

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

WESLEI MONTEIRO AMBRÓS

**NOVOS ASPECTOS DA ESTRATIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS EM JIGUES
DESCONTÍNUOS**

PORTO ALEGRE

2017

WESLEI MONTEIRO AMBRÓS

**NOVOS ASPECTOS DA ESTRATIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS EM JIGUES
DESCONTÍNUOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio

PORTO ALEGRE

2017

WESLEI MONTEIRO AMBRÓS

**NOVOS ASPECTOS DA ESTRATIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS EM JIGUES
DESCONTÍNUOS**

Esta tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia - Área de Concentração Tecnologia Mineral Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharias de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio (Orientador)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann (coordenador do PPGE3M/UFRGS)

Aprovada em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Régis Sebben Paranhos

Prof. Dra. Rejane Candiota Tubino

Prof. Dr. Paulo Nunes Conceição

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Dr. Ing. Carlos Hoffmann Sampaio pelo inestimável grau de suporte, orientação, confiança e liberdade oferecidos, os quais foram essenciais na realização deste estudo. Do mesmo modo, agradeço à todos(as) os(as) pesquisadores e colegas do LAPROM que auxiliaram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho. Ter a oportunidade de vivenciar anos de aprendizagem em um ambiente tão agradável e qualificado é um privilégio que jamais será esquecido.

Agradeço também à equipe do laboratório GPEM-IFSTTAR pelo acolhimento, infraestrutura e expertise de seus membros disponibilizados no auxílio ao presente trabalho. Dedico um agradecimento especial ao Dr. Bogdan Cazacliu pela hospitalidade e pela valiosa instrução científica.

À CAPES, pelo suporte financeiro oferecido ao longo da pesquisa.

Agradeço aos meus pais pelo apoio fundamental e incondicional, à minha namorada pelo constante incentivo, e a todos àqueles que contribuíram de alguma forma na execução deste trabalho.

Por fim, agradeço Àquele por meio do qual todo trabalho se torna possível.

“Uma resposta aproximada para o problema certo vale muito mais do que uma resposta exata para um problema aproximado.”

(John W. Tukey)

RESUMO

O presente estudo visa dar luz sobre fenômenos ainda pouco explorados que ocorrem durante a estratificação em leitos de jigagem, bem como sobre novas possibilidades de aplicação da técnica. Por meio de testes com misturas de agregados em jigues hidráulico e pneumático descontínuos, foi pela primeira vez examinada a ocorrência de convecção granular em jigues. Os fatores envolvidos em sua formação e a influência sobre a estratificação foram analisados em detalhes. Do mesmo modo, foi examinada a influência da granulometria do leito sobre a estratificação em jigues pneumáticos e a possibilidade de uso do mesmo como um equipamento multi-separador. Os resultados revelam a existência de um fluxo ordenado e estacionário de partículas durante a pulsação do leito, ascendente na porção central e descendente nas bordas do jigue, de modo similar ao fluxo convectivo descritos na literatura para leitos vibrados mecanicamente. Este fluxo convectivo gerou uma distorção no rearranjo do leito estratificado, dando origem a um perfil horizontal de estratificação no qual as partículas leves se concentraram nas bordas e as partículas densas se concentraram preferencialmente na zona central dos estratos. Com base nos resultados, um mecanismo de formação do fluxo convectivo e um modelo preditivo do rearranjo do leito foram propostos. Observou-se também que a diminuição da granulometria e o aumento da distribuição de tamanho dos constituintes do leito teve um efeito positivo sobre a estratificação. Os resultados sugerem que isto pode estar em parte relacionado a maior compactação do leito quando da presença de partículas de menor tamanho. Também, resultados experimentais demonstraram a possibilidade de uso do jigue pneumático para realizar a operação conjunta de separação de materiais rochosos e não rochosos em um único estágio. O desempenho global na remoção de contaminantes não-rochosos foi similar ao de separadores pneumáticos e sistemas de "sorting" automático descritos na literatura. Ainda, a quantidade inicial de contaminantes no sistema teve um efeito desprezível sobre o desempenho. Os resultados obtidos, em particular aqueles relacionados à convecção granular, fornecem novas perspectivas a respeito dos fenômenos envolvidos na estratificação em jigues. Ainda, benefícios práticos podem ser extraídos a partir dos resultados da análise do efeito da granulometria sobre a estratificação e do uso de jigues pneumáticos como multi-separadores.

Palavras-chave: **Jigues. Estratificação. Convecção granular. Granulometria. Multi-separador.**

ABSTRACT

This study aims to shed some light on some unclear phenomena that occurs during particle stratification in jigs as well as on new possibilities of application of jiggling technique. For the first time, the occurrence of granular convection in jiggling beds was analyzed by considering the case of hydraulic and pneumatic jigs operating with mixtures of aggregates. The elements involved in the pattern formation and its influence on bed stratification were analyzed in detail. The influence of particle size distribution on bed stratification and the possibility of using pneumatic jiggling as a multi-separator were also examined. The experimental results reveal the existence of a steady, ordered flow of particles over bed pulsation, in which particles move upward in the center of the jig bed and downward along the walls of the jig container, similarly to the circulation patterns reported in the literature. The convection gave rise to a distortion in the particle rearrangement, engendering the formation of a horizontal stratification profile in which light particles tended to be concentrated along the walls while dense particles tended to be concentrated preferentially in the center portion of the strata. On the basis of the experimental results, a mechanism of pattern formation and a prediction model were proposed. The results also revealed that the decrease of the particle size and the increase in the particle size distribution had a positive influence on stratification extent. It was suggested by the results that this behavior can be related to the higher bed compaction due to the presence of smaller particles in the bed. Also, experimental results indicated the technical feasibility of the combined use of pneumatic jiggling for the removal undesired non-stony materials together with the bed stratification in only one single stage. The reported separation efficiency in the removal of low-density materials was comparable to those of air classifiers and automatic sorting systems. Also, the initial content of contaminants seemed to have a negligible effect on the separation performance. The results obtained, in particular those related to the granular convection, provides new perspectives about the phenomena involved in stratification by jiggling. Moreover, practical benefits can be obtained from the results about the influence of particle size on bed stratification and about the usage of pneumatic jiggling for multi-separation.

Keywords: Jigs. Stratification. Granular convection. Particle size. Multi-separator.

AMBRÓS, Wesley Monteiro. **Novos aspectos da estratificação de partículas em jiges descontínuos**. 2017. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Jigues de pulsação manual usados no beneficiamento de minérios de cobre e estanho.....	12
Figura 2: Esquema básico de funcionamento de jigues.	13
Figura 3: Esquema de operação do jigue Baum (a) e do jigue pneumático (b).....	15
Figura 4: Esquema de funcionamento do jigue reverso	16
Figura 5: (a) Velocidade e (b) deslocamento do leito de jigagem ao longo de um ciclo de pulsação.....	22
Figura 6: Movimentação do leito de jigagem ao longo de um ciclo de pulsação.	23
Figura 7: Forças atuantes sobre uma partícula esférica isolada em um fluido.	25
Figura 8: Variação do coeficiente de arraste em função do regime de escoamento	27
Figura 9: Ação individual e combinada dos mecanismos de segregação em jigues de acordo com a teoria hidrodinâmica.	34
Figura 10: Posição do centro de gravidade em uma mistura binária de partículas com diferentes densidades.....	36
Figura 11: Segregação de partículas de intrusos com diferentes propriedades em relação ao leito que as contém.....	37
Figura 12: Mudança de energia potencial quando uma partícula densa muda sua posição no leito.	39
Figura 13: Perfis de estratificação em jigue contínuo de duplo estágio.....	43
Figura 14: Diferentes perfis de estratificação decorrentes da variação da razão de tamanho entre as partículas constituintes do sistema.....	48
Figura 15: Simulação do fluxo convectivo em mistura de partículas esféricas de vidro de 5 a 10 mm	56
Figura 16: Perfil de segregação horizontal de misturas de esferas de (a) vidro e (b) aço para diferentes espessuras de leito.....	59
Figura 17: Fluxograma do procedimento experimental geral adotado ao longo dos testes.....	62
Figura 18: Jigue pneumático modelo AllAir® S-500	65
Figura 19: Estimativa da velocidade e vazão máxima da corrente de ar.....	66
Figura 20: Jigue hidráulico modelo AllJig® S-400.....	68

Figura 21: Procedimento geral de dosagem e carregamento dos jigues antes dos ensaios de estratificação para o caso de misturas ternárias equivolúmetricas	69
Figura 22: Extração e análise da composição dos produtos de jigagem	72
Figura 23: Padrões de segregação horizontal em camadas dos jigues após ensaios de estratificação	73
Figura 24: (a) Configuração inicial do leito no ensaio no jigue hidráulico. (b) Configuração inicial do leito no ensaio no jigue pneumático.	75
Figura 25: (a) Deslocamento diferencial do leito na zona central da parede e nas arestas. (b) Curva ilustrativa do deslocamento ao longo do tempo.	77
Figura 26: Análise do movimento vertical do leito usando o software Tracker	78
Figura 27: Configuração dos testes e zonas de amostragem do leito estratificado.	80
Figura 28: Análise da contaminação intercamadas relacionado à extração dos produtos do jigue.	82
Figura 29: Proporção volumétrica de cada intervalo de granulometria presente nas misturas M1, M2 e M3.	83
Figura 30: Configuração do leito utilizada nos ensaios.	87
Figura 31: Evolução da estratificação em leito reverso de misturas binárias no jigue hidráulico.	89
Figura 32: Perfil de estratificação médio das misturas binárias de brita e material cerâmico para as cinco condições operacionais utilizadas.	89
Figura 33: Evolução do processo de elevação de partículas de gesso através de camada uniforme de concreto.	91
Figura 34: Forma assumida pelo estrato de concreto após jigagem de mistura binária contendo concreto e gesso.	91
Figura 35: Imagens do deslocamento horizontal do traçador lilás (a) e verde (b) mediante ampliação de um dos quadrantes da superfície do leito	92
Figura 36: (a) deslocamento vertical e (b) velocidade do leito na zona central e nas arestas para as três frequências de pulsação usadas nos testes.	95
Figura 37: Desvio padrão percentual das medidas de deslocamento vertical do leito para (a) 60 CPM, (b) 90 CPM e (c) 120 CPM.	97
Figura 38: Número total de aparições dos traçadores na superfície do leito e estimativa da velocidade média de convecção em função da frequência de pulsação aplicada.	99

Figura 39: Fração volumétrica dos componentes em cada uma das zonas de amostragem ao longo dos três tempos de jigagem.....	100
Figura 40: Correlação entre resultados experimentais e estimativas da fração volumétrica obtidas por meio de extrapolação linear	102
Figura 41: Compacidade local calculada para cada zona de amostragem ao longo dos tempos de jigagem considerados	103
Figura 42: Comparação entre segregação vertical e horizontal conforme observado nos ensaios.	105
Figura 43: Rearranjo do leito conforme o modelo.....	108
Figura 44: Correlação entre os dados experimentais e as predições do modelo para cada tempo de jigagem	110
Figura 45: Evolução do índice de mistura I_{mix} longo do tempo de jigagem.....	111
Figura 46: Correlação entre dados experimentais e numéricos para $t = 120$ s.	112
Figura 47: Imagens do leito do jigue antes e após a estratificação para $t = 120$ s.	114
Figura 48: Mecanismo proposto de formação do fluxo convectivo em jigues.....	115
Figura 49: Ilustração do desenvolvimento do perfil de estratificação segundo o mecanismo de convecção proposto	117
Figura 50: Índice e perfis de estratificação relativos aos ensaios realizados com leitos formados por diferentes classes de tamanho.	121
Figura 51: Índice e perfis de estratificação relativos aos ensaios realizados com leitos formados por diferentes faixas de tamanho	122
Figura 52: Perfil de distribuição dos componentes da mistura M1 após a estratificação	123
Figura 53: Perfil de distribuição do (a) gesso, (b) material cerâmico e (c) brita contidos na mistura M2 após a estratificação.....	124
Figura 54: Perfil de distribuição do (a) gesso, (b) material cerâmico e (c) brita contidos na mistura M3 após a estratificação.....	125
Figura 55: Composição mássica das camadas de base (a) e de topo (b) em função do aumento da proporção de miúdos leves no sistema.	127
Figura 56: Composição mássica da fração grosseira nas camadas de base (a) e de topo (b) em função do aumento da proporção de miúdos leves no sistema.	128
Figura 57: Recuperação mássica de (a) brita na camada de base e (b) gesso na camada de topo, juntamente com a fração mássica de material miúdo (em relação ao total presente na mistura) que reportou em cada um dos estratos.	128

Figura 58: Comparação da variação da compactação da camada de base do leito em função da classe e da faixa de tamanhos de partícula componentes do sistema com o índice de estratificação.	129
Figura 59: Variação da compactação em função da razão entre o diâmetro das partículas do sistema ($d_p = 30$ mm) e a largura do container (D).	130
Figura 60: Evolução do processo de classificação no jigue pneumático. A sequência de imagens corresponde ao ensaio com 4,6% de impurezas.	134
Figura 61: Vista superior dos estratos após o ensaio com 9% de impurezas.	135
Figura 62: Composição mássica global e de cada estrato após separação em jigue pneumático de misturas contendo diferentes níveis de contaminação com material rochoso e não rochoso.	136
Figura 63: Variação do teor e recuperação do concreto em função do grau inicial de contaminação e da quantidade de produto coletada (1 ou 2 estratos).	137
Figura 64: Comparação entre o grau médio de remoção de contaminantes do concreto no produto do estrato 1 e dos estratos 1 e 2.	138
Figura 65: Efeito da variação dos parâmetros operacionais. (a) Fluxo de ar reduzido para 70%. (b) Frequência de pulsação reduzida para 140 CPM.	140
Figura 66: Perfis de distribuição do gesso (a) e do material cerâmico (b) após a separação no jigue.	141
Figura 67: Influência do grau de contaminação adicional sobre o teor de gesso (a) e material cerâmico (b) em cada estrato.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Razões de sedimentação livre e retardada no regime de Newton ($q = 1$) para misturas binárias de carvão e ardósia betuminosa.	31
Tabela 2: Densidade das amostras medidas em picnômetro à água e desvio-padrão relativo a três medições consecutivas para cada material.	64
Tabela 3: Configurações aplicadas na câmera para coleta de vídeos e imagens dos ensaios.	71
Tabela 4: Resultados das análises relativas ao erro de extração. (a) Configuração típica. (b) Uso de camadas intermediárias.	82
Tabela 5: Quantidade de materiais utilizados na preparação das misturas ternárias equivolúmetricas usadas nos ensaios.	84
Tabela 6: Quantidade de miúdos leves adicionados à mistura M1.	84
Tabela 7: Composição das misturas preparadas.	86

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ROM - *run-of-mine* (minério que vem diretamente da mina).

RCD - resíduo de construção e demolição.

RPM - rotações por minuto.

CPM - ciclos por minuto.

BNP - *brazil nutt effect* (efeito castanha do Pará).

RBNP - *reverse brazil nutt effect* (efeito castanha do Pará inverso).

TC - Topo-centro.

MC - Meio-centro.

BC - Base-centro.

TP - Topo-parede.

MP - Meio-parede.

BP - Base-parede.

CO - Compacidade.

M1 - Mistura 1 (granulometria de 19,1 - 12,7 mm).

M2 - Mistura 2 (granulometria de 12,7 - 8 mm).

M3 - Mistura 3 (granulometria de 8 - 4,75 mm).

LISTA DE SÍMBOLOS

- α - Ângulo de intercessão dos vértices de cada estrato (graus)
- $\sigma_{experimental}$ - Variância da concentração obtida experimentalmente (adimensional)
- σ_{ideal} - Variância da concentração para a estratificação ideal (adimensional)
- ρ_f - Densidade do fluido (kg/m³)
- ρ_s - Densidade da partícula (kg/m³)
- ρ_l - Densidade da partícula do componente leve (kg/m³)
- ρ_d - Densidade da partícula do componente denso (kg/m³)
- ρ_a - Densidade da polpa (kg/m³)
- $\bar{\rho}$ - Densidade média do leito na altura H (kg/m³)
- ρ_C - Densidade do concreto (kg/m³)
- ρ_B - Densidade do material cerâmico (kg/m³)
- ρ_G - Densidade do gesso (kg/m³)
- $(-\Delta p)$ - Queda de pressão no leito (Pa)
- Δs - Rebaixamento do centro de gravidade do leito (m)
- ΔE - Rebaixamento da energia potencial do leito (J)
- $\overline{\Delta y}$ - Diferença média de deslocamento entre o centro e as arestas (mm)
- ε - Porosidade (adimensional)
- Γ - Aceleração vibracional (adimensional)
- ω - Frequência angular (rad/s)
- μ - Viscosidade dinâmica (Pa.s)
- Φ - Fração volumétrica de sólidos na polpa (adimensional)
- ζ - Fator de forma cinemático (adimensional)
- A - Amplitude de pulsação (mm)
- A_p - Área superficial da partícula (mm²)
- B - Largura do compartimento do jigge/base maior dos estratos (mm)
- b_i - Base menor dos estratos i (mm)

CC - Critério de concentração (adimensional)

C_ρ - Concentração volumétrica média de partículas com densidade ρ (m^3/m^3 total)

C_D - Coeficiente de arraste (adimensional)

D - Coeficiente de difusão (m^2/s)

d_p - Diâmetro de partícula (mm)

d_l - Diâmetro de partícula do componente leve (mm)

d_d - Diâmetro de partícula do componente denso (mm)

E - Energia potencial (J)

E_I - Energia potencial do leito no estado misturado (J)

E_{II} - Energia potencial do leito no estado estratificado (J)

f - Frequência de pulsação (CPM)

F_a - Força de arraste (N)

F_e - Força de empuxo (N)

F_g - Força gravitacional (N)

g - Aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$)

H - Altura do leito (mm)

h_i - Altura do estrato i (mm)

H_l - Espessura da camada de componente leve (m)

H_d - Espessura da camada de componente denso (m)

I_E - Índice de estratificação (adimensional)

I_{mix} - Índice de mistura (adimensional)

K - Número de componentes no sistema (mm)

k - Constante de evolução da estratificação (adimensional)

K_w - Constante que caracteriza os distúrbios de empacotamento (adimensional)

L - Espessura do leito (mm)

m_p - Massa de partícula (kg)

m_l - Massa de partícula do componente leve (kg)

m_d - Massa de partícula do componente denso (kg)

m_C - Massa de concreto (kg)

m_B - Massa de material cerâmico (kg)

m_G - Massa de gesso (kg)

n - Número de estratos de amostragem (mm)

n_E - Fluxo de estratificação (kg/m².s)

n_D - Fluxo difusivo (kg/m².s)

P_i - Proporção do componente i no sistema (adimensional)

$Q_{mín}$ - Fluxo mínimo de fluidização (m³/s)

q - Quociente da razão de sedimentação (adimensional)

R - Recuperação do componente leve ou denso (adimensional)

Re - Número de Reynolds (adimensional)

S - Área da seção transversal do leito (m²)

S_I - Centro de gravidade do leito misturado (m)

S_{II} - Centro de gravidade do leito estratificado (m)

S_l - Centro de gravidade da camada de material leve (m)

S_d - Centro de gravidade da camada de material denso (m)

t - Tempo de pulsação (s)

U_f - Velocidade relativa do fluido (m/s)

$U_{f,mín}$ - Velocidade mínima de fluidização (m/s)

U_∞ - Velocidade terminal da partícula (m/s)

u - Velocidade de penetração da partícula (m/s)

V_p - Volume de partícula (mm³)

V_T - Volume total da zona de amostragem (mm³)

V_w - Volume no qual ocorre distúrbios de empacotamento (m³)

$\bar{v}_{convecção}$ - Velocidade média de convecção (mm/s)

x - Módulo da dimensão horizontal do leito (mm)

$x_{estrato}$ - Massa ou volume total de partículas no estrato (kg ou m³)

$x_{i,estrato}$ - Massa ou volume total de partículas no estrato (kg ou m³)

$x_{i,total}$ - Massa ou volume total de partículas do componente i no sistema (kg ou m³)

\bar{X}_i - Concentração média do componente i no sistema (adimensional)

w - Distância da parede a partir da qual ocorrem distúrbios de empacotamento (mm)

y - Deslocamento vertical do leito (mm)

$y_{centro,t}$ - Deslocamento da zona central no tempo t (mm)

$y_{esquerda,t}$ - Deslocamento da aresta esquerda no tempo t (mm)

$y_{direita,t}$ - Deslocamento da aresta direita no tempo t (mm)

$\bar{y}_{aresta,t}$ - Deslocamento médio das arestas no tempo t (mm)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 JUSTIFICATIVA.....	8
1.2 OBJETIVOS	9
1.2.1 Objetivo geral.....	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 ESTRUTURA DA TESE	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 JIGAGEM.....	11
2.1.1 Características gerais	11
2.1.2 Aplicações.....	17
2.1.3 Aplicação potencial: multi-separador pneumático.....	18
2.2 PRINCÍPIOS DA SEPARAÇÃO EM JIGUES	20
2.2.1 Pulsação do leito de jigagem	20
2.2.2 Estratificação do leito de jigagem	24
2.3 FATORES QUE AFETAM A ESTRATIFICAÇÃO EM JIGUES DESCONTÍNUOS	45
2.3.1 Densidade de partícula	45
2.3.2 Tamanho de partícula	47
2.3.3 Formato de partícula.....	49
2.3.4 Amplitude e frequência de pulsações	50
2.3.5 Número de ciclos de jigagem.....	51
2.3.6 Outros fatores	51
2.4 CONVECÇÃO GRANULAR	52
2.4.1 Conceitos gerais	52
2.4.2 Convecção e segregação	56
2.4.3 Convecção granular e jigagem	59

3. MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1 AMOSTRAS	63
3.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS	63
3.3 ENSAIOS DE JIGAGEM	64
3.3.1 Jigue pneumático	64
3.3.2 Jigue hidráulico	67
3.3.3 Ensaio de estratificação	68
3.3.4 Análise dos resultados	72
3.4 INVESTIGAÇÃO DA CONVECÇÃO GRANULAR EM JIGUES	73
3.4.1 Observação de padrões convectivos	74
3.4.2 Influência das condições operacionais na convecção	76
3.4.3 Influência da convecção sobre a estratificação	79
3.6 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO LEITO	80
3.6.1 Minimização do erro experimental	81
3.6.2 Ensaio de estratificação	82
3.6.3 Análise da precisão de estratificação	84
3.7 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MULTI-SEPARAÇÃO EM JIGUES	85
4. CONVECÇÃO GRANULAR E ESTRATIFICAÇÃO EM JIGUES	88
4.1 PADRÕES CONVECTIVOS	88
4.2 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS	94
4.3 INFLUÊNCIA DA CONVECÇÃO SOBRE A ESTRATIFICAÇÃO	99
4.3.1 Perfis de estratificação	99
4.3.2 Comparação entre segregação vertical e horizontal	105
4.3.3 Modelo de estratificação	107
4.3.4 Mecanismo de formação de fluxos convectivos	113
4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS	118
5. EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE A ESTRATIFICAÇÃO A SECO	120

5.1 VARIAÇÃO DA CLASSE DE TAMANHO DO LEITO	120
5.2 VARIAÇÃO DA FAIXA DE TAMANHO DO LEITO	121
5.3 EFEITO DA INSERÇÃO DE MIÚDOS LEVES	126
5.4 GRANULOMETRIA E COMPACIDADE	129
5.5 CONCLUSÕES PARCIAIS	131
6. USO DE JIGUES COMO MULTI-SEPARADORES PNEUMÁTICOS	133
6.1 EVOLUÇÃO GERAL DA ESTRATIFICAÇÃO	133
6.2 PERFIS DE ESTRATIFICAÇÃO	135
6.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS	138
6.4 PERFIS DE DISTRIBUIÇÃO	140
6.5 ASPECTOS TECNOLÓGICOS GERAIS	142
6.6 CONCLUSÕES PARCIAIS	144
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
7.1 CONCLUSÕES	145
7.2 ESTUDOS COMPLEMENTARES E FUTUROS	146
REFERÊNCIAS	149
APÊNDICE 1	161
APÊNDICE 2	163
APÊNDICE 3	165

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

É possível afirmar, sem receio de exagero, que qualquer material particulado que possua uma diferença significativa de densidade entre seus constituintes (o que pressupõe um grau de liberação adequado dos mesmos) é passível de ser separado, até certo grau, em um dos diversos modelos de jigues existentes, bastando apenas que a granulometria do material esteja dentro da faixa de operação do equipamento em questão.

De fato, em sua história recente, o método de jigagem ultrapassou as fronteiras do processamento mineral, sendo aplicado em atividades tão variadas quanto a reciclagem de plásticos (TSUNEKAWA et al., 2012) e a fabricação de goma de mascar (TURNER, 1991). Esta versatilidade pode ser em parte atribuída à variedade de fenômenos envolvidos na estratificação de partículas em leitos pulsantes, os quais permitem realizar separações em um largo espectro de densidades, tamanhos e formas de partículas. Todavia, a despeito da natureza complexa dos mecanismos por trás da estratificação em jigues, predomina atualmente uma escassez de estudos profundos no tema, em contraste com as importantes contribuições obtidas no século passado, as quais deram origem às duas principais abordagens teóricas usadas atualmente na jigagem: a teoria fluidodinâmica (GAUDIN, 1939) e a teoria da energia potencial (MAYER, 1950, 1964), de caráter termodinâmico.

Entretanto, a crescente pressão por melhor desempenho operacional aliada a restrições ambientais cada vez mais severas constitui um cenário propício ao desenvolvimento de inovações que possam trazer benefícios à aplicação de jigues. Sinal disso é a gradual retomada de interesse pela utilização de jigues pneumáticos, especialmente devido as vantagens inerentes à eliminação de água no processamento. Porém, a menor eficiência destes jigues em comparação aos modelos hidráulicos demanda o desenvolvimento de melhorias a fim de aumentar sua competitividade. Estas melhorias, todavia, exigem obrigatoriamente um entendimento mais completo dos mecanismos envolvidos no processo de estratificação que ocorre em leitos de jigues.

Neste âmbito, o presente estudo se coloca como uma tentativa de dar luz sobre fenômenos pouco explorados na jigagem, bem como sobre novas possibilidades de aplicações de jigues. Devido a sua crescente importância, aliada a carência de estudos no tópico, foi dado um foco especial ao tema da jigagem à seco. Ainda, o estudo se limitou a análise da jigagem em equipamentos operando descontinuamente. Todavia, como será possível verificar, a maior parte dos resultados obtidos são potencialmente úteis mesmo para jigues operando sob condições distintas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar, separadamente, a influência sobre a separação de misturas de agregados contidas em jigues descontínuos de três aspectos latentes envolvidos na estratificação em leitos de jigagem: a ocorrência de convecção granular, a separação à seco em diferentes faixas granulométricas e o potencial de uso do jigue pneumático como um dispositivo multi-separador.

1.2.2 Objetivos específicos

No âmbito do objetivo geral supramencionado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar a ocorrência e verificar a influência de parâmetros operacionais de jigues sobre o fenômeno de convecção granular;
- b) Analisar o efeito da convecção granular sobre a estratificação de partículas em jigues descontínuos em conjunto com a influência do tempo de jigagem;
- c) Propor um mecanismo que descreva a influência da convecção granular sobre o perfil de estratificação final do leito;

- d) Analisar a influência da variação da composição granulométrica do leito sobre o perfil de estratificação final em jigue pneumático descontínuo;
- e) Verificar a viabilidade de emprego da jigagem pneumática na separação conjunta e em estágio único de misturas contendo componentes rochosos e não rochosos.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Capítulo 1 - *Introdução*. Apresenta o contexto geral, as principais motivações e os objetivos estabelecidos no desenvolvimento do estudo.

Capítulo 2 - *Revisão bibliográfica*. Aborda o estado da arte da tecnologia de jigagem, suas aplicações, principais modelos teóricos e a influência de propriedades sobre a estratificação do sistema, com foco particular na operação descontínua.

Capítulo 3 - *Materiais e Métodos*. Detalha o procedimento geral adotado ao longo dos testes, bem como os equipamentos e materiais utilizados.

Capítulo 4 - *Convecção granular e estratificação em jigsawes*. Apresenta os resultados de identificação da ocorrência de correntes convectivas em leitos de jigues, sua dependência em relação aos parâmetros operacionais e sua influência sobre a estratificação por densidade de misturas ternárias de agregados.

Capítulo 5 - *Efeito da granulometria sobre a estratificação à seco*. Compara os resultados obtidos em ensaios realizados com misturas de agregados contendo diferentes distribuições granulométricas e examina as possíveis razões responsáveis pelas diferenças observadas no grau de estratificação do sistema.

Capítulo 6 - *Uso de jigues como multi-separadores pneumáticos*. Avalia a viabilidade técnica de emprego de jigues pneumáticos para separar, em uma única etapa, materiais rochosos de não-rochosos enquanto paralelamente realiza a estratificação do leito contendo o material rochoso.

Capítulo 7 - *Considerações finais*. Recapitula as principais contribuições do trabalho e descreve possíveis estudos suplementares a respeito do temas abordados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 JIGAGEM

2.1.1 Características gerais

O uso de técnicas que exploram diferenças de densidade, tamanho e forma entre constituintes de minérios visando a sua separação remontam, presumivelmente, à Antiguidade Clássica (HABASHI, 2006). Desde então, estes métodos de *concentração gravimétrica* ou gravítica permanecem entre os mais amplamente utilizados nos processos de beneficiamento mineral, a despeito da contínua introdução de novas técnicas (WILLS, 2006). O propósito de qualquer método de concentração gravimétrica consiste em criar condições nas quais partículas com diferentes densidades, tamanhos e formas possam mover-se de forma relativa umas as outras quando sob a ação de um campo de força gravitacional e/ou centrífugo, originando assim múltiplas camadas ou bandas contendo os componentes leve e denso. Quando o movimento relativo interparticular se manifesta na forma de expansões e contrações verticais de um leito provocadas por um fluido pulsante, a operação de concentração gravimétrica em questão é denominada *jigagem* (SAMPAIO; TAVARES, 2005; WILLS, 2006).

Ainda que possivelmente seja um processo tão antigo quanto à separação em calhas (LYMAN, 1992), os mais notáveis registros do uso da jigagem vieram a aparecer somente no séc. XVI, como parte da obra genuína de Agricola (1950). Nesta, a remoção descontínua de camadas estratificadas de minérios metálicos produzidas pelo repetido mergulho de um cesto perfurado em um tanque contendo água é descrita à exaustão. Tais modelos de jigues manuais mantiveram-se praticamente inalterados até o séc. XVIII (Figura 1), quando o advento da revolução industrial aumentou substancialmente a demanda por carvões e minérios. A despeito disso, jigues pulsados manualmente continuam sendo utilizados até os dias de hoje em garimpos artesanais de ouro e pedras preciosas (DDI, 2010).

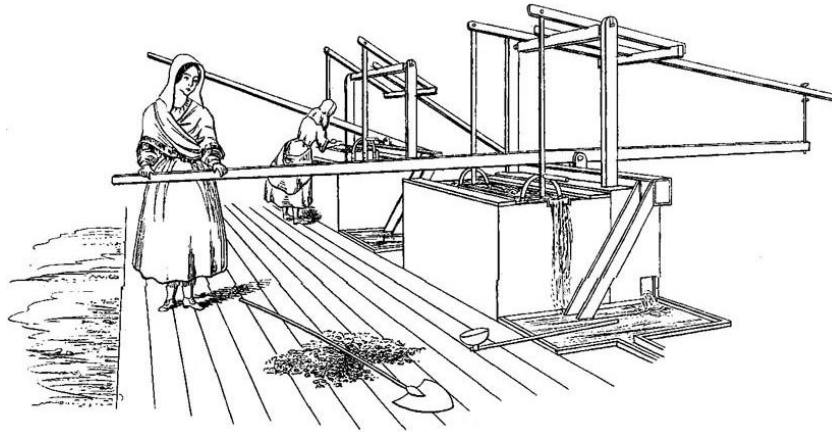


Figura 1: Jigues de pulsação manual usados no beneficiamento de minérios de cobre e estanho.
Fonte: Henderson (2016)

O surgimento de sistemas hidráulicos munidos de pistão ou êmbolo, com ou sem selos de diafragma, seria o fator decisivo que marcou a transição da pulsação manual para a pulsação mecânica (BURT, 1984), dando origem à configuração básica dos jigues modernos (Figura 2). De modo geral, o esquema básico de um jigue consiste de um recipiente dividido em dois compartimentos, sendo um deles correspondente à câmara de separação, a qual contém um crivo fixo sobre o qual as partículas de alimentação se depositam e através do qual o pulso de fluido é sucessivamente introduzido no interior da câmara. No caso de operação contínua, o crivo do jigue encontra-se levemente inclinado no sentido longitudinal a fim de permitir o escoamento da polpa na direção oposta a da alimentação, onde ocorre a extração dos produtos leve e denso. No compartimento vizinho encontra-se o mecanismo responsável pela pulsação do fluido, item cujo contínuo aprimoramento guiou o desenvolvimento da jigagem ao longo dos dois últimos séculos (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Os tipos de jigues costumeiramente utilizados no processamento mineral podem ser classificados segundo os seguintes critérios: condição do crivo, método de extração dos produtos, tipo de mecanismo gerador da pulsação e meio fluido utilizado (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Conforme supramencionado, nos jigues de crivo fixo o fluido se move através da superfície do crivo, o qual permanece imóvel no interior da câmara de separação. Alguns jigues, no entanto, realizam a pulsação através do movimento mecânico do crivo dentro de um fluido estacionário. Tais jigues de crivo móvel, menos convencionais que aqueles de crivo fixo, incluem o jigue de ROM e o jigue pressurizado (WILLS, 2006; RIAZI; GUPTA, 2015).

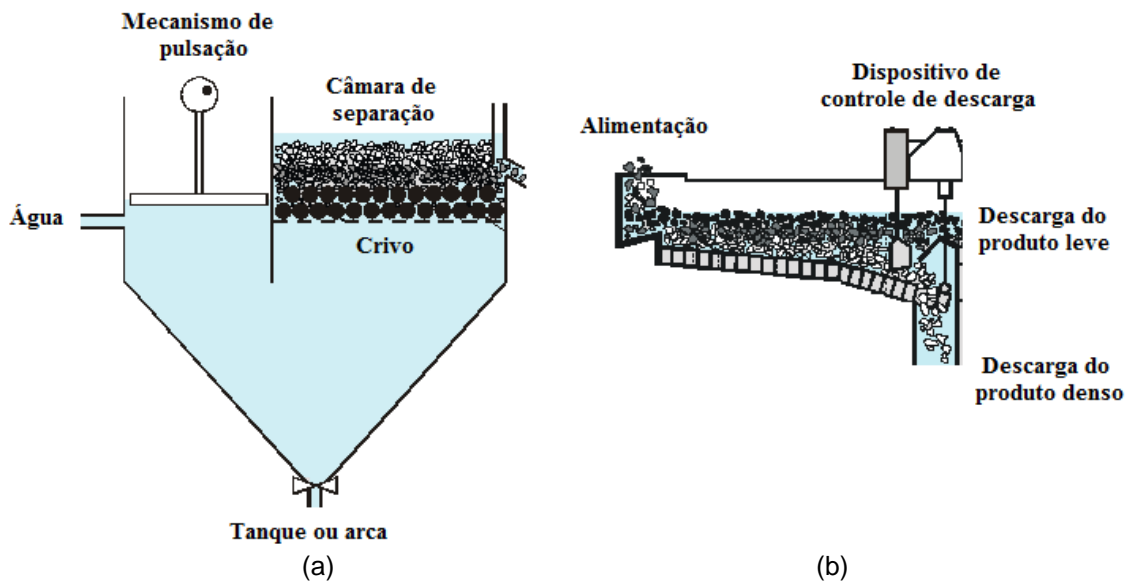


Figura 2: Esquema básico de funcionamento de jiges. (a) Vista transversal; (b) Vista longitudinal.
 Fonte: modificado de Sampaio e Tavares (2005).

Quanto à extração dos produtos, jiges podem ser divididos naqueles no qual a remoção se dá unicamente sobre o crivo e aqueles no qual partículas finas densas são removidas através do crivo. No primeiro caso, busca-se controlar o tamanho mínimo de partículas da alimentação a fim de que sejam maiores do que a abertura do crivo, embora seja esperado que uma porção das partículas finas densas possa vir a atravessá-lo e assim reportar ao fundo da arca. Diferentes sistemas de descarga são utilizados no descarregamento das partículas mais grossas, tais como barras de retenção, válvulas tipo estrela e descarga por orifício central (WEINSTEIN; SNOBY, 2007; SAMPAIO; TAVARES, 2005). Instrumentos de controle de descarga estão usualmente acoplados a estes sistemas, regulando a abertura ou rotação (no caso de válvulas) do dispositivo de descarga. A extração através do crivo é usada no beneficiamento de materiais finos, de modo que as partículas do produto denso devem possuir tamanho menor que a abertura da tela do crivo. Eventualmente, uma camada de fundo contendo material diferente do minério (como feldspato) é utilizada a fim de controlar a taxa de percolação do material fino através do crivo. Estes modelos, os quais incluem o jige Batac de finos, são denominados jiges de crivo aberto, sendo bastante utilizado no beneficiamento de carvão (SAMPALIO; TAVARES, 2005).

