

NAYARA YUN LIM

**VARIABILIDADE NAS PROPRIEDADES DA AREIA ARTIFICIAL
PRODUZIDA A PARTIR DA BRITAGEM DE CALCÁRIO**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas
do curso de graduação do Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientadora: Dra. Carina Ulsen

Coorientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

**São Paulo
2013**

NAYARA YUN LIM

**VARIABILIDADE NAS PROPRIEDADES DA AREIA ARTIFICIAL
PRODUZIDA A PARTIR DA BRITAGEM DE CALCÁRIO**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas
do curso de graduação do Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientadora: Prof. Dra. Carina Ulsen

Coorientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

**São Paulo
2013**

TF-2013
L628v
Sjens 2451464

H2013g

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009718

Lim, Nayara Yun

Variabilidade nas propriedades a areia artificial produzida a partir
da britagem de calcário / N. Y. Lim. São Paulo, 2013.

45 p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1. Materiais de Construção 2. Areia 3. Caracterização Tecnológica
de minérios I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Carina Ulsen, minha orientadora, pela sua dedicação, competência, atenção e incentivo que tornaram possível a conclusão deste Trabalho de Formatura.

Ao Gustav, Juliana, e todas as outras pessoas do laboratório, pela paciência, disponibilidade e ajuda neste trabalho.

Ao Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) que disponibilizou equipamentos e ensaios para as análises das amostras.

À fábrica de argamassas e aos seus funcionários que disponibilizaram e separaram as amostras de areia artificial.

Aos funcionários do Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM).

À minha família e amigos.

RESUMO

A areia é o segundo bem mineral mais produzido no país e a estimativa é que o aumento na produção dos agregados continue nos próximos anos. A extração de areia de fontes naturais não renováveis está cada vez mais restrita e grande parte deste bem mineral consumido nas grandes metrópoles Brasileiras provém de municípios distantes, com preços cada vez mais elevados. Neste contexto, o uso da areia artificial resultante da britagem de rochas de jazidas mais próximas vem ganhando presença.

A areia artificial é produzida a partir de sucessivas etapas de britagem em até três estágios seguida de cominuição em britadores de impacto vertical, que conferem maior regularidade na morfologia da areia e homogeneidade na distribuição granulométrica, propriedades que afetam diretamente o comportamento reológico de argamassas e concretos. Dessa forma, o acompanhamento ou controle dos produtos é fundamental para a garantia da qualidade e propriedades das argamassas e concretos.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a variabilidade composicional e a distribuição de tamanho e forma das partículas de areia artificial produzida a partir da cominuição de brita calcária e a influência no comportamento reológico de argamassas.

Foram coletadas 57 amostras de areia artificial, com amostragens sistemáticas a cada turno de produção, durante 60 dias. Para cada uma delas foram determinadas as curvas de distribuição granulométrica, parâmetros de esfericidade e relação de aspecto, composição mineralógica e composição química de alíquotas representativas. Após a análise dos resultados, foram escolhidas três amostras com características distintas de forma para formulação de argamassas e determinação do consumo de água em relação ao torque da mistura.

Os resultados obtidos apresentaram pouca variação em relação à forma das partículas e maior variação nas curvas de distribuição granulométricas. Em relação ao ensaio reológico, o consumo de água necessário para atingir o mesmo torque de mistura desejado também foi similar. Os resultados demonstraram que o processo de cominuição em moinho BHS é eficiente na produção de areia artificial de composição e forma pouco variáveis; isso pode ser atribuído tanto à eficácia do mecanismo de processamento como à possível constância na frente de lavra.

ABSTRACT

The sand is the second most produced mineral in the country, estimates indicate that an increase in production of its aggregates will continue during the following years. The extraction of the sand from renewable natural sources is even more restricted and a great part of this mineral good is consumed in great Brazilian metropolis coming from distant settlements, with prices that are increasingly more expensive. In this context, the use of artificial sand resulting from the comminution of rock deposits that are close from these metropolis is naturally taking place.

The artificial sand is produced from successive steps of comminution in at least three stages following the crushing that occurs in a Vertical Shaft Impact Crusher, that promotes an efficient regulation on the morphology of the sand and its homogeneity in the particle size distribution, proprieties that directly affect the rheological behavior of the mortar and concretes. In this way, the control of the product is fundamental in order to have the guarantee of the quality and properties of the mortar and concretes.

This work has the objective of evaluating the compositional variability, size distribution and shape of the particles of the artificial sand produced from the comminution of crushed limestone and the influence on rheological behavior of the mortar.

In this work, 57 samples of artificial sand were collected, with systematic samples in each bout of production, during 60 days. For each one of them, it was determined the particle size distribution curve, variables of sphericity, aspect ratio, mineral composition and chemical composition of the representative aliquot. After the results analysis, three samples were chosen with extreme characteristics in terms of shape for formulation of mortars and the determination of water consumption in relation to the mixture of torque.

The results obtained revealed a small variation in relation to the shape of the particles and a bigger variation on the particle size distribution curves. In relation to the rheological test, the consumption of water required to reach the same amount of torque on the desired mixture was also similar. The results showed that the comminution process in a BHS mill is efficient in terms of the production of artificial sand with characteristics containing a small variation related to the shape and composition. This can be attributed to the efficiency of the mechanism process as well as the constant extraction from the same mining front.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	5
3.2	AREIA	6
3.2.1	<i>Origem e características da areia</i>	<i>6</i>
3.2.2	<i>Produção de areia artificial.....</i>	<i>7</i>
3.2.3	<i>Argamassas industrializadas</i>	<i>8</i>
3.2.4	<i>Propriedades da areia artificial para formulação de argamassas.....</i>	<i>9</i>
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA AREIA	12
3.3.1	<i>Distribuição granulométrica</i>	<i>12</i>
3.3.2	<i>Forma de partículas</i>	<i>13</i>
3.3.3	<i>Composição mineralógica.....</i>	<i>15</i>
3.3.4	<i>Composição química.....</i>	<i>16</i>
3.4	DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIA ARTIFICIAL	16
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
4.1	AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	19
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ARTIFICIAL.....	19
4.2.1	<i>Distribuição de tamanho e forma de partículas</i>	<i>19</i>
4.2.2	<i>Composição mineralógica.....</i>	<i>20</i>
4.2.3	<i>Composição química.....</i>	<i>22</i>
4.3	DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIA ARTIFICIAL	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
5.1	DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS.....	24
5.2	MORFOLOGIA DA AREIA ARTIFICIAL	26
5.3	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA	26
5.4	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	27
5.5	DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIA ARTIFICIAL	29
5.5.1	<i>Seleção das amostras</i>	<i>29</i>
5.5.2	<i>Desempenho reológico da argamassa com areia artificial.....</i>	<i>31</i>
6	CONCLUSÕES.....	35
7	REFERÊNCIAS	36

APÊNDICE

APÊNDICE 1 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	40
APÊNDICE 2 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE FOMA.	42
APÊNDICE 3 – DENDOGRAMAS.....	43
APÊNDICE 4 – RESULTADOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	45

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – PRODUÇÃO DE AREIA E BRITA (DNPM, 2012).....	1
FIGURA 1.2 – PREÇO A AREIA (DNPM, 2012).....	2
FIGURA 3.1 – PREÇO MÉDIO POR TONELADA DE AREIA MÉDIA POR REGIÃO JAN-JUL/2009 (DNPM, 2009).....	6
FIGURA 3.2 – ESQUEMA INTERNO DO MOINHO BHS ROTOR MILL RPM	8
FIGURA 3.3 – CONSUMO DE ÁGUA EM UM MEIO COM PARTÍCULAS ARREDONDADAS EM COMPARAÇÃO A UM MEIO COM PARTÍCULAS ALONGADAS	10
FIGURA 3.4 - EFEITO DA QUANTIDADE E DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS SOBRE A EFICIÊNCIA DO EMPACOTAMENTO	11
FIGURA 3.5 - ESFERICIDADE E ARREDONDAMENTO DE PARTÍCULAS (POOLE E SIMS, 1998).....	13
FIGURA 3.6– CAMSIZER, ANÁLISE DE FIGURAS DINÂMICAS	14
FIGURA 3.7 – REPRESENTAÇÃO DOS DIFERENTES VALORES DE RELAÇÃO DE ASPECTO	15
FIGURA 3.8 - REÔMETRO ROTACIONAL DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL DA POLI-USP	17
FIGURA 4.1 – FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	18
FIGURA 4.2 – AMOSTRAS COLETADAS E AMOSTRADAS EM DIVISOR DE AMOSTRAS TIPO JONES	19
FIGURA 4.3- ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E DA FORMA DAS PARTÍCULAS EM EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE IMAGENS POR FLUXO DE PARTÍCULAS CAMSIZER.....	20
FIGURA 4.4 - ALÍQUOTAS PULVERIZADAS (A) E PRENSAGEM EM SUPORTE PRÓPRIO PARA A DRX (B)	21
FIGURA 4.5 - DIFRATÔMETRO DE RAIOS X - X'PERT MPD, MARCA PANALYTICAL	21
FIGURA 4.6 - ESPECTRÔMETRO POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X AXIOS ADVANCED, MARCA PANALYTICAL.....	22
FIGURA 5.1 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA OBTIDA POR ANÁLISE DINÂMICA EM EQUIPAMENTO CAMSZIER	24
FIGURA 5.2 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA COMPARATIVA ENTRE PENEIRAMENTO A SECO E ANÁLISE DE FLUXO DE IMAGENS	25
FIGURA 5.3 – VARIAÇÃO DA RELAÇÃO DE ASPECTO E ESFERICIDADE DE TODAS AS AMOSTRAS	26
FIGURA 5.4 – COMPARAÇÃO DO DIFRATOGRAMA DAS AMOSTRAS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO EM FUNÇÃO DOS PICOS	27
FIGURA 5.5 – VARIAÇÃO DOS TEORES DOS PRINCIPAIS ÓXIDOS NAS AMOSTRAS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO	28
FIGURA 5.6 – DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS MÉDIAS DE CADA GRUPO	30
FIGURA 5.7 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	30
FIGURA 5.8 – RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AS AMOSTRAS SELECIONADAS.....	31
FIGURA 5.9 – CURVAS DE MISTURA PARA DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA PARA ARGAMASSAS	33
FIGURA 5.10 – DISTRIBUIÇÃO DAS FASES DE ARGAMASSAS	33

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – MÉTODO DE ANÁLISE DE TAMANHO DAS PARTÍCULAS (WILLS E NAPIER-MUNN, 2006)	12
TABELA 5.1 – IDENTIFICAÇÃO DOS COMPOSTOS MINERALÓGICOS OBTIDOS A PARTIR DAS ANÁLISES DOS PICOS DO DIFRATOGRAMA	27
TABELA 5.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO	28
TABELA 5.3 – VALORES MÉDIOS DA ESFERICIDADE, RELAÇÃO DE ASPECTO E AMPLITUDE DA DISTRIBUIÇÃO	29
TABELA 5.4 – PROPRIEDADES DAS AMOSTRAS SELECIONADAS	31
TABELA 5.5 – FORMULAÇÃO DA ARGAMASSA	32
TABELA 5.6 – MÉDIA DA RELAÇÃO DE ASPECTO E ESFERICIDADE DAS AMOSTRAS	34

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o DNPM, nos anos de 2009 a 2011, a areia foi o segundo bem mineral mais produzido no Brasil e a brita o terceiro, além disso, a Figura 1.1 mostra um aumento na produção de agregados nesse período, com destaque para o crescimento da produção de areia, que foi de 40%. Em 2012, o crescimento foi de 4% ao ano e a estimativa para 2013 é que o Produto Interno do Setor continue entre 3,5 e 4%. Isso se deve a maiores investimentos em infraestrutura, crescimentos moderados na área imobiliária, pacotes de concessões de ferrovias e rodovias anunciadas pelo governo federal e linhas de financiamento do BNDES.

Dentre os principais agregados utilizados na construção civil encontra-se a areia, aplicada em concretos, argamassas e em pavimentação asfáltica. Essas ocupam primeiro lugar em consumo de matéria prima no mundo e segundo lugar em valor, devido aos baixos preços unitários. A extração de areias naturais em leitos de rios está cada vez mais restrita e grande parte da areia consumida nas grandes metrópoles provém de municípios distantes, resultando em um alto custo no produto, principalmente devido ao transporte – 1/3 do preço da areia e 2/3 do preço da brita (LA SERNA e REZENDE, 2009). Na Figura 1.2 é possível observar a evolução do preço da areia, entre 2009 e 2011 houve um aumento de 16%. Em função disto, a indústria da construção civil busca alternativas para redução de custos, agilidade de execução e a melhoria das propriedades do produto final. Nesse contexto, o uso de areia artificial vem ganhando presença.

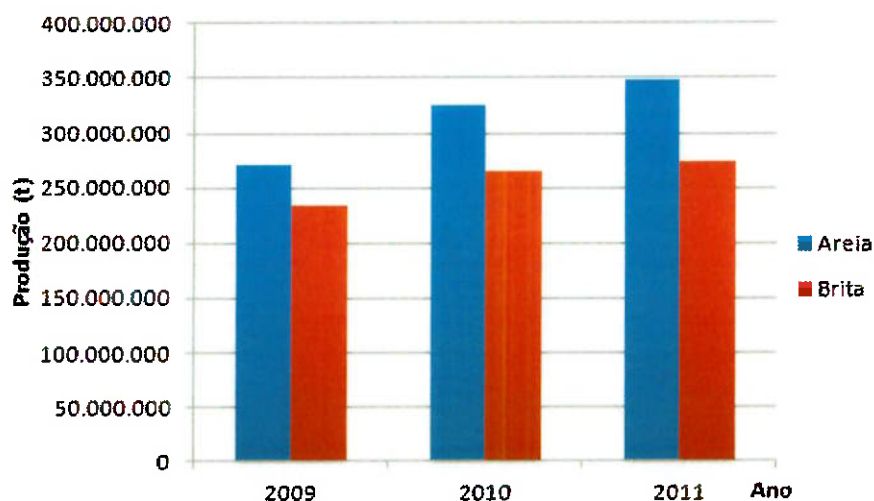


Figura 1.1 – Produção de areia e brita (DNPM, 2012)

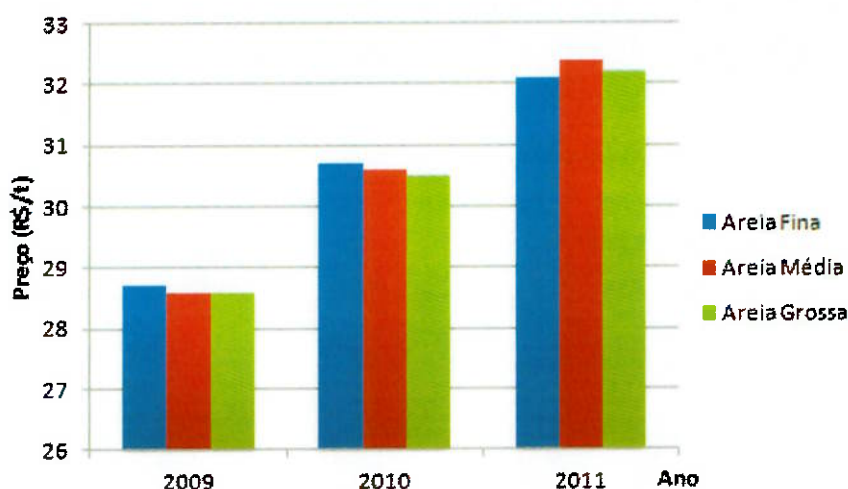


Figura 1.2 – Preço a areia (DNPM, 2012)

Em geral, o volume ocupado pelo agregado é de 60% a 80% do volume total da mistura de argamassa, assim as características dos agregados, como forma, textura e distribuição granulométrica têm forte influência nas propriedades das argamassas e em seu custo, pois influenciam diretamente no comportamento no estado fluido e no estado endurecido das argamassas (OLIVEIRA, STUDART *et al.*, 2000). Portanto, é necessário o estudo dessas características para que o consumo de areia artificial aumente e incentive a substituição da areia natural pela areia artificial.

