



# MISTURAS BI-DISPERSAS DE AREIAS: EFEITOS DA GRANULOMETRIA NO EMPACOTAMENTO E FLUIDEZ

## BIDISPERSE MIXTURES OF SAND: EFFECTS OF GRANULOMETRY ON ITS PACKING AND FLOWABILITY

D. B. BAIÃO<sup>1</sup>, C. S. MACHADO<sup>1</sup> e R. CONDOLTA<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário FEI, Departamento de Eng. Química, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil

\*Autor correspondente: Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Química, Avenida Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, 09850-901, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil, Fone: +55 11 4353(r.2250)  
e-mail address: [rcondotta@fei.edu.br](mailto:rcondotta@fei.edu.br) (R. Condotta).

### ARTICLE INFO

Article history:  
Received 2018-01-09  
Accepted 2018-02-10  
Available online 2018-12-28

#### palavras-chave

Areia de Sílica  
Areia de Quartzo  
Coesão  
Interação Interparticular  
Empacotamento

#### keywords

Sand  
Quartz  
Cohesion  
Interparticle Interactions  
Particle Packing

### ABSTRACT

*The present work aims to evaluate the effect of granulometry (particle size and particle size distribution) on the main physical properties of bidisperse bulk solids, such as bulk density, porosity, cohesion, compressibility and basic flow energy. Therefore, two groups of mixtures comprising commercial sands with different sizes were prepared. The first group (G1) consisted on adding two sort of fine quartz powder (particle undersize of 200 and 600 mesh) into commercial sand 50/60 (coarse). The second group (G2) was formulated adding commercial sand (80/100 and 50/60) added into coarse one (40/50). All mixtures were tested at static and dynamic conditions and at incipient transition (shear test). As result, it was observed higher interactions for smaller quartz's particles that lead to form agglomerates, increasing bulk porosity and reducing bulk density of non-consolidated mixtures comprising this sort of material. Fine particles at group 1 mixtures have also improved the quality of fluidization, but decrease powder flowability increasing cohesion. The results obtained for group 2 mixtures have revealed no significant changes on bulk properties as increasing fine particle into coarse one. This is could be attributed to the low ratio between fine and coarse particles, changing particle packing, once the interspaces between coarse particles could not be filled with fine one.*

### RESUMO

*Este trabalho teve como o objetivo avaliar o efeito da granulometria (tamanho das partículas e faixa de distribuição granulométrica) nas principais propriedades físicas de leitos bi dispersos, tais como densidade aparente, porosidade, coesão, compressibilidade e energia básica de fluxo. Para tanto foram confeccionados dois grupos de misturas envolvendo areias comerciais com diferentes granulometrias. O primeiro grupo (G1) consistiu na incorporação de dois tipos de areias de quartzo (partículas menores que mesh 200 e mesh 600) em um de tipo de areia de sílica comercial 50/60 (grosso). O segundo grupo (G2) constituiu em misturas de areias de sílica 40/50 (grosso) mediante adição de partículas de menor granulometria de areia de sílica 50/60 e 80/100. Todas as misturas foram analisadas em condições estáticas, dinâmicas e na iminência do movimento (cisalhamento). Como resultado observou-se uma maior tendência por parte das partículas de tamanho reduzido em formar aglomerados, aumentando a porosidade e diminuindo densidade aparente quando não consolidadas. A presença de partículas de tamanho reduzido nas misturas do grupo 1 também melhorou a fluidização das misturas deste grupo, mas prejudicou a fluidez aumentando a coesão do meio. Os resultados obtidos para o grupo 2 de misturas não apresentaram diferenças significativas em suas características com a incorporações de finos. Isto se deve a baixa relação entre o tamanho das partículas, de maneira que as partículas menores não cabem nos interstícios das partículas maiores.*

## 1. INTRODUÇÃO

À pressão e temperatura ambiente, diversas substâncias são estáveis no estado sólido, o que lhes confere algumas vantagens como forma e volume definidos. A dimensão dos sólidos, por sua vez, é uma característica do material e pode ser natural ou resultante de um processo de fragmentação. Ao passo que materiais pulverulentos (conjunto de partículas muito finas e leves) apresentam propriedades específicas e individuais definidas pelas partículas e pelo meio em que esses materiais se encontram.

Esses fatores tornam-se inconvenientes em processos nos quais não há um estudo que auxilia nas operações industriais e no projeto de equipamentos, podendo resultar em perda de produção, má qualidade do produto, risco para a saúde e explosão. Enquanto que uma compreensão mais apurada do comportamento dos pós pode minimizar estes problemas e melhorar o processo, controle de qualidade e emissões ambientais (RHODES, 2008).

Diferentemente dos líquidos que possuem sua fluidez classificada segundo sua viscosidade, não há uma definição concreta nem uma unidade específica para se descrever o fluxo dinâmico de materiais particulados (FREEMAN; COOKE, 2006). Porém, a vasta utilização de sólidos particulados em escala industrial e os riscos atrelados a sua manipulação, processamento e armazenamento, torna necessário o estudo do comportamento e escoamento desses sólidos, que nesse caso, é realizado de modo singular.

A granulometria de um material particulados pode definir, num primeiro momento, a sua aplicação, sendo necessária sua classificação prévia dentre as definições existentes. Em linhas gerais, denomina-se de poeira ou pó, um sistema constituído por partículas de tamanho inferior a 300 micrômetros, e de sólidos granulares ou grosseiros quando as partículas forem superiores a este tamanho. Estas categorias são ainda subdivididas, sendo a menor delas denominada pós ultrafinos quando constituídos por partículas inferior a 1,0  $\mu\text{m}$ . (WOODCOCK, MASON, 1987; CAMPOS, 2012). De modo geral, os pós são constituídos de partículas sólidas, fisicamente distintas, e que podem apresentar variadas origens, estruturas e composições e se comportam em conjunto (COELHO, 2007; MARQUES, 2012).

Um dos materiais estudados nesse trabalho é a areia, termo que abrange um amplo conjunto de materiais granulares, constituídos principalmente de quartzo. É um agregado miúdo originado por meio de processos naturais (areia natural) ou artificiais de desintegração de rochas ou provenientes de outros processos industriais (areia artificial) (DIAS *et al.*, 2006). A conotação granulométrica para areia é atribuída a um material granular solto, não coesivo, constituído por partículas de dimensão 0,06 a 2,0 mm, podendo ainda ser subdividida em areia grossa, areia, média e areia fina (ANEPAC, 2014).

O segundo material avaliado nesse trabalho foi o quartzo comercial ou areia de quartzo, que é um tipo de areia artificial oriunda de um processo de cominuição. O quartzo é um dos minerais mais abundantes na superfície terrestre, sendo componente das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, constituído principalmente por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), podendo ter em sua composição lítio, sódio, potássio e titânio. As inúmeras variedades de quartzo são classificadas em

macrocristalinas com cristais estruturados e bem desenvolvidos; e em criptocristalinas com formas parciais englobadas em massas minerais amorfas (BIOMANIA, 2018).

