não mensurável, pode-se defini-la como a facilidade de se trabalhar com a argamassa.

No caso de revestimentos, TRISTÃO (1995<sub>a</sub>) coloca que essa propriedade pode ser traduzida como uma facilidade de acabamento superficial e uma adequada aderência ao substrato. Nota-se, então, que a trabalhabilidade é uma propriedade dependente de outras, tais como

consistência, plasticidade, retenção de água, tixotropia, coesão, exsudação, tempo de pega e adesão inicial.

Essa propriedade é amplamente influenciada pelas características dos agregados. Segundo SELMO (1989), o agregado miúdo bem graduado, com os vazios entre os grãos maiores preenchidos pelos grãos menores, contribui para a melhoria da trabalhabilidade. Já os finos de natureza siltosa ou argilosa são eficazes para aumentar a trabalhabilidade, em contrapartida, sua quantidade deve ser controlada para atender outras propriedades, tais como retração moderada de secagem e resistência mecânica. Apesar disso, SABBATINI (1986) relata que experiências práticas comprovam que argamassas executadas com areias possuindo até 30% de argila em massa apresentam melhor trabalhabilidade, sendo que a aderência e a resistência não são necessariamente prejudicadas. Argamassas executadas com areias com aquela porcentagem de argila contrariam a NBR 7200 (ABNT, 1998), que limita o teor de materiais de natureza argilosa em 5%, no máximo.

A forma dos grãos de silte presentes nas areias é questionável pois, se possuem predominantemente forma lamelar, era de se esperar que a trabalhabilidade fosse prejudicada e não melhorada, como colocado por SELMO (1989). No entanto, a explicação pode estar não na forma, mas na composição mineralógica e no tamanho dos grãos, que acabam funcionando como um lubrificante entre as partículas maiores.

CINCOTTO *et al.* (1995) afirmam que a trabalhabilidade é melhorada à medida que o módulo de finura do agregado e o teor de grãos angulosos decrescem e usa-se uma areia bem graduada. A presença de grãos arredondados, que possuem menores área específica e atrito interno que os grãos angulosos, confere à argamassa uma melhora na trabalhabilidade e na compacidade (SELMO, 1986).

BASÍLIO (1980) afirma que a trabalhabilidade, no caso do concreto, é influenciada pela área específica, uma vez que esta nos dá a indicação da quantidade de água de molhagem que a mistura requer. Pode-se supor então que, devido a maior área específica dos agregados miúdos, a trabalhabilidade da argamassa será muito mais influenciada que a do concreto. No Quadro 2.4, de caráter puramente ilustrativo, são apresentados os volumes de água de molhagem necessários, considerando-se apenas como fator interveniente os diâmetros das diversas frações.

**Quadro 2.4: Água de molhagem em função do diâmetro do agregado (Vallette *apud* BASÍLIO, 1980)**

Agregado (mm)	Água de molhagem (l/m <sup>3</sup> )
---------------	--------------------------------------

0,16 – 0,30	300
0,20 – 0,40	280
0,40 – 0,80	200
0,80 – 1,60	120
1,60 – 3,15	75
2,50 – 5,00	56
6,30 – 10,00	38
16,00 – 25,00	18
40,00 – 63,00	11
120,00 – 200,00	5

## 2.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido e dos revestimentos

### 2.5.1 Resistência mecânica - compressão, tração e desgaste superficial

A resistência mecânica das argamassas, apesar de não ser uma propriedade fundamental como é para o concreto, deve ser considerada pelo simples fato de que dela depende a elasticidade do revestimento e, por conseguinte, a durabilidade (TRISTÃO, 1995<sub>a</sub>).

Essa propriedade diz respeito à capacidade de resistência às tensões de tração, compressão ou cisalhamento às quais o revestimento pode estar sujeito e à tensão máxima que ele pode sofrer antes de atingir o colapso (CARNEIRO, 1999). A resistência mecânica e a elasticidade são propriedades que vão determinar o comportamento dos revestimentos quando solicitados (CINCOTTO *et al.*, 1995).

A resistência ao desgaste superficial ou à abrasão é influenciada pelo teor de aglomerante, pela granulometria, pelas natureza e resistência a abrasão do agregado, sendo especificamente prejudicial a presença de material de natureza argilosa no agregado (CINCOTTO *et al.*, 1995). Possivelmente ocasionado pela expansão do material de natureza argilosa.

Não só a constituição mineralógica faz com que os argilo-minerais tenham comportamento, na presença de água, diferenciado dos grãos de silte e areia, mas também pelo fato de possuírem elevada área específica, estes requerem uma maior quantidade de água, diminuindo a resistência à abrasão do revestimento, que se caracteriza por descolamento com pulverulência (SELMO, 1986). Segundo SELMO (1989), o excesso de areia fina pode diminuir a resistência à abrasão dos revestimentos. Um dos fatores pode ser a sua elevada área específica.

Segundo RAO (2001<sub>a</sub>), o tamanho do agregado e sua área específica têm papel significativo na resistência à compressão das argamassas para concreto. A resistência aumenta gradualmente e, em seguida, decresce à medida que o tamanho dos grãos e a superfície específica aumentam (Figura 2.1). A maior resistência observada foi em grãos com tamanhos variando de 1,50 mm

a 2,00 mm. É importante observar que a área superficial da partícula foi calculada assumindo o grão esférico e diâmetro igual à média da fração a qual pertence o agregado.

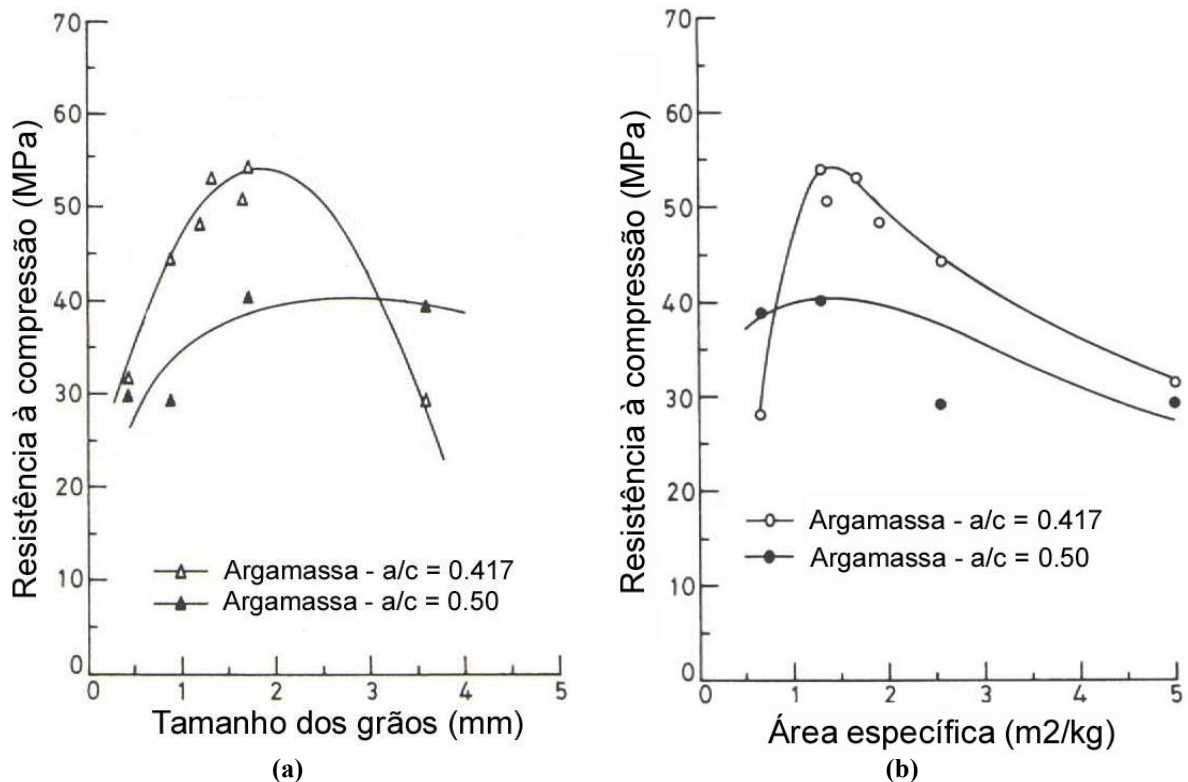


Figura 2.1: Variação da resistência à compressão de argamassas para concreto em função do tamanho (a) e da superfície específica (b) dos grãos de areia (adaptado de RAO, 2001<sub>a</sub>)

### 2.5.2 Módulo de deformação

Outra propriedade a ser considerada é o módulo de deformação, pois os revestimentos devem possuir a capacidade de deformar-se, absorvendo as variações dimensionais, sem romper ou fissurar.

FIORITO (1994) apresenta valores médios para o módulo de deformação das argamassas,  $E_A$ , ressaltando a sua variabilidade em função da composição da mistura.

- argamassas ricas, no traço 1:3, por exemplo -  $E_A = 14.000$  MPa
- argamassas no traço 1:5, por exemplo -  $E_A = 5.000$  MPa
- argamassas mais elásticas nos traços 1:1:8, 1:2:8 ou 1:3:12, por exemplo -  $E_A = 1.050$  MPa

Quanto mais bem graduada a areia maior será o seu módulo de deformação, o que ocorre em função do aumento da rigidez da estrutura interna da argamassa pelo empacotamento dos grãos (CARNEIRO, 1999).

A argamassa será tanto mais deformável quanto menor for seu módulo de deformação. O agregado possui um módulo de deformação,  $E_A$ , elevado (o quartzo possui  $E_A = 45.000$  MPa). Já as argamassas, dependendo do traço, possuem módulos de deformação que podem variar de 1.000 a 14.500 MPa. Disso resulta que as propriedades mecânicas da mistura serão governadas pelo aglomerante, pois o agregado é o material mais resistente do conjunto (PINTO, 1986).

### 2.5.3 Retração

A retração é um fenômeno de contração volumétrica da argamassa no estado fresco que ocorre devido à perda de água de amassamento por evaporação, para a base e também devido às reações de hidratação do cimento.

Esse fenômeno ocorre durante a pega e após o endurecimento da argamassa. No estado fresco, ele se dá pela saída de água da mistura e na argamassa endurecida, pela perda de água fisicamente aderida à parede dos vazios capilares da pasta (KOPSCHITZ *et al.*, 1997).

A presença do agregado miúdo diminui a fissuração devido à evaporação da água contida na pasta. Em contrapartida, quanto maior o índice de vazios e a área específica da areia, maior será o consumo de aglomerantes e água, podendo causar uma maior retração na secagem das argamassas.

As características das areias que vão influenciar essa propriedade são a granulometria, a finura e a forma geométrica do grão, que vão determinar a quantidade de água ou pasta aglomerante necessária na dosagem (BORTOLUZZO & LIBÓRIO, 1999). A escolha criteriosa do agregado permite, então, reduzir de maneira eficaz a retração de secagem das argamassas. Segundo SELMO (1989), a granulometria deve ser contínua para que o volume de vazios a ser preenchido pela pasta seja menor, diminuindo assim a retração da mistura.

FIORITO (1994) apresenta os resultados de ensaios de retração em 6 traços de argamassas. Desse estudo o autor concluiu que pode-se adotar para retração das argamassas o valor de 0,0006 mm/mm ou 6<sup>0</sup>/<sub>00</sub>, valor referente à média de três barras de argamassas com dimensões 25x25x280 mm, ensaiadas conforme a ASTM-C157. Esse ensaio é controverso, pois, devido à baixa resistência a tração das argamassas de revestimento torna-se difícil a desforma dos corpos de prova nas primeiras 48 horas.

Para a argamassa ainda no estado fresco, CARVALHO & CAVALCANTI JR (1997) observaram que o uso de argilas e saibros com elevado teor de finos aumentou a retração por secagem.

Mesmo após a secagem, e com mais de quatro meses de idade, notam-se variações dimensionais em função do grau higrométrico do ambiente (FIORITO, 1994).

RAO (2001<sub>b</sub>) concluiu que o tamanho do agregado miúdo nas argamassas de concreto tem grande influência na retração por secagem a longo prazo (cerca de 1095 dias), observando que o aumento no tamanho dos agregados miúdos reduz, de forma significativa, a retração por secagem última.

#### 2.5.4 Aderência

A aderência pode ser definida como a capacidade de resistência a tensões normais ou tangenciais à superfície de interface entre camadas e que ocorre devido à penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação (CARASEK, 1996). Essa propriedade não depende somente da argamassa, mas também das condições do substrato onde ela será aplicada.

A NBR 13749 (ABNT, 1996), que fixa as condições exigíveis para o recebimento de revestimento de argamassas aplicadas sobre paredes e tetos, apresenta os limites de resistência de aderência à tração para o emboço e camada única, conforme o Quadro 2.5. A norma não especifica, entretanto, os critérios de resistência de aderência à tração para o reboco, por julgar que o desempenho do mesmo pode não estar associado a essa característica.

**Quadro 2.5: Limites de resistência de aderência à tração ( $R_a$ ) para emboço e camada única, segundo a NBR 13749 (ABNT, 1996)**

Local		Acabamento	$R_a$ (MPa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,25$
		Cerâmica e laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
		Cerâmica	$\geq 0,30$
Teto			$\geq 0,20$

No que se refere aos agregados, a presença de grãos angulosos dificulta a trabalhabilidade, em contrapartida, proporciona superfície mais áspera, melhorando, com isso, a aderência. Grãos de mica, em grande quantidade nas areias, afetam desfavoravelmente a aderência, pois a sua forma lamelar resulta em lâminas orientadas paralelamente à base, pelo alisamento da argamassa, atuando como superfícies de descolamentos. Já os argilo-minerais em excesso podem prejudicar a aderência pasta-agregado, visto que tendem a recobrir os grãos de areia, resultando em pulverulência (SELMO, 1986). No entanto, não se tem encontrado trabalhos experimentais que comprovem essas afirmações.

Segundo SELMO (1989), em substratos de baixa absorção capilar, a resistência de aderência pode ser melhorada pela utilização de areia fina, afirmação comprovada por CINCOTTO *et al.* (1995) que observaram que a aderência das argamassas à base é melhorada com a presença de agregados de granulometria fina na mistura. Entretanto, CARASEK *et al.* (2001) afirmam



que areias muito finas, principalmente com partículas menores que 0,075 mm, prejudicam a aderência por dois fatores prováveis. O primeiro seria a substituição dos produtos de hidratação do cimento pelos grãos finos nos poros do substrato. A segunda hipótese, explicada pela teoria dos poros ativos, seria que grãos muito pequenos acarretariam a formação, na argamassa fresca, de poros menores que os do substrato, reduzindo a sua capacidade de sucção da pasta aglomerante.

CARASEK (1996) considera que, modificando-se as proporções aglomerante/agregado e a composição granulométrica da areia, pode-se alterar a porosidade da argamassa aumentando-se o número de poros ativos dos substratos, através da alteração dos raios médios dos capilares da argamassa.

Ao analisar o desempenho dos revestimentos de argamassa em obra, CANDIA & FRANCO (1998) concluíram que a cura nas primeiras idades tem significativa influência nos valores de aderência, observando ainda que argamassas com menores resistências à compressão correspondiam àquelas com menor resistência de aderência.

### **2.5.5 Permeabilidade**

Permeabilidade é a capacidade do material de permitir a percolação de água pelos seus vazios, característica que influencia muito as condições de habitabilidade da edificação.

Os fatores que influenciam a permeabilidade das argamassas são a granulometria do agregado, sua natureza e o teor de aglomerante. Essa propriedade é diretamente proporcional à relação água/aglomerante e inversamente proporcional à resistência da pasta (CINCOTTO *et al.*, 1995).

A permeabilidade também é função do grau de hidratação, sendo que quanto maior o grau de hidratação, maior será a resistência à passagem de água. RAO (2001<sub>a</sub>) afirma que a presença de areia nas argamassas age como redutor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  cristalizado e abaixa a permeabilidade da pasta de cimento.

A permeabilidade ocorre principalmente na zona de transição entre a pasta e o agregado. Sabe-se que a zona de transição é fraca e vulnerável à fissuração devido a esforços diferenciais entre a pasta do cimento e o agregado induzidos por retração de secagem, contração térmica e carga aplicada externamente (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Nas argamassas produzidas com areias finas, que implica em maior área específica, a quantidade de água é aumentada e, conseqüentemente, a relação água/cimento da pasta também, apesar de a areia fina melhorar a zona de transição. RAO (2001<sub>a</sub>) comenta que a espessura da zona de transição parece ser função do tamanho e da forma das partículas de areia não apresentando, entretanto, nenhum resultado experimental conclusivo.

No que se refere à absorção capilar, estudos realizados por BONIN *et al.* (1999<sub>b</sub>) em argamassas no traço 1:2:9, em volume, apontam que a influência da distribuição granulométrica do agregado é muito pequena.

### **2.5.6 Condutividade térmica**

A condutividade térmica do revestimento diz respeito à capacidade de isolamento térmico. Essa propriedade é influenciada pela composição e pela quantidade de matéria sólida, pela distribuição, pela geometria e dimensões dos poros e pelo teor de umidade contido no interior dos poros.

Essa propriedade é bastante influenciada pela composição mineralógica das areias. Os agregados de estrutura cristalina com poros interconectados conduzem mais calor do que os agregados de estrutura vítrea com poros em distribuição discreta (CINCOTTO *et al.*, 1995). No que se refere à mineralogia dos agregados, o fato de as areias serem compostas principalmente de quartzo, que possui estrutura vítrea, contribui favoravelmente para o isolamento térmico dos revestimentos.

### **2.5.7 Resistência a ataques químicos**

Os argilo-minerais expansivos, a pirita, a mica, as concreções ferruginosas e a matéria orgânica provenientes de impurezas contidas nos agregados podem causar reações expansivas. Os interstícios dos argilo-minerais, cujas camadas laminares podem ser ocupadas pela água, são considerados expansivos, ação que gera a alteração da estrutura cristalina. A pirita resulta em sulfatos e as concreções ferruginosas em óxido de ferro hidratado, de maior volume (CINCOTTO *et al.*, 1995).

A matéria orgânica, quando presente no agregado, vai interferir no processo de endurecimento do aglomerante, isto é, nas reações de hidratação do cimento e carbonatação da cal (CINCOTTO *et al.*, 1995).

A presença de sais solúveis pode alterar o endurecimento das argamassas e provocar eflorescência nos revestimentos em presença de umidade (SELMO, 1986).

## **2.6 Propriedades das argamassas no período de uso**

### **2.6.1 Durabilidade**

A durabilidade pode ser definida como a capacidade de resistência à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro mecanismo de deterioração, conservando sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposta ao seu meio ambiente (MEHTA, 1994).

A durabilidade não é propriedade única, mas sim o resultado de uma série de propriedades e fatores externos que caracterizam a capacidade do revestimento em desempenhar as funções para as quais foi especificada ao longo da vida útil da edificação.

O desempenho do revestimento com relação à durabilidade está ligado às seguintes propriedades: aderência, retração, permeabilidade, resistência mecânica e resistência ao congelamento (CINCOTTO *et al.*, 1995). Outro fator que influencia a durabilidade é a compatibilidade entre os materiais que compõem a argamassa e entre a argamassa e o substrato.

## 2.7 Conclusão

Diante do que foi exposto anteriormente, é notório que as características texturais das areias vão ter papel fundamental no desempenho dos revestimentos de argamassa, merecendo, então, estudos mais aprofundados do que apenas a análise granulométrica feita até então.

Para enfatizar a influência de outros parâmetros de caráter textural, apresenta-se o Quadro 2.6 que contém um resumo das principais características das areias que vão influenciar o desempenho e a durabilidade das argamassas de revestimento.

**Quadro 2.6: Características das areias que influenciam na durabilidade do revestimento de argamassa**

Propriedades	Característica das areias
Aderência	Angulosidade, presença de grãos de mica e argilo-minerais e granulometria
Retração	Granulometria, forma do grão e composição mineralógica
Permeabilidade	Teor de finos e presença de finos argilosos
Resistência mecânica	Granulometria, mineralogia e presença de argilo-minerais

### **CAPÍTULO 3. METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DA TEXTURA E DA ÁREA ESPECÍFICA DO AGREGADO MIÚDO**

Neste capítulo serão abordados os ensaios para obtenção das características texturais das areias, bem como as diversas metodologias existentes na literatura para cálculo das áreas específicas dos agregados miúdos ou dos parâmetros necessários para tal.

#### **3.1 Textura dos grãos de areia**

Na Geologia, algumas das principais propriedades dos sedimentos são: o tamanho, a forma (arredondamento e esfericidade), o aspecto ótico (textura superficial ou rugosidade) e a composição mineralógica. O principal fator que influi nas propriedades dos grãos é o agente transportador a que são submetidos, uma vez que o tamanho depende da velocidade e do meio de transporte. A forma relaciona-se, em grande parte, com a distância percorrida e o rigor e o meio do transporte. Já a textura superficial é devida às características do transporte (SUGUIO, 1973).

##### **3.1.1 Granulometria**

A granulometria é a medida dos tamanhos dos grãos de agregados. A determinação da composição granulométrica dos agregados é feita por peneiramento, de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987). Esse ensaio consiste em se fazer passar uma quantidade de material, previamente seco em estufa, através de uma série de peneiras, pesando-se o material retido. Para Engenharia Civil, usa-se a série de peneiras constantes no Quadro 3.1. Já na Geologia, as classes variam de acordo com o Quadro 3.2.

**Quadro 3.1: Peneiras usadas no ensaio de peneiramento, segundo metodologia da Engenharia Civil**

Série Normal	Série Intermediária
-	ABNT 6,3 mm
ABNT 4,8 mm	-
ABNT 2,4 mm	-
ABNT 1,2 mm	-
ABNT 0,6 mm	-
ABNT 0,3 mm	-
ABNT 0,015 mm	-

**Quadro 3.2: Peneiras usadas no ensaio de peneiramento, segundo metodologia da Geologia**

Abertura (mm)	Malha USBS <sup>3.1</sup>	Diâmetro Phi <sup>3.2</sup>
4,000	5	- 2,00
3,360	6	- 1,75
2,380	8	- 1,25
2,000	10	- 1,00
1,410	14	- 0,50
1,000	18	0,00
0,710	25	0,50
0,500	35	1,00
0,350	45	1,50
0,250	60	2,00
0,177	80	2,50
0,125	120	3,00
0,105	140	3,25
0,074	200	3,75
0,062	230	4,00
< 0,062	Fundo	> 4,00

Se todos os agregados fossem constituídos de partículas cujas formas fossem esferas perfeitas, a classificação por meio da análise granulométrica seria simples, pois as aberturas de malhas das peneiras corresponderiam ao diâmetro mínimo dos grãos retidos e ao diâmetro máximo dos grãos que passam por ela. Mas, de fato, tais partículas raramente possuem forma regular, além de possuírem formas diferentes.

É comum referir-se ao tamanho dos grãos através de diâmetros. Os mais comuns são o diâmetro máximo e o mínimo (abertura, em mm, da maior e da menor peneira da fração, respectivamente), diâmetro médio (média aritmética das aberturas das peneiras da fração), dimensão máxima característica (abertura de malha quadrada, em mm, cuja porcentagem retida acumulada é igual ou imediatamente inferior a 5% em massa), diâmetro de Feret (distância entre dois lados opostos da projeção da partícula em uma direção fixa) e diâmetro de Martin (tamanho da linha que divide a projeção da partícula em duas partes de áreas iguais).

O uso de diâmetros para representar tamanho de grãos é relativo, pois o termo diâmetro só se aplica a esferas perfeitas a partir das quais se pode calcular área ou volume do sólido. A abertura nominal da peneira é considerada como o “diâmetro” das partículas, tratando-se,

<sup>3</sup> <sup>1</sup> United States Bureau of Soils

<sup>3</sup> <sup>2</sup> O diâmetro Phi é adotado na Geologia para aproximar a distribuição granulométrica a uma normal e, a partir daí, poder aplicar as teorias estatísticas relativas (mediana, média, desvio-padrão e assimetria). O diâmetro Phi é calculado pela fórmula:  $\phi = -\log_2 (d/d_p)$ , onde  $d_p$  é o grão padrão com diâmetro de 1 mm (LEEDER, 1995).

evidentemente, de um “diâmetro equivalente”, pois as partículas não são esféricas. Além disso, a representação da granulometria através de diâmetros não permite obter nenhuma informação sobre a forma da partícula.

Na interpretação dos resultados de granulometria dos agregados por peneiramento, KWAN *et al.* (1999) alertam para que é preciso considerar que:

- partículas que passam pela peneira de malha quadrada podem ter uma dimensão maior que a abertura da malha. Na Figura 3.1<sub>a</sub> é possível observar que uma partícula de baixa esfericidade (alongada) com comprimento maior que a abertura da peneira pode passar através dela sem dificuldade. Nesse caso, a abertura da peneira é uma medida da dimensão lateral da partícula;
- partículas lamelares podem passar através da peneira, que é de malha quadrada, diagonalmente (Figura 3.1<sub>b</sub>). Nesse caso, a largura da partícula pode ser maior que a abertura, entretanto, tem que ser menor que a diagonal da abertura da malha.