Em relação aos mecanismos de pulsação, os jiges se dividem entre os pulsados mecanicamente através da oscilação vertical do crivo (jiges de crivo

móvel), jígues de pistão, de diafragma e, finalmente, jígues pulsados a ar. De desenvolvimento contemporâneo aos jígues de pistão, a pulsação por diafragma (impelido pelo movimento oscilatório de um excêntrico) foi concebida visando eliminar os problemas decorrentes da vedação precária em jígues de pistão (LINS, 1998). Uma das vantagens da pulsação por diafragma em relação à de pistão é a possibilidade de fabricação de separadores mais compactos, uma vez que os diafragmas podem ser posicionados diretamente abaixo da câmara de separação do jigue, tal como ocorre nos jígues Pan-american e Bendelari (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

O uso de ar comprimido em detrimento de artefatos mecânicos na geração de pulsações surgiu ao final do século XIX, com o desenvolvimento do jigue Baum (RAO; GOURICHARAN, 2016). O fator chave para seu sucesso consiste no uso de válvulas controladas eletronicamente e de acionamento rápido para entrada e saída de ar, permitindo assim uma maior variação e controle do ciclo de jigagem em comparação aos jígues pulsados mecanicamente (SAMPAIO; TAVARES, 2005). No caso do jigue Baum, uma câmara contendo ar pressurizado encontra-se posicionada sobre um dos compartimentos em forma de U do jigue (Figura 3a). Válvulas rotativas ou de guilhotina regulam a admissão de ar dentro da arca do jigue preenchida com água, a qual ascende devido à ação do fluxo de ar, produzindo assim a elevação das partículas do leite. O acionamento de válvulas de exaustão, associado à perda de pressão devido à expansão do ar na arca resulta na despressurização do sistema, impelindo a água a retornar ao nível inicial, causando assim o colapso e subsequente compactação do leite. É comum que a seção longitudinal da arca do jigue Baum seja dividida em várias repartições ao longo da direção do transporte do leite, cada qual contendo um controle independente do ciclo de jigagem. Visto que cada uma destas repartições caracteriza um jigue individual, mesmo um único jigue Baum industrial pode ser considerado como um sistema de separação em múltiplos estágios.

Entretanto, o recipiente em forma de U do jigue Baum torna difícil manter uma distribuição uniforme da pulsação ao longo do leite, particularmente para equipamentos de grande largura (WILLS, 2006). Assim, foi proposto um modelo alternativo de jigue no qual a injeção de ar ocorre através de múltiplas câmaras de ar posicionadas abaixo do compartimento que contém o leite, de forma semelhante ao que ocorre em jígues de diafragma. Com base nesse princípio, os jígues

denominados TACUB e Batac foram desenvolvidos (CHEN, 1980). Nestes equipamentos, sistemas de regulação eletrônica permitem variar o tempo de abertura e fechamento de válvulas em escalas de milissegundos, garantindo assim um ajuste fino dos parâmetros de pulsação. Ainda, a inexistência de compartimento lateral permite a construção de sistemas mais compactos, melhorando o uso de área útil em usinas e aumentando a capacidade unitária de processamento.

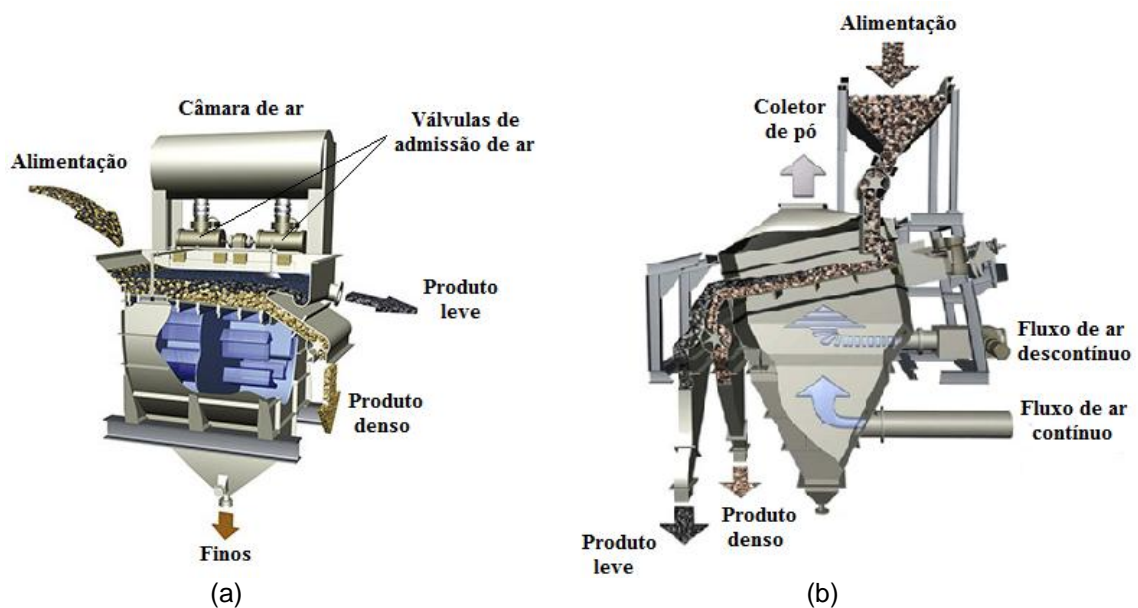


Figura 3: Esquema de operação do jigge Baum (a) e do jigge pneumático (b).
Fonte: AllMineral, 2017

O início do século XX foi marcado pela introdução e desenvolvimento dos primeiros jigues pneumáticos para aplicação em plantas de beneficiamento à seco de carvões (WEINSTEIN; SNOBY, 2007). A principal vantagem no uso da jigagem pneumática consiste na completa eliminação da água de processo, evitando assim custos relacionados à filtração e secagem dos produtos, bem como no tratamento e recirculação de água na usina. Contudo, devido à densidade insignificante do ar comparada à da água, uma precisão de separação adequada exige um controle mais rígido das características do leito, em especial da faixa granulométrica da alimentação. Durante a operação do jigge pneumático, sopradores impelem dois fluxos ascendentes distintos de ar na câmara de separação. No modelo de jigge pneumático AllAir® (ALLMINERAL, 2017) um dos fluxos é contínuo, tendo como função pré-expandir o leito e propiciar uma distribuição uniforme de ar ao longo do seu volume, reduzindo assim a formação de curtos-circuitos. O segundo fluxo,

descontínuo, promove a pulsação do leito e é regulado pela abertura de válvulas do tipo borboleta. Coletores de poeira costumam ser posicionados sobre o compartimento de separação a fim de conduzir o material fino transportado pela corrente de ar para recuperação em sistemas de filtros manga ou ciclones.

Nas últimas décadas, o surgimento de inovações no projeto e operação de jigues está estreitamente ligado ao seu emprego alternativo na reciclagem de materiais. Como exemplo, jigues híbridos (jigue RETAC[®]) nos quais bolhas de ar ascendentes são introduzidas na câmara de estratificação de forma análoga ao que ocorre na flotação, foram desenvolvidos especialmente para a separação de plásticos com densidades similares, porém com diferentes propriedades superficiais (HORI et al., 2009a, 2009b). Semelhantemente, o assim chamado *jigue reverso* (Figura 4) realiza separações de misturas de plásticos menos densos que a água baseado em um inusitado mecanismo de flutuação diferencial (ITO et al., 2010). Ainda no âmbito dos plásticos, modificações recentes na descarga de afundados do supracitado jigue RETAC[®] permitiram alcançar maiores teores do produto denso mediante sua coleta como produto *overflow* (TSUNEKAWA et al., 2012). É admirável o fato de que tais níveis de inovações em jigues tenham sido propostos em um cenário deveras distante daquele encontrado no processamento mineral.

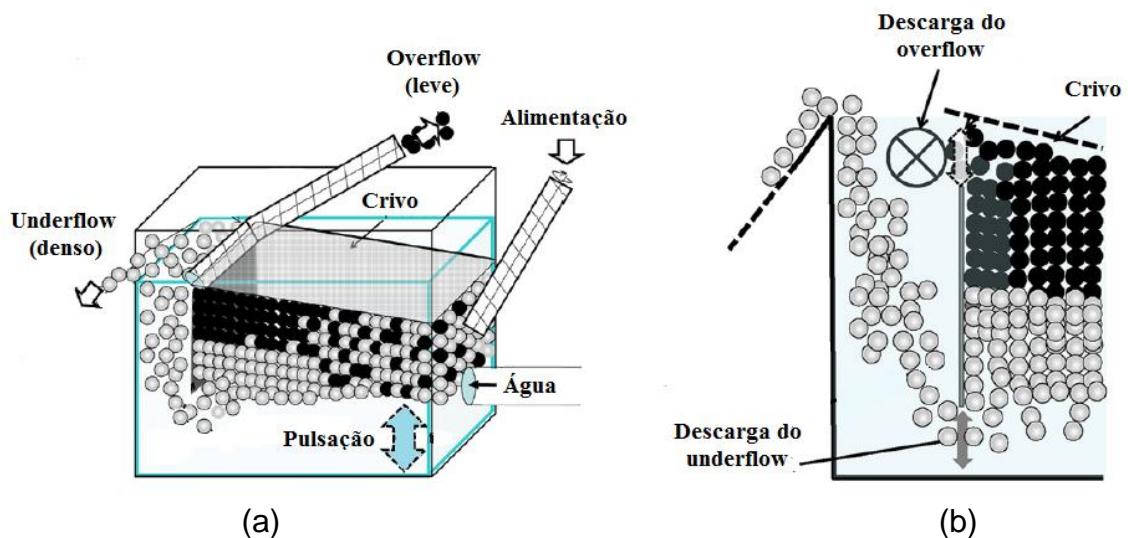


Figura 4: Esquema de funcionamento do jigue reverso. (a) Vista geral. (b) Detalhe do sistema de descarga dos produtos.

Fonte: Ito et al., 2010.

2.1.2 Aplicações

Em geral, os diferentes modelos de jiges hidráulicos encontram vasta aplicação na concentração de carvões e minérios, operando em faixas de densidades que abrangem desde o ouro (19 g/cm^3) até os macerais do carvão (densidade entre $1,3$ e $1,8 \text{ g/cm}^3$ para a vitrinita) (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Ainda que seja, por excelência, um item tradicional em plantas de processamento de carvões (RONG, 1986; SCHNEIDER, 1987; TRIPATHY ET AL., 2016; CIERPISZ; KRYCA; SOBIERAJSKI, 2016), exemplos típicos do uso de jiges para minérios incluem o beneficiamento de minério de ferro (MILLER, 1991; MUKHERJEE; BHATTACHARJEE; MISHRA, 2006; NAUDÉ et al., 2013), concentração de ouro aluvionar e de alto teor (LINS; SILVA, 1987; LAPLANTE; GRAY, 2005), pré-concentração de minérios de tungstênio (SRIVASTAVA; PATHAK, 2000), separação de dolomita de rocha fosfática (CARLSON; EISELE; KAWATRA, 2010), concentração de diamantes aluvionares (DDI, 2010), bem como na recuperação de minérios de estanho, cobre e cassiterita (SAMPAIO; TAVARES, 2005; WILLS, 2006). Jiges pneumáticos, por outro lado, são em sua maior parte utilizados no beneficiamento de carvões (WEINSTEIN; SNOBY, 2007; SAMPAIO et al., 2008; BOYLU et al., 2014).

Em sua história recente, a jigagem transcendeu o rol de aplicações do processamento mineral, sendo desde então utilizada em uma ampla variedade de segmentos. Conforme afirma Turner (1991), jiges são aplicados até mesmo em processos pitorescos, tais como a separação de ossos e cartilagens em abatedouros para fabricação de cola e goma de mascar, respectivamente. Todavia, é na reciclagem de materiais que o emprego de jiges tem encontrado um terreno particularmente fértil. Conforme supramencionado, a reciclagem de plásticos tais como polietileno, policarbonato e PVCs vêm inclusive impulsionando o desenvolvimento de novos modelos de jiges, particularmente no Japão (HORI et al., 2009a; ITO et al., 2010; TSUNEKAWA et al., 2012). Na reciclagem de componentes metálicos, a jigagem tem sido utilizada na recuperação de metais ferrosos e não ferrosos a partir de diversas fontes, tais como escória de aciaria (SRIPRIYA; MURTY, 2005), sucatas de automóveis (MORI et al., 1994) e resíduos de fiação previamente triturados (WANG et al., 2015).

De modo similar, o emprego de jigues tem sido descrito por diversos autores como um método efetivo para reciclagem de agregados graúdos de concreto ($d > 4,75$ mm) a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) (JUNGMANN; NEUMANN, 1991; XING; HENDRIKS, 2006; COELHO; BRITO, 2013a; CAZACLIU et al., 2014). XING (2004) realizou ensaios de separação de concreto ($2,4 \text{ g/cm}^3$) e tijolo ($1,7 \text{ g/cm}^3$) em jigue hidráulico operando em batelada, obtendo um produto denso com 99% de pureza e seis vezes menos poroso que o produto de topo. O emprego em usina de reciclagem de dois estágios de jigagem pneumática, um para remoção de gesso e outro para remoção de material cerâmico do concreto ($d > 4,75$ mm), foi descrito por Coelho e Brito (2013b, 2013c), sendo os jigues destaques em relação ao consumo energético e as emissões de CO_2 . Ainda, nos recentes trabalhos de CAZACLIU et al. (2014) e SAMPAIO et al. (2016), os resultados mostraram que a remoção de gesso e material cerâmico pode ser efetivamente realizada em um único estágio de jigagem à seco, gerando um produto denso com mais de 90% de concreto, o que atende a composição adequada para agregados reciclados segundo os padrões de qualidade de vários países (MARTÍN-MORALES et al., 2013).

2.1.3 Aplicação potencial: multi-separador pneumático

Os processos de reciclagem de materiais e processamento de grãos possuem seus próprios conjuntos de separadores gravimétricos, os quais constituem em grande parte equipamentos que operam à seco devido a limitações quanto a umidade e as baixas densidades dos materiais que classificam. Classificadores desta categoria incluem mesas e elutriadores pneumáticos, os separadores "drum" e "air knife", e o classificador "zig zag" (SAMPAIO; TAVARES, 2005; NIHOT, 2015; HE et al., 2016). Uma aplicação comum destes equipamentos tem sido na remoção de componentes leves (plástico, papel, madeira, etc.) durante o processamento de resíduos urbanos e de construção e demolição para fins de reciclagem (SEKITO; MATSUTO; TANAKA, 2006; COELHO; DE BRITO, 2013a). Todavia, devido a considerável influência do tamanho e formato de partícula na separação, a eficiência destes equipamentos tende a ser baixa. A fim de contornar essa limitação, alguns estudos sugerem o desenvolvimento de classificadores que operem com uma

corrente de ar pulsante, ao invés de contínua (EVERETT; PEIRCE, 1990; DUAN; HE; CHEN-LONG et al., 2009). Esta estratégia visa submeter a alimentação à contínuos ciclos de aceleração e desaceleração, de modo a impedir que os componentes atinjam suas velocidades terminais, criando assim uma condição propícia a separação devido a *aceleração diferencial inicial* das partículas. Uma vez que esta independe da dimensão das partículas, a separação por densidade passa a ser dominante no sistema. É interessante notar que a *aceleração diferencial inicial* constitui um dos três mecanismos envolvidos na estratificação em jigues, de acordo com a teoria fluidodinâmica proposta por Gaudin (1939). De fato, não é por acaso que o desenvolvimento de tais separadores foi, supostamente, influenciado pelos conceitos envolvidos na separação em jigues (PEIRCE; WITTENBERG, 1984).

Dado o exposto, é razoável presumir que jigues pneumáticos sejam capazes de efetuar a separação de componentes leves contidos em leitos particulados de modo similar ao que classificadores pneumático pulsado a ar fariam. Uma vez que jigues pneumáticos se mostram capazes de separar agregados grosseiros com densidades bastante próximas (minérios e carvões), a separação de contaminantes orgânicos tais como papel, plásticos, borracha e madeira é possivelmente uma tarefa mais simples. Agregando os dois casos, isto é, para o caso de uma mistura contendo ambos componentes particulados densos (rochosos) e contaminantes leves indesejados (em geral, não rochosos), evidencia-se a possibilidade de que um jigue pneumático seria capaz de remover estes do sistema ao mesmo tempo em que separa a fração pesada contida no leito, de forma que ambas as operação seriam realizadas em uma única etapa. Um exemplo prático de tal aplicação seria no processamento de resíduos de construção e demolição mistos, os quais podem possuir uma elevada quantidade de contaminantes orgânicos leves (folhas, plásticos, madeira, isopor, etc.) misturados a componentes pedregosos (concreto, agregados, tijolos, gesso) (LLATAS, 2013), sendo aqueles separados em classificadores pneumáticos tradicionais previamente à jigagem (COELHO; DE BRITO, 2013a; 2013b). O uso direto de jigues pneumáticos na separação de ambas as frações implicaria na redução do número de estágios do processo, potencialmente reduzindo o custo por tonelada de resíduo processada.

2.2 PRINCÍPIOS DA SEPARAÇÃO EM JIGUES

2.2.1 Pulsação do leito de jigagem

No decorrer do processo de jigagem, a segregação de partículas em diferentes camadas contendo a fração densa e leve está intrinsecamente relacionada ao fenômeno de expansão e compactação do leito. Desta forma, é conveniente definir a jigagem como um processo de repetitiva fluidização e defluidização do leito no qual a velocidade ascendente do fluido varia continuamente ao longo do ciclo de operação (KIRCHBERG; HENTZSCHEL, 1957; MUKHERJEE; MISHRA, 2006; CRESPO, 2016). Assim, de modo análogo ao que ocorre em leitos fluidizados, é necessário que o fluxo ascendente de fluido atinja uma velocidade mínima para que seja possível a elevação do leito contido em um jigue. Esta velocidade mínima de fluidização pode ser determinada conhecendo-se o regime de escoamento no sistema e a perda de carga decorrente da passagem do fluido através do leito. O regime de escoamento pode ser determinado através do número de Reynolds para escoamentos através de leitos particulados (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002):

$$Re = \frac{U_f \rho_f d_p}{\mu(1 - \varepsilon)} \quad (1)$$

Onde U_f , ρ_f e μ são a velocidade superficial, densidade e viscosidade do fluido, respectivamente; ε é a porosidade do leito e d_{eq} é o diâmetro médio das partículas constituintes do leito, para o caso de partículas esféricas. Esta relação é somente válida para o escoamento do fluido através do leito antes do início da fluidização. Para baixos valores ($Re \leq 10$), o fluxo é laminar e a perda de carga pode ser estimada através da equação de Carman-Kozeny:

$$\frac{(-\Delta p)}{L} = \frac{-180\mu(1 - \varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} U_f \quad (2)$$

Sendo L a espessura do leito. A velocidade mínima de fluidização ocorre quando a força de arraste exercida pelo fluido (representada pela queda de pressão) se iguala a força-peso aparente do leito, isto é:

$$-\Delta P = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f)Lg \quad (3)$$

No qual ρ_s e ρ_f são as densidades do sólido formador do leito e do meio fluido, respectivamente, e g é a aceleração da gravidade ($= 9,81 \text{ m/s}^2$). A expressão contida no lado direito da igualdade representa a força-peso aparente por unidade de área do leito (kN/m^2). Substituindo a equação (3) em (2) para a velocidade mínima de fluidização, obtém-se:

$$U_{f,\min} = \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} \frac{(\rho_s - \rho_f)gd_p^2}{180\mu} \quad (4)$$

Correlações para o caso em que o regime é não laminar, tal como a correlação de Ergun, podem ser encontradas disponíveis na literatura especializada (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002). Uma observação atenta da eq. (4) revela que a velocidade ou o fluxo mínimo de fluido necessário para elevar o leito ($Q_{\min} = U_{f,\min} \times S$, onde S é a área da seção transversal do leito), diminui a medida que se aumenta a densidade e a viscosidade do meio. Uma vez que líquidos são consideravelmente mais densos e viscosos do que gases sob as mesmas condições, é normal que o fluxo ascendente de fluido usado para elevar o leito seja muito menor em jiges hidráulicos do que aqueles usados na jigagem pneumática. Da mesma forma, $U_{f,\min}$ varia com o quadrado do diâmetro médio das partículas formadoras do leito. Conforme será visto adiante, ambos os fatores têm efeito importante sobre o intervalo máximo de tamanhos de partículas usados na alimentação de jiges, particularmente para o caso de jiges pneumáticos.

A elevação do leito constitui apenas uma das fases do movimento das partículas no decorrer da jigagem. Devido ao processo cíclico de pulsação, o leito de jigagem descreve um movimento oscilatório caracterizado por uma amplitude de pulsação A e por uma frequência de pulsação f (ciclos por minuto, cpm). Denomina-se *ciclo de jigagem* ao modo como pulsações de amplitude A e frequência f são impostas sobre o leito. O ciclo mais simples utilizado descreve um movimento

harmônico simples, sendo um dos principais ciclos utilizados em jigsawes de pistão e diafragma (SAMPAIO; TAVARES, 2005). A figura 5 ilustra as características de deslocamento do leito e velocidade do fluido para este tipo de ciclo.

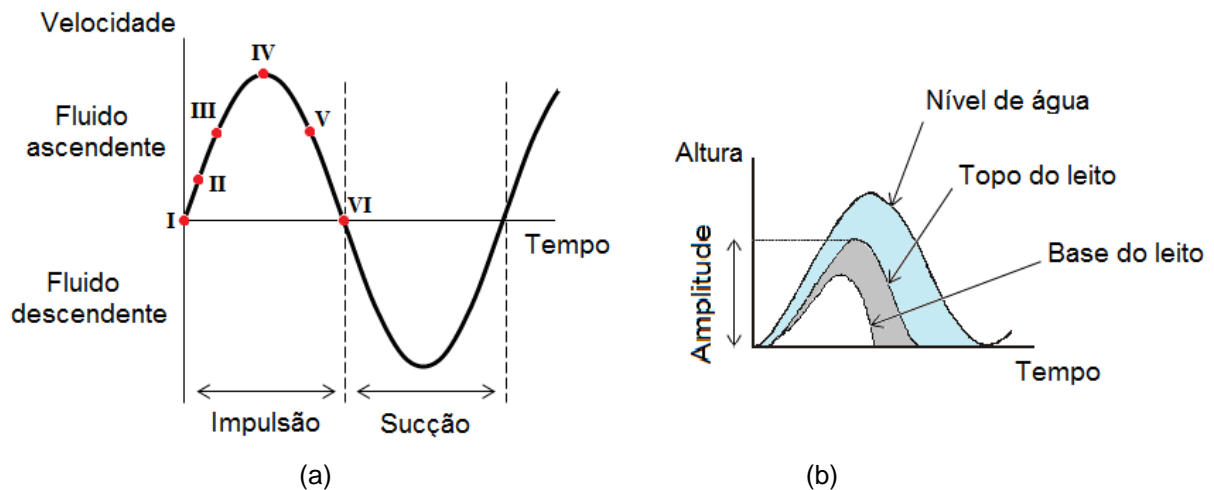


Figura 5: (a) Velocidade e (b) deslocamento do leito de jigagem ao longo de um ciclo de pulsação. Fonte: modificado de Sampaio e Tavares, 2005.

Uma análise integral da movimentação do leito de jigagem foi elaborada por Kirchberg e Hentzschel (1957), os quais utilizaram um jigage de diafragma com pulsações harmônicas contendo um leito de partículas esféricas, variando amplamente as propriedades do leito e as condições de pulsação. Inicialmente, o deslocamento básico do leito foi cuidadosamente registrado para o caso mais simples possível, i.e. para um leito formado por partículas de mesma composição e tamanho uniforme (Figuras 5.a e 6).

No princípio do processo o leito encontra-se em repouso e a velocidade do meio fluido é nula (I). Então, momentos após o início do fluxo ascendente, a força de arraste exercida pelo fluido se iguala ao peso-aparente do leito e o mesmo é elevado como um corpo rígido (II). Neste ponto, uma zona de alta porosidade é formada abaixo do leito, também chamada de *camada de fluido*. À medida que o fluxo ascendente atravessa o leito, inicia-se o processo de dispersão das partículas na forma de uma onda de dispersão que se propaga a partir da base do leito, denominada *camada de dispersão* (III). Enquanto o fluxo se aproxima do seu valor máximo, a camada de dispersão se expande até o ponto em que abrange todo o volume do leito (IV). Conforme a velocidade do fluido diminui, condições para

sedimentação das partículas passam a prevalecer enquanto a onda de dispersão se dissipa através do leito (V). Finalmente, o leito se encontra novamente estático sobre o crivo enquanto a fase de sucção tem início.

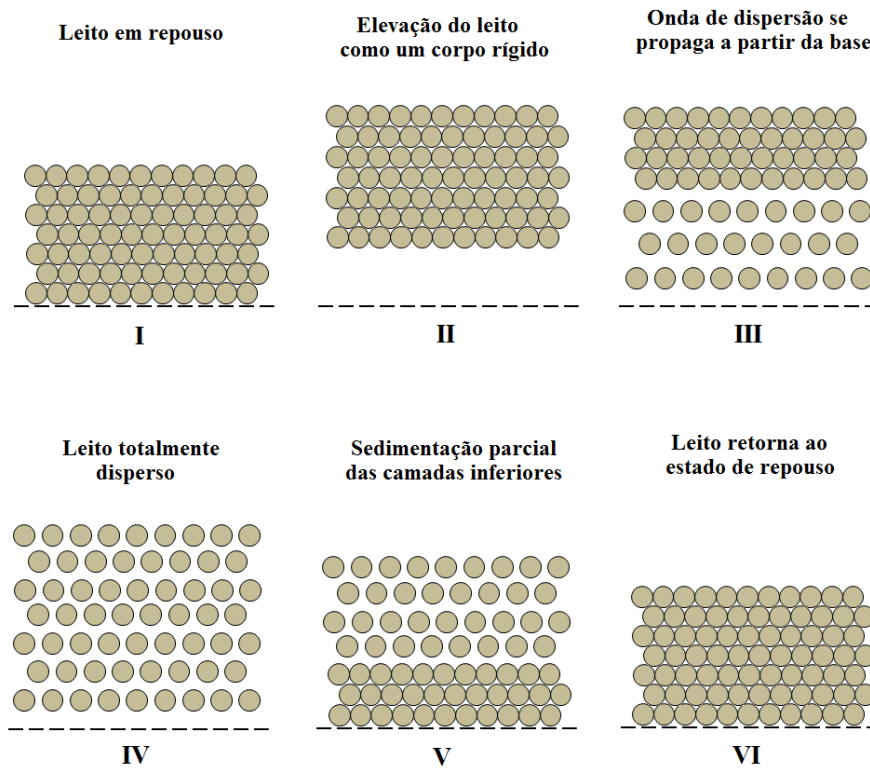


Figura 6: Movimentação do leito de jigagem ao longo de um ciclo de pulsação.
Fonte: elaborado pelo autor com base em Kirchberg e Hentzschel (1957).

Resultados experimentais a respeito da mobilidade do leito, como os apresentados acima, são a base para estudos recentes sobre modelagem de leitos de jigagem, em especial no que diz respeito à variação da porosidade no decorrer do processo (WITTEVEEN, 1995; VIDUKA et al., 2013; CRESPO, 2016).

2.2.2 Estratificação do leito de jigagem

O fenômeno de estratificação em jigues ocorre quando um leito formado por partículas não homogêneas é submetido a contínuos ciclos de pulsação, conforme demonstrado na Figura 6. A estratificação é fundamentalmente resultado das diferenças de velocidade relativa entre as partículas constituintes do sistema, o que por sua vez decorre da existência de diferenças significativas nas densidades, nos tamanhos e nas formas das mesmas. Os diversos modelos propostos para descrição dos mecanismos envolvidos na estratificação em jigues se originam, basicamente, de duas abordagens distintas. A primeira, de natureza fluidodinâmica, baseia-se na análise do movimento diferencial das partículas do leito sob a ação de diferentes forças ao longo do ciclo de jigagem. A segunda, de caráter termodinâmico, considera que a tendência inerente do sistema à atingir um estado de equilíbrio termodinâmico é a força motriz por trás do processo de estratificação. A seguir, estes dois tipos de modelos são descritos em detalhes.

2.2.2.1 Modelos fluidodinâmicos

A quintessência dos modelos fluidodinâmicos de estratificação reside inicialmente no balanço de forças que atuam sobre uma partícula isolada em um fluido. Para que a mesma se desloque em relação ao fluido, é necessário que exista uma força externa atuando sobre o sistema, que no caso da jigagem é a força gravitacional. Da mesma forma, forças opostas ao movimento surgem sempre que existe uma diferença relativa de velocidade entre a partícula e o fluido. No caso do deslocamento vertical, pelo menos duas forças atuam na resistência ao movimento da partícula: a força de empuxo e a força de arraste. A ação dessas forças para o caso simples de uma partícula esférica imersa em um fluido em movimento é ilustrada na Figura 7.

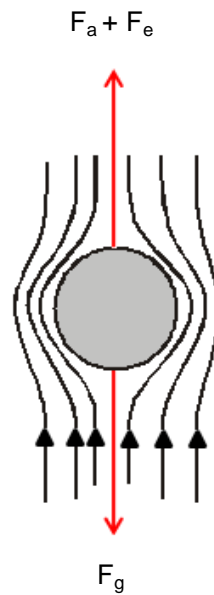


Figura 7: Forças atuantes sobre uma partícula esférica isolada em um fluido.
Fonte: elaborado pelo autor.

O módulo e o sentido de movimento da partícula no fluido resultam do balanço entre as forças atuantes no sistema, dado por:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_a + F_e - F_g \quad (5)$$

onde m_p e U_p são a massa e a velocidade da partícula e F_a , F_e e F_g são, respectivamente, a força de arraste, a força de empuxo e a força gravitacional. O efeito combinado das duas últimas resulta na força peso aparente da partícula:

$$F_g - F_e = V_p (\rho_s - \rho_f) g \quad (6)$$

Onde $V_p = (1/6)\pi d_p^3$ corresponde ao volume da partícula esférica. Assim, fica evidente que a diferença relativa de densidade entre o fluido e a partícula é um fator que define se a mesma irá flutuar ou afundar. No caso da jigagem, $\rho_s > \rho_f$ é a regra quase absoluta (com exceção do jigage reverso, descrito na Figura 4 da seção 2.1.1). Por outro lado, a força de arraste exercida sobre a partícula depende de vários fatores, incluindo seu tamanho, forma, inclinação, bem como das condições de escoamento. No caso, a uniformidade espacial da partícula esférica elimina quaisquer influências da forma e da inclinação do corpo em relação ao escoamento.

Contudo, a força de arraste é particularmente afetada pelo regime de escoamento do sistema, dado pelo número de Reynolds:

$$Re = \frac{U_f d_p \rho_f}{\mu} \quad (7)$$

o qual representa a razão entre as forças inerciais e viscosas atuantes no deslocamento do fluido. Para o caso em que as forças viscosas são largamente dominantes ($Re < 0,5$) as forças inerciais podem ser consideradas desprezíveis, e a força de arraste sobre a partícula pode ser calculada segundo a Lei de Stokes:

$$F_a = 3\pi\mu d_p U_\infty \quad (8)$$

Onde U_∞ é a velocidade da partícula no seio do fluido. Contudo, à medida que o valor de Re aumenta, o aparecimento de vórtices na camada limite do fluido dificulta o emprego de expressões analíticas para o cálculo da força de arraste. Neste caso, a relação entre as condições do fluido e a força de arraste é representada através de um número adimensional que caracteriza os diversos fatores que afetam o escoamento do fluido ao longo da partícula, denominado coeficiente de arraste (C_D). Este é determinado experimentalmente considerando vários regimes de escoamento (Figura 8), e uma vez conhecido, pode ser usado no cálculo da força de arraste segundo a expressão:

$$F_a = \frac{1}{2} C_D \rho_f U_\infty^2 A_p \quad (9)$$

no qual $A_p = (1/4)\pi d_p^2$ é a área superficial da partícula. Assim, para o regime de Stokes ($Re < 0,5$), o coeficiente de arraste decresce linearmente à medida que Re aumenta, sendo dado por $C_D = 24/Re$.

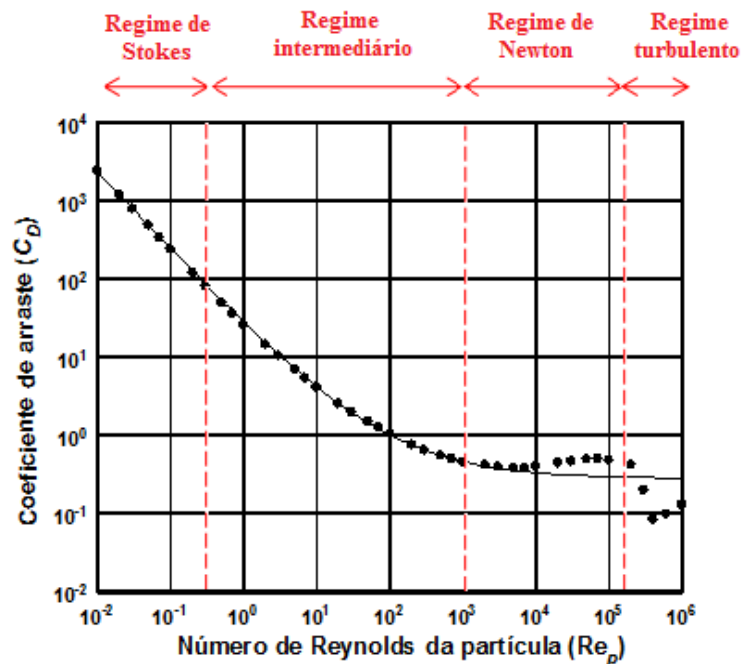


Figura 8: Variação do coeficiente de arraste em função do regime de escoamento.
 Fonte: modificado de Sampaio e Tavares (2005)

Conforme supramencionado, valores superiores de Re traduzem a crescente influência das forças inerciais no sistema, de forma que a relação entre Re e C_D deixa de ser linear. Nesta faixa, que se estende até $Re \approx 10^3$, não existe uma solução analítica disponível da equação de Navier-Stokes, sendo regra o uso de modelos empíricos disponíveis na literatura (COUPER et al., 2005). O intervalo compreendido entre $10^3 < Re < 2 \times 10^5$ corresponde ao regime no qual as forças inerciais são preponderantes, de forma que a lei de Newton é aplicável. O valor de C_D é aproximadamente constante e independente do Re , sendo estimado em $C_D \approx 0,44$ (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002). Finalmente, para o caso em que $Re \geq 2 \times 10^5$, o escoamento passa de laminar à turbulento. Neste caso, as forças inerciais dominam de tal maneira que o escoamento se torna caótico e o descolamento da camada limite é frequente, ocasionando assim um decréscimo considerável do valor do C_D . Este regime, no entanto, ocorre para condições de escoamento muito além daquelas tipicamente empregadas em jiques. De fato, as condições típicas de jigagem ocorrem no regime intermediário e de Newton (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Existem diversas expressões empíricas para o coeficiente de arraste no regime intermediário, não havendo um consenso geral sobre qual é a melhor (COUPER et al., 2005). No caso do regime de Newton, o valor

do C_D pode ser diretamente substituído na equação (9), de forma que a força de arraste assume a forma:

$$F_a = 0,22 \rho_f U_\infty^2 A_p \quad (10)$$

A equação (10) representa a força de resistência do fluido ao movimento da partícula no regime de Newton, sendo tanto maior quanto mais acelerado for este movimento. Uma condição de interesse é aquela na qual a resistência oferecida pelo fluido atinge a mesma intensidade da força de campo agindo sobre a partícula, de forma que a aceleração da mesma se torna nula. Esta condição ocorre quando $dU_p/dt = 0$ na equação (5), de forma que:

$$0,22 \rho_f U_\infty^2 \frac{1}{4} \pi d_p^2 - \frac{1}{6} \pi d_p^3 (\rho_s - \rho_f) g = 0 \quad (11)$$

Isolando U_∞ , obtém-se:

$$U_\infty = \left[\frac{3gd_p(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{1/2} \quad (12)$$

A qual corresponde à *velocidade terminal* da partícula esférica sob condições de sedimentação livre no regime de Newton. Assim, a equação (12) revela que a velocidade terminal depende do tamanho e da densidade da partícula em questão. O efeito da forma de partícula costuma ser de difícil quantificação analítica, sendo geralmente analisado a partir de dados empíricos. Um método particularmente útil consiste em medir em laboratório as velocidades terminais de sedimentação de uma partícula irregular de interesse e de uma partícula esférica de densidade e tamanho equivalente. A razão entre os dois valores, dada por $\zeta = U_{\infty,irregular} / U_{\infty,esférico}$, é denominada *fator de forma cinemático* (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Uma vez que a resistência ao escoamento tende a diminuir com o aumento da esfericidade da partícula, a velocidade terminal de partículas com formato irregular tende a ser menor do que aquela de partículas esféricas de mesma densidade e tamanho. Assim, quanto maior for a esfericidade de uma dada partícula, maior será a probabilidade que a mesma reporte à banda contendo o produto denso, ao passo

que partículas planares possuem maior tendência a reportar a camadas superiores do leito.

Conforme mencionado, o movimento relativo de partículas em um fluido ocasionado pela diferença de densidade entre as mesmas é o fator principal que guia os fenômenos que ocorrem durante a jigagem. Assim, convém analisar a equação da velocidade terminal livre (equação 12) considerando um sistema contendo partículas de diferentes densidades e tamanhos. Supondo uma mistura binária contendo partículas esféricas de um material leve L , de diâmetro d_l e densidade ρ_l , e de um material denso D , de diâmetro d_d e densidade ρ_d . A condição na qual as duas partículas apresentam a mesma velocidade terminal é dada por:

$$\left[\frac{3gd_l(\rho_l - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{1/2} = \left[\frac{3gd_d(\rho_d - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{1/2} \quad (13)$$

a qual simplificando e rearranjando, resulta em:

$$\frac{d_l}{d_d} = \left(\frac{\rho_d - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \right)^q \quad (14)$$

Esta razão, denominada *razão de sedimentação* (RITTINGER, 1867), indica a razão entre os tamanhos de partículas de materiais de diferentes densidades que apresentam a mesma velocidade terminal. Esta relação é válida para todos os regimes de escoamento, sendo estes representados pelo quociente q , onde $q = \frac{1}{2}$ para o regime de Stokes, $q = 1$ para o regime de Newton e $\frac{1}{2} < q < 1$ para o regime intermediário. A razão de sedimentação constitui um fator útil para avaliar, a priori, o domínio que diferenças de densidades exercem na separação, sendo este tanto mais alto quanto maiores forem estas diferenças. Exemplificando, uma razão de sedimentação igual a 3 indica que as partículas de um dado material leve possuirão a mesma velocidade terminal de um outro material denso de tamanho três vezes menor. Contudo, se o material denso estiver presente na forma de partículas ainda menores (ou o material leve com partículas maiores) a velocidade terminal do material leve excederá à do material denso, uma vez que as diferenças de tamanho, e não de densidade, passarão a controlar o movimento das partículas contidas no sistema.