Interações entre partículas desses sistemas de sólidos particulados podem ocorrer, e podem ser classificadas quanto a sua origem. Como consequência das forças oriundas de ligações covalentes, estas são extremamente fortes, com uma energia de formação na faixa de 300 a 700  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , e influenciam a forma espacial molecular, as energias de ligação, dentre outros aspectos do comportamento químico. Já as interações consequentes de ligações físicas, estas são mais comuns, porém muito mais fracas, geralmente com energias de ligação inferior a 40  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Apesar de serem mais fracas do que as ligações químicas, sua influência estende-se sobre distâncias maiores, sendo denominadas "forças de longo alcance" (ZENG, MARTIN, MARRIOTT, 2003).

Essas interações entre partículas podem ainda serem classificadas em adesão e coesão. O estudo dessas classes é de suma importância quando as forças gravitacionais agindo sobre as partículas tornar-se insignificante, ou seja, quando as dimensões das partículas são muito pequenas.

A adesão refere-se a interações entre as partículas de materiais diferentes, sendo o resultado de forças que existem entre partículas microscópicas e uma superfície sólida em contato (PODCZECK, NEWTON, JAMES, 1995). Apesar das várias definições para a adesão nenhuma é totalmente satisfatória ou universalmente aceita, podendo ser compreendida como atração entre dois corpos sólidos, com superfícies de contato comuns, e produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares de ação a curta distância (FELICETTI, 2008).

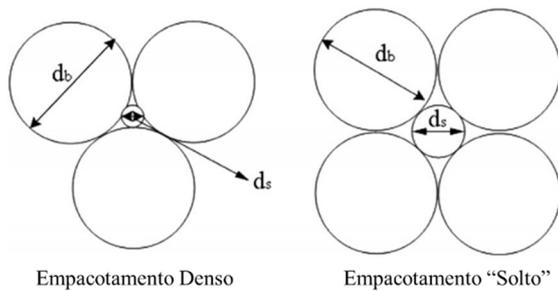
A coesão por sua vez, se refere às interações entre partículas de mesma estrutura química. Quando presentes em um material pulverulento, essas forças tornam possível a propriedade de plasticidade além de serem responsáveis pela retenção de um fluido, o que afeta diretamente no movimento do sólido. São originadas por diferentes mecanismos cuja intensidade depende da distância entre partículas e do tamanho da partícula.

Outro conceito importante no estudo de materiais particulados é a sua fluidez. É uma propriedade que leva em conta as características físicas do produto a granel que são responsáveis pelo seu comportamento de fluxo. O bom comportamento do fluxo normalmente significa que o material pulverulento escoar facilmente, não consolida e flui para fora de um silo ou tremonha, devido à força da gravidade. O contrário se deve aos produtos que sofrem obstruções ou consolidação durante o armazenamento ou transporte.

Em vista do exposto a ação de fluir significa que um produto sólido é deformado plasticamente devido às cargas agindo sobre ele e a magnitude da carga necessária para o fluxo é uma medida de sua aptidão ao escoamento (SCHULZE, 2011). E sendo a viscosidade a resistência interna de um fluido ao escoamento, a fluidez para sólido pode ser definida em uma abordagem mais simples como o inverso da viscosidade, como um conjunto de características físico-químicas que confere movimento às partículas partindo de um estado estacionário.

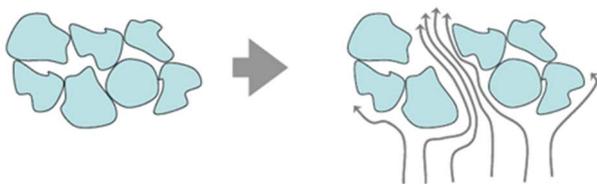
Outro fator decisivo no escoamento de sistemas de materiais particulados é o modo como as partículas desse sistema se arranjam e são acomodadas num leito, ou seja, a

forma de empacotamento das partículas. Este empacotamento depende das características isoladas das partículas, como tamanho (granulometria), densidade e forma, e o resultado acaba originando numa outra importante propriedade, a porosidade interparticular. Em termos da porosidade, um sistema particulado pode ser classificado como denso ou solto, sendo este último o de maior porosidade. Além disso, sistemas dispersos com diferenças consideráveis de tamanho de partículas podem apresentar comportamentos distintos. A Figura 1 ilustra as diferentes condições de empacotamento em leitos bi disperso, enfatizando a dependência da porosidade com a granulometria das partículas.



**Figura 1 – Tipos de Empacotamento de Partículas.**

Conforme já mencionado, o escoamento é a transição do estado estático para o dinâmico, mediante deformação plástica do sistema particulado, resultante de uma força externa. Sistemas de descargas e chutes empregam a gravidade, enquanto sistemas pneumáticos empregam ar que devem minimizar as interações entre as partículas e arrastá-las. Mesmo em sistemas monodispersos, cujas interações entre as partículas são similares, a fluidização pode ser problemática. A Figura 2 ilustra um leito de partículas coesas e monodispersas onde, frequentemente, se observa a formação de um caminho preferencial de ar introduzido no leito durante o processo de fluidização.



**Figura 2 – Fluidização de um material coesivo.**

A adição de partículas menores num leito de partículas maiores é uma técnica empregada para melhorar a fluidização, reduzindo a velocidade mínima de fluidização do novo sistema bi disperso. Juliang (2013) alega que em sistemas com ampla distribuição granulométrica, partículas menores ocupam os espaços intersticiais, atuando como “lubrificantes” das partículas maiores e reduzindo a porosidade do sistema. Os limites de porosidade, ilustrados na Figura 1, foram determinados com relações entre o tamanho das partículas (pequenas/grandes) de  $1/6,5$  e  $1/2,4$ , para as quais uma única partícula está presente nos interstícios das maiores. Resultados com diferentes relações entre os tamanhos das partículas confirmaram essas hipóteses, entretanto, variações na quantidade de cada população de partículas não foi contemplada neste estudo.

Assim, com o intuito de avaliar o efeito da adição de partículas menores (finas) em leitos inicialmente constituídos por partículas maiores, foram confeccionadas misturas de

materiais comerciais do segmento da construção civil (Grupo 1), compreendidos por areia “fina” e areia de quartzo, e por misturas de areia base empregadas na preparação de moldes de fundição (Grupo 2).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos utilizados (métodos estáticos e dinâmicos) são descritos a seguir juntamente com a metodologia e os respectivos materiais utilizados (reagentes, equipamentos e vidrarias).

### 2.1 Preparação das amostras

As amostras utilizadas na confecção das misturas do grupo 1 (G1) consistiram em areia de sílica e areia de quartzo (Brasil Minas), e foram classificadas pela operação de peneiramento, sendo a areia de sílica compreendida pela fração intermediária entre as peneiras 50 e 60 mesh, e as areias de quartzo as frações passantes nas peneiras de 200 mesh e 600 mesh. As amostras foram então denominadas de areia fina, quartzo #200 e quartzo #600. A areia fina foi dividida em 12 amostras e diferentes teores de cada areia de quartzo foram adicionados à estas, originando misturas com frações mássicas de 3, 6, 10, 15, 20, 30%, tanto de quartzo #200 quanto de quartzo #600.

As amostras empregadas na elaboração do grupo 2 (G2) consistiram em areia base utilizada na preparação de areia para fundição (Bentomar), já classificadas quanto a sua granulometria pelo fabricante como areia 40/50, areia 50/60 e areia 80/100. Para a formulação das misturas desse grupo, diferentes quantidades de areia 50/60 e areia 80/100 foram adicionadas às amostras de areia 40/50, originando misturas de 5, 10, 20, 30 e 50% de areia 50/60 e areia 80/100.