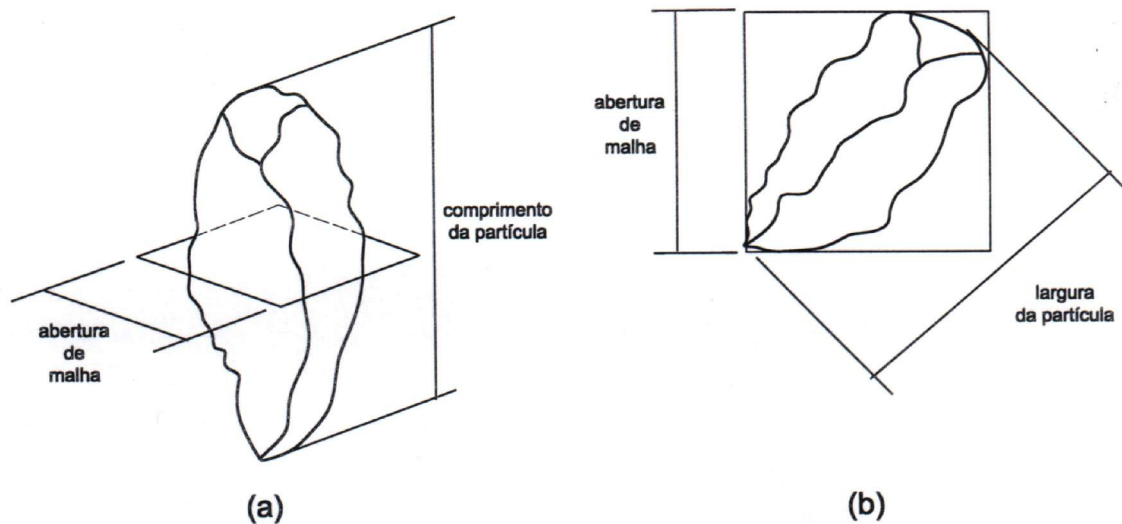


Figura 3.1: Partículas com comprimento (a) e largura (b) maiores que a abertura da malha da peneira (KWAN *et al.* 1999)

Segundo SCARLETT (1996), a representação por diâmetros estabelece uma relação linear de medida do tamanho da partícula, mas se as dimensões da partícula dobram, por exemplo, sua área aumenta em quatro vezes e o volume em oito vezes, enquanto que os diâmetros equivalentes de área e volume simplesmente dobram.

Ao analisar a influência da granulometria nas propriedades das argamassas, TRISTÃO (1995<sub>a</sub>) afirma que não existe uma boa correlação entre os resultados obtidos e o módulo de finura. O autor sugere a introdução dos coeficientes de Allen-Hazen (coeficientes de uniformidade) para avaliação da distribuição granulométrica em conjunto com o módulo de finura.

Os mesmos resultados são confirmados por CARNEIRO (1999), que concluiu que os parâmetros apropriados para estimar as características mecânicas das argamassas são a massa unitária da areia e o perfil da distribuição granulométrica, além do coeficiente de uniformidade.

Observa-se no meio científico uma grande preocupação com o estudo da influência do tamanho dos grãos de areia nas características das argamassas. ROMAN (1991) observou que as areias grossas tendem a aumentar a resistência à compressão das argamassas e as areias finas, apesar de reduzirem a resistência, aumentam a aderência ao substrato. Esse fato é confirmado por CARNEIRO (1999), que afirma que o aumento da dimensão característica dos grãos de areia acarreta uma melhora na resistência mecânica das argamassas.

Sabe-se que a relação água/cimento utilizada na mistura influencia propriedades como resistência mecânica, porosidade e absorção capilar. A obtenção da trabalhabilidade da argamassa sem o comprometimento dessas propriedades pode ser conseguida através de uma granulometria adequada das areias. BONIN *et al.* (1999<sub>a</sub>) afirmam que argamassas produzidas com areias não uniformes de maior massa unitária necessitam de menos água para atingir a consistência normal e as que utilizam areias mais finas precisam de mais água para atingir tal consistência.

Além do ensaio de peneiramento, é possível obter-se uma dimensão média representada pelo diâmetro de uma esfera com mesmo volume da partícula. Para isso, pode-se utilizar o deslocamento de fluidos. O procedimento se baseia na medida do volume médio de cada grão através do volume de líquido deslocado dividido pelo número conhecido de grãos imersos. Com o volume unitário e considerando-se o grão como tendo forma esférica, aplica-se a fórmula de volume para cálculo do diâmetro.

Utilizando-se a água como líquido deslocado, dois ensaios se apresentam: o frasco de Chapman e o ensaio do picnômetro, normalizados para cálculo da massa específica de agregado miúdo e de solo que passa na peneira de 4,8 mm, respectivamente.

Outro ensaio é o de deslocamento de mercúrio, que apresenta a vantagem de não ser absorvido pelo material a ser analisado. O diâmetro médio é obtido da mesma maneira que descrito anteriormente. Apesar de muito preciso, esse método se encontra proibido, uma vez que os vapores de mercúrio contaminam o ambiente, afetando a saúde de quem faz as medições (GUZZO, 1992).

SUGUIO (1980) afirma que a redução da granulometria por abrasão depende do tamanho original do sedimento, da dureza do material, da natureza da ação, do tamanho e da proporção dos materiais associados, da natureza dos materiais do leito e do tempo e distância da ação abrasiva. O referido autor conclui que a distribuição granulométrica está mais relacionada com o fator hidráulico do agente transportador, e a granulometria é herdada da rocha matriz ou é produto de desintegração e não resultado de processos de agentes transportadores. Segundo McLANE (1995), a forma e o tamanho dos grãos são determinados principalmente por processos que agem antes da sedimentação do material.

### **3.1.2 Forma e textura superficial**

O estudo das características dos agregados com base na análise granulométrica tem sido preocupação no meio científico. A bibliografia indica que, além do tamanho das partículas, é necessário ampliar os estudos analisando também a forma e a textura superficial dos grãos (SELMO, 1986; TRISTÃO, 1995<sub>a</sub>; ENTIN & NEFYODOVA, 1997; DÍAZ, 1998; CINCOTTO & CARNEIRO, 1999; KWAN *et al.*, 1999; GALLIAS *et al.*, 2000).

De acordo com a NBR 7389 (ABNT, 1992), a forma do grão é avaliada visualmente, seja a olho nu ou com o auxílio de lupa, através de comparação com uma figura contendo formas padrões de grãos (Figura 3.2). O resultado será obtido de acordo com o grau de esfericidade (alto ou baixo) e o grau de arredondamento (anguloso, subanguloso, subarredondado ou arredondado).





Figura 3.2: Av  
19

R 7389 (ABNT,

A superfície dos grãos, pela NBR 7389 (ABNT, 1992), deve ser descrita de acordo com a textura superficial, classificando-os em polidos, foscos ou rugosos. A ocorrência de películas de recobrimento ou impregnações deve ser observada.

Segundo SUGUIO (1980), a luz refletida é um indicativo de superfície lisa e polida e a difusão da luz indica superfície fosca (tipicamente relacionados às areias eólicas ou que sofreram ataque químico). O polimento é consequência do retrabalho de agentes abrasivos de granulação fina.

Cailleux *apud* SUGUIO (1980) indica que a maioria dos grãos de quartzo possui superfície polida em ambientes marinhos. Porém, em ambientes fluviais, apenas uma pequena parcela apresenta-se com superfície brilhante e polida.

O índice de forma mais comum é o grau de esfericidade, que dá a idéia de quão próximo o grão está de uma esfera, enquanto que o grau de arredondamento é uma medida do grau de curvatura dos cantos (pontas e arestas). O grau de arredondamento é independente da forma dos grãos (SUGUIO, 1980).

Segundo MENDES (1992), os grãos de areia das dunas eólicas costeiras mostram um grau de arredondamento mais elevado, seguido da areia de praia. Já as areias fluviais apresentam-se de angulares a subarredondadas. Para Suguio *apud* ALBINO (1992), a esfericidade está relacionada com a estrutura da rocha originária do sedimento e o arredondamento indica maturidade ou histórico erosivo.

RAO (2001<sub>a</sub>) afirma que quanto menores as partículas, mais próximas à forma esférica elas se encontrarão. Essa afirmativa será analisada posteriormente.

### 3.1.3 Análise morfoscópica

A morfoscopia é uma técnica empregada na Geologia para estudo da forma e da textura superficial de materiais granulares, permitindo avaliar o desgaste sofrido pelos grãos no processo de transporte, além de sua natureza (POPP, 1998).

Em conjunto com a análise granulométrica e a determinação do teor de materiais pesados, esse método permite uma boa caracterização dos sedimentos quanto às condições ambientais (ALBINO, 1992). Isoladamente, entretanto, os dados originados da análise morfoscópica são insuficientes para a compreensão do ambiente sedimentar, uma vez que é uma técnica exclusivamente descritiva, isto é, relata as propriedades da superfície dos grãos (MENDES, 1972).

Apesar do ensaio ter como objetivo a caracterização do ambiente de sedimentação e do agente transportador, os resultados de forma, tamanho e, principalmente, textura superficial, permitirão uma melhor correlação entre as características do agregado miúdo e a influência desses fatores na área específica das areias.

## 3.2 Análise de imagens

O termo análise de imagens se refere à análise computacional de imagens digitalizadas. A utilização desse método para observar forma e textura superficial dos agregados miúdos para argamassa permite uma maior rapidez e precisão, com uma melhor reprodução quando comparada às técnicas manuais.

Na opinião de CHERMANT (2001), com o desenvolvimento dos computadores pessoais e o progresso na aquisição, armazenamento e exibição das imagens e de novos algoritmos e programas, pesquisadores na área de engenharia civil devem usar a análise de imagens para caracterizar seus materiais através de um método estatístico pertinente. Nesse campo, a análise de imagens tem sido usada para avaliar o tamanho, a forma e a distribuição espacial de grãos e poros em solos arenosos, estudar a microestrutura do concreto, detectar falhas nos pavimentos, medir deformações estruturais e analisar condições de tráfego (KWAN *et al.*, 1999).

PERSSON (1998) ajustou o método de análise de imagens para cálculo da distribuição granulométrica dos agregados no concreto ou argamassa com o objetivo de investigar as diferenças na forma e no tamanho dos grãos e, posteriormente, relacioná-las com as propriedades reológicas da mistura, para sugerir um proporcionamento nos processos produtivos.

Atualmente, a análise de imagens inclui muitas classes de ferramentas, tais como tratamento de sinais, estereologia, reconhecimento de amostras e, algumas vezes, até inteligência artificial. Um dos maiores objetivos da estereologia é ter acesso a parâmetros tridimensionais, através de medidas no plano. A estereologia pode ser definida como o campo da matemática que relaciona parâmetros tridimensionais através de medidas bidimensionais obtidas de seções da estrutura (CHERMANT, 2001).

Segundo COSTER & CHERMANT (2001), ao se usar a técnica de análise de imagens, dois problemas podem surgir. O primeiro deles é a escala que está relacionada com o tamanho da imagem comparada com a estrutura analisada e a localização e posição da imagem, pois diferentes escalas de observação mostrarão características variadas do material, devendo, então, o campo de observação ser grande o suficiente para verificar as características gerais e o *pixel* (menor unidade de resolução) pequeno o bastante para observar os detalhes. O segundo são problemas estereológicos que são resolvidos com análises tridimensionais. Como geralmente isso não é possível em alguns materiais, então, parâmetros estereológicos e relações podem ser usados para obter as características tridimensionais de medidas no plano.

MORA *et al.* (1998) concordam que o principal problema da técnica do processamento digital das imagens é a impossibilidade de medida na terceira dimensão, impedindo a obtenção da espessura das partículas analisadas. Os referidos autores apresentam um método desenvolvido por Barksdale segundo o qual a espessura do grão pode ser estimada pela criação e medição de uma sombra através de iluminação específica. Entretanto, essa técnica pode ser dificultada pelo fato de exigir uma distância tal que permita a projeção da sombra entre as partículas.

O processo de análise de imagens é constituído de diversas etapas que, neste trabalho, serão tratadas separadamente, em ordem mais ou menos seqüencial (Figura 3.3), conforme descrito por GABAS (1999).

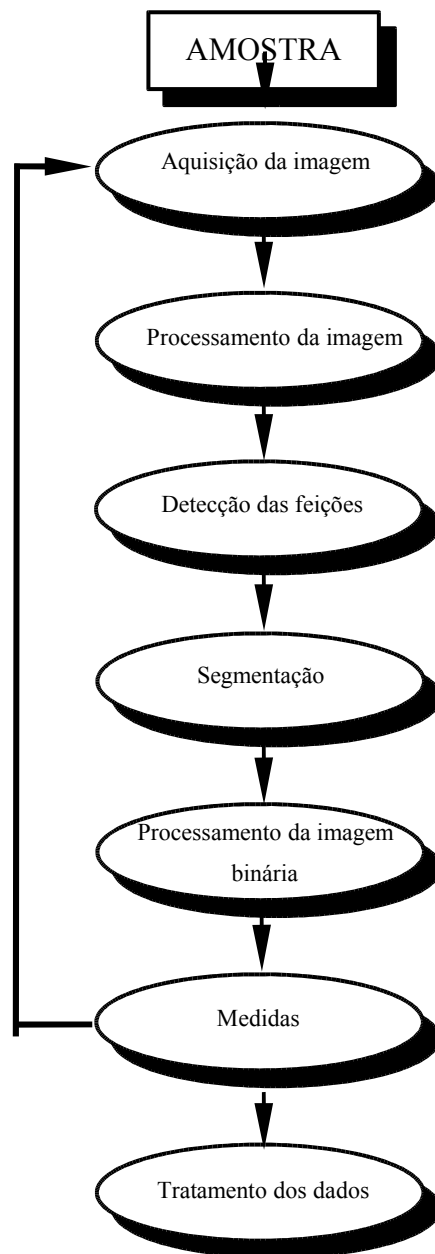


Figura 3.3: Etapas de análise de imagens (GABAS, 1999)

### 3.2.0.1 Aquisição da imagem

A aquisição da imagem é o processo através do qual a imagem real da amostra é digitalizada e armazenada no computador. A digitalização é o processo utilizado para transformar imagens, ilustrações, figuras e fotografias numa matriz numérica que possa ser processada pelo computador.

Cada ponto de imagem ou elemento de imagem é chamado de *pixel*. *Pixel* é um termo derivado de *picture element* e pode ser definido como a menor unidade de resolução, sendo

usualmente quadrado e possuindo um valor numérico que representa o brilho e as cores da imagem. É conveniente, porém incorreto, referir-se ao número de *pixels* como a resolução da imagem, pois esta está associada com a dimensão do *pixel* no campo da imagem (RUSS, 1990).

A captura da imagem pode ser feita por câmaras, lupas, microscópios e até telescópios, sendo que a escolha da melhor técnica vai depender do tipo de amostra e da informação desejada.

### 3.2.0.2 Processamento de imagem

O processamento de imagens nada mais é que o uso de ferramentas para melhorar a visualização ou detecção das feições de interesse<sup>3,3</sup>, corrigindo defeitos de iluminação e ruídos para se obterem medidas mais precisas. Pela ASTM E 1382 (1997), que trata da metodologia para obtenção do tamanho de grãos para uso na metalografia, o processamento de imagem é um termo genérico onde uma variedade de técnicas são usadas para realçar ou modificar o contraste, achar bordas e limpar imagens antes de realizar as medições.

O ruído pode ocorrer em função de *pixels* perdidos na aquisição da imagem, podendo-se resolver este problema com a sobreposição de várias imagens ou com o uso de filtros de mediana. No primeiro caso, os *pixels* destacados ocuparão localizações diferentes nas diversas imagens que quando sobrepostas assumirão valores médios de brilho, fazendo com que o ruído desapareça. Já no filtro de mediana, o novo valor de brilho é dado pelo valor da mediana do *pixel* central e de seus vizinhos, geralmente utilizando uma matriz 3 x 3 (GABAS, 1999).

O maior uso do processamento da imagem se dá na correção de defeitos de sombreamento e eliminação de ruídos provenientes da aquisição da imagem (GABAS, 1999).

Segundo RUSS (1990), o problema de sombreamento está associado a três fatores principais, que seriam a iluminação não uniforme, a incidência do feixe de luz formando ângulos e as irregularidades na própria amostra. Dependendo dos defeitos causados na imagem, tais ocorrências podem chegar ao extremo de condenar as tentativas de reconhecimento, seleção ou medida das bordas dos objetos analisados.

---

<sup>3</sup> <sup>3</sup> Definida como objeto, fase ou estrutura de interesse (RUSS, 1990).

### 3.2.0.3 Detecção das feições de interesse

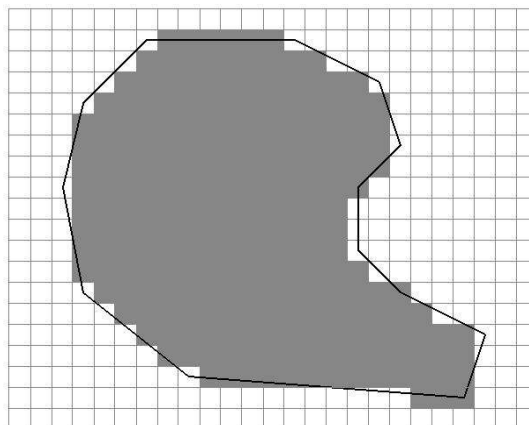
Discriminar e localizar as características de interesse é fundamental na técnica de análise de imagens. Feições de interesse não identificadas ou mal identificadas podem gerar medidas erradas que irão comprometer a qualidade dos resultados.

A operação é feita estabelecendo-se dois limiares de níveis de cinza, podendo ser realizada manual ou automaticamente. O *pixel*, cujo valor de cinza se encontra entre este limiar, é considerado como parte da característica de interesse, sendo que todos os outros pontos são considerados fundo. Em outras palavras, nessa etapa, objeto e base são separados para posterior medição (RUSS, 1990).

RUSS (1990) apresenta duas definições distintas para feição de interesse:

- a) uma região de *pixels* adjacentes que têm alguma propriedade em comum (*pixel representation*);
- b) uma região dentro de um limite ou adjacente a qualquer outra feição (*boundary representation*).

Na Figura 3.4 pode-se observar claramente a diferença entre as definições acima, sendo que a linha que contorna o objeto representa a definição de *pixel representation* e o objeto a definição de *boundary representation*.



**Figura 3.4: Representaç**

Ao final dessa op  
características previamente definidas pelos limiares adotados.

iria contendo apenas as

#### 3.2.0.4 Segmentação

A segmentação é a operação na qual se obtém uma definição de bordas e margens, pois para se reconhecer ou medir objetos é preciso primeiramente distingui-los do fundo. Segundo RUSS (1994), os operadores mais utilizados para melhoria das bordas e margens são o Laplace, o Robert, o Sobel e o Kirsch.

O operador Laplace melhora o realce da imagem utilizando uma matriz 3x3 ou maior. A matriz é simétrica e produz resultados nulos em regiões uniformes da imagem e valores diferentes de zero (positivos ou negativos) para bordas, linhas ou pontos (GABAS, 1999).

Como ferramenta de realce de borda, o operador Sobel é superior ao laplaciano, pois é mais sensível a bordas que a pontos. No que se refere a bordas fracas, o melhor operador é o de Kirsch, apesar de gastar um tempo maior na operação (RUSS, 1990).

YOUNG e FU (1986) consideram que os métodos de segmentação baseados no contorno e na região são os mais utilizados. O de contorno procura por descontinuidades locais (variações de intensidade) que são conectadas formando-se as bordas. No método de regiões, propriedades similares na imagem (*pixels* com intensidades ou cores semelhantes) são consideradas bordas. Os dois métodos são complementares e devem ser combinados para obtenção de resultados satisfatórios nessa etapa da análise da imagem.

Os métodos apresentados detectam pontos de bordas usando comparações locais entre os *pixels*, não garantindo a criação de linhas contínuas, o que pode ser um problema quando o objetivo é analisar contorno de grãos.

#### 3.2.0.5 Processamento da imagem binária

Após a detecção das feições de interesse, a imagem binária produzida pode ainda conter ruídos ou outras imperfeições. Quando isso acontece faz-se necessário manipular a imagem binária, que resulta em outra imagem binária.

O processamento de imagens binárias pode ser manual ou automático. No processamento manual o usuário pode intervir na tonalidade de cinza do *pixel* (*ON* ou *OFF*).

Neste tipo de processamento utilizam-se principalmente as operações lógicas booleanas (combinação de imagens) e as operações morfológicas (modificações dos *pixels* da imagem original).

Os operadores lógicos booleanos são *AND*, *OR*, *EX-OR* (*exclusive OR*) e *NOT*. Eles podem ser usados em qualquer combinação para obter-se a relação desejada (Figura 3.5).

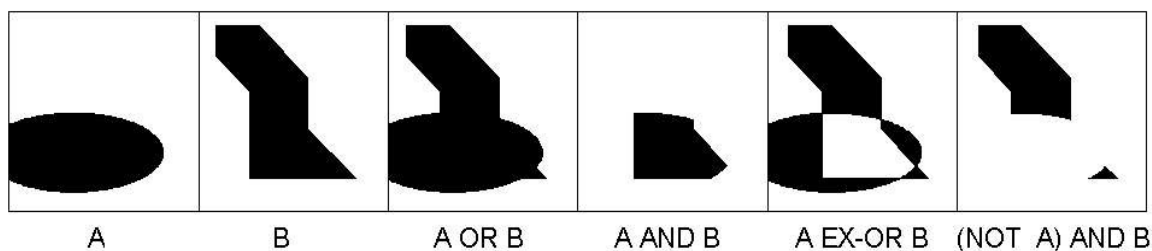


Figura 3.5: Exemplo de lógica booleana usada para combinar duas regiões (RUSS, 1990)

Nas operações morfológicas o valor de cada *pixel* na imagem resultante é baseado nos seus valores da imagem original e naqueles que o rodeiam. As operações mais importantes são dilatação (*dilation*) e erosão (*erosion*). Na dilatação adicionam-se *pixels* às bordas dos objetos, isto é trocam-se *pixels OFF* por *ON*, enquanto que na erosão trocam-se *ON* por *OFF*, de acordo com os *pixels* presentes na vizinhança, conforme Figura 3.6 (MATLAB, 1997).

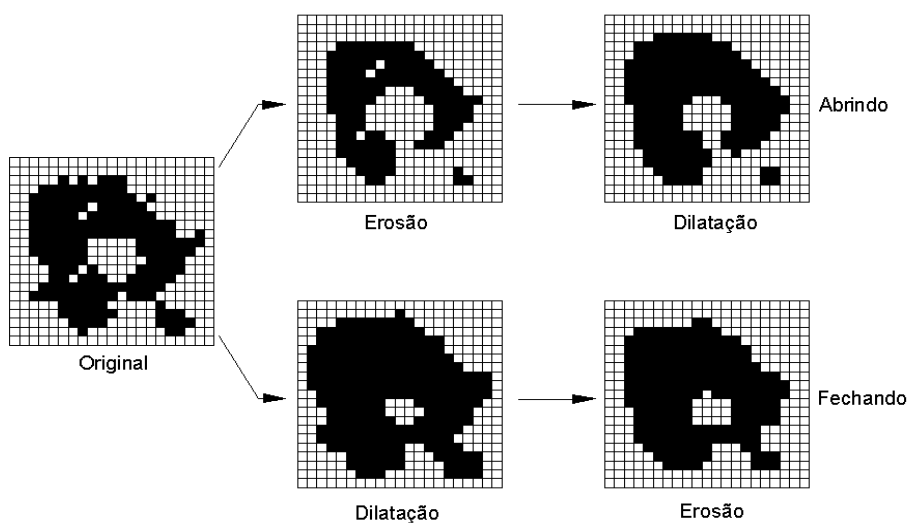


Figura 3.6: Exemplo de aplicação de operações morfológicas de erosão e dilatação (RUSS,1990).

Além das duas operações citadas acima, PRATT (1991) apresenta a esqueletização (*skeletonization*) como a terceira operação morfológica fundamental, da qual resulta uma linha de pontos equidistantes da borda da feição de interesse.



### 3.2.0.6 Medições

Nessa etapa são feitas as medições dos parâmetros a serem posteriormente tratados, que podem ser divididas em duas classes:

#### 3.2.0.6.1 Medições globais

São descrições dos parâmetros relativos a toda a amostra. As principais são fração de área (soma das áreas das feições de interesse dividida pela área total da amostra analisada, determinada apenas pela contagem dos *pixels*), fração volumétrica (razão da soma dos volumes das feições de interesse pelo volume total analisado) e número das feições de interesse (contagem da quantidade de parâmetros de interesse).

#### 3.2.0.6.2 Medições específicas

São informações sobre as características individuais e podem se referir ao tamanho, à forma e ao posicionamento.

- Medições relativas ao tamanho

*Área (S)* – é a medida de tamanho mais simples de ser obtida. Em uma representação por *pixels*, é o número deles contido na feição. Na representação por bordas, a área é calculada baseando-se no posicionamento da feição de acordo com os eixos X e Y.

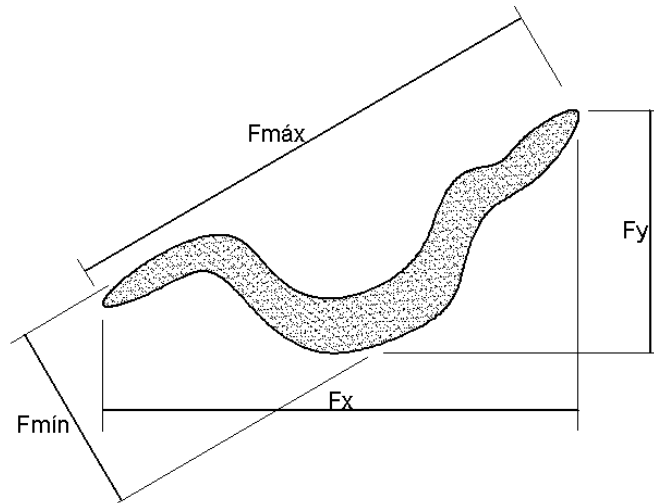
*Perímetro (P)* – é um parâmetro geométrico bem definido, onde são somados os comprimentos das distâncias de pontos sucessivos.

*Diâmetros (d)* – os diâmetros de Feret, também chamados de dimensões Caliper, são as distâncias entre duas tangentes em lados opostos da feição em direções fixas (Figura 3.7).

- Medições relativas a forma

*Fator de forma ( $F_f$ )* – é talvez o parâmetro mais usado e é dado pela relação

$$F_f = \frac{4\pi S}{P^2} \quad (3.1)$$



**Figura 3.7: Diâmetros**

Para círculos, o fator de forma é igual a 1, decrescendo para formas irregulares.

*Arredondamento* ( $A_r$ ) – é dado pela relação

$$A_r = \frac{4S}{\pi(d_{máx})^2} \quad (3.2)$$

Similar ao fator de forma, os círculos possuem arredondamento igual a 1 e as formas irregulares apresentam arredondamento menor que 1.

- Medições relativas ao posicionamento - a forma mais usual de se obter a posição da feição de interesse é a coordenada X e Y do centróide, que corresponde ao ponto mais próximo do centro da feição (RUSS, 1990).

### 3.2.0.7 Tratamento dos dados

Os parâmetros coletados na etapa anterior são armazenados em arquivo para posterior tratamento estatístico e análise.