Por integrar o efeito combinado da densidade e tamanho de partículas, juntamente com a densidade do meio fluido, Taggart (1945) elevou a razão de sedimentação ao nível de índice para avaliação da aplicabilidade de métodos gravimétricos, denominando-a como *critério de concentração* (CC). Assim, quanto maior o valor de CC, maior é o intervalo de tamanhos viável de ser alimentado em um jig e mais fácil será a separação. O CC também indica que não apenas a densidade e o tamanho de partícula são determinantes na separação, mas também a densidade do meio fluido. Na prática, o movimento das partículas contidas em polpas difere significativamente daquele de partículas isoladas, uma vez que existem também interações entre as mesmas, destas com as paredes do recipiente, bem como variações inesperadas na viscosidade aparente da polpa. Desta forma, condições de sedimentação livre dificilmente ocorrem na prática, sendo mais útil a descrição do fenômeno como um processo de *sedimentação retardada* ou impedida. Rittinger (1867) e mais tarde Richards (1906) supuseram que a sedimentação retardada diferencial (entre os componentes leve e denso) seria o mecanismo crucial que define a separação em jigs e outros equipamentos de concentração gravimétrica. A razão de sedimentação livre (equação 14) pode ser reescrita como razão de sedimentação retardada pela consideração da densidade da suspensão ρ_a em lugar da densidade do fluido ρ_f :

$$\frac{d_l}{d_d} = \left(\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_l - \rho_a} \right)^q \quad (15)$$

onde:

$$\rho_a = \emptyset \rho_s + (1 - \emptyset) \rho_f \quad (16)$$

Sendo \emptyset a fração volumétrica de sólidos contidos na polpa. A variação da razão de sedimentação retardada em função de mudanças da fração volumétrica de sólidos, da proporção de materiais leve e denso na mistura e do meio fluido empregado é mostrada na Tabela 1. É possível observar que a razão de sedimentação se eleva na medida em que se aumenta a fração volumétrica de sólidos na polpa e a proporção do componente denso em relação ao componente leve, uma vez que ambos elevam a densidade da suspensão (equação 16). O

contínuo incremento desta pode resultar em razões de sedimentação que tendem ao infinito, isto é, onde não é possível manter a estabilidade da suspensão contendo os componentes denso e leve. Exemplificando, se uma suspensão aquosa contendo 30% de sólidos da mistura carvão-ardósia da Tabela 1 contiver 75% ou mais de ardósia (em volume), então a polpa original segregará em duas suspensões, uma contendo ardósia e água e outra contendo carvão, água e partículas de ardósia não segregadas. Isto revela que, quanto mais próxima a densidade da suspensão estiver da densidade dos componentes que se deseja separar, tanto mais fácil será a separação. Isto evidencia o fato que a separação em jigues à ar é normalmente menos eficiente que em jigues à água, uma vez que a densidade do ar é muito menor que a da água.

Tabela 1: Razões de sedimentação livre e retardada no regime de Newton ($q = 1$) para misturas binárias de carvão e ardósia betuminosa.

% de componente denso na mistura	Meio fluido	% volumétrica de sólidos na polpa			
		10%	20%	30%	40%
25%	Água	6,00	7,67	11,00	21,00
	Ar	2,05	2,23	2,47	2,82
50%	Água	6,72	11,00	41,00	∞
	Ar	2,08	2,31	2,61	3,22
75%	Água	7,67	21,00	∞	∞
	Ar	2,11	2,40	2,87	3,86

Fonte: adaptado de Gaudin (1939).

Ainda que útil para uma compreensão básica dos princípios envolvidos na jigagem, a mera análise do balanço de forças sobre partículas é insuficiente para descrever fenômenos tais como a ocorrência de classificação reversa em jigues, ou seja, a concentração em uma mesma camada de partículas finas leves junto às grossas densas. Também, conforme observado por Gaudin (1939), a mistura sólido-fluido do leito de jigagem, diferente de sólidos em suspensões, é geralmente demasiada compacta para que as partículas se mantenham suspensas durante tempo suficiente para ocorrência de segregação devido a meras diferenças

existentes entre velocidades terminais. Assim, a sedimentação retardada diferencial por si só é incapaz de descrever o fenômeno de segregação em jigues. De fato, a prática demonstra ser tipicamente possível separar um intervalo de tamanho muito mais amplo que aquele previsto pela equação (15). A fim de contornar este problema, Gaudin (1939) propôs que outros dois mecanismos atuam em conjunto com a sedimentação retardada diferencial: a aceleração inicial diferencial e a percolação (ou consolidação) intersticial. Este conjunto de mecanismos propostos por Gaudin (1939) é amplamente conhecido como a *teoria hidrodinâmica da jigagem*, embora a terminologia “fluidodinâmica” pareça mais apropriada, uma vez que a jigagem também pode ser realizada a seco.

O mecanismo de *aceleração inicial diferencial* baseia-se no fato de que as partículas contidas em um leito de jigagem passam a maior parte do tempo em estados alternados de aceleração e desaceleração. Entre estes estados, há instantes em que a velocidade das partículas é nula ou próxima de nula, de forma que a força de arraste exercida sobre a partícula pode ser considerada desprezível. Nesta condição, a equação (5) toma a forma:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = V_p (\rho_s - \rho_f) g \quad (17)$$

onde a massa da partícula é $m_p = \rho_s V_p$. Substituindo na equação (17), tem-se que:

$$\frac{dU_p}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) g \quad (18)$$

Ou seja, o movimento das partículas nos instantes iniciais depende somente da densidade das mesmas, sendo independente do tamanho. Deste modo, durante os breves instantes em que a aceleração da partícula é nula e o sentido do movimento se inverte (como no final da expansão do leito) a diferença de densidade é a única força motriz que controla a segregação das partículas. Uma vez que estes momentos ocupem uma fração significativa do movimento das partículas, a separação final obtida será melhor do que aquela prevista unicamente através do mecanismo de sedimentação retardada diferencial. A fim de intensificar o efeito da aceleração inicial diferencial, é necessário que as partículas se movam por

distâncias mais curtas e o sentido do movimento varie repetidamente, o que poderia ser alcançado pelo uso de altas frequências e baixas amplitudes de pulsação do leito.

Em um leito composto por partículas de diferentes tamanhos e densidades, as partículas maiores tenderão a se depositar no fundo antes das partículas finas. Contudo, enquanto estas permanecem imóveis sobre o crivo do jig, as partículas finas poderão continuar a sedimentar através dos interstícios da camada grosseira. O mecanismo denominado *percolação intersticial* representa esta condição na qual a sedimentação dos finos continua após a deposição da camada grosseira. Ainda que possa ocorrer somente sob ação da gravidade, o arraste do fluido durante a fase de sucção em jigs hidráulicos intensifica sua ocorrência, podendo aumentar a recuperação de partículas finas no produto denso.

A Figura 9 mostra a atuação individual e conjunta dos mecanismos. Enquanto a sedimentação retardada e a aceleração diferencial induzem as partículas densas e grossas para camadas inferiores do leito, o mecanismo de percolação intersticial produz uma segregação inversa em relação ao tamanho de partícula, visto que induz as densas e finas em direção ao fundo do jig. Ressalta-se que, embora atuem conjuntamente, as condições propícias à ocorrência dos mecanismos de sedimentação retardada e aceleração diferencial são distintas. Enquanto o primeiro é favorecido por ciclos longos de jigagem (alta amplitude e baixa frequência) a fim de permitir o alcance das velocidades terminais das partículas, o segundo é intensificado pelo uso de ciclos curtos (baixa amplitude e alta frequência) de forma a produzir contínuas acelerações e desacelerações das partículas do leito. Ainda, o tipo de produto desejado (leve ou denso) bem como a granulometria e a proporção do mesmo na alimentação definirá se a ocorrência de percolação intersticial é ou não desejável. Se o produto alvo for o componente denso contido em uma alimentação rica em finos leves, a percolação intersticial pode ocasionar elevada contaminação do produto de fundo. No caso de um produto desejável leve, a percolação intersticial auxilia na remoção dos finos densos inicialmente presentes nas camadas superiores do leito.

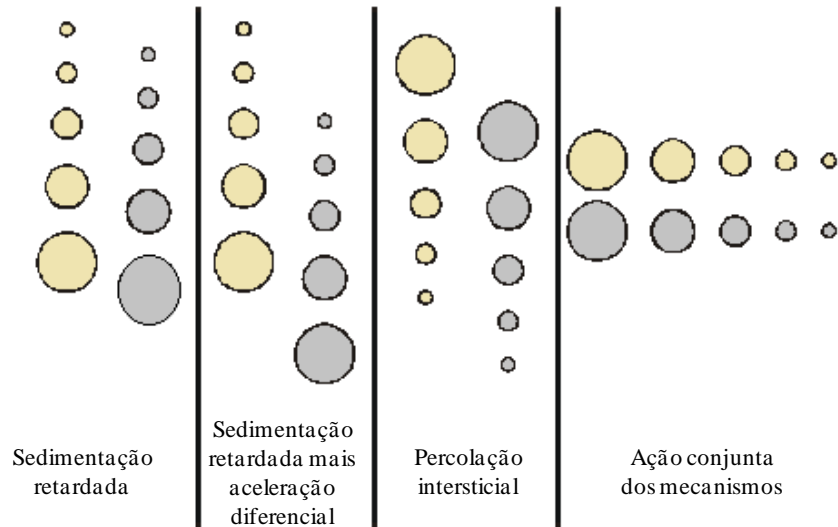


Figura 9: Ação individual e combinada dos mecanismos de segregação em jiges de acordo com a teoria hidrodinâmica.

Fonte: adaptado de Gaudin (1939).

No aspecto qualitativo, a teoria hidrodinâmica de Gaudin descreve satisfatoriamente os fenômenos gerais que ocorrem durante a estratificação em jiges. Contudo, sua aplicação na modelagem e simulação do processo de jigagem exige a resolução das equações do movimento, em estado transiente, para cada partícula individual presente no sistema. Até recentemente, este obstáculo tornava a teoria hidrodinâmica incapaz de ser utilizada quantitativamente na descrição da jigagem. Contudo, o gradativo aumento da capacidade computacional nas últimas décadas têm tornado viável a solução numérica das equações de conservação que governam o movimento de partículas em jiges. Recentes estudos baseados no método dos elementos discretos (DEM) e na fluidodinâmica computacional (CFD) (BECK; HOLTHAM, 1993; MISHRA; MEHROTRA, 1998; XIA; PENG; WOLFE, 2007; VIDUKA et al., 2013; CRESPO, 2016) têm se mostrado promissores uma vez que são capazes de vincular a estratificação do leito com os principais parâmetros operacionais de jiges, tais como a amplitude e frequência de pulsações. Contudo, a complexidade destes modelos exige o uso intensivo de recursos computacionais, de modo que os custos associados podem torná-los pouco competitivos para aplicação prática (CRESPO, 2016).

2.2.2.2. Modelos termodinâmicos

A análise da estratificação do leito sob um viés termodinâmico foi originalmente concebida por Mayer (1950, 1964), constituindo uma das principais contribuições ao entendimento da jigagem. Seu modelo considera a mistura de partículas heterogêneas em um leito de jigagem como um sistema mecânico que tende a um estado de menor energia potencial, correspondente ao estado estratificado. Assim, a diferença de energia potencial gravitacional entre os estados misturado e estratificado seria a verdadeira força motriz que promove a estratificação do leito e a energia suprida pelas pulsações serviria apenas para liberar a energia potencial latente do leito não estratificado.

A redução da energia potencial do sistema se manifesta na forma de diminuição do centro de massa do leito estratificado. A Figura 10 ilustra esse processo considerando dois estados distintos: (I) uma mistura binária perfeitamente homogênea de partículas com diferentes densidades e tamanhos; (II) um leito perfeitamente estratificado em relação à densidade. A energia potencial do leito no estado perfeitamente misturado é dada por:

$$E_I = (m_l + m_d)g \frac{H}{2} \quad (19)$$

Onde m_l e m_d são as massas do componente leve e denso contida na mistura e $H/2$ é a posição vertical do centro de gravidade S_I do leito misturado. O leito estratificado é caracterizado pelo surgimento de dois centros de gravidade distintos, um para a camada de material leve (S_l) e outro para a camada de material denso (S_d). A energia potencial do leito neste estado é:

$$E_{II} = m_l g \left(\frac{H_l}{2} + H_d \right) + m_d g \left(\frac{H_d}{2} \right) \quad (20)$$

Portanto, a diferença de energia potencial entre os estados I e II é dada por:

$$\Delta_E = E_I - E_{II} = \frac{1}{2} (m_d g H_l - m_l g H_d) \quad (21)$$

a qual é sempre positiva.

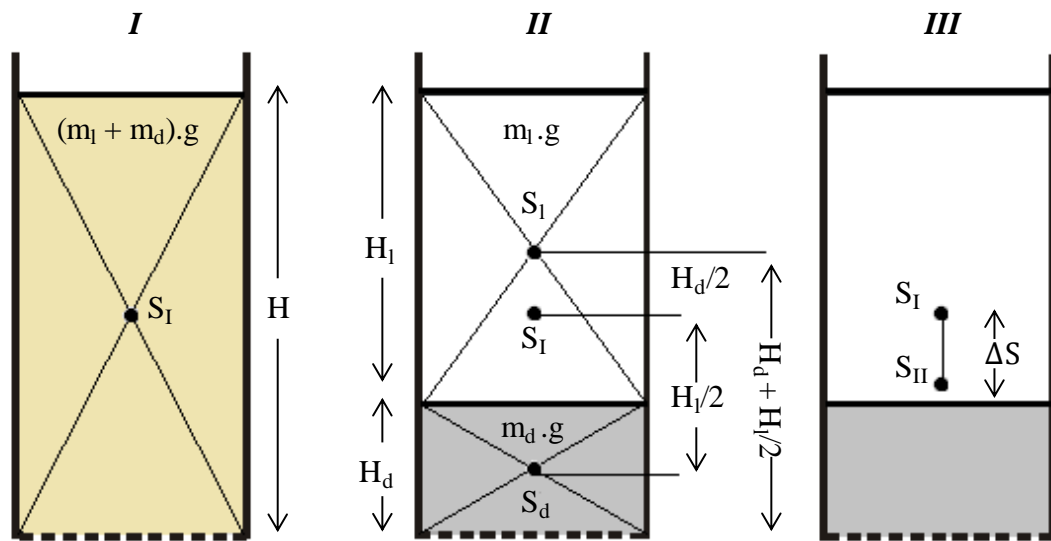


Figura 10: Posição do centro de gravidade em uma mistura binária de partículas com diferentes densidades. (I) mistura homogênea, (II) estratificação perfeita, (III) rebaixamento do centro de gravidade.

Fonte: adaptado de Mayer (1964) e Sampaio e Tavares (2005).

O primeiro termo da equação (21) representa a energia de deslocamento das partículas do material denso de massa m_d ao longo da distância $H_l/2$, ou seja, do centro de gravidade inicial S_I para o centro de gravidade final S_d . Por outro lado, o segundo termo representa o trabalho de elevação das partículas leves de massa m_l pelas densas ao longo da distância $H_d/2$, ou seja, do centro de gravidade inicial S_I para o centro de gravidade final S_{II} . O resultado global é o rebaixamento do centro de massa do leito, o qual é expresso por:

$$\Delta_S = \frac{\Delta_E}{(m_l + m_d)g} \quad (22)$$

Mayer também notou que o rebaixamento do centro de massa do leito está relacionado ao crescente grau de empacotamento do mesmo conforme o processo de estratificação progride. Uma vez que este empacotamento depende não apenas da densidade, mas também do tamanho e da forma das partículas, alguma estratificação também deverá ocorrer em função de diferenças nestas propriedades. Assim, por exemplo, uma partícula grossa posicionada sobre a superfície de um leito

formado por partículas finas (Figura 11.a) tende a afundar à medida que o leito pulsa, uma vez que a partícula grosseira possui uma maior densidade de empacotamento do que teria várias partículas finas ocupando o mesmo volume. No caso oposto, isto é, de uma partícula fina contida no interior de um leito de partículas grosseiras (Figura 11.b), a partícula fina tenderia a ascender continuamente no leito até ser expulsa do mesmo, uma vez que o distúrbio causado pela sua presença geraria uma zona de baixo empacotamento no interior do leito. De forma similar, a presença de uma partícula tabular em um leito de partículas esféricas (Figura 11.c) causaria um distúrbio no empacotamento devido ao aumento local no número de vazios. Após alguns ciclos de expansão e compactação, esta partícula seria deslocada para o topo do leito, minimizando assim a energia potencial total do sistema.

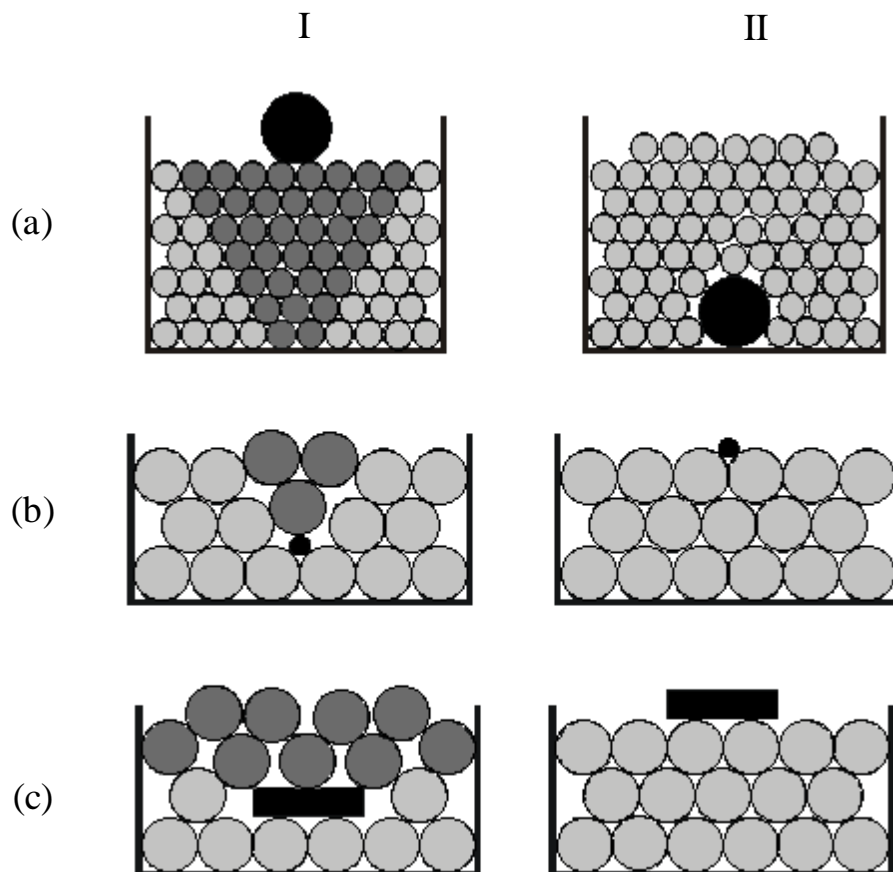


Figura 11: Segregação de partículas de intrusos com diferentes propriedades em relação ao leito que as contém. (a) Uma partícula grosseira em um leito de miúdos; (b) Uma partícula miúda em um leito de grosseiros; (c) Uma partícula tabular em um leito de partículas esféricas.

Fonte: elaborado pelo autor com base em Mayer (1964).

Uma decorrência interessante da teoria da energia potencial é que o estado inicial em que o leito se encontra, isto é, antes da estratificação, tem influência sobre a extensão da mesma. Mayer (1964) ilustrou este fato para o caso de um leito binário no qual a camada de material denso é inicialmente depositada sobre a camada de material leve. Após um único pulso, o sistema é completamente invertido de forma que a camada de material denso desloca a camada inteira de material leve em um único movimento. Neste caso, o valor de Δ_E é bastante elevado uma vez que a configuração inversa do leito (camada densa sobre a camada leve) maximiza a energia potencial armazenada no sistema. Conjuntamente, a presença de mistos tende a piorar a estratificação como um todo. Para o caso hipotético de uma mistura ternária na qual o material misto possui densidade intermediária entre o material denso e o material leve, a variação do centro de gravidade da camada mista entre o estado misturado e o estado estratificado será virtualmente nula, uma vez que no início o material misto se encontrava perfeitamente distribuído ao longo do leito e ao final concentrado na parte central do mesmo. Assim, as partículas do material misto teriam um efeito nulo no rebaixamento do centro de gravidade do sistema, ao passo que sua presença aumentaria o termo no denominador da equação (22).

Visando propor uma descrição cinética da estratificação, Mayer (1964) assumiu que a energia potencial é continuamente convertida em energia cinética durante o processo de rearranjo do leito. Esta energia cinética seria em grande parte transformada em deslocamento das partículas dentro do sistema, enquanto uma fração da mesma se dissiparia devido ao atrito e ao calor. Deste modo, uma vez que a energia disponível diminui à medida que o leito segrega, a velocidade de estratificação também decresce progressivamente. Correlacionando este fenômeno com situações similares existentes na Física, Mayer (1964) considerou que o decréscimo de energia potencial do sistema poderia ser descrito como uma equação cinética de primeira ordem em função do tempo de jigagem:

$$\frac{d\Delta_E}{dt} = -k\Delta_E \quad (23)$$

Na qual a constante k caracteriza a taxa de evolução da estratificação. Integrando a equação (23) e substituindo Δ_E por Δ_s , tem-se:

$$H(t) = \Delta_S \exp(-kt) \quad (24)$$

As equações (23) e (24) demonstram que à medida que $t \rightarrow \infty$, ou seja, para infinitos ciclos de jigagem, a energia potencial do sistema eventualmente atingirá um valor mínimo que corresponde à estratificação perfeita do leito. É precisamente nesse ponto que repousa a principal limitação da teoria da energia potencial conforme inicialmente proposta por Mayer, uma vez que a prática claramente demonstra que uma estratificação perfeita do leito jamais é obtida. Neste sentido, uma contribuição significativa à teoria de Mayer foi realizada por King (1987, 2001). Seu modelo admite que a estratificação perfeita nunca pode ser alcançada, de modo que o perfil final de estratificação de um leito de jigagem é o resultado do equilíbrio dinâmico entre o fluxo que promove a estratificação, relacionada à minimização da energia potencial do sistema, e um fluxo dispersivo contrário a este, de natureza difusiva, o qual tende a remisturar as camadas do leito.

Considerando o caso de um leito composto de partículas esféricas de tamanho uniforme (Figura 12), o gradiente de energia potencial de uma partícula com densidade ρ em um leito de partículas com densidade média $\bar{\rho}$ é dada por:

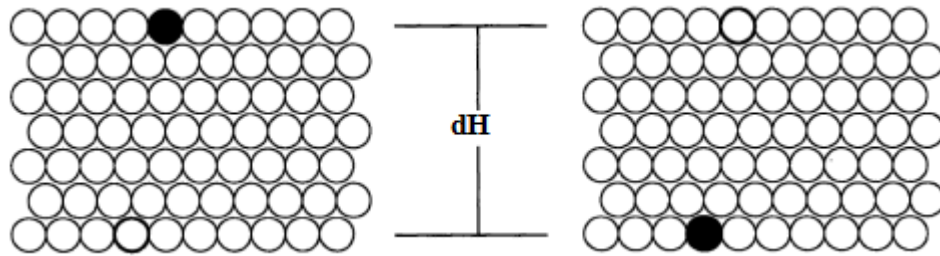


Figura 12: Mudança de energia potencial quando uma partícula densa muda sua posição no leito.
Fonte: adaptado de King, 2001.

$$\frac{dE}{dH} = V_p g(\rho - \bar{\rho}) \quad (25)$$

Onde H é espessura do leito medida a partir do crivo. A densidade média $\bar{\rho}$ do leito de espessura H é dada por:

$$\bar{\rho} = \int_0^{\infty} \rho C_{\rho} d\rho \quad (26)$$

Assim, o gradiente de energia potencial gera um movimento de subida ou descida da partícula de acordo com o sinal de $(\rho - \bar{\rho})$. Se $\rho > \bar{\rho}$ a partícula se moverá para baixo e se $\rho < \bar{\rho}$ ela se moverá para cima. O fluxo de partículas de densidade ρ causado pelo gradiente de energia potencial é dado por:

$$n_s = -C_\rho u \frac{dE}{dH} = -C_\rho u V_p g (\rho - \bar{\rho}) \quad (27)$$

Onde C_ρ é a concentração em volume das partículas com densidade ρ no leito com densidade média $\bar{\rho}$ e u é a velocidade de penetração da partícula sob ação do gradiente de energia potencial e na ausência de qualquer força dispersiva. O sinal negativo indica que cada partícula tenderá a se mover de modo a minimizar a energia potencial do sistema.

Oposto ao fluxo de estratificação há um fluxo difusivo causado devido a interações partícula-partícula e partícula-fluido. Este fluxo pode ser descrito como um processo de difusão Fickiana clássica do tipo:

$$n_D = -D \frac{dC_\rho}{dH} \quad (28)$$

No qual o coeficiente de difusão D depende da granulometria e formato da partícula e do mecanismo de expansão. Neste caso, o sinal negativo indica que as partículas tenderão a se mover de modo a minimizar as diferenças de concentrações ao longo da altura do leito. Um estado de equilíbrio dinâmico existe quando a tendência das partículas estratificarem sob influência da diminuição de energia potencial é contrabalanceada pela tendência de se dispersarem sob ação do gradiente de concentração gerado pela própria estratificação. Este equilíbrio dinâmico ocorre quando $n_D = -n_s$, de forma que:

$$\frac{dC_\rho}{dH} = -\frac{u V_p g}{D} C_\rho (\rho - \bar{\rho}) \quad (29)$$

Que pode ser reescrito em termos da altura relativa do leito $h = H/H_b$, onde H_b é a profundidade total do leito, e em termos de uma constante específica de estratificação, dada por:

$$\alpha = \frac{uV_p g H_b}{D} \quad (30)$$

De modo que:

$$\frac{dC_\rho}{dh} = -\alpha C_\rho [\rho - \bar{\rho}(h)] \quad (31)$$

Desta forma, α é um parâmetro único que pode ser usado para descrição do processo de estratificação, sendo independente da densidade da partícula e, portanto, da composição do leito. Assim, em um leito de partículas esféricas de tamanho uniforme, todas as partículas possuem o mesmo valor de α . A solução da equação (31) fornece o perfil vertical de concentração das partículas com densidade ρ ao longo do leito após a estratificação de equilíbrio ser alcançada. Esta solução deve satisfazer as seguintes condições:

$$\int_0^1 C_\rho dh = C_\rho^f \quad \text{para todo } \rho \quad (32)$$

$$\int_0^\infty C_\rho d\rho = 1 \quad 0 \leq h \leq 1 \quad (33)$$

Onde C_ρ^f é a distribuição densimétrica da alimentação em volume, a qual pode ser determinada a partir de ensaios laboratoriais de afunda-flutua. As diferentes faixas densimétricas assim obtidas podem então serem usadas para discretizar a equação (31) expressando-a da forma:

$$\frac{dC_i(h)}{dh} = -\alpha C_i(h) [\rho_i - \bar{\rho}(h)] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (34)$$

O sistema de equações assim obtido deve ser solucionado levando em conta as seguintes condições:

$$\bar{\rho}(h) = \sum_{i=1}^n C_i(h)\rho_i, \quad \sum_{i=1}^n C_i(h) = 1 \quad e \quad C_i^f = \int_0^1 C_i(h)dh \quad (35)$$

Após a resolução do sistema de equações apresentado acima, o teor de sólidos em massa Y e a recuperação R dos componentes nos produtos leve e denso podem ser calculados. Supondo que se queira saber o teor de sólidos bem como a recuperação de um dado componente de densidade ρ_j no produto leve após a divisão do leito na altura h_s , têm-se que:

$$Y(h_s) = \frac{\int_{h_s}^1 \bar{\rho}(h)dh}{\int_0^1 \bar{\rho}(h)dh} \quad (36)$$

$$R_j(h_s) = \frac{\int_{h_s}^1 C_i(h)dh}{\int_0^1 C_i(h)dh} \quad (37)$$

Uma solução analítica para o caso particular de misturas binárias em jiges descontínuos ($n = 2$) foi apresentada no trabalho original desenvolvido por King (1987). O emprego do modelo para sistemas multicomponentes, no qual a solução analítica não é possível, foi posteriormente abordado por Tavares e King (1995), juntamente com o desenvolvimento do modelo para o caso de jiges contínuos. Para tal, foram também levados em conta a influência do transporte horizontal do leito, do mecanismo de divisão (corte) do leito estratificado, bem como da presença de múltiplos estágios de jigagem (jiges com múltiplos compartimentos) (Figura 13).

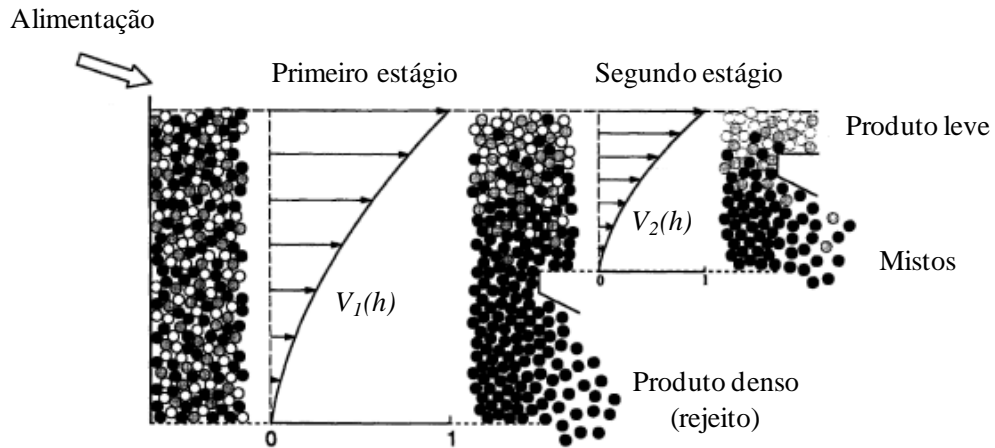


Figura 13: Perfis de estratificação em jig contínuo de duplo estágio.
Fonte: modificado de Tavares e King (1995).

Tavares e King (1995) compararam a capacidade preditiva do modelo com dados reais de separação medidos para vários jiges Baum e Batac operando com diferentes variedades de carvões. Para cada caso, o valor ótimo de α foi estimado por meio do melhor ajuste entre os teores e recuperações de produto obtido experimentalmente e aqueles gerados pelo modelo. Os menores valores de α encontrados para jiges contínuos industriais sugerem que a estratificação em jiges descontínuos é mais precisa. Contudo, isto pode ser um indicativo que o tempo de residência do leito no interior dos jigues contínuos foi insuficiente para se alcançar o perfil de estratificação de equilíbrio.

Uma das principais limitações do modelo de Tavares e King (1995) é o fato de ser válido somente para sistemas contendo partículas de tamanho e formato uniforme. Rao (2007) incorporou o efeito da presença de partículas de diferentes tamanhos considerando que α e o diâmetro da partícula d_j estão relacionados por uma lei de potência da forma:

$$\alpha = A(d_i)^b \quad (38)$$

onde A e b são parâmetros relacionados à estratificação. Substituindo esse valor de α na equação (34):

$$\frac{dC_{ij}(h)}{dh} = -A(d_i)^b C_{ij}(h) [\rho_i - \bar{\rho}(h)] \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (39)$$

Onde $C_{ij}(h)$ representa o perfil de concentração da espécie de densidade i e tamanho j . Simulações com misturas contendo partículas de várias densidades e dois tamanhos (15,75 e 1 mm) demonstraram que o grau de estratificação das partículas finas foi consideravelmente menor em comparação com o das partículas grossas.

De modo geral, as contribuições na teoria da energia potencial derivadas do modelo proposto por King (1987, 2001) e Tavares e King (1995) são de grande valia, uma vez que permitem estimar o perfil de concentração dos componentes na estratificação de equilíbrio e assim prever o teor e recuperação de produto para uma dada altura de corte, tanto para processos contínuos quanto descontínuos. Uma particular vantagem em relação a modelos empíricos baseados em curvas de partição é que somente um parâmetro precisa ser estimado a partir de dados experimentais, o coeficiente específico de estratificação α , o qual fornece uma indicação imediata do desempenho da jigagem (quanto maior, melhor é o desempenho). Todavia, de forma similar à teoria de Mayer, o modelo limita-se a prever o perfil de estratificação no equilíbrio, não constituindo, de fato, um modelo cinético do processo. Ainda, parece incapaz de estabelecer uma relação com os parâmetros operacionais da jigagem, os quais certamente influenciam o grau de estratificação final do leito.

Por fim, o estudo recente da validação do modelo realizado por Woollacott, Bwalya e Mabokela (2015) demonstrou que a condição referente a independência de α em relação a composição densimétrica da mistura não foi necessariamente obedecida. Particularmente, a razão α/H_b aumentou na medida em que se elevou o número de componentes da mistura, ao contrário de manter o valor constante conforme estabelecido por King (1987, 2001) e Tavares e King (1995). Segundo os autores do estudo, as predições do modelo foram relativamente insensíveis a mudanças do valor de α , de forma que a tendência verificada pode ser espúria. Contudo, a fim de elucidar a questão, convém verificar em futuros estudos se é de fato conveniente assumir o coeficiente específico de estratificação α como independente da composição do leito.

2.3 FATORES QUE AFETAM A ESTRATIFICAÇÃO EM JIGUES DESCONTÍNUOS

Conforme previamente mencionado, diversos são os fatores que podem influenciar a estratificação do leito de jigagem, os quais envolvem características relacionadas à composição do leito, aos parâmetros operacionais fixados, ao tipo de fluido pulsante (seção 2.2.2), bem como ao modelo de jigue utilizado. Em jigues de operação contínua, a taxa de alimentação, o teor de sólidos na polpa, a velocidade de transporte longitudinal do leito e o método de extração dos produtos estão entre as variáveis adicionais a serem consideradas (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Todavia, a operação de jigues contínuos foge ao escopo do presente estudo, de modo que o foco foi orientado somente aos elementos que podem influenciar a estratificação em jigues descontínuos. Dentre estes, citam-se: a densidade, o tamanho e a forma das partículas do leito; a amplitude, frequência e duração das pulsações; e a espessura do leito bem como a altura do ponto de separação (ponto de corte). O efeito de variações discretas nestas propriedades sobre o perfil de estratificação do leito foi e tem sido o objeto de alguns trabalhos (KIRCHBERG; HENTZSCHEL, 1957; LILL; SMITH, 1960; RONG; LYMAN, 1992; NAUDÉ et al., 2013; PITA; CASTILHO, 2016; WOOLLACOTT; SILWAMBA, 2016), embora o número de estudos atuais disponíveis sobre o tema sejam, aparentemente, escassos.

2.3.1 Densidade de partícula

De modo geral, a influência de diferenças discretas de densidade sobre a estratificação do sistema fez parte dos estudos primários que visavam compreender os fundamentos da segregação de partículas em jigues. Uma vez que a separação por densidade é o principal propósito da jigagem, os estudos mais recentes têm focado nos processos de segregação por tamanho e forma de partículas, a fim de inibi-los ou conduzi-los de forma favorável à separação por densidade.

Utilizando misturas binárias formadas por esferas de vidro e aço (grande diferença de densidade) e por esferas de vidro e de porcelana (pequena diferença de densidade), Kirchberg e Hentzschel (1957) observaram o processo de estratificação por densidade usando o mesmo ciclo harmônico exibido na Figura 5

(seção 2.2.1). Os resultados revelaram que durante os primeiros ciclos de jigagem, o comportamento do leito é similar ao caso em que sua composição é homogênea, ocorrendo formação de uma camada fluida seguida pela dispersão do leito. Contudo, à medida que as pulsações evoluem, partículas densas começam a sedimentar, inicialmente na camada fluida e após nas camadas dispersas do leito. As partículas leves sedimentam em menor velocidade ao passo que se elevam mais durante a fase de impulsão. Assim, o processo de segregação evolui da base para o topo do leito, podendo ser entendido como um deslocamento das partículas leves pelas partículas densas.

O perfil de estratificação resultante depende da diferença de densidade entre os componentes leve e denso. Para pequenas diferenças, ocorre a formação de uma camada inferior rica no componente denso, uma camada superior abundante no componente leve, e uma camada mista entre as duas nas quais ambos os componentes encontram-se misturados. Para diferenças significativas de densidade, ocorre a formação de duas camadas distintas, cada qual rica em um dos componentes. Neste caso, é possível que as duas camadas oscilem fora de fase durante a pulsação, uma vez que a camada inferior, rica em material denso, tende a se desprender da camada superior leve e sedimentar rapidamente, enquanto esta é mais propensa a ser elevada a maiores alturas devido à força de arraste do fluido. A ocorrência desse comportamento foi reforçada pelos resultados obtidos no recente estudo de VIDUKA et al. (2013).

Lill e Smith (1960) mediram as velocidades de penetração de partículas intrusas de diferentes densidades (até $\rho_s \approx 10 \text{ g/cm}^3$) posicionadas sobre a superfície de um leito homogêneo de esferas ou placas de vidro ($\rho_s = 2,54 \text{ g/cm}^3$). Foi observado que a velocidade de penetração aumentou de forma linear à medida que a densidade do intruso colocado sobre o leito aumentou. Na prática, isto significa que um número menor de ciclos é necessário na separação de materiais com grandes diferenças de densidade, resultando em menores tempos de residência no equipamento e assim maiores capacidades de processamento.

2.3.2 Tamanho de partícula

A regra geral para jigues é a mesma estabelecida para a maioria dos concentradores gravimétricos: quanto menor o tamanho de partícula da alimentação, menos precisa é a separação como um todo (OLAJIDE; CHO, 1987; MUKHERJEE; MISHRA, 2006; KOWOL; MATUSIAK, 2015; PITA; CASTILHO, 2016). De fato, não é por acaso que a faixa de tamanho da alimentação seja um dos principais critérios de avaliação da aplicação não somente da jigagem, mas de qualquer método de concentração gravimétrica (SAMPAIO; TAVARES, 2005; WILLS, 2006).