As 28 amostras (22 misturas e 6 amostras puras) foram caracterizadas pelos métodos estáticos e dinâmicos à temperatura e pressão atmosféricas (25°C e 1 atm).

### 2.2. Testes estáticos

A análise granulométrica das partículas foi realizada por técnica de difração à laser no equipamento BlueWave (MicroTrac), em via úmida, com água como meio dispersante. Para amostras muito finas foi utilizado a sonda acoplada de ultrassom para dispersar os aglomerados formados por interação física.

Para a determinação da densidade real das partículas, foi utilizado um picnômetro à gás hélio (Gas Pycnometer), modelo AccuPyc II 1340 (Micromeritics), dotado de uma câmara de amostragem de 10cm<sup>3</sup>. Foram realizadas 10 medidas de densidade após um processo de 100 purgas do sistema.

A determinação das densidades aparente e compactada das amostras foi realizada em triplicata segundo a metodologia II da U.S. Pharmacopeia (2006) com auxílio do equipamento Auto-Tap (Logan), sendo a densidade compactada determinada após 2000 batidas. As porosidades foram obtidas por relações específicas entre a densidade real e a compactada, e o Índice de Hausner calculado pela relação entre a densidade compactada e a densidade aparente.

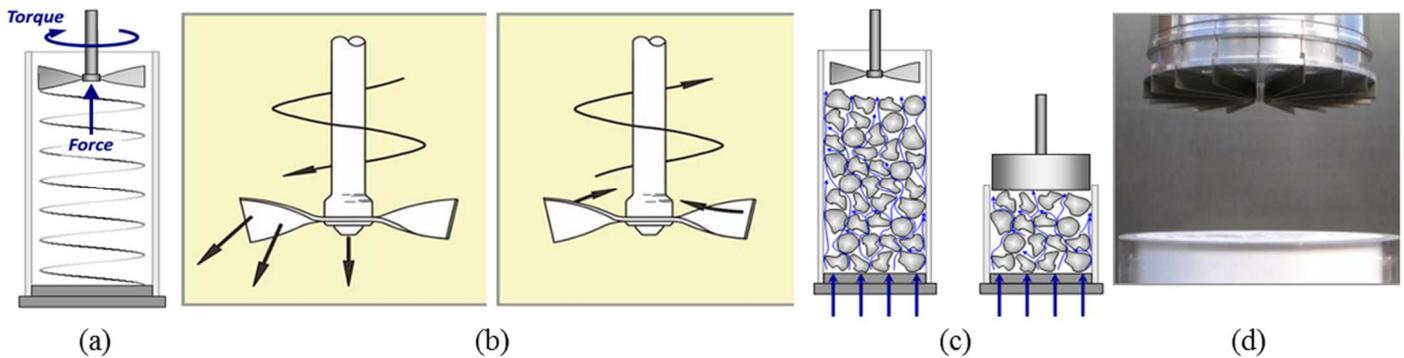
### 2.3. Testes dinâmicos

Os chamados testes dinâmicos foram realizados com auxílio do reômetro de pó FT-4, da Freeman Technology e

foram assim denominados pois determinam certas propriedades do leito de partículas quando imposto à agentes externos que resultam, ou podem resultar na movimentação das partículas do leito. Desta forma, os testes realizados foram energia básica de fluxo, energia de fluxo variável, permeabilidade, compressão e cisalhamento.

O princípio de funcionamento deste equipamento é a

medida simultânea da força axial e rotacional (torque) de uma lâmina torcida de 48 mm de comprimento ao se mover através de um leito de material pulverulento, numa trajetória helicoidal no sentido anti-horário, conforme apresentado na Figura 3. Desta forma, é possível quantificar a resistência que o material oferece ao movimento da lâmina, fornecendo parâmetros indicativos da fluidez de materiais pulverulentos no estado dinâmico (SANTOS, CONDOTTA, 2014).



**Figura 3: (a) ilustração da força axial e rotacional (torque) medido pelo FT-4; (b) sentido forças aplicadas ao sólido pela lâmina torcida quando submetida a rotação nos sentidos anti-horário e horário, respectivamente; (c) ilustração dos experimentos de aeração, compactação e permeabilidade realizados com injeção de ar na base do recipiente contendo a amostra; (d) cabeça cisalhante dotada de dentes, utilizado nos testes de cisalhamento.**

Outra característica do reômetro de pó FT-4 é a preocupação na homogeneização do material antes de realização dos ensaios propriamente dito, retirando qualquer influência da maneira que o operador prepara o leito de partículas para análise. Para tanto, a lâmina torcida é submetida à rotação horária, homogeneizando o leito e aliviando as tensões geradas na preparação do leito ou até mesmo durante a realização dos ensaios. Desta forma, antes de se repetir qualquer medida, o aparelho realizará uma nova etapa de homogeneização do estado de tensões do leito.

Neste trabalho, os testes dinâmicos mencionados foram realizados pelo menos duplicata, utilizando-se o kit de acessórios de 50mm, segundo a metodologia padrão descrita no manual do equipamento (FREEMAN, 2008). Entretanto, uma breve descrição da metodologia é realizada a seguir.

O teste de estabilidade foi realizado no recipiente de 160 ml de volume a uma velocidade periférica da lâmina de 100 mm/s. Esta análise foi realizada 7 vezes, no intuito de se verificar se o material sofre qualquer alteração em suas características durante sua movimentação pela lâmina, tais como segregação, abrasão ou quebra das partículas. Além disso, conforme já mencionado, um ciclo de homogeneização da amostra é realizado entre as medidas propriamente dita. Após a realização deste conjunto de medidas, o equipamento fornece a energia básica de fluxo (BFE - energia dispendida para deslocar a lâmina torcida através da amostra de pó após estabilidade atingida), em mJ.

O teste de compressibilidade consistiu em comprimir 85 ml de amostra variando-se a tensão normal aplicada, previamente definida em: 0,5, 1, 2, 4, 6, 8, 12 e 15 kPa. O resultado obtido neste teste é a porcentagem de redução do volume da amostra em relação aos 85ml iniciais. No teste de permeabilidade, o mesmo volume da amostra foi comprimido

nas mesmas condições anteriores, mas com injeção de ar seco a 2mm/s na base do recipiente. Transdutores de pressão na linha de ar registraram a perda de carga que foi posteriormente associada com a tensão normal aplicada. Já o teste de aeração é semelhante ao teste de estabilidade, porém com a injeção de ar seco na base do recipiente e a velocidade da lâmina é mantida constante em 100mm/s. A vazão de ar, expressa em velocidade linear, variou de 0 mm/s a 40 mm/s para o grupo 1 e de 0 mm/s a 16 mm/s para o grupo 2.

O teste cisalhamento, realizado em condição quase-estático, determina os parâmetros na iminência do movimento. Dentre os parâmetros mais importantes determinado neste teste estão a função de fluxo e a coesão, indispensáveis para a classificação da fluidez de materiais particulados. O teste de cisalhamento é similar ao teste de compactação, com a diferença que o pistão é substituído por uma cabeça cisalhante, dotada de dentes, que se fincam na amostra. O leito de partículas é então consolidado sob uma tensão normal pré-definida. Posteriormente, procede-se com a determinação das condições de ruptura (deformação plástica) deste leito, aplicando-se tensões cisalhantes que são impostas mediante a rotação da cabeça cisalhante. Para cada estado de consolidação são aplicadas 5 tensões cisalhantes sob tensões normais que variam de 1/3 a 2/3 da tensão normal de consolidação. O processo deve ser repetido para diferentes tensões de consolidação a fim de se obter a função de fluxo do material, mas cada teste individual já permite a quantificação da força de coesão desenvolvida pelo material naquela condição.