A maior dificuldade na análise dos dados coletados é a necessidade de se obter características tridimensionais de medições feitas no plano. Surge, então, a estereologia como ferramenta para auxiliar estas análises.

### 3.2.1 Erros nas medidas utilizando a análise de imagens

MORA *et al.* (1998) sugerem que os grãos a serem ensaiados através da análise de imagens tenham tamanhos de, pelo menos, 10 *pixels*, para que se possa assegurar um erro máximo de 10% nas medidas. Entretanto, se várias partículas posicionadas aleatoriamente são analisadas, esta porcentagem é certamente menor. Para se manter o erro nas medições abaixo deste

percentual, neste estudo as dimensões dos grãos foram sempre maiores que 10 *pixels* e a aleatoriedade foi conseguida na preparação da amostra, conforme descrito no Capítulo 4.

Uma outra fonte de erro no valor da área específica diz respeito à forma do grão considerada no cálculo. CARR *et al.* (1992) observaram que o erro cometido ao caracterizar uma partícula esférica como cúbica e vice-versa é de aproximadamente 16%. Como as duas areias analisadas possuem forma próxima à esfera, pode-se afirmar que no cálculo da área específica em massa através da teoria dos fractais pela equação da esfera, o erro certamente é menor do que esta porcentagem.

### 3.3 Área específica

Pode-se definir área específica ou superfície específica como a área superficial do sólido na unidade de massa ou na unidade de volume. A NBR 7224 (ABNT, 1996) define como área específica do material em pó a medida da superfície total das partículas “A” por unidade de volume “V” ou massa “m”, denominadas, respectivamente, área específica em volume ( $A_V$ ) e área específica em massa ( $A_M$ ).

O cálculo das superfícies em sólidos regulares é bastante simples, bastando para tanto a aplicação de fórmulas matemáticas. Ao se transpor para o caso particular dos agregados, o cálculo da área superficial complica-se, devido à diversidade de tamanhos e a seus formatos irregulares.

BASÍLIO (1980) afirma que a área específica de um agregado influencia praticamente todas as propriedades do concreto, sendo que pequenas variações granulométricas no agregado miúdo podem acarretar mais diferenças no desempenho de uma mistura que uma grande alteração na granulometria do agregado graúdo.

BAUER (1992) apresenta uma relação entre a dimensão dos grãos e sua respectiva área específica, conforme pode ser observado no Quadro 3.3.

Ao analisar o efeito de materiais finos na quantidade de água requerida em pastas de cimento para concreto, GALLIAS *et al.* (2000) afirmam que é possível que minerais finos produzam uma significativa perda de trabalhabilidade ou aumento na quantidade de água e, conseqüente, decréscimo na densidade do concreto. Nesse mesmo artigo, os autores concluem que a quantidade de água requerida aumenta quando aumenta a área específica BET<sup>3,4</sup> ( $m^2/g$ ),

---

<sup>3,4</sup> Este método determina a área específica baseada na adsorção dos gases nas superfícies internas e externas de um material poroso (FAGERLUND, 1973).

entretanto, os resultados obtidos com as 14 misturas com minerais finos de diferentes origens, mineralogia e finura, não apresentaram uma tendência forte o suficiente para estimar a quantidade de água requerida para pastas de concreto com mistura de materiais finos.

**Quadro 3.3: Áreas específicas em função do diâmetro dos agregados, segundo BAUER (1992)**

Fração	Área específica, $A_M$ , (m <sup>2</sup> /kg)
10 – 20 $\mu\text{m}$	158,7
40 – 80 $\mu\text{m}$	39,6
0,6 – 1,2 mm	2,8
2,4 – 4,8 mm	0,7
38 – 76 mm	0,1

Usualmente, no proporcionamento das argamassas e concretos, os agregados miúdos são caracterizados, basicamente, por sua granulometria, não levando-se em consideração a forma e a rugosidade do mesmo.

Considera-se que apenas a análise da composição granulométrica não é suficiente para determinar as características das areias. Alguns ensaios são apresentados a seguir, na tentativa de quantificar a área exposta do agregado com uma maior precisão.

### **3.4 Análise de alguns métodos existentes para determinação da área superficial e da área específica dos grãos**

A seguir serão apresentados e comentados alguns métodos para obtenção da área específica dos grãos, desenvolvidos por diversos pesquisadores. É possível observar que a grande dificuldade encontra-se no cálculo da área superficial dos grãos, devido à variedade de forma e textura deles.

#### **3.4.1 Esfericidade do grão**

No estudo da forma das partículas dos agregados, observa-se uma tendência do meio acadêmico em considerar os grãos esféricos como forma de simplificação dos cálculos. Como as partículas muito dificilmente apresentarão essa forma geométrica regular, faz-se necessário conceituar esfericidade do grão, que é uma medida de forma.

A esfericidade possui diversas definições. Segundo McLANE (1995), originalmente a esfericidade foi definida por Wadel como sendo a razão entre o diâmetro de uma esfera de

mesmo volume que a partícula e o diâmetro da menor esfera circunscrita. Entretanto, o autor coloca que, de um ponto de vista prático, esse método não é muito usado. Além disso, SCARLETT (1996) afirma que duas partículas que possuem forma semelhante, mas com tamanhos diferentes, podem ter a mesma esfericidade descrita por Wadel, não sendo esse parâmetro isolado um bom fator para representar a forma da partícula.

MENDES (1972) define a esfericidade como a relação entre a área superficial da partícula e o seu volume, sendo que, numericamente, essa medida indica o quão próximo o grão está de uma esfera na qual os valores de x, y e z nos eixos ortogonais são iguais.

Outra definição é apresentada por MORA & KWAN (2000). De acordo com os autores, a esfericidade é a razão da área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula e a sua área real. Como a área superficial tem que ser avaliada tridimensionalmente, a análise de imagens não pode ser diretamente empregada. Já Ritenhouse *apud* CARR *et al.* (1990), define esfericidade como a relação entre o diâmetro do círculo com uma área igual à projeção da partícula e o diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula, podendo variar de 0 a 1, sendo que na prática esses valores vão de 0,45 (alongada) a 0,97 (muito esférica). Esse foi o método escolhido neste trabalho para cálculo da esfericidade, uma vez que os parâmetros podem ser obtidos diretamente da análise de imagens bidimensional.

Entretanto, LEEDER (1995) afirma que a melhor forma de calcular a esfericidade foi apresentada por Sneed e Folk, e é feita pela Equação 3.3:

$$\psi = (s^2/li)^{1/3} \quad (3.3)$$

McLANE (1995) apresenta, além do método citado acima, um outro, onde o cálculo da esfericidade é feito através da Equação 3.4:

$$\psi = (is/l^2)^{1/3} \quad (3.4)$$

onde:  $\psi$  = a máxima projeção de esfericidade; l, i e s = maior, intermediária e menor dimensões do grão, respectivamente.

Considerando que a partícula possui forma esférica, superfície lisa e que o diâmetro da esfera é a média aritmética da abertura das peneiras da fração, é possível calcular a área específica volumétrica ( $A_v$ ) e em massa ( $A_M$ ), conforme pode ser observado no Quadro 3.4. Esse quadro deve ser considerado como sendo apenas de caráter ilustrativo, pois é sabido que a textura

superficial e a forma vão influenciar muito na área superficial da partícula. Outro fator que deve ser observado é que o diâmetro médio das partículas não é simplesmente a média aritmética das frações. A coluna das áreas específicas em  $m^2/kg$  foi obtida dividindo-se os valores em volume pela massa específica do quartzo ( $2650 \text{ kg}/m^3$ ).

**Quadro 3.4: Áreas específicas volumétricas ( $A_V$ ) e em massa ( $A_M$ ), em função do diâmetro dos agregados miúdos.**

Diâmetro (mm)	Área específica, $A_V$ ( $m^2/m^3$ )	Área específica, $A_M$ ( $m^2/kg$ )
4,8 – 2,4	1.680	0,63
2,4 – 1,2	3.360	1,27
1,2 – 0,6	6.670	2,52
0,6 – 0,3	13.300	5,02
0,3 – 0,15	26.670	10,06
0,15 – 0,075	53.330	20,13

Para cálculo da superfície exposta do grão, partindo-se da consideração de que a partícula de areia é esférica, incorre-se em dois erros distintos. O primeiro deles é que, ao comparar-se uma elipse e uma esfera com mesmo volume, a elipse apresentará maior área superficial, pois a esfera é o sólido regular que apresenta a menor superfície para um dado volume. O segundo erro acontece ao desprezar-se a textura superficial do grão pois, ao comparar-se dois grãos esféricos de volumes iguais, sendo que um apresenta superfície lisa e o outro superfície áspera, é de se esperar que o grão com maior textura superficial tenha uma maior área exposta.

Segundo COUTINHO (1973), a área superficial de uma partícula pode atingir o triplo ou o quádruplo da área de uma esfera de volume correspondente, sendo esta variação atribuída à rugosidade da superfície do grão.

Por isso, calcular a área superficial partindo-se da consideração do grão esférico não nos permite uma boa aproximação. A vantagem desse método limita-se à simplificação do cálculo.

A área superficial, considerando-se o grão esférico e liso, foi calculada pela fórmula de área de uma esfera tomando-se em conta o diâmetro como o valor médio das dimensões máximas e mínimas obtidas no ensaio de análise de imagens. Para cálculo da área específica, simplesmente dividiu-se a área superficial de cada partícula pela sua massa.

### 3.4.2 Método de Edwards e London

Esse método, citado por COUTINHO (1973), consiste em separar a areia em frações e contar o número de grãos por unidade de massa em cada fração. De posse da quantidade de partículas e conhecendo-se a massa específica, é possível obter-se o diâmetro médio dos grãos,  $d_0$ . Edwards supôs que a área específica volumétrica seria dada pela Equação 3.5, hipótese correta quando se trata de uma esfera, visto que, se a área de uma esfera ( $S = \pi d_0^2$ ) for dividida pelo seu volume ( $V = \pi d_0^3/6$ ), obtém-se a Equação 3.5.

$$A_v = \frac{6}{d_0} \quad (3.5)$$

onde:  $d_0$  = diâmetro médio da fração (m).

O Método de Edwards foi adaptado por London que, ao invés de supor o diâmetro médio da fração como sendo a média aritmética, adotou a média geométrica das dimensões extremas da fração  $d_1/d_2$ . O cálculo da área específica volumétrica,  $A_v$ , passa a ser, então, obtido pela Equação 3.6:

$$A_v = \frac{6}{\sqrt{d_1 d_2}} \quad (3.6)$$

onde:  $d_1$  = diâmetro superior da fração (m); e  $d_2$  = diâmetro inferior da fração (m).

COUTINHO (1973) ressalta que essa expressão (Equação 3.6) dá resultados corretos quando  $d_1/d_2 \leq 2$ . Caso contrário, é preferível supor que o diâmetro médio da esfera seja  $0,71 d_1$ .

Para cálculo das áreas específicas volumétricas, considerou-se o diâmetro médio ( $d_0$ ) como a média aritmética das maiores e menores dimensões obtidas no ensaio de análise de imagens das respectivas frações e  $d_1$  e  $d_2$  como os valores médios das dimensões máximas e mínimas das frações, respectivamente.

### 3.4.3 Método Durriez e Arrambide

Esse método para cálculo da área específica foi desenvolvido pelos pesquisadores supracitados e apresentado por COUTINHO (1973). Nele a área específica de uma fração granulométrica  $d_1/d_2$ ,  $A_M$  (m<sup>2</sup>/kg) é calculada pela Equação 3.7:

$$A_M = \frac{2,5}{\sqrt{d_1 d_2}} \quad (3.7)$$

onde:  $d_1$  e  $d_2$  = diâmetros das partículas correspondentes à fração granulométrica analisada em mm

A Equação 3.7 só é válida para agregados cuja massa específica dos sólidos,  $\delta$ , é igual a 2,65. Se o material analisado possuir massa específica diferente de 2,65, faz-se necessário multiplicar a área específica por  $2,65/\delta$ , expressão deduzida para concreto betuminoso.

Durriez e Arrambide também são citados por CHAPIUS & LÉGARÉ (1992), propondo uma outra forma para calcular a área específica,  $A_M$  (m<sup>2</sup>/kg), tal que:

$$A_M = 135A + 12B + 2,3C \quad (3.8)$$

onde: A = porcentagem, em massa, da fração menor que 80  $\mu$ m; B = porcentagem, em massa, da fração entre 80  $\mu$ m e 0,315 mm; e C = porcentagem, em massa, da fração entre 0,315 e 0,50 mm.

Com os resultados das pesquisas feitas por Durriez e Arrambide, pode-se indicar que a área específica de materiais com dimensões entre 0 e 80  $\mu$ m é de aproximadamente 135 m<sup>2</sup>/kg.

### 3.4.4 Método Brosch e Souza

BROSCH & SOUZA (1965) avaliaram a área específica dos finos do minério de ferro, utilizando o permeabilímetro de Blaine (padronizado para medida de finura do cimento Portland, segundo a NBR 7224 (ABNT, 1996). A análise da área específica dos grãos do minério de ferro foi feita por um processo gráfico analítico, em que o aparelho foi calibrado e relacionado com a curva de sedimentação de uma amostra tomada como padrão.

Após ser determinada a área específica da amostra padrão, com base na sua curva de sedimentação no meio aquoso, a mesma característica pode ser avaliada em novas amostras,



através de um simples ensaio de permeabilidade. Para avaliação da área específica da amostra padrão, os autores utilizaram-se de dois métodos, um analítico e outro gráfico.

Conhecendo-se o número exato de grãos da fração, pode-se calcular analiticamente a área específica,  $A_M$  (cm<sup>2</sup>/g), através da Equação 3.9:

$$A_M = \frac{\pi \sum_{i=1}^m n_i d_i^2}{M} \quad (3.9)$$

onde:  $n_i$  = número de grãos de diâmetro  $d_i$ ;  $d_i$  = diâmetro dos grãos (cm); e  $M$  = massa dos  $n$  grãos de diâmetro  $d$  (g).

A somatória foi obtida pela multiplicação do número conhecido de grãos pelo quadrado do diâmetro médio, em cm, da análise de imagens. Para tanto, foram contados e pesados 800 partículas de cada fração das duas areias analisadas.

Caso não seja possível contar o número de grãos de diâmetro  $d_i$ , a obtenção da área específica,  $A_M$  (cm<sup>2</sup>/g), pode ser feita através da fórmula:

$$A_M = \frac{6}{\rho} \sum_{i=1}^m \frac{1}{d_i} x \frac{v_i}{V_r} \quad (3.10)$$

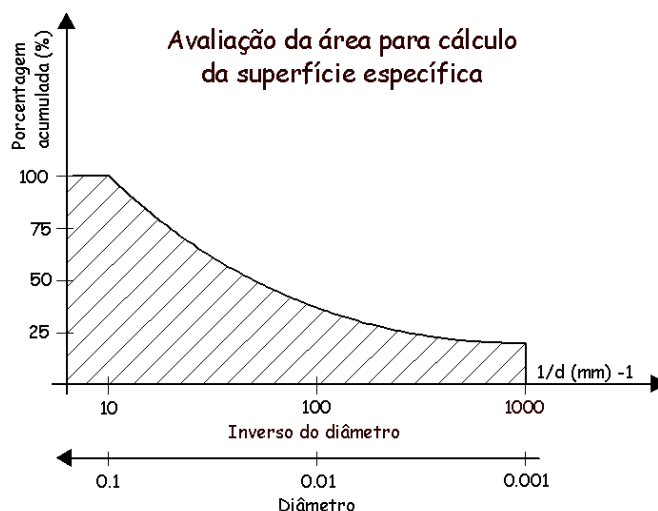
onde:  $\rho$  = densidade dos grãos;  $d_i$  = diâmetro dos grãos (cm); e  $v_i/V_r$  = teor volumétrico ou relação entre o volume parcial de grãos de mesmo diâmetro e volume total dos grãos.

A avaliação gráfica da área específica pode ser feita representando-se um sistema de eixos ortogonais, sendo que na abscissa são colocados os valores  $1/d$  e na ordenada os valores das

porcentagens acumuladas do material. A área sob a curva fornece o valor de  $\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_i} x \frac{v_i}{V_r} = S$ .

Ou seja, a área específica é dada pela expressão  $A_M = \frac{6}{\rho} S$ . A Figura 3.8 representa a área para cálculo da área específica.

**Figura 3.8: Gráfico relacionando o inverso do diâmetro das partículas com as porcentagens acumuladas (BROSCH & SOUZA, 1965)**



Esses autores alertam que para o cálculo gráfico das áreas é necessário aplicar os módulos  $m_1$  e  $m_2$  das escalas das abscissas e das ordenadas, sendo a fórmula expressa através da Equação 3.11:

$$A_M = \frac{6}{\rho} S m_1 m_2 \quad (3.11)$$

Nesses cálculos é imprescindível admitir constante a densidade do material para que os valores volumétricos sejam proporcionais aos teores gravimétricos.

Nas discussões do trabalho, Brosch argumenta que: *"a forma do grão de minério tem grande importância na avaliação da superfície específica. Todas essas fórmulas foram deduzidas, admitindo-se o grão esférico. Quando o grão não for esférico e sim alongado, o valor encontrado precisa ser corrigido por um fator, muitas vezes grande[...], podendo chegar a ser 2 ou 3"*. O autor complementa que deve ser utilizado um fator de correção para calcular a área específica, quando o grão não for equidimensional.

### 3.4.5 Método do permeabilímetro de Blaine

A NBR 7224 (ABNT, 1996) apresenta o método de ensaio para determinação da área específica do cimento Portland e outros materiais em pó, exclusivamente pelo emprego do permeabilímetro de Blaine. Através desse ensaio é possível se obter a finura de materiais em pó pela medição do tempo requerido para passagem do ar pela massa do material. É um método comparativo, o que requer uma amostra de área específica conhecida para calibração do aparelho. O cálculo da área específica em massa,  $A_M$  ( $m^2/kg$ ), é feito pela expressão:

$$A_M = \frac{k\sqrt{\varepsilon^2} \sqrt{t}}{\delta(1-\varepsilon)\sqrt{\eta}} \quad (3.12)$$

Já a área específica em volume,  $A_V$  ( $m^{-1}$ ), é dada pela expressão:

$$A_V = \delta A_M \quad (3.13)$$

onde:  $k$  = constante do aparelho ( $\sqrt{Pa}/m$ );  $\varepsilon$  = porosidade da camada;  $t$  = tempo (s); e  $\delta$  = massa específica dos grãos ( $mg/m^3$ );  $\eta$  = viscosidade dinâmica do ar.

A aplicação desse método para grãos relativamente maiores, como é o caso do agregado miúdo, pode ocasionar um tempo de passagem do ar tão curto que a sua medição ficaria impossibilitada.

### 3.4.6 Método proposto por Chapius e Légaré

Um método analítico simples para cálculo da área específica de grãos, com base apenas na porcentagem de material retido nas frações e no peso específico aparente das partículas, é proposto por CHAPIUS & LÉGARÉ (1992). É importante ressaltar que no desenvolvimento desse método não se leva em consideração a forma do grão. O método calcula a área específica,  $A_M$  ( $m^2/kg$ ), através da fórmula:

$$A_M = \left(\frac{6}{\rho}\right) \sum \left[ \frac{(P_{N_{od_1}} - P_{N_{od_2}})}{d_2} \right] \quad (3.14)$$

onde:  $(P_{N_{od_1}} - P_{N_{od_2}})$  = porcentagem, em peso, da fração compreendida entre as peneiras de abertura  $d_1$  e  $d_2$ ;  $\rho$  = densidade dos grãos ( $kg/m^3$ ); e  $d_2$  = abertura da peneira (mm).

Os cálculos das áreas específicas das frações foram feitos usando-se as massas específicas das frações obtidas pelo picnômetro e considerando-se as porcentagens de material retida nas peneiras em 100%.

### 3.4.7 Teoria dos fractais

Fractal é um termo usado na geometria para descrever a forma de um objeto que não possui uma topologia ideal. A geometria fractal é uma ferramenta matemática para lidar com

sistemas complexos que não têm características próprias a escalas diferentes. Um exemplo típico de um fractal é o perfil de um litoral. Ao se analisar este perfil a diferentes escalas, com 1 cm igual a 0,1 km e 10km, por exemplo, não é possível dizer, sem indicação, que escala pertence a que figura, pois as mesmas parecem iguais (BUNDE & HAVLIN, 1995).

O conceito dos fractais foi inicialmente proposto por Mandelbrot *apud* CARR *et al.* (1990), para calcular a distância entre dois pontos situados na costa da Grã-Bretanha, que é muito irregular. O conceito é bastante simples. No cálculo da distância, L, entre os dois pontos, utilizando-se uma régua de tamanho arbitrário y, e começando-se a medida do ponto A, a régua é colocada no final de cada segmento até chegar ao ponto B. O valor encontrado será obtido pela expressão (CARR *et al.*, 1990):

$$L = Ny + f \quad (3.15)$$

onde: N = número de segmentos de tamanho y; y = tamanho dos segmentos; e f = tamanho do último segmento (fração do segmento).

Se uma régua de tamanho menor for usada para repetir a mesma distância, esta será maior do que a anterior, pois mais detalhes da costa serão considerados.

Na descrição da geometria do agregado usando o conceito dos fractais, espera-se desenvolver um método quantitativo para caracterização da forma do agregado para concreto e argamassa que seja mais facilmente aplicável (CARR *et al.* 1990).

Um método empírico para estimativa da área superficial do agregado com base na dimensão fractal é apresentado por CARR *et al.* (1992). A partir da Equação 3.15, esses autores desenvolveram equações específicas para cálculo de agregados de formas esféricas, cúbicas e piramidais:

$$\text{Área} = \frac{[(N + f / y)y^{Df}]^2}{\pi} \quad [\text{esféricas}] \quad (3.16)$$

$$\text{Área} = \frac{3[(N + f / y)y^{Df}]^2}{8} \quad [\text{cúbicas}] \quad (3.17)$$

$$\text{Área} = \frac{[(N + f / y)y^{Df}]^2}{3\sqrt{3}} \quad [\text{piramidais}] \quad (3.18)$$

onde:  $D_f$  = dimensão fractal; e  $(N+f/y)y^{D_f}$  = perímetro da partícula

Para cálculo da área superficial dos agregados, considerou-se o perímetro como o valor médio das diversas frações, obtido na análise de imagens.

Para cálculo da superfície específica através dos fractais, dividiram-se as áreas superficiais das partículas, pela massa média das mesmas nas diversas frações.

HYSLIP & VALLEJO (1997) apresentam um método denominado área-perímetro para a avaliação da rugosidade de materiais granulares a partir da dimensão fractal de rugosidade ( $D_R$ ), obtida pela equação:

$$D_R = 2/m \quad (3.19)$$

onde:  $m$  = coeficiente angular ou inclinação da reta (log área / log perímetro)

Para avaliação da correlação entre  $D_R$  e a rugosidade das areias, os referidos autores utilizaram a técnica de análise de imagens para obtenção dos parâmetros necessários (área e perímetro da projeção das partículas). Os resultados indicam uma tendência de areias mais rugosas apresentarem  $D_R$  maiores. SCARLETT (1996) também concorda que maiores valores de  $D_R$  implicam em amostras mais rugosas.

### 3.5 Conclusão

Em função das vantagens anteriormente colocadas, a análise de imagens foi o método escolhido para a obtenção dos parâmetros requeridos no cálculo das áreas específicas de acordo com as diversas metodologias apresentadas.

É de se esperar que a técnica de análise de imagens, aliada à teoria dos fractais, venha a dar resultados de áreas específicas maiores que o dos outros métodos, visto que, neste caso, são consideradas tanto forma quanto textura superficial dos grãos de areia nos cálculos.

## **CAPÍTULO 4. ESTUDO EXPERIMENTAL**

Segundo CERVO & BERVIAN (1996), existem basicamente três tipos de pesquisa: a bibliográfica, a descritiva e a experimental. Neste trabalho foram usadas as pesquisas bibliográfica e experimental. A primeira possibilitou o enquadramento do tema no contexto de pesquisas anteriores e a segunda auxiliou na obtenção e análise das variáveis e parâmetros, permitindo tirar conclusões sobre as metodologias mais eficazes para se conseguirem a forma e a área específica dos grãos das areias estudadas.

No estudo de uma metodologia de dosagem das argamassas é imprescindível conhecer as características dos constituintes, em particular das areias, que compõem cerca de 80% da mistura.

Nos estudos de avaliação da forma e textura dos grãos, não se utilizou um programa específico para este fim, e sim uma série de programas amplamente utilizados comercialmente e facilmente encontrados, cuja seqüência, descrita a seguir, possibilitou a realização das medições necessárias para o desenvolvimento da metodologia de análise.

### **4.1 Areias utilizadas**

Como o objetivo desta pesquisa foi analisar a superfície específica dos grãos, optou-se pelo uso de duas areias com grãos consideradas no meio acadêmico como tendo formas e texturas superficiais diferentes e de ampla comercialização no mercado da construção civil na Grande Vitória - ES. As supostas diferenças baseiam-se no retrabalho exercido pelo agente transportador<sup>4.1</sup> e nas características do ambiente de sedimentação.

A primeira amostra é de rio e foi extraída do Rio Doce, no município de Colatina - ES, sendo a coleta feita em Vitória - ES, para onde a areia é transportada por via férrea, para ser comercializada. A outra amostra é proveniente de jazida próxima à praia e foi coletada na região da Barra do Jucu, no município de Vila Velha - ES. No comércio da Grande Vitória essa areia é conhecida como areia de jazida.

Neste trabalho, a areia proveniente do Rio Doce denominou-se de AR e a da Barra do Jucu foi denominada AJ.

---

<sup>4.1</sup> Agente que carrega o solo para um local diferente de sua formação.

## 4.2 Ensaios de caracterização das areias

### 4.2.1 Granulometria

A medida do tamanho dos grãos foi feita através da medição das dimensões máximas e mínimas, empregando a técnica de análise de imagens. Já a análise granulométrica do material foi feita de acordo como ensaio de peneiramento usando as séries de peneiras da Geologia e da Engenharia Civil.

### 4.2.2 Massa específica

Para determinação da massa específica do material, realizaram-se dois ensaios: o frasco de Chapman e o do picnômetro.

A determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman é normalizada pela NBR 9776 (ABNT, 1987).

O ensaio consiste em medir o volume de líquido deslocado por 500 g de material previamente seco em estufa. Com o frasco contendo 200 cm<sup>3</sup> de água, adiciona-se o agregado miúdo cuidadosamente para que não respingue nas paredes do recipiente. Agita-se o conjunto para eliminar as possíveis bolhas de ar aderidas aos grãos. Faz-se, então, a nova leitura do volume de água + agregado miúdo. A massa específica do agregado miúdo,  $\delta$  (g/cm<sup>3</sup>), será dada pela fórmula:

$$\delta = \frac{500}{Lf - 200} \quad (4.1)$$

onde: Lf = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água + agregado miúdo).

A norma recomenda que sejam feitas duas determinações consecutivas com amostras do mesmo agregado miúdo, sendo que os resultados não devem diferir entre si em mais de 0,05 g/cm<sup>3</sup>. O resultado deve ser expresso em 3 algarismos significativos.

Além do ensaio com o frasco de Chapman, a massa específica da areia foi avaliada também pelo picnômetro, ensaio muito usado em Geotecnia para avaliação da massa específica dos sólidos que passam na peneira 4,8 mm.

O ensaio para avaliação da massa específica pelo picnômetro é normalizada pela NBR 6508 (ABNT, 1984) e consiste em determinar o volume deslocado pelo material, através da diferença de massa do recipiente com e sem a areia.

A metodologia do ensaio consiste em se colocar uma certa quantidade de solo ( $M_1$ ) no picnômetro com água destilada suficiente para cobrir os grãos. Com o restante do material determina-se a umidade inicial da amostra. O conjunto é colocado em banho-maria por 30 minutos para que as bolhas de ar aderidas aos grãos se soltem. Para tanto, deve-se mexer o recipiente esporadicamente e ter o cuidado de adicionar mais água destilada para compensar a que foi perdida por evaporação.

Após o banho-maria, o conjunto é deixado em repouso para esfriar até chegar à temperatura ambiente. Ao estabilizar a temperatura, completa-se o recipiente com água destilada e coloca-se a tampa, enxugando-se a parte externa do picnômetro. O conjunto (picnômetro + solo + água) é pesado obtendo-se  $M_2$ . A seguir, determina-se a temperatura  $T$  do conteúdo do picnômetro. Com esta temperatura obtém-se a massa do picnômetro cheio de água na curva de calibração ( $M_3$ ). A massa específica dos grãos de solo,  $\delta$  ( $\text{g/cm}^3$ ) é calculada através da fórmula:

$$\delta = \frac{M_1 \times 100 / (100 + h)}{\left[ M_1 \times 100 / (100 + h) \right] + M_3 - M_2} \times \delta_T \quad (4.2)$$

onde:  $M_1$  = massa do solo úmido;  $M_2$  = massa do picnômetro + solo + água, na temperatura  $T$  de ensaio;  $M_3$  = massa do picnômetro cheio de água, na temperatura  $T$  de ensaio;  $h$  = umidade inicial da amostra; e  $\delta_T$  = massa específica da água, na temperatura  $T$  de ensaio, obtida no anexo da norma.

A norma recomenda usar aproximadamente 60 g de areia no picnômetro de 500 ml. O resultado final é a média de pelo menos dois ensaios, que não tenham diferido mais do que  $0,02 \text{ g/cm}^3$ , expressa com três algarismos significativos, em  $\text{g/cm}^3$ .

Devido à granulometria da areia AR, que possui 99% do material com dimensões maior que 0,177 mm, não foi possível obter a quantidade de material necessária à execução do ensaio com o frasco de Chapman da menor fração (0,15-0,075 mm). Em função desse fator, resolveu-se, então, usar o ensaio com o picnômetro, pois a quantidade de material requerida é bem menor (cerca de 10 g para cada medição).

#### 4.2.3 Análise mineralógica

A análise mineralógica é feita de acordo com a NBR 7389 (ABNT, 1992), sendo discriminados os minerais observados com auxílio de lupa binocular. A norma sugere que a



análise seja feita por profissional habilitado, com um número mínimo de 500 grãos de cada fração, como garantia de representatividade de todas as frações.

### **4.3 Metodologias de ensaio para análise da forma e da textura superficial das partículas**

Para a análise da forma e da textura superficial das areias ensaiadas foram utilizadas duas metodologias distintas. A primeira foi a morfoscopia, utilizada na sedimentologia para obter o grau de esfericidade e o grau de arredondamento dos sedimentos. A outra foi a análise de imagens, que permite obter a maioria dos parâmetros necessários para cálculo da esfericidade do grão e da área específica.

#### **4.3.1 Morfoscopia**

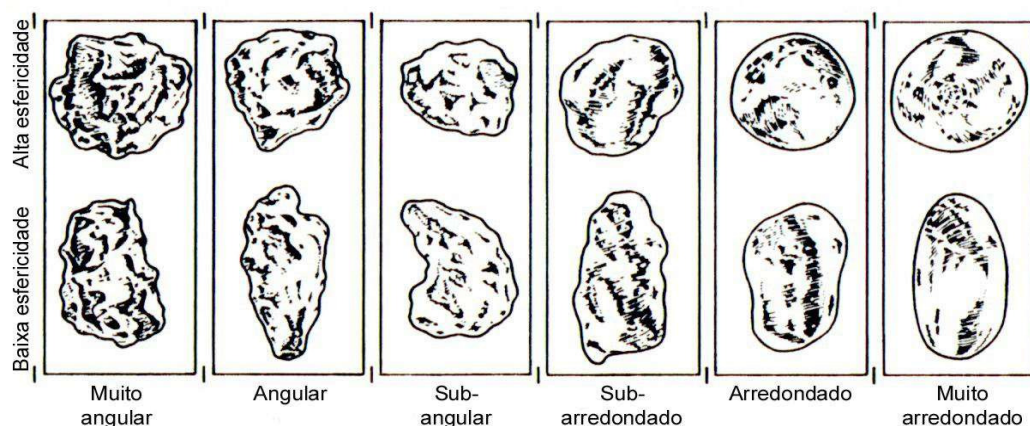
No presente trabalho, a análise morfoscópica será empregada com o objetivo de auxiliar a caracterização das areias ensaiadas no que diz respeito a forma e a textura superficial dos grãos.

Antes de proceder-se à análise morfoscópica propriamente dita, o material a ser ensaiado passa por um processo de preparação e separação em frações (análise granulométrica). Os sedimentos, ao chegarem ao laboratório, são lavados (para eliminação dos sais presentes), passam por um processo de secagem em estufa (aproximadamente 24 horas) e quarteamento (para redução da amostra). Do material quarteado separam-se 50 gramas, que serão usados na análise granulométrica e, posteriormente, na morfoscopia.

A análise granulométrica é feita pelo processo de peneiramento mecânico durante 15 minutos com o conjunto de peneiras listadas no Quadro 3.2. O material retido nas peneiras é pesado para cálculo da porcentagem de areia em cada fração.

Com o sedimento separado nas respectivas frações, passa-se à análise morfoscópica. Neste ensaio, os grãos de areia foram classificados de acordo com a textura superficial e a esfericidade, em função das características individuais das partículas.

O ensaio de análise morfoscópica foi feito observando-se 25 grãos de cada fração, escolhidos aleatoriamente, através de uma lupa e classificando-os, por comparação, a partir de uma imagem padrão de desgaste superficial e forma, reproduzida na Figura 4.1. Os grãos são classificados em seis grupos de graus de arredondamento: muito angular, angular, subangular, subarredondado, arredondado e muito arredondado.



**Figura 1.1: Padrão de imagens de arredondamento (McLANE, 1995)**

Alguns geólogos preferem a distribuição em apenas quatro classes, que seriam a angulosa (junção das classes muito angulosa e angulosa), a sub-angulosa, a sub-arredondada e a arredondada (junção das classes arredondado e bem arredondado). Essa é a classificação recomendada pela NBR 7389 (ABNT, 1992), com a diferença de que as classes angular e sub-angular são chamadas de angulosa e sub-angulosa, sendo esta última a que foi empregada neste trabalho.

POPP (1998) afirma que a plotagem das curvas de frequência (simples e acumulativas), facilitam a visualização da distribuição das classes de arredondamento, além de permitir concluir sobre o grau de classificação dos grãos e a origem do sedimento em monogenética (uma moda) ou poligenética (duas ou mais modas). A moda representa o ponto máximo da curva de frequência simples.

No que se refere à esfericidade, os grãos foram classificados como de alta ou baixa esfericidade, segundo suas características geométricas individuais, quando comparados com a Figura 4.1.

Devido ao longo período de treinamento necessário para se obter resultados confiáveis, este ensaio foi feito por profissional da área de sedimentologia do Centro de Geologia da Universidade Federal do Espírito Santo.

#### **4.3.2 Análise de imagens**

A análise de imagens foi o método escolhido para obtenção dos parâmetros necessários no cálculo da área específica dos grãos em função da facilidade, da rapidez, da precisão e da possibilidade de automação.

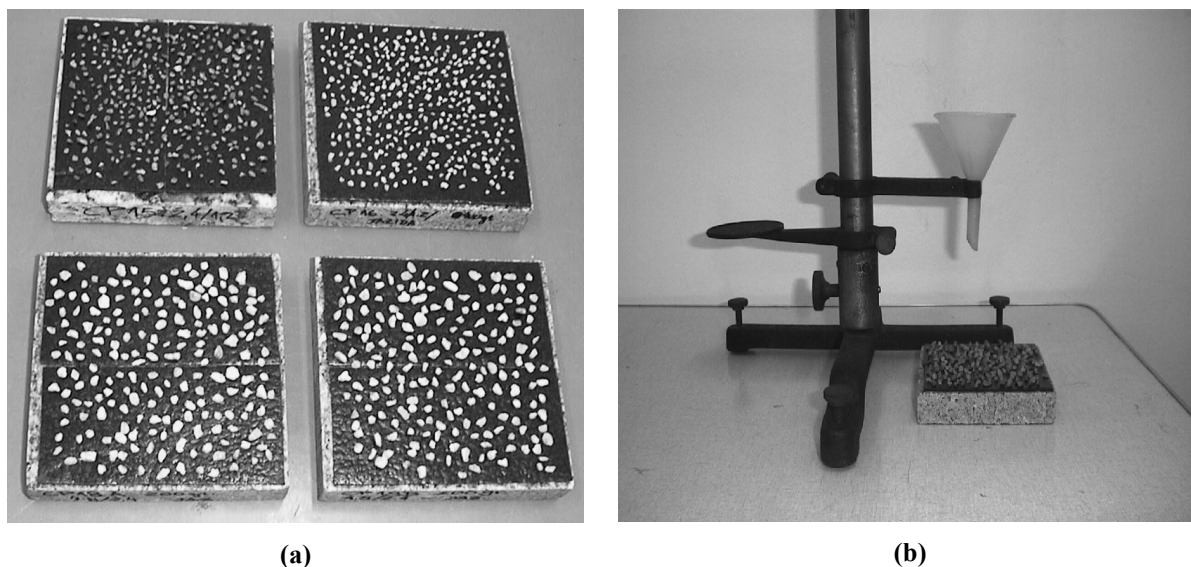
#### 4.3.2.1 Preparação das amostras para aquisição das imagens

Inicialmente as areias foram separadas em frações, obtidas por peneiramento utilizando as peneiras de abertura de malha 4,8 mm a 0,075 mm, conforme recomendação da NBR 7217 (ABNT, 1987). Obtiveram-se, então, as frações 4,8-2,4; 2,4-1,2; 1,2-0,6; 0,6-0,3; 0,3-0,15 e 0,15-0,075 mm. Após a separação, as frações foram lavadas para eliminar impurezas e colocadas em estufa à temperatura de  $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, aproximadamente.

Para observar a eficiência do peneiramento, cada fração foi individualmente peneirada por três minutos em agitador mecânico, tomando-se o cuidado de evitar excesso de material em cada peneira. Posteriormente, as frações foram sendo manualmente peneiradas uma a uma, até que a massa de material passante após um minuto de agitação fosse inferior a 1% do material retido. Como a grande quantidade de material não permitiu uma única operação, as frações foram divididas em tantas partes quantas foram necessárias para evitar a formação de camada espessa sobre a malha da peneira. O material foi, então, acondicionado em recipientes plásticos, identificados e providos de tampas.

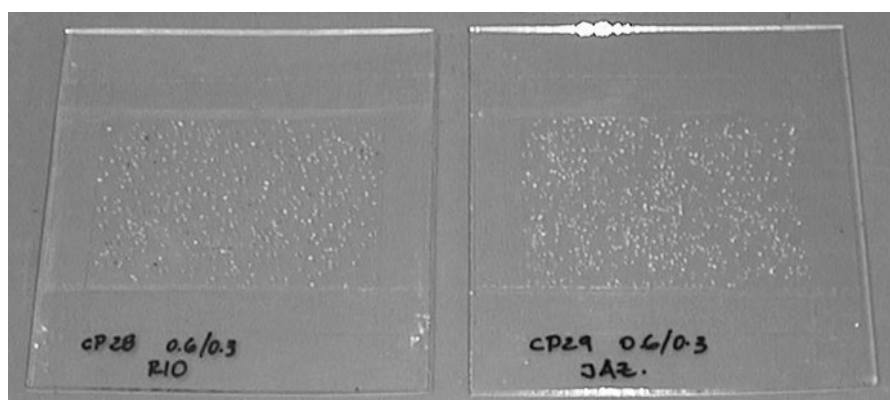
Com as areias devidamente separadas em frações e quarteadas para obtenção de uma quantidade representativa para a realização do ensaio, procedeu-se à preparação das amostras, que foi feita de duas maneiras diferentes. Para as três maiores frações foi necessário utilizar um fundo que permitisse um bom contraste com os grãos, uma vez que a imagem seria obtida através de equipamento fotográfico. Utilizou-se então uma fita preta adesiva, fixada a uma superfície plana e rígida, com fita dupla face (Foto 4.1<sub>a</sub>).

Para garantir a aleatoriedade da fixação dos grãos à fita, eles foram lançados através de um funil fixado a um suporte metálico e a uma altura definida de 5 cm (Foto 4.1<sub>b</sub>). Em tentativas anteriores, com fitas de pouca espessura, observou-se que os grãos maiores sofriam reflexão, problema que foi minimizado usando-se uma fita de 2 mm de espessura, aproximadamente.



**Foto 4.1:** Exemplo de fixação dos grãos das frações grossas (a) e aparato desenvolvido para garantir a aleatoriedade dos grãos na superfície adesiva (b)

Inicialmente, para as três menores frações, as amostras foram preparadas da mesma maneira descrita anteriormente. Ao tentar obter a imagem, através de uma câmera digital acoplada a uma lupa, observou-se que a imagem não apresentava a nitidez desejada, devido à grande reflexão da iluminação utilizada. Os melhores resultados com o uso desse equipamento seriam obtidos com a luz passando através da amostra. A maneira mais simples e que se mostrou bastante eficaz foi fixar uma fita adesiva transparente tipo Polypack sobre uma placa de vidro (Foto 4.2).



**Foto 4.2:** Fixação dos grãos das frações finas sobre superfície adesiva transparente

O lançamento dos grãos foi feito da forma descrita anteriormente, tendo apenas a altura de lançamento menor, cerca de 1 cm. Devido à pequena dimensão dos grãos, observou-se que não houve reflexão nessas frações.

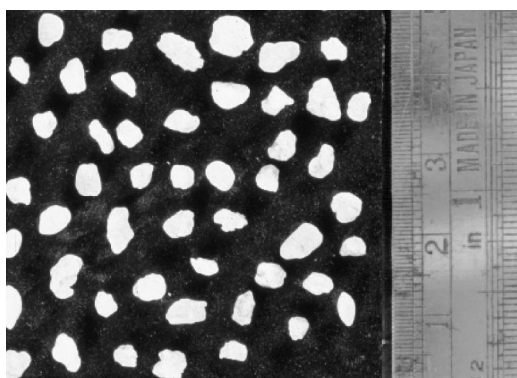
Antes de se utilizar esse modo de fixação dos grãos, foram feitas tentativas com outros tipos de fita e com resina epóxi. A cola presente nas fitas causou muita reflexão, não permitindo uma boa imagem para processamento.

A técnica que utiliza os grãos imersos no epóxi não se mostrou muito eficiente, pois grãos maiores, em função da baixa viscosidade da resina, se acomodaram no fundo do recipiente, assumindo uma posição preferencial de repouso e comprometendo, assim, a aleatoriedade requerida. Outro fator foi a grande quantidade de bolhas de ar incorporadas à resina após mistura dos seus dois componentes.

#### 4.3.2.2 Aquisição das imagens

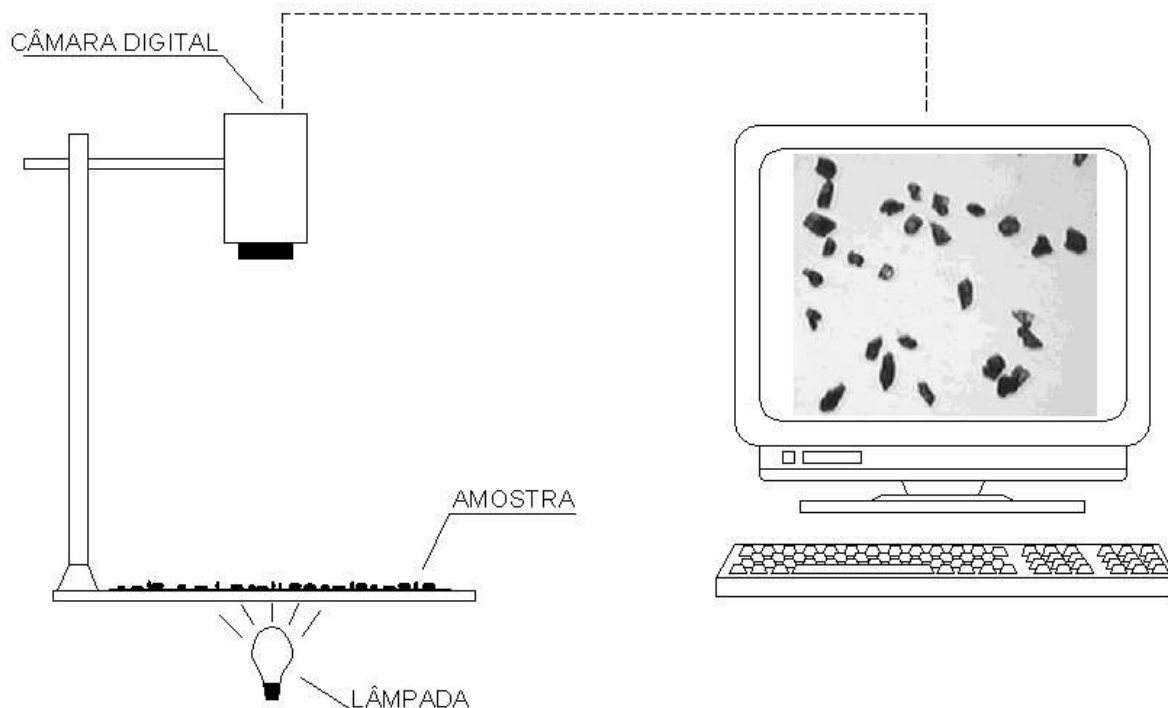
As imagens das frações 4,8-2,4; 2,4-1,2 e 1,2-0,6 mm foram obtidas através de fotografias tiradas em estúdio com uma câmara Nikon F5 acoplada com lentes de 60 mm 1:1. A iluminação foi feita com 2 flashes de estúdio Mako 404.

Para possibilitar a obtenção da escala das imagens, uma régua foi fotografada junto com a amostra de grãos de areia (Foto 4.3). Os slides obtidos foram então digitalizados em *scanner* Minolta específico para slides e negativos.



**Foto 4.3:** Exemplo de amostra de areia com a régua inserida na imagem para obtenção da escala

A aquisição das imagens das três menores frações foi feita através de uma câmara digital Sony acoplada a uma lupa da marca Olympus. A câmara estava diretamente ligada a um computador que possui instalado um programa específico para captura e armazenamento de imagens digitais, denominado ATI (Figura 4.2). Ajustaram-se o foco e o aumento e, quando a imagem que apareceu na tela mostrou-se satisfatória, foi congelada e armazenada na memória do computador, para posterior processamento e análise. Tanto o foco quanto o aumento foram mantidos constantes durante a captura das imagens de uma mesma fração.



**Figura 4.2:** Esquema de aquisição das imagens de grãos através de lupa acoplada ao computador

A resolução das imagens foi uma preocupação neste trabalho, uma vez que influencia a qualidade delas depois de processadas. KRAL *et al.* (2000) alertam para o fato de que resoluções de 640 x 480 *pixels* são muito baixas para os padrões atuais. No Quadro 4.1 constam as resoluções das imagens digitais.

Em função do aumento utilizado para obter-se uma boa nitidez, o campo da imagem foi reduzido, fazendo-se necessário, então, um maior número de imagens para obter-se a quantidade de grãos requeridos.

Da mesma forma que nas frações mais grossas, depois de armazenada uma quantidade de imagens com um número de grãos suficientes para análise, fotografou-se, com os mesmos foco e aumento, uma régua, para obter a escala da imagem.

Aproximadamente 400 grãos foram analisados para cada fração ensaiada. Esse número foi baseado nos estudos feitos por PERSSON (1998), que observou que amostras menores não permitiram uma análise estatística consistente. No Capítulo 5 apresenta-se um estudo para cálculo do número de grãos necessários para uma boa análise estatística das areias estudadas.

**Quadro 4.1: Resolução das imagens digitalizadas na etapa de aquisição**

Areia	Fração (mm)	Resolução (“pixels”)
AJ	4,8 – 2,4	1485 x 1192
	2,4 – 1,2	1448 x 1176
	1,2 – 0,6	2069 x 1168
	0,6 – 0,3	800 x 600
	0,3 – 0,15	800 x 600
	0,15 – 0,075	800 x 600
AR	4,8 – 2,4	1413 x 1145
	2,4 – 1,2	1385 x 1179
	1,2 – 0,6	2018 x 1163
	0,6 – 0,3	800 x 600
	0,3 – 0,15	800 x 600
	0,15 – 0,075	800 x 600

Durante o processamento de imagem e detecção das feições de interesse, descritos nos itens 4.3.2.3 e 4.3.2.4, foi possível observar a melhor qualidade das imagens das fotos tiradas em estúdio com equipamento convencional, pois a resolução deste equipamento, em relação à câmara digital, é muito superior. Uma câmara fotográfica convencional possui uma resolução de aproximadamente 17 milhões de *pixels*, enquanto uma câmara digital possui de 350 mil (baixa resolução) a 2,3 milhões de *pixels* (alta resolução) (VEJA, 2000). Ao transferir as fotos para a memória do computador, a resolução é ditada pelo equipamento de digitalização, que é menor que a da imagem original.

#### 4.3.2.3 Processamento das imagens

Nesta etapa, a visualização da imagem adquirida anteriormente foi melhorada através de programas computacionais. O programa utilizado para processamento foi o Adobe Photoshop. As imagens adquiridas por equipamento fotográfico (frações 4,8-2,4; 2,4-1,2 e 1,2-0,6 mm) foram primeiramente convertidas de RGB<sup>4,2</sup> para escala de cinza e depois o contraste da imagem foi aumentado em 100%.

Durante o processamento da fração 1,2-0,6 mm da areia AJ, a imagem resultante ficou muito grande, ocupando muitos megabytes de memória e tornando o processamento muito lento. O problema foi resolvido aumentando o contraste em 100% e diminuindo o brilho da imagem em 30%.

<sup>4, 2</sup> RGB significa vermelho (*red*), verde (*green*) e azul (*blue*), ou seja, uma imagem colorida.

Para servir de parâmetro de escala, foi inserido, nesta etapa do processamento, um retângulo com uma dimensão conhecida (1 cm) e com uma coloração diferente do fundo, para possibilitar o contraste.

Nas três menores frações, o procedimento foi o mesmo, diferenciando apenas no contraste, que foi de 60%. Em função do material utilizado e da qualidade de obtenção das imagens, elas posteriormente não apresentaram problemas de ruído e o sombreamento foi minimizado nos ajustes de contraste.

#### **4.3.2.4** Segmentação e detecção das feições de interesse

Para permitir as medidas das feições de interesse, foi preciso identificar e reconhecer as bordas dos grãos, processo feito através do programa CorelTRACE 9, que possui uma ferramenta denominada rastreamento de contorno, que verifica as mudanças súbitas de intensidade e reconhece o ponto como uma borda. A intensidade adotada para rastreamento das bordas das três maiores frações foi 70%. A escolha dessa porcentagem se deu após diversas tentativas, pois observou-se que números maiores acarretaram numa imagem muito pesada (muitos megabytes) e que números menores, não permitiram boa precisão na detecção das bordas.

Ao tentar aplicar esses mesmos parâmetros para detecção das bordas dos grãos menores, 0,6-0,3, 0,3-0,15 e 0,15-0,075 mm, o tempo requerido para obtenção do contorno das partículas foi muito longo, indicando uma imagem com muitos megabytes de memória. Então, antes de aplicar o rastreamento, a imagem, que era em tons de cinza, foi convertida para preto e branco, com limiar médio de 128. Após esta operação, foi feito o rastreamento das imagens com 100% de intensidade.

Depois de feito o rastreamento das imagens das frações, o arquivo foi salvo com extensão DXF, que permitiu o reconhecimento pelo programa posterior.

A imagem da etapa anterior foi importada para um programa de CAD (*Computer Aided Design* ou Desenho Auxiliado por Computador) e salva na extensão usual do programa, que é DWG. Neste trabalho, o programa de CAD usado foi o AutoCAD-R14.

#### **4.3.2.5** Processamento da imagem binária

Durante a aquisição da imagem, a irregularidade de iluminação, a cola da fita adesiva e as partículas de poeira foram detectadas como objetos no processo de rastreamento. Antes de proceder às medidas, então, foi preciso “limpar” a imagem, processo feito manualmente por



comparação entre a imagem original e a imagem rastreada, apagando objetos que não eram grãos.