No estado plástico a propriedade mais importante das argamassas é a trabalhabilidade, na qual as características dos agregados exercem grande influência (NEVES e LIMA, 2000). Grãos com morfologia irregular elevam o consumo de água para que se atinja comportamento reológico adequado, enquanto grãos menos ângulos melhoram a trabalhabilidade das argamassas (D'AGOSTINO, 2004).

De acordo com a norma (ABNT, 2008) agregados graúdos (+4,8 mm) podem ser avaliados através da medição manual do maior e do menor diâmetro de cada partícula utilizando um paquímetro, sendo assim um método moroso e impreciso, pois dependem do operador e a análise de um número significativo de partículas levaria um tempo extremamente elevado (AL-ROUSAN, MASAD *et al.*, 2007). Com o avanço da tecnologia surgiram equipamentos de análise de imagens dinâmica capazes de avaliar dezenas de milhares até milhões de partículas em poucos minutos, sendo um assim, um método mais preciso e representativo.

Uma vez que os métodos para determinação da morfologia de agregados até então utilizados eram morosos, imprecisos e com baixa representatividade e o avanço tecnológico possibilitou equipamentos mais preciso e representativos, este trabalho utiliza um moderno

equipamento óptico-eletrônico que mede o tamanho e a forma das partículas através da análise dinâmica de imagens 2D com ótima reprodutibilidade. Como o uso da areia artificial ainda requer mais pesquisas e tende a crescer nos próximos anos, este trabalho tem a importância de estudar a variabilidade das principais características da areia e sua influência no consumo de água e cimento na formulação de argamassas.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a variabilidade composicional, a distribuição de tamanho e forma das partículas de areia artificial produzida a partir da cominuição de brita calcária (brita 1, de 9,5 a 19 mm) e a influência no comportamento reológico de argamassas industrializadas.

O escopo do trabalho envolveu a amostragem sistemática de areia artificial em uma fábrica de argamassas, a caracterização da distribuição granulométrica e da morfologia das partículas, composição química e mineralógica e a formulação de misturas cimentícias com areias de distintas características morfológicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Agregados são materiais granulares, sem forma ou volume definidos, com dimensões e propriedades para uso em obras de engenharia civil (LA SERNA e REZENDE, 2009). Dentre esses materiais a pedra britada, areia e cascalho as substâncias minerais mais utilizadas no Brasil e no mundo.

De acordo com a NBR 9935 (ABNT, 1987) os agregados podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os primeiros são extraídos da natureza já em sua forma particulada, como areia e cascalho, enquanto os artificiais são removidos da fonte em forma de blocos, exigindo processos industriais para a sua fragmentação adequada, como a brita e a areia artificial.

Quanto à classificação em relação à dimensão, são especificados pela norma brasileira NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997), em agregados miúdos como a areia natural ou areia artificial, aqueles retidos em peneiras com abertura de malha de 0,075 mm e passantes em 4,8 mm; e em agregados graúdos como pedregulho ou brita, retidos em peneiras com abertura de malha de 4,8 mm e passantes em 152 mm. O rachão é o material obtido diretamente do britador primário e que é retido na peneira de 76 mm.

A mineração de agregados para construção civil gera grandes volumes de produção, apresenta beneficiamento simples e necessita ser produzido no entorno do local de consumo, devido ao baixo valor unitário (LA SERNA e REZENDE, 2009). Sendo assim, o custo do frete, 1/3 do preço da areia e 2/3 do preço da brita, é fator determinante para a distância em que o produto mineral pode chegar ao consumidor de forma economicamente viável. O preço médio de areia média por região do país é encontrada na Figura 3.1 e mostra que a região de São Paulo possui o maior valor.

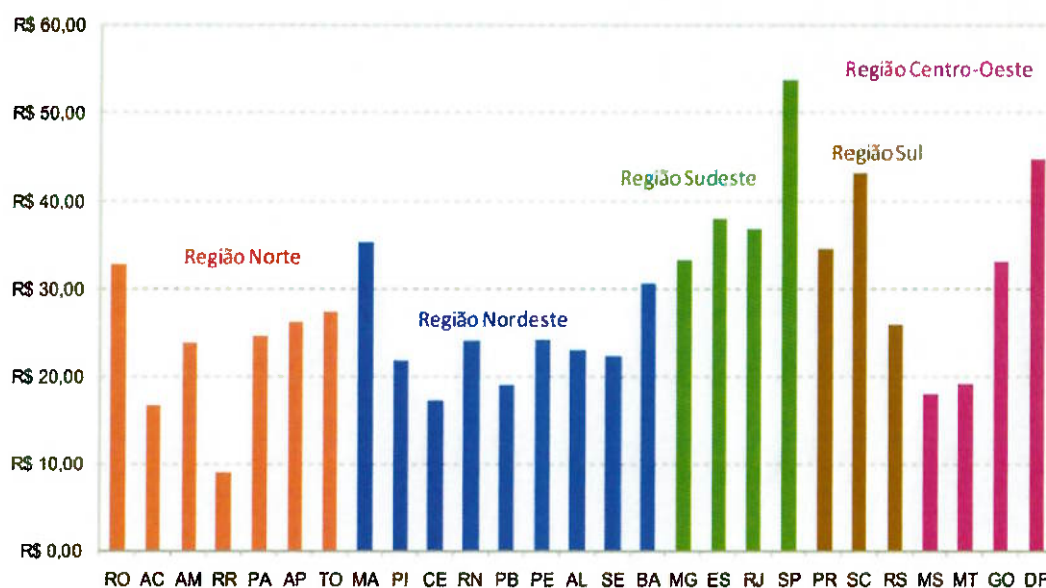


Figura 3.1 – Preço médio por tonelada de areia média por região jan-jul/2009 (DNPM, 2009)

As aplicações dos agregados estão relacionadas aos tamanhos e às granulometrias de cada material. De acordo com a DNPM, em 2007 a construção civil demandou 66% do consumo de rocha britada beneficiada e em relação à areia, o grande setor consumidor também foi a construção civil. Dentre o consumo de areia, 35% é destinado a argamassa, 20% para concreteiras, 15% a construtoras e 30% para outras finalidades (LA SERNA E REZENDE, 2009).

3.2 AREIA

3.2.1 Origem e características da areia

A areia é um agregado miúdo, com origem natural ou resultante da britagem de rochas e segundo a ABNT é um bem mineral constituído basicamente por quartzo. As características físicas dos grãos, como tamanho, arredondamento e esfericidade estão diretamente relacionadas aos processos de fragmentação e transporte e distância que sofreram.

A areia pode ser caracterizada de diferentes formas, como pelo seu módulo de finura ou por especificações de faixas granulométricas. De acordo com a NBR 7211/1983 a areia pode ser classificada de acordo com o seu módulo de finura em: muito finas (- 1,35 a 2,25), finas (-1,71 a 2,78), médias (-2,11 a 3,28) e grossas (-2,71 a 4,02). Enquanto para SELMO (1989) são classificadas em: fina (<2,0), média (2,0 a 3,0) e grossa (>3,0).

A areia pode ser encontrada em toda a crosta terrestre, mas para o uso como material para construção civil é obtida a partir de depósitos de leitos de rios e planícies

aluviais, rochas sedimentares e mantos de alteração de rochas cristalinas. Areias de praias e dunas litorâneas não apresentam propriedades adequadas para aplicação em construção devido à presença de sais, elevado conteúdo de finos e pelos elevados teores de material micácio (ANEPAC).

3.2.2 Produção de areia artificial

A produção de areia artificial ou industrial tende a ganhar espaço em relação à extração de areia natural devido ao seu melhor custo/benefício. Um dos motivos é a exaustão de areia natural próxima às áreas urbanas e os impactos ambientais que a extração da mesma causa ao meio ambiente, como a retirada da cobertura vegetal e a degradação do curso d'água. Em 2000, a participação da areia artificial no mercado de São Paulo foi de 7%, e em 2002 esse número subiu para 9% (ALMEIDA e SAMPAIO, 2005).

A areia artificial é produzida nas minerações de agregados a partir da britagem de rochas, e geralmente são subprodutos da produção de outros agregados, como a brita. Rochas de granito, calcário e basalto são britadas e moídas para a produção de brita, mas esse processo gera também um volume de finos considerável, que são as areias artificiais, também conhecidos como pó de pedra. Por ser um subproduto do processo, essas areias costumam apresentar forma irregular e textura rugosa.

Um estudo realizado sobre a produção de areia artificial a partir dos finos de granito, com formato alongado ou lamelar, utilizando o britador de impacto vertical (VSI), modelo Barmac (fabricado pela Metso) concluiu que houve uma melhoria na forma das partículas, tornando-as mais arredondadas e próximas a areia padrão utilizada em obras na construção civil (SALVADOR, 2007).

Outro equipamento similar ao VSI, popular em países Europeus, mas menos conhecido no Brasil, é o moinho de areia BHS Rotor Impact Mill RPM (Figura 3.2), que de acordo com seu catálogo garante a produção de areia artificial com forma cúbica. De modo similar ao VSI, as partículas entram em choque entre si e é capaz de produzir areia artificial com forma e textura mais regulares.

BHS - Rotor Impact Mill RPM

Inside view of the Rotor Impact Mill

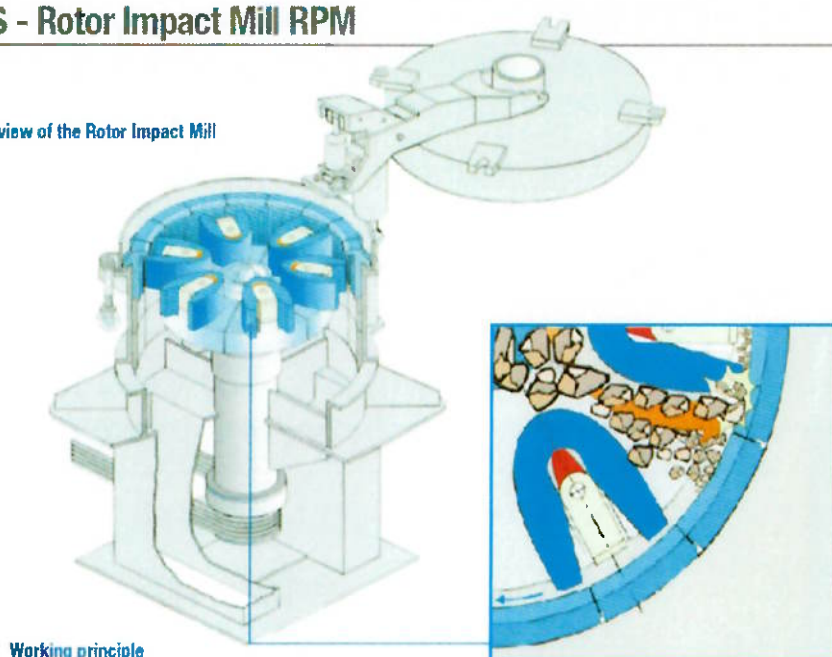


Figura 3.2 – Esquema interno do moinho BHS Rotor Mill RPM

O moinho BHS Rotor Impact Mill RPM é utilizado em uma fábrica de argamassas no Estado de São Paulo, para produzir areia a partir da cominuição da brita (9,5 – 19 mm), no qual é produzida areia artificial para a fabricação de argamassas. A capacidade do equipamento é de 25 t/h com uma produção média de 64% de areia média, 24% de areia fina e 12% de areia grossa.

O estado de São Paulo é o que mais produz e consome areia no país; em 2011 concentrou 23% do total nacional, e, além disso, apresenta também o maior preço para o mesmo, R\$ 32,00 por tonelada (DNPM, 2012). O aumento das distâncias de transporte e seu consequente aumento no preço, somado às dificuldades cada vez maiores de extração de areia natural, a inevitabilidade na geração do pó de pedra durante a britagem das rochas, são fatores que contribuem para o aumento da participação da areia artificial no mercado de argamassas e concretos industrializados.

3.2.3 Argamassas industrializadas

De acordo com a norma NBR 13529 (ABNT, 1995), argamassas industrializadas são aquelas provenientes da dosagem controlada em plantas industriais de aglomerantes, agregados e aditivos em estado seco e homogêneo. Estes compõem uma mistura seca à qual o consumidor adiciona somente a quantidade de água requerida para proceder à mistura.

O uso de argamassas industrializadas está cada vez mais comum; seu processo quando comparado ao das outras argamassas, em que a mistura dos componentes é feito na própria obra, é muito mais simples. Assim, o preparo das argamassas industriais exige um número menor de etapas, demandando menos transporte e armazenagem de materiais, e menos mão de obra.

De acordo com Regattieri e Silva (2006) existem várias vantagens do uso da argamassa industrializada em relação ao uso da argamassa preparada em obra. O recebimento e descarregamento dos materiais são de forma ensacada e dispostos sobre pallets, demandando menos mão de obra e menores perdas; o transporte dos materiais pode ser feita por bombeamento e o armazenamento e o preparo pode ser feitos no local de aplicação. Além disso, ao contrário das argamassas comuns, em que é necessário dosar todos os materiais, dependendo assim da experiência do mestre de obras, a medição dos materiais é assegurada pelo próprio fabricante e o cuidado necessário é somente com a quantidade de água a ser adicionada para garantir a trabalhabilidade à mistura.

O custo da argamassa industrializada, em termos de material, é 129% maior que o custo da argamassa preparada em obra (SELMO, NAKAKURA, MIRANDA e MEDEIROS, 2002). Mas ao considerar o gasto global, incluindo material e mão de obra, o preço da argamassa industrial torna-se vantajoso, pois há um grande desperdício de materiais no preparo da argamassa em obra.

As argamassas industrializadas são aplicadas em contrapisos, revestimentos internos e externos, assentamento e alvenaria, decoração e textura entre outros. São comercializados em sacos ou em silos, em que seu descarregamento é feito pelo próprio caminhão.

3.2.4 Propriedades da areia artificial para formulação de argamassas

A forma das partículas de areia artificial depende da natureza de origem do material, do tipo de britador e da sua relação de redução. As partículas mais alongadas ou lamelares apresentam área específica maior do que as partículas de forma regular, assim influenciam negativamente na trabalhabilidade da argamassa (NEVILLE, 1997).