As amostras do grupo 1 foram submetidas à tensão de consolidação de 6 kPa e as amostras do grupo 2, submetidas à tensão de 9 kPa, obtendo-se as coesões nessas respectivas tensões.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A distribuição granulométrica das amostras puras empregadas na confecção das misturas dois grupos de materiais é ilustrada na Figura 4. As distribuições granulométricas das misturas estão apresentadas nos gráficos das Figuras 5 e 6.

As amostras puras de areia 50/60 (G1) e areia 40/50 (G2) apresentaram as menores faixas de distribuição, seguida pela areia 50/60 (G2), retratando características de materiais essencialmente monodispersos. Observa-se que ambas as areias 50/60 estão na mesma faixa de tamanho de partículas, porém a porcentagem de distribuição da areia 50/60 utilizada na confecção do grupo 1 é maior, sinalizando a melhor padronização desse material quanto a variação do tamanho de partículas.

Para as amostras de areia 80/100 (G2) e quartzos (G1), a faixa de distribuição é mais larga, característico de materiais dispersos. Esse efeito é mais acentuado para os quartzos, visto que o tamanho destas partículas é inferior à 100  $\mu\text{m}$  e as interações interparticulares se tornam mais pronunciáveis.

Em relação às distribuições granulométricas das misturas do grupo 1, não foi observado efeito significativo quanto ao quartzo nas concentrações de 3 e 6%. Esse comportamento monodisperso é originado pela falta de sensibilidade da análise que, expressa em unidades volumétricas, não detectou a pequena quantidade de quartzo. Assim, a formação de um sistema bidisperso só foi constatada para os teores acima de 10% de quartzo.

Já para as amostras do grupo 2, um comportamento semelhante foi observado para a mistura de maior granulometria, onde a presença de finos só foi detectada para composições mássicas acima de 10% de areia 80/100. Para as misturas contendo a areia 50/60, efeitos na distribuição granulométrica foram observados em todos os teores, além de manter o comportamento Gaussiano da mesma.

Os valores numéricos dos tamanhos médios de distribuição bem como os resultados das análises estáticas estão contidos na Tabela 1

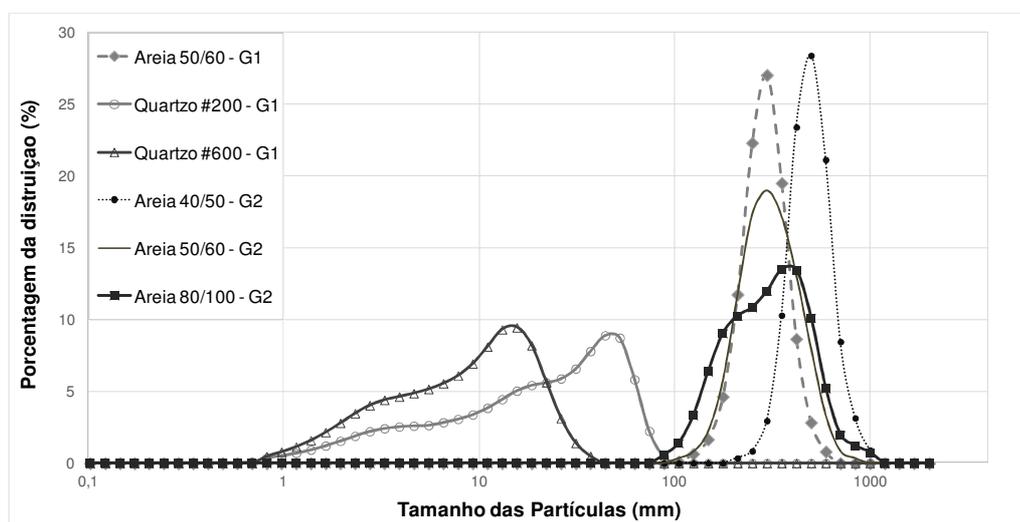


Figura 4 – Distribuição granulométrica das amostras puras.

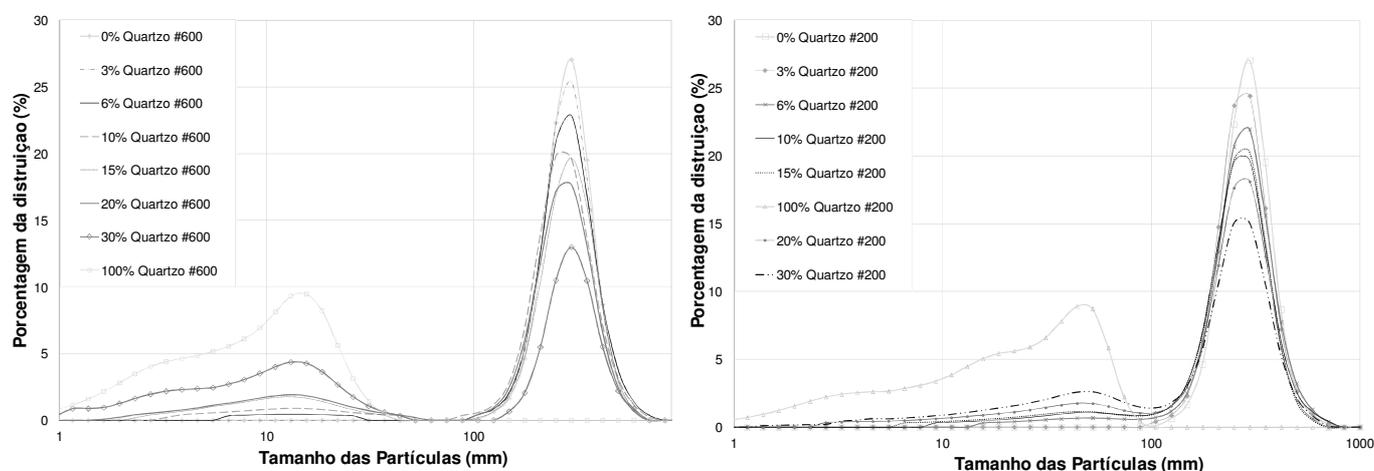


Figura 5 – Distribuição granulométrica das misturas do grupo 1: Areias de sílica e quartzo.