Em geral, uma mistura formada por partículas de mesma composição e diferentes tamanhos submetidas a contínuas pulsações verticais em um jigue tende a se classificar de maneira que os grãos maiores se concentrem nas camadas inferiores e os menores nas superiores, o que sugere uma predominância do mecanismo de sedimentação retardada (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Durante o processo, a estratificação do leito evolui de forma análoga ao que ocorre em leitos de tamanho uniforme com partículas de diferentes densidades, de modo que as partículas maiores se comportam como as partículas densas e as menores como as leves (KIRCHBERG; HENTZSCHEL, 1957). Contudo, ao contrário da segregação por densidade, a segregação por tamanho possui caráter não monotônico, isto é, a intensidade e mesmo a direção do deslocamento de partículas de diferentes tamanhos podem mudar à medida que se varia a razão de tamanho do sistema (razão entre o tamanho máximo e mínimo das partículas constituintes do leito). Tendo isso em mente, Woollacott e Silwamba (2016) analisaram o efeito que a variação da razão de tamanho do sistema teria sobre o perfil de estratificação em um jigue hidráulico operando em batelada com misturas binárias de esferas de vidro de diferentes tamanhos. Os resultados revelaram quatro tipos de perfis característicos de estratificação, conforme exibido na Figura 14.

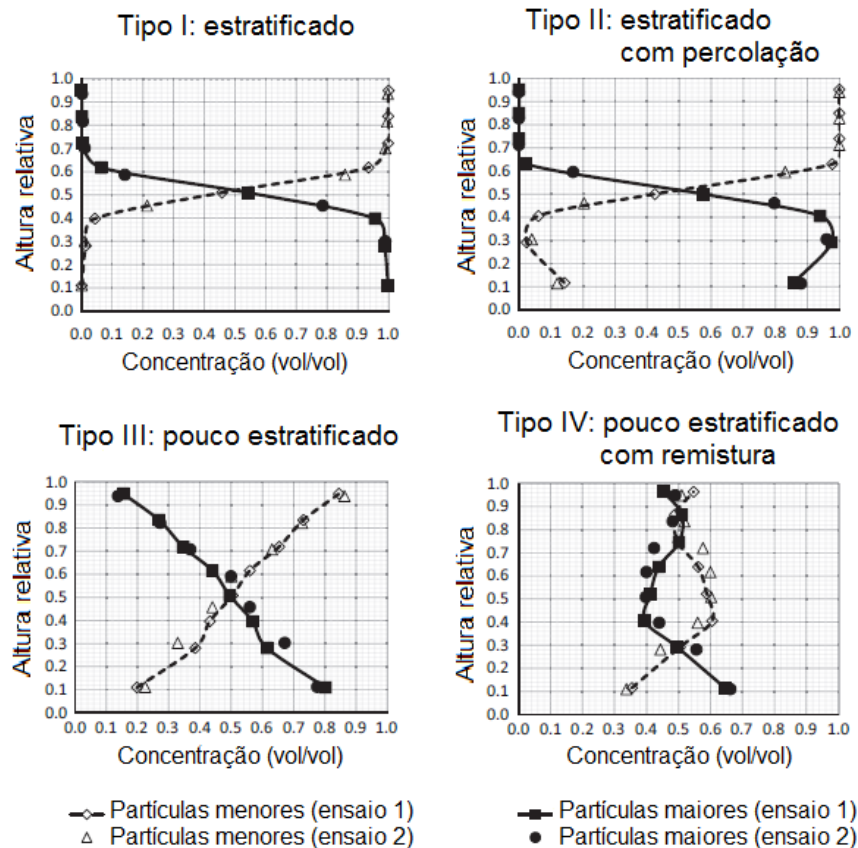


Figura 14: Diferentes perfis de estratificação decorrentes da variação da razão de tamanho entre as partículas constituintes do sistema.
Fonte: modificado de Woollacott e Silwamba (2016)

É possível observar que, para razões de tamanho consideradas altas (entre 1,7:1 e 2,3:1), uma elevada estratificação foi observada (tipo I), com uma distribuição padrão de partículas maiores no fundo e menores no topo. Contudo, razões de tamanhos ainda maiores (entre 2,5:1 e 3,5:1) resultaram em considerável percolação das partículas menores através do leite, reportando assim ao produto de fundo (tipo II). No caso em que baixas razões de tamanho foram utilizadas (entre 1,17:1 e 1,25:1), a estratificação do leite foi reduzida, não existindo uma fronteira definida entre as fases, mas sim um gradiente de concentração vertical (tipo III). Por fim, para o caso específico em que a razão de tamanho foi de 1,33:1, um perfil pouco estratificado e com remistura dos componentes foi obtido (tipo IV). Esta remistura, afirmam os autores, pode estar associada à presença de correntes convectivas no sistema, as quais influenciam especialmente as partículas de menor tamanho. Tendo em conta que tal variedade no perfil de segregação foi obtida para leites de densidade uniforme sob condições fixas de operação, é possível imaginar o grau de

complexidade que a segregação por tamanho acrescenta na avaliação prática da separação em jiges.

Por fim, vale prestar atenção aos resultados aparentemente contrastantes obtidos em testes em escala piloto (jigue Denver) descritos por Mukherjee e Mishra (2006). Em seu estudo, o efeito do tamanho sobre a estratificação para três classes de partículas (-10+8 mm, -8+6 mm e -6+3 mm) foi avaliado para diversas condições de pulsação, sendo que a classe mais grosseira apresentou melhor separação em todos os casos. Por outro lado, testes similares realizados com misturas das três classes de tamanho resultaram em uma estratificação tanto melhor quanto maior era a fração volumétrica de finos (-6+3 mm) no sistema. Os autores atribuem esse resultado à menor porosidade do leito misto contendo um excesso de partículas finas, ocasionando um maior efeito de arraste e assim permitindo uma fluidização adequada do leito mesmo em baixas amplitudes. Contudo, isso não esclarece o fato que a separação no leito com excesso de finos também foi alta em médias e altas amplitudes de pulsação.

2.3.3 Formato de partícula

O padrão de segregação devido a diferenças de formato de partícula, não somente em jiges, mas em qualquer sistema sujeito a vibrações verticais externas, tende a ser orientado pela densificação das camadas inferiores do leito. Neste caso, a força motriz da segregação está relacionada a diferenças de empacotamento, ou compactidade (fração de sólidos em uma unidade total de volume), entre componentes do leito ocasionadas por diferenças na geometria das partículas. Assim, as partículas que se concentram nas zonas inferiores do sistema são aquelas que, quando puras, produzem leitões mais densos (ABREU; TAVARES; CASTIER, 2003; ESCUDIÉ et al., 2006). Em outras palavras, a segregação por forma de partícula se sucede de modo que o sistema evolui para um estado com o mais baixo nível de energia potencial, assim como previsto por Mayer (1950, 1964). Conforme indicado no recente estudo de Cazacliu et al. (2014), a separação satisfatória de materiais com densidades bastante próximas (no caso, concreto e material cerâmico) pode ser alcançado devido a diferenças significativas entre o grau de empacotamento dos mesmos.

Ainda, no caso da jigagem, outro fator que deve ser levado em consideração é o arraste diferencial sobre partículas com geometrias distintas. Dependendo da orientação em relação ao fluxo ascendente, partículas lamelares sofrem um arraste mais intenso por estarem mais sujeitas a componente normal (perpendicular à superfície da partícula) da força de arraste exercido pelo fluido (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002). Em acordo com esse fenômeno, observou-se no recente estudo de Pita e Castilho (2016), envolvendo a separação de plásticos em um jigue Denver, que a precisão da jigagem foi maior quando o componente leve possuía formato mais lamelar, facilitando seu deslocamento em direção as camadas superiores do leito. Por outro lado, a contaminação do produto leve aumentou quando da presença de partículas lamelares do componente denso no sistema.

2.3.4 Amplitude e frequência de pulsações

Durante a jigagem, o deslocamento vertical do sistema deve ser suficiente para permitir que partículas com diferentes densidades possam se movimentar e atingir diferentes posições no leito. Considerando que a máxima mobilidade das partículas ocorre em condições de máxima dispersão do leito, Kirchberg e Hentzschel (1957) analisaram a influência da amplitude e da frequência de pulsações sobre o fenômeno de dispersão de leitos homogêneos. Como resultado, constatou-se que baixas amplitudes não permitem a formação de um leito suficientemente disperso ao passo que amplitudes muito altas dispersam consideravelmente o leito, porém sofrem intervenção excessiva do contrafluxo descendente do fluido antes do fim do ciclo de expansão. Da mesma forma, frequências de pulsação demasiado altas não permitem que a onda de dispersão se propague por todo o leito, uma vez que o fluxo muda rapidamente de direção, enquanto que frequências baixas geralmente estão associadas com baixas velocidades de fluido, o que pode resultar em um fluxo insuficiente para elevar totalmente as partículas do leito. Depreende-se disso que, para uma separação eficiente, a amplitude de pulsação do leito deve ser tanto maior quanto mais grosseiras forem as partículas constituintes do leito (MUKHERJEE; MISHRA, 2006). Por outro lado, o uso de elevadas amplitudes de pulsação em leitos com partículas finas tende a prejudicar a estratificação (HORI et al., 2009b), o que possivelmente

ocorre devido a remistura causada pela injeção de demasiada energia no leito. Em suma, existem condições limites de amplitude e frequência de pulsação fora das quais a dispersão do leito como um todo é prejudicada. Essas condições, por sua vez, irão depender das características do material formador do leito.

2.3.5 Número de ciclos de jigagem

O número de ciclos de pulsação aplicados ao leito (ou ainda, o tempo de jigagem sob condições fixas de pulsação) possui em efeito cumulativo sobre a estratificação: quanto mais ciclos forem aplicados, mais próximo o leito se aproxima da estratificação de equilíbrio. Rong e Lyman (1992) observaram que a estratificação de traçadores densimétricos ($1,3 < \rho_s < 2,0 \text{ g/cm}^3$) em jiges Baum evolui rapidamente até $t = 180 \text{ s}$. A partir deste ponto, a taxa de estratificação evolui mais lentamente até $t = 300 \text{ s}$, quando então um estado próximo do equilíbrio é alcançado e a estratificação aparentemente cessa. Contudo, a estratificação continuou evoluindo para $t > 300 \text{ s}$ quando as partículas do leito foram menores que 8 mm , sugerindo que um maior tempo de estratificação é necessário para atingir o equilíbrio em leitos contendo partículas finas.

Sampaio et al. (2016) observaram um comportamento similar durante a estratificação de misturas ternárias de agregados em jige pneumático descontínuo, porém, com uma cinética ainda mais rápida. A maior parte da estratificação ocorreu quando $t \leq 30 \text{ s}$, ao passo que nenhum ganho significativo foi observado para $t > 120 \text{ s}$, indicando que este foi aproximadamente o tempo necessário para se atingir a estratificação de equilíbrio. De fato, é esperado a priori que a cinética de estratificação em jiges pneumáticos seja mais elevada que em jiges hidráulicos, uma vez que no ar as partículas sedimentam centenas de vezes mais rápido do que na água (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

2.3.6 Outros fatores

A espessura do leito, a altura do ponto de corte e a proporção entre os componentes da mistura são outros fatores que afetam a estratificação em jiges

descontínuos e estão estreitamente relacionados. Ainda que estudos que avaliem a influência direta da espessura do leito na estratificação sejam escassos, é possível pressupor que quanto mais profundo é o leito do jig, maior será o tempo necessário para a estratificação, uma vez que as partículas do sistema precisarão percorrer uma maior distância até atingirem suas posições de equilíbrio. Esta hipótese vai ao encontro dos supramencionados resultados obtidos por Lill e Smith (1960) se considerado que a velocidade de penetração das partículas independe de sua posição vertical no leito.

A altura do ponto de corte (ou de separação) dos produtos de jigagem depende tanto da espessura do leito quanto da proporção de material leve ou denso presentes no sistema. Por exemplo, o aumento da proporção de material denso na alimentação irá resultar em um maior teor de produto denso se considerada uma mesma altura de corte, podendo-se optar também por manter o teor constante e aumentar a recuperação de produto mediante a elevação do ponto de corte (RIAZI; GUPTA, 2015; WILLS, 2006). Ainda, Feil, Sampaio e Wotruba (2012) observaram que a redução da espessura do leito é desejável quando o produto-alvo é o componente leve e existe grande proporção de material denso no sistema, uma vez que maiores profundidades de leito exigem amplitudes de pulsação mais elevadas (a fim de erguer o leito), o que pode aumentar a contaminação do produto leve com material denso.

2.4 CONVECÇÃO GRANULAR

2.4.1 Conceitos gerais

Um fluido contido em um recipiente estático com paredes rígidas e aquecido a partir de sua base (como uma panela sobre a chama de um fogão) estará sujeito a um gradiente vertical de temperatura derivado do aquecimento desigual de suas extremidades. À medida que o fluxo de calor aumenta acima de um valor crítico, a transferência de calor no sistema, primariamente na forma condutiva, passa a ser dominada pelo movimento macroscópico do fluido, o qual define o estado de transferência convectiva (INCROPERA; DEWITT, 2007). Mais precisamente,

diferenças de densidades são geradas no fluido em função do gradiente térmico existente, de modo que o fluido próximo à base recebe calor, torna-se menos denso e sobe. Por outro lado, o fluido menos quente das camadas superiores (e, portanto, mais denso) se move ocupando posições inferiores, sendo aquecido e ascendendo novamente, dando prosseguimento ao processo. Este contínuo movimento de recirculação define assim a existência de uma *corrente* ou *fluxo convectivo* no sistema (GREEN; PERRY, 2008; KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

A situação mencionada acima ilustra um exemplo ordinário de convecção natural, onde diferenças de densidades geradas por gradientes de temperatura induzem um movimento em massa do fluido no interior do sistema (INCROPERA; DEWITT, 2007). De modo análogo, quando um material granular é submetido à agitação ou vibração vertical (na mesma direção da força gravitacional), é possível que ocorra a formação de um padrão de circulação interna muito similar ao que ocorre na convecção natural em fluidos, do qual deriva o nome de *convecção granular* dado ao fenômeno. Assim, a ocorrência deste fenômeno está ligada a transferência unidirecional de energia ao sistema particulado (isto é, a partir de uma das extremidades do leito de partículas). Em equipamentos industriais, isto geralmente ocorre através do contato das partículas com uma superfície vibratória (calhas vibratórias, funis de alimentação, etc.), um container rotativo (como tambores rotativos e moinhos de bolas) ou ainda com o interior de um recipiente que contém um fluido pulsante (tal como ocorre na jigagem).

Uma das primeiras observações deste fenômeno é atribuída à Faraday (1831), o qual constatou que grãos de areia depositados sobre um prato vibratório formam uma pilha na porção central de sua superfície e apresentam uma circulação interna dos grãos: partículas contidas no seio do leito sobem até a superfície através da pilha central, deslizam para os lados e se movimentam novamente em direção ao centro na porção mais baixa do leito. Durante mais de um século pouca ou nenhuma atenção foi dada ao fenômeno. Contudo, a partir de meados dos anos 80 surgiu um interesse renovado pelo tema. Desde então, uma miríade de novos estudos que visam entender a dinâmica e os mecanismos por trás da convecção granular têm surgido (SAVAGE, 1988; EVESQUE; RAJCHENBACH, 1989; LAROCHE; DOUADY; FAUVE, 1989; GALLAS; HERRMANN; SOKOFOWSKI, 1992; TAGUCHI, 1992; KNIGHT; JAEGER; NAGEL, 1993; WASSGREN; BRENNEN; HUNT, 1996; WASSGREN, 1997; SHINBROT; MUZZIO, 1998; RAMÍREZ; RISSO; CORDERO,

2000; YANG; HSIAU, 2000; ARANSON; TSIMRING, 2006; GARCIMARTÍN et al., 2007; PASTOR et al., 2007; MAJID; WALZEL, 2009; HSIAU et al., 2011; XUE et al., 2013; ZHANG et al., 2014; WINDOWS-YULE; PARKER, 2014; WINDOWS-YULE; DOUGLAS; PARKER, 2015; ZIDI; HASSEINE; MOUMMI, 2017).

De forma geral, muitos destes estudos compartilham uma metodologia comum: a análise do movimento de partículas uniformes contidas em recipientes retangulares ou cilíndricos dotados de paredes rígidas e com uma base flexível vibratória. Esta, por sua vez, encontra-se posicionada sobre um agitador eletromagnético. Através do agitador é possível aplicar uma vibração senoidal na direção vertical, sendo possível variar amplamente a frequência e a amplitude do pulso. Quando realizada, a detecção do deslocamento das partículas é feita através do uso de câmeras de alta velocidade, imagem por ressonância magnética (IRM), velocimetria por imagem de partículas (PIV) ou mesmo mediante tomografia por emissão de pósitrons (TEP). Os dados gerados costumam ser usados na validação de modelos numéricos.

De modo geral, os fluxos convectivos observados nestes estudos apresentam uma configuração bem definida. Esta consiste no movimento ascendente de partículas na porção central do leito, as quais, ao atingir a superfície livre do mesmo, se dirigem às paredes laterais do recipiente, descendo ao longo das mesmas até a base do leito e reiniciando novamente o ciclo. O andamento do processo se assemelha a uma avalanche estacionária, que se mantém simétrica em relação ao centro do leito. Além disso, um ponto comum entre os diversos estudos é a influência determinante dos parâmetros de vibração do sistema, isto é, da frequência e amplitude de oscilação do leito, sobre a intensidade do fluxo convectivo. Para tanto, Evesque e Rajchenbach (1989) introduziram o parâmetro adimensional Γ , denominado de *aceleração vibracional* ou ainda *aceleração adimensional*, dado por:

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g} = \frac{A \cdot 4\pi^2 f^2}{g} \quad (40)$$

onde A é a amplitude e f a frequência de oscilações. O fluxo convectivo normalmente aparece quando a excitação do sistema é forte o suficiente para vencer a força gravitacional, isto é, para $\Gamma > 1g$. Via de regra, a intensidade do fluxo convectivo aumenta com o valor de Γ . Para valores constantes de Γ , a velocidade da

corrente convectiva aumenta de modo monotônico com o aumento da amplitude de oscilação (WASSGREN, 1997; YANG; HSIAU, 2000). Por outro lado, ao se manter Γ constante e aumentar continuamente a frequência de vibração, os padrões de convecção observados no sistema podem ser alterados. Em estudo recente, Zhang et al. (2014) observaram que o uso de $f > 20$ Hz pode resultar no surgimento de múltiplas correntes convectivas assimétricas e com diferentes dinâmicas individuais. Tais frequências, contudo, estão muito além daquelas possíveis de serem empregadas na jigagem.

A despeito do intenso debate existente sobre os mecanismos responsáveis por induzir o fluxo convectivo, o mais notável deles está relacionado à natureza dissipativa de materiais granulares, e particularmente ao atrito gerado devido as interações entre as partículas contidas no sistema e destas com as paredes do recipiente. Este mecanismo tem sido denominado na literatura como "sidewall-driven convection" (WASSGREN, 1997; SCHRÖTER et al., 2006; WINDOWS-YULE, 2015), ainda que possa eventualmente aparecer com outros nomes. Considerando um leito agitado verticalmente a partir de sua base, o movimento durante a fase de elevação ocorre com o leito inicialmente empacotado (como se fosse um corpo único), exercendo assim crescente pressão sobre as paredes laterais. Esta pressão, por sua vez, resulta em um cisalhamento que age na direção oposta ao movimento ascendente das partículas, retardando a dilatação das mesmas nas proximidades das paredes. Por outro lado, na fase de consolidação o leito se encontra dilatado, resultando em um maior espaço livre para o movimento de queda das partículas próximas às paredes¹. O efeito líquido desta assimetria na dissipação de energia resulta no movimento descendente das partículas próximas as paredes laterais do recipiente. Por sua vez, um movimento ascendente é induzido nas partículas contidas na porção central do leito a fim de conservar o fluxo de massas no sistema. A Figura 15 mostra um exemplo do fluxo convectivo gerado.

Assim, a configuração das paredes do recipiente no qual o leito está contido é um fator crucial no ensejo da convecção. Quanto maior for a dissipação de energia nas paredes (relacionado ao coeficiente de atrito do material que as constitui), mais intenso será o fluxo convectivo. Evidências também sugerem que o efeito do fluido intersticial sobre a convecção é desprezível, sendo esta dominada pelas interações

¹ É interessante notar a semelhança deste mecanismo de oscilação com aquele descrito para jiges por Kirchberg e Hentzschel (1957) na seção 2.2.1.

entre as partículas e as paredes (EVESQUE; RAJCHENBACH, 1989; KNIGHT; JAEGER; NAGEL, 1993). Ainda, a espessura (profundidade) do leito e a forma do recipiente em que o mesmo se encontra desempenham um papel importante na formação do fluxo convectivo. De modo geral, a convecção torna-se mais intensa à medida que se aumenta a profundidade do leito (HSIAU et al., 2011). Os resultados obtidos por Taguchi (1992) e Garcimartín et al. (2007) também sugerem que a velocidade de convecção é maior próxima à superfície do leito, de modo que para valores baixos de aceleração ($\Gamma \approx 1,2$), a célula convectiva se manifesta somente nesta região. Em relação à geometria do recipiente, Knight, Jaeger e Nagel (1993) e mais recentemente Majid e Walzel (2009) demonstraram ser possível reverter o sentido do fluxo convectivo (tornando-o ascendente nas paredes e descendente no centro) mediante o uso de recipientes com geometria cônica ou piramidal invertida.

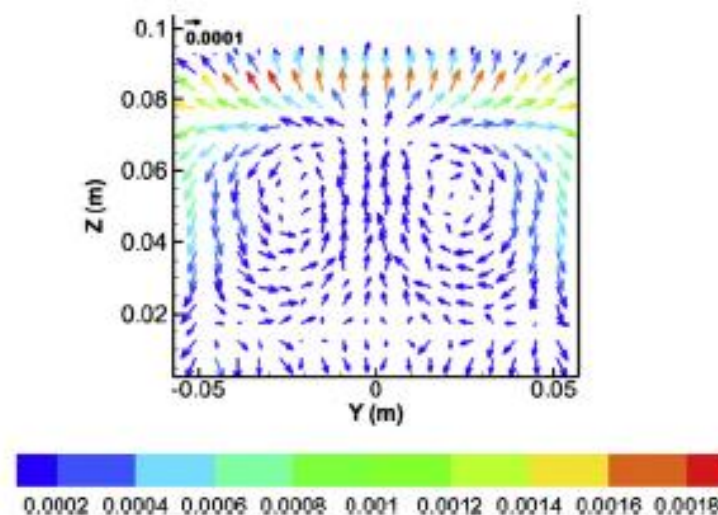


Figura 15: Simulação do fluxo convectivo em mistura de partículas esféricas de vidro de 5 a 10 mm. O leito com espessura de 100 mm estava contido em um cilindro de acrílico (200 x 120) mm submetido a uma vibração com amplitude de 1 mm e frequência de 40 Hz. A escala de cores representa a magnitude de cada vetor com base na discretização aplicada ao sistema. É possível observar que o fluxo é mais intenso próximo ao topo do leito.
Fonte: Jain, Metzger e Glasser (2013).

2.4.2 Convecção e segregação

Uma vez que envolve o transporte macroscópico de partículas ao longo do volume do leito, existe uma ligação direta entre a convecção granular e a segregação de partículas em leitos agitados verticalmente. Esta relação tem sido

estudada para o caso de diferenças entre características das partículas formadoras do leite, tais como diferenças no tamanho de partículas (KNIGHT; JAEGER; NAGEL, 1993; SHINBROT; MUZZIO, 1998; HONG; QUINN; LUDING, 2001; ROSATO et al., 2002; FERNANDO; WASSGREN, 2003; HUERTA; RUIZ-SUÁREZ, 2004; CIAMARRA et al., 2006; ELLENBERGER; VANDU; KRISHNA, 2006; SCHRÖTER et al., 2006; METZGER; REMY; GLASSER, 2011; JAIN; METZGER 2013), na densidade de partículas (HSIAU; CHEN, 2002; CIAMARRA et al., 2006; KLEIN et al., 2006; YANG, 2006; ZEILSTRA; HOEF; KUIPERS, 2008; TAI; HSIAU; KRUELLE, 2010; YANG et al., 2015) e no coeficiente de restituição das partículas (elasticidade) (BRITO et al., 2008). Embora a convecção presumivelmente influencie a segregação de partículas com diferentes geometrias, estudos envolvendo o tema são pouco conhecidos.

O assim chamado "Efeito Castanha do Pará" (do inglês *Brazil Nutt Effect*, BNP) (ROSATO et al., 1987) é um exemplo conhecido da superposição entre convecção e segregação por tamanho. Neste caso, partículas grandes contidas em um leite formado por partículas de vários tamanhos tenderão a subir até a superfície, uma vez que o espaço deixado abaixo das partículas maiores durante cada pulso tende a ser facilmente preenchido pelas partículas menores. Deste modo, as partículas maiores sobem até o topo do leite seguindo o fluxo convectivo ascendente. Uma vez lá, estas partículas se dirigem às paredes e, se forem demasiado grandes, não conseguem penetrar na fina camada descendente do fluxo convectivo, permanecendo "presas" nas bordas (KNIGHT; JAEGER; NAGEL, 1993). No caso de pequenas diferenças de tamanho, as partículas maiores podem ser readmitidas no fluxo, contribuindo assim para a remistura do sistema.

Por outro lado, o processo inverso de segregação pode ocorrer se a amplitude de oscilação do leite for alta e a profundidade considerável, de forma que os espaços existentes sejam grandes o suficiente para permitir a sedimentação de partículas maiores (SHINBROT; MUZZIO, 1998; HONG; QUINN; LUDING, 2001). Neste caso, diz-se ocorrer o chamado "Efeito Castanha do Pará Inverso" (do inglês *Reverse Brazil Nutt Effect*, RBNP), uma vez que partículas maiores tendem a ocupar as zonas inferiores do leite, enquanto as menores ficam nas regiões superiores. A razão entre tamanhos bem como a proporção entre as partículas constituintes do sistema também desempenham um papel determinante na distribuição final das

partículas no leito, existindo casos em que a convecção pode contribuir tanto para segregação quanto para a remistura das partículas (ROSATO et al., 2002).

A relação entre convecção granular e segregação por densidade tem sido menos explorada na literatura. Yang (2006) analisou a segregação de misturas binárias de esferas de vidro e aço com tamanho uniforme ($d = 3$ mm) agitadas verticalmente por um agitador eletromagnético senoidal. Foi possível verificar que, assim como na segregação por tamanho, a convecção possui caráter ambivalente, podendo tanto beneficiar a segregação por densidade quanto a remistura dos componentes, sendo que a taxa de remistura aumentou com a aceleração vibracional do sistema. É interessante notar como este resultado se relaciona ao modelo de dispersão em jiges (TAVARES; KING, 1995), conforme discutido na seção 2.2.2. Este pontua que quanto mais energia for fornecida ao sistema, maior será o grau de remistura e mais longe da estratificação perfeita o sistema se encontrará.

Yang (2006) também observou que partículas mais densas tendem a se concentrar na zona central do leito, enquanto as partículas leves possuem maior tendência a assumirem posições próximas as paredes (Figura 16). Este perfil horizontal de concentração tornou-se mais intenso à medida que se aumentou a profundidade do leito, comportamento o qual foi também demonstrado em experimentos similares realizados por Tai, Hsiau e Kruelle (2010). Outros estudos relevantes dedicados a examinar a conexão entre convecção e segregação por densidade geralmente envolvem condições bastante distintas daquelas encontradas na jigagem, tais como misturas formadas por partículas com *top size* de dezenas de micrômetros (ZEILSTRA; HOEF; KUIPERS, 2008; YANG et al., 2015) e acelerações muito mais altas que aquelas encontradas em jiges ($30 < f < 100$ Hz) (CIAMARRA et al., 2006; LIM, 2010; WINDOWS-YULE, 2015).

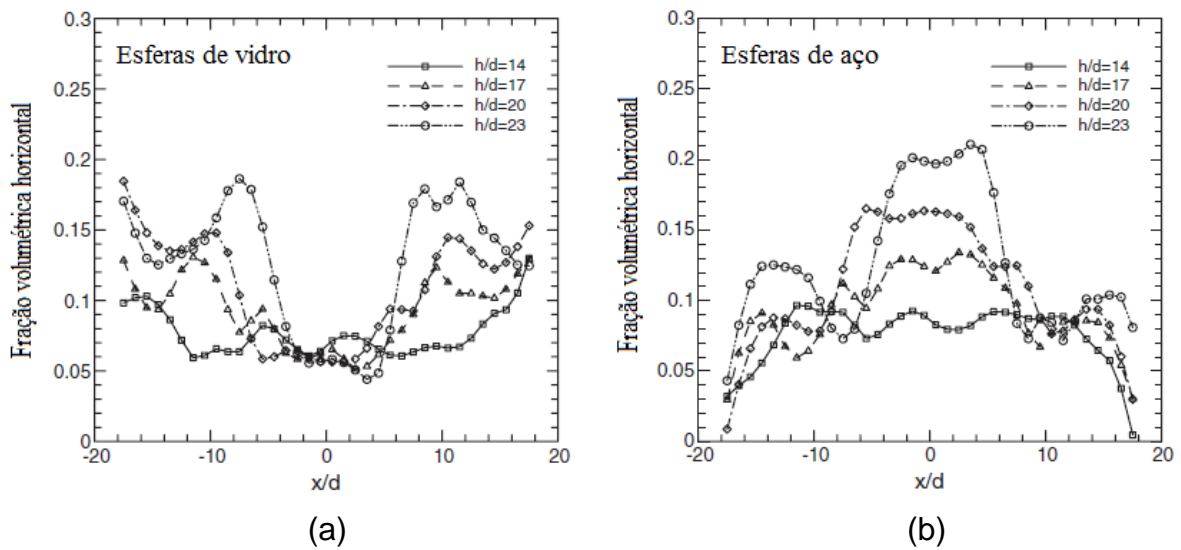


Figura 16: Perfil de segregação horizontal de misturas de esferas de (a) vidro e (b) aço para diferentes espessuras de leito h/d (onde $d = 3$ mm é o diâmetro das partículas). A aceleração e a frequência de vibrações usadas foram $\Gamma = 3$ e $f = 15$ Hz, respectivamente. Pode-se observar que leitos mais profundos apresentam um maior grau de segregação horizontal.

Fonte: adaptado de Yang (2006).

2.4.3 Convecção granular e jigagem

Conforme supramencionado, a influência da convecção na segregação de partículas em sistemas vibratórios tem sido objeto de intensa pesquisa. O principal foco prático destes estudos têm sido encontrar maneiras de entender, e assim evitar, a ocorrência de segregação em equipamentos de processo, tais como misturadores (ALEXANDER; MUZZIO; SHINBROT, 2003; CONWAY et al., 2005; ALIZADEH; BERTRAND; CHAOUKI, 2014), funis de alimentação (FRAIGE et al., 2008) e sistemas com leitos fluidizados (CANO-PLEITE et al., 2017). Uma vez que a maior parte dos produtos granulados industriais (alimentos, fármacos, fertilizantes, munições, etc.) são constituídos por apenas um componente (com densidade e geometria uniformes), é normal que a segregação por tamanho seja a ocorrência dominante e, portanto, a mais intensamente investigada.

Por outro lado, a ausência de estudos no tema revela que o fenômeno de convecção granular permanece inexplorado no âmbito da jigagem. Convém notar, entretanto, que uma referência ao mesmo é feita no recente trabalho de Woollacott e Silwamba (2016), os quais, ao analisarem a segregação por tamanho em um jigge laboratorial, supuseram que correntes convectivas poderiam estar envolvidas na

remistura de partículas menores dentro do sistema, superpondo-se ao efeito da percolação intersticial.

A operação em jigsawes reúne as condições típicas encontradas em sistemas granulares sujeitos à convecção: um leito particulado contido em um recipiente rígido sujeito a oscilações verticais vigorosas produzidas a partir de sua base. Todavia, visto que a pulsação do leito de jigsawagem difere daquela usualmente empregada em estudos sobre convecção granular, uma abordagem distinta pode ser necessária. Estas diferenças estão basicamente relacionadas à injeção de energia no leito e ao modo de medir a excitação do mesmo.

Na grande maioria dos sistemas vibratórios abordados na literatura (seção 2.4.2), a energia de vibração do leito é fornecida por meio de uma placa metálica localizada na base do leito e montada sobre um agitador eletromagnético, o qual promove a oscilação da placa por meio de um pulso senoidal. Assim, no caso de baixas acelerações ($\Gamma < 1g$), o leito permanece aderido à placa, oscilando com a mesma. Em acelerações maiores, conforme descrito por Windows-Yule (2015), a placa transfere energia cinética por meio de colisões às partículas próximas da base do leito. Estas partículas, por sua vez, colidirão com bandas superiores, transmitindo gradualmente a energia cinética para o restante do sistema. Este gradiente de energia cinética, ou mais precisamente, de temperatura granular, pode desempenhar em alguns casos um importante papel na formação de correntes convectivas (HSIAU et al., 2011). Do mesmo modo, o impulso de formação de correntes convectivas é atribuído às forças dissipativas presentes no sistema, sendo a influência do fluido intersticial considerada desprezível (EVESQUE; RAJCHENBACH, 1989; KNIGHT; JAEGER; NAGEL, 1993).

Na jigsawagem, ainda que a transmissão de energia para o leito também ocorra a partir da base, o fluido que promove a pulsação percorre todo o volume do leito durante o golpe de impulsão (e também durante a fase de sucção, dependendo do ciclo imposto em jigsawes hidráulicos). Assim, o efeito de arraste do fluido intersticial é um fator que não pode ser desprezado. Somando a isso o efeito da perda de carga devido à passagem do fluido pelo leito (e também junto às paredes laterais), a possível existência de curtos circuitos, bem como a variedade de ciclos de jigsawagem existentes além do senoidal, então o fenômeno de convecção granular em jigsawes torna-se potencialmente mais complexo que aquele existente em sistemas vibrados mecanicamente.

Conforme mencionado na seção 2.4.1, a aceleração vibracional do sistema é definida pelo fator adimensional Γ (equação 40), sendo que correntes convectivas começam a aparecer quando $\Gamma > 1$. Valores típicos de Γ encontrados na literatura situam-se entre $2 < \Gamma < 6$ (TAI; HSIAU; KRUELLE, 2010; ZHANG, 2014), porém valores tão altos quanto $\Gamma = 20$ podem ser encontrados (YANG et al., 2015). As amplitudes de vibração empregadas costumam ser menores que aquelas usadas em jiques industriais, mas normalmente possuindo a mesma ordem de magnitude. Contudo, as frequências de vibração são consideravelmente maiores, podendo alcançar até 200 Hz (KLEIN et al., 2006; YANG et al., 2015). É importante ressaltar que os valores de A e f usados na determinação de Γ correspondem à amplitude e frequência de oscilação da placa de fundo², e não do leito. Desta forma, o parâmetro Γ não caracteriza de forma eficaz a aceleração fornecida ao leito durante o processo de impulsão em jiques, sendo decerto mais conveniente avaliar a mesma em termos do fluxo ascendente de fluido. Ainda, uma vez que o deslocamento momentâneo do leito da base do recipiente é um pré-requisito fundamental para o desenvolvimento do processo de jigagem, é manifesto o fato que acelerações maiores que $1g$ obrigatoriamente devem ocorrer durante a fase de elevação do leito.

² Normalmente medida por meio de acelerômetro (WASSGREN, 1997).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento geral adotado ao longo dos experimentos realizados é mostrado no fluxograma esquemático da Figura 17. Os subitens apresentados são descritos em detalhes, primeiramente para os ensaios como um todo, sendo em seguida descritos o grupo de procedimentos adotados para ensaios específicos.

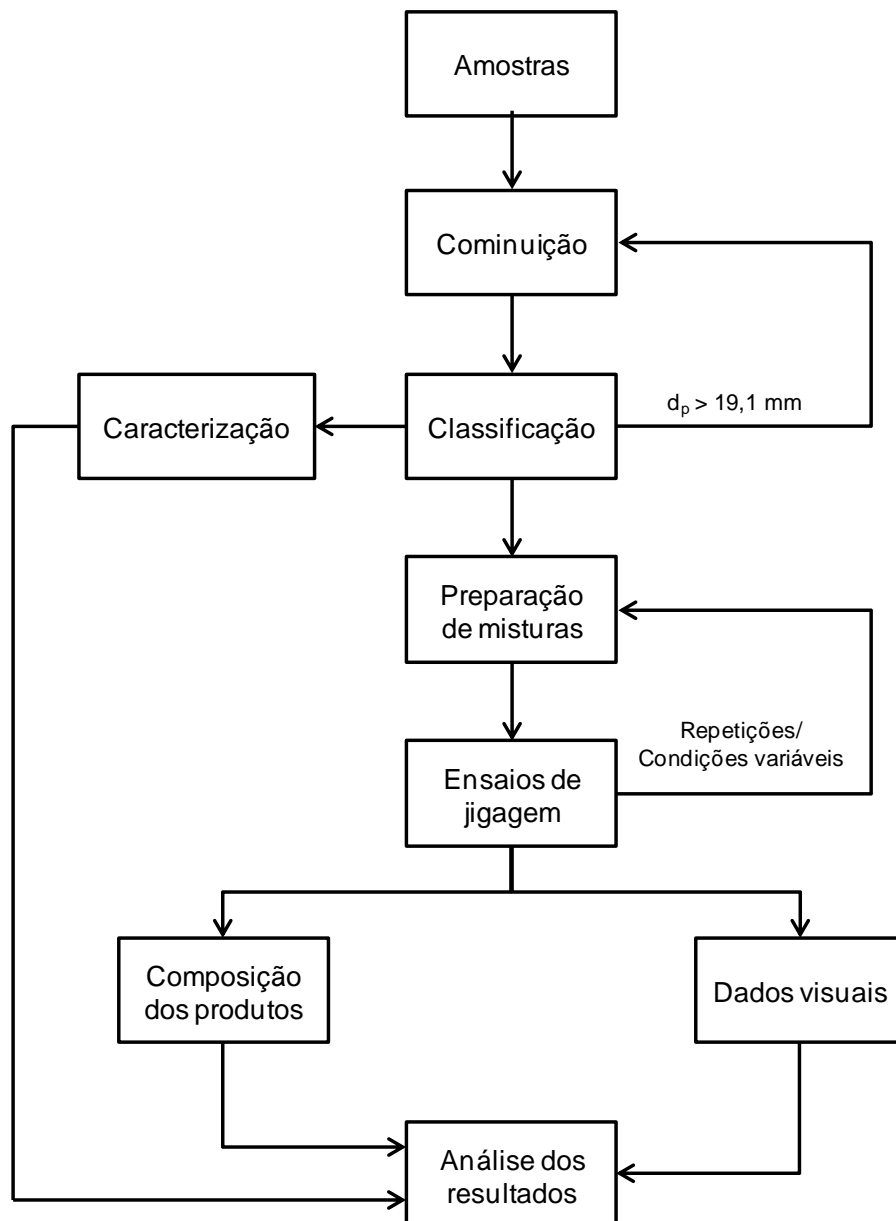


Figura 17: Fluxograma do procedimento experimental geral adotado ao longo dos testes.