Agregados miúdos com menor proporção de grãos angulosos tende a produzir argamassas com melhor trabalhabilidade, mantendo-se a granulometria contínua (CINCOTTO, SILVA e CASCUDO, 1995).

A textura superficial de um grão pode ser classificada em polida, fosca ou rugosa, de acordo com a norma NBR 7389 (ABNT, 1992). Na prática é observado que partículas de agregados com forma arredondada e textura lisa requerem menor consumo de pasta de

cimento e água para se obter a trabalhabilidade desejada em relação a partículas de forma angulosas e textura rugosa. A Figura 3.3 ilustra o aumento do consumo de água em um meio com partículas alongadas em relação a um meio com partículas arredondadas. O agregado miúdo determina a demanda de água, que é fator importante na durabilidade de argamassas (GRIGOLI, 2001).

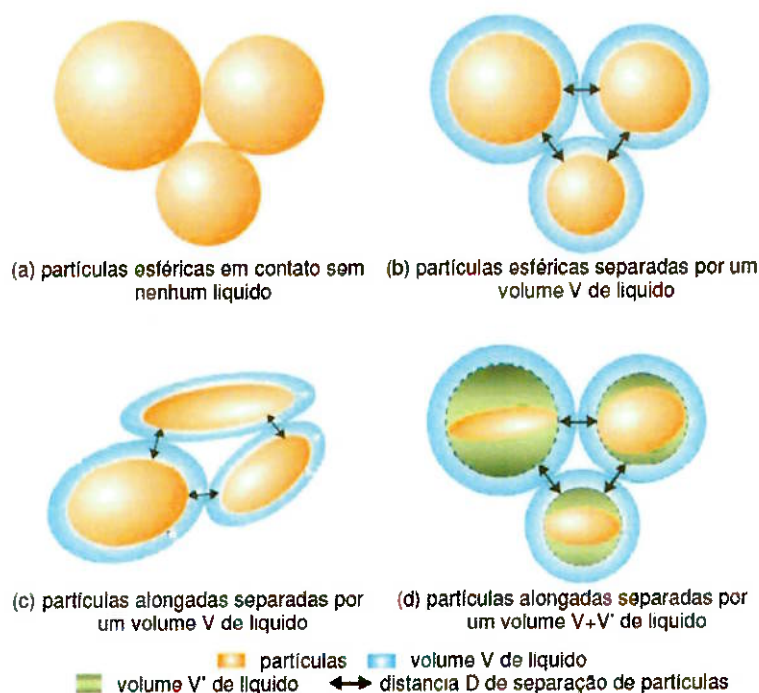


Figura 3.3 – Consumo de água em um meio com partículas arredondadas em comparação a um meio com partículas alongadas

Geralmente a areia artificial produzida pela britagem de granito apresenta grãos angulosos com baixa esfericidade e superfície dos grãos rugosa (NEVES, 2001). Essas características influenciam na textura das argamassas, deixando-as mais áspera, apesar de melhorar a aderência do aglomerante à superfície do grão (CARASEK, CASCUDO E SCARTEZINI, 2001).

Os materiais pulverulentos são aqueles em que as partículas passam pela peneira de 0,075 mm de abertura (ABNT, 2003). A NBR 7211 (ABNT, 2003) estabeleceu o teor máximo para estes finos: para concretos submetidos à abrasão, máximo de 13% de finos de areia artificial e para os demais concretos, máximo de 17% de finos de areia artificial.

No caso da produção de argamassas, o teor de materiais pulverulentos pode melhorar a trabalhabilidade e contribuir na melhoria da porosidade e na durabilidade (GRIGOLI, 2001).

A distribuição do tamanho de partículas influencia na qualidade e no custo da argamassa. Areia de granulometria grossa produz argamassa de superfície áspera e de difícil trabalhabilidade, enquanto areia de granulometria muito fina necessita mais água para o mesmo traço e trabalhabilidade, por apresentar maior área de superfície específica. O empacotamento dos agregados com menor número de vazios será mais econômico, pois requer menor quantidade de pasta de cimento (ISHIKAWA, 2003). A Figura 3.4 ilustra diversos empacotamento de partículas possíveis, mostrando a influência dos diferentes tamanho de partículas no preenchimento de vazios.

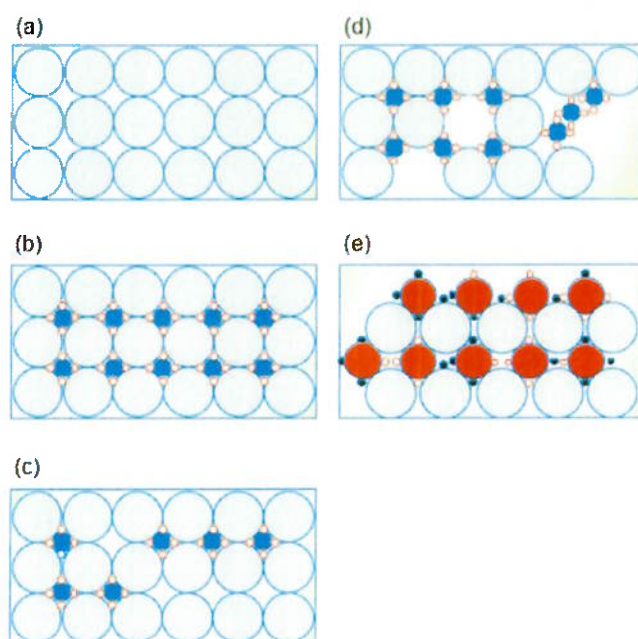


Figura 3.4 - Efeito da quantidade e do tamanho das partículas sobre a eficiência do empacotamento

A distribuição granulométrica da areia interfere nas propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. Assim, é desejável uma distribuição granulométrica contínua e com um baixo volume de vazios, para que haja uma redução no consumo de água sem perder a trabalhabilidade no estado fresco, e no estado endurecido uma minimização das tensões internas do aglomerante, redução da permeabilidade e uma contribuição no incremento das resistências mecânicas às solicitações externas (CINCOTTO e CARNEIRO, 1999).

Quanto mais ampla for a distribuição granulométrica, maior será a densidade de empacotamento, reduzindo a quantidade de água necessária para se obter uma boa trabalhabilidade, pois as distribuições granulométricas estreitas aumentam os espaços vazios entre as partículas (PILEGGI, 2001).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA AREIA

As propriedades da areia que mais influenciam no desempenho de argamassas são: distribuição granulométrica e empacotamento, forma das partículas, composição química e mineralógica.

3.3.1 Distribuição granulométrica

A análise da distribuição granulométrica e da morfologia das partículas dos agregados é de extrema importância, uma vez que influenciam diretamente no comportamento reológico do sistema e no desempenho de argamassas e concretos (OLIVEIRA, STUART, 2000).

A determinação da distribuição de tamanho de partículas pode ser feita de diversos métodos e equipamentos, o mesmo pode ser observado na Tabela 3.1. A escolha do método deve ser feito de acordo com a granulação da amostra, da necessidade do fracionamento desta e da possibilidade de se trabalhar em meio úmido ou não.

Tabela 3.1 – Método de análise de tamanho das partículas (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006)

Método	Intervalo Granulométrico (µm)	Meio	Fracionamento de amostras
Peneiramento	5 – 100.000	Seco ou úmido	Sim
Elutriação	5 – 45	Úmido	Sim
Sedimentação	1 – 70	Úmido	Sim
Difração a laser	0,1 – 9.000	Seco ou úmido	Não
Microscopia óptica	0,2 – 50	Seco ou meio líquido	Não
Microscopia eletrônica	0,005 - 100	seco	Não

O peneiramento é a separação de um material em duas ou mais classes em função do tamanho das partículas. As operações de peneiramento industrial a seco são realizados, normalmente, em frações granulométricas de 1,7 mm a 6 mm, enquanto os peneiramentos a úmido são aplicados para 0,4 mm a 50 µm. As escalas granulométricas são determinadas por meio de uma série de aberturas de peneiras que mantém entre si uma relação constante, por exemplo, a escala Tyler tem como abertura de referência 75 µm e tem uso geral em todo o mundo (CARRISSO E CORREIRA, 2004).

Desenvolvimentos recentes permitiram o avanço tecnológico de sistemas de análise de imagens por fluxo de partículas, que permitem a análise tanto do tamanho como de sua morfologia, alguns desses equipamentos são: QICPIC (Sympatec), Camsizer (Retsch Technology), CPA (Havevr & Boecker) e RapidVue (Beckman Coulter). Dentre destes, destaca-se o equipamento Camsizer, que por meio de análise de imagens 2D, analisa cerca de 1.000.000.000 partículas em poucos minutos.

3.3.2 Forma de partículas

A caracterização da morfologia e distribuição granulométrica de partículas é muito importante na produção de argamassas e concretos (OLIVEIRA, STUDART ET AL, 2000), uma vez que agregados com morfologia irregular aumentam o consumo de água para a obtenção do comportamento reológico adequado à aplicação (DAVISON, 1974). Além disso, grãos menos angulosos melhorarem a trabalhabilidade das argamassas (D'AGOSTINO, 2004).

Em agregados miúdos, a morfologia pode ser avaliada em análises estáticas, em que as partículas são colocadas sobre uma superfície plana, suportes ou lâminas e as imagens são adquiridas por técnicas de microscopia (D'AGOSTINO, 2004; ISO 2006). Esses métodos são morosos, imprecisos e apresentam baixa reprodutibilidade e representatividade, devido o baixo número de partículas analisadas e a interpretação do analista. A Figura 3.5 ilustra o gabarito para avaliação visual de esfericidade e arredondamento das partículas.

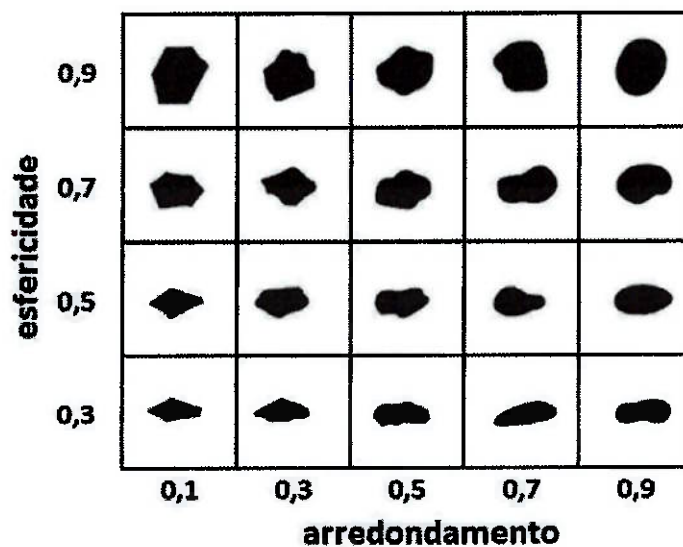


Figura 3.5 - Esfericidade e arredondamento de partículas (POOLE e SIMS, 1998)

Atualmente, a caracterização da forma das partículas tende a utilizar os sistemas de análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas, cujos métodos são descritos pela norma internacional ISO 13322-2/06 (ISO, 2006). São analisadas centenas de milhares de partículas em um amplo espectro de tamanho em poucos minutos, possibilitando a obtenção simultânea tanto da forma como do tamanho (HAWLITSCHEK et al., 2013).

O equipamento Camsizer (Figura 3.6), da fabricante Restsch Technology, é capaz de medir a forma e o tamanho das partículas através da análise do fluxo dinâmico de imagens 2D. Em seu funcionamento, o material passa por uma área onde existe uma fonte de luz LED e duas câmeras que captam simultaneamente imagens, que são processadas pelo software do equipamento. Os dados obtidos são processados através de algoritmos, gerando informações precisas e de elevada reprodutibilidade.

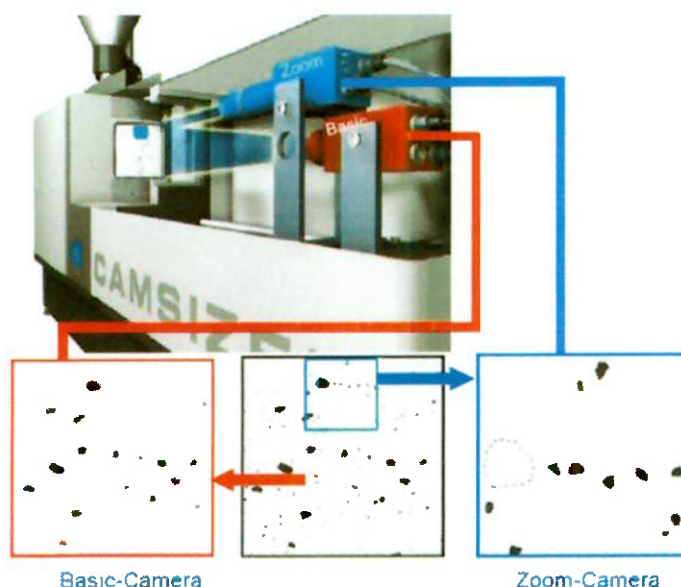


Figura 3.6– Camsizer, análise de figuras dinâmicas

O equipamento realiza a análise da forma em 2D de acordo com os parâmetros de simetria, convexidade, esfericidade (Equação 1) e de relação de aspecto - razão entre o menor e o maior diâmetro das partículas (Equação 2), dentre os quais se destacam os dois últimos.

$$esf. = \frac{4\pi(\text{área da partícula})}{(\text{perímetro da partícula})^2}$$

Equação 1 - Esfericidade

$$b/l = \frac{x_{min}}{Fe_{max}}$$

Equação 2 - Relação de aspecto

Os parâmetros de forma, esfericidade e relação de aspecto, apresentam valores entre 0 e 1. Quanto mais próximos de 1, mais arredondadas são as partículas e quanto menores os valores, mais alongadas são elas. A Figura 3.7 ilustra o aumento do comprimento das partículas em função dos valores do parâmetro da relação de aspecto. Observa-se que pequenos aumentos no valor do parâmetro representam um aumento significativo no comprimento da partícula.

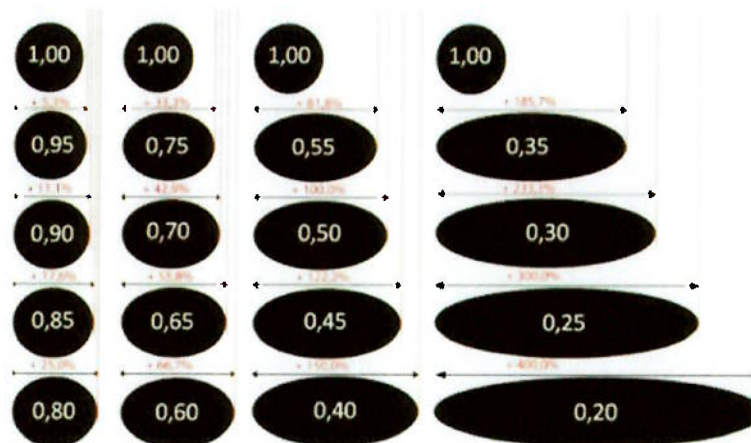


Figura 3.7 – Representação dos diferentes valores de relação de aspecto

3.3.3 Composição mineralógica

As análises mineralógicas são um recurso essencial na identificação de constituintes e determinação de suas propriedades na caracterização tecnológica. Existem diversas técnicas de identificação de espécies minerais e cada um deles possui um método ou equipamento específico, avaliando determinadas propriedades (SANT' AGOSTINHO).