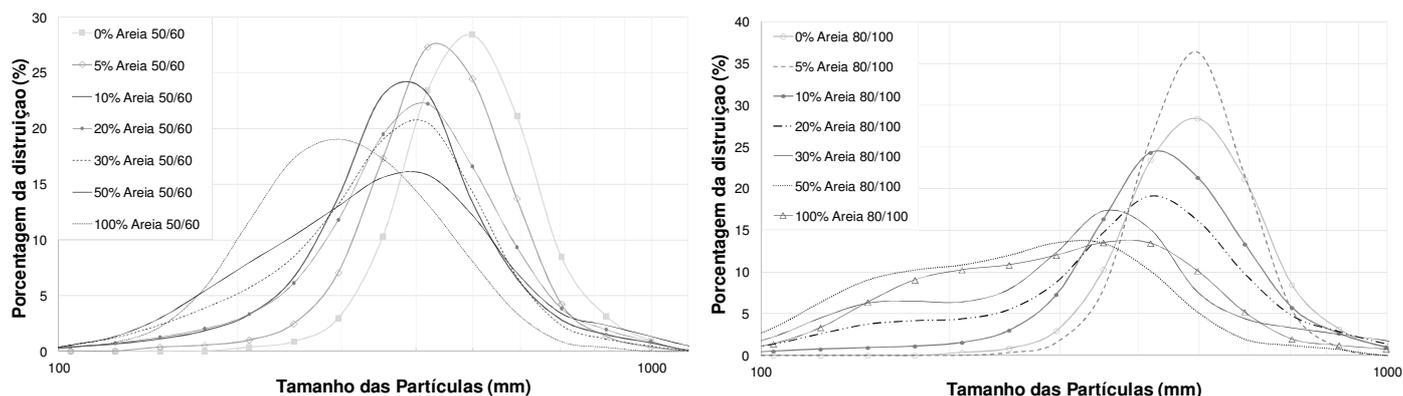


Figura 6 – Distribuição granulométrica das misturas do grupo 2: Areias de fundição.

Tabela 1 – Resultados das análises estáticas de caracterização das amostras puras e misturas.

Parâmetro Analisado	Amostra	Teor de finos								
		0%	3%	5 - 6 %	10%	15%	20%	30%	50%	100%
Diâmetro Médio Vol. - $d_{v(4,3)}$ / $\mu\text{m}$	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	270,80	270,20	262,00	236,50	226,50	209,20	148,60	-	9,55
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	270,80	261,60	253,20	234,70	226,30	210,40	190,90	-	23,88
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	465,10	-	454,60	415,90	-	376,70	351,10	304,50	205,10
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	465,10	-	414,80	377,20	-	380,70	347,30	345,70	296,10
Densidade Aparente $\rho_{\text{bulk}}$ / ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	1,45	1,43	1,43	1,42	1,37	1,33	1,20	-	0,70
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	1,45	1,43	1,46	1,44	1,44	1,39	1,40	-	0,90
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	1,58	-	1,56	1,57	-	1,58	1,58	1,58	1,48
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	1,58	-	1,58	1,59	-	1,58	1,59	1,58	1,57
Densidade Compactada (2000 batidas) $\rho_{\text{tapped}}$ / ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	1,54	1,58	1,64	1,70	1,78	1,83	1,89	-	1,38
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	1,54	1,54	1,64	1,70	1,73	1,80	1,88	-	1,68
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	1,71	-	1,75	1,75	-	1,78	1,80	1,77	1,65
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	1,71	-	1,73	1,75	-	1,75	1,75	1,78	1,76
Porosidade Aparente (bulk porosity) $\epsilon$	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	0,45	0,45	0,45	0,46	0,48	0,49	0,54	-	0,75
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	0,45	0,46	0,45	0,46	0,46	0,46	0,47	-	0,66
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	0,41	-	0,42	0,41	---	0,41	0,41	0,41	0,44
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	0,41	-	0,41	0,40	---	0,41	0,41	0,41	0,41
Índice de Hausner	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	1,06	1,10	1,14	1,20	1,30	1,37	1,58	-	1,95
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	1,06	1,08	1,12	1,18	1,20	1,29	1,35	-	1,87
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	1,09	-	1,12	1,12	-	1,13	1,14	1,12	1,12
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	1,09	-	1,10	1,10	-	1,11	1,10	1,13	1,13

A densidade das partículas das amostras de ambos os grupos foi praticamente a mesma, de aproximadamente  $2,65 \pm 0,20 \text{ g}/\text{cm}^3$ , uma vez que estes materiais são essencialmente constituídos de dióxido de silício.

A densidade aparente das amostras, por se tratar de uma característica do leito, está relacionada com o tamanho das partículas que o constitui. Assim, os leitos constituídos por partículas maiores exibiram valores similares para essa propriedade, em torno de  $1,5 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Entretanto, as amostras de quartzos #200 e #600 mostraram valores inferiores:  $0,9 \text{ g}/\text{cm}^3$ , e  $0,7 \text{ g}/\text{cm}^3$ , respectivamente. Isto reforça mais uma vez a presença de interações interparticulares mais acentuadas em meios porosos com partículas menores, provocando a formação de aglomerados com espaços vazios em seu interior, o que resulta em uma menor densidade aparente e maior porosidade do leito.

Tal efeito também foi constatado analisando-se os valores de porosidade dos materiais e o comportamento do material quando submetido à compactação. Os maiores valores

de porosidade foram obtidos para as amostras de quartzos, devido aos aglomerados presentes, enquanto todas as amostras de areias, independentemente do tamanho e teor de finos, os valores permaneceram constantes e torno de 0,41. A amostra de quartzo #600 apresentou maior Índice de Hausner, seguido do quartzo #200. As misturas do grupo 1 têm influência nesse índice para a adição igual e superior a 10% de finos, já as misturas do grupo 2 não sofreram qualquer alteração significativa. Os resultados mais importantes dos testes dinâmicos são apresentados numericamente na Tabela 2.

Analisando os valores da energia básica de fluxo das amostras puras, verifica-se que as menores energias foram obtidas para o quartzo #600 e #200. Esta comparação fica mais evidente através de uma comparação gráfica, ilustrada pelas Figuras 7 e 8.

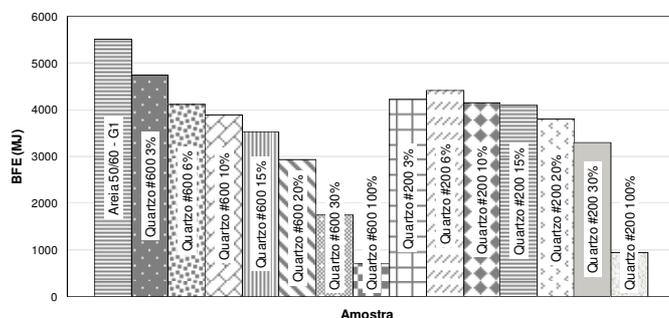
O fato de se necessitar uma energia menor não significa que as interações entre as partículas desses meios sejam menores, a explicação desse comportamento está no fato de que o teste de energia básica de fluxo mede a energia requerida pela

lâmina do reômetro para permear o leito do material. Sendo um leito constituído por partículas de tamanho reduzido com tendências coesivas, a interação entre elas ocorre de modo a

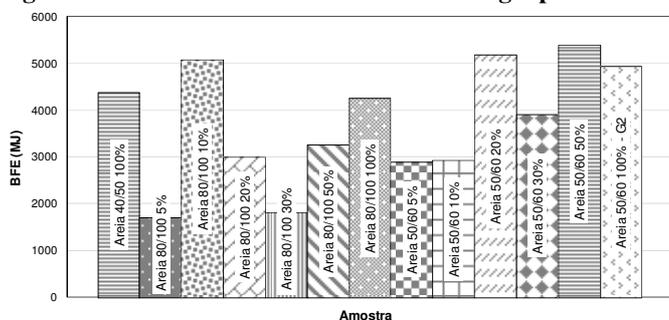
formarem aglomerados internamente vazios, os quais oferecem menor resistência à lâmina