Também foi necessário separar grãos superpostos, que o programa interpretou como uma partícula única. O programa de CAD usado permitiu a operação de reconstituição através das ferramentas de *explode*, que transforma um objeto único em segmentos de retas, *line*, que permitiu desenhar uma linha separando os dois grãos e *boundary*, que reconstituiu a borda dos grãos, desta vez separados. Quando se observou que a superposição não possibilitaria uma reconstituição próxima da forma real dos grãos, eles foram abandonados e apagados.

#### 4.3.2.6 Medidas das feições de interesse

Neste trabalho, as feições de interesse foram área, perímetro, dimensões máximas e mínimas dos grãos e diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula.

Antes de proceder às medições, foi preciso escalar a imagem. Com o retângulo de dimensões conhecidas previamente inserido na imagem foi possível através, da ferramenta *align*, colocar a imagem na escala requerida.

Com a imagem na escala desejada, procedeu-se às medidas dos parâmetros requeridos. Os valores de área (cm<sup>2</sup>) e perímetro (cm) dos grãos foram obtidos através da ferramenta *area* do programa de CAD (Figura 4.3).

As dimensões máximas foram obtidas traçando-se linhas paralelas ao maior comprimento do grão e, posteriormente, utilizando-se a ferramenta de cota. Da mesma forma, foram obtidas as dimensões mínimas das partículas (Figura 4.4).

O diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula foi feito desenhando uma circunferência passando pelos dois pontos mais externos da partícula, utilizando a ferramenta *circle* e, posteriormente, a ferramenta *diameter* para se obter o valor do diâmetro da circunferência (Figura 4.5).

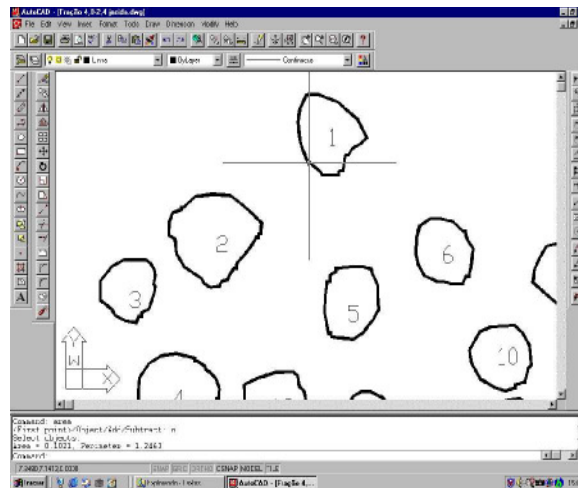


Figura 4.3: Exemplo de área e perímetro, em  $\text{cm}^2$  e  $\text{cm}$ , respectivamente, obtidos através do AutoCAD-R14

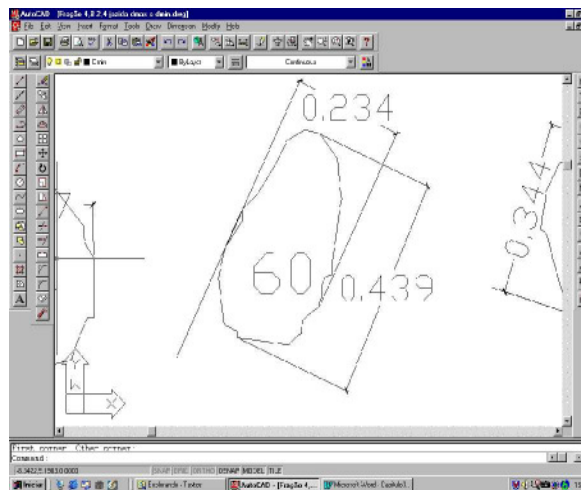


Figura 4.4: Exemplo de dimensões máximas e mínimas, em  $\text{cm}$ , obtidas através do AutoCAD-R14

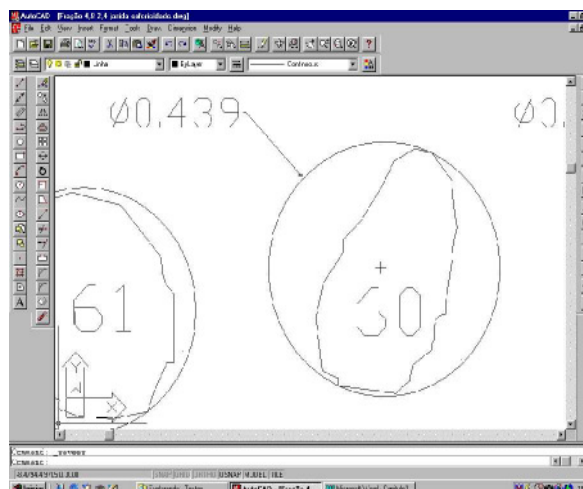


Figura 4.5: Exemplo de diâmetro do menor círculo circunscrito, em  $\text{cm}$ , obtido através do AutoCAD-R14

**4.3.2.7 Tratamento dos dados**

Os parâmetros de área, perímetro, dimensões máximas e mínimas e diâmetro do menor círculo circunscrito de cada grão foram copiados individualmente para a planilha eletrônica para posterior análise.

Na análise estatística dos dados obtidos na análise de imagens, foram utilizadas as técnicas da estatística descritiva e da análise de variância (ANOVA) para verificar se houve diferença significativa entre as médias dos parâmetros analisados. As análises estatísticas foram auxiliadas pelo programa computacional SPSS versão 8.0, considerando-se os fatores fração, procedência e interação entre eles.

Dos valores de área e perímetro calculou-se o diâmetro equivalente de uma circunferência e a esfericidade. Já os parâmetros perímetro, dimensões máximas, mínimas e médias obtidos na análise de imagens foram usados para cálculo da área específica dos grãos, de acordo com os diversos métodos apresentados no Capítulo 3.

## CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios para obtenção da forma e da textura superficial dos agregados miúdos, segundo as metodologias anteriormente descritas.

### 5.1 Apresentação dos resultados

#### 5.1.1 Caracterização das areias

Para caracterização do agregado miúdo foram feitos os ensaios de análise granulométrica, massa específica pelo Frasco de Chapman e picnômetro e análise mineralógica, cujos resultados estão a seguir.

##### 5.1.1.1 Granulometria

A caracterização granulométrica do material foi feita de acordo com a metodologia utilizada nas áreas da engenharia civil e da sedimentologia. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam as curvas granulométricas das duas areias ensaiadas, com a série de peneiras apresentadas nos Quadros 3.1 e 3.2, respectivamente.

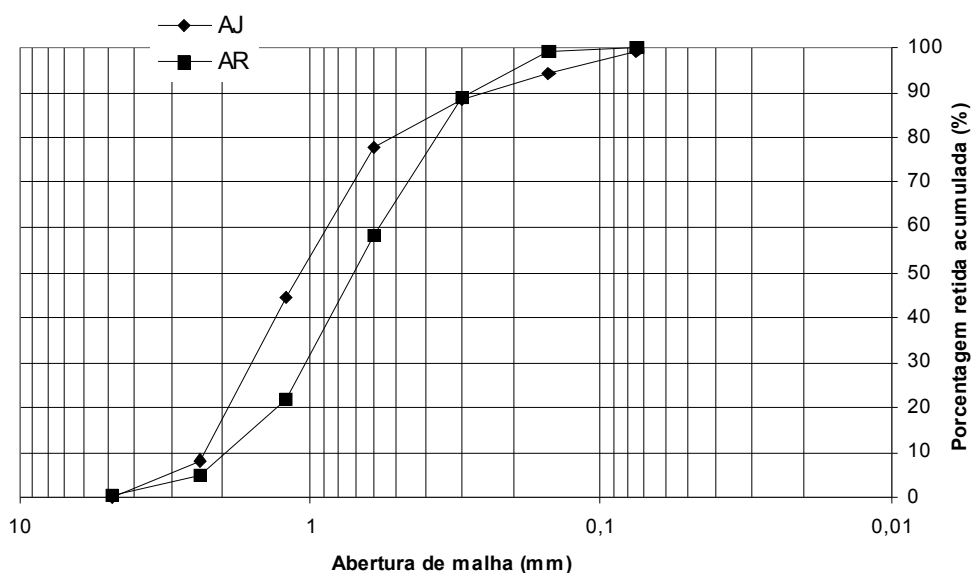


Figura 5.1: Curvas granulométricas das areias ensaiadas, segundo metodologia da engenharia civil

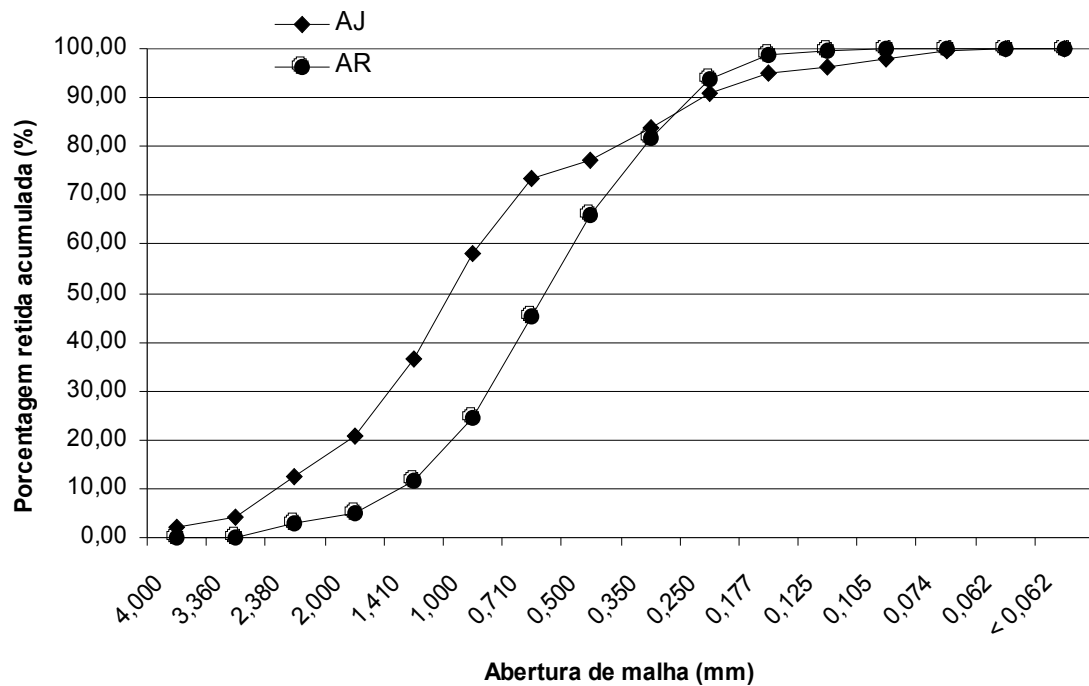
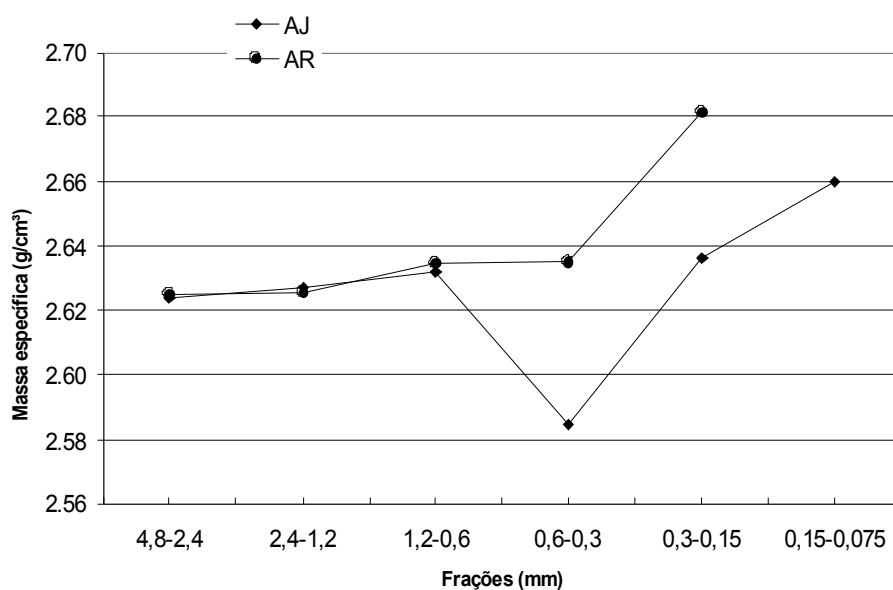


Figura 5.2: Curvas granulométricas das areias ensaiadas, segundo metodologia da sedimentologia

### 5.1.1.2 Massa específica

Nos dois ensaios foram feitas três medidas para cada fração de cada uma das procedências e calculou-se a média das três medições para cada fração. As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam as médias dos resultados da massa específica das frações pelo frasco de Chapman e pelo picnômetro, respectivamente.

Figura 5.3: Gráfico de massa específica das areias AJ e AR, ensaiadas segundo método do frasco de



Chapman (g/cm³)

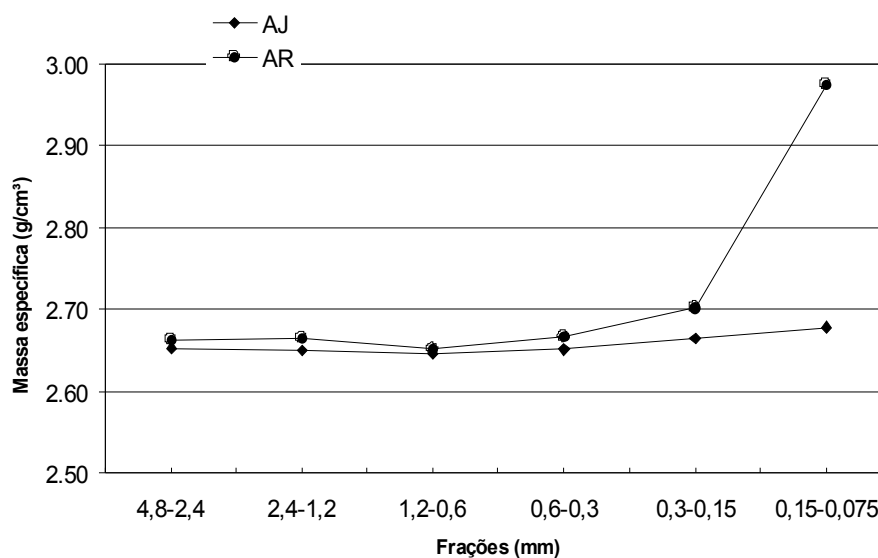


Figura 5.4: Gráfico de massa específica das areias AJ e AR, ensaiadas segundo método do picnômetro (g/cm³)

### 5.1.1.3 Análise mineralógica

Os resultados do ensaio de análise mineralógica são apresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1: Análise mineralógica das frações

Areia	Fração (mm)	Composição mineralógica
-------	-------------	-------------------------

AJ	4,8 – 2,4	100% de quartzo
	2,4 – 1,2	100% de quartzo
	1,2 – 0,6	100% de quartzo
	0,6 – 0,3	99% de quartzo e 1% de ilmenita
	0,3 – 0,15	97% de quartzo, 2% de ilmenita (com leucoxênio) e 1% de rutilo
	0,15 – 0,075	96% de quartzo, 2% de ilmenita (com leucoxênio) 1% de rutilo e ocorrências raras cerca de 1% de turmalina, zircão e magnetita
AR	4,8 – 2,4	98% de quartzo, 2% de fragmento de rocha (quartzosa, quartzo-hemetítica e quartzo-feldspática) e mica
	2,4 – 1,2	97% de quartzo, 3% de mica, fragmentos de rocha (quartzosa, quartzo-hematítica, quartzo-feldspática) e limonita
	1,2 – 0,6	96% de quartzo, 2% de hornblenda, 2% de ilmenita, mica (expandida) e feldspato (caulinizado)
	0,6 – 0,3	91% de quartzo, 2% de hornblenda, 2% de mica (expandida), 2% de feldspato (caulinizado), 1% de limonita, 1% de ilmenita e 1% de cianita, turmalina e granada
	0,3 – 0,15	80% de quartzo, 8% de mica (expandida), 5% de ilmenita, 3% de hornblenda, 2% de feldspato (caulinizado), 1% de limonita e 1% de cianita, turmalina, granada, magnetita, silimanita, zircão e rutilo
	0,15 – 0,075	60% de quartzo, 15% de ilmenita, 10% de mica expandida, 8% de hornblenda, 2% de magnetita, 1% de limonita, 1% de turmalina, 1% de zircão e 2% de feldspato (caulinizado), cianita, granada, silimanita, andalusita, anatásio, rutilo, xenotímio e pirita

### 5.1.2 Morfoscopia

Nas Figuras 5.5 a 5.8 estão representados os resultados obtidos na análise morfoscópica no que se refere à textura superficial e do grau de esfericidade de cada fração das areias AJ e AR, ensaiadas segundo a metodologia anteriormente descrita. Os dados que originaram estes gráficos se encontram na Tabela A.1 do Anexo A.

Os grãos que se enquadraram no grupo de angulares e sub-angulares, foram classificados como rugosos e aqueles grãos considerados sub-arredondados e arredondados foram descritos como lisos. Usou-se essa classificação para enfatizar as características distintas de cada grupo das amostras.

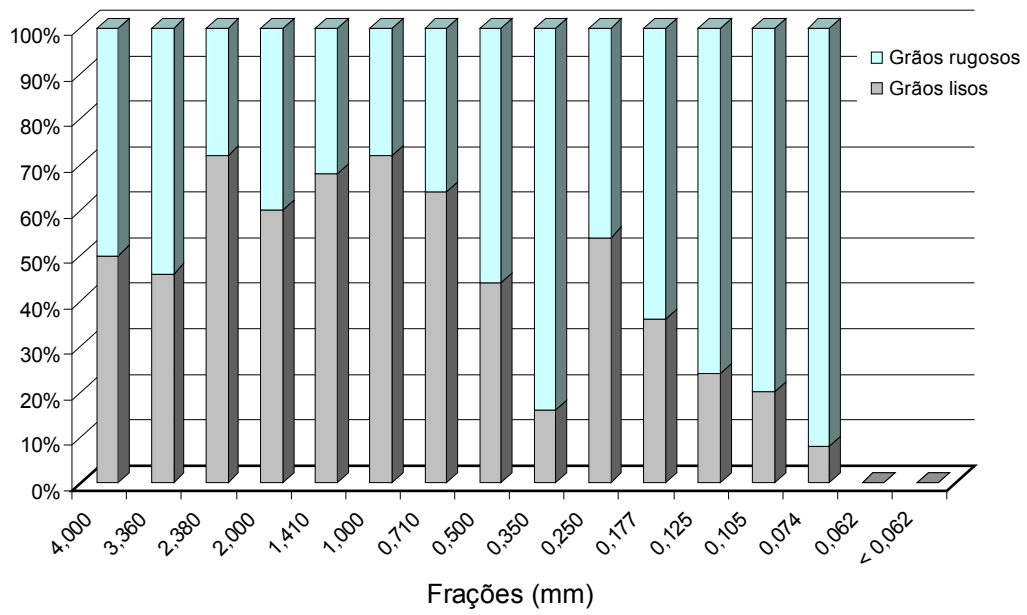


Figura 5.5: Gráfico de proporção da textura superficial dos grãos da areia AJ nas respectivas frações

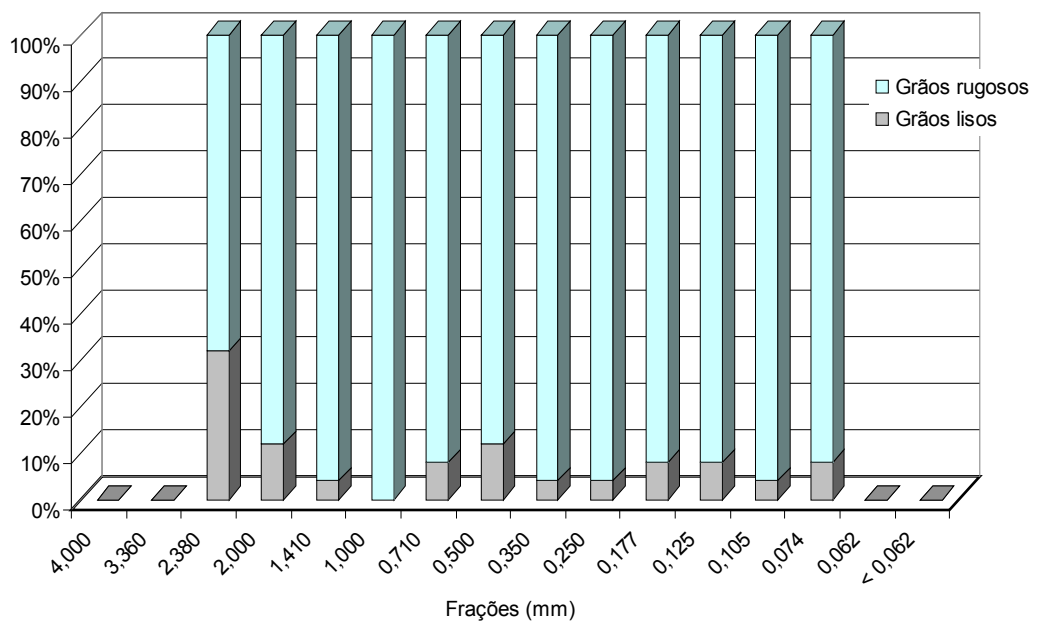
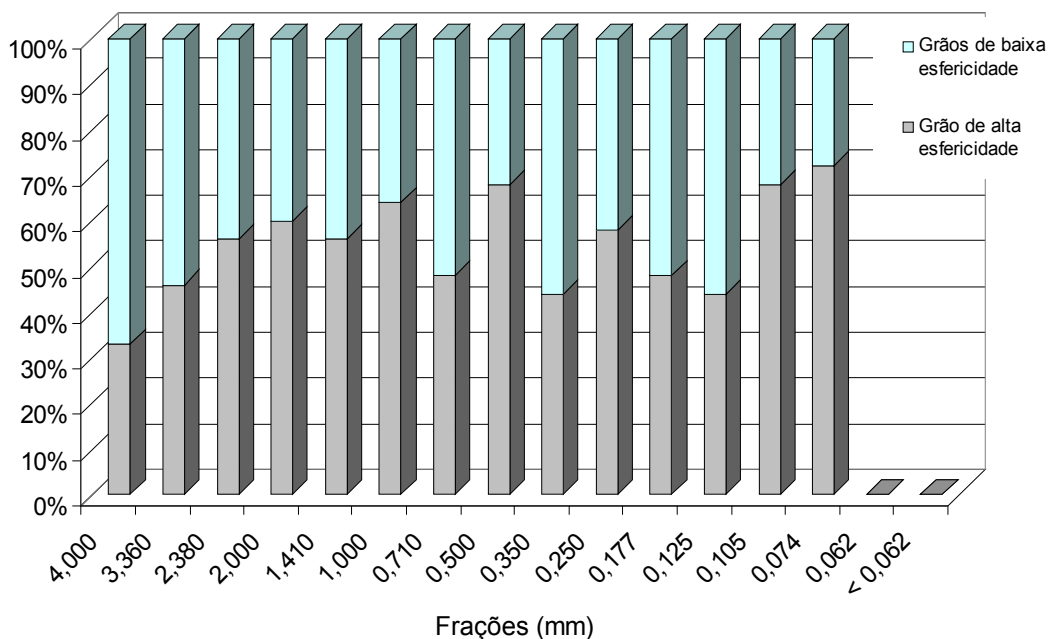


Figura 5.6: Gráfico de proporção da textura superficial dos grãos da areia AR nas respectivas frações





Figur:

Frações (mm)

5

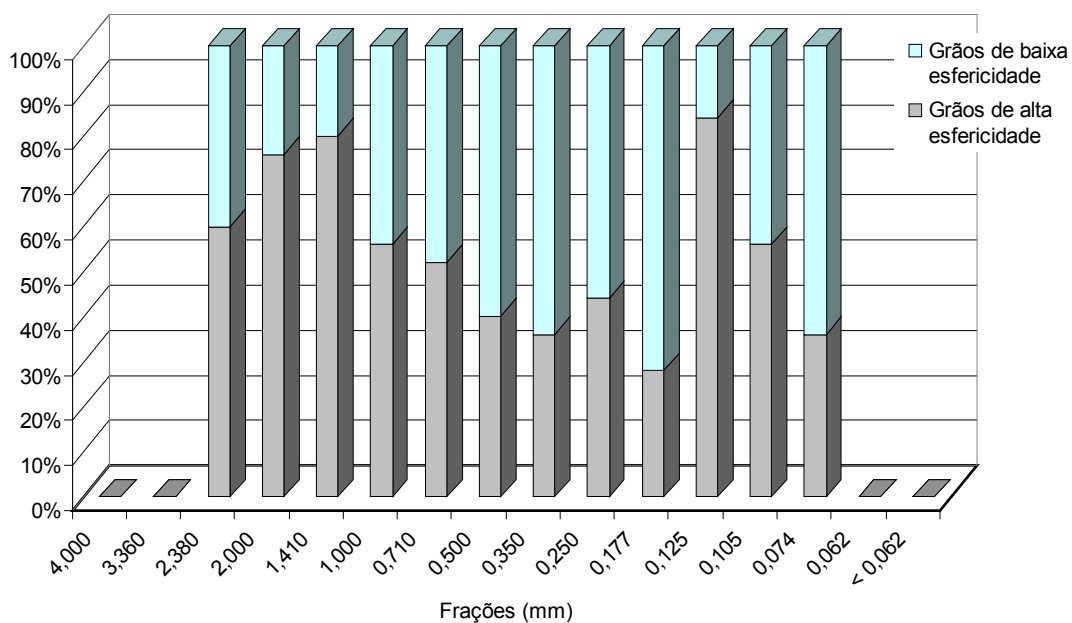


Figura 5.8: Gráfico de proporção dos graus de esfericidade dos grãos da areia AR nas respectivas frações

Nas Figuras 5.9 e 5.10, os parâmetros de forma são apresentados em função da distribuição granulométrica dos materiais. Os dados obtidos nos ensaios encontram-se na Tabela A.2 do Anexo A.