A técnica de difração de raios X possibilita identificar as fases cristalinas de um material e através de comparação do difratograma coletado com fichas catalogadas de minerais presentes em bancos de dados disponíveis é possível identificar os minerais presentes.

O difratômetro de raios X é composto por um sistema de geração de raios X, um sistema de filtros e fendas e um sistema de detecção. A geração é dada em tubos de raios X, os feixes gerados são colimados por filtros e fendas e incidem sobre a amostra. A interação com a amostra gera feixes difratados, que também são filtrados e captados pelo detector.

Com base na difração dos raios X pode ser feita uma análise por agrupamento (*cluster analysis*), um recurso estatístico que facilita a análise de grande quantidade de dados. Tem como objetivo classificar parâmetros em grupos de forma que os parâmetros

pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si com relação às variáveis (características) escolhidas e os parâmetros em grupos diferentes sejam heterogêneos (MINGOTI, 2005).

O agrupamento realizado pode ser representado visualmente através do dendograma. Nele, os objetos são representados como nós e os passos do agrupamento pela junção dos ramos do dendograma. O comprimento do ramo indica a distância entre subgrupos quando estão unidos. Neste caso, o emprego do *software* X'Pert Highscore Plus (PANalytical) permite a comparação de vários espectros sem o prévio tratamento dos mesmos ou identificação das fases cristalinas presentes (MACCHIAROLA et al., 2007).

3.3.4 Composição química

Há diversas técnicas de análise química, mas as mais utilizadas e aplicadas em material geológico são a espectrometria de raios X (FRX), espectrofotometria de absorção atômica (AAS) e espectrometria de emissão atômica por plasma de acoplamento indutivo (ICP-OES).

Na técnica de fluorescência de raios X, a amostra é irradiada por raios X, possibilitando a excitação aos elementos químicos em geral com a emissão de luz na região do espectro eletromagnético correspondente aos raios X (0,1 a 100 Å) (FORMOSO, 1984). A radiação resultante emitida pela amostra tem energia característica dos elementos presentes na amostra, cujas intensidades são proporcionais às suas concentrações.

3.4 DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIA ARTIFICIAL

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação resultante dos materiais quando submetidos à determinada tensão ou solicitação mecânica. Segundo Newton, líquidos perfeitos apresentam deformação total proporcional ao esforço mecânico e ao tempo em que o mesmo foi aplicado. Na maioria das vezes, os fluidos apresentam características reológicas diferente das ideais.

A viscosidade é uma medida de resistência ao fluido de escoamento e a dificuldade imposta por unidades móveis ao fluxo do líquido aumenta a mesma. O perfil de escoamento de um fluido é perturbado pela presença de partículas fazendo com que a viscosidade aumente, assim quanto maior for a perturbação, maior será a viscosidade (PILEGGI, 2001).

Os fluidos em geral podem apresentar comportamentos independentes do tempo, como a pseudoplasticidade. Ela ocorre quando a viscosidade aparente do fluido diminui com o aumento da taxa e/ou tensão de cisalhamento. No caso de suspensões com alta concentração de sólidos, esse comportamento é geralmente causado pelo tipo de interação entre as partículas, seja a atração ou repulsão (PILEGGI, 2001).

A argamassa deve apresentar um comportamento pseudoplástico para facilitar espalhamento, nivelamento e acabamento, mas também uma elevada viscosidade para manter-se estável. Assim, há diversas técnicas de caracterização reológica de argamassas que avaliam a consistência do material de acordo com sua trabalhabilidade.

A reometria rotacional permite a avaliação de propriedades reológicas de fluidos e suspensões, argamassas e concretos. Determinam parâmetros de viscosidade e tensão de escoamento através da aplicação controlada de cisalhamento e medida do torque necessário para tal (PILEGGI, 2001).

O reômetro rotacional do Departamento de Engenharia de Construção Civil da POLI-USP **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, (Figura 3.8) permite a realização do preparo das argamassas e é capaz de medir o comportamento de mistura de argamassas e concretos. O equipamento é preciso e versátil, todas as operações de controle, coleta e armazenamento de dados são realizadas através do software de controle.



Figura 3.8 - Reômetro Rotacional do Departamento de Engenharia de Construção Civil da POLI-USP

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental é detalhado na Figura 4.1, e envolveu as seguintes atividades:

1. Amostragem de areia artificial produzida na fábrica de argamassas industrializadas;
2. Análise da distribuição de tamanho de partículas por peneiramento a seco e por análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas;
3. Análise da forma das partículas por análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas;
4. Análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX) de todas as amostras seguida de agrupamento por similaridade composicional (*cluster analysis*);
5. Determinação da composição química por FRX das amostras representativas de cada agrupamento.
6. Seleção de amostras com características distintas para o estudo do comportamento reológico de argamassas.
7. Formulação de argamassas para avaliação da trabalhabilidade da mistura por meio da avaliação do consumo de água e torque de mistura.

Procedimento experimental

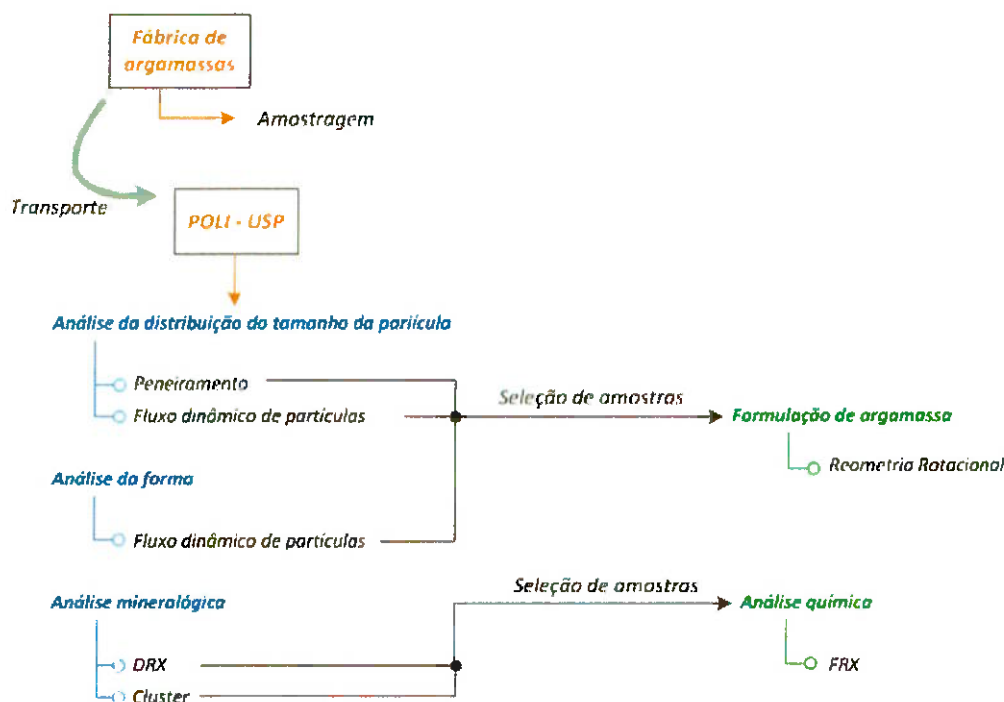


Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental

4.1 AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

As amostras de areia artificial foram coletadas em uma fábrica de argamassas, localizada no município de Cajamar/SP, que produz areia artificial com a finalidade de fabricar argamassas industrializadas.

Uma mineração de agregados vizinha à fábrica fornece brita 1 (9,5 – 19mm), através de um transportador de correia, que após o processo de secagem em secador horizontal alimenta o moinho BHS Sand Maker, produzindo areia fina (<1,2 mm), média (<2,4 mm) e grossa (< 4,8 mm).

A coleta de amostras foi realizada nas pilhas de produtos de areia média após o peneiramento. A amostragem foi realizada diariamente, durante 2 meses, totalizando 57 amostras de aproximadamente 3 kg cada. As amostras coletadas foram identificadas, armazenadas e transportadas à Poli-USP uma vez por semana.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ARTIFICIAL

As amostras coletadas foram homogeneizadas e amostradas em divisor de amostras tipo Jones, Figura 4.2 para obtenção de alíquotas representativas para os estudos de caracterização: análise da distribuição de tamanho e forma de partículas, composição mineralógica e química.



Figura 4.2 – Amostras coletadas e amostradas em divisor de amostras tipo Jones

4.2.1 Distribuição de tamanho e forma de partículas

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento a seco e comparada com os resultados das análises de imagens por fluxo de partículas, a qual foi também utilizada para a caracterização da morfologia destas.

Para o peneiramento a seco foram amostradas alíquotas representativas, as quais foram peneiradas a seco em peneiras com telas metálicas em agitador magnético de peneiras durante 5 minutos. Foram consideradas as telas de abertura nominais de 1,4; 1,2; 0,60; 0,30; 0,15 e 0,09 mm.

Para a caracterização por análise de imagens por fluxo de partículas, alíquotas representativas foram analisadas em equipamento Camsizer L (30 μ m a 30 mm), segundo procedimento descrito pela norma ISO 13322-2/ 2006. Todos os produtos foram analisados em duplicata. A Figura 4.3 mostra o equipamento, com a imagem das partículas e a curva de distribuição granulométrica determinada em tempo real.

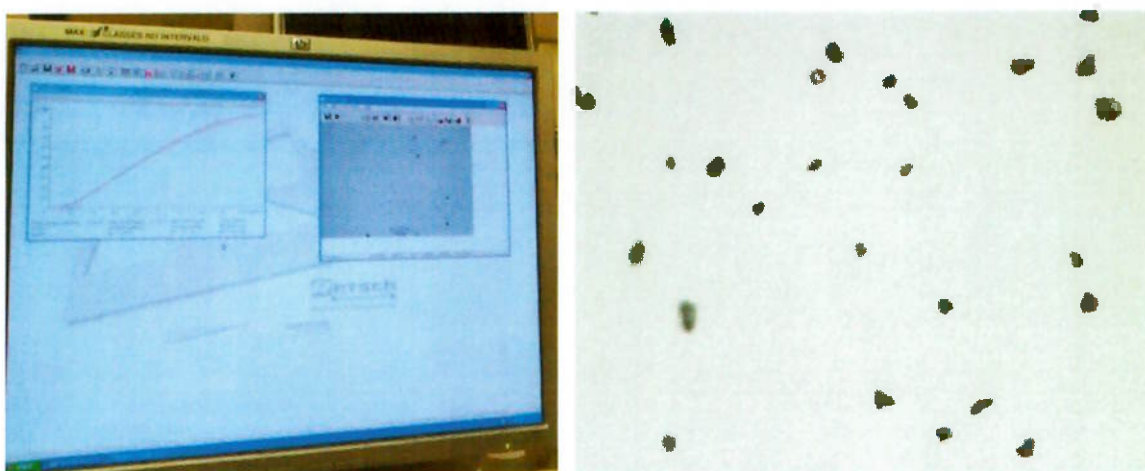


Figura 4.3- Análise granulométrica e da forma das partículas em equipamento de análise de imagens por fluxo de partículas Camsizer

4.2.2 Composição mineralógica

A determinação da composição mineralógica no material foi feita através da difratometria de raios X.

A preparação das amostras é uma etapa fundamental em caracterização, e em um primeiro momento todas as alíquotas foram pulverizadas em moinho de bolas, tipo planetário⁷ da marca Fritsch. O material pulverizado (Figura 4.4a) foi armazenado para que as amostras fossem prensadas (Figura 4.4b) todas no mesmo dia, minimizando possíveis erros de preparação e interferências nos resultados das análises.

⁷ Moinho indicado para preparação de amostras para DRX. Imagens e maiores detalhes na homepage do laboratório www.lct.poli.usp.br



(a) alíquotas pulverizadas



(b) prensagem em suporte para DRX

Figura 4.4 - Alíquotas pulverizadas (a) e prensagem em suporte próprio para a DRX (b)

O estudo foi efetuado através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO com detector X'Celerator (Figura 4.5), com tubo de cobre 40 kV e 40mA.



Figura 4.5 - Difratômetro de raios X - X'Pert MPD, marca PANalytical

A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007).

Os difratogramas obtidos foram agrupados em *clusters* pelo software X'Pert Highscore Plus, considerando a posição e a intensidade dos picos difratados. Os principais parâmetros utilizados no agrupamento das amostras foram: picos e perfil como dados de origem, 70% de limiar de comparação, medida de distância euclidiana e 30 % de *cut-off* para definição de *clusters*

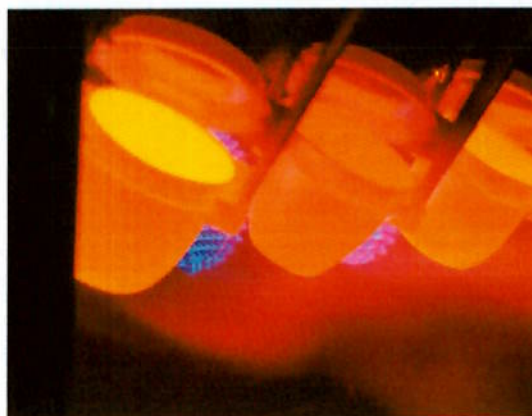
4.2.3 Composição química

A partir do agrupamento realizado em *clusters* pelo software X'Pert Highscore Plus, foram selecionadas amostras representativas de cada grupo para a determinação quantitativa da composição química.

A análise química foi realizada em espectrômetro por fluorescência de raios X Axios Advanced, marca PANalytical(Figura 4.6) e a perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1.050°C por 1h, em amostras pulverizadas em moinhos de anéis oscilantes, marca Herzog. Os teores apresentados foram determinados por análise quantitativa em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro (Figura 4.6b), por comparação com materiais certificados de referência na calibração Rochas TBL.



(a) equipamento de FRX



(b) fusão de amostras

Figura 4.6 - Espectrômetro por fluorescência de raios X Axios Advanced, marca PANalytical

4.3 DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIA ARTIFICIAL

A partir da análise dos resultados foram escolhidas amostras com a forma mais regular, menos regular, e morfologia intermediária entre elas (forma boa e curva de distribuição granulométrica intermediária), com o objetivo de avaliar a influência da morfologia das partículas na formulação de argamassas.

A avaliação do desempenho reológico foi realizada através do Reometria Rotacional no Departamento de Engenharia e Construção Civil da POLI-USP, capaz de determinar os

teores de água para a obtenção de argamassas com trabalhabilidades semelhantes. As misturas de argamassas (4 kg), compostas por 25% de cimento e 75% de areia em volume, foram misturadas no reômetro durante 4 minutos com rotação constante de 126 rpm.