**Tabela 2 - Resultados das análises dinâmicas e na iminência do movimento das amostras puras e suas misturas.**

Parâmetro Analisado	Amostra	Teor de finos								
		0%	3%	5 / 6 %	10%	15%	20%	30%	50%	100%
<b>Energia Básica de Fluxo BFE (mJ)</b>	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	5510,31	4737,92	4106,43	3880,74	3516,50	2929,29	1733,08	-	684,66
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	5510,31	4220,42	4405,13	4148,96	4088,04	3790,27	3299,36	-	954,31
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	4367,03	-	1711,52	5065,80	-	2988,32	1804,54	3246,55	4241,41
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	4367,03	-	2884,68	2917,19	-	5173,56	3900,61	5381,00	4934,32
<b>Compressibilidade a 15kPa (%)</b>	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	2,30	1,80	2,40	4,24	5,84	10,37	16,07	-	22,95
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	2,30	1,99	2,03	2,23	3,45	3,81	8,03	-	16,57
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	2,35	-	2,42	-	1,89	2,16	1,95	1,71	1,54
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	2,35	-	2,32	-	2,61	2,12	2,23	1,89	2,41
<b>Energia de Aeração a 40mm/s (mJ) EA a 10 mm/s (mJ)</b>	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	661,26	33,17	27,94	23,13	29,47	52,78	160,47	-	122,63
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	661,26	123,25	32,32	18,96	16,86	18,97	38,77	-	53,47
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	1993,77	-	3309,80	3391,45	-	3758,35	3363,99	2922,67	1855,49
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	1993,77	-	1832,47	2181,53	-	1971,14	2449,14	2265,75	2440,72
<b>Relação de Aeração (EA<sub>0mm/s</sub>/EA<sub>40mm/s</sub>) (EA<sub>0mm/s</sub>/EA<sub>16mm/s</sub>)</b>	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	8,33	142,85	146,98	167,80	119,34	55,50	10,80	-	5,58
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	8,33	34,24	136,28	218,81	242,44	199,83	85,10	-	17,85
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	1,19	-	0,77	0,79	-	0,88	0,95	1,30	1,86
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	1,19	-	1,35	0,97	-	1,05	0,87	0,94	0,92
<b>Queda de Pressão a 15 kPa (mBar)</b>	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	0,48	0,71	1,35	3,21	7,61	24,83	73,29	-	89,89
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	0,48	0,46	1,15	2,60	3,46	5,04	19,50	-	84,04
	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	2,35	-	2,42	1,89	-	2,16	1,95	1,71	1,54
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	2,35	-	2,32	2,61	-	2,12	2,23	1,89	2,41
<b>Coesão (kPa) a 6 kPa</b>	Quartzo #600 em Areia 50/60- G1	0,11	0,11	0,24	0,30	0,32	0,39	0,80	-	1,02
	Quartzo #200 em Areia 50/60- G1	0,11	0,24	0,20	0,21	0,14	0,23	0,42	-	0,67
<b>Coesão a 9 kPa</b>	Areia 80/100 em Areia 40/50 - G2	0,40	-	0,44	0,33	-	0,45	0,54	0,58	0,43
	Areia 50/60 em Areia 40/50 - G2	0,40	-	0,41	0,46	-	0,45	0,63	0,34	0,48



**Figura 7 – Valores do BFE das misturas do grupo 1**



**Figura 8 – Valores do BFE das misturas do grupo 2**

O decréscimo do valor de BFE com o aumento da quantidade de quartzos nas misturas do grupo 1 é o resultado da interação das partículas de quartzo com as de areia, havendo assim, a destruição dos aglomerados e a deposição dos quartzos na superfície das partículas maiores de areia. Com isso, os quartzos servem como agentes de fluidez (uma espécie de rolamento) que facilita a movimentação das partículas maiores.

Esse fenômeno ocorre em leitos nos quais a relação entre o tamanho das partículas é pronunciada. No caso do grupo 1, a relação dos diâmetros das partículas das amostras é de aproximadamente 1/30 (areia e quartzo #600) e 1/10 (areia e do quartzo #200).

Os resultados do teste de BFE das amostras do grupo 2 não apresentaram o mesmo comportamento, o que pode ser explicado pela relação do tamanho das partículas, que nesse caso é de 1/2,25 (areia 80/100) e 1/1,6 (areia 50/60). Estas relações ultrapassam os limites apresentado por Jiliang (2013) em que as partículas estão nos interstícios e atuam como lubrificante, facilitando o movimento do leito. Desta forma, visto que valores de BFE das amostras puras e das misturas desse grupo estão na mesma ordem de grandeza, infere-se que partículas menores substituem as partículas maiores no empacotamento, oferecendo essencialmente a mesma resistência ao movimento da lâmina.

No teste de compressibilidade, o quartzo #600 destaca-se mais uma vez por apresentar o maior percentual de compressibilidade, o que é explicado novamente pela sua maior tendência coesiva, capaz de formar aglomerados internamente vazios que são os responsáveis pelos baixos valores de BFE e maiores taxas de compressão observados, uma vez que são destruídos durante a compressão. O aumento do teor mássico de quartzo nas misturas torna as amostras mais compressíveis, exceto para pequenas quantidades.

As amostras do grupo 2, por apresentarem relação de tamanho de partículas próximos de 1, tamanhos superiores a 100  $\mu\text{m}$  e baixa propensão à coesão, não sofreram modificações significativas em seus leitos durante o processo de compressão,

o que já era esperado ao analisar a porosidade dessas amostras. A Figura 9 demonstra o comportamento das amostras puras e de algumas misturas do grupo 1 no teste de aeração

Verifica-se que apesar das amostras de quartzos puros e das misturas que os contêm apresentarem os menores valores de energia, ou as maiores reduções iniciais nos valores de energia à baixas velocidades do ar, eles não atingem o patamar de zero no estado de estabilidade. As amostras de areia pura e suas misturas, apesar de atingirem um patamar constante para elevadas velocidades do ar, esse patamar tende a zero, indicando ausência de qualquer interação entre as partículas do leito, característica de materiais não coesivos.

Isto se deve ao fato das partículas de areia, por serem maiores e apresentarem a maior densidade aparente, requererem maiores velocidades do ar para fluidizarem e atingirem o patamar de estabilidade, o que só ocorre quando o leito estiver totalmente fluidizado.

Já o motivo das amostras puras de quartzo #600 e #200 atingirem o patamar de estabilidade, ainda que diferente de zero, em baixas velocidades, se deve ao fato do regime de fluidização estabelecido ser do tipo agregativo no qual se fluidizam não as

partículas individualmente, mas um conjunto de aglomerados com poros isolados (espaços vazios), e havendo aglomerados no sistema, ainda existe interação entre as partículas mesmo depois de estabelecido o regime de fluidização, o que requerer mais energia para movimentar a lâmina através desse sistema.

No teste de permeabilidade a areia 50/60 (G1) apresentou menor queda de pressão, seguida da areia 80/100, areia 40/50, areia 50/60 (G2), quartzo #200 e quartzo #600. As misturas apresentaram maior queda de pressão de acordo com a maior fração mássica de quartzo, sendo que o aumento da queda de pressão mais evidente para as misturas de areia e quartzo #600 do grupo 1.