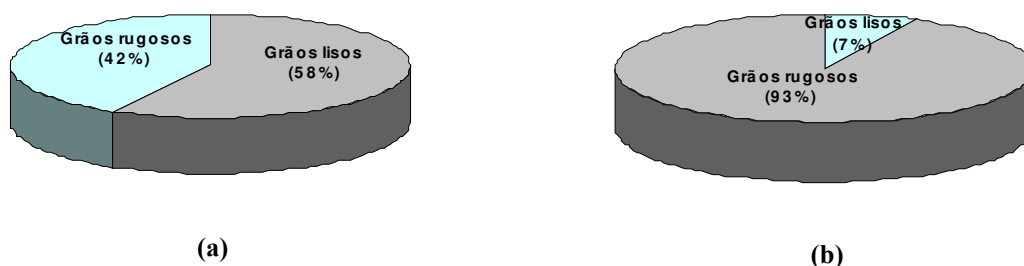


Figura 5.9: Gráfico de relação entre texturas superficiais dos grãos das areias AJ (a) e AR (b) em função da distribuição granulométrica, através da análise morfoscópica

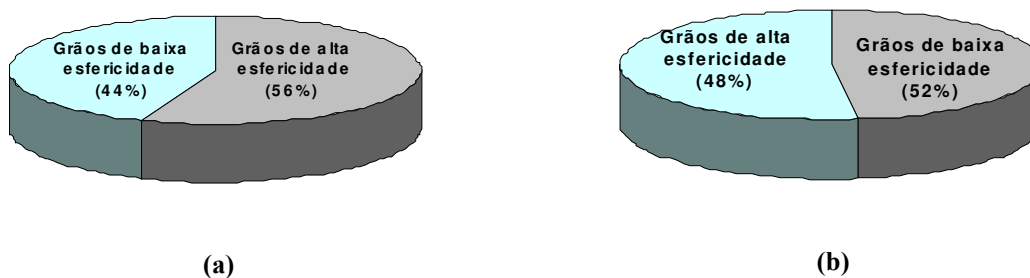


Figura 5.10: Gráfico de relação entre graus de esfericidade dos grãos das areias AJ (a) e AR (b) em função da distribuição granulométrica, através da análise morfoscópica

### 5.1.3 Análise de imagens

Nas tabelas a seguir estão apresentados os valores médios de área e perímetro (Tabela 5.1), das dimensões máximas, dimensões mínimas, dimensões médias (Tabela 5.2) e dos diâmetros da menor circunferência circunscrita (Tabela 5.3) às projeções das partículas relativas às frações das areias das duas procedências, obtidas através da análise de imagens. As dimensões médias apresentadas na Tabela 5.2 foram calculadas a partir da média aritmética entre os valores médios da dimensão máxima e da dimensão mínima das projeções das partículas.

Tabela 5.1: Valores médios das áreas e perímetros das projeções das partículas, em mm<sup>2</sup> e mm, respectivamente

Fração (mm)	AJ		AR	
	Área (mm <sup>2</sup> )	Perímetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Perímetro (mm)
4,8 – 2,4	10,97	12,56	12,12	13,42
2,4 – 1,2	4,45	7,97	4,43	8,13
1,2 – 0,6	1,54	4,85	1,10	3,98
0,6 – 0,3	0,232	1,842	0,307	2,119
0,3 – 0,15	0,071	1,016	0,095	1,199
0,15 – 0,075	0,020	0,530	0,021	0,659

**Tabela 5.2:** Valores médios das dimensões máximas, mínimas e médias das projeções das partículas nas respectivas frações, em mm

Fração (mm)	Dimensão máxima (mm)		Dimensão mínima (mm)		Dimensão média (mm)	
	AJ	AR	AJ	AR	AJ	AR
4,8 - 2,4	4,493	4,888	3,203	3,295	3,848	4,092
2,4 - 1,2	2,888	2,995	2,034	1,985	2,461	2,490
1,2 - 0,6	1,768	1,469	1,187	0,993	1,478	1,231
0,6 - 0,3	0,695	0,780	0,450	0,519	0,573	0,650
0,3 - 0,15	0,372	0,431	0,253	0,297	0,402	0,364
0,15 - 0,075	0,193	0,206	0,133	0,140	0,163	0,173

**Tabela 5.3:** Valores médios dos diâmetros da menor circunferência circunscrita às projeções das partículas nas respectivas frações, em mm

Fração (mm)	AJ	AR
4,8 - 2,4	4,56	4,93
2,4 - 1,2	2,91	3,00
1,2 - 0,6	1,78	1,47
0,6 - 0,3	0,69	0,79
0,3 - 0,15	0,37	0,44
0,15 - 0,075	0,20	0,21

De posse dos valores das áreas e perímetros das projeções das partículas, foi possível calcular o diâmetro de uma circunferência com área e perímetro iguais à dos grãos. Esses diâmetros, chamados de diâmetros equivalentes, foram relacionados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4:** Valores médios dos diâmetros equivalentes de área e perímetro das projeções das partículas nas respectivas frações, em mm

Fração (mm)	AJ		AR	
	em relação à área	em relação ao perímetro	em relação à área	em relação ao perímetro
4,8 - 2,4	3,696	3,996	3,869	4,272
2,4 - 1,2	2,349	2,537	2,388	2,669
1,2 - 0,6	1,381	1,545	1,162	1,268
0,6 - 0,3	0,532	0,586	0,610	0,675
0,3 - 0,15	0,295	0,324	0,343	0,382
0,15 - 0,075	0,155	0,169	0,162	0,210

### 5.1.3.1 Esfericidade

A partir da definição de esfericidade descrita anteriormente como a relação entre o diâmetro do círculo com área igual à projeção da partícula e o diâmetro do menor círculo circunscrito à sua projeção e com os dados obtidos na análise de imagens (Tabelas 5.3 e 5.4), calculou-se a esfericidade média de cada fração das areias (Figura 5.11).

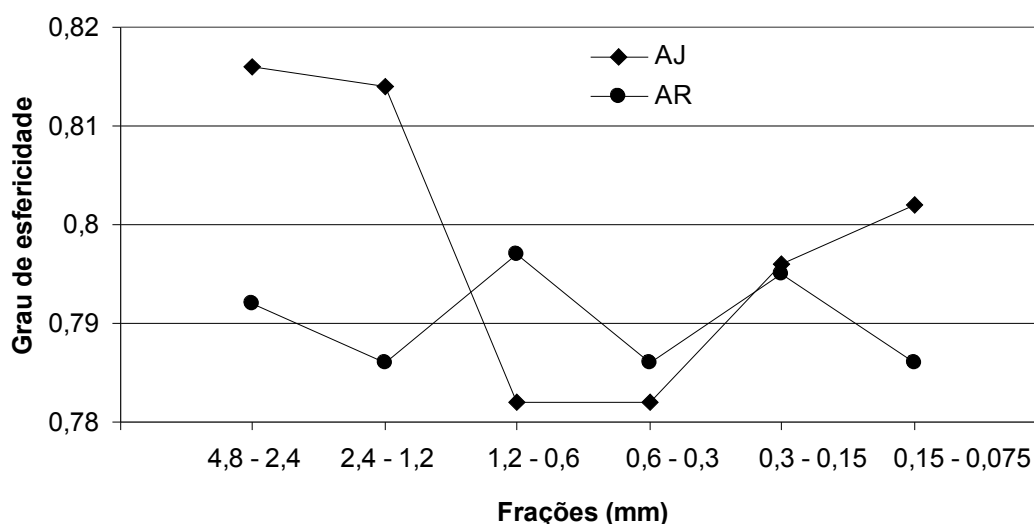


Figura 5.11: Gráfico de valores médios dos graus de esfericidade das frações das areias AJ e AR, obtidos pela análise de imagens, segundo definição de Ritenhouse *apud* CARR *et al.* (1990)

De posse das esfericidades médias de cada fração e com as curvas granulométricas das areias ensaiadas foi possível obter a esfericidade média das areias AJ e AR, que foram 0,792 e 0,786, respectivamente.

### 5.1.3.2 Dimensão fractal de rugosidade

Para verificar a correlação entre dimensão fractal de rugosidade,  $D_R$ , e a rugosidade observada por HYSLIP & VALLEJO (1997), foram plotadas as Figuras 5.12 e 5.13, através das quais foi

possível calcular os valores de  $D_R$  em função do coeficiente angular da reta ajustada aos pontos, conforme Equação 3.19.

Para a areia AJ a dimensão fractal de rugosidade calculada pelo coeficiente angular da reta ajustada foi 1,8879 e para a areia AR foi 1,9728.

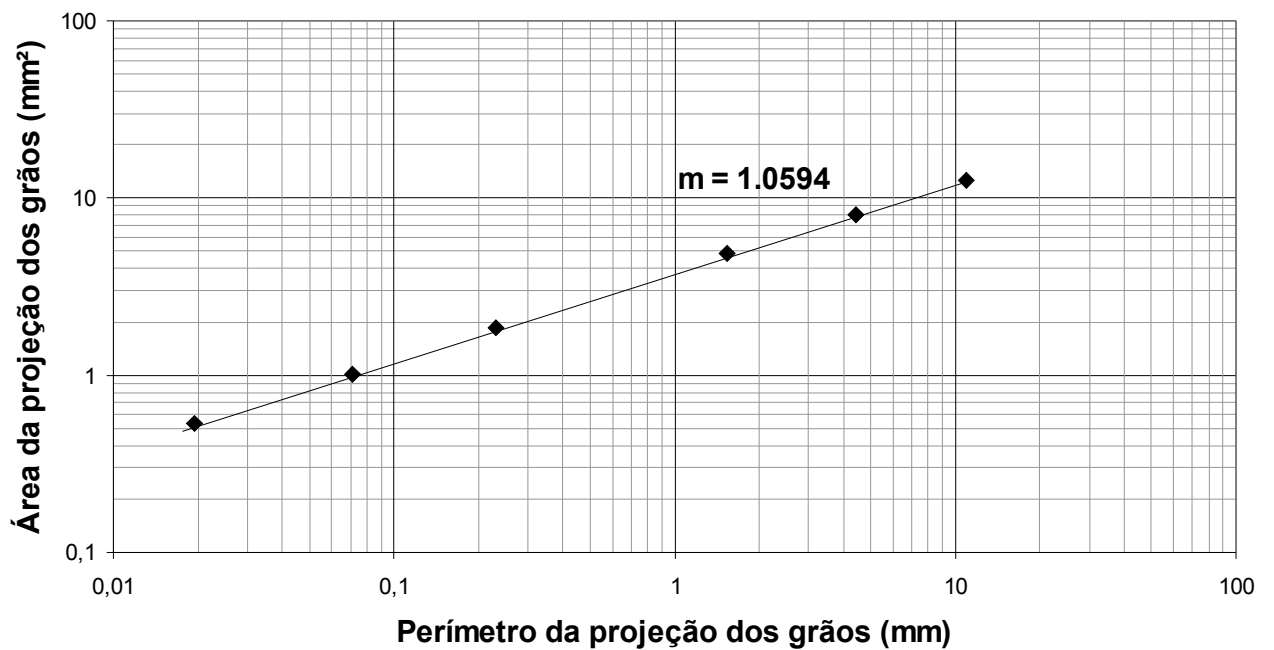


Figura 5.12: Gráfico do coeficiente angular para cálculo de  $D_R$  da areia AJ

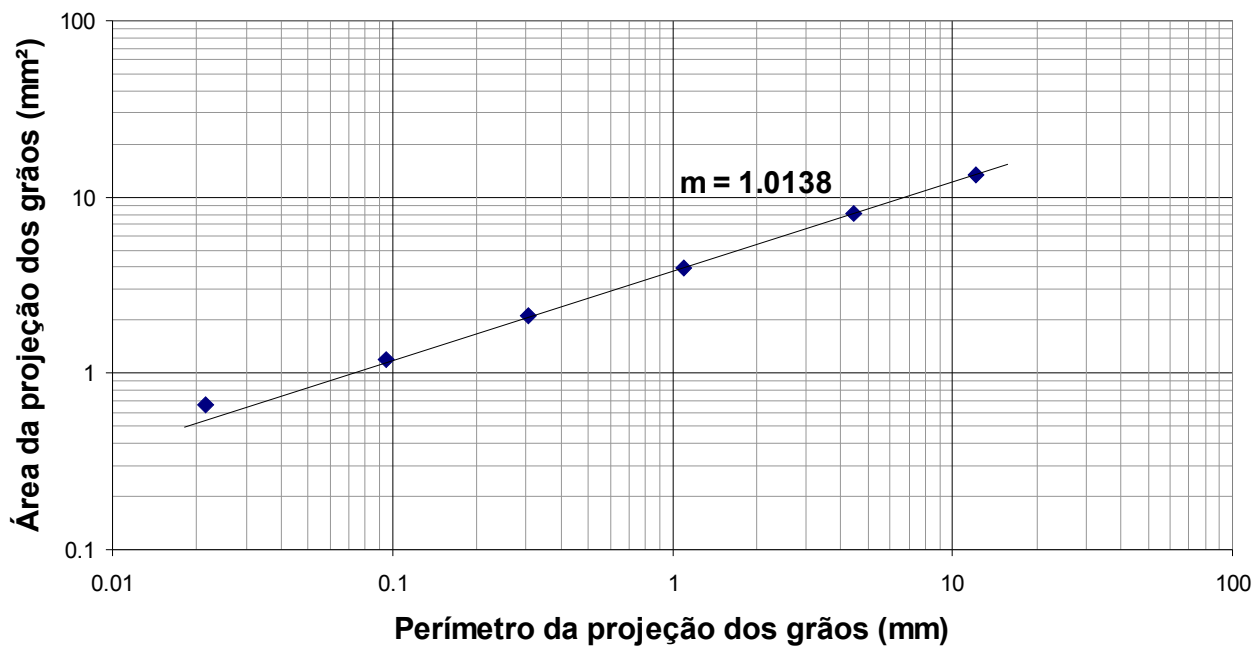


Figura 5.13: Gráfico do coeficiente angular para cálculo de  $D_R$  da areia AR

#### 5.1.4 Áreas específicas

Neste item serão apresentados os resultados das áreas específicas calculadas de acordo com as metodologias dos diversos autores apresentadas no Capítulo 3, utilizando os parâmetros obtidos na análise de imagens.

Como a maioria dos métodos apresentados neste trabalho calculam a área específica em massa, foi necessário obter o peso médio dos grãos nas diversas frações. A Tabela 5.5 apresenta esses valores, obtidos pela pesagem de 800 grãos de cada fração para as duas procedências, após quarteamento.

A seguir, apresenta-se uma descrição dos parâmetros necessários para a obtenção das áreas específicas em massa e em volume, de acordo com os diversos métodos apresentados. Nas Tabelas 5.6 e 5.7 são apresentados os valores calculados de área específica em massa para as areias AJ e AR, respectivamente. As áreas específicas em volume das areias ensaiadas encontram-se na Tabela 5.8.

Tabela 5.5: Valores médios das massas das partículas das frações das areias AR e AJ nas respectivas frações, em g

Fração (mm)	AJ	AR
4,8 – 2,4	$4,32 \times 10^{-2}$	$4,53 \times 10^{-2}$

2,4 - 1,2	$8,40 \times 10^{-3}$	$7,11 \times 10^{-3}$
1,2 - 0,6	$1,35 \times 10^{-3}$	$0,88 \times 10^{-3}$
0,6 - 0,3	$1,44 \times 10^{-4}$	$1,86 \times 10^{-4}$
0,3 - 0,15	$2,04 \times 10^{-5}$	$2,10 \times 10^{-5}$
0,15 - 0,075	$2,25 \times 10^{-6}$	$3,00 \times 10^{-6}$

Tabela 5.6: Áreas específicas em massa para a areia AJ, segundo as diversas metodologias apresentadas, em  $m^2/kg$

Fração (mm)	Grãos esféricos	Durriez e Arrambide	Brosch e Souza	Chapius e Légaré	Carr <i>et al.</i>		
					Esférica	Cúbica	Piramidal
4,8 - 2,4	1,077	0,737	0,861	0,943	1,162	1,369	0,703
2,4 - 1,2	2,265	1,473	1,812	1,887	2,407	2,836	1,455
1,2 - 0,6	5,084	2,946	4,067	4,417	5,546	6,534	3,353
0,6 - 0,3	7,163	5,893	5,730	7,547	7,500	8,836	4,535
0,3 - 0,15	15,087	11,697	19,909	14,981	16,107	18,975	9,738
0,15 - 0,075	37,097	23,306	29,685	29,851	39,739	46,817	24,026

Tabela 5.7: Áreas específicas em massa para a areia AR, segundo as diversas metodologias apresentadas, em  $m^2/kg$

Fração (mm)	Grãos esféricos	Durriez e Arrambide	Brosch e Souza	Chapius e Légaré	Carr <i>et al.</i>		
					Esférica	Cúbica	Piramidal
4,8 - 2,4	1,161	0,734	0,929	0,940	1,265	1,491	0,765
2,4 - 1,2	2,740	1,468	2,196	1,880	2,959	3,486	1,789
1,2 - 0,6	5,410	2,946	4,328	3,774	5,730	6,750	3,464
0,6 - 0,3	7,136	5,848	5,709	7,491	7,684	9,053	4,646
0,3 - 0,15	19,821	11,567	15,857	14,815	21,791	25,671	13,175
0,15 - 0,075	31,342	21,031	25,073	26,936	46,079	54,285	27,859

Tabela 5.8: Área específica volumétrica dos grãos segundo Edwards e London *apud* COUTINHO (1973), em  $m^2/m^3$

Fração (mm)	Método de Edwards		Método de London	
	AJ	AR	AJ	AR
4,8 - 2,4	1559	1466	1582	1495
2,4 - 1,2	2438	2410	2476	2461
1,2 - 0,6	4060	4874	4142	4968
0,6 - 0,3	10471	9231	10729	9430
0,3 - 0,15	14925	16484	19558	16770

0,15 - 0,075	36810	34682	37450	35331
--------------	-------	-------	-------	-------

## 5.2

### 5.3 Discussão dos resultados

Com os resultados obtidos nos diversos ensaios apresentados nos itens anteriores, foi feita uma análise, visando a correlacionar as características físicas das areias analisadas.

#### 5.3.1 Massas específicas

A areia AR apresentou valores crescentes de massa específica, tanto no ensaio com frasco de Chapman quanto com o picnômetro. Esse fenômeno se explica pelo fato de que as menores frações da areia referida possuem uma porcentagem considerável de minerais mais pesados que o quartzo, conforme pode ser observado na análise mineralógica (Quadro 5.1).

Já a areia AJ manteve sua massa específica em torno de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, no ensaio do picnômetro, mas no ensaio com frasco de Chapman, a fração 0,6-0,3 mm apresentou um valor muito baixo. Esperava-se que a análise mineralógica apresentasse algum mineral nesta fração que pudesse esclarecer a ocorrência, mas a quantidade de ilmenita presente não é suficiente para que os valores sejam tão discrepantes. Um erro de leitura também foi descartado, uma vez que a massa específica neste ensaio é obtida da média de três medições e todas elas tiveram valores próximos.

#### 5.3.2 Dimensões máximas

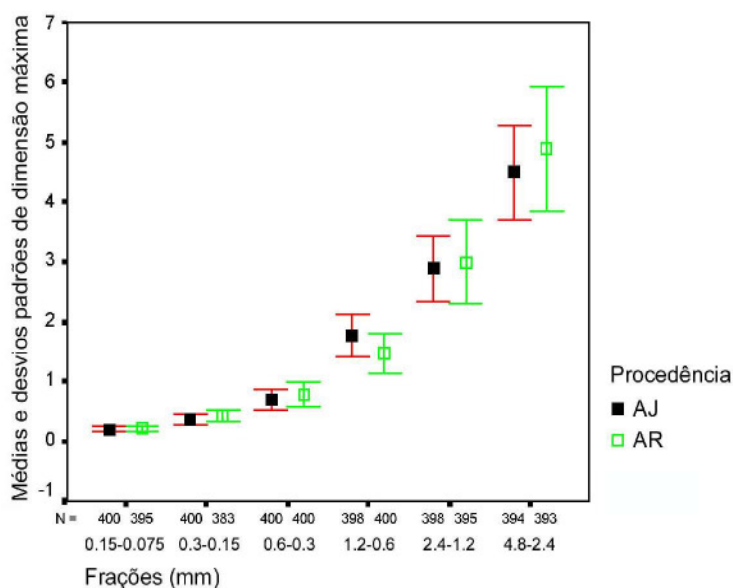
Como já era esperado, o valor médio da dimensão máxima foi maior que a abertura de malha da peneira superior da fração. A única exceção foi a fração 4,8-2,4 mm da areia AJ, que pode ser explicada pela ocorrência de poucos grãos alongados, por ter apresentado a maior esfericidade (0,816).

Ainda no que se refere à dimensão máxima, os valores obtidos foram menores do que o tamanho da diagonal do quadrado formado pelos fios das malhas das peneiras. Como é possível observar na Tabela 5.2, a fração 1,2-0,6 mm da areia AJ foi a única que fugiu à regra. A provável causa foi o problema de processamento da imagem da referida fração durante a obtenção dos parâmetros na análise de imagens.

Na Figura 5.14 são representados graficamente os valores das médias e desvios padrões da variável dimensão máxima, segundo os fatores considerados. É possível observar que



as areias AJ apresentam médias sempre abaixo da areia AR, exceto na fração 1,2-0,6 mm. Os valores que originaram este gráfico estão na Tabela B.1 do Anexo B.



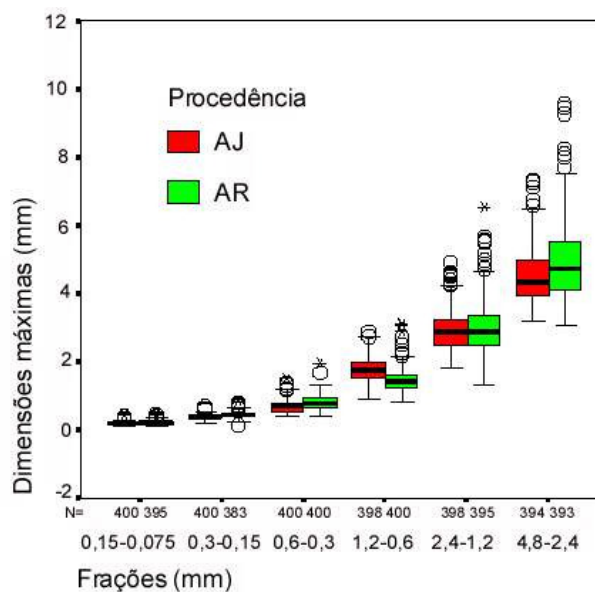
**Figura 5.14: Representação gráfica da variável dimensão máxima segundo a interação dos fatores fração e procedência**

Na Figura 5.15 são apresentados o Gráfico Box-Plot, onde constam o primeiro quartil, mediana<sup>5.1</sup> e pontos considerados discrepantes (círculos) e altamente discrepantes (asterisco)<sup>5.2</sup>, segundo os fatores fração e procedência.

A partir do gráfico da Figura 5.15, é possível observar que os dados apresentam relativa simetria, com alguns pontos discrepantes e pouquíssimos pontos altamente discrepantes, mostrando uma pequena variabilidade entre eles.

<sup>5.1</sup> Primeiro quartil é o valor situado de tal modo na série, que 25% dos termos são menores que ele; terceiro quartil é o valor situado de tal modo na série, que 75% dos termos é menor que ele e mediana é o valor situado de tal forma no conjunto que se separa em dois subconjuntos de mesmo número de elementos (CRESPO, 1996).

<sup>5.2</sup> Pontos discrepantes são valores entre  $Q3 + 1,5 (Q3 - Q1)$  e  $Q3 + 3,0 (Q3 - Q1)$  ou entre  $Q1 - 1,5 (Q3 - Q1)$  e  $Q1 - 3,0 (Q3 - Q1)$  e pontos altamente discrepantes são valores maiores que  $Q3 + 3,0 (Q3 - Q1)$  e menores que  $Q1 - 3,0 (Q3 - Q1)$ , onde  $Q1$  e  $Q3$  são o primeiro e o terceiro quartil, respectivamente.



**Figura 5.15:** Gráfico dos valores do primeiro e terceiro quartil, mediana e pontos discrepantes e altamente discrepantes da variável dimensão máxima, segundo os fatores fração e procedência (Gráficos Box-Plot)

Para verificar as diferenças entre as médias das variáveis analisadas, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 5.9, mostrando que há diferença significativa entre as médias das dimensões máximas segundo os fatores fração e procedência, uma vez que a probabilidade p de os resultados serem iguais é zero.

**Tabela 5.9:** Análise de variância (ANOVA) das médias da variável dimensão máxima, em mm

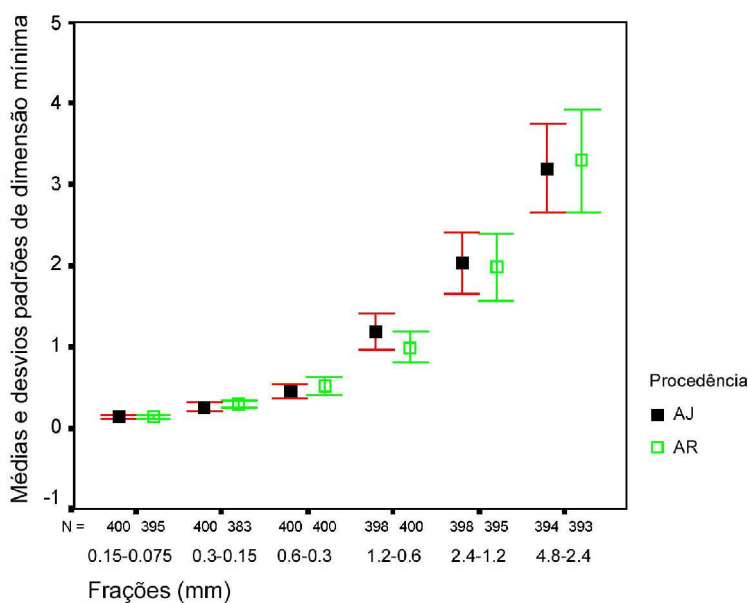
ANOVA		
Variável dependente: dimensão máxima (mm)		
Fonte de Variação	F	p
Modelo	4687,147	,000
Constante	62825,846	,000
FRAÇÃO	10266,109	,000
PROCEDÊNCIA	18,166	,000
FRAÇÃO x PROCEDÊNCIA	41,393	,000

### 5.3.3 Dimensão mínima

Pelo mesmo motivo que as dimensões máximas foram maiores que a abertura de malha da peneira superior da fração, também as dimensões mínimas foram maiores que a abertura de malha da peneira inferior, sendo que esses resultados já eram esperados.