Para cada amostra, durante os dois primeiros minutos foram adicionadas quantidades iguais de água (520 g), e nos minutos seguintes, quantidades necessárias para a obtenção da trabalhabilidade desejada. Após a determinação dos teores de água foram determinados a densidade aparente e o teor de ar incorporado, segundo a norma NBR 13278 (ABNT, 1995).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Tanto as curvas de distribuição granulométricas obtidas a partir do peneiramento a seco como as curvas obtidas por análise de imagens de fluxo de partículas apresentaram variação em suas curvas. Alguns exemplos de variações da distribuição granulométrica são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (distribuições obtidas por análise por fluxo de partículas). Todas as curvas de distribuição granulométrica são apresentadas no Apêndice 1, tanto por peneiramento a seco como por análise de fluxo de imagens.

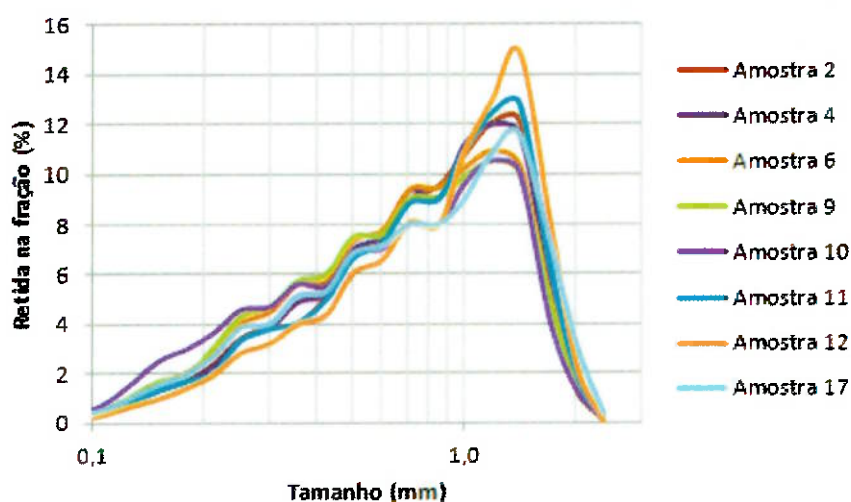


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica obtida por análise dinâmica em equipamento Camszier

Resultados comparativos entre a distribuição granulométrica obtida por peneiramento a seco e análise de imagens são apresentados na Figura 5.2.

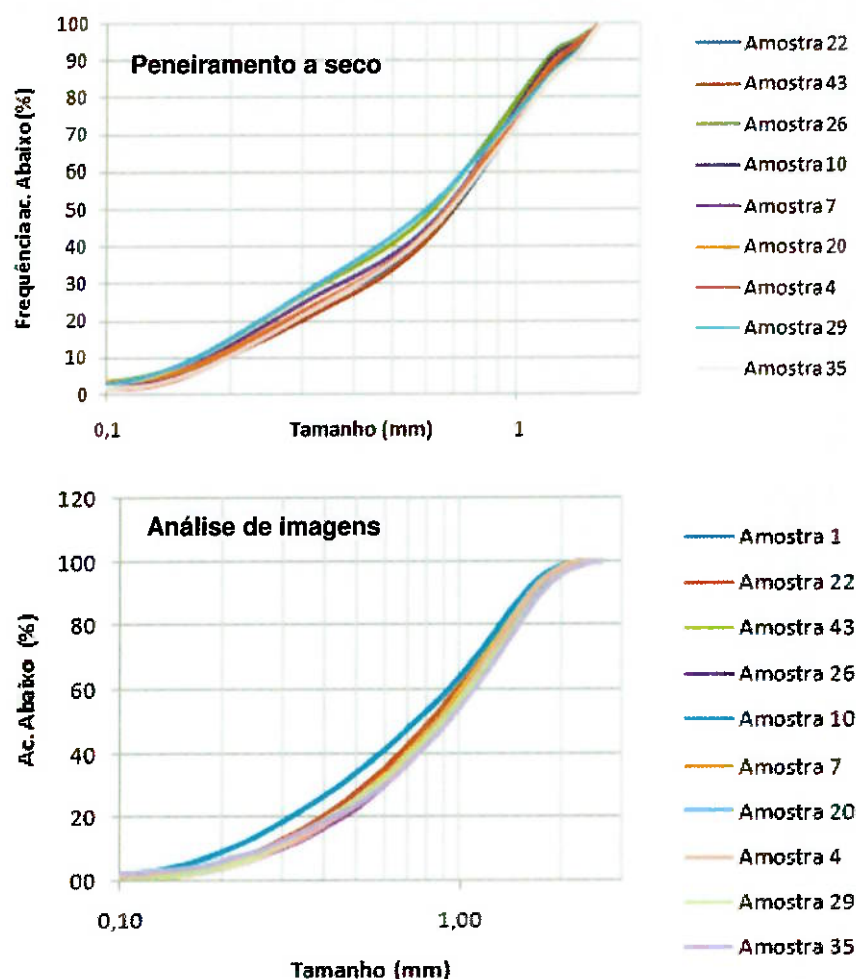


Figura 5.2 – Distribuição granulométrica comparativa entre peneiramento a seco e análise de fluxo de imagens

Pode-se observar que para uma mesma amostra a curva obtida através do peneiramento a seco é diferente da curva obtida por análise dinâmica de imagens, uma curva está deslocada em relação à outra e há uma maior diferença em relação aos grossos. Um dos motivos pode ser relacionado ao peneiramento a seco ser limitado em relação à abertura da malha da peneira, no caso a maior malha é de 1,4 mm, enquanto a análise de fluxo de imagens abrange diversas granulometrias.

Um artigo publicado à respeito do equipamento utilizado (Camsizer) mostra que o resultados obtidos por peneiramento são bastante próximos da curva de distribuição granulométrica obtida pelo Camsizer (HAWLITSCHEK etl. al. ,2013). A partir disso, foram considerados os resultados da análise do fluxo de imagens para este trabalho, uma vez que o equipamento é mais preciso e as amostras foram analisadas em duplicatas. Acredita-se

que a diferença se deu em função dos parâmetros do peneiramento, como as aberturas das malhas, massa da amostra e tempo de peneiramento.

5.2 MORFOLOGIA DA AREIA ARTIFICIAL

Os parâmetros relacionados à morfologia apresentaram poucas diferenças. Em relação aos valores da relação de aspecto, o maior valor médio foi 0,699 e o menor valor 0,681. Os valores médio de esfericidade apresentaram uma variação maior, o maior valor médio foi de 0,823 e o menor valor de 0,784.

No Apêndice 2 é possível observar as curvas de porcentagem acumulada abaixo em função dos parâmetros de esfericidade e relação de aspecto (b/l) de todas as amostras.

Na maioria das amostras, os valores de esfericidade e relação de aspecto variaram de forma contínua, amostras com altos valores de esfericidade apresentaram também altos valores para relação de aspecto e vice-versa, como mostra a Figura 5.3, demonstrando a interdependências destes parâmetros.

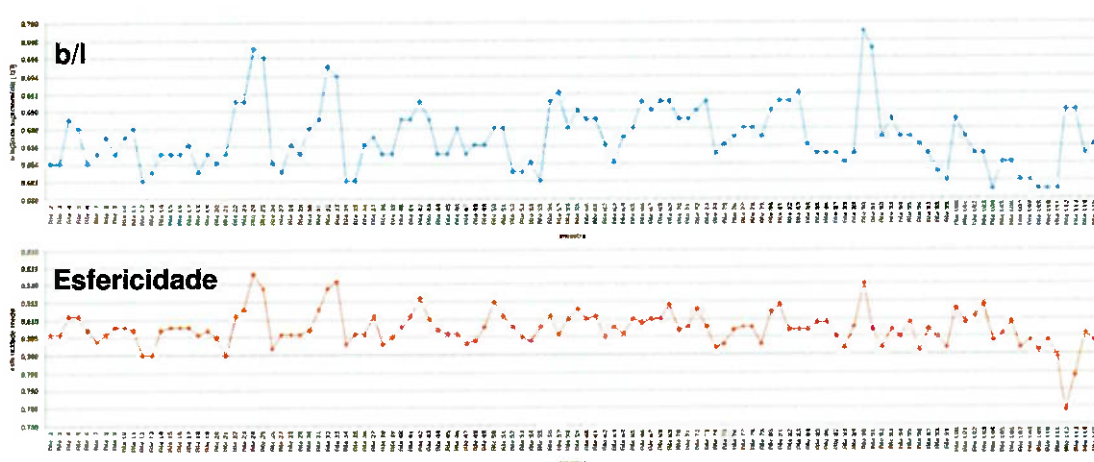


Figura 5.3 – Variação da relação de aspecto e esfericidade de todas as amostras

5.3 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

A análise dos resultados da difração de raios X foi feita através do agrupamento dos resultados (*cluster analysis*), um recurso estatístico, utilizando o *software* X'Pert Highscore Plus. Os critérios utilizados foram um *cut-off* de 30, medida de distância euclidiana e método de linkagem por média. A partir disso, os resultados foram classificados em quatro grupos (o Apêndice 3 contém o dendograma obtido).

Para cada grupo foi escolhida uma amostra representativa e a Figura 5.4 ilustra a comparação entre os picos obtidos pelo difratograma de cada uma delas.

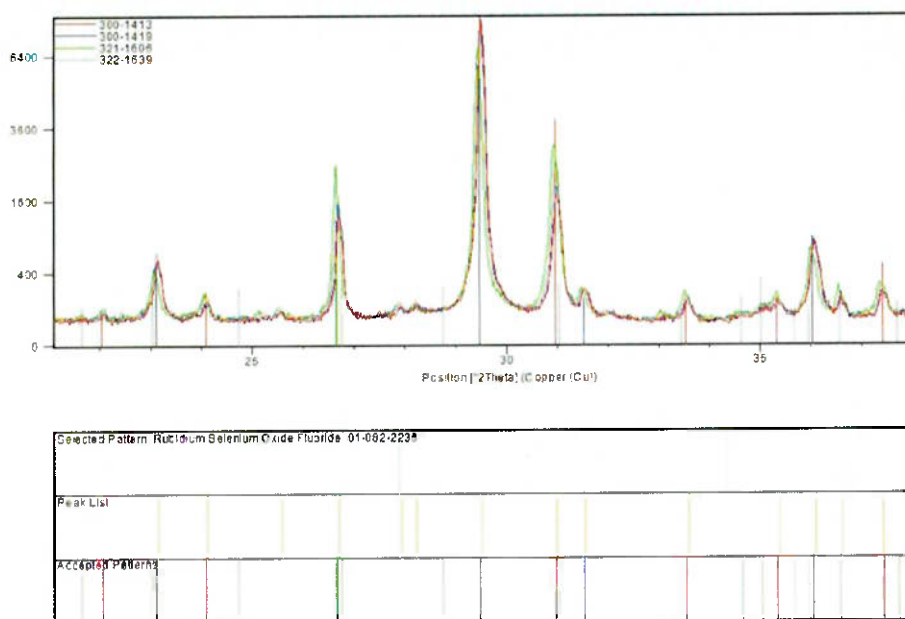


Figura 5.4 – Comparação do difratograma das amostras representativas de cada grupo em função dos picos

A partir da análise dos difratogramas concluiu-se que as amostras são constituídas basicamente por dolomita, quartzo, calcita e muscovita (Tabela 5.1 – Identificação dos compostos mineralógicos obtidos a partir das análises dos picos do difratograma Tabela 5.1). A variação nos resultados de cada grupo é bastante sutil, sendo possível observar pequenas variações nos picos de dolomita e quartzo.

Tabela 5.1 – Identificação dos compostos mineralógicos obtidos a partir das análises dos picos do difratograma

Cód. De Ref.	Nome do composto	Fórmula Química	Mineral
01-085-0796	Quartzo	SiO_2	Quartzo
01-075-1656	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita
01-085-1118	Calcita	CaCO_3	Calcita
01-074-1392	Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	Muscovita

5.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A partir do agrupamento dos resultados da DRX (*cluster analysis*), foram selecionadas amostras representativas para cada um dos quatro grupos. Os resultados da análise química realizada por fluorescência de raios X, através do equipamento X Axios Advanced, marca PANalytical, encontram-se na Tabela 5.2 e na Figura 5.5.

Tabela 5.2 – Composição química das amostras representativas de cada grupo

Amostra representativa de cada grupo	CaO	PF	CaO+PF	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Outros
G1	43,3	40,1	83,4	4,31	8,42	1,91	1,96
G2	37,4	37,8	75,2	7,34	13,8	1,95	1,71
G3	42,7	39,6	82,3	4,57	9,19	1,93	2,01
G4	41,2	39,7	80,9	6,06	9,36	2,28	1,40

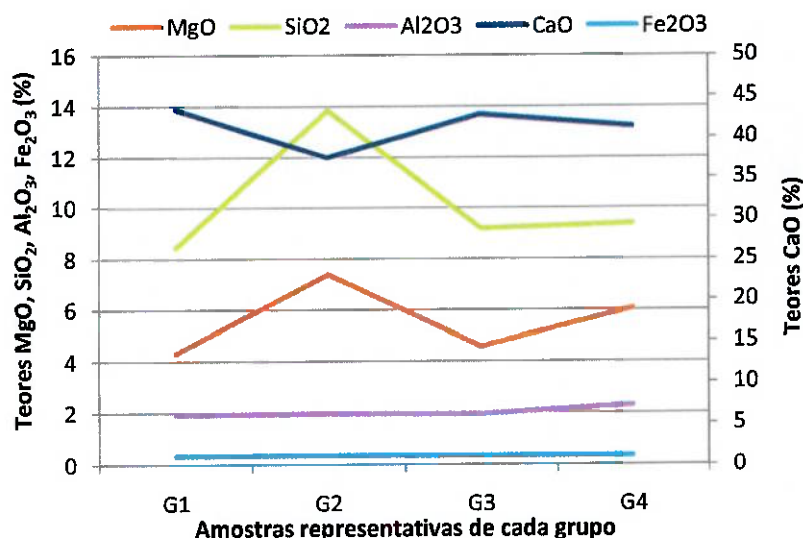


Figura 5.5 – Variação dos teores dos principais óxidos nas amostras representativas de cada grupo

Apesar da similaridade na composição mineralógica, os resultados das análises químicas demonstraram maiores diferenças entre as amostras representativas de cada grupo. O teor de sílica no G2 é de 13,9% enquanto nos demais grupos, varia entre 8,42 e 9,36%; no G2 observam-se também aumentos nos teores de MgO e reduções de CaO e PF. A composição química completa das amostras representativas encontram-se no Apêndice 4.

A partir da análise dos resultados da difração de raios X, foi possível associar a composição química com a composição mineralógica. O alto teor de sílica no G2 foi associado 12% de quartzo em sua composição mineralógica, enquanto nos demais grupos ficaram em torno de 7%. Ainda no G2, o alto teor de MgO foi relacionada à dolomita, que corresponde a 34% de sua composição mineralógica, enquanto nos demais variou entre 20% e 28%. As reduções de CaO e PF foram associadas à calcita, assim o G2 obteve apenas 48% em sua composição e nos outros variou entre 59% e 67%.