Verifica-se também que, para teores maiores de finos, a quantidade de partículas menores é suficiente para saturarem os espaços intersticiais das partículas maiores e aumentar a perda de carga do sistema. As misturas do grupo 2, apresentaram baixa perda de carga para todas as composições.

Os valores das coesões das misturas do grupo 1 e 2 são apresentadas nas Figuras 10 e 11, proveniente de testes de cisalhamentos conduzidos à 6kPa e 9kPa, respectivamente.

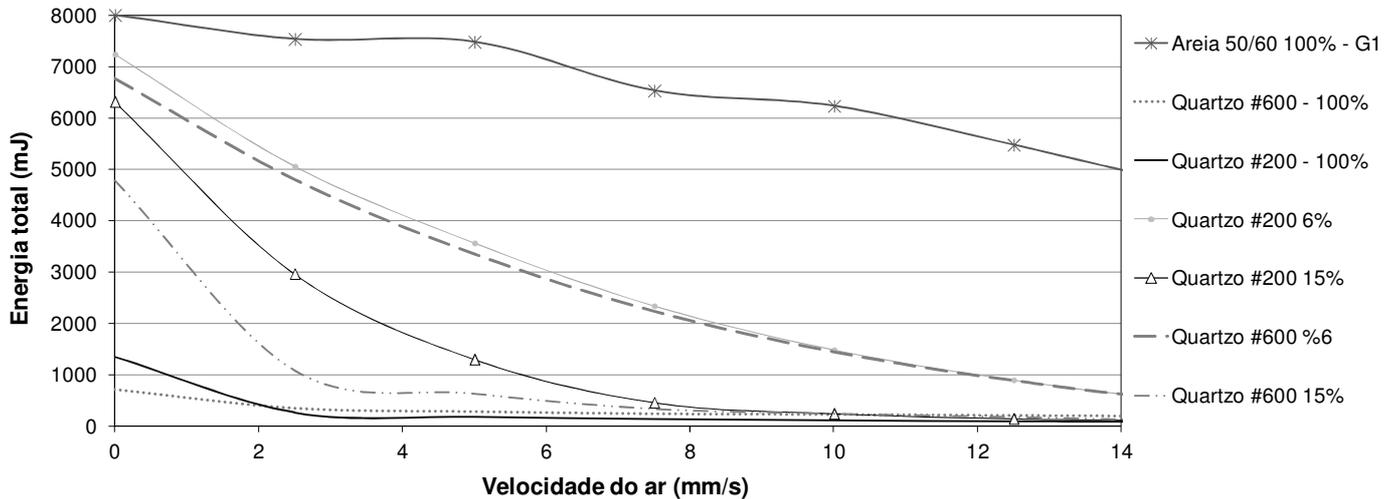


Figura 9 – Teste de Aeração para amostras do grupo 1.

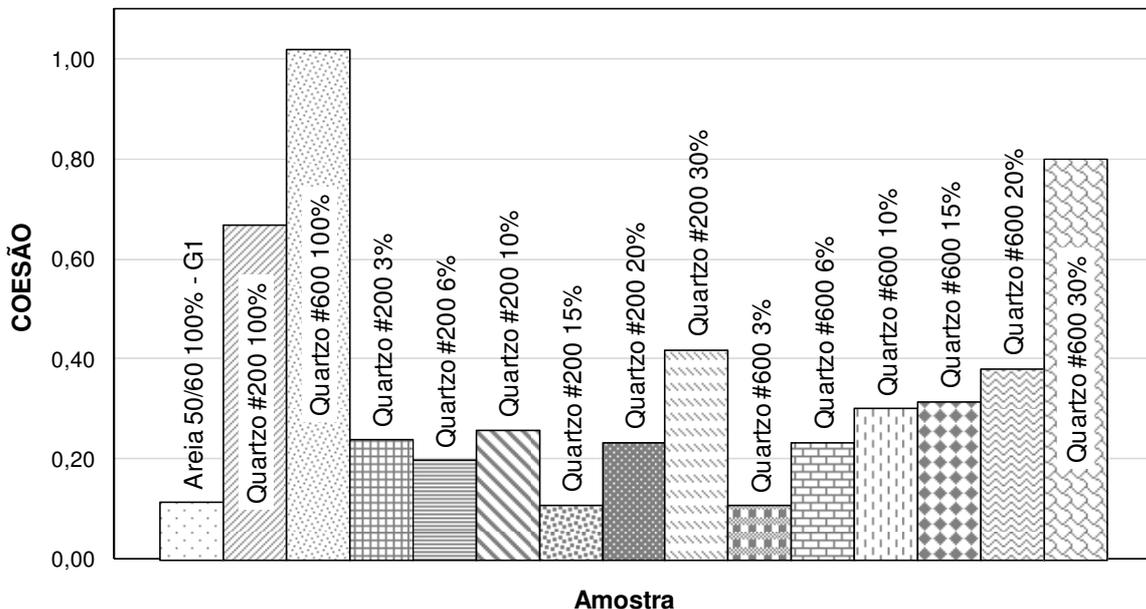
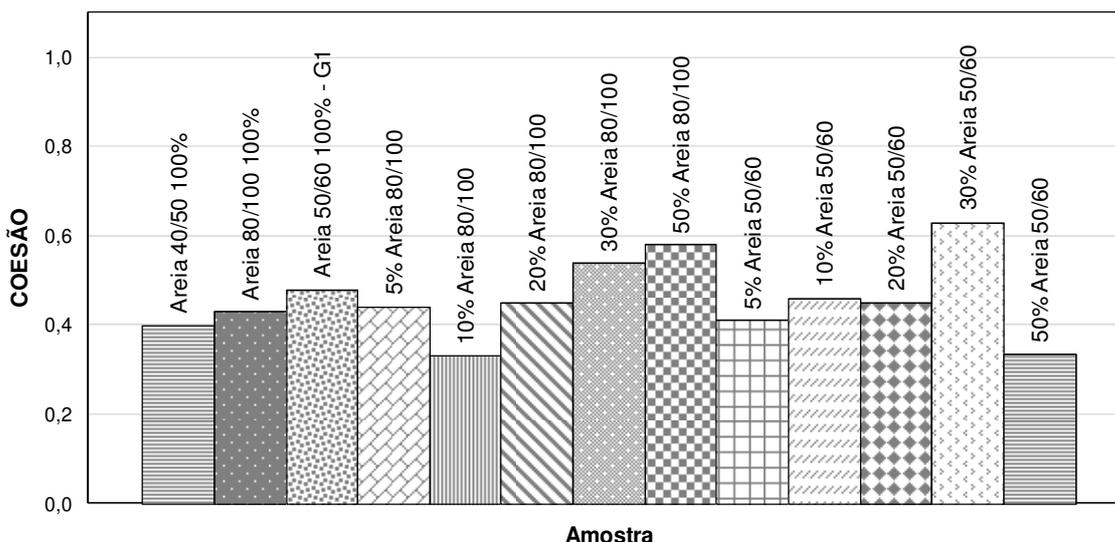


Figura 10 – Teste de Cisalhamento a 6 kPa para misturas do grupo 1.