Da mesma forma que no item anterior, são apresentados os valores das médias e desvios padrões da variável dimensão mínima segundo os fatores estudados.

Na Figura 5.16 observa-se que as médias da areia AR foram maiores que as da areia AJ, exceto nas frações 1,2-0,6 e 2,4-1,2 mm, quando analisados os fatores fração e procedência. Os valores de médias e desvios padrões da variável dimensão mínima estão apresentados na Tabela B.2 do Anexo B.



**Figura 5.16: Representação gráfica da variável dimensão mínima segundo a interação dos fatores fração e procedência**

Na Figura 5.17 pode-se notar que a variabilidade dos dados, no que se refere a variável dimensão mínima, é maior que a variável analisada anteriormente. Entretanto, não se tem a ocorrência de nenhum ponto altamente discrepante.

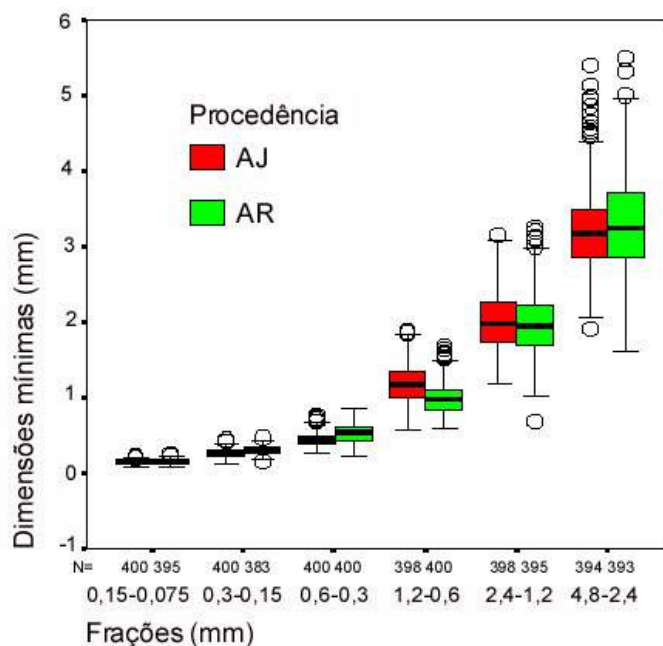


Figura 5.17: Gráfico dos valores do primeiro e terceiro quartil, mediana e pontos discrepantes e altamente discrepantes da variável dimensão mínima, segundo os fatores fração e procedência (Gráficos Box-Plot)

A análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 5.10, mostra que há diferença significativa da variável estudada quando analisada sob os fatores fração, interação fração e procedência. Já no fator procedência, a variável dimensão mínima não apresentou essa diferença, o que equivale a dizer que, se for analisado apenas este fator, as areias AJ e AR têm as mesmas médias de dimensões mínimas.

Tabela 5.10: Análise de variância (ANOVA) das médias da variável dimensão mínima, em mm

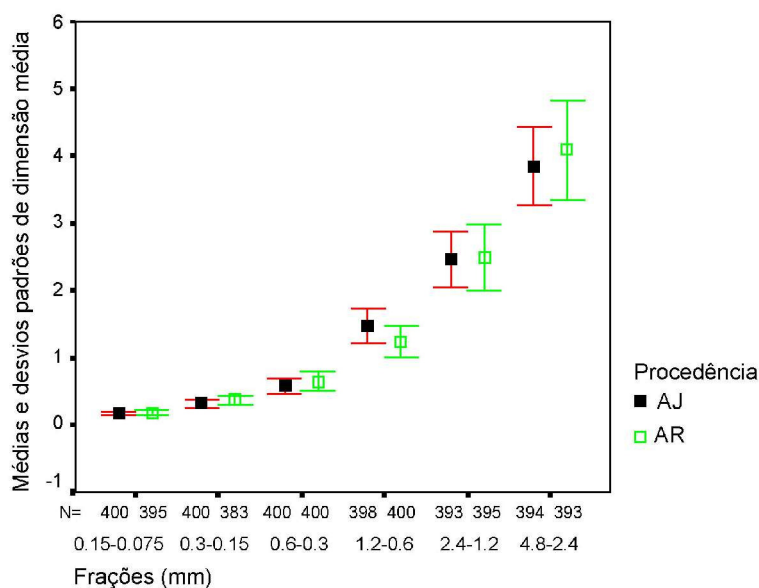
ANOVA		
Variável dependente: dimensão mínima (mm)		
Fonte de Variação	F	p
Modelo	5628,408	,000
Constante	73731,936	,000
FRAÇÃO	12356,916	,000
PROCEDÊNCIA	0,338	,561
FRAÇÃO x PROCEDÊNCIA	23,211	,000

### 5.3.4 Dimensão média

Analisando os valores de dimensões médias, observa-se que usar o diâmetro médio como a média aritmética da abertura das peneiras da série normal da engenharia civil não é recomendado. As dimensões médias dos grãos foram maior que a média aritmética da abertura das peneiras, cerca de 43% para a areia AJ e 41% para a areia AR.

No caso específico das areias analisadas neste trabalho, os cálculos que levam em consideração o diâmetro médio estariam sujeitos a erros menores se fosse considerado 1,42 vezes a média aritmética das aberturas das peneiras das frações.

Os valores de média e desvios padrões desta variável segundo os fatores fração e procedência são representados graficamente na Figura 5.18, onde é possível observar que a areia AR possui as maiores médias, exceto na fração 1,2-0,6 mm, provavelmente causados pelos problemas de processamento da imagem da areia AJ na referida fração.



**Figura 5.18:** Representação gráfica da variável dimensão média, segundo a interação dos fatores fração e procedência

Os valores de mediana, quartis e pontos discrepantes são apresentados na Figura 5.19, onde é possível observar a relativa simetria dos dados analisados e a ocorrência de apenas um ponto altamente discrepante, mostrando uma pequena variabilidade.

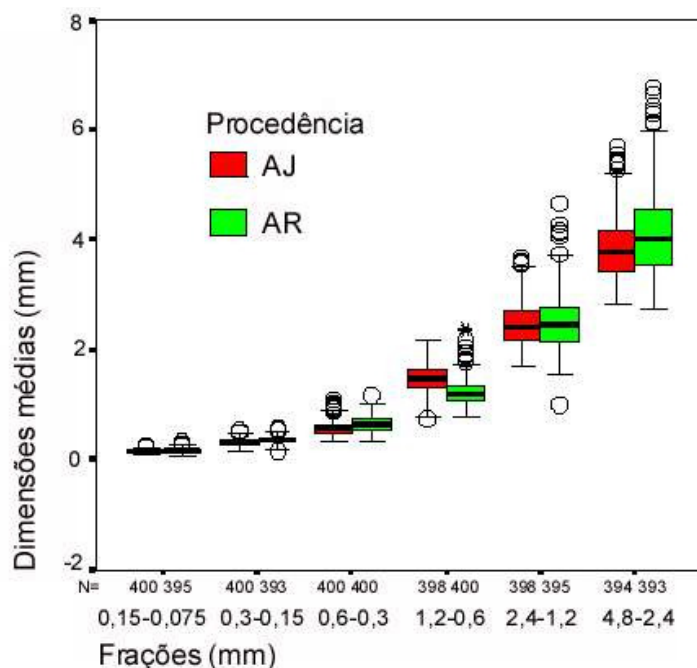


Figura 5.19: Gráfico dos valores do primeiro e do terceiro quartil, mediana e pontos discrepantes e altamente discrepantes da variável dimensão média, segundo os fatores fração e procedência (Gráficos Box-Plot)

Da análise de variância (ANOVA) é possível perceber que há diferenças significativas entre as médias da variável analisada, segundo os fatores fração e procedência, conforme Tabela 5.11. As diferenças são consideradas significativas quando  $p < 0,05$ , onde  $p$  é a probabilidade de os valores serem iguais.

Tabela 5.11: Análise de variância (ANOVA) das médias da variável dimensão média, em mm

ANOVA		
Variável dependente: dimensão média (mm)		
Fonte de Variação	F	p
Modelo	6394,478	,000
Constante	85111,548	,000
FRAÇÃO	14025,139	,000
PROCEDÊNCIA	7,418	,006
FRAÇÃO x PROCEDÊNCIA	39,670	,000

### 5.3.5 Esfericidade

É possível observar na Figura 5.11 que a areia AR mostra pequena variação na esfericidade, com tendência a apresentar um valor próximo a 0,79 nas diversas frações estudadas. Já na

areia AJ verificam-se três grupos de esfericidade bem distintos. As duas maiores frações (4,8-2,4 e 2,4-1,2 mm) possuem grãos com a maior esfericidade, em torno de 0,815. Nas duas frações seguintes (1,2-0,6 e 0,6-0,3 mm) os valores decrescem subitamente para 0,782 e novamente aumentam para um valor próximo de 0,80, nas duas frações mais finas (0,3-0,15 e 0,1-0,075 mm).

Se na prática a esfericidade definida por Ritenhouse *apud* CARR *et al.* (1990), varia de 0,45 (alongada) a 0,97 (muito esférica), é correto afirmar que as duas areias analisadas podem ser classificadas como esféricas.

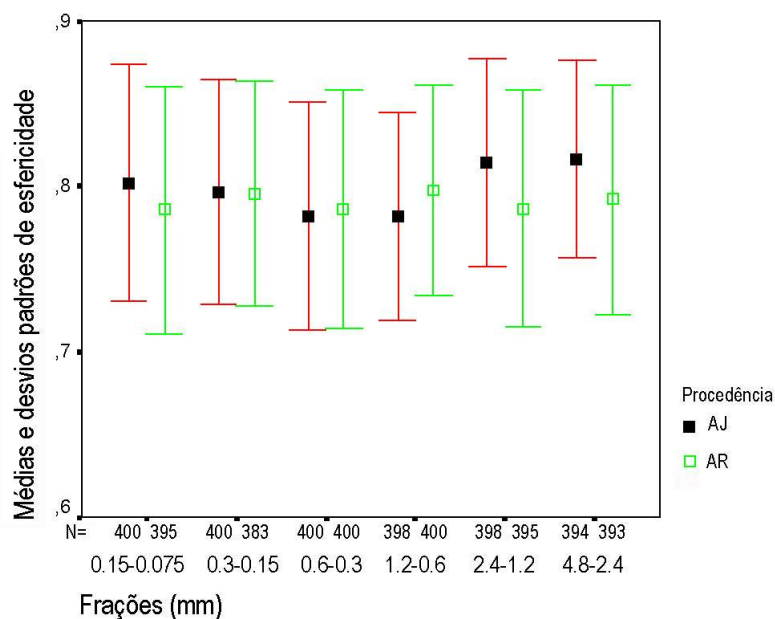
Ao compararmos as figuras de esfericidade da morfoscopia (Figuras 5.7 e 5.8) com os parâmetros obtidos pela análise de imagens, não é possível fazer nenhuma correlação consistente. Entretanto, através da Figura 5.10 verifica-se que a porcentagem de grãos esféricos na areia AJ é maior que na areia AR.

Esse fato foi confirmado pela esfericidade obtida pela análise de imagens, pois ao aplicarmos a porcentagem de material retido em cada peneira à sua respectiva esfericidade média obteve-se a areia AJ com grau de esfericidade de 0,792 e a areia AR com 0,786.

No que se refere a forma de agregados miúdos, no meio acadêmico, é comum considerarem-se as areias de rio como possuindo grãos esféricos, em função do agente transportador. Os resultados de esfericidade apresentados nos ensaios de análise de imagens e morfoscopia mostram uma forte tendência a contrariar esta afirmativa.

A afirmativa feita por RAO (2001<sub>a</sub>), de que partículas menores apresentariam formas mais próximas à esfera, não foi confirmada neste estudo em nenhum dos dois ensaios de forma realizados (morfoscopia e análise de imagens).

Da mesma forma que no item anterior, foi feita a análise estatística da variável esfericidade. As médias e os desvios padrões das areias AJ e AR segundo os fatores procedência e fração são representados graficamente na Figura 5.20. Novamente confirmou-se que a areia AJ possui um grau de esfericidade ligeiramente superior à areia AR. Os valores que originaram o gráfico estão na Tabela B.3 do Anexo B.



**Figura 5.20: Representação gráfica das médias e desvios padrões da variável esfericidade segundo os fatores fração e procedência**

A Figura 5.21 (Gráfico Box-Plot) apresenta os valores do primeiro e terceiro quartil, mediana e os pontos discrepantes (círculo) e altamente discrepantes (asterisco) segundo os fatores fração e procedência. Também é possível verificar a relativa simetria dos dados e a ocorrência de poucos pontos discrepantes e nenhum altamente discrepante.

Para verificar as diferenças entre as médias da variável esfericidade, foi realizada a análise de variância (Tabela 5.12). Os resultados encontrados indicam a existência de diferenças estatisticamente significantes entre todas as médias consideradas, confirmando então que as esfericidades são diferentes segundo fatores fração, procedência e a interação entre eles. Esta confirmação vem fortalecer a afirmação de Suguio *apud* ALBINO (1992), que relata que a esfericidade depende da rocha matriz, e não somente do agente transportador.



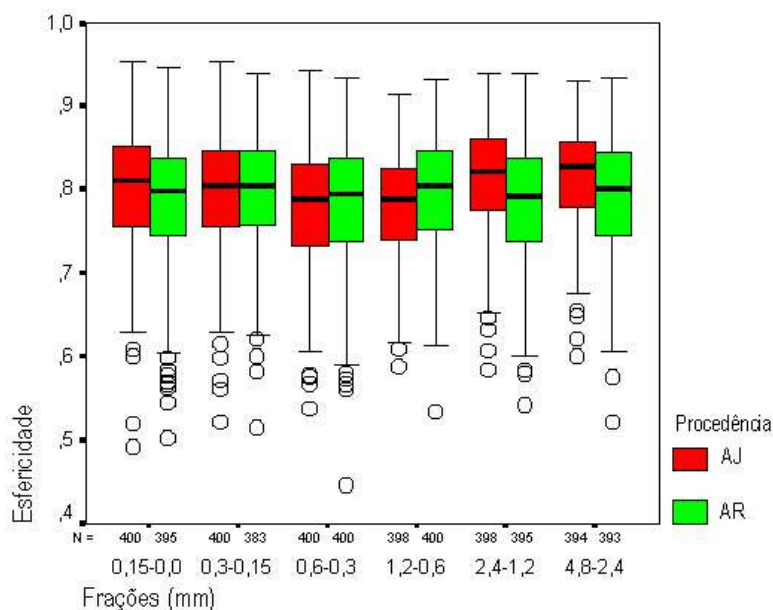


Figura 5.21: Valores do primeiro e terceiro quartil, mediana e pontos discrepantes a altamente discrepantes da variável esfericidade segundo os fatores fração e procedência (Gráfico Box-Plot)

Tabela 5.12: Análise de variância (ANOVA) das médias da variável esfericidade

**ANOVA**

Variável dependente: dimensão média (mm)

Fonte de Variação	F	p
Modelo	11,480	,000
Constante	650060,914	,000
FRAÇÃO	8,954	,000
PROCEDÊNCIA	17,878	,000
FRAÇÃO x PROCEDÊNCIA	12,742	,000

### 5.3.6 Rugosidade

Os resultados experimentais mostram que a areia AR, que no ensaio de morfoscopia apresentou grão com textura superficial mais rugosa, apresentou um  $D_R$  maior que a areia AJ, confirmando os estudos de HYSLIP VALLEJO (1997).

Entretanto, esta relação deve ser verificada com areias de texturas superficiais variadas, de modo a se ter um espaço amostral maior e, só então, poder confirmar a verdadeira correlação entre  $D_R$  e rugosidade.

### 5.3.7 Área específica

No item 5.1.4 foram apresentadas as áreas específicas das duas areias ensaiadas de acordo com os diversos métodos apresentados no Capítulo 3. Para uma melhor interpretação, as Figuras 5.22 e 5.23 representam graficamente os resultados de área específica em massa e em volume das areias AJ e AR, calculadas nas Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8.

A Figura 5.22 mostra que é possível verificar que, nos métodos que se baseiam apenas na granulometria, a areia AJ, comprovadamente com menor rugosidade, apresentou sempre valores menores de área específica que a areia AR.

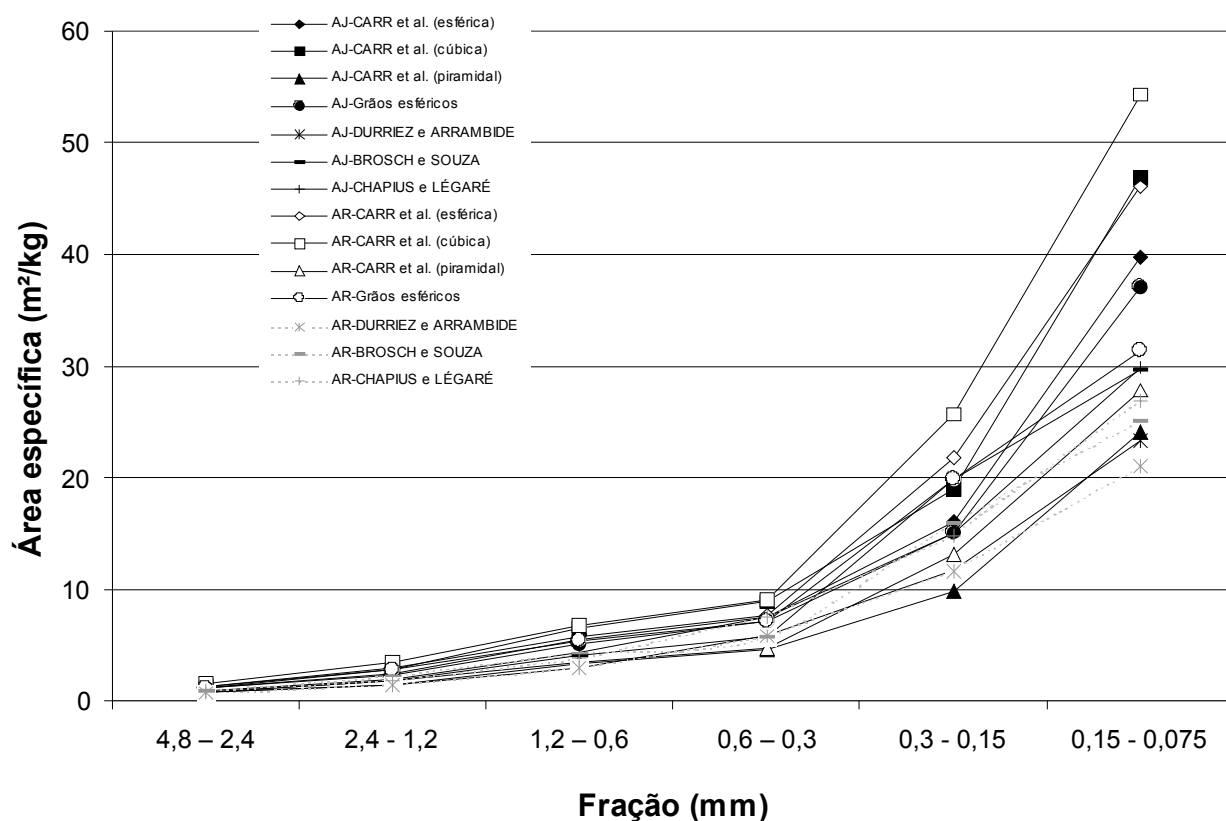
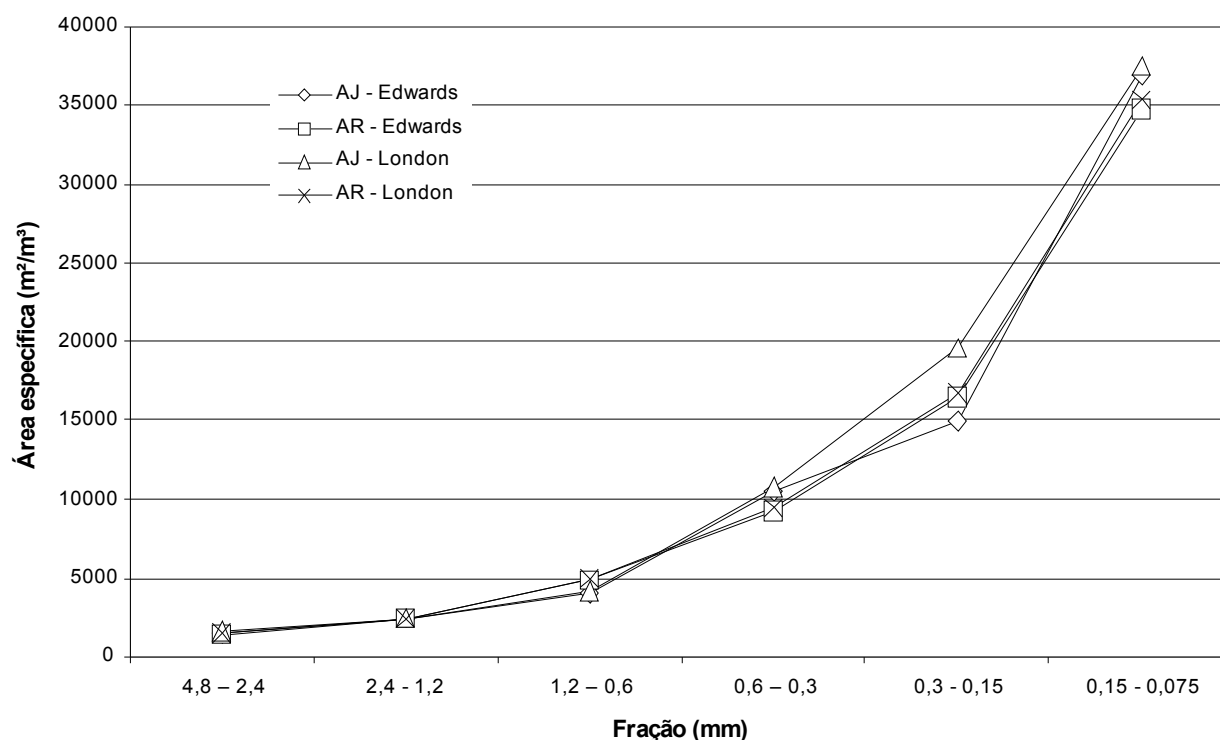


Figura 5.22: Representação gráfica das áreas específicas em massa



**Figura 5.23: Representação gráfica das áreas específicas em volume**

Já no cálculo das áreas específicas utilizando a teoria dos fractais, a areia AR apresentou maiores valores que a AJ. Pode-se concluir então que este é o único método analisado neste trabalho que leva em consideração a textura superficial dos grãos.

Ainda analisando a Figura 5.22, é possível observar que à medida que os grãos diminuem de tamanho, as diferenças entre as áreas específicas calculadas pelos diversos métodos apresentados se tornam maiores.

Verifica-se também que os valores de área específica calculados pelas metodologias aqui estudadas podem chegar ao dobro daquelas apresentadas nos Quadros 3.3 e 3.4, que consideram os grãos de forma esférica com superfície lisa.

#### **5.4 Tamanho das amostras**

Neste trabalho, utilizaram-se as amostras de cada fração contendo 400 grãos, em função dos resultados obtidos por PERSSON (1998), que verificou que uma boa análise estatística só foi conseguida com esse número de dados.

Através dos resultados obtidos na análise de imagens e de ferramentas estatísticas, foi possível calcular o número mínimo de partículas a serem analisadas para que se possa obter um alto nível de confiabilidade (95%) no que se refere à variável esfericidade.

O número de grãos,  $n$ , foi calculado como (BUSSAB & MORETTIN, 1993):

$$n = (z \cdot \sigma / E)^2 \quad (\text{Eq. 5.1})$$

onde:  $z$  = nível de confiabilidade ou intervalo de confiança (para 95%,  $z = 1,96$ );  $\sigma$  = desvio padrão; e  $E$  = precisão (maior média – menor média).

Na Tabela 5.13 são apresentados os números mínimos de grãos a serem ensaiados para o parâmetro esfericidade das areias AJ e AR, para um intervalo de confiança de 95%. De acordo com os resultados obtidos é aconselhável que, em trabalhos futuros que venham a estudar a forma dos agregados através da análise de imagens, utilize-se um espaço amostral de, no mínimo, 158 partículas, para que se possa garantir uma boa correlação estatística.

**Tabela 5.13: Número mínimo de grãos a serem analisados pelo parâmetro esfericidade**

Fração (mm)	Esfericidade	
	AJ	AR
4,8-2,4	12	137
2,4-1,2	13	145
1,2-0,6	13	115
0,6-0,3	16	148
0,3-0,15	15	130
0,15-0,075	17	158

A diferença entre o número de grãos requeridos para uma boa correlação estatística foi muito grande em função da procedência das areias analisadas (Tabela 5.13). Esta variação se deu devido aos dados obtidos na análise de imagens. A areia AJ apresentou um desvio padrão médio de 6,7061E-02, menor que 7,0242E-02, apresentado pela areia AR. Pode-se então concluir que o desvio padrão dos dados obtidos para a areia AR fez com que o número de grãos analisados fosse maior do que para a areia AJ.

Outro fator que contribuiu para a diferença foi a precisão adotada. Para esse trabalho a precisão foi a diferença entre a maior e a menor média de esfericidade das diversas frações das duas procedências, sendo que para a areia AR esta precisão foi muito maior pois a maior e a menor média de esfericidade foram muito próximas.



## **CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

É consenso no meio científico que a forma e a textura superficial dos agregados influenciam de forma profunda as propriedades das argamassas nos estados fresco, endurecido e durante o período de uso. Apesar desta constatação, tais características não têm sido foco de estudos, o que ocasiona uma carência de literaturas disponíveis nesta área.

No que se refere especificamente à área superficial exposta dos grãos, existe uma grande variedade de metodologias propostas na literatura, sendo que a quase totalidade delas consideram o grão esférico, liso e com diâmetro médio igual à média aritmética da abertura das peneiras na respectiva fração analisada. Os erros advindos dessas considerações podem ser muito grandes, uma vez que a área superficial real do grão pode chegar ao triplo daquela calculada com tais considerações, dependendo da forma e, principalmente, da sua rugosidade. A diversidade de metodologias e as considerações impostas para simplificação dos cálculos fizeram com que a análise da área específica dos agregados miúdos não tenha sido efetivamente quantificada até hoje.