5.5 DESEMPENHO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS COM AREIA ARTIFICIAL

5.5.1 Seleção das amostras

A partir dos parâmetros de forma, esfericidade e distribuição granulométrica as amostras foram agrupadas por similaridade por meio de análises por *cluster*, através do software R². O agrupamento resultou em seis grupos representativos, denominados grupos 1 a 6 (dendograma no Apêndice 3). A partir desses dados foi feita uma média dos parâmetros de cada grupo, como mostra a Tabela 5.3. e uma média das distribuições granulométricas (Figura 5.6).

Os maiores valores para os parâmetros de esfericidade e relação de aspecto foram encontrados no Grupo 5, enquanto os menores valores no Grupo 1. Foi observada também uma relação entre os parâmetros de forma e as distribuições granulométricas: o Grupo 5, de forma mais arredondada, apresentou a curva de distribuição granulométrica mais estreita (material com distribuição de partículas menos dispersa), enquanto o Grupo 1, de forma menos arredondada, demonstrou curvas mais amplas.

Tabela 5.3 – Valores médios da esfericidade, relação de aspecto e amplitude da distribuição

Grupo	Esfericidade (SPHT)	Relação de aspecto (b/l)	Amplitude da distribuição (span)
1	0,801	0,684	1,829
2	0,805	0,687	1,726
3	0,809	0,688	1,583
4	0,806	0,685	1,632
5	0,814	0,692	1,458
6	0,807	0,686	1,531

Relação de aspecto (b/l) = razão entre o menor e o maior diâmetro da partícula.

SPAN = amplitude da distribuição granulométrica, definido por $(D[90]-D[10]) / (D[50])$.

Esfericidade = relação entre a área da partícula e seu perímetro, definida por $(4\pi \cdot \text{Área} / \text{Perímetro}^2)$.

² Programa de agrupamento de dados disponível para download:

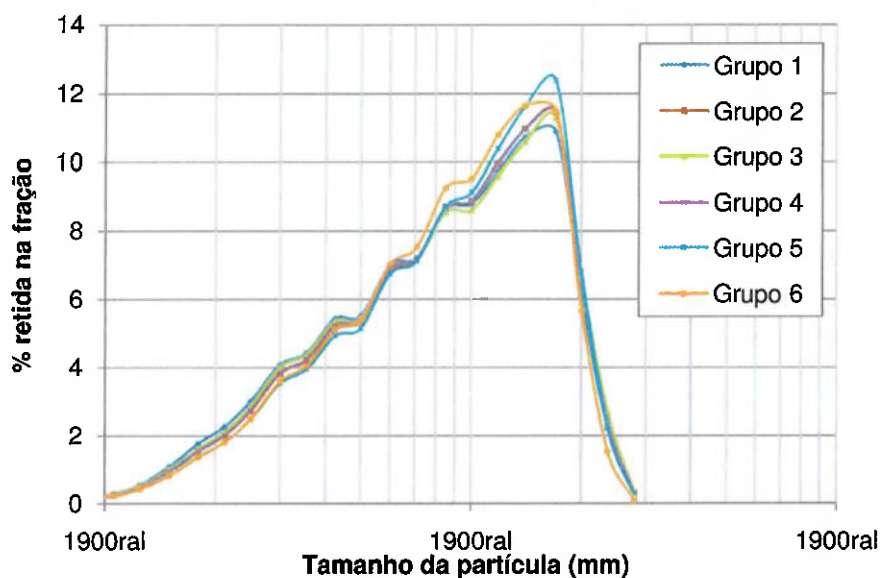
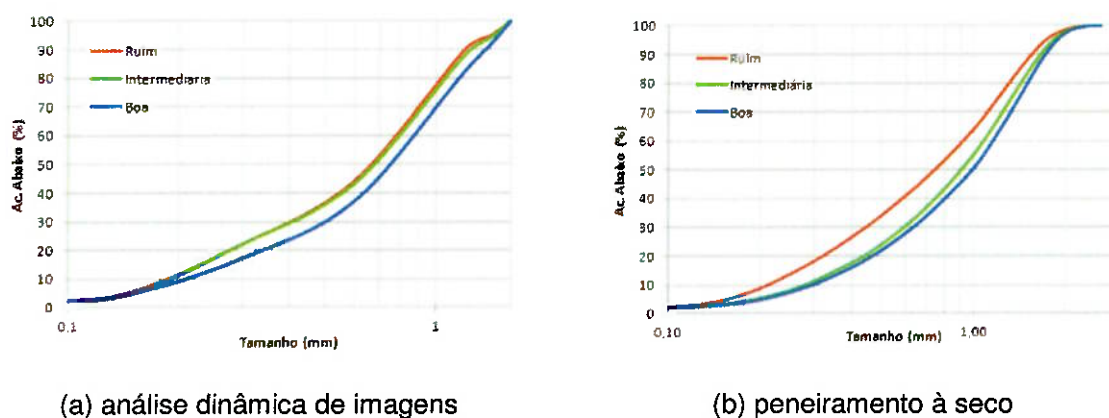


Figura 5.6 – Distribuições granulométricas médias de cada grupo

Devido à similaridade das distribuições granulométricas, os dados foram reanalisados para seleção das amostras com características mais distintas. Dessa forma foi escolhida uma amostra representativa do Grupo 1 e uma amostra representativa do Grupo 5. Além disso, foi selecionada também uma amostra com curva de distribuição granulométrica intermediária, pertencente ao Grupo 5 de melhor forma. Todas as três amostras escolhidas pertencem ao Grupo 3 (G3) em relação à composição química. Os resultados da distribuição granulométricas encontram-se na Figura 5.7, esfericidade e relação de aspecto por faixa granulométrica são observadas na Figura 5.8.



(a) análise dinâmica de imagens

(b) peneiramento à seco

Figura 5.7 – Curvas de distribuição granulométrica

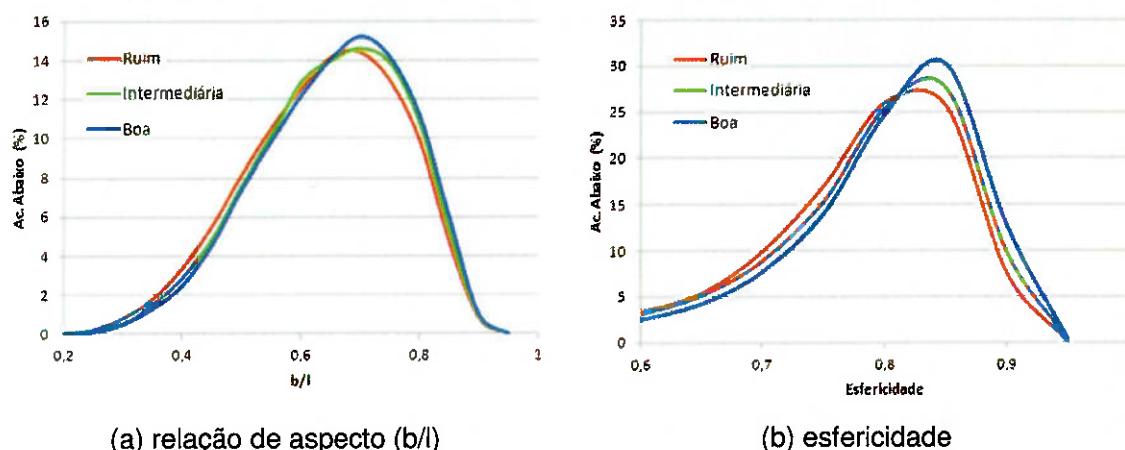


Figura 5.8 – Resultados comparativos entre as amostras selecionadas

Como critério de comparação foi escolhido também uma amostra de areia artificial proveniente dos finos da britagem de agregados, o pó de pedra. Esse material é produzido a partir da cominuição de rochas calcárias em uma região próxima às amostras estudadas neste trabalho. Os parâmetros de esfericidade, relação de aspecto e amplitude da distribuição granulométrica encontram-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Propriedades das amostras selecionadas

Classificação da forma/amostra	Esfericidade (SPHT)	Relação de aspecto (b/l)	Amplitude da distribuição (span)
Ruim	0,805	0,684	1,732
Intermediária	0,811	0,691	1,471
Boa	0,823	0,697	1,410
Pó de pedra	0,805	0,673	1,738

5.5.2 Desempenho reológico da argamassa com areia artificial

As argamassas foram preparadas utilizando proporção em volume, pelo relação entre a massa e a densidade determinada por picnometria por intrusão de gás hélio, sendo de 75% de areia e 25% de cimento CPIIF (densidade 3,10 g/cm³ e superfície específica de 3,53 m²/cm³), proveniente da fábrica da Votorantim em Itaú de Minas (MG). A Tabela 5.5 apresenta a composição das argamassas em massa.

Tabela 5.5 – Formulação da argamassa

Materiais	Densidade (g/cm ³)	Composição (% em massa)			
		Ruim	Intermediária	Boa	Pó de pedra
Cimento	3,10	27,5	27,4	27,4	27,1
Ruim	2,85	72,5			
Intermediária	2,86		72,6		
Boa	2,86			72,6	
Pó de pedra	2,80				72,9
Total		100	100	100	100

As curvas de mistura das argamassas com as relações do torque da mistura com o teor de água necessário encontram-se na Figura 5.9. Inicialmente, foram adicionadas massas iguais de água para cada amostra (13% em massa), neste primeiro ciclo as amostras de forma boa e intermediária apresentaram o ponto de virada na curva, diminuindo o torque necessário para a mistura, enquanto a amostra de forma ruim e o pó de pedra mantiveram os valores de torque elevados.

Em um segundo ciclo foi adicionado 0,5% de água em massa para cada amostra. O valor do torque da amostra de forma ruim se aproximou aos valores da amostra de forma boa e intermediária, enquanto o torque da mistura composta por pó de pedra manteve-se alto.

No terceiro ciclo, tanto para a amostra intermediária quanto para a amostra de forma ruim, foram adicionadas mais 0,5% de água, para atingir o torque de 1 N.m, enquanto para a amostra de forma boa foi necessário 0,25% em massa de água. Neste ciclo o pó de pedra manteve-se com o torque elevado. Assim, no quanto e último ciclo, a amostra de pó de pedra teve um acréscimo de 0,5% de água, quando atingiu o torque desejado.

Dessa forma, demonstrou-se que as amostras de forma boa e intermediária necessitam de um tempo menor, em relação às amostras de forma ruim e pó de pedra, para atingirem um torque de mistura estável no tempo.

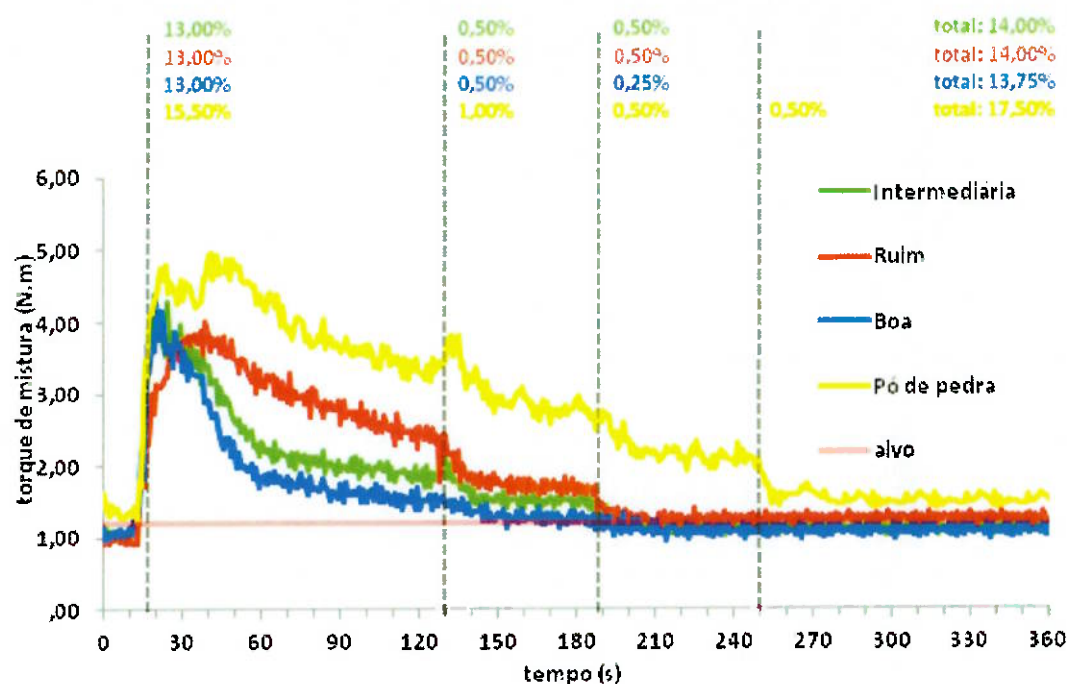


Figura 5.9 – Curvas de mistura para determinação do consumo de água para argamassas

A Figura 5.10 representa a proporção volumétrica das fases das argamassas no estado fresco. Nota-se que as amostras de forma boa, ruim e intermediária apresentaram resultados semelhantes, com 5% de ar incorporado e 27% de água, enquanto a amostra composta por pó de pedra apresentou menor teor de ar incorporado (4%) e maior teor de água (32%).

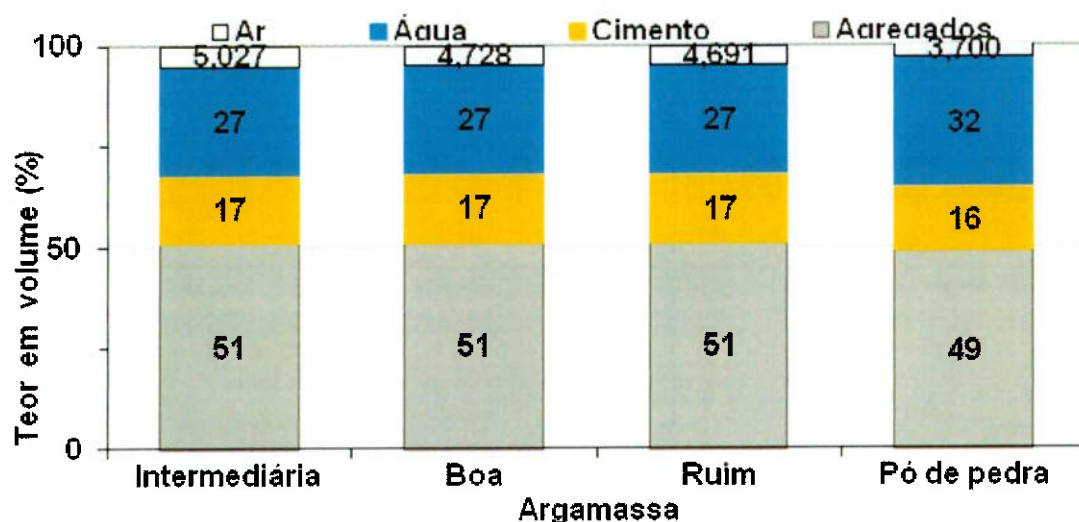


Figura 5.10 – Distribuição das fases de argamassas

Um estudo realizado sobre a influência de areias recicladas (RCD) em argamassas concluiu que para o torque de 1 N.m a areia natural (IPT, NBR-7214) consumiu 16,5% de água em massa e a areia RCD 20,75% (HAWLITSCHK et. al., 2013). Assim, comparando os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que a areia artificial apresentou resultados satisfatórios, uma vez que seu consumo de água foi menor em relação a outros tipos de areia, incluindo areia natural.