**Figura 11 – Teste de Cisalhamento a 9 kPa para misturas do grupo 2.**

Pelo teste de cisalhamento conduzido a 6kPa, pode-se comprovar quantitativamente que amostra de quartzo #600 é mais coesiva e a de areia 50/60 (G1), a menos coesiva. Consequentemente, as misturas formuladas com maior fração mássica de quartzo #600 apresentaram maior coesão. As misturas formuladas com quartzo #200 não possuem relação entre a fração mássica de quartzo e a coesão, sendo a menor coesão a da mistura de 15% de quartzo #200.

A areia 50/60 é a mais coesiva dentre as areias analisadas no teste de cisalhamento à 9 kPa. E assim como as misturas formuladas com quartzo #200, as misturas do grupo 2 também não possuem relação entre a fração mássica de finos e a coesão, sendo a menor coesão a da mistura de 10% de areia 80/100 e 50% de areia 50/60. Neste caso, observa-se a que quanto maior a divergência do tamanho das partículas binárias (finas e grossas) que constituem um leito, mais a coesão torna-se expressiva.

#### 4. CONCLUSÕES

Foi investigado o arranjo de partículas em sistemas bidispersos e o seu papel na fluidez de misturas de materiais particulados constituídos de areia, avaliando principalmente a granulometria das partículas. Os materiais estudados foram partículas inorgânicas inertes, areia e areia de quartzo, formados principalmente por dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>).

Foi constatado o aumento da coesão de amostras de tamanho inferior a 100µm, exemplificados pelas amostras de quartzo, e das misturas que utilizavam este material. Em linhas gerais, estas amostras apresentaram maiores porosidades, densidade aparente e piores coesões e índice de Hausner, indicativos de sua má fluidez, com a incorporação de finos em sua composição.

As amostras de areia base para processo de fundição (G2) apresentaram as maiores granulometrias, cujos diâmetros médios volumétricos foram superiores à 200 µm, apresentaram os menores valores de coesão. Estes valores, além de serem inferiores aos observados para as misturas do grupo 1, foram similares, indicando que esta propriedade é independente da dispersão e do tamanho das partículas na faixa estudada. Além disso, as misturas bi dispersas destes materiais, independente de

seus teores, não apresentaram alterações quanto à densidade aparente, porosidade e compactação.

Em linhas gerais, notou-se diferentes condições de empacotamento das misturas de partículas dos 2 grupos de materiais estudados. As partículas finas do grupo 1 apresentam diferentes características quando em leitos de amostra pura, formando aglomerados com espaço interno vazio, e das características que conferem quando no leito de misturas bidispersas, atuando como agentes de fluidez. Esse comportamento foi confirmado pelo decréscimo da energia básica de fluxo das misturas com o aumento da porcentagem de quartzo.

Já as amostras do grupo 2, de maiores tamanhos e menores relações entre seus tamanhos, ofereceram maior resistência o movimento da lâmina, e um comportamento singular da energia básica de fluxo independente do teor de finos em suas composições. Tal comportamento pode ser atribuído a um intertravamento das partículas durante o movimento da lâmina, visto que a relação de tamanho indica que não houve preenchimento dos interstícios, mas uma permuta de partículas de diferentes tamanhos no empacotamento do leito.

Finalmente, a presença de partículas de tamanho bastante reduzido resultou no aumento das forças coesivas de leitos contendo este tipo de partículas, o que sugere problemas na inicialização de fluxo sob ação da gravidade. Entretanto, estas mesmas amostras apresentaram melhorias na sua movimentação por agentes mecânicos (lâminas, agitadores) e por aeração (fluidização, transporte pneumático). Já as amostras do grupo 2 apresentaram pequenas alterações nestas mesmas características.

O exposto enfatiza a necessidade em se adotar as diretrizes que melhor representam as condições reais que o material particulado será submetido, pois materiais pulverulentos possuem propriedades específicas e individuais que dizem respeito à natureza das partículas constituintes, e das características do meio em que o material se encontra; assim, qualquer alteração designa a estes materiais uma taxa de escoamento esporádica.

## AGRADECIMENTOS

Ao Centro Universitário FEI pelo suporte financeiro ao desenvolvimento do trabalho

## REFERÊNCIAS

- ANEPAC. Areia. São Paulo. 2016. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/agregados/areia-e-brita/item/136-areia>> Acesso em Fevereiro de 2018.
- CAMPOS, M. M. Análise da Escoabilidade de Pós. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.
- COELHO, M. C. Tecnologia de pós: Notas de aula do Curso de Especialização em Farmacotecnia Avançada. Lisboa: Faculdade de Farmácia da Universidade de Lisboa 2007. Disponível em: <[http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/810/1/Tecnologia%20de%20P%C3%B3s%20\(2\).pdf](http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/810/1/Tecnologia%20de%20P%C3%B3s%20(2).pdf)> Acesso em Fevereiro de 2018.
- DIAS, E.; SANTOS, M.; GOTO, M.; OLIVEIRA, M.; SATO, P.; TOMASELLI, B.; RAMOS, A. Mineração, geologia e meio ambiente: Impactos sociais e econômicos da regulamentação Conama sobre intervenção em área de preservação permanente sobre o setor de agregados e argilas. Relatório Técnico MULTIGEO - RT06011. FIESP. 2006.
- FELICETTI, M. Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos aplicando a Técnica Centrífuga. 2008. 261 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. 2008.
- JILIANG, M. XIAOPING, C. DAOYIN, L. Minimum fluidization velocity of particles with wide size distribution at high temperatures. **Powder Technology**, v. 235, p. 271-278. 2013.
- FREEMAN, R.; COOKE, J. Understanding powder behavior by measuring bulk, flow and shear properties, **Pharmaceutical Technology Europe**, v. 18, n. 9, 2006.
- FREEMAN TECHNOLOGY, FT-4 Powder Rheometer User's Manual, 2008.
- MARQUES, S. Projeto sistema de captação de pó. Minas Gerais, 2012. 94 f. Monografia (MBA em Gerenciamento de Projetos, Programas e Portifólios) – Faculdade de Ciências Aplicadas de Minas, Uberlândia, MG, 2012.
- PAPINI, C. Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho de partícula. 2003. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, 2003.
- PODCZECK, F., NEWTON, J.M. JAMES, M.B. Assessment of adhesion and autoadhesion forces between particles and surfaces. Part II. The investigation of adhesion phenomena of salmeterol xinafoate and lactose monohydrate particles in particle-on-particle and particle-on-surface contact. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 9, n. 4, p. 475-486. 1995.
- BIOMANIA. Quartzo Disponível em: <<https://biomania.com.br/artigo/quartzo>> Acesso em Fevereiro de 2018.
- RHODES, M. Introduction to particle technology, 2ª ed., John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- SANTOS, C. M., CONDOTTA, R. Avaliação do efeito da distribuição granulométrica nas propriedades de escoamento de materiais granulares. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014, Florianópolis, Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis. 2014.
- SCHULZE, D. Flow Properties of powders and bulk solids. Wolfenbutter: 2011. Disponível em <<http://www.dietmar-schulze.de/grd1.pdf>> Acesso em: Fevereiro de 2018.
- U.S. Pharmacopeia. USP29-NF24, pg 3017. In: Pharmacopeial Forum, vol. 28, n. 2, pg 618. 2006.
- WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. Bulk Solids Handling: an introduction do the practice and technology. Glasgow, Leonard Hill, 1987.
- ZENG; MARTIN; MARRIOT. Particulate Interactions in Dry Powder Formulations for Inhalation. Taylor & Francis. London and New York, 2003.