O advento de novas tecnologias, tais como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a análise de imagens permite a inclusão de características texturais das partículas, até então desprezadas, no cálculo da área específica dos grãos. Tais técnicas certamente vão permitir avanços nesse campo e a posterior correlação entre as propriedades das argamassas e as características físicas de caráter textural das areias, além de sua distribuição granulométrica mais condizente com a realidade.

Neste trabalho calculou-se a área específica das areias através de várias metodologias disponíveis na literatura, utilizando a técnica de análise de imagens para obtenção dos parâmetros requeridos para tal.

Através dos ensaios e avaliações feitas no desenvolvimento deste trabalho experimental, chegou-se às conclusões que se seguem.

No cálculo da área específica dos grãos através da teoria dos fractais, aliada à técnica de análise de imagens para obtenção dos parâmetros requeridos, observou-se que a diferença entre os valores individuais chegou a ser 2,70 vezes maior do que os cálculos feitos com a consideração dos grãos esféricos e lisos. Em média, estes valores foram 2,16 vezes maior para a areia AJ e 2,47 vezes maior para a areia AR. Como era de se esperar, a areia AR, mais rugosa, apresentou uma diferença mais pronunciada.

Ao comparar-se as áreas específicas das areias analisadas pela teoria dos fractais, observou-se que a areia AR, comprovadamente mais rugosa, apresentou sempre valores maiores que a

areia AJ. Já nos outros métodos, não se constatou nenhuma tendência que pudesse ser significativa. Esse fato comprova que o único método avaliado neste trabalho que considera a rugosidade superficial do grão no cálculo da superfície exposta é a que utiliza a teoria dos fractais.

Na engenharia civil, no que se refere a agregados para concretos e argamassas, é consenso considerar a areia de rio, em função do retrabalho sofrido, como areia esférica e arredondada. Entretanto, neste trabalho esta afirmativa é contestada, uma vez que a areia proveniente de litoral (AJ), supostamente mais alongada e rugosa, apresentou maior grau de esfericidade e de arredondamento.

O peneiramento de agregados miúdos utilizando as frações separadas através das peneiras da série normal, apesar de largamente empregado e difundido no que se refere à análise granulométrica dos agregados, apresenta limitações. Os valores médios das dimensões máximas e mínimas dos grãos de areia ensaiados pela análise de imagens foram muito superiores às aberturas de malha das frações correspondentes. Entretanto, em função do amplo emprego, faz-se necessária uma correlação entre os dois métodos. A maior dificuldade se dá pelo fato de que, enquanto no peneiramento trabalha-se com proporção, em massa, de material, na análise de imagens avalia-se o número de grãos.

A dimensão fractal de rugosidade pode ser um parâmetro muito eficiente na determinação do grau de arredondamento das areias. Entretanto, o espaço amostral analisado neste trabalho foi muito restrito, exigindo estudos complementares para efetiva comprovação.

Finalmente, a técnica de análise de imagens mostrou-se uma poderosa ferramenta para avaliação das características físicas dos agregados miúdos, tais como grau de esfericidade e dimensões máximas e mínimas. Aliada à teoria dos fractais, como parâmetro estereológico, mostrou-se a metodologia mais eficiente, uma vez que leva em consideração a rugosidade superficial das partículas. Além disso, a técnica de processamento de imagens digitais, aplicada ao estudo de características físicas dos agregados, possibilita automação das análises, melhorando a reprodutibilidade e minimizando a interferência do operador presente em qualquer ensaio. Entretanto, é preciso ter cuidado durante todas as etapas que envolvem a análise de imagens, principalmente o processamento, pois nesta fase pode-se suavizar demasiadamente o contorno ou borda da partícula, perdendo-se as características de rugosidade.

### **6.1 Recomendações para trabalhos futuros**

Este trabalho foi apenas o início de um amplo campo de avaliação das características físicas dos agregados e sua influência nas propriedades e desempenho das argamassas de

revestimento. Cabe, portanto, que se façam estudos complementares, que irão preencher uma lacuna ainda inexplorada.

Para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa, recomenda-se:

- o desenvolvimento de uma metodologia para cálculo da área específica dos agregados através da técnica de análise de imagens, inclusive com padrões de aquisição, processamento e análise dos dados;
- a verificação da efetiva correlação entre a dimensão fractal de rugosidade e o grau de arredondamento das arestas dos agregados, inclusive com indicadores para classificação;
- a avaliação do desempenho das argamassas de revestimento executadas com agregados de diferentes formas e texturas superficiais, ou seja, diferentes áreas específicas;
- o desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento baseada na área específica dos agregados miúdos;
- a verificação da contribuição do grau de arredondamento, grau de seleção e classe modal na rugosidade dos agregados miúdos para argamassas de revestimento;
- a verificação da rugosidade das areias utilizando um maior número de frações.



## Referências Bibliográficas

ABRAMS, D. A. **Design of concrete mixtures**. Structural Materials Research Laboratory. Chicago, 1925. Bulletin

ALBINO, Jacqueline. **Morfodinâmica e processos de sedimentação das praias da Barra e São José do Barreto, Macaé - RJ**. Rio de Janeiro, 1992. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard test methods for determining average grain size using semiautomatic and automatic image analysis. **ASTM E 1382-97**. Philadelphia, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Rochas e solos. **NBR 6502**. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm: determinação da massa específica; método de ensaio. **NBR 6508**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. Execução de Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: procedimento. **NBR 7200**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. Agregado para concreto: especificação. **NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. Agregados: determinação da composição granulométrica. **NBR 7217**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da área específica. **NBR 7224**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. Materiais de pedra e agregados naturais. **NBR 7225**. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. **NBR 7389**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. **NBR 9776**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânica: terminologia. **NBR 13529**. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: especificação. **NBR 13749**. Rio de Janeiro, 1996.

BASÍLIO, Eduardo Santos. **Agregados para concreto**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1980.

BAUER, E.; ROCHA, A. C.; COSTA, R. A.; OLIVEIRA, S. J. Geração de parâmetros de referência para controle de recebimento de agregados para argamassa de revestimento. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Anais...** Salvador, UFBA, p. 87-96.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais para construção**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992.

BONIN, L. C.; FEUERHAMEL, C.; CARNEIRO, A. M. P. Estudo da influência da distribuição granulométrica na trabalhabilidade da argamassa. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 3., 1999, Anais...** Vitória, UFES, p. 371-378.

- BONIN, L. C.; KOPSCHITZ, P. X.; CINCOTTO M. A. Influência da distribuição granulométrica da areia na absorção capilar das argamassas de revestimento. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, 3., 1999, **Anais...** Vitória, UFES, p. 379-387.
- BORTOLUZZO, C. W.; LIBÓRIO, J. B. L. Determinação das tensões devido retração impedida em argamassas de revestimento. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, 3., 1999, **Anais...** Vitória, UFES, p. 125-136.
- BROSCH, Carlos Dias; SOUZA, Roberto Dias Pimentel de. **Avaliação da superfície específica dos finos do minério de ferro**. IPT, n. 762, São Paulo, 1965. Boletim.
- BRZEZICKI, J. M.; KASPERKIEWICZ, J. Automatic image analysis in evaluation of aggregate shape. **Journal of Computing in Civil Engineering**. ASCE, v. 13, n. 2, p. 123-128, 1999.
- BUNDE, Armin; HAVLIN, Shlomo. **Fractals in science**. Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- BUSSAB, W.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Atual Editora, 1993.
- CALHAU, E. L. **Argamassas de revestimento com aditivo incorporador de ar: propriedades e recomendações**. Vitória, 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES.
- CANDIA, M. C.; FRANCO, L. S. **Contribuição ao estudo das técnicas de reparo da base no desempenho dos revestimentos de argamassa**. São Paulo, 1998. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Boletim Técnico.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos S. A., 1983.
- CARASEK, Helena, **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação**. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP.
- CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo; SCARTEZINI, Luís Maurício. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, 4., 2001, **Anais...** Brasília, UNB, p. 43-67.
- CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP.
- CARNEIRO, A. M. P. **Revestimento externo em argamassa de cimento, cal e areia: sistemática das empresas de construção civil de Porto Alegre**. Porto Alegre, 1993. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.
- CARR, J. R.; NORRIS, G. M.; NEWCOMB, D. E. Characterization of aggregate shape using fractal dimension. **Transportation Research Record** - National Academy Press, Washington, n. 1278, p. 43-50, 1990.
- CARR, J.; MISRA, M.; LITCHFIELD, J. Estimating surface area for aggregate in the size range 1 mm or larger. **Transportation Research Record** - National Academy Press, Washington, n. 1362, p. 20-27, 1992.

- CARVALHO, C. H.; CAVALCANTI JR., D. A. Argamassas com adição utilizadas em Aracajú. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Anais...** Salvador, UFBA, p. 162-172.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. São Paulo: Makron Books, 1996. 209 p.
- CHAPIUS, R. P.; LÉGARÉ, P. P. A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures: effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance. **ASTM – STP 1147**, Philadelphia, 1992.
- CHERMANT, Jean-Louis. Why automatic image analysis? An introduction to this issue. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Science Ltd., v. 23, p. 127-131, 2001.
- CHERMANT, J. L.; CHERMANT, L.; DEQUIEDT, A. S.; REDON, C. Some fields and applications of automatic image analysis in civil engineering. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Science Ltd., v. 23, p. 157-169, 2001.
- CINCOTTO, M. A. C.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. IPT, n. 68, São Paulo, 1995. Boletim.
- CINCOTTO, M. A. C.; CARNEIRO, A. M. P. Estudo da influência da distribuição granulométrica nas propriedades de argamassas dosadas por curvas granulométricas. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 3., 1999, Anais...** Vitória, UFES.
- COSTER, M.; CHERMANT, J. L. Image analysis and mathematical morphology for civil engineering materials. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Science Ltd., v. 23, p. 133-151. 2001.
- COUTINHO, A. de Souza. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Lisboa: LNEC, 1973, v. 1, p. 405 - 418.
- CRESPO, Antônio Arnot. **Estatística fácil**. São Paulo: Editora Saraiva, 1996.
- DÍAZ, Vitervo O'Reilly. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: PINI, 1998.
- ENTIN, Z. B.; NEFYODOVA, L. S. Parameters relevant for standardization of sands and mortar strength. **In: International Congress on the Chemistry of Cement, 1997, Proceedings...** Gothenburg.
- FAGERLUND, G. Determination of specific surface by the BET method. **Materiaux et Constructions**, v. 6, n. 33, Paris: mai/jun 1973.
- FIORITO, Antônio J. S. I. **Manual de argamassa e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. São Paulo: PINI, 1994.
- GABAS, S. G. **Análise de imagens aplicada à caracterização de minérios - análise modal e liberação**. São Paulo, 1999. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP.
- GALLIAS, J. L.; KARA-ALI, R.; BIGAS J. P. The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Science Ltd., v. 30, p. 1543-1549, 2000.
- GUZZO, H. **Medição do volume de pelotas de minério de ferro através da digitalização de imagens**. Vitória, 1992. Monografia (Especialização), Universidade Federal do Espírito Santo – UFES.

HYSLIP, J. P.; VALLEJO, L. E. Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. **Engineering Geology**, Elsevier Science Ltd., v. 48, p. 231-244, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. Performance standards in buildings: principles for their preparation and factors to be considered. **ISO 6241**. 1984.

KOPSCHITZ, P.; FRANCINETE JR., P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. Estudo da retração e do desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas para revestimento. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, 2., 1997, **Anais...** Salvador, UFBA, p. 120-132.

KRAL, M. V.; MANGAN, M. A.; SPANOS, G.; ROSEMBERG, R. O. Three-dimensional analysis of microstructures. **Materials Characterization**, Elsevier Science Ltd., v. 45, p. 17-23, 2000.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F.; CHAN, H. C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Science Ltd., v. 29, p. 1403-1410, 1999.

LEEDER, M. R. **Sedimentology process and product**. London: Chapman e Hall, 1995. p. 35-43.

MACIEL L. L.; MELHADO, S. B. **A inserção do projeto dos revestimentos de argamassa de fachada no processo de produção do edifício**. São Paulo, 1997. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Boletim Técnico.

MARTINELLI, F. A.; HELENE, P. R. L. **Usos, funções e propriedades das argamassas mistas destinadas ao assentamento e revestimento de alvenarias**. São Paulo: 1991. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Boletim Técnico.

MARTÍNEZ, C. A.; RUBIERA, N. P. Análisis microestructural de granitos, por técnicas de processo digital de imágenes, para su utilización como áridos en hormigones. **In: Revista Ingeniería Civil**, n. 99, Madrid, 1995.

MATLAB. **Image processing toolbox: user's guide**, The Math Works Inc., 1997.

MENDES, Josué Camargo. **Estratigrafia e sedimentologia: geologia estrutural e aerofotogeologia**. Brasília: Instituto Nacional do Livro, 1972.

MENDES, J. C. **Elementos de estratigrafia**. São Paulo: T. A. Queiroz Editor Ltda, 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

McLANE, Michael. **Sedimentology**. New York: Oxford University Press, 1995.

MORA, C. F.; KWAN A. K. H.; CHAN, H. C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. **Cement and Concrete Research**. Elsevier Science Ltd, v. 28, n. 6, p. 921-932, 1998.

MORA, C. F.; KWAN, A. K. H. Sphericity, shape factor and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Science Inc., v. 30, p. 351-358, 2000.

OLIVEIRA, Hildérico Pinheiro de. **Uma introdução para o emprego racional das argamassas nos edifícios**. Salvador, 1959. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade da Bahia.

- OLIVEIRA, Marilda Barros. **Verificação de algumas propriedades de argamassas com saibro da região de Uberlândia para assentamento de tijolos cerâmicos**. São Paulo, 1989. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP.
- PERSSON, Anna-Lena. Image analysis of shape and size of fine aggregates. **Engineering Geology**, Elsevier Science Ltd, v. 50, p. 177-186, 1998.
- PINTO, J. A. N. **Elementos para dosagem de argamassas**. Santa Maria: Edições UFSM, 1986.
- POPP, José Henrique. **Geologia Geral**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1998.
- PRATT, William K. **Digital image processing**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- RAGO, F.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. C.; PASSOS GUIMARÃES, J. E. Desempenho das argamassas de revestimento mistas e aditivadas: metodologia de avaliação. **In: International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, 1994, Proceedings...** Florianópolis.
- RAGO, Fabíola & CINCOTTO, Maria Alba. Influência do tipo de cal hidratada nas propriedades de pastas cimento-cal. **In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2., 1997, Anais...** Salvador, UFBA
- RAO, G. Appa. Influence of silica fume on long-term strength of mortars containing different aggregate fractions. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Science Ltd., v. 31, p. 7-12, 2001<sub>a</sub>.
- RAO, G. Appa. Long-term during shrinkage of mortar influence of silica fume and size of fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Science Ltd., v. 31, p. 171-175, 2001<sub>b</sub>.
- ROMAN, H. R. Argamassas de assentamento para alvenarias. **In: Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil, 3., 1991, Anais...** Florianópolis.
- RUSS, J. C. **Computer-Assisted Microscopy: the measurement and analysis of images**. New York: Plenum Press, 1990.
- RUSS, J. C. **The image processing handbook**. Flórida: CRC Press, Inc., 1994.
- SABBATINI, Fernando Henrique. Agregados miúdos para argamassas de assentamento. **In: Simpósio Nacional de Agregados, 1., 1986, Anais...** São Paulo, EPUSP.
- SCARLETT, Brian. **Materials science and technology: a comprehensive treatment**. New York: Editora Weinhein, 1996.
- SELMO, Sílvia Maria de Souza. Agregados miúdos para argamassas de revestimento. **In: Simpósio Nacional de Agregados, 1., 1986, Anais...** São Paulo, EPUSP.
- SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios**. São Paulo, 1989. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP.
- SHACKLOCK, B. W.; WALKER, W. R. The specific surface of concrete aggregates and relation to the workability of concrete. **Cement and Concrete Association**, n. 4, p. 1-9, 1958.
- SINGH, B. G. Effect of the specific surface of aggregates on consistency of concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 28, n. 10, p. 989-997, 1957.
- SINGH, B. G. Specific surface of aggregates related to compressive and flexural strength of concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 29, n. 10, p. 879-907, 1958.

SINGH, B. G. Specific surface of aggregates applied to mix proportioning. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 30, n. 8, p. 893-901, 1959.

SUGUIO, K. **Introdução a Sedimentologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1973.

SUGUIO, K. **Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1980.

TRISTÃO, Fernando Avancini. **Influência da Composição Granulométrica da Areia nas Propriedades das Argamassas de Revestimento**. Santa Catarina, 1995<sub>a</sub>, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 188 p.

TRISTÃO, Fernando Avancini. Argamassas de Revestimento. **In: Seminário Nacional de Materiais de Construção Civil**, 3., 1995<sub>b</sub>, **Anais...** Vitória Escola Técnica Federal do Espírito Santo.

VALENTIN, J. Produtos e normas para revestimento. **Jornal da Normatização**, fev. 1998. Disponível em: <http://www.cobracon.org.br/ht/jn98/jn980003.html>. Acesso em: 01 set. 2001.

VEJA: Vida digital. **Foto sem filme**. São Paulo: Editora Abril, v. 33, n. 16, abr. 2000, 118 p. Encarte Especial.

WERNER, A. M.; LANGE, D. A. Quantitative image analysis of masonry mortar microstructure. **Journal of Computing in Civil Engineering**. ASCE, v. 13, n. 2, p. 110-115, 1999.

YOUNG, Tzay Y.; FU, King-Sun. **Handbook of pattern recognition and image processing**. San Diego: Academic Press, Inc., 1986.

**CAPÍTULO 1.**

**CAPÍTULO 2.**

**CAPÍTULO 3.**

**CAPÍTULO 4.**

**CAPÍTULO 5.**

**CAPÍTULO 6.**

**CAPÍTULO 7.**

**CAPÍTULO 8. ANEXOS**

**CAPÍTULO 9.**

**CAPÍTULO 10.**

**CAPÍTULO 11.**

**CAPÍTULO 12.**

**CAPÍTULO 13.**

**CAPÍTULO 14.**

**CAPÍTULO 15.**

**CAPÍTULO 16.**

**CAPÍTULO 17.**

**CAPÍTULO 18.**

**CAPÍTULO 19. ANEXO A**

**Tabela A.1: Proporção em função da textura e forma dos grãos da areia AJ**

AREIA AJ									
Diâmetro (mm)	Resultados do ensaio de morfoscopia				Porcentagem Retida (peneiramento)	Proporção em função da granulometria do material			
	Textura		Forma			liso (%)	rugoso (%)	esférico (%)	along. (%)
	liso (%)	rugoso (%)	esférico (%)	along. (%)					
4,000	50	50	33	67	1,95	0,98	0,98	0,64	1,31
3,360	46	54	46	54	2,16	0,99	1,16	0,99	1,16
2,380	72	28	56	44	8,51	6,12	2,38	4,76	3,74
2,000	60	40	60	40	8,20	4,92	3,28	4,92	3,28
1,410	68	32	56	44	15,97	10,86	5,11	8,94	7,03
1,000	72	28	64	36	21,29	15,33	5,96	13,62	7,66

0,714	64	36	48	52	15,50	9,92	5,58	7,44	8,06
0,500	44	56	68	32	3,79	1,67	2,12	2,58	1,21
0,350	16	84	44	56	6,71	1,07	5,64	2,95	3,76
0,250	54	46	58	42	7,05	3,81	3,24	4,09	2,96
0,177	36	64	48	52	4,07	1,47	2,61	1,95	2,12
0,125	24	76	44	56	1,44	0,34	1,09	0,63	0,80
0,105	20	80	68	32	1,52	0,30	1,22	1,04	0,49
0,074	8	92	72	28	1,85	0,15	1,70	1,33	0,52
0,062	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0
< 0,062	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0
Porcentagem Total					100	58	42	56	44

Tabela A.2: Proporção em função da textura e forma dos grãos da areia AR

AREIA AR									
Diâmetro (mm)	Resultados do ensaio de morfoscopia				Porcentagem retida (peneiramento)	Proporção em função da granulometria do material			
	Textura		Forma			liso (%)	rugoso (%)	esférico (%)	along. (%)
	liso (%)	rugoso (%)	esférico (%)	along. (%)					
4,000	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
3,360	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2,380	32	68	60	40	3	0,84	1,79	1,58	1,05
2,000	12	88	76	24	2	0,26	1,92	1,66	0,52
1,410	4	96	80	20	6	0,26	6,18	5,15	1,29
1,000	0	100	56	44	13	0,00	13,24	7,42	5,83
0,714	8	92	52	48	20	1,64	18,84	10,65	9,83
0,500	12	88	40	60	21	2,51	18,38	8,35	12,53
0,350	4	96	36	64	16	0,63	15,12	5,67	10,08
0,250	4	96	44	56	12	0,48	11,56	5,30	6,75
0,177	8	92	28	72	5	0,41	4,71	1,43	3,69
0,125	8	92	84	16	1	0,07	0,83	0,76	0,14
0,105	4	96	56	44	0	0,01	0,17	0,10	0,08
0,074	8	92	36	64	0	0,01	0,13	0,05	0,09
0,062	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
< 0,062	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00



---

Porcentagem Total	100	7	93	48	52
-------------------	-----	---	----	----	----

## 0.1 ANEXO B

**Tabela B.1: Médias e desvios padrões da variável dimensão máxima segundo os fatores fração e procedência.**

Estatística Descritiva				
Variável dependente: Dimensão máxima				
Fração	Procedência	Média	Desvio Padrão	N
4,8-2,4	AJ	4,4932	,7810	394
	AR	4,8882	1,0516	393
	Total	4,6905	,9463	787
2,4-1,2	AJ	2,8879	,5560	398
	AR	2,9950	,6901	395
	Total	2,9412	,6283	793
1,2-0,6	AJ	1,7678	,3562	398
	AR	1,4689	,3342	400
	Total	1,6179	,3762	798
0,6-0,3	AJ	,6947	,1906	400
	AR	,7799	,2081	400
	Total	,7373	,2039	800
0,3-0,15	AJ	,3715	8,288E-02	400
	AR	,4307	9,349E-02	383
	Total	,4004	9,300E-02	783
0,15-0,075	AJ	,1934	4,172E-02	400
	AR	,2060	5,658E-02	395
	Total	,1996	5,003E-02	795
Total	AJ	1,7268	1,5959	2390
	AR	1,7962	1,7426	2366
	Total	1,7614	1,6707	4756

**Tabela B.2: Médias e desvios padrões da variável dimensão mínima segundo os fatores fração e procedência.**

Estatística Descritiva				
Variável dependente: Dimensão mínima				
Fração	Procedência	Média	Desvio Padrão	N

4,8-2,4	AJ	3,2034	,5522	394
	AR	3,2948	,6259	393
	Total	3,2490	,5916	787
2,4-1,2	AJ	2,0335	,3768	398
	AR	1,9854	,4150	395
	Total	2,0096	,3968	793
1,2-0,6	AJ	1,1872	,2320	398
	AR	,9932	,1950	400
	Total	1,0899	,2351	798
0,6-0,3	AJ	,4500	9,542E-02	400
	AR	,5187	,1193	400
	Total	,4844	,1133	800
0,3-0,15	AJ	,2531	5,369E-02	400
	AR	,2975	4,868E-02	383
	Total	,2748	5,587E-02	783
0,15-0,075	AJ	,1337	2,316E-02	400
	AR	,1403	3,056E-02	395
	Total	,1370	2,728E-02	795
Total	AJ	1,2045	1,1389	2390
	AR	1,2059	1,1577	2366
	Total	1,2052	1,1482	4756

**Tabela B.3: Médias e desvios padrões da variável dimensão média segundo os fatores fração e procedência.**

Estatística Descritiva				
Variável dependente: Dimensão média				
Fração	Procedência	Média	Desvio Padrão	N
4,8-2,4	AJ	3,8507	,5847	394
	AR	4,0940	,7442	393
	Total	3,9722	,6797	787
2,4-1,2	AJ	2,4633	,4130	398
	AR	2,4926	,4969	395
	Total	2,4779	,4567	793
1,2-0,6	AJ	1,477	,2635	398
	AR	1,2336	,2420	400
	Total	1,3554	,2807	798

0,6-0,3	AJ	,5794	,1286	400
	AR	,6517	,1491	400
	Total	,6133	,1444	800
0,3-0,15	AJ	,3148	6,202E-02	400
	AR	,3666	6,298E-02	383
	Total	,3401	6,761E-02	783
0,15-0,075	AJ	,1634	2,915E-02	400
	AR	,1730	3,974E-02	395
	Total	,1682	3,512E-02	795
Total	AJ	1,4673	1,3573	2390
	AR	1,5031	1,4373	2366
	Total	1,4851	1,3977	4756

**Tabela B.4: Médias e desvios padrões da variável esfericidade segundo os fatores fração e procedência**

**Estatística Descritiva**

Variável dependente: Esfericidade

Fração	Procedência	Média	Desvio Padrão	N
4,8-2,4	AJ	,81626	5,9222E-02	394
	AR	,79186	6,9769E-02	393
	Total	,80408	6,5805E-02	787
2,4-1,2	AJ	,81411	6,3028E-02	398
	AR	,78627	7,1772E-02	395
	Total	,80025	6,8905E-02	793
1,2-0,6	AJ	,78189	6,2308E-02	398
	AR	,79752	6,3715E-02	400
	Total	,78972	6,3461E-02	798
0,6-0,3	AJ	,78189	6,9490E-02	400
	AR	,78596	7,2403E-02	400
	Total	,78393	7,0946E-02	800
0,3-0,15	AJ	,79632	6,7957E-02	400
	AR	,79518	6,7781E-02	383
	Total	,79576	6,7830E-02	783
0,15-0,075	AJ	,80215	7,1313E-02	400
	AR	,78583	7,4928E-02	395
	Total	,79404	7,3540E-02	795

Total	AJ	,79873	6,7061E-02	2390
	AR	,79042	7,0242E-02	2366
	Total	,79459	6,8780E-02	4756

---

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)