O estudo também determinou parâmetros em relação à morfologia de areia RCD e areia natural (HAWLITSCHK et. al., 2013), que podem ser comparados aos valores aqui obtidos para areia artificial. Os resultados encontram-se na Tabela 5.6, e é possível observar que em relação à esfericidade os resultados da areia artificial foram melhores, enquanto para a relação de aspecto (b/l) os valores ficaram próximos.

Tabela 5.6 – Média da relação de aspecto e esfericidade das amostras

Parâmetros	areia IPT	areia RCD	Areia artificial	
			Grupo 1	Grupo 5
Esfericidade	0,795	0,794	0,801	0,814
Relação de aspecto	0,706	0,694	0,684	0,69

6 CONCLUSÕES

As 57 amostras de areia artificial coletadas na fábrica de argamassas apresentaram variação nas curvas de distribuição granulométrica, mas os parâmetros de forma mostraram-se próximos: a diferença nos valores da relação de aspecto foi de apenas 3% e de esfericidade 5%. Dessa forma, pode-se concluir que o moinho BHS é eficiente na produção de areia artificial com produtos homogêneos em relação à morfologia.

As amostras apresentaram pequenas diferenças na mineralogia, enquanto a composição química apresentou uma variação maior nos resultados. A difração por raios X mostrou pequenas diferenças nos picos de dolomita e quartzo, enquanto a fluorescência por raios X associada aos dados da DRX comprovou que há diferença nos teores de dolomita, quartzo e também na calcita. Os teores de dolomita variaram entre 20% e 28%, calcita entre 48% e 67%, quartzo entre 7% e 12% e muscovita 4%.

Devido à similaridade das composições mineralógicas pode-se fazer uma ressalva em relação à eficiência do moinho BHS, uma vez que não se sabe a origem do material todas as amostras podem ser oriundas de uma mesma frente de lavra, facilitando a semelhança nos resultados obtidos em relação à forma e composição.

O estudo de reologia mostrou que as variações nas características morfológicas praticamente não influenciaram no consumo de água das argamassas. A amostra de forma mais arredondada consumiu apenas 0,25% de água a menos em relação à amostra mais irregular para o torque desejado. No entanto, comparando o resultado com amostras de areia natural IPT, pó de pedra e areia reciclada, fica evidente a influência dos parâmetros de forma no consumo de água necessário para a mesma trabalhabilidade.

A avaliação e determinação dos parâmetros geométricos da areia são fundamentais para garantia da qualidade e propriedades das argamassas e concretos. O moinho BHS demonstrou a produção de areia artificial com baixa variabilidade em relação à composição e morfologia, mas não se sabe a origem do material. Estudos em diferentes frentes de lavra poderiam ser feitos para comprovar a produção de produtos com baixa variabilidade a partir de amostras iniciais com características diversas.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. L. M.; SAMPAIO J. A. *Produção de areia artificial com base em finos de brita de granito*. In: I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais – II Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, 2005, Guarapari.

ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRA (ABNT): *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação*. 2003.

_____: *NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação*. 2012.

_____: *NBR 7389: Análise Petrográfica de agregado para concreto – Parte 1: Agregado miúdo*. 2009.

_____: *NBR 7809: Versão Corrigida – Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de Ensaio*. 2008.

_____: *NBR-9935: Agregados - Terminologia*. 2005.

_____: *NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia*. 1995.

_____: *NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação*. TÉCNICAS, A.-A. B. D. N. 1997.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL (ANEPAC). *Agregados – areia*. Disponível em: < <http://anepac.org.br/wp/agregados/areia/>>. Acesso em: 18 de nov. 2013.

CARAESK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. *Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 4., 2001. Brasília. Anais. Brasília: PECC.ANTAC, 2001. P. 43-67.

CARRISO, R. C. C.; CORREIRA, J. C. G.; Classificação e Peneiramento. *Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro. CETEM. 2004. Cap. 5. p 197-238.

CINCOTTO, M. A.; CARNEIRO, A. M. P. *Estudo da influência da distribuição granulométrica nas propriedades de argamassas dosadas por curva granulométrica*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 3., 1999. Vitória. Anais. Vitória: PPGEC/ANTAC. 1999. v. 1, p. 3-26.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. *Argamassa de revestimento: Características, propriedades e método de ensaio*. São Paulo: Boletim 68, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas S/A, 1995. 118 p.

D'AGOSTINO, L. Z. *Uso de finos de pedreira no preparo de argamassas de assentamento*. 2004. 126 p. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DAVISON, J. J. Masonry mortar. *Canadian Building Digest*, Ottawa, National Research Council of Canada, p. 163, 1974.

DNPM. Anuário mineral brasileiro 2012.

FORMOSO, M. L. L. Difractometria de raios-X. In: GOMES, C. B. (Ed.). *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Blucher/Pró-Minério, 1984. p. 1-43.

GRIGOLI, A. S. *Adições minerais inertes em argamassas de areia e cimento*. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 43, 2001, Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2001. I-006.

GRIGOLI, A. S. *Concreto estrutural executado com agregado miúdo muito fino da formação geológica do arenito de Caiuá, na região noroeste do Paraná*. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 43, 2001, Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2001. IV-012.

HAWLITSCHKE, G.; CARDOSO F.A.; ULSEN, C.; AMARAL, I.; KAHN, H.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. *Estudo da influência de areias recicladas a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas*. In: X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2013, Fortaleza.

HAWLITSCHKE, G.; ULSEN, C.; KAHN, H.; MASINI, E. A., WESTERMANN, J. *Análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas*. Brasil Mineral, São Paulo, n. 329, p. 82-85, maio 2013.

ISHIKAWA, P. H. *Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural*. 2003. 158 p. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ISO. 13322-2 Particle size analysis - Image analysis methods - Part 2: Dynamic image analysis methods. STANDARDIZATION, I. O. F. 2006.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. *Agregados para a construção civil*. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4008: 34 p. 2009.

MACCHIAROLA K. et al. Modern X-ray diffraction techniques for exploration and analysis of ore bodies. In: DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION, 5, 2007, Toronto, Canada.

MINGOTI, S. A. *Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada – Uma Abordagem Aplicada*. Belo Horizonte: Editora. UFMG 2005.300 p.

NEVES, L. *Aplicação dos finos gerados pela produção de pedras britadas graníticas no concreto pré-misturado em substituição às areias naturais*. 2001. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NEVES, L.; LIMA, J. R. B. *Finos de britagem como agregados substituto às areias naturais. Um estudo de caso*. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42, 2000. Forateleza. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2000. Paper IV 006.

NEVILLE, A. M.- *Propriedade do Concreto*. São Paulo: Editora Pini, 1994.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico*. Fazendo Arte Editorial, 2000.

PILEGGI, R. G. *Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários*. 2001. 204 p. Tese (Doutorado) - Ciência e engenharia de materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

REGATTIERI, C.E.; SILVA, L. L. R. *Ganhos potenciais na utilização da argamassa industrializada*. 2006. Disponível em: <
<http://www.abai.org.br/images/ganhos%20potenciais.pdf>>. Acesso em: 28 de set. 2013.

SANT'AGOSTINO, L. M.; KAHN, H. *Metodologia para a caracterização tecnológica de matérias primas minerais*. São Paulo: EPUSP, 1997. 29 P. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/069)

SELMO, S.M.S.; NAKAKURA, E.H.; MIRANDA, L.F.R.; MEDEIROS, M.H.F.; SILVA, C.O. *Propriedades e Especificações de Argamassas Industrializadas de Múltiplo Uso*. São Paulo: EPUSP, 2002. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/310). Disponível em: <
http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00310.pdf>. Acesso em: 28 de set. 2013.

APÊNDICE 1 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Os resultados das distribuições granulométricas obtidas tanto por peneiramento como por análise de fluxo de imagens 2D são apresentadas a seguir:

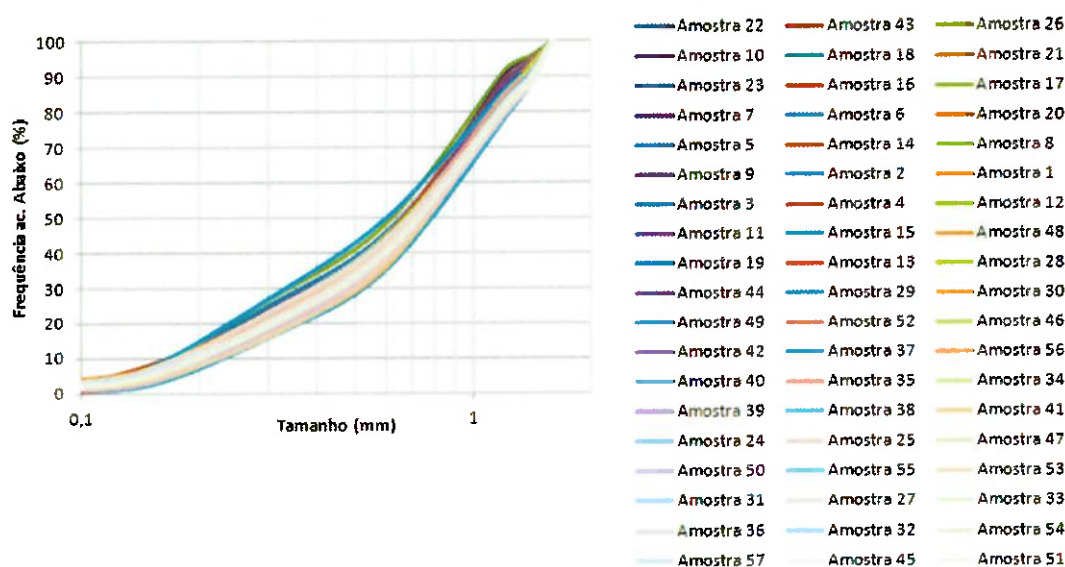


Figura A.1.1 – Distribuição granulométrica ac. abaixo obtida por peneiramento

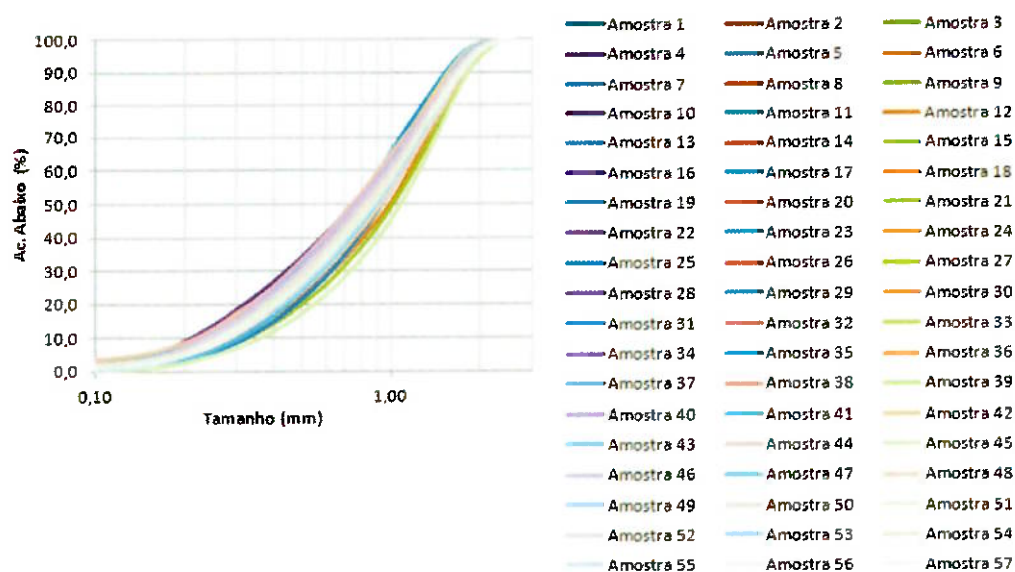


Figura A.1.2 – Distribuição granulométrica ac. abaixo obtida por análise de imagens