3.1 AMOSTRAS

Os experimentos foram realizados com misturas de agregados típicos da construção civil, a saber: brita basáltica, concreto, material cerâmico e gesso. Amostras de brita basáltica com granulometria de 19,1-9,5 mm foram coletadas diretamente em pilha de estocagem localizada em pátio de obra. As amostras de concreto foram inicialmente obtidas na forma de corpos de prova cilíndricos moldados em laboratório para obtenção de uma resistência média a compressão de 30 MPa. O material cerâmico utilizado consistiu em blocos cerâmicos utilizados em alvenaria com dimensões de (190 x 140 x 90) mm. As amostras de gesso foram obtidas através de resíduos de placas de gesso acartonado coletadas em pátios de obras. Adicionalmente, os testes que envolveram a separação de materiais não-rochosos (seção 3.7) também contaram com a utilização de madeira e papel. Neste caso, as amostras de madeira foram oriundas de resíduos de paletes de transporte enquanto o papel foi coletado juntamente com os resíduos de gesso acartonado, consistindo da camada de papel cartão utilizado no revestimento do gesso.

3.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS

Os ensaios foram realizados com materiais na faixa de tamanho de 4,75 a 19,1 mm, incluído as faixas de tamanho compreendidas dentro deste intervalo. Este intervalo foi escolhido por estar dentro da faixa operacional dos jigues, a qual limita o tamanho mínimo de partícula a valores maiores que 1 mm (devido a abertura do crivo) e o tamanho máximo de partícula a 25 mm (espessura mínima das gavetas do compartimento do jigue, conforme detalhado no item 3.3.1). Para cominuição das amostras foi utilizado um britador de mandíbulas modelo Plangg, seguido de classificação a seco do produto britado em peneiras vibratórias até que a quantidade total de agregados necessária para o desenvolvimento de um ensaio estivesse dentro da granulometria desejada. As aberturas de peneiras utilizadas variaram de acordo com o propósito do ensaio a ser realizado. Além da granulometria, a caracterização de materiais envolveu a medição das densidades das amostras. A mesma foi realizada mediante o método do picnômetro após 24 horas de imersão em água, conforme descrito na norma NF EN 1097-6 (2014). A Tabela 1 mostra as

densidades medidas para cada material. Uma vez britado, classificado e caracterizado, os agregados individuais estavam em condições de serem usados na preparação de misturas para realização de ensaios de estratificação nos jigues.

Tabela 2: Densidade das amostras medidas em picnômetro à água e desvio-padrão relativo a três medições consecutivas para cada material.

Material	Densidade (g/cm ³)
Brita basáltica	2,64 (± 0,00)
Concreto	2,39 (± 0,04)
Cerâmico	2,26 (± 0,02)
Gesso	1,86 (± 0,02)

3.3 ENSAIOS DE JIGAGEM

3.3.1 Jigue pneumático

O jigue pneumático usado nos experimentos foi um jigue modelo AllAir[®] S-500 da fabricante *AllMineral* estruturado para reproduzir em escala piloto o processo de estratificação em jigues pneumáticos industriais por meio de operação em batelada, apresentando capacidade máxima de aproximadamente 100 kg. Conforme exibido na Figura 18, o conjunto completo do jigue pneumático consiste de quatro elementos principais: unidade de alimentação de ar (1), sistema de controle e distribuição de ar (2), câmara de separação (3) e sistema coletor de poeira (4). A admissão de ar no sistema se dá por meio de um soprador centrífugo modelo COMBIMAC[®] 49631/B1Y1 de 15 kW capaz de produzir uma vazão de ar de até 73 m³/min com pressão de saída de até 6000 Pa. Uma vez injetado, o ar é conduzido por um tubo distribuidor no qual uma conexão em Y divide o fluxo em duas correntes, uma contínua e outra descontínua. A corrente de ar contínua tem como função a pré-expansão do leito a fim de evitar a formação de curtos circuitos e garantir uma expansão uniforme durante o golpe de impulsão, produzido pela entrada da corrente

descontínua de ar. Esta é controlada pela atuação de uma válvula tipo borboleta, na qual os ciclos de abertura e fechamento permitem a geração de pulsos de ar com frequências de até 6,6 Hz. O tubo de condução de ar termina em um distribuidor radial, que consiste em um tubo metálico perfurado posicionado logo abaixo da câmara de separação, o qual induz a geração de um fluxo ascendente de ar. Junto ao sistema de distribuição encontra-se um painel de controle, no qual é possível regular o fluxo de ar e a frequência de pulsação.

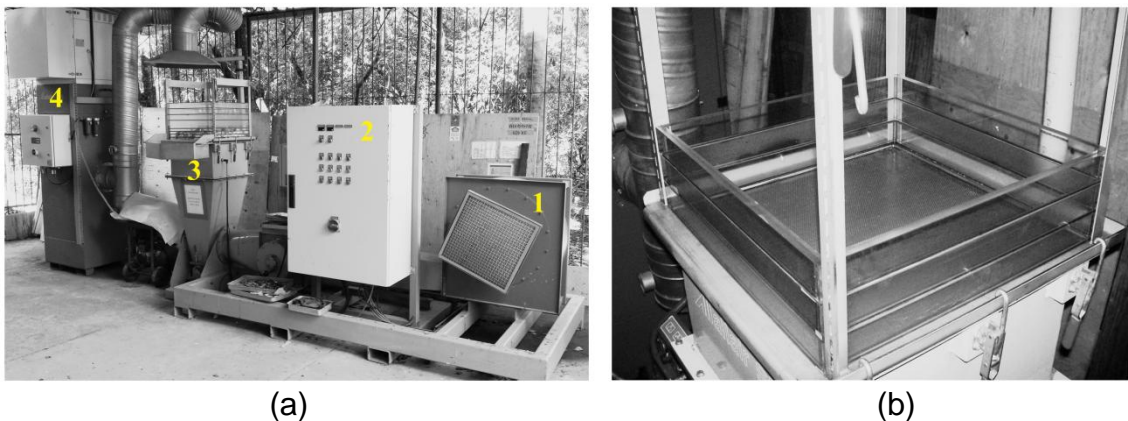


Figura 18: Jigue pneumático modelo AllAir® S-500. (a) Esquema geral. (b) Detalhe do compartimento de separação do jigue, dotado de gavetas sobrepostas de Plexiglass.
Fonte: autoria própria.

O fluxo de ar é ajustado no painel de controle em termos da porcentagem da rotação máxima do ventilador, variando de 0 a 100%. Com base nas informações técnicas do ventilador e nas relações de semelhança de ventiladores (HENN, 2001) foi calculada a curva pressão versus potência do ventilador, bem como a velocidade de saída na descarga do ventilador em função da rotação do mesmo. Mediante este procedimento, a velocidade e a vazão da corrente de ar no jigue puderam ser diretamente relacionadas à porcentagem da velocidade do ventilador, conforme exibido na Figura 19. É importante ressaltar que os valores obtidos correspondem às características que o ar possui no duto de descarga do ventilador, não levando em conta as perdas devido ao transporte no tubo distribuidor, na válvula borboleta e no crivo perfurado do jigue. Assim, a velocidade e a vazão do fluxo ascendente de ar na câmara de estratificação são presumivelmente menores do que os estimados, sendo necessária suas medições para obtenção de valores mais precisos. Embora tais

medições não tenham sido realizadas no presente trabalho, dados obtidos da literatura (BOYLU et al., 2014) envolvendo um jigue pneumático bastante similar (porém operando continuamente) descrevem operações com velocidades ascendentes de ar entre 950 e 1275 cm/s, valores estes da mesma ordem daqueles observados na Figura 19. Para fins de simplicidade, o fluxo de ar utilizado nos testes é doravante definido em termos da porcentagem da rotação máxima do ventilador, conforme exibido no painel do jigue.

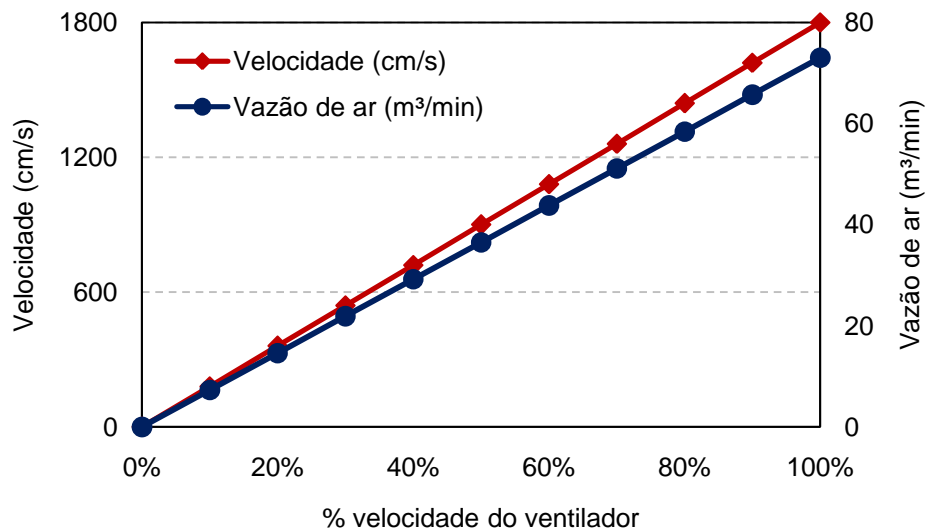


Figura 19: Estimativa da velocidade e vazão máximas da corrente de ar em função da porcentagem da velocidade do ventilador exibida no painel de controle do jigue pneumático.

A frequência de pulsação é regulada em função da frequência de rotação da válvula borboleta, podendo variar de 0 a 400 RPM. Uma vez que cada ciclo de abertura e fechamento da válvula resulta em um pulso de ar que, por sua vez, induz um ciclo de expansão e compactação do leito, é também conveniente expressar a frequência de pulsação em número de ciclos por minuto (CPM), unidade que será doravante adotada ao longo do texto.

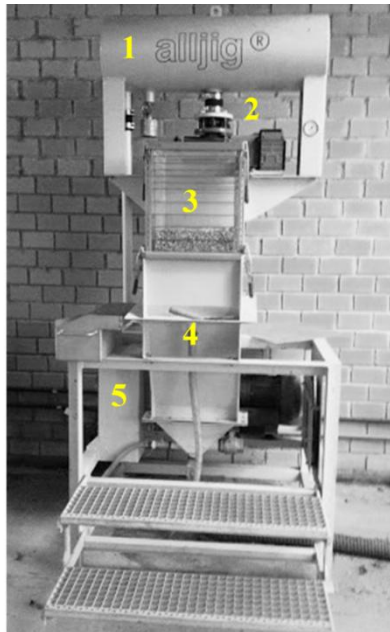
A câmara de separação é o principal componente do jigue, uma vez que é o local onde ocorre o processo de estratificação. Ela é composta por 14 compartimentos retangulares de Plexiglass sobrepostos um sobre os outros (Figura 18.b). Destes, oito compartimentos possuem dimensões de (530 x 530 x 50) mm enquanto outros seis, de menor espessura, possuem dimensões de (530 x 530 x 25) mm. Desta forma, é possível a remoção de diferentes camadas ou fatias do leito

estratificado para análise isolada dos produtos contidos em cada estrato. A câmara de separação é montada sobre um crivo fixo que consiste em um suporte metálico perfurado com aberturas de 1 mm, tendo como função permitir a passagem do fluxo ascendente de ar bem como suportar o leito. A abertura do crivo em conjunto com a espessura dos compartimentos define a faixa máxima de tamanho de partícula viável de processar no jig, ou seja, de 1 a 50 mm. Por fim, o sistema é completo pela unidade coletora de poeira, a qual é composta por um bocal de sucção posicionado sobre a abertura superior da câmara de separação que remove e conduz a poeira até mangas filtrantes.

3.3.2 Jigue hidráulico

O jig hidráulico usado nos ensaios foi um jig modelo AllJig[®] S-400, também da fabricante *AllMineral*, que funciona de forma similar a um jig Baum industrial (vide Figura 3.a na seção 2.1.1), exceto por operar em batelada e apresentar uma capacidade não maior que 50 kg. Uma vista frontal do equipamento é mostrada na Figura 20(a). Devido ao formato em U da arca, o jig é dividido lateralmente em dois compartimentos preenchidos com água, de forma que o mecanismo de pulsação a ar está conectado a uma extremidade enquanto a câmara de separação encontra-se na outra. Assim, a água contida na arca do jig é submetida a um movimento pulsante pela ação do ar injetado em uma das extremidades do equipamento. Um soprador centrífugo modelo SCL 30DH MOR de 1,32 kW capaz de fornecer uma vazão de ar de até 1,1 m³/min e gerar pressões da ordem de 30 kPa é usado para injeção de ar em uma câmara de ar vedada posicionada na parte superior do jig. O controle da entrada de ar na arca é realizado através de duas válvulas localizadas na conexão entre a câmara de ar e a arca. A primeira, uma válvula guilhotina, permite variar a vazão de entrada de ar através da regulagem da abertura da face de vedação, a qual é realizada manualmente através de um volante (Figura 20.b). Desta forma, a entrada de ar na arca pode ser ajustada desde a condição nula (válvula fechada) até a condição de vazão máxima (válvula totalmente aberta, correspondente a 8 rotações do volante). Abaixo da válvula guilhotina encontra-se uma válvula de pistão rotativo, responsável pelo controle da frequência de entrada de ar na arca e, conseqüentemente, da

frequência de pulsações no jigge. Esta é ajustada em um painel de controle lateral e pode variar desde 0 até 150 RPM. Ainda, uma válvula de exaustão de ar situa-se na parte inferior da câmara de ar, sendo responsável pela redução de pressão no sistema necessária para que a coluna de água retorne a posição inicial.



(a)



(b)

Figura 20: Jigue hidráulico modelo AllJig® S-400. (a) Esquema geral. (b) Detalhe da válvula guilhotina, cuja abertura, controlada via volante, permite controlar a vazão de entrada de ar na arca.
Fonte: autoria própria.

O compartimento de separação do jigge hidráulico possui configuração similar a do jigge pneumático, sendo formada por compartimentos retangulares sobrepostos de Plexiglass. Destes, cinco compartimentos possuem dimensões de (430 x 430 x 50) mm enquanto outros seis possuem dimensões de (430 x 430 x 25) mm. Cada compartimento possui uma camada de borracha fixa em uma das bases, de forma que o conjunto montado da câmara fique vedado e evite vazamentos no decorrer da operação. Do mesmo modo, o compartimento de separação fica alocado sobre um suporte de tela perfurada com orifícios de 1 mm.

3.3.3 Ensaio de estratificação

O esquema utilizado nos ensaios de estratificação consistiu das seguintes etapas: preparação de misturas e carregamento dos jigues (pré-jigagem); estratificação do leito e coleta de dados visuais (jigagem); extração dos estratos e análise da composição dos produtos (pós-jigagem). A seguir cada uma é descrita em detalhes.

a) Pré-jigagem: as misturas foram preparadas de acordo com as proporções mássicas ou volumétricas desejadas para cada componente. Para os casos no qual a preparação envolveu proporções em massa, a fração individual de cada componente foi determinada por pesagem em balança. Por outro lado, quando proporções volumétricas foram utilizadas, convencionou-se em utilizar as gavetas dos jigues como volume de referência, de modo que cada componente era alocado em uma ou mais gavetas e amostrava-se o volume exato necessário para preenchê-la(s). Uma vez preparadas as frações individuais de cada constituinte, as mesmas eram pré-misturadas em um balde e depositadas no compartimento do jigue, de modo a preencher o número de camadas pré-definidas para o ensaio (Figura 21).

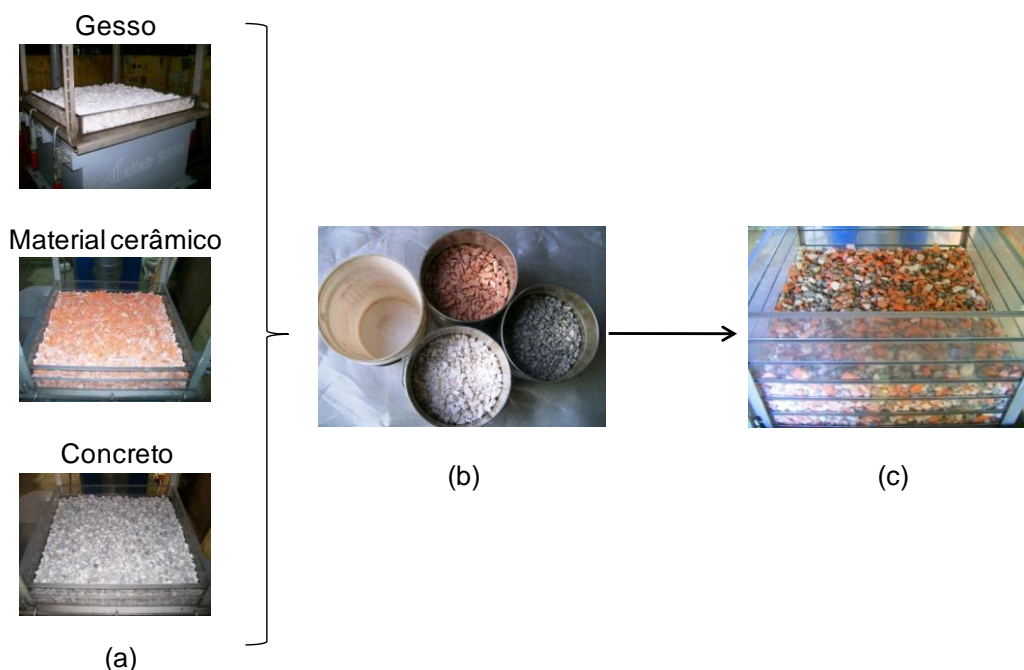


Figura 21: Procedimento geral de dosagem e carregamento dos jigues antes dos ensaios de estratificação para o caso de misturas ternárias equivolumétricas. (a) Determinação do volume individual dos componentes. (b) Pré-mistura. (c) Carregamento no compartimento do jigue.

b) Jigagem: após a deposição da mistura no interior do compartimento dos jígues, a chave de comando era acionada e os parâmetros de operação eram ajustados no painel de controle. Feito isso, o mecanismo de pulsação era acionado em conjunto com um cronômetro a fim de regular o tempo exato de cada ensaio. No caso do jigue hidráulico, a câmara de separação deve ser preenchida com água de modo a cobrir todo o leito antes do acionamento do mecanismo de pulsação. A frequência de pulsação e o tempo de jigagem foram, sem exceção, os únicos parâmetro variados nos testes realizados no jigue hidráulico. A abertura da válvula guilhotina (que controla a entrada de ar) foi mantida em 4 voltas de abertura do volante (equivalente a 50% da abertura da válvula). A válvula de exaustão de ar (que controla a saída de ar) foi igualmente mantida a 50% de abertura (≈ 2 voltas do volante).

No caso do jigue pneumático, existe um intervalo de tempo compreendido entre o acionamento do ventilador e o estabelecimento de um fluxo de ar estacionário (≈ 10 s). Para todos os efeitos, este período é considerado como parte do tempo de jigagem medido ao longo dos testes realizados. Ainda, conforme supramencionado, no painel do jigue pneumático é possível variar a frequência de pulsação e, de forma indireta, a intensidade do fluxo de ar. Dado a massa do leito tipicamente utilizada nos testes (entre 40 e 55 kg), seu valor se manteve sempre entre 70% e 80% da velocidade do ventilador, os quais correspondem a velocidades estimadas de descarga da corrente de ar de 1260 e 1440 cm/s, respectivamente (Figura 19).

Uma câmera *GoPro HERO 4 Black* foi utilizada para captura de fotos e vídeos do experimentos realizados. Para tal, o procedimento geral consistiu em posicionar a câmera de frente ou sobre o compartimento de jigagem, de modo que registros dos ensaios fossem coletados segundo as perspectivas lateral e de superfície do leito, respectivamente. O aparato da câmera é dotado de um suporte de garra com braço flexível que pode ser acoplado a objetos fixos (no caso, foram usadas as extremidades do próprio compartimento de jigagem). A configuração de fotos e vídeos bem como o controle da câmera foram realizados através de conexão *wi-fi* mediante o aplicativo *GoPro App*, o qual pode ser instalado em dispositivos dotados dos sistemas operacionais Windows, Android ou Apple. No caso presente, foi utilizado um Smartphone *Samsung Galaxy J3*. As configurações da câmera utilizadas nos testes são mostradas na Tabela 3. Além destas, foi habilitado o uso da

ferramenta *Protune*, a qual permite otimizar a qualidade de fotos e vídeos por meio do ajuste automático da tonalidade e sensibilidade da câmera em função da luz ambiente.

Tabela 3: Configurações aplicadas na câmera para coleta de vídeos e imagens dos ensaios.

Configurações de captura	
Resolução de vídeo	1080
Resolução de tela	1920 x 1080
Quadros por segundo	30
Tipo de arquivo	MP4
Conexão GoPro App	Wi-fi
Dispositivo GoPro App	Samsung Galaxy J3
Fotografias	12 Megapixels
Campo de visão	Estreito
Configurações do Protune	
Balanco de branco	Automático
Cor	Cor GoPro
Obturador	Automático
Limite ISO	1600
Nitidez	Alta
Compensação da exposição	0
Especificações	
Cartão de memória	64 GB
Transferência de dados	Minicabo USB
Duração da bateria	≈ 60 minutos
Tipo de suporte	Garra flexível

c) Pós-jigagem: Após atingir o tempo de jigagem pré-estabelecido para o ensaio em questão, o mecanismo de pulsação era suspenso, a água era removida da câmara (no caso do jigue hidráulico), e o leite estratificado era retirado mediante a extração de cada camada. A espessura das gavetas usadas nos testes (25 ou 50 mm) variava de acordo com a granulometria do material formador do leite e do número de estratos desejados do produto estratificado. Para extração de cada camada, um coletor era engatado na altura correspondente da camada no compartimento do jigue, de modo que o arraste horizontal da gaveta depositasse todo o seu conteúdo no interior do coletor. Este era engatado de tal modo na câmara que impedia o deslocamento das camadas inferiores de acrílico, permitindo assim que cada estrato fosse separadamente removido. Após a extração completa dos

produtos de separação, as frações obtidas eram tratadas separadamente, sendo classificadas nos casos em que a segregação por classe de tamanhos era de interesse, e separadas manualmente em seus constituintes e pesadas a fim de se determinar a composição de cada estrato, em todos os casos (Figura 22). Uma vez determinada a composição de todos os estratos, a etapa de coleta de dados estava finalizada e os resultados obtidos eram então submetidos à análise posterior.

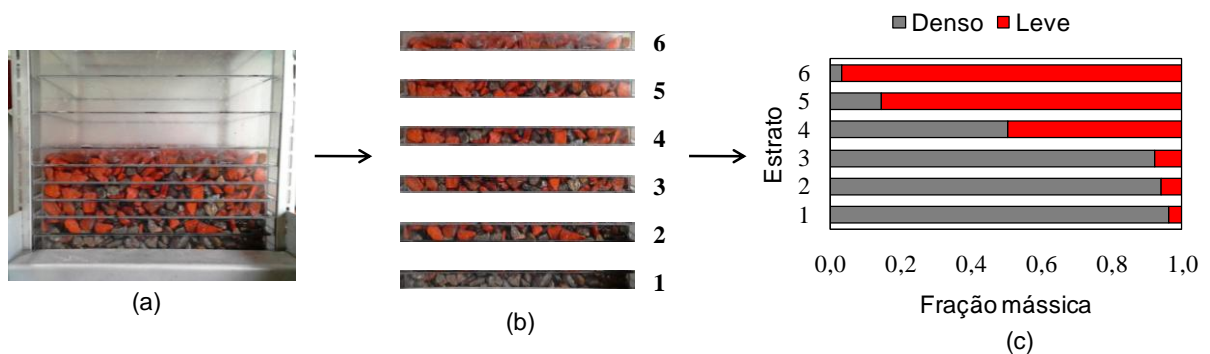


Figura 22: Extração dos estratos e análise da composição dos produtos de jigagem. (a) Leito estratificado após o término do ensaio. (b) Remoção em camadas dos estratos. (c) Composição mássica de cada estrato.

3.3.4 Análise dos resultados

Os resultados dos ensaios de estratificação foram analisados em termos do teor e recuperação dos produtos de jigagem. O teor foi definido como a fração (mássica ou volumétrica) de um dado componente i presente em um dos estratos do leito, dado por:

$$Teor = \frac{X_{i,estrato}}{X_{estrato}} \quad (41)$$

Onde $X_{estrato}$ é a massa ou volume total de partículas contidas no estrato. A curva de teores do componente i versus os estratos (ou camadas) do leito define o assim denominado *perfil de estratificação* do componente i . Do mesmo modo, a recuperação foi definida como a fração (mássica ou volumétrica) total de um dado componente i que reportou a determinado estrato, dada por:

$$\text{Recuperação} = \frac{X_{i,\text{estrato}}}{X_{i,\text{Total}}} \quad (42)$$

Onde $X_{i,\text{Total}}$ é a massa ou volume total de partículas do componente i contidas no leito. A curva de recuperação do componente i versus os estratos (ou camadas) do leito define o assim denominado *perfil de distribuição* do componente i . Nos ensaios em que o leito foi constituído por diferentes faixas de tamanho, o teor e a recuperação não somente dos componentes, mas também das faixas granulométricas individuais foram analisados. Também, um índice de estratificação foi proposto a fim de avaliar a precisão de separação (mais detalhes no item 3.6.3).

3.4 INVESTIGAÇÃO DA CONVECÇÃO GRANULAR EM JIGUES

O estímulo inicial que deu origem aos testes visando a avaliar o papel da convecção granular na jigagem foi a observância de um inesperado padrão de segregação horizontal nos estratos do leito após a realização de ensaios típicos de estratificação nos jigues (Figura 23). Esse padrão observado, com o material leve próximo às bordas e o denso na porção central, é muito similar ao reportado por Yang (2006) para o caso de segregação induzida por convecção granular.

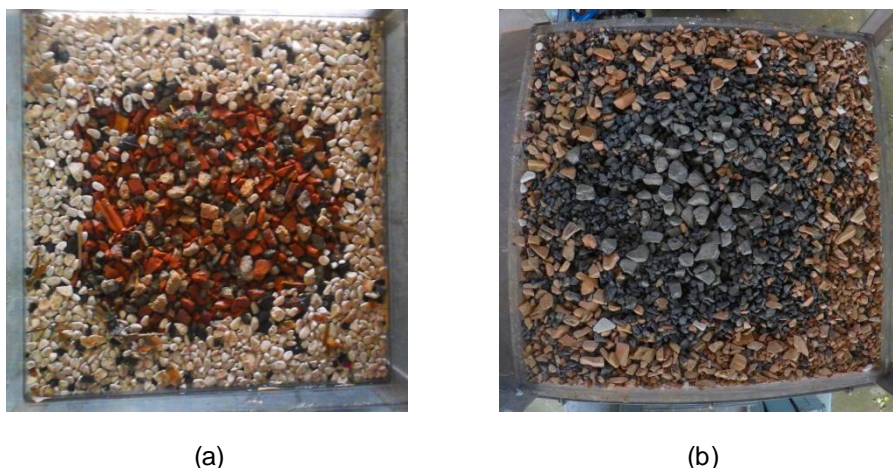


Figura 23: Padrões de segregação horizontal em camadas dos jigues após ensaios de estratificação.
(a) Jigue hidráulico. (b) Jigue pneumático

Deste modo, o ponto de partida dos ensaios delineados para investigar a ocorrência do fenômeno de convecção em jiges foi a observação do padrão peculiar do movimento convectivo, tal qual descrito na literatura (seção 2.4). Uma vez confirmada a ocorrência deste padrão de convecção, foi realizada uma tentativa preliminar de correlacionar o movimento convectivo com as condições de pulsação do leito. Por fim, a influência do fluxo convectivo sobre a estratificação de misturas ternárias de agregados foi analisada em detalhes. A seguir, é feita uma descrição detalhada dos procedimentos realizados.

3.4.1 Observação de padrões convectivos

O exame de aspectos relacionados ao movimento convectivo nos jiges hidráulico e pneumático foram realizados por meio de análise qualitativa de imagens e vídeos do movimento de partículas contidas no leito. Para tanto, misturas binárias de agregados (concreto e material cerâmico ou concreto e gesso) foram preparadas de modo que a configuração inicial do sistema consistisse da camada de base dos jiges preenchida pelo componente leve puro, sendo esta coberta totalmente por várias camadas do componente mais denso. Esta configuração foi adotada porque a diferença de energia potencial gravitacional entre os estados inicial (com o material leve no fundo) e final (com o material leve no topo) seria a máxima possível para o sistema binário em questão, gerando assim uma grande tendência de deslocamento das partículas de uma camada para a outra. Deste modo, foram realizados testes com as seguintes condições:

a) Mistura de concreto e material cerâmico em jigue hidráulico: neste conjunto de ensaios, misturas equivolúmetricas de concreto (12.600 g) e material cerâmico (8.700 g) no intervalo de 19,1 - 14 mm foram utilizadas. Conforme supramencionado, uma camada de material cerâmico puro (espessura de 75 mm) foi inicialmente posicionado no interior da câmara de jigagem. Em seguida, o material cerâmico foi coberto por uma camada de mesma espessura de partículas de concreto (a espessura total do leito foi de 150 mm, equivalente a seis gavetas menores), conforme mostrado na Figura 24(a). Um total de cinco ensaios foi realizado com frequências de pulsação de 20, 53, 85, 117 e 150 CPM. Em todos os ensaios, um

tempo de jigagem fixo de 120 s foi adotado. Para cada frequência de pulsação, a amplitude de pulsação do leito foi medida por meio de uma régua fixada à parede externa do compartimento do jigue (a amplitude de pulsação registrada consistiu na medida do deslocamento do leito, e não da coluna de água sobre o mesmo). Após cada ensaio, a composição mássica de cada estrato foi determinada mediante separação manual e pesagem dos produtos. Registros dos ensaios foram adquiridos mediante o posicionamento da câmera digital em frente à parede lateral do compartimento de jigagem.



Figura 24: (a) Configuração inicial do leito no ensaio no jigue hidráulico. (b) Configuração inicial do leito no ensaio no jigue pneumático.

b) Mistura de concreto e gesso em jigue pneumático: uma fina camada de 25 mm de gesso (2.800 g) foi coberta com uma camada de 125 mm de concreto, ambos no intervalo de tamanho de 19,1 a 12,7 mm (Figura 24.b). A câmera digital foi posicionada sobre o topo do leito a fim de registrar o movimento de ascensão das partículas de gesso até a superfície. O volume de gesso utilizado foi definido de antemão para não preencher completamente a camada de topo, de modo que seu deslocamento horizontal na superfície pudesse ser observado em contraste às partículas mais escuras de concreto. A frequência de pulsação, o fluxo de ar e o tempo de jigagem foram fixados em 160 CPM, 70% e 120 s, respectivamente. Um teste adicional foi realizado com os mesmos parâmetros, porém utilizando uma mistura contendo uma camada de 50 mm de gesso (8.300 g) e 100 mm de concreto (40.700 g). Ao término deste ensaio, as partículas de gesso foram cuidadosamente removidas do leito a fim de manter as partículas da camada inferior de concreto

intocáveis, de modo a se poder observar a distribuição da camada estratificada de concreto.

b) Traçadores: no jigue hidráulico, dois traçadores constituídos por partículas grosseiras de brita artificialmente coloridas foram inseridos em um leito de 75 mm de espessura formado unicamente por partículas de brita na faixa de tamanho de 5 a 10 mm. Um dos traçadores foi colorido de verde e possuía dimensões 17,3 x 15,6 mm. O outro, ligeiramente maior, foi colorido de lilás e possuía dimensões de 27,3 x 16,9 mm. Um total de três ensaios foram realizados, nos quais a frequência de pulsação variou em 60, 90 e 120 CPM e um tempo de operação fixo de 3600 s foi utilizado. O movimento dos traçadores na superfície do leito foi capturado por câmera digital ao longo de todo o tempo de ensaio.

3.4.2 Influência das condições operacionais na convecção

Neste conjunto de testes buscou-se examinar a premissa de que o fluxo convectivo está relacionado à dissipação de energia devido ao atrito das partículas com as paredes laterais do compartimento que as contém (vide seção 2.4), a qual deve estar relacionada as condições de pulsação do leito do jigue. Para tal, seria conveniente medir as diferenças de deslocamento do leito na zona central e nas bordas do compartimento do jigue. Contudo, uma vez que não era viável mensurar diretamente o deslocamento na porção central da superfície do leito, e sabendo a priori que o retardamento induzido pelas paredes era ainda maior nos vértices do compartimento (diferenças visíveis de deslocamento ocorrem entre o centro da parede e as arestas), decidiu-se por analisar o movimento oscilatório da zona central da parede frontal do compartimento de jigagem e compará-lo com o deslocamento do leito nas arestas do mesmo (Figura 25).

A configuração utilizada nos testes foi a mesma dos ensaios com os traçadores, i.e. um leito de 75 mm de espessura composto por partículas de brita na faixa de tamanho de 5 a 10 mm. Do mesmo modo, a frequência de pulsação do leito variou em 60, 90 e 120 CPM. O deslocamento vertical do leito foi registrado pela câmera digital posicionada em frente à parede frontal do jigue, enquanto a dinâmica

na superfície do leito foi registrada por uma câmera posicionada no topo do compartimento de separação.

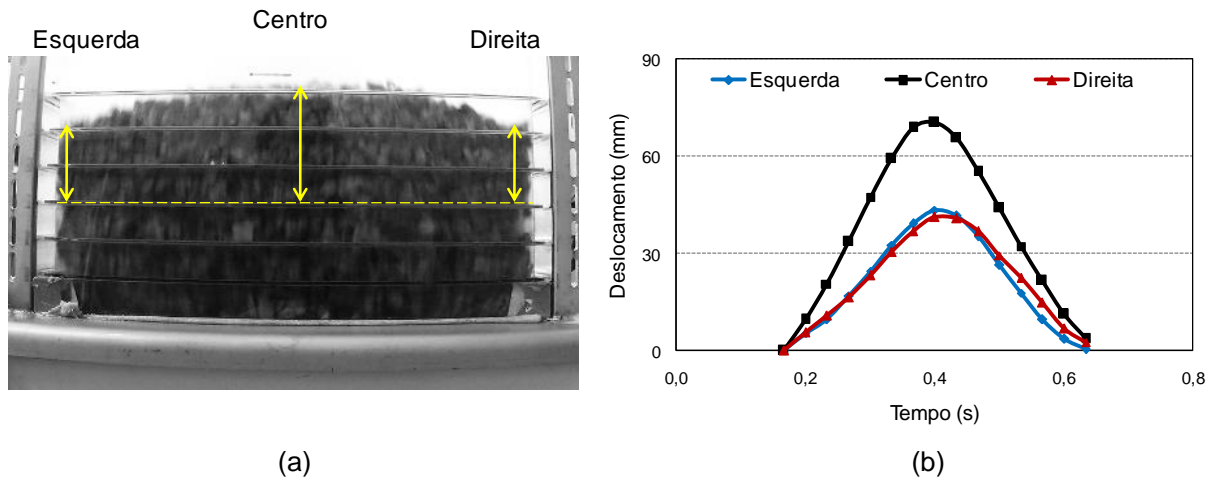


Figura 25: (a) Deslocamento diferencial do leito na zona central da parede e nas arestas. (b) Curva ilustrativa do deslocamento ao longo do tempo.

Os filmes obtidos a partir da parede frontal foram usados na análise do movimento vertical do leito, a qual foi realizada através do software livre *Tracker*[®] 4.97. Construído em plataforma Java, o software é uma conhecida ferramenta de análise de vídeos usada no estudo do comportamento de objetos em movimento (BROWN, 2017). Mediante o mesmo, o movimento do leito registrado em vídeo foi dividido quadro a quadro e o deslocamento vertical medido com base em um sistema de coordenadas cartesianas. Para que o rastreamento do movimento possa ser realizado com êxito, é necessária a existência de um contorno bem definido que diferencie o objeto de interesse dos outros, permitindo detectá-lo a cada quadro. Deste modo, convencionou-se rastrear o deslocamento da interface sólido-fluido, uma vez que a mesma manteve-se demarcada ao longo de todos os quadros dos vídeos. Sendo assim, definiu-se registrar o deslocamento referente a 10 ciclos consecutivos de oscilação em três pontos distintos ao longo da parede frontal da câmara de separação: na aresta esquerda (definido como a origem do sistema, isto é, $x = 0$ mm), na zona central ($x = 200$ mm) e na aresta direita ($x = 400$ mm) (Figura 26). O procedimento foi repetido para cada uma das frequências usadas nos testes.

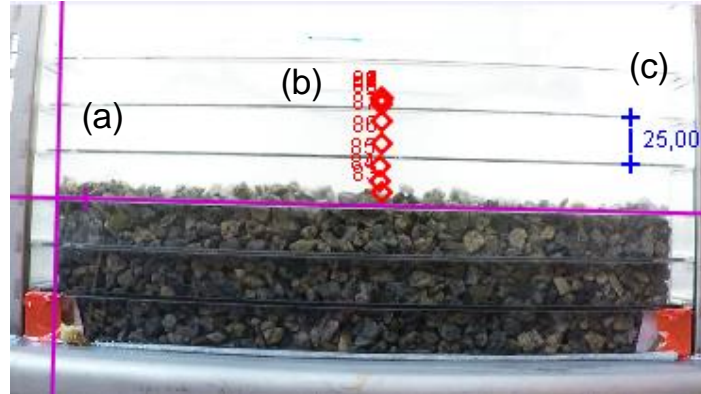


Figura 26: Análise do movimento vertical do leito usando o software Tracker© 4.97. (a) O cruzamento das duas linhas representa a origem dos eixos coordenados, $x = 0$ e $y = 0$. (b) Trajetória detectada da interface sólido-fluido para um ciclo de oscilação. (c) Bastão de calibração, utilizado para definir a escala do deslocamento analisado. No caso, foi usado como comprimento de referência uma das gavetas do compartimento do jig, cuja espessura é de 25 mm.

Uma vez medido o deslocamento do leito, as diferenças de deslocamento na zona central e nas arestas foram comparadas e uma tentativa de medida da velocidade média de convecção em cada frequência de pulsação foi realizada. Conforme destacado por Garcimartín et al. (2007), uma estimativa grosseira da velocidade de convecção pode ser obtida multiplicando a diferença de altura entre o ponto mínimo do leito no centro e nas bordas pela frequência de oscilação. Presumindo que uma medida ligeiramente mais precisa poderia ser obtida levando em conta a diferença de altura em todos os momentos do ciclo de oscilação, definiu-se a *velocidade média de convecção* como:

$$\bar{v}_{convecção} = \overline{\Delta y} \cdot f \quad (43)$$

Onde:

$$\overline{\Delta y} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \left[\frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^t (y_{centro,t} - \bar{y}_{aresta,t}) \right] \quad (44)$$

$$\bar{y}_{aresta,t} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t (y_{esquerda,t} + y_{direita,t}) \quad (45)$$

no qual $\overline{\Delta y}$ é a média das diferenças de posição vertical entre o centro e as arestas do leito referente a 10 ciclos de oscilação, cada qual com duração Δt (instantes compreendidos entre o início da fase de expansão e o fim da fase de compactação); $y_{centro,t}$, $y_{esquerda,t}$ e $y_{direita,t}$ representam a altura da zona central e das arestas esquerda e direita do leito no instante t , respectivamente. O valor médio das duas últimas foi definido como a altura média do leito nas arestas no instante t , $\bar{y}_{aresta,t}$.

Os valores de velocidade média de convecção assim obtida foram comparados ao número de aparições dos traçadores na superfície. A princípio, pretendia-se realizar um procedimento similar de detecção do deslocamento dos traçadores na superfície do leito. Todavia, restrições impostas pela variação da altura da coluna de água ao longo do ciclo de jigagem (a qual causava distorções nas imagens) e a variação de turbidez da mesma (devido a contínua liberação de lamelas causada pelo atrito entre as partículas) tornaram esta tarefa inviável. Assim, o procedimento limitou-se a simples contagem do número de aparições dos traçadores na superfície livre do leito ao longo dos 3600 s de teste para cada condição. Deste modo, uma vez determinados os valores de $\bar{v}_{convecção}$, a comparação destes com a quantidade de aparições dos traçadores na superfície do leito permitiu verificar, a nível preliminar, a relação entre os parâmetros de pulsação do jigge e a incidência da convecção.

3.4.3 Influência da convecção sobre a estratificação

A fim de verificar a influência do fluxo convectivo sobre a estratificação, foram realizados ensaios de estratificação em jigge pneumático de misturas ternárias contendo concreto, material cerâmico e gesso no intervalo de tamanho de 19,1 a 12,7 mm. Um total de três testes foram realizados com diferentes tempos de jigagem: 15, 45 e 120 s. A frequência de pulsação, o fluxo de ar e a espessura do leito foram mantidas fixas em 160 CPM, 70% e 150 mm (três gavetas maiores), respectivamente. Estes foram os parâmetros ótimos de operação obtidos por Sampaio et al. (2016) durante a estratificação de misturas similares no mesmo equipamento. Para cada experimento, foi preparada uma mistura ternária contendo

o mesmo volume a granel de cada material, correspondendo a uma proporção mássica de 48% de concreto, 31% de material cerâmico e 21% de gesso. A quantidade total de material usada em cada teste foi de 43000 g ($\pm 1\%$). A fim de quantificar a estratificação de partículas o leito foi dividido em seis zonas de amostragem. Para tal, as três camadas verticais (denominadas de base, meio e topo) foram cada qual divididas horizontalmente em duas zonas por meio de um arco retangular (400 x 400 x 50 mm) e separadamente coletadas após cada teste (Figura 27). A porção contida na parte interna do arco foi denominada *zona central* enquanto a porção externa ao arco, limitada pelas paredes, foi denominada de *zona de borda*. Após a coleta dos produtos em cada zona, as partículas foram separadas manualmente e pesadas a fim de determinar a composição de cada zona.

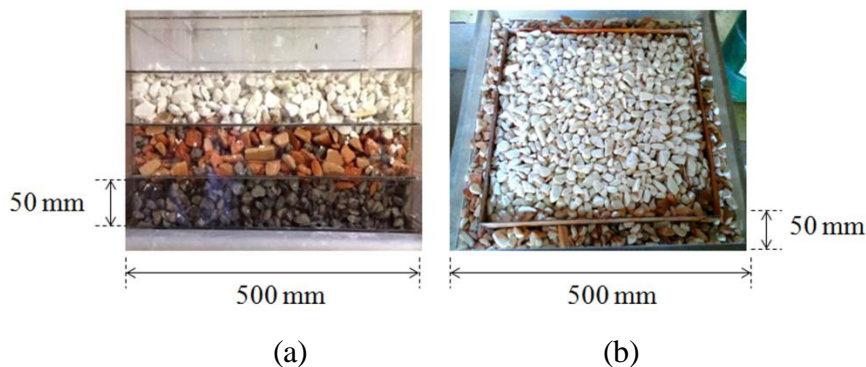


Figura 27: Configuração dos testes e zonas de amostragem do leito estratificado. (a) Camadas verticais (topo, meio e base). (b) Cada camada foi dividida horizontalmente em duas zonas: central (parte interna do retângulo) e de borda (parte externa ao retângulo).

3.6 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO LEITO

Foram elaborados três conjuntos de testes visando examinar o efeito do tamanho de partícula sobre a estratificação em jiges pneumáticos, sendo em todos os casos utilizadas misturas ternárias contendo o mesmo volume a granel de brita, material cerâmico e gesso. Do mesmo modo, as condições operacionais mantiveram-se fixas para todos os ensaios, e corresponderam a um fluxo de ar de 80%, frequência de pulsação de 160 CPM e um tempo de jigagem de 120 s. A despeito disso, testes preliminares revelaram desvios relativos maiores que 10% entre ensaios consecutivos, mesmo em condições idênticas. Deste modo, certos

procedimentos foram efetuados a fim de identificar e quantificar o erro associado aos testes, bem como buscar uma maneira conveniente de minimizá-lo. A seguir, este ajuste inicial e os testes realizados são descritos em detalhes.

3.6.1 Minimização do erro experimental

A grande variabilidade obtida nos ensaios preliminares foi arbitrariamente imputada ao procedimento de extração dos produtos do jigüe, uma vez que os distúrbios gerados pelo arraste das gavetas quando o leite se encontra estratificado têm potencial de ocasionar contaminações dos estratos com materiais provenientes de outras camadas. Assim, o experimento elaborado buscou verificar a ocorrência de contaminação intercamadas decorrente da remoção dos estratos do jigüe. Para isso, três gavetas maiores do compartimento do jigüe (50 mm) foram cada qual preenchida com brita (base), material cerâmico (meio) e gesso (topo) na faixa de 19,1 – 12,7 mm. Em seguida, cada camada foi cuidadosamente removida e a composição total de cada uma foi determinada. Os resultados são mostrados na Figura 28(a) e na Tabela 4(a). Duas espécies de contaminação intercamadas foram identificadas, denominadas de *contaminação por deposição* e *contaminação por arraste*. A primeira envolve a penetração de partículas leves nas camadas inferiores do leite devido à perturbação causada pelo arraste da camada imediatamente superior, sendo possivelmente mais intensa quanto mais finas forem as partículas contidas nos estratos superiores. Ela afetou particularmente as camadas mais profundas do leite (meio e base). A segunda está relacionada ao arraste de partículas do material denso localizado próximo à interface com uma camada superior, sendo possivelmente mais intensa quando o leite é composto por material grosseiro devido à coleta conjunta de maiores volumes das camadas inferiores. Este tipo de contaminação dos produtos afetou particularmente os estratos superiores do leite (topo e meio).

A fim de minimizar o erro de extração relacionado a ambas as contaminações, as camadas do jigüe foram reconfiguradas conforme mostrado na Figura 28(b) e na Tabela 4(b). Neste caso, a espessura das camadas de concreto e gesso foi elevada para 75 mm, correspondente a uma gaveta maior e uma menor do compartimento do jigüe. Assim, após a extração individual das mesmas, o produto contido nas

camadas menores, localizado na interface entre as camadas, foi desconsiderado na análise da composição. Como resultado, o nível de contaminação médio das três camadas em função da extração foi reduzido de 9,1% para apenas 0,6%. Em decorrência disso, a configuração exibida na Figura 28(b) foi aquela adotada na realização dos ensaios de estratificação.

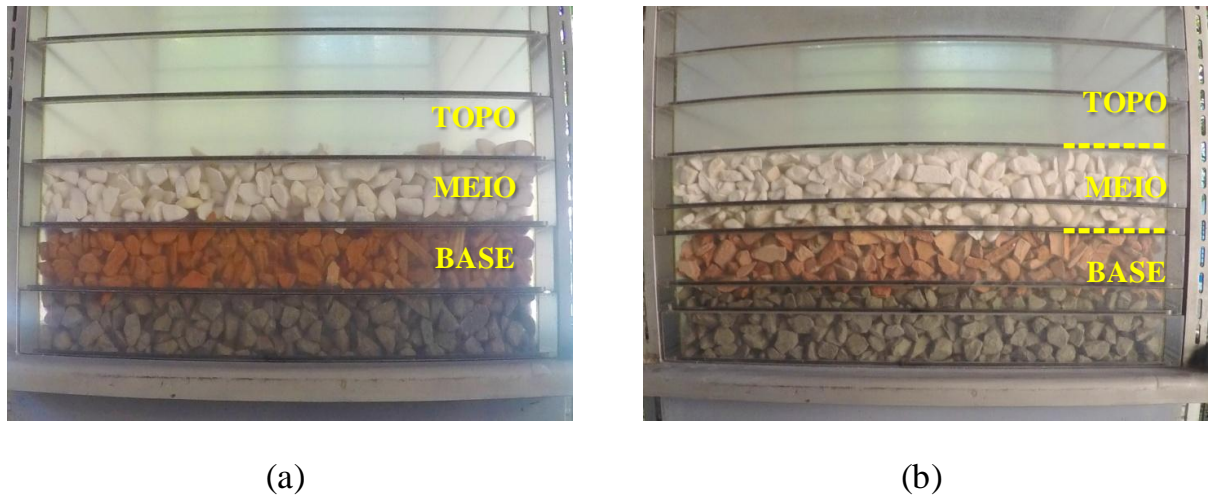


Figura 28: Análise da contaminação intercamadas relacionado à extração dos produtos do jigue. (a) Configuração típica com camadas sobrepostas de produtos. (b) Configuração modificada pelo uso de camadas intermediárias que diminuem a contaminação entre camadas adjacentes.

Tabela 4: Resultados das análises relativas ao erro de extração. (a) Configuração típica. (b) Uso de camadas intermediárias.

Camada	Contaminação (% massa)			Camada	Contaminação (% massa)		
	Percolação	Arraste	Total		Percolação	Arraste	Total
Topo	0.0%	8.4%	8.4%	Topo	0.0%	0.0%	0.0%
Meio	6.1%	6.5%	12.6%	Meio	0.1%	1.0%	1.1%
Base	6.3%	0.0%	6.3%	Base	0.8%	0.0%	0.8%
Média	4.1%	5.0%	9.1%	Média	0.3%	0.3%	0.6%

3.6.2 Ensaios de estratificação

Três diferentes conjuntos de experimentos foram preparados. No primeiro, ensaios de estratificação em triplicata foram efetuados com misturas ternárias restritas unicamente a uma das seguintes faixas granulométricas: 19,1 - 12,7 mm (denominada como *grosseiros*); 12,7 – 8 mm (denominada como *intermediários*) e 8

– 4,75 mm (denominada como *miúdos*). O objetivo destes ensaios foi avaliar o efeito do tamanho absoluto de partículas constituintes do leito sobre a estratificação do sistema.

Outro conjunto de testes envolveu a análise do efeito relacionado à ampliação da faixa granulométrica de trabalho sobre a estratificação do sistema. Para tal, as misturas ternárias foram preparadas com três diferentes níveis de dispersão em relação à granulometria: 19,1 – 12,7 mm (mistura M1); 19,1 – 8 mm (mistura M2) e 19,1 – 4,75 mm (mistura M3). A proporção volumétrica de cada faixa de tamanho é mostrada na Figura 29.

Por fim, ensaios adicionais foram realizados com a mistura M1, na qual foram adicionadas quantidades crescentes de miúdos na composição dos constituintes mais leves (10%, 20% e 30% em massa) visando avaliar, em especial, o efeito sobre a concentração do componente denso (brita). A quantidade de materiais usadas em cada um dos ensaios encontra-se compilada nas Tabelas 5 e 6.

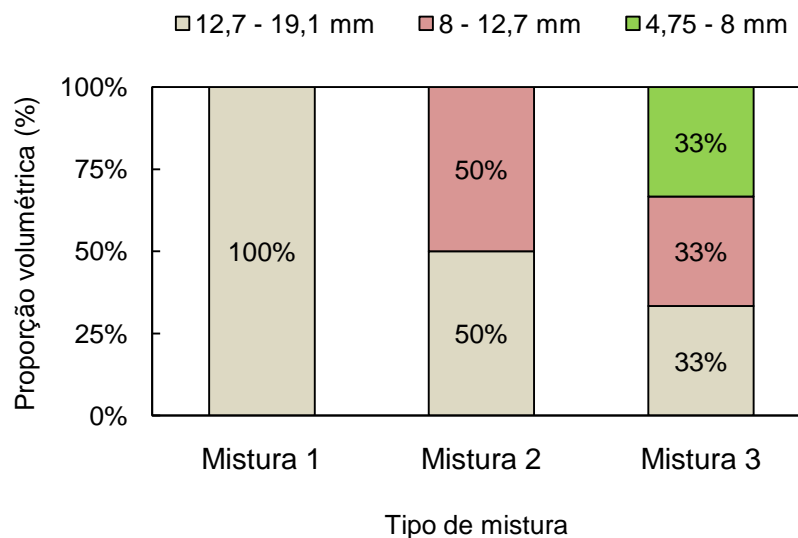


Figura 29: Proporção volumétrica de cada intervalo de granulometria presente nas misturas M1, M2 e M3. Os valores referem-se tanto a composição granulométrica dos componentes individuais (brita, cerâmico e gesso) quanto à composição da mistura total.

Tabela 5: Quantidade de materiais utilizados na preparação das misturas ternárias equivolúmetricas usadas nos ensaios.

Granulometria (mm)	19,1 - 12,7	12,7 - 8	8 - 4,75	19,1 - 8	19,1 - 4,75
Denominação	"Grossoiro", "M1"	"Intermediário"	"Miúdo"	"M2"	"M3"
Brita (g)	33631	32700	30350	30310	28682
Cerâmico (g)	13251	12650	14420	13776	16482
Gesso (g)	9662	11500	11700	10937	9916
Σ (g)	56545	56850	56470	55024	55079

Tabela 6: Quantidade de miúdos leves adicionados à mistura M1.

% Miúdos leves	10%	20%	30%
Cerâmico (g)	1270	2540	3810
Gesso (g)	782	1564	2346

3.6.3 Análise da precisão de estratificação

Além de avaliar os resultados obtidos em função do teor e da recuperação dos produtos após a jigagem, um índice de estratificação foi concebido a fim de quantificar a precisão da separação, dado por:

$$I_E = \frac{\sigma_{experimental}}{\sigma_{ideal}} \quad (46)$$

Onde:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^K \left[\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X})^2 \cdot P_i \right] \quad (47)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (48)$$

Onde a I_E é o índice de estratificação, σ^2 é a variância da concentração do componente i na camada j , \bar{X} é a concentração média do componente nas n camadas de amostragem, K é o número total de componentes no sistema e P_i é a proporção total do componente i no sistema. O índice proposto foi baseado em índices usados por Too et al. (1979) no cálculo do grau de mistura em sistemas multicomponentes. Assim, $\sigma = 0$ para o caso de uma mistura perfeitamente homogênea, enquanto para o caso da estratificação perfeita seu valor (correspondente ao máximo possível) depende do número de componentes do sistema, bem como de suas proporções mássicas ou volumétricas. Para o caso da configuração adotada nos testes, tem-se que $n = 3$, $k = 3$ e $P_i = 0,33$ (proporção volumétrica, a proporção mássica variou de acordo com a granulometria da mistura), e o valor correspondente de σ calculado para o caso da estratificação ideal é de 0,57. O índice de estratificação tal como proposto consiste na razão entre a variância real da concentração obtida experimentalmente (menor que 0,57 para o caso da estratificação imperfeita) e a variância para o caso da estratificação ideal. Assim, $I_E = 0$ corresponde ao estado perfeitamente misturado do sistema enquanto $I_E = 1$ corresponde ao estado perfeitamente estratificado do leito.

3.7 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MULTI-SEPARAÇÃO EM JIGUES

Ensaio foram elaborados a fim de averiguar a capacidade de jigsaw pneumáticos de efetuar a multi-separação de componentes orgânicos leves (não rochosos) de componentes pedregosos (rochosos) ao mesmo tempo em que estratifica estes últimos entre si. A remoção de contaminantes, a segregação dos componentes e a influência de variações discretas nos parâmetros de pulsação foram avaliados para misturas contendo diferentes níveis de contaminação.

Os testes foram realizados com misturas binárias de concreto e material cerâmico nas quais quantidades pré-definidas de gesso, madeira e resíduos de papel foram adicionadas. No presente caso, tomando como base o processo de reciclagem de RCD, definiu-se o concreto como o produto alvo, de modo que os outros componentes, incluindo o material cerâmico, são indesejáveis. O volume a

granel de concreto e material cerâmico foi definido como aquele necessário para preencher completamente duas gavetas menores do compartimento do jigüe, correspondendo a uma massa total de 18245 g de concreto e 12240 g de material cerâmico. Os resíduos de madeira e papel tiveram seu tamanho reduzido, por meio de corte e poda manual, a fim de evitar a presença de pedaços demasiado grandes dentro do jigüe.

Cinco misturas foram preparadas, cada qual contendo quantidades crescentes de gesso, madeira e papel (Tabela 7). A proporção mássica entre os três contaminantes foi mantida constante em 40% de gesso, 40% de madeira e 20% de papel. Durante os testes, um prato perfurado foi fixado no topo do compartimento do jigüe a fim de evitar que os pedaços de papel fossem carregados para fora do sistema pela corrente ascendente de ar. Exceção foi feita para o teste com 9% de contaminantes, no qual o prato foi retirado para verificar a capacidade do fluxo de ar em expulsar os pedaços de papel do sistema. Conforme ilustrado na Figura 30, a espessura do leito variou entre 100 mm (na ausência dos três contaminantes mais leves) e 125 mm (nível máximo de contaminação, 9% em massa). A frequência de pulsação, o fluxo de ar e o tempo de jigagem foram mantidos constantes em 160 CPM, 80% e 120 s, respectivamente. Ainda, dois testes adicionais foram realizados com a mistura contendo 4,6% em massa de contaminantes a fim de analisar o efeito da variação na velocidade da corrente de ar e na frequência de pulsação sobre a classificação. No primeiro caso, a frequência foi mantida constante (160 CPM) enquanto o fluxo de ar foi reduzido para 70%. No segundo caso, o fluxo de ar foi mantido fixo em 80%, enquanto a frequência de pulsação foi diminuída para 140 CPM. O tempo de jigagem foi mantido invariável em ambos os casos.

Tabela 7: Composição das misturas preparadas.

Material	Fração total de contaminantes (% massa)				
	0,0	1,0	2,3	4,6	9
Concreto	58,0	57,3	56,5	54,9	53,3
Cerâmico	42,0	41,7	41,3	40,5	37,8
Gesso	-	0,4	0,9	1,9	3,6
Madeira	-	0,4	0,9	1,9	3,6
Papel	-	0,2	0,4	0,8	1,7
Total (%)	100	100	100	100	100
Total (g)	31484	31923	32364	33373	35013



Figura 30: Configuração do leito utilizada nos ensaios. Quantidades selecionadas de contaminantes foram adicionadas a uma mistura binária de concreto e material cerâmico.

4. CONVECÇÃO GRANULAR E ESTRATIFICAÇÃO EM JIGUES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as conclusões parciais relativas à identificação da ocorrência de correntes convectivas em leitos de jigues, sua dependência em relação aos parâmetros operacionais, bem como sua influência sobre a estratificação por densidade de misturas ternárias de agregados.

4.1 PADRÕES CONVECTIVOS

Os resultados dos ensaios com os sistemas com arranjo reverso das camadas do leito, tanto em jigue hidráulico quanto pneumático, revelaram um comportamento muito similar ao de fluxos convectivos descritos na literatura (vide seção 2.4). Em particular, ocorreu a formação de um padrão de fluxo no qual o material leve inicialmente contido na banda inferior se elevou através da porção central do leito, enquanto o material mais denso inicialmente contido na banda superior desceu simultaneamente pelas bordas do compartimento de jigagem. Deste modo, embora a inversão das camadas leve e densa tenha ocorrido conforme antecipado (devido à diferença de densidade entre as camadas), o processo não se desenvolveu de maneira uniforme ao longo do volume do leito, uma vez que a ascensão do componente leve e o abaixamento do componente denso claramente ocorreram em regiões distintas do sistema. Este comportamento está ilustrado na Figura 31 para o caso da mistura binária de brita e material cerâmico no jigue hidráulico. Neste caso, uma vez atingido um estado aproximadamente estacionário ($t > 40$ s), o processo de estratificação aparentemente cessou, bem como o movimento relativo entre as camadas de concreto e de material cerâmico.

A Figura 32 ilustra o perfil de estratificação obtido para cada uma das condições operacionais dos ensaios. Conforme pode ser observado, é plausível considerar que a influência dos parâmetros de pulsação do leito sobre o rearranjo do sistema foram mínimas, uma vez que os perfis de estratificação observados são bastante semelhantes. As principais discrepâncias de concentração ocorreram nos estratos 3 e 4, os quais estão localizados na porção intermediária do leito. Em particular, o uso de condições limites de frequência ($f = 150$ CPM) e amplitude de pulsação ($a = 100$ mm) deram origem a um perfil um pouco menos estratificado, o que pode ser atribuído a insuficiência de espaço livre para o deslocamento de

partículas através do leito, prejudicando a separação (no caso de frequências muito altas) ou, por outro lado, na injeção de energia em excesso durante a fase de elevação do leito, causando remistura no sistema (no caso de amplitudes de pulsação elevadas). Todavia, a composição dos estratos da base e do topo do leito mantiveram-se praticamente inalteradas mesmo nessas condições. Tal resiliência frente a variações nas condições de pulsação parece indicar um grande ímpeto na direção do rebaixamento da energia potencial do sistema em questão.

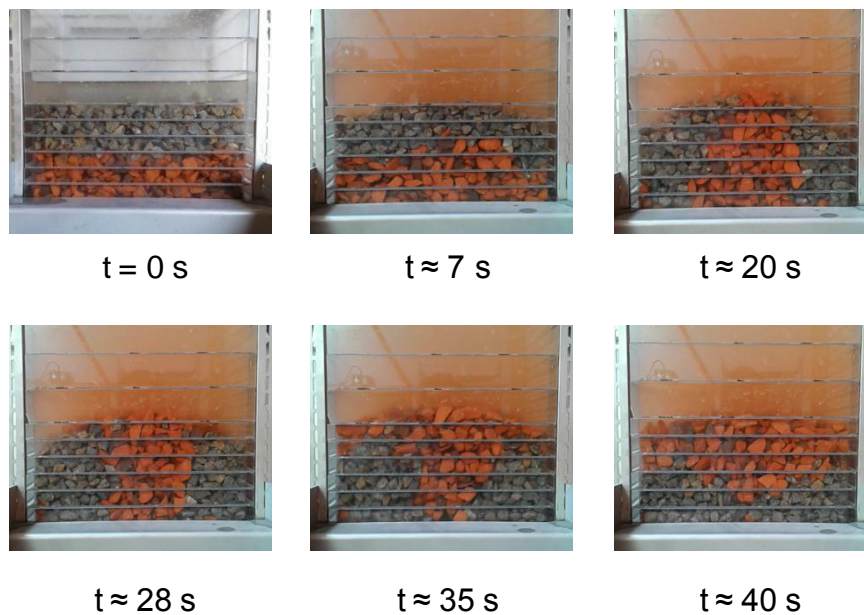


Figura 31: Evolução da estratificação em leito reverso de misturas binárias no jigge hidráulico.

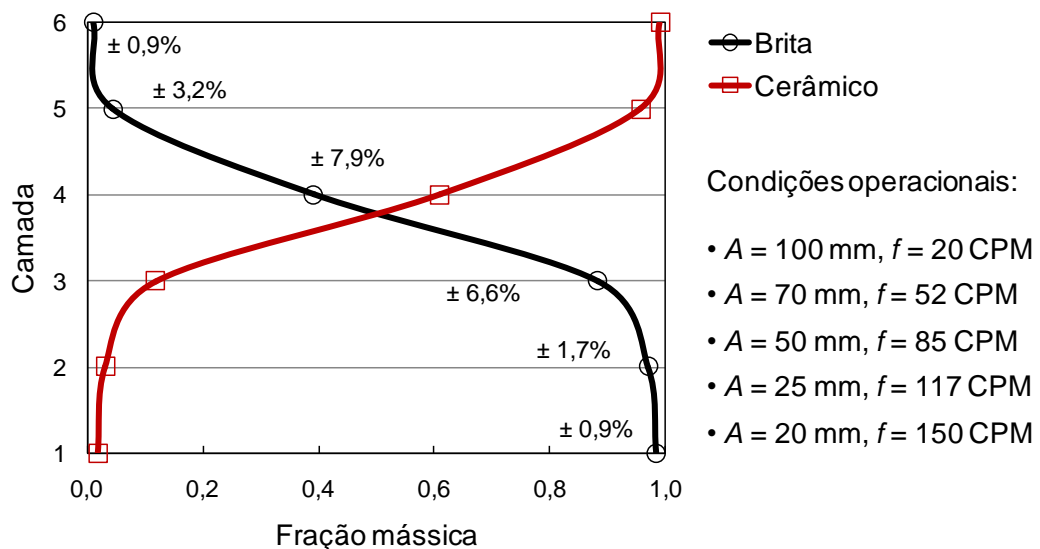


Figura 32: Perfil de estratificação médio das misturas binárias de brita e material cerâmico para as cinco condições operacionais utilizadas. As porcentagens exibidas no gráfico se referem ao desvio padrão das concentrações mássicas em cada estrato para as diferentes condições de amplitude (A) e frequência (f) utilizadas.

Um padrão similar de deslocamento das camadas do leito foi observado para o caso do sistema gesso-concreto no jigue pneumático. A Figura 33 exhibe imagens da superfície livre do leito para diferentes instantes compreendidos entre o estado inicial de estratificação reversa (gesso sob concreto, $t = 0$) até um estado aproximado de equilíbrio, onde a maior parte do gesso está concentrada na camada de topo. Conforme anteriormente mencionado, selecionou-se uma quantidade de gesso insuficiente para o preenchimento completo da camada de topo, de forma que sua distribuição em relação à subcamada de concreto pudesse ser observada.

Assim, tão logo a pulsação deu-se início ($t \approx 12$ s), foi possível observar o aparecimento de partículas de gesso nas proximidades do centro geométrico da superfície do leito. A partir deste ponto, as partículas se espalharam continuamente ao longo da superfície do leito, deslocando-se em direção às bordas do compartimento. Após um curto período de tempo ($t \approx 35$ s), praticamente todo o gesso contido no sistema já se concentrava no topo. Ao fim do processo, quase todas as partículas de gesso se encontravam concentradas ao longo das bordas, evidenciando um perfil bem definido de estratificação horizontal. À medida que as partículas de gesso migravam em direção às paredes e ali se estabeleciam, foi possível observar o movimento da camada inferior de concreto. Nesta, uma zona estagnada localizada na porção central, a partir da qual partículas de concreto apareciam continuamente, era circundada por uma periferia na qual ocorria um deslocamento das partículas em direção às paredes, de forma semelhante a uma erupção. Ao contrário das partículas de gesso, que permaneceram detidas nas paredes após ali se estabelecerem, a camada de concreto sustentou esse movimento circular até o fim do processo.

Uma vez suspensa a pulsação do leito, as partículas de gesso localizadas sobre a camada de concreto foram cuidadosamente removidas manualmente a fim de observar o formato assumido pelo estrato inferior de concreto. Conforme mostra a Figura 34, as partículas de concreto se distribuíram em forma de pilha, com geometria similar a um tronco de pirâmide, com uma elevação na porção central e uma depressão nas bordas. Nestas, existiam algumas partículas de gesso que haviam penetrado profundamente no interior do leito.

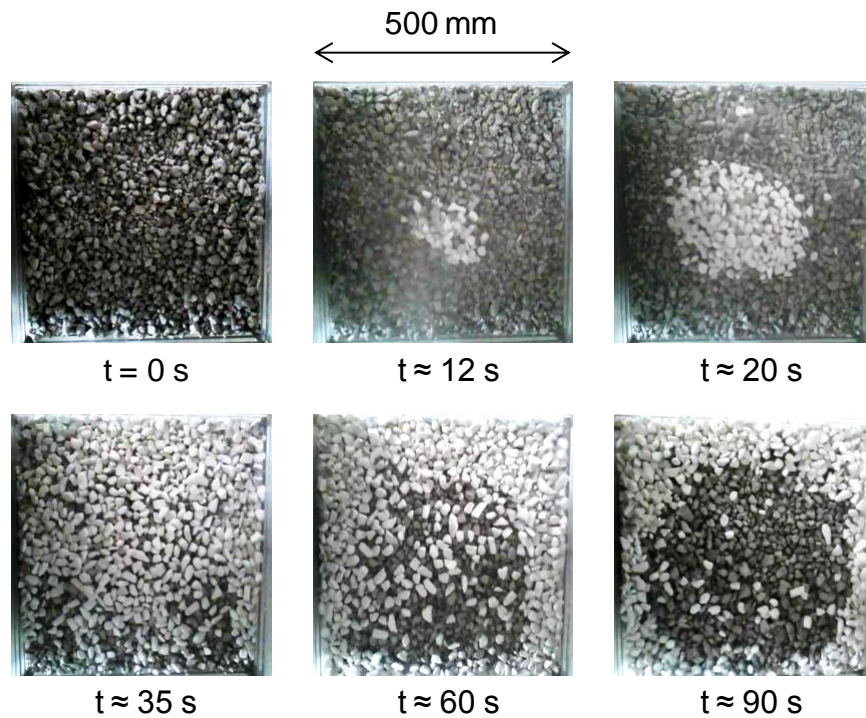


Figura 33: Evolução do processo de elevação de partículas de gesso através de camada uniforme de concreto.

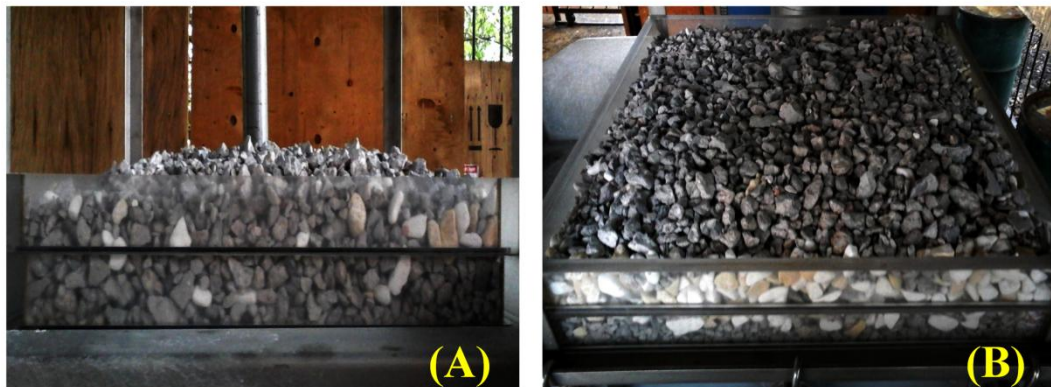


Figura 34: Forma assumida pelo estrato de concreto após jigagem de mistura binária contendo concreto e gesso. (A) A ocorrência de uma pilha (monte) semelhante a um tronco de pirâmide quadrado pode ser claramente observado após remoção cuidadosa das partículas de gesso. (B) Uma quantidade significativa de gesso concentrou-se no interior do leito, ao longo das paredes.

Por fim, a observação do deslocamento horizontal dos traçadores na superfície do leito confirmou, ao menos qualitativamente, a ocorrência de convecção granular durante a pulsação do leito. O padrão de movimento observado, direcionado às bordas internas do compartimento de jigagem, seguido por

penetração no seio do leito nas bordas e posterior reaparecimento nas vizinhanças da porção central (Figura 35) repetiu-se em todas as condições de ensaio utilizadas. Contudo, prescindiu-se da análise quantitativa, uma vez que não era possível observar a dinâmica interna da corrente convectiva (somente da superfície), sendo inviável determinar a espessura, o alcance bem como a velocidade da célula de convecção. Convém notar também que, embora o padrão de convecção tenha se mantido imutável, o processo de aparecimento e desaparecimento dos traçadores frequentemente se sucedeu de forma aleatória, onde períodos de intenso fluxo eram seguidos por lapsos de estagnação (permanência no interior do leito). Todavia, o mero exame da aparição e do desaparecimento dos traçadores na superfície forneceu informações elementares em decorrência da repetição de certos padrões.

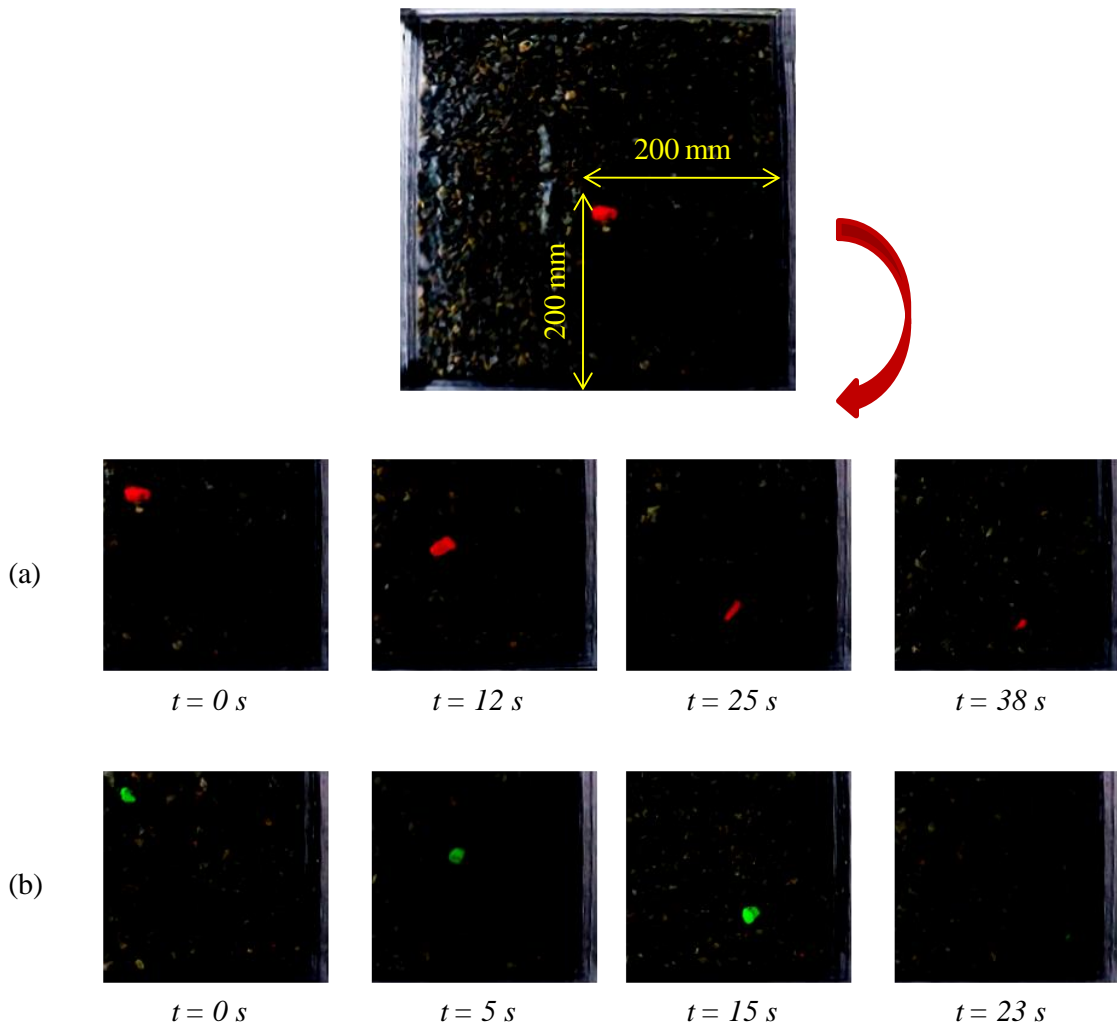


Figura 35: Imagens do deslocamento horizontal do traçador lilás (a) e verde (b) mediante ampliação de um dos quadrantes da superfície do leito (200 x 200 mm) durante o ensaio com $f = 120$ CPM. O meio-tom das imagens foi ajustado a fim de melhor visualizar o deslocamento dos traçadores na superfície.

Em primeiro lugar, o número de aparições de traçadores na superfície diminuiu com o aumento da frequência de pulsação. Para $f = 60$ CPM, foram observadas 48 aparições do traçador verde e 58 aparições do traçador lilás. Para $f = 90$ CPM, estas corresponderam a 33 e 37 aparições, respectivamente. Por fim, para $f = 120$ CPM o número de aparições dos traçadores caíram sensivelmente para 31 (verde) e 25 (lilás). Enquanto isso sugere uma maior velocidade de convecção para menores frequências de pulsação, outra particularidade notada revelou que o aumento da frequência de pulsação deu origem a um perfil de convecção aparentemente mais uniforme. De modo específico, para $f = 120$ CPM os traçadores irrompiam em pontos localizados a maiores distâncias das paredes, próximos ao centro geométrico da superfície do leito, se deslocando então em direção às paredes ou, ocasionalmente, às arestas do compartimento.

Por outro lado, para $f = 60$ CPM, os traçadores desciam nas bordas e reapareciam não muito distante das paredes, tendendo a ficarem “presos” em uma só região. Um comportamento intermediário foi observado para $f = 90$ CPM. Isto poderia indicar um maior alcance da corrente convectiva (abrangência de uma maior largura do leito) quando maiores frequências de pulsação foram empregadas, de modo que os traçadores percorriam uma distância maior no seio do leito antes de eclodir na superfície. Por outro lado, uma vez que maiores frequências de pulsação resultam em menores amplitudes de expansão do leito³, é possível também que a célula convectiva se encontrasse limitada somente à banda superior do leito, tal como ocorre em baixas acelerações vibracionais de leitos vibrados mecanicamente (TAGUCHI, 1992; GARCÍMARTIN et al., 2007). Dadas essas incertezas, é temerário realizar qualquer consideração a respeito da dinâmica da convecção sem que haja uma observação detalhada do fenômeno no interior do leito. Porém, os resultados obtidos tornam evidente o fato de que um fluxo granular de caráter convectivo se manifesta no sistema e que o comportamento do mesmo é influenciado pelas condições operacionais de pulsação do leito.

³ Para uma taxa constante de injeção de ar na arca do jigue hidráulico, o aumento da frequência de pulsação resultará em uma menor expansão do leito.

4.2 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS

A Figura 36 mostra os resultados da análise do movimento do leito do jigge para as três frequências de pulsação consideradas. Sobretudo, é possível notar que o deslocamento vertical do leito na porção central da parede foi, sem exceção, maior do que nas arestas durante a maior parte do ciclo de jigagem. Ainda, a diferença de deslocamento foi maior quando menores frequências de pulsação foram utilizadas, sendo considerável quando $f = 60$ CPM, porém discreta quando $f = 120$ CPM. Conforme pode ser observado na Figura 36(a), durante os momentos iniciais da fase de expansão o leito se elevou de modo aproximadamente uniforme, de modo que diferenças de deslocamento significativas ($\Delta y \geq 5$ mm) não foram observadas. Contudo, após dado momento, o movimento ascendente nas zonas das arestas desaceleraram mais rapidamente do que no centro, enquanto neste o movimento de elevação ainda continuou evoluindo. Como efeito líquido, é possível presumir que a porção do leito localizada próxima às arestas iniciou a fase de consolidação instantes antes que a porção do leito localizada no centro.

Buscando comparar quantitativamente o efeito da frequência de pulsação no desenvolvimento dos deslocamentos diferenciais, foi determinada a fração de instantes do ciclo no qual diferenças de deslocamento vertical ocorreram bem como a diferença média de posição, $\overline{\Delta y}$, ao longo de todo o ciclo. Para $f = 60$ CPM, diferenças significativas de deslocamento surgiram quando o ciclo completou 27% de sua evolução (aproximadamente a meio caminho da expansão máxima), sendo que a assimetria do movimento manteve-se até o fim do ciclo. Ao longo do ciclo, a porção central do leito permaneceu em média 14,8 mm acima da porção localizada nas arestas do recipiente. Apesar do fato que a velocidade de sedimentação do leito no centro também foi maior na porção central (Figura 36.b), o leito contido nas arestas alcançou posições de repouso momentos antes que o leito localizado no centro, uma vez que o deslocamento máximo médio nas duas arestas foi de 43,5 mm ($\pm 2,6$ mm) enquanto no centro foi de 71,8 mm.

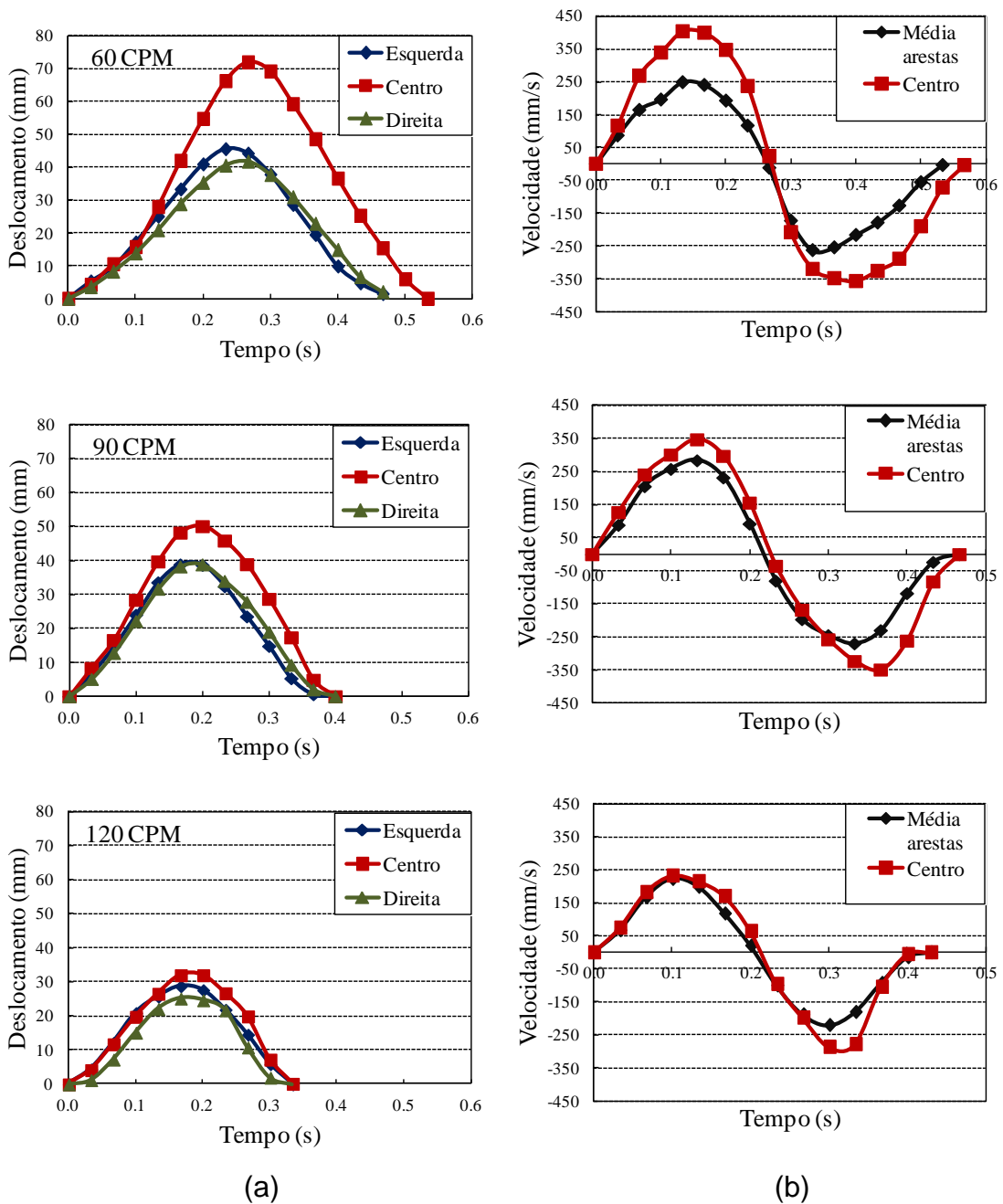


Figura 36: (a) deslocamento vertical e (b) velocidade do leito na zona central e nas arestas para as três frequências de pulsação usadas nos testes. Cada ponto contido nas curvas representa o valor médio naquele instante para 10 ciclos de jigagem.

Por outro lado, para $f = 90$ CPM, diferenças significativas de deslocamento surgiram somente quando o ciclo estava próximo de completar 50% do seu movimento, isto é, nas proximidades do ponto de expansão máxima do leito. Como pode ser observado, a partir do início da fase de consolidação, as diferenças de posições foram se tornando menores até o ponto em que o leito contido em ambas as zonas alcançam a posição de repouso aproximadamente no mesmo instante.

Para este caso, o deslocamento diferencial médio do ponto central em relação às arestas foi de 6,9 mm, ao passo que o deslocamento máximo médio nas duas arestas e no centro foram de 38,8 mm ($\pm 0,0$ mm) e 50,1 mm, respectivamente. De modo similar, para $f = 120$ CPM, diferenças significativas de posição surgiram quando o ciclo estava próximo da expansão máxima ($\approx 50\%$ de extensão). Contudo, ainda antes do leito retornar à posição de repouso (cerca de 90% do ciclo completo), o deslocamento diferencial médio deixou de ser significativo. De fato, o deslocamento vertical médio do ponto central em relação às arestas para este caso foi de apenas 3,13 mm, mantendo-se abaixo do nível de significância pré-definido ($\Delta y_{min} = 5$ mm). Todavia, deve-se levar em conta que este valor refere-se apenas à média para todo o ciclo, de modo que diferenças significativas (até a ordem de 7 mm) ocorreram durante a fase de consolidação. Neste caso, o deslocamento máximo no centro foi de 32,1 mm enquanto nas arestas foi de 27,0 mm ($\pm 2,5$ mm).

Informações úteis a respeito da precisão das medidas de deslocamento vertical do leito, bem como da variabilidade do movimento para diferentes ciclos foram obtidas mediante o exame do desvio padrão das medições, conforme exibido na Figura 37. Observa-se que o desvio padrão em todas as três zonas foi muito mais alto nos instantes iniciais e finais do movimento do leito do que nas proximidades do ponto de expansão máxima. Em outras palavras, o grau de variação de posições ao longo dos 10 ciclos de jigagem analisados foram maiores quando o leito estava em estado de repouso ou quase repouso. Isto fornece alguma percepção a respeito da flutuação nas posições de repouso atingidas pelo leito ciclo após ciclo. Todavia, cabe frisar que os valores absolutos da posição do leito tendiam ao mínimo nos extremos do ciclo (deslocamento $\rightarrow 0$), de modo que mesmo variações discretas em torno da média resultaram em grandes valores de desvio padrão. A saber, o maior desvio padrão observado foi de 55% (para $t = 0$ s e $f = 120$ CPM na aresta direita, Figura 37.c) o que correspondeu, em termos absolutos, a um desvio de 0,26 mm em relação à posição média de repouso de 0,47 mm. Em contrapartida, o menor desvio padrão observado foi de apenas 1,7% (para $t = 0,27$ s e $f = 60$ CPM no centro, Figura 37.a) o que por sua vez correspondeu a um desvio padrão absoluto de 1,3 mm em relação a posição média obtida nesse instante, igual a 77 mm. Assim, levando em conta que procedimento de medida do deslocamento foi formalmente o mesmo ao longo dos ciclos analisados, é possível supor que o modo de variação do desvio padrão observado (para diferentes instantes dentro do ciclo) não deve estar

somente relacionado às imprecisões das medidas, mas sim a características inerentes ao processo de oscilação do leito. Assim, poder-se-ia afirmar que, a grosso modo, a imprecisão nas medições poderia ser avaliada em termos do desvio padrão nas proximidades do ponto de deslocamento máximo enquanto, distante deste, o aumento no desvio padrão estaria relacionado a flutuações causadas por diferentes interações entre partículas ao longo dos ciclos.

Neste caso, é possível observar que os desvios nas proximidades do ponto máximo para 60 CPM ($0,17 < t < 0,3$ s) e 90 CPM ($0,13 < t < 0,23$ s) mantiveram-se, com exceção da aresta esquerda, abaixo de 10%. Por outro lado, variações muito maiores foram observadas nas arestas para $f = 120$ CPM, indicando uma oscilação considerável no deslocamento do leito nas arestas para este caso. Isto pode estar relacionado ao fato que, sob alta frequência de pulsação, o leito ainda pode estar em queda quando a corrente fluida reinicia a ascensão, o que aliado à elevada dissipação nas arestas, resulta em uma maior flutuação de posições ao longo do tempo.

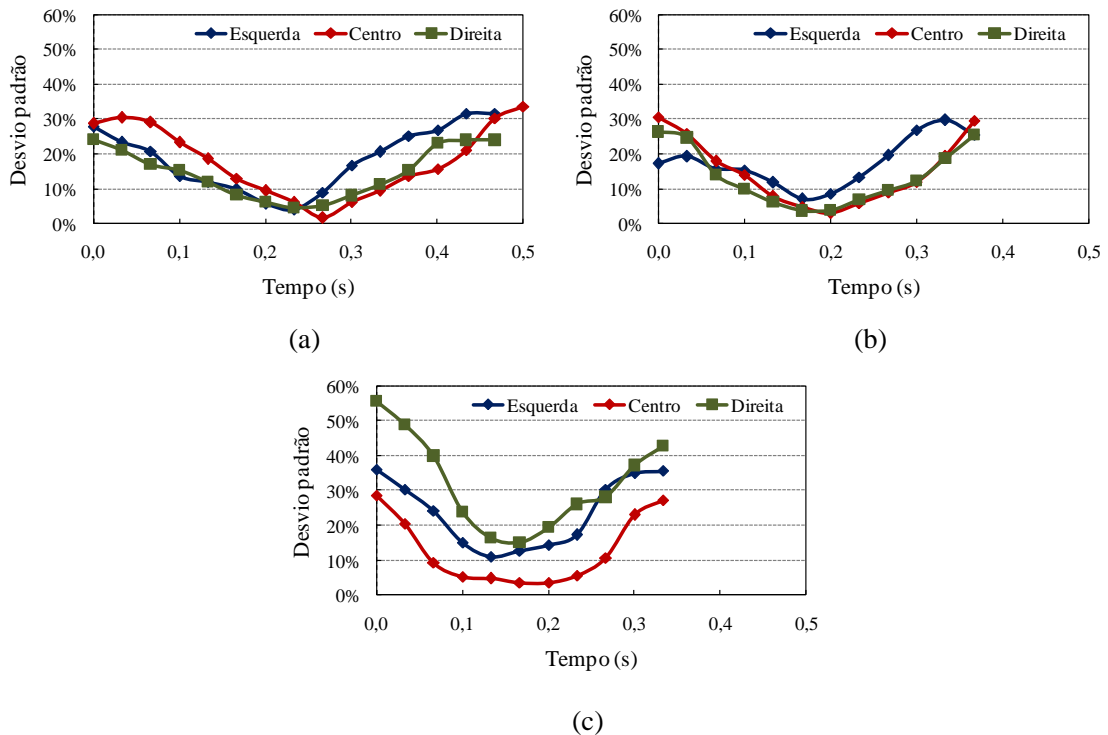


Figura 37: Desvio padrão percentual das medidas de deslocamento vertical do leito para (a) 60 CPM, (b) 90 CPM e (c) 120 CPM. Cada ponto representa o desvio padrão de 10 medidas, cada qual correspondente a um dado instante dentro do ciclo de jigagem.

Os resultados obtidos permitem induzir que quanto mais extenso é o movimento vertical de elevação do leite (relacionado a altas amplitudes e baixas frequências de pulsação) maior tende a ser a diferença de deslocamento entre a porção do leite contida na parte central e aquela localizada próximo às extremidades do compartimento, o que, por sua vez, pode ser atribuído a uma maior dissipação de energia cinética devido ao atrito das partículas com as arestas do recipiente. Extrapolando esta inferência para o volume total do leite, poder-se-ia admitir que o mesmo fenômeno ocorra entre a zona central do sistema e a região vizinha às bordas do recipiente que contém o leite. Também é interessante notar que, para além das diferenças de deslocamento entre o centro e as arestas, existem pequenas diferenças de deslocamento entre as arestas esquerda e direita. Particularmente, o deslocamento do leite localizado na aresta direita tendeu a ser levemente inferior ao localizado na esquerda. Na ausência de outras causas, pode-se atribuir a ocorrência deste fenômeno à existência de não uniformidades no fluxo ascendente de água pulsada na câmara do jigue.

A comparação entre a velocidade média de convecção, estimada segundo a equação (43), e o número de aparições dos traçadores na superfície do leite é mostrada na Figura 38. É possível notar que assim como a velocidade média, o número de aparições dos traçadores na superfície decresce de maneira aproximadamente linear com o aumento da frequência de pulsação (mais precisamente, com a diminuição da amplitude de pulsação que decorre do aumento da frequência). Em suma, isso sugere um aumento da intensidade do fluxo convectivo na superfície do leite à medida que a amplitude de pulsação do sistema é elevada. Ressalta-se que, uma vez que nada foi revelado a respeito do movimento no interior do leite, seria incerto inferir sobre o efeito global da redução da frequência (ou aumento da amplitude) sobre o fluxo convectivo. Todavia, o comportamento observado vai ao encontro daquele reportado na literatura (WASSGREN, 1997; YANG; HSIAU, 2000), o qual sustenta que a velocidade do fluxo convectivo tende a aumentar com o aumento da amplitude de oscilação do leite. Essa tendência foi confirmada, uma vez que no jigue hidráulico usado nos ensaios a amplitude de oscilação depende inversamente da frequência de pulsação (quanto menor a segunda, maior a primeira).

Por fim, ainda que as estimativas da velocidade média de convecção careçam de validação experimental, dados de literatura revelam uma ordem de magnitude

similar. Hsiau e Chen (2002), por exemplo, mediram o movimento convectivo bidimensional de um leito de esferas de vidro de 3 mm, encontrando velocidades horizontais e verticais de até 14 mm/s e 6,5 mm/s, respectivamente. Ressalta-se que neste caso, o leito foi vibrado mecanicamente com uma frequência muito maior (15 Hz) e uma amplitude de oscilação muito menor (≈ 3 mm) do que aquelas usadas no presente estudo.

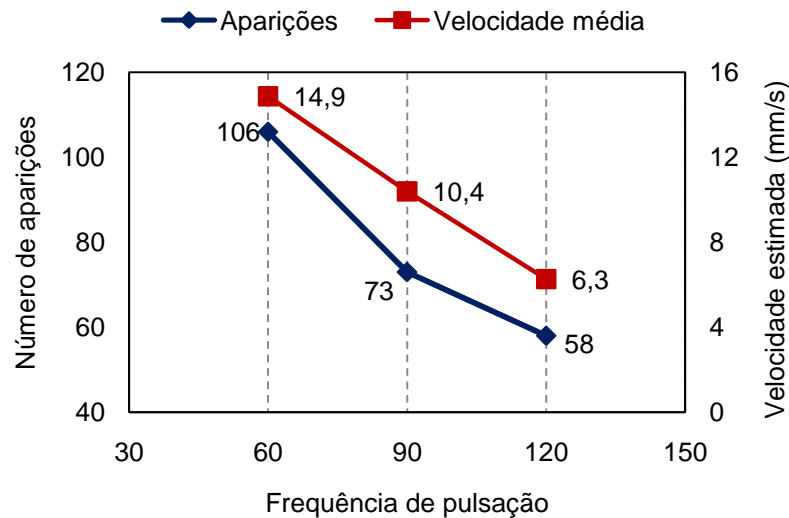


Figura 38: Número total de aparições dos traçadores na superfície do leito e estimativa da velocidade média de convecção em função da frequência de pulsação aplicada.

4.3 INFLUÊNCIA DA CONVECÇÃO SOBRE A ESTRATIFICAÇÃO

4.3.1 Perfis de estratificação

Os resultados obtidos após os testes de estratificação são mostrados na Figura 39. De forma geral, o leito foi rearranjado em uma configuração constituída por uma camada de topo e de fundo preenchidas em larga proporção com partículas de gesso e concreto, respectivamente, e uma camada intermediária contendo uma mistura composta principalmente por partículas de concreto e material cerâmico. Conforme apontado por Cazacliu et al. (2014), embora a separação de gesso dos outros componentes seja *a priori* viável segundo o critério de concentração, o mesmo sugere que a separação entre concreto e material cerâmico seria de difícil

execução devido a proximidade entre as densidades dos dois componentes. Visto que tal não foi confirmado pelos dados experimentais e levando em conta a ausência de qualquer segregação por diferenças de tamanho, é bastante provável que diferenças na compactidade (ou na densidade de empacotamento) dos componentes, originadas por diferenças na geometria de partícula, foram um fator de peso no rearranjo final do leito (ABREU; TAVARES; CASTIER, 2003; ESCUDIÉ et al., 2006). Conforme reportado por Cazacliu et al. (2014), a compactidade das partículas de concreto é significativamente maior do que das partículas de material cerâmico de mesma granulometria, o que sugere que um leito mais compacto é formado quando o concreto é preferencialmente concentrado na camada de fundo.

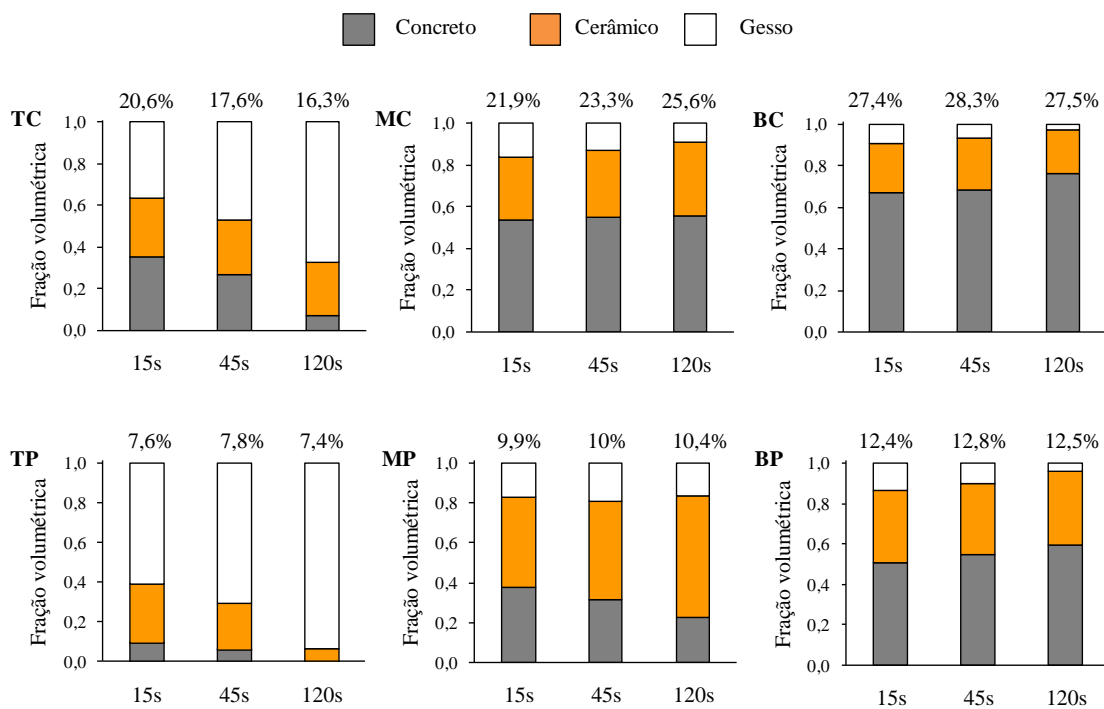


Figura 39: Fração volumétrica dos componentes em cada uma das zonas de amostragem ao longo dos três tempos de jigagem. As zonas de amostragem foram abreviadas como TC (topo centro), MC (meio centro), BC (base centro), TP (topo parede), MP (meio parede) e BP (base parede). A porcentagem exibida acima de cada coluna representa a fração mássica contida em cada zona em relação à massa total de material do leito.

Como regra geral, partículas mais densas estiveram mais concentradas na zona central de cada camada enquanto partículas mais leves tenderam a estar mais concentradas ao longo das bordas do recipiente. Como pode ser observado na Figura 39, os grãos de gesso estiveram preferencialmente agrupados nas proximidades das paredes em todas as camadas, particularmente na de topo. Nesta

camada, para todos os três tempos de jigagem utilizados, sua fração volumétrica na zona de borda permaneceu aproximadamente 24% maior do que no centro, indicando assim que um perfil de segregação horizontal estacionário foi rapidamente alcançado na camada superior. De modo similar, na camada de fundo, as diferenças de concentração entre as zonas de centro e de borda permaneceram aproximadamente constante em 16% ao longo do tempo de jigagem, sendo contudo, orientada na direção oposta (maior concentração no centro do que nas bordas). Por outro lado, as partículas de material cerâmico mostraram uma tendência maior de se concentrar nas zonas de borda quando nas camadas intermediária e de fundo. As diferenças locais de concentração horizontal na camada intermediária aumentaram com o tempo de jigagem em 15%, 17% e 26% para os tempos de jigagem de 15 s, 45 s e 120 s, respectivamente. Considerando que o material cerâmico foi o componente com densidade intermediária no sistema e, portanto, o de mais difícil separação, é razoável supor que, caso o tempo de jigagem fosse grande o suficiente, sua distribuição horizontal ao longo da camada intermediária também iria eventualmente permanecer aproximadamente constante.

A fim de analisar a evolução da estratificação ao longo do tempo, predições da estratificação para os tempos de 45 s e 120 s foram realizadas por meio de extrapolação linear. Assim, para estimar a fração volumétrica dos componentes em $t = 45$ s, foram usados os dados experimentais de $t = 0$ s (estado inicial, considerado perfeitamente misturado) e $t = 15$ s, enquanto para estimativa da composição em $t = 120$ s foram usados os dados obtidos nos ensaios em $t = 15$ e 45 s. A Figura 40 mostra uma comparação entre os valores de composição preditos e aqueles obtidos experimentalmente. A concentração de partículas de mesma composição predita a partir dos dados em $t = 0$ e 15 s mostrou-se maior do que aquela observada experimentalmente para $t = 45$ s. Por outro lado, a predição originada de $t = 15$ e 45 s apresentou boa concordância com os resultados experimentais em $t = 120$ s. Pode-se depreender a partir disso que uma concentração de partículas (i.e., variação no arranjo inicial do leito) ocorreu rapidamente no início do processo de jigagem seguida por um decréscimo na taxa de concentração após $t = 15$ s, a qual evoluiu de forma estável até $t = 120$ s. Deste modo, a evolução do processo de estratificação após os primeiros instantes (de 15 até 120 s) pode ser descrita como um processo linear no qual a influência do tempo de jigagem poderia ser estimada através de extrapolação linear.

É também possível observar na Figura 40 que alguns valores de concentração obtidos via extrapolação linear foram menores do que 0 ou mesmo maiores do que 1, conforme indicado pelos valores dentro dos círculos. Uma análise detalhada revela que as zonas do leito nas quais estes valores críticos ocorreram estiveram bem correlacionadas com o rearranjo do leito, conforme ilustrado na Figura 39. Por exemplo, resultados da extrapolação predizem uma alta concentração de concreto na camada de fundo (fração volumétrica predita de 1,28) e uma concentração negativa de gesso na mesma região (fração volumétrica predita de -0,32). Tendência similar ocorreu na extrapolação a partir dos dados de $t = 15$ e 45 s, porém com uma extensão muito menor (fração volumétrica predita de -0,03). Estes resultados reforçam a evidência de que a estratificação vertical ocorre mais rapidamente nos primeiros ciclos de jigagem. Além disso, também indica que o perfil horizontal de segregação (ou seja, a diferença de concentração entre as zonas de centro e de borda) é estabelecido logo no início da pulsação do leito e, a despeito de variações pontuais no grau de segregação, mantém a mesma configuração ao longo do tempo de jigagem.

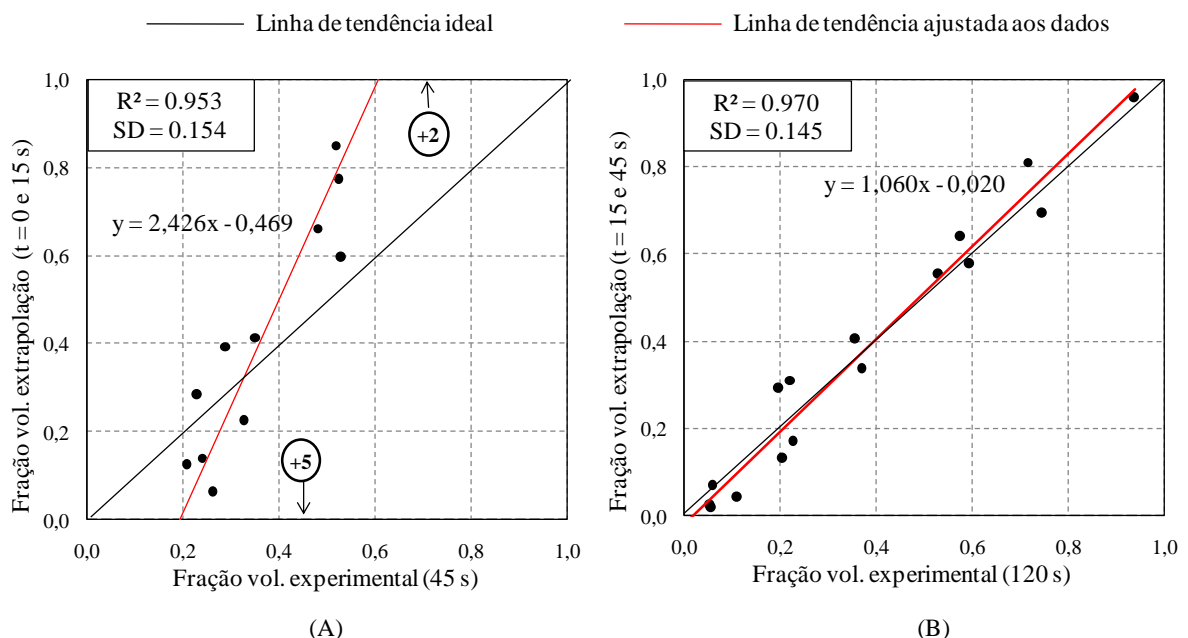


Figura 40: Correlação entre resultados experimentais e estimativas da fração volumétrica obtidas por meio de extrapolação linear. (A) Predição da estratificação em $t = 45$ s a partir dos dados em $t = 0$ e 15 s. (B) Predição da estratificação em $t = 120$ s a partir dos dados em $t = 15$ e 45 s. Os pontos representam a fração volumétrica de cada componente (concreto, cerâmico e gesso) em cada uma das seis zonas de amostragem. Dentro dos círculos estão indicados os valores preditos que excedem os limites mínimo e máximo de concentração.

Adicionalmente, a variação de compacidade em cada zona (centro e borda das três camadas) foi determinada a fim de analisar o rearranjo do leito após a estratificação (Figura 41). Neste ponto, convém definir a compacidade local como a fração de sólidos contida em uma dada região:

$$CO = \frac{(m_C/\rho_C) + (m_B/\rho_B) + (m_G/\rho_G)}{V_T} \quad (49)$$

onde m_C , m_B e m_G são as massas de concreto, material cerâmico e gesso coletadas em uma das seis zonas de amostragem adotadas; ρ_C , ρ_B e ρ_G são as densidades de cada material, dados na Tabela 2, e V_T é o volume total referente à zona de amostragem, o qual pode corresponder tanto à zona de centro quanto à zona de borda de uma dada camada. Inicialmente, o leito misturado possuía uma compacidade global igual a $CO = 0,51$. Convém observar que, para fins de comparação, o rebaixamento do leito após a jigagem foi considerado desprezível.

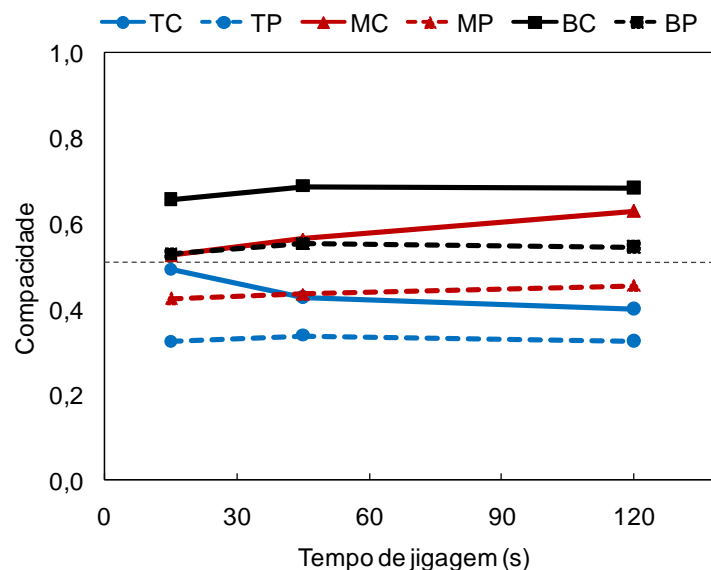


Figura 41: Compacidade local calculada para cada zona de amostragem ao longo dos tempos de jigagem considerados. A linha fina pontilhada corresponde a compacidade global do sistema.

Conforme esperado, uma camada bastante compactada foi formada na base do leito após sucessivos ciclos de jigagem e a distribuição da compacidade diferiu significativamente ao longo do volume do leito parcialmente segregado, conforme mostrado na Figura 41. Com base em dados da literatura (BEN-AÏM, 1970; MCWHIRTER; CRAWFORD; KLEIN, 1997), foi previsto que uma redução na

compacidade local poderia ser observada nas zonas de borda devido a efeitos de empacotamento. Em concordância com este comportamento, a compacidade local ao longo das paredes permaneceu invariavelmente menor do que na zona central do leito. Na camada de fundo, a diferença de compacidade entre as duas zonas permaneceu constante em 0,13 ao longo do tempo de jigagem. Por outro lado, diferenças locais na compacidade variaram significativamente nas outras camadas, aumentando de 0,10 para 0,17 na camada intermediária e diminuindo de 0,17 para 0,07 na camada de topo, o que claramente define uma tendência oposta de concentração.

Na zona central da camada de fundo, observou-se que a variação de compacidade a partir do estado inicial foi mais rápida do que em outras camadas, estabilizando-se em $CO \approx 0,68$ para $t = 45$ s. Isso sugere que o componente denso concentrou-se na camada de fundo mais rapidamente do que os componentes mais leves concentraram-se nas camadas superiores⁴. Ainda, isto também é um indicativo de que a estratificação continua a evoluir mesmo após a formação de um leito consideravelmente compacto na base. Esta circunstância concorda qualitativamente com aquela descrita por Crespo (2016). Curiosamente, a variação de compacidade ao longo do tempo nas camadas intermediária e de topo, embora de comportamento opostos, mostraram uma taxa de variação muito similar. Em particular, para $t = 15$, 45 e 120 s o aumento da compacidade na camada intermediária foi de 0,02, 0,06 e 0,12 unidades, respectivamente. Isto reforça o fato que a variação da compacidade total do leito ao longo do tempo poderia ser desprezada no âmbito da presente análise.

Em suma, os resultados supramencionados indicam que uma banda compacta foi rapidamente formada na camada inferior do leito e intercâmbio de partículas foi particularmente alto entre as camadas intermediária e de topo. Também, a evolução da compacidade local sugere que o leito inicialmente misturado começou a estratificar da base para o topo, o que está de acordo com o comportamento descrito na literatura (KIRCHBERG; HENTZSCHEL, 1957; CRESPO, 2016).

Em contraste com a considerável variação de compacidade na zona central, a compacidade local nas zonas de borda permaneceu quase invariável ao longo do

⁴ A evolução do teor de concreto no fundo (Figura 39) reforça esse comportamento.

processo (com diferenças inferiores a 0,03 unidades em todos os casos). Isto não necessariamente contradiz os resultados exibidos na Figura 39, os quais mostram, por exemplo, um aumento da concentração de gesso ao longo das bordas na camada de topo, mas pode revelar que, ao contrário da zona central, a segregação evoluiu à compacidade constante. Neste caso, os distúrbios no empacotamento dos grãos causado pelas paredes podem ser altos o suficiente a ponto de sobrepor as variações em compacidade relacionadas à variações de composição.

4.3.2 Comparação entre segregação vertical e horizontal

Uma comparação entre a segregação na direção vertical e horizontal é mostrada na Figura 42. Na presente análise, a segregação na direção vertical foi tida como a diferença absoluta entre a concentração volumétrica do principal componente em uma dada camada (gesso no topo, material cerâmica no meio e concreto na base) e a concentração volumétrica média do mesmo material nas outras duas camadas. Do mesmo modo, a segregação na direção horizontal foi avaliada através da diferença absoluta entre as concentrações volumétricas de cada material na zona central e de borda.

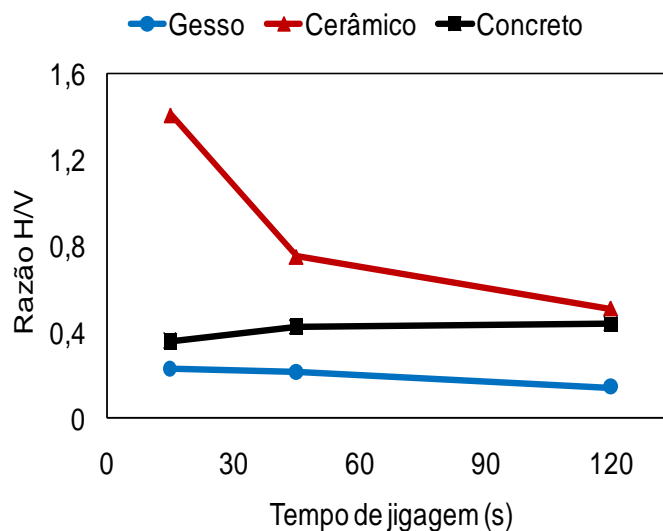


Figura 42: Comparação entre segregação vertical e horizontal conforme observado nos ensaios. Os valores exibidos na ordenada representam a razão entre a extensão da segregação horizontal e a extensão da segregação vertical.

A Figura 42 revela à primeira vista que a segregação horizontal foi expressamente secundária em comparação com a segregação vertical, embora aquela tenha apresentado influência importante no rearranjo do leito. A cinética de segregação foi significativamente diferente nas duas direções. No plano horizontal, as diferenças médias de composição ao longo do tempo entre as zonas de centro e de borda mantiveram-se em 0,090 ($\pm 0,014$) para o gesso, 0,091 ($\pm 0,010$) para o material cerâmico e 0,180 ($\pm 0,014$) para o concreto. Por outro lado, utilizando o método previamente descrito, as diferenças médias na composição vertical aumentaram de modo aproximadamente linear ao longo do tempo, variando de 0,490 ($\pm 0,190$) para o gesso, 0,122 ($\pm 0,064$) para o material cerâmico e 0,312 ($\pm 0,092$) para o concreto. É interessante observar, a partir desta análise, que em contraste com o processo de segregação vertical, um perfil horizontal de estratificação se estabeleceu rapidamente logo no início da jigagem, variando suavemente ao longo do tempo de jigagem, conforme pode ser observado pelos baixos valores dos desvios-padrões. Ainda, as diferenças médias de composição mostram que a segregação horizontal foi mais intensa para as partículas mais densas, localizadas nas camadas mais profundas do leito. Esta evidência parece demonstrar que a profundidade do leito tem importante influência na formação do perfil horizontal de segregação, embora a análise de sua relevância esteja além do escopo do presente estudo. Além disso, as mudanças de composição médias observadas reforça a hipótese discutida na seção 4.3.1, a qual admite que a concentração de material denso (concreto) na camada de base é mais rápida do que a de material leve (gesso) na camada de topo.

É também possível observar (Figura 42) que a razão de segregação para o gesso foi menor do que para o material cerâmico e o concreto em todos os casos. Isto pode estar relacionado a densidade relativamente baixa do gesso, a qual favorece sua elevação até à superfície do leito e seu conseqüente acúmulo na camada de topo. Assim, é possível induzir que na existência de diferenças significativas de densidade entre os componentes, a segregação vertical é favorecida de tal modo que pode exceder em muito a segregação horizontal.

Por outro lado, altos valores de razão de segregação foram obtidos para o material cerâmico e o concreto, incluindo uma razão de segregação excepcionalmente maior que 1 para o material cerâmico quando $t = 15$ s, indicando assim uma predominância da segregação horizontal sobre a vertical. Conforme

supramencionado, as densidades próximas do material cerâmico e do concreto (2,26 g/cm³ e 2,39 g/cm³, respectivamente) torna *a priori* difícil sua separação com base somente em diferenças de densidade, embora outros mecanismos possam causar a segregação, como a diferença na densidade máxima de empacotamento (ABREU; TAVARES; CASTIER, 2003; CAZACLIU et al., 2014). Todavia, diferenças na compacidade do material cerâmico e do concreto *per se* não são capazes de justificar a formação de um perfil horizontal de estratificação, bem como o fato da estratificação evoluir com uma compacidade aproximadamente constante na camada de fundo (Figura 41). Estas observações não usuais permitem assumir que a segregação horizontal não ocorre devido a diferenças de compacidade local, mas em função do período no qual o leito se encontra dilatado.

4.3.3 Modelo de estratificação

Com base na análise precedente, um modelo simplificado de estratificação foi proposto a fim de prever a segregação por densidade após a jigagem. Para tanto, foram determinadas as frações volumétricas de cada componente em cada uma das regiões de amostragem (TC, MC, BC, TP, MP e BP) levando em conta os seguintes pressupostos:

- *Segregação horizontal.* Considerou-se que a existência de fluxo convectivo é responsável por distorcer o padrão final de estratificação do sistema, de forma a assumir a configuração exibida na Figura 43. O formato de cada estrato piramidal foi definido considerando que a razão $B-b_i$ é proporcional à razão $H-h_i$, onde b_i e h_i são o comprimento da base menor e a altura do estrato i , respectivamente. A distância w a partir da qual inicia a influência das bordas do recipiente sobre a estratificação foi dada pela intercessão entre a base do container e a linha que cruza o vértice de cada estrato, a qual define um ângulo agudo $\alpha \leq 90^\circ$. Portanto, quando $\alpha \rightarrow 90^\circ$ então $w \rightarrow 0$ e o efeito da convecção sobre o rearranjo do leito é desprezível;
- *Empacotamento nas paredes.* O efeito das perturbações no empacotamento de partículas próximas às paredes foi assumido conforme postulado por Ben-Aïm (1970). Em sua abordagem, admite-se a existência de distúrbios no

empacotamento do leito ao longo de um volume V_w , no qual a distância entre cada ponto e a parede é menor que $d/2$, a metade do diâmetro de partícula. Neste volume, a compacidade é dada por $K_w \cdot CO$, onde $K_w < 1$, enquanto a mesma permanece igual a CO no restante do container. Por meio de diversos experimentos, De Larrard, Sedran e Angot (1994) estimaram o valor de $K_w = 0,73$ para agregados britados, o qual foi o valor adotado no presente modelo;

- *Mistura.* Assumiu-se que no estado final o material cerâmico encontrava-se misturado com concreto e gesso ao longo de todo o volume do leito em uma proporção definida pelo assim chamado índice de mistura, I_{mix} . Assim, uma proporção I_{mix} de concreto ou gesso era substituída por partículas de material cerâmico em suas respectivas zonas preferenciais de concentração (base e topo, respectivamente) ao passo que uma proporção I_{mix} de material cerâmico era substituída por partículas de concreto ou gesso em outra camada, de maneira a manter a massa total do sistema constante. Ainda, mudanças na altura do leito decorrente do processo de compactação foram consideradas desprezíveis, de forma que também assumiu-se a conservação do volume total do leito. O valor de I_{mix} é um parâmetro de entrada do modelo.

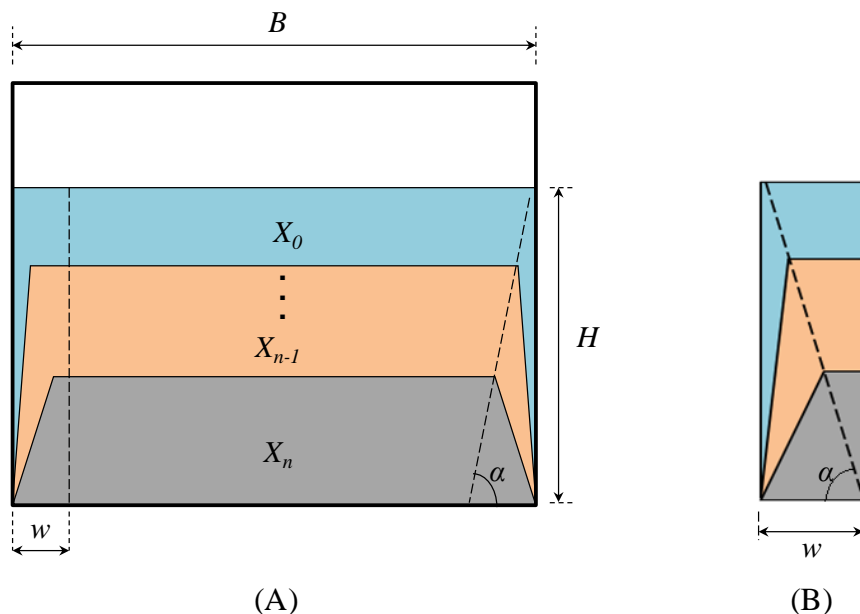


Figura 43: Rearranjo do leito conforme o modelo. (A) Após a jigagem, cada um dos n estratos assume a forma de um tronco de pirâmide onde o componente mais denso encontra-se coberto pelo mais leve. O comprimento da base menor de cada estrato aumenta progressivamente com a altura do leito H até se igualar ao comprimento do compartimento de jigagem B no topo. (B) Detalhe da configuração geométrica na zona de borda, definida pela distância w das paredes laterais.

Dados os parâmetros de entrada, o primeiro passo do modelo consiste no cálculo da geometria de cada estrato, cada qual definido pela altura h_i e comprimento da base maior b_i . Assim, dada a seguinte relação:

$$\tan \alpha = \frac{3H}{w} = \frac{h_i}{w - \left(\frac{B - b_i}{2}\right)} \quad (50)$$

ou,

$$h_i = \frac{3H(b_i - B + 2w)}{2w} \quad (51)$$

A solução conjunta da equação (50) e da equação do volume do tronco de pirâmide fornece os valores de b_i e h_i em cada estrato. No caso em questão, os valores destes parâmetros referentes ao estrato do gesso foram obtidos por subtração, uma vez que V_{gesso} e H eram já conhecidos.

Uma vez determinadas as dimensões de cada estrato, o volume total V_T de cada zona foi calculado mediante relações geométricas simples. Em seguida, o volume individual de cada componente em cada uma das zonas foi diretamente determinado a partir de sua compactidade no estado puro, levando em conta os distúrbios de empacotamento nas paredes:

$$m_i = K_w \cdot CO_i \cdot V_T \quad (52)$$

Deste modo, quando a distância das paredes é menor do que $d/2 = 8$ mm, então $K_w = 0,73$ e, para distâncias maiores, $K_w = 1$. A fração volumétrica em cada zona é então dada por:

$$x_i = \frac{v_i}{\sum v_i} (1 - I_{mix}) + \frac{v_j}{\sum v_i} I_{mix} \quad (53)$$

onde $i, j =$ concreto, gesso ou material cerâmico.

Os valores ótimos de I_{mix} e α para cada tempo de jigagem foram encontrados através da minimização da diferença entre os valores numéricos e aqueles obtidos experimentalmente (soma dos quadrados dos resíduos).

A Figura 44 mostra as previsões do modelo para os três tempos de jigagem considerando os valores ótimos de ajuste. Como pode ser visto, o modelo foi suficientemente preciso na previsão da composição para $t = 45$ e 120 s ($R^2 = 0,908$ e $0,924$, respectivamente). Contudo, conforme antecipado, o ajuste não foi menos preciso para $t = 15$ s ($R^2 = 0,803$). Apesar disso, a diminuição do valor do índice de mistura I_{mix} ao longo do tempo de jigagem fornece uma informação interessante a respeito da evolução do processo de estratificação. Ainda que a influência do tempo de jigagem (ou do número de ciclos) não seja levada em conta, seu efeito pode ser indiretamente estimado em termos do I_{mix} , uma vez que o nível de mistura do sistema (desconsiderados possíveis efeitos de remistura) tende a decrescer ao longo do tempo de jigagem.

A redução do valor de I_{mix} foi virtualmente linear em relação ao tempo de jigagem, conforme exibido na Figura 45. Conforme discutido previamente, a taxa de estratificação pode ser considerada um processo linear após certo tempo de jigagem de forma que, neste contexto, o uso de do índice de mistura I_{mix} pode ser uma maneira plausível de representar a extensão da estratificação. Ainda, a extrapolação da equação de regressão linear para $t = 0$ resulta em $I_{mix} = 0,352$ ao invés de $I_{mix} = 0,45$, o qual corresponde de fato ao índice de mistura do estado inicial. Isto parece indicar que a estratificação evolui rapidamente (de modo não-linear) nos primeiros instantes em que o leite é pulsado, sendo então modificada para uma evolução mais lenta (aproximadamente linear) em algum momento quando $t \leq 15$ s.

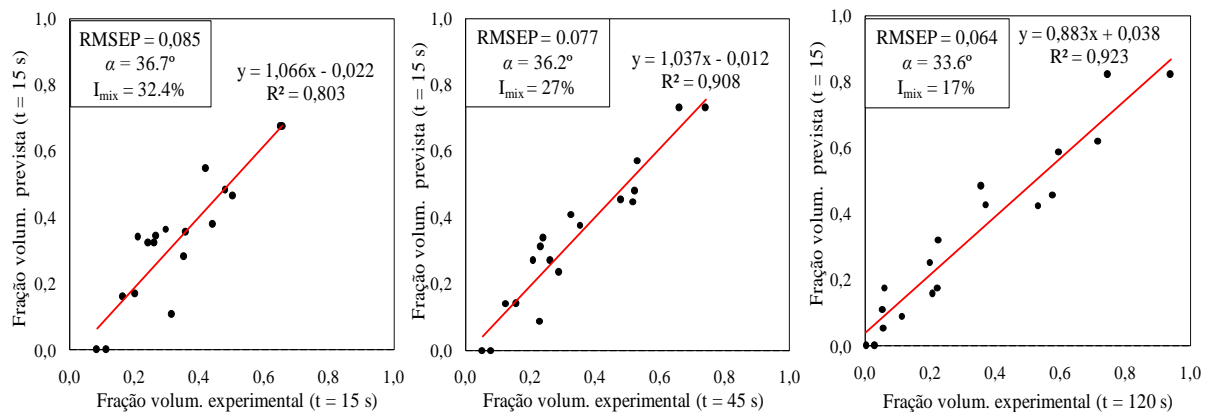


Figura 44: Correlação entre os dados experimentais e as previsões do modelo para cada tempo de jigagem. O erro médio quadrático da previsão ($RMSEP = [\sum(\text{previsto} - \text{experimental})^2/n]^{0,5}$) foi calculado a fim de se obter uma estimativa do erro de previsão.

Ao contrário do índice de mistura, o valor de α manteve-se quase inalterado para os três tempos de jigagem considerados, indicando que a configuração de estratificação (em forma de tronco de pirâmide) pouco variou ao longo do processo. Adicionalmente, a evolução do valor de R^2 parece indicar que o leito foi rearranjado rapidamente na configuração definida (antes de 15 s), embora a mesma não estivesse plenamente estabelecida para $t < 120$ s. Em suma, isso sugere que as diferenças de concentração horizontal (entre as zonas de centro e de borda) variaram pouco ao longo do tempo de jigagem, o que é sustentado pelos dados experimentais, com exceção da variação de composição do material cerâmico na camada intermediária.

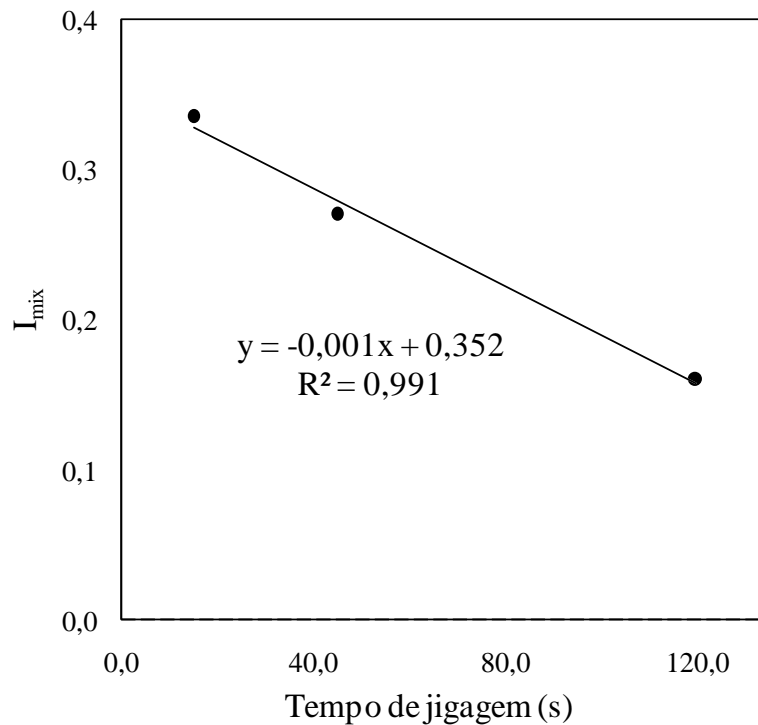


Figura 45: Evolução do índice de mistura I_{mix} longo do tempo de jigagem. É possível observar um decréscimo linear a medida que o tempo de jigagem aumenta.

A fim de verificar a relevância de cada pressuposto individual do modelo, simulações foram realizadas após um destes ser arbitrariamente obliterado (Figura 46). Quando os distúrbios de empacotamento nas paredes foram omitidos, as predições do modelo mantiveram-se de fato inalteradas, sugerindo uma influência ínfima no rearranjo final do leito. Por outro lado, o grau de correlação entre os dados numéricos e experimentais decaiu consideravelmente ao se desconsiderar os efeitos de mistura do material cerâmico ($I_{mix} = 0$) e a configuração diferencial de

estratificação nas paredes ($\alpha = 90^\circ$, o que indica, em última instância, a ausência de convecção). Estes resultados manifestam que a estratificação diferencial nas zonas de centro e de borda, conforme assumido pelo modelo (Figura 43), é capaz de representar efetivamente o perfil de estratificação observado experimentalmente, ao passo que razoáveis melhorias na predição podem ser obtidas ao se levar em conta a influência da mistura no sistema. Convém notar que há um balanço entre o efeito de mistura (regulado pelo valor de I_{mix}) e de convecção (regulado pelo valor de α) inerente ao modelo, de modo que a supressão de um tende a causar a inflação de outro a fim de gerar um ajuste ótimo aos dados experimentais.

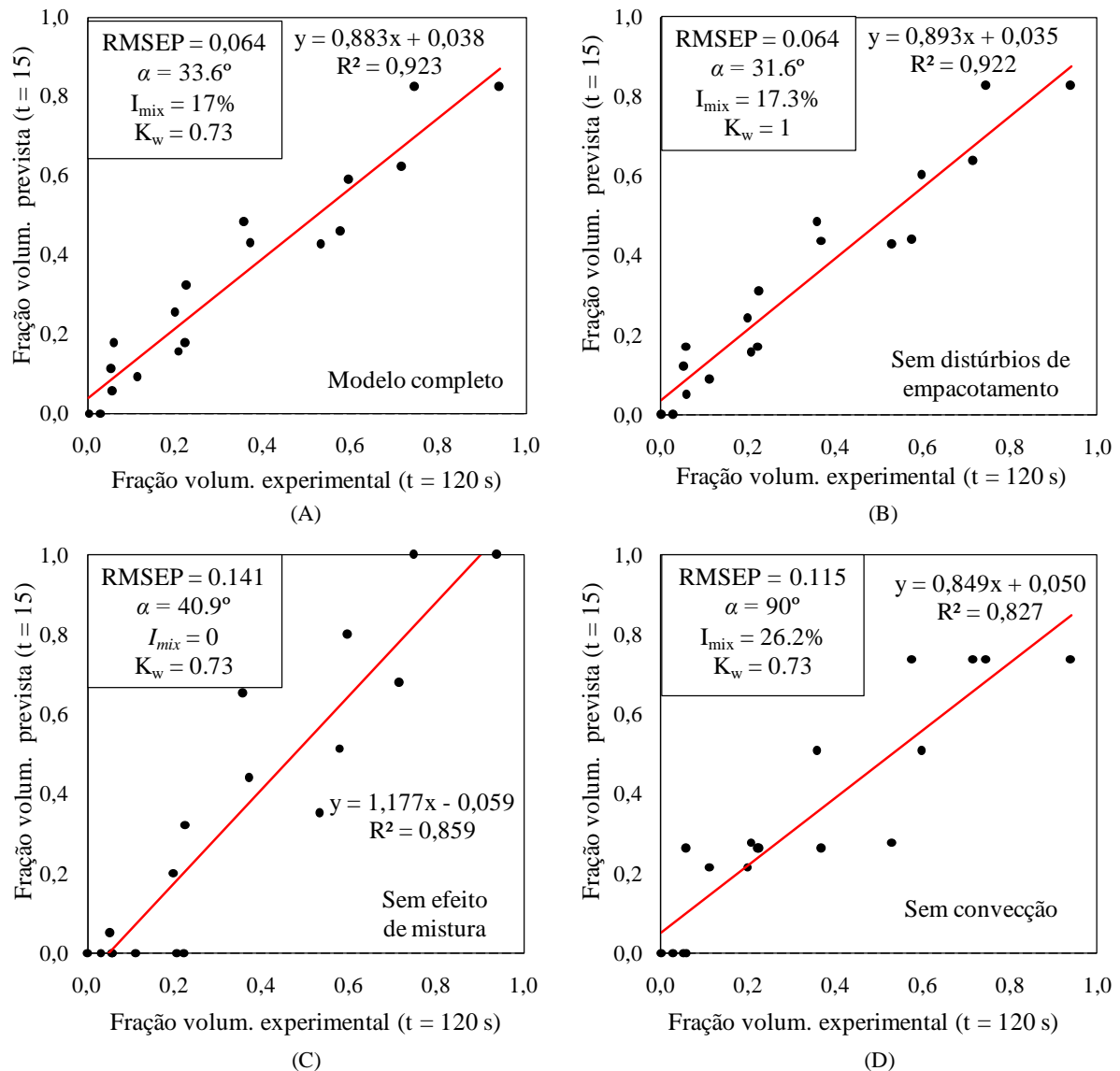


Figura 46: Correlação entre dados experimentais e numéricos para $t = 120$ s. (A) Modelo completo. (B) Ausência de distúrbios de empacotamento ($K_w = 1$). (C) Remoção dos efeitos de mistura do material cerâmico ($I_{mix} = 0$). (D) Ausência de segregação distinta nas paredes ($\alpha = 90^\circ$).

4.3.4 Mecanismo de formação de fluxos convectivos

Os resultados descritos ao longo deste capítulo revelam a existência indubitável de células convectivas durante o processo de pulsação do leite de jigagem, as quais se manifestam com uma configuração similar àquela descrita na literatura para o caso de leitos sob agitação vertical, i.e. com um fluxo ascendente na porção central e descendente próximo às paredes (ZHANG et al., 2014; WINDOWS-YULE; DOUGLAS; PARKER, 2015; ZIDI; HASSEINE; MOUMMI, 2017). Do mesmo modo, demonstrou-se a ocorrência de um padrão distinto de segregação do leite na porção localizada nas vizinhanças das bordas do compartimento do jigue, conforme ilustrado na Figura 47. Dado isso, é razoável supor uma relação de causalidade entre os dois fenômenos, ou seja, que o fluxo convectivo é responsável pela segregação distinta nas zonas centrais e de borda, dando origem, em última instância, a um perfil horizontal de estratificação. Assim, com base nos resultados experimentais e em dados de apoio obtidos na literatura, foi realizada uma tentativa preliminar no sentido de propor um mecanismo para formação do fluxo convectivo durante a pulsação do leite do jigue.

Conforme descrito por Kirchberg e Hentzschel (1957), nos instantes em que o leite encontra-se dilatado, a alta porosidade do sistema permite que partículas de maior inércia (grandes e densas) atinjam posições inferiores do leite, tendendo a minimizar a energia potencial do mesmo. Na prática, isto se manifesta como um deslocamento ascendente das partículas de menor inércia pelas partículas de maior inércia, conforme proposto por Mayer (1950; 1964). Deste modo, existem duas condições básicas para a existência de um movimento relativo das partículas em um leite de jigagem: (1) a existência de espaços vazios suficientemente largos entre os grãos e (2) a existência de diferenças significativas nas propriedades inerciais dos componentes. De fato, conforme assumido em estudos prévios, o ajuste da porosidade local do leite poderia ser usado como um meio efetivo de controle da estratificação (WITTEVEN, 1995; CRESPO; 2016).

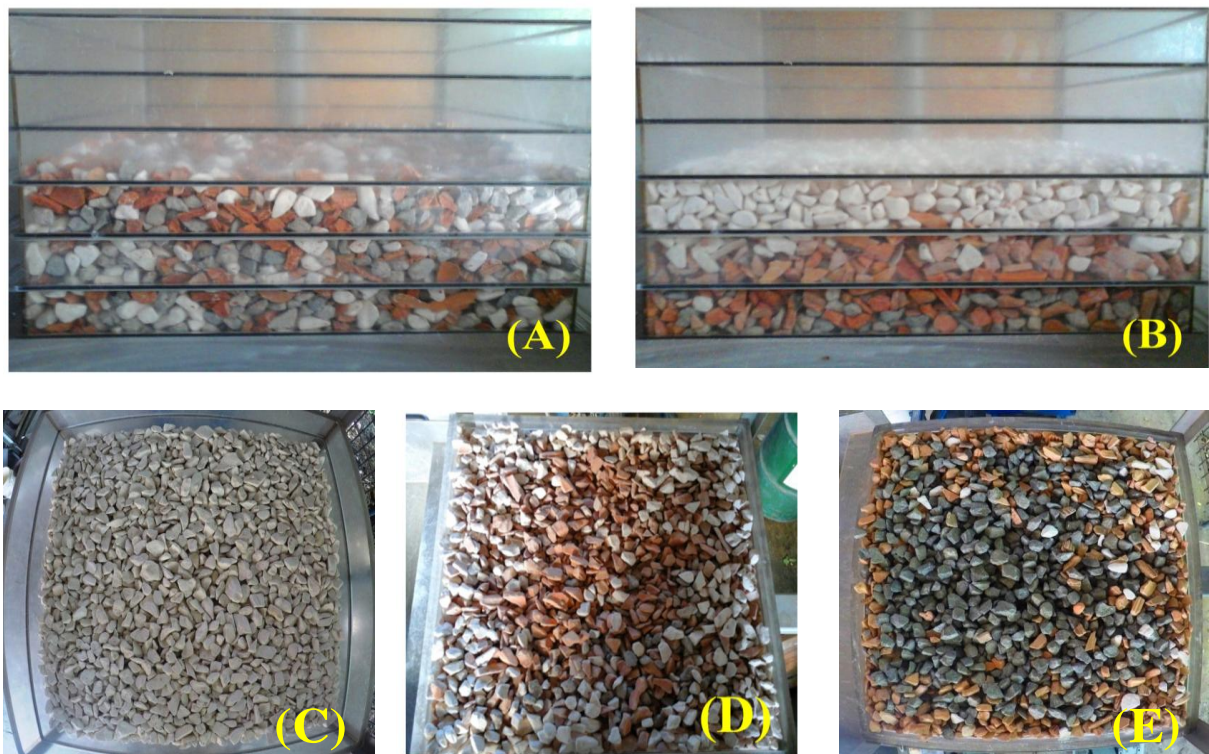


Figura 47: Imagens do leito do jigge antes e após a estratificação para $t = 120$ s. (A) Leito misturado antes do ensaio. (B) Leito estratificado, no qual é possível notar um padrão em forma de arco do estrato sob a camada de gesso. (C) Vista superior da camada de topo, totalmente coberto por gesso após a estratificação. (D) Vista superior da camada de meio, onde partículas de gesso se localizam preferencialmente ao longo das bordas. (E) Vista superior da camada inferior, na qual as partículas de concreto estão mais concentradas na porção central.

Convém examinar, em um primeiro momento, o comportamento de um leito de composição uniforme sob pulsação em um compartimento retangular de um jigge operando em batelada. Dada a restrição imposta pelas paredes laterais do compartimento do jigge, bem como o comportamento do fluxo convectivo observado nos ensaios (descendente nas bordas), é possível admitir a ocorrência de uma significativa dissipação de energia próximo às paredes durante a fase de elevação do leito, gerando um gradiente horizontal de velocidades que aponta para a porção mais afastada das mesmas. Como resultado, o leito do jigge como um todo se eleva com um perfil aproximadamente côncavo, ou seja, a elevação nas bordas é menor do que no centro, sendo ainda menor nas arestas devido ao efeito dobrado da dissipação por atrito. Em decorrência desta expansão assimétrica, a superfície livre do leito no topo apresenta uma inclinação horizontal que favorece o rolamento das partículas em direção às bordas (EVESQUE; RAJCHENBACH, 1989). Além disso, devido a maior desaceleração nas paredes, a porção do leito contida em suas

proximidades começa a consolidar momentos antes da porção central (0,03 s para $f = 60$ RPM). O efeito conjunto é o deslocamento discreto, porém repetido a cada ciclo, de partículas da porção central em direção às bordas (Figura 48.a).

Por outro lado, no seio do leito, a leve diferença de fase existente durante os primeiros instantes da consolidação dá origem a uma diferença entre porosidades locais (no centro e ao longo das bordas), uma vez que a porção central do leito ainda não iniciou a fase de descida, encontrando-se, portanto, mais dilatada. Como resultado, partículas próximas às paredes serão mais propensas a se moverem transversalmente na direção da zona porosa central. Em acordo com esta hipótese, Xue et al. (2013) estimaram que partículas contidas em leitos agitados verticalmente possuem até cinco vezes mais chances de migrarem para um interstício longe da parede lateral do que para outro próximo à mesma. Por fim, uma lacuna é formada abaixo do leito nos breves instantes em que o mesmo perde contato com o crivo devido ao impulso de elevação. Esta lacuna, também maior na porção central devido ao atrito nas paredes, será o destino preferencial das partículas vizinhas, em especial daquelas localizadas nas bordas, uma vez que sedimentam primeiro que as partículas localizadas no centro (Figura 48.b).

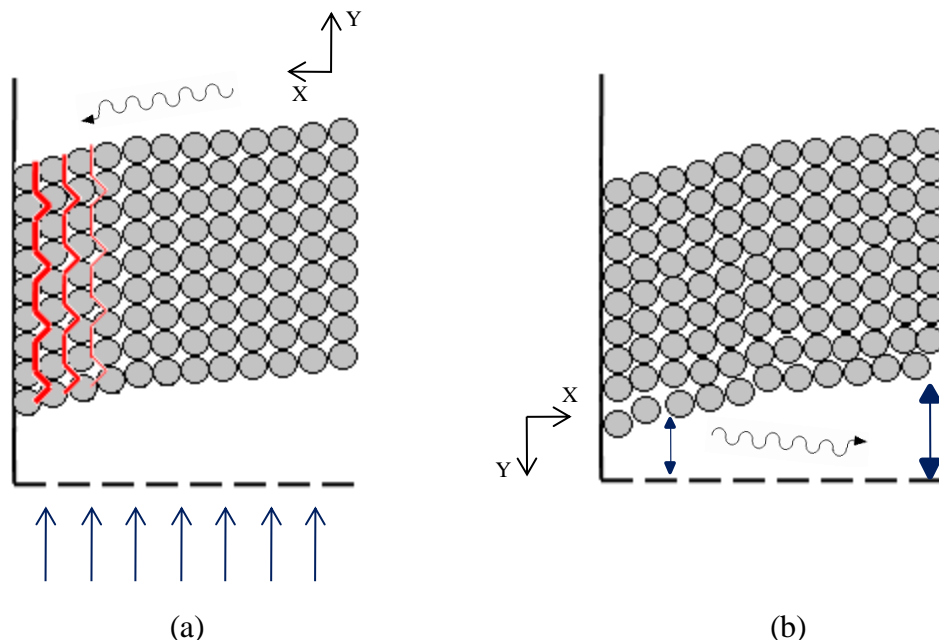


Figura 48: Mecanismo proposto de formação do fluxo convectivo em jiges. (a) Durante a fase de elevação do leito, a dissipação de energia cinética devido ao atrito com as paredes e com as partículas próximas (representada em vermelho) retarda o movimento de ascensão nas bordas. (b) Durante o início da fase de consolidação, a lacuna sob o leito é maior na zona central, resultando uma maior migração de partículas em direção a essa zona. Os vetores x e y representam o movimento preferencial das partículas nas direções horizontal e vertical, respectivamente.

Deste modo, o efeito combinado do deslocamento de partículas no sentido centro-borda no topo e borda-centro nas camadas profundas do leito dá origem ao movimento circular ordenado observado experimentalmente, o qual caracteriza a ocorrência de convecção. A partir dos resultados experimentais, também é possível inferir que quanto mais extenso for o deslocamento do leito durante a fase de elevação (relacionado a altas amplitudes e baixas frequências), mais intenso deve ser a dissipação por atrito nas paredes e, conseqüentemente, o fluxo convectivo. Esta hipótese é confirmada em diversos estudos encontrados na literatura (WASSGREN, 1997; YANG; HSIAU, 2000). Por outro lado, pouco pode ser dito a respeito do alcance da célula de convecção no sistema, uma vez que não foi possível observar sua trajetória no interior do leito.

Convém notar que a aparição do fluxo convectivo parece não depender de diferenças locais de composição, manifestando-se mesmo no caso de leitos formados por partículas uniformes (seção 4.1), sendo assim um atributo inerente à pulsação do leito. Portanto, no caso de leitos constituídos por partículas com diferentes densidades, é esperado que a convecção exerça certa influência sobre a segregação do sistema. Esta ocorre, inicialmente, sobre a elevação das partículas leves, a qual tende a ser mais intensa na porção central do leito do que nas bordas (vide seção 4.1). Em seguida, após a formação das bandas leve e densa devido à segregação parcial ou total, a camada de material leve no topo é empurrada em direção as paredes pela corrente convectiva existente na região. Caso a diferença de densidade entre os materiais seja considerável (como entre o concreto e o gesso), a camada de material leve manter-se-á sobre a camada do componente denso, sendo incapaz de adentrar na corrente descendente ao longo das bordas, concentrando-se assim nessa região. Neste caso, o fluxo convectivo que inicialmente abrangia todo o leito fica limitado somente à banda inferior do material denso. Por outro lado, para pequenas diferenças de densidade (como entre o concreto e o material cerâmico), as partículas do material leve são capazes de penetrar novamente no seio do leito, ocasionando remistura nas vizinhanças das paredes laterais. Paralelamente, as partículas de material denso contido na base do leito tenderão a se afastar das paredes, migrando para a zona central. Ao fazerem isso, concedem espaço para a corrente descendente ao longo das bordas, dando continuidade ao processo. O efeito líquido desse comportamento é que, ao fim do processo, os estratos leve e denso não se distribuem em camadas planas, mas sim

em um perfil levemente côncavo, em formato de arco, no qual uma pilha de material denso encontra-se circundada pelo material leve (Figura 49).

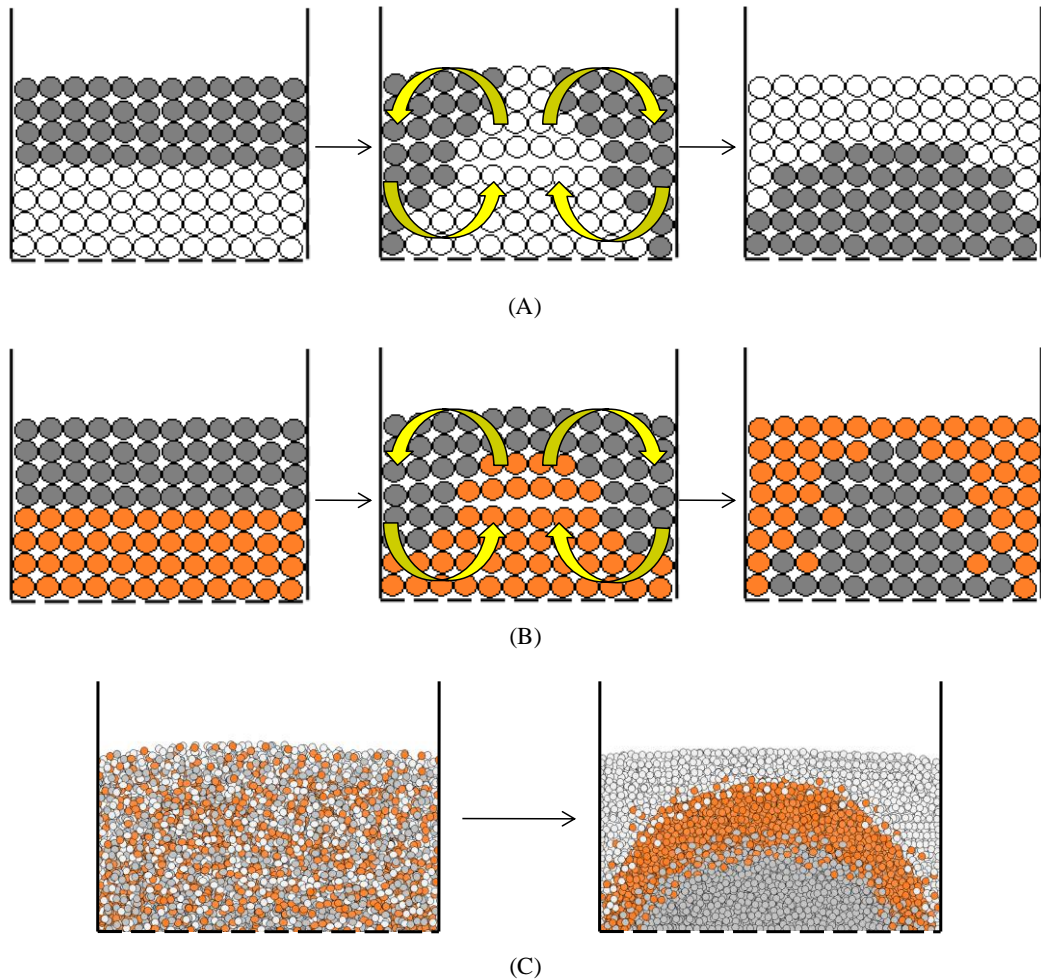


Figura 49: Ilustração do desenvolvimento do perfil de estratificação segundo o mecanismo de convecção proposto. (A) Leito inicialmente composto por uma camada de gesso sob uma camada de concreto, resultando em rearranjo com pouca remistura nas bordas. (B) Leito inicialmente composto por uma camada de material cerâmico sob uma camada de concreto, no qual ocorre significativa remistura nas bordas. (C) Arquétipo do perfil de estratificação da mistura ternária usada nos testes.

O mecanismo de convecção proposto é muito similar aquele sugerido para convecção em leitos agitados mecanicamente ("sidewall-driven convection", ver seção 2.4.1), sendo, de fato, uma derivação deste para o caso de leitos de jigagem. É interessante notar que o fluxo convectivo pode tanto auxiliar a estratificação nos momentos iniciais do processo como prejudicar a mesma quando os componentes já se encontram significativamente separados. Contudo, uma vez que a separação em bandas tende a ocorrer rapidamente, a convecção age sobretudo na remistura do

sistema, de modo que o padrão final de estratificação dependeria, em última instância, do equilíbrio entre o ímpeto da estratificação e a ação de remistura. É interessante notar a semelhança desta circunstância com aquela sugerida pelo modelo de dispersão (KING, 1987; TAVARES; KING, 1995), no qual o rearranjo do leito em jiges é entendido como uma competição entre o decréscimo da energia potencial do sistema (força motriz da estratificação) e a remistura do leito, representada na forma de um fluxo difusivo fickiano. Contudo, enquanto a ocorrência de fluxos difusivos em leitos macroscópicos é de difícil observação, os resultados obtidos indicam que a convecção é um fenômeno explícito que influencia ativamente a remistura do leito.

4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

A observação do deslocamento de camadas de partículas e de traçadores em leitos dos jiges hidráulico e pneumático revelou a existência de um padrão de movimento convectivo similar ao descrito na literatura para o caso de leitos vibrados mecanicamente. Este padrão constituiu-se de um fluxo ascendente de partículas na porção central do leito e descendente nas paredes laterais. O movimento convectivo ocorreu mesmo no caso de leitos de tamanho, densidade e formato de partículas uniformes, demonstrando assim ser uma característica inerente ao processo de pulsação do leito.

A análise do movimento do leito revelou que o deslocamento vertical do mesmo foi sempre maior no centro do que nas bordas, de modo a indicar uma significativa dissipação de energia nas paredes. As diferenças de deslocamento registradas foram usadas na estimativa da velocidade média de convecção, a qual aumentou quando menores frequências de pulsação (maiores amplitudes) foram utilizadas. Ainda, a correlação entre a velocidade média de convecção e o número de aparições de traçadores na superfície do leito reforçou a hipótese de que a convecção está relacionada ao deslocamento vertical diferencial do leito do jige.

Os resultados dos ensaios de estratificação mostraram que o fluxo convectivo deu origem a um perfil de