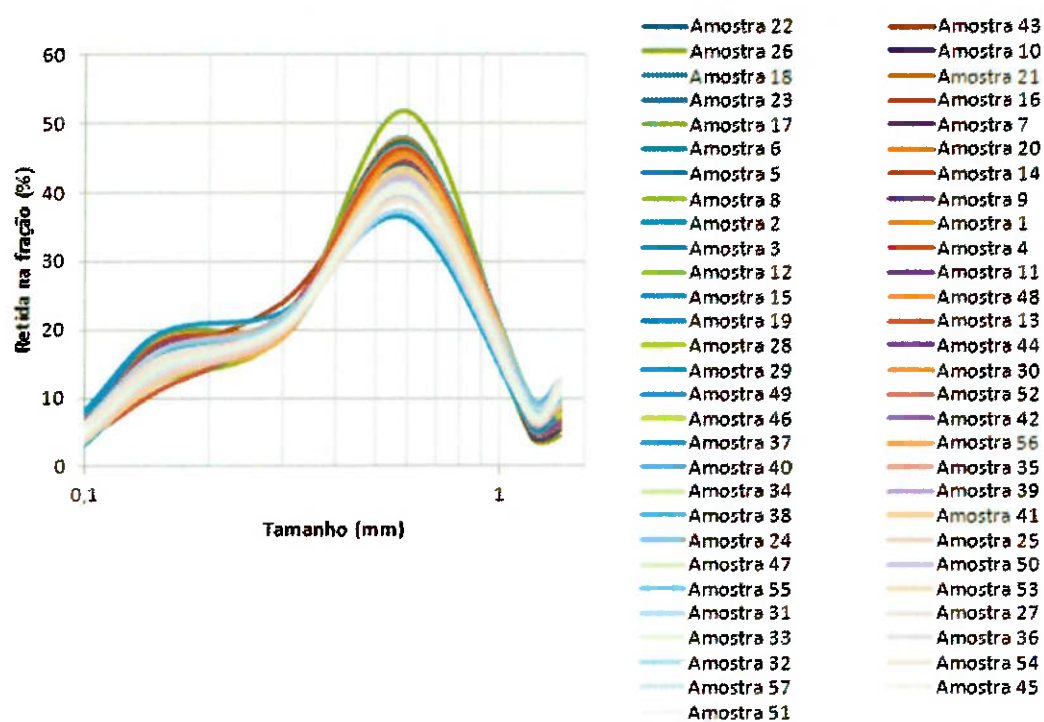


Figura A.1.3 - Distribuição granulométrica obtida por peneiramento

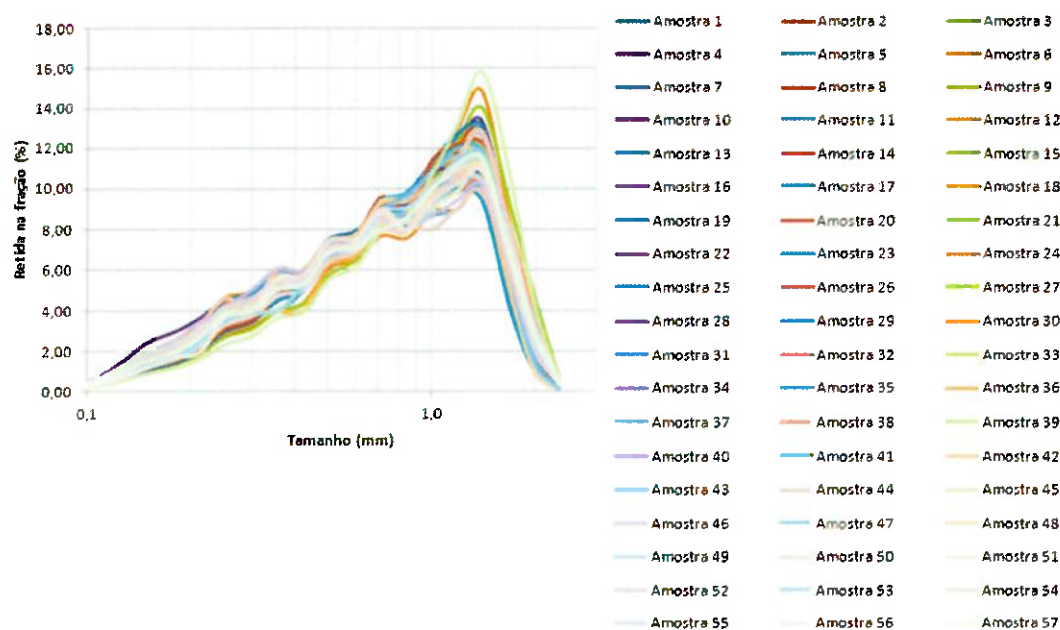


Figura A.1.4. - Distribuição granulométrica obtida por análise de imagens

APÊNDICE 2 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE FORMA

Os resultados dos parâmetros de forma obtidos através da análise do fluxo de imagens 2D são apresentados a seguir:

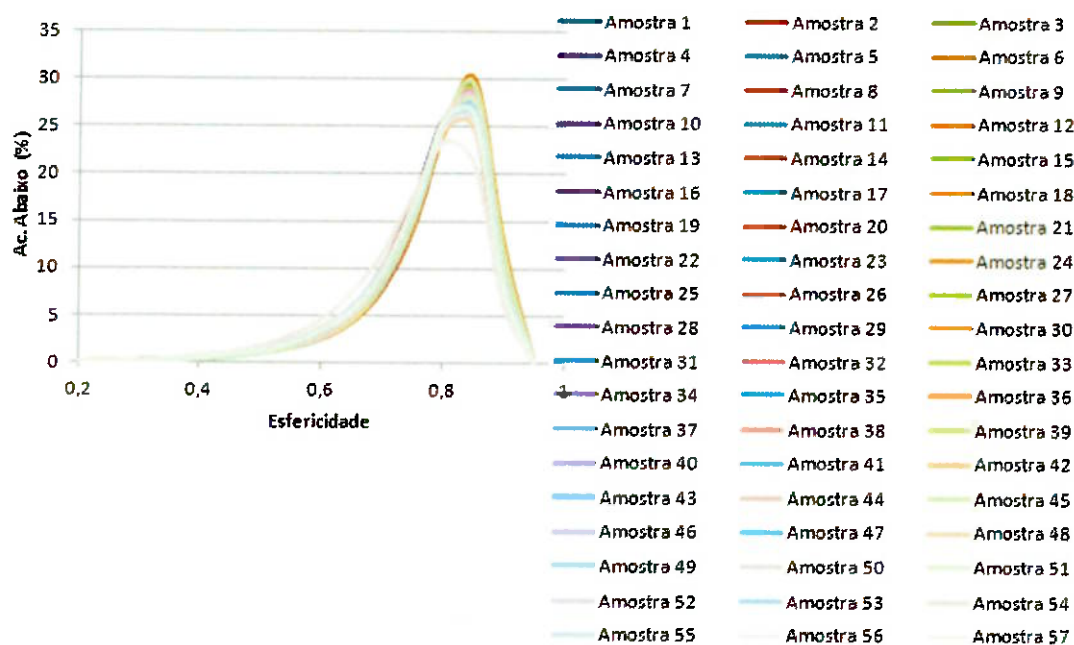


Figura A.2.1 – Resultados de esfericidade

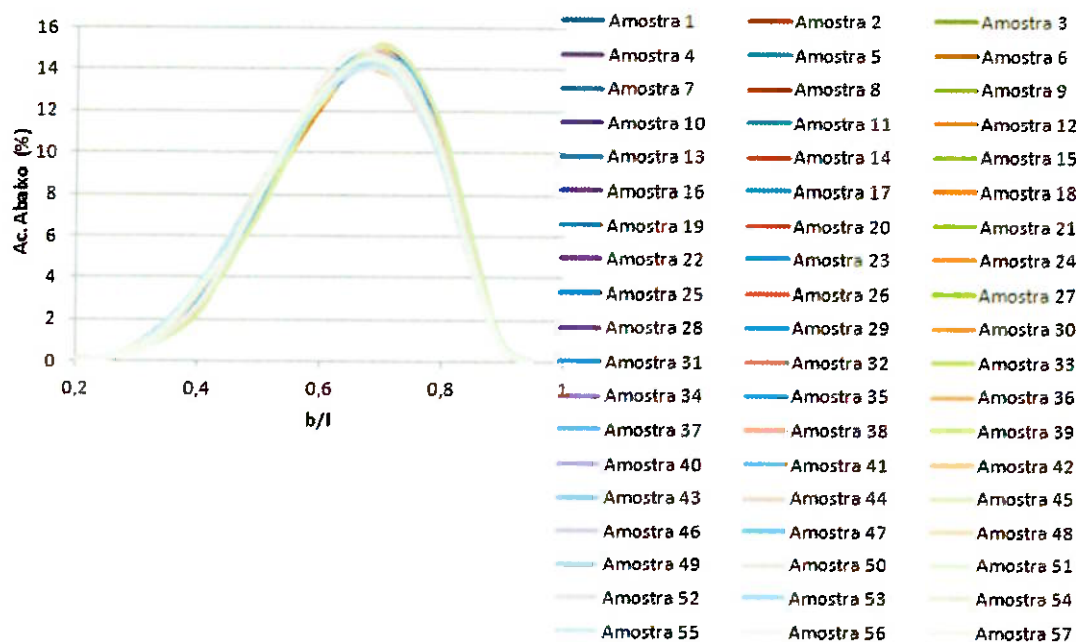


Figura A.2.2 – Resultados da relação de aspecto

APENDICE 3 – DENDOGRAMAS

O dendograma obtido através do *software* R para a classificação em grupos, considerando os parâmetros de forma e de amplitude da distribuição granulométrica é apresentado a seguir.

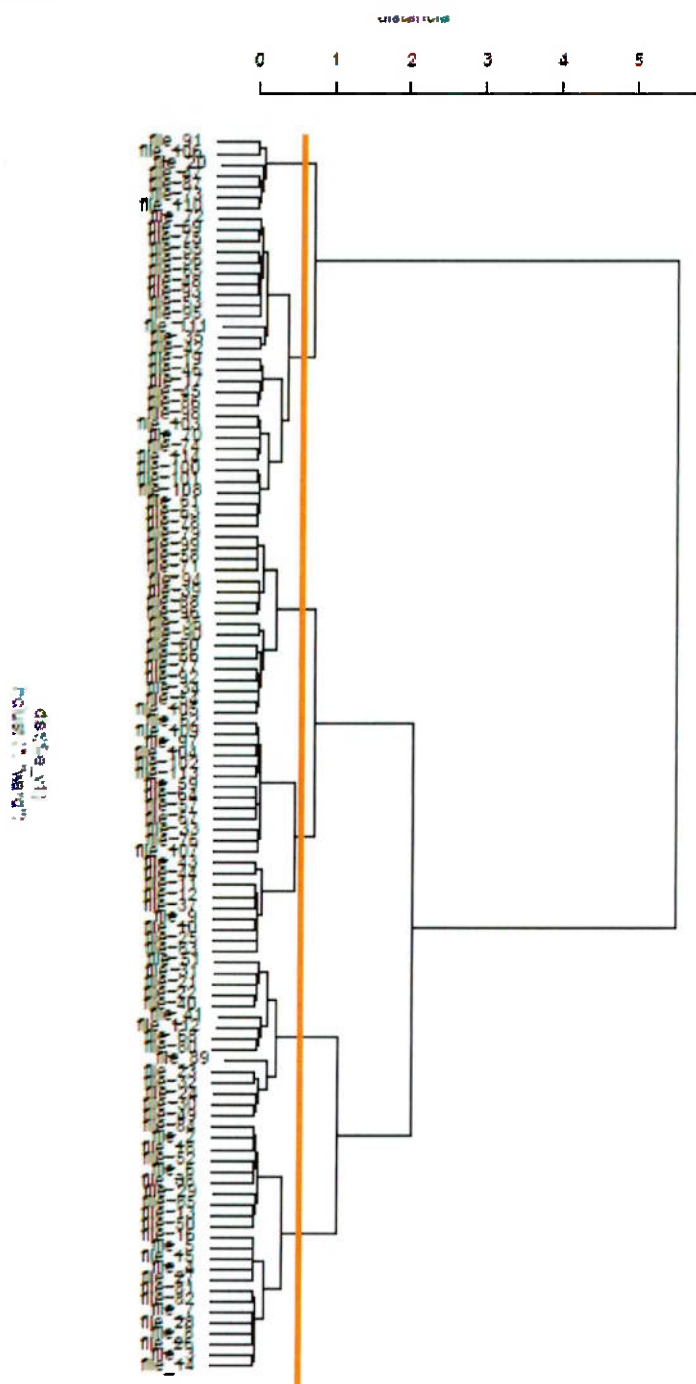


Figura A.3.1 – Dendograma em função da morfologia

O dendograma obtido pelo software X'Pert Highscore Plus, considerando os resultados da DFX e os parâmetros de picos e perfil como dados de origem, 70% de limiar de comparação, medida de distância euclidiana e 30 % de *cut-off* para definição de *clusters* é apresentado a seguir.

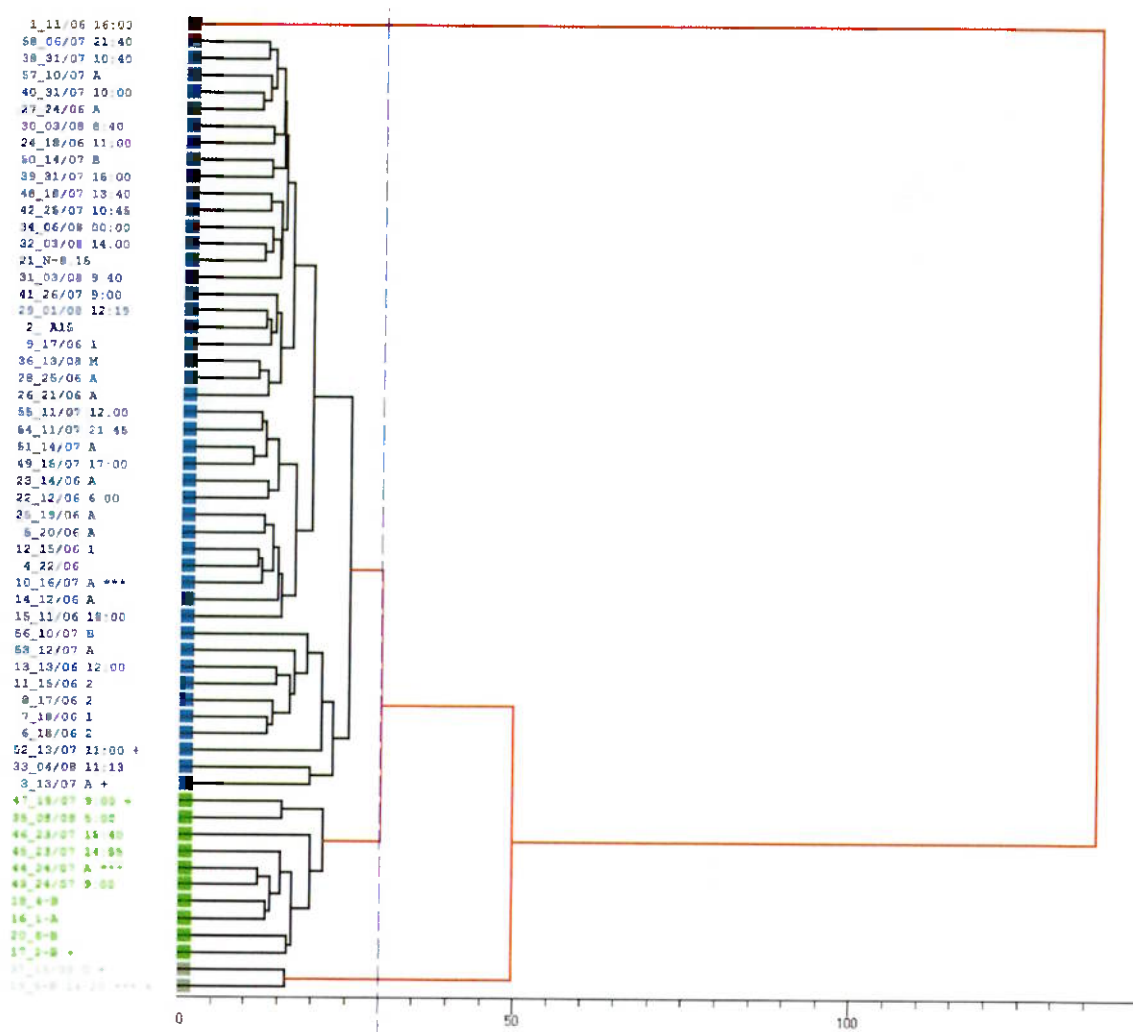


Figura A.3.2 – Dendograma obtido a partir dos dados da DFX

APNEDICE 4 – RESULTADOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Tabela A.4.1 – Composição química das amostras representativas

Amostra	G1	G2	G3	G4
CaO	43,3	37,4	42,7	41,2
MgO	4,31	7,37	4,57	6,06
SiO ₂	8,42	13,8	9,17	9,36
Al ₂ O ₃	1,91	1,95	1,93	2,28
Fe ₂ O ₃	0,94	1,03	0,93	0,95
Na ₂ O	0,01	0,15	<0,10	0,17
K ₂ O	0,41	0,45	0,45	0,48
P ₂ O ₅	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
TiO ₂	<0,10	<0,10	<0,10	0,11
SrO	<0,10	0,14	<0,10	<0,10
MnO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
S	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
PF	40,1	37,8	39,6	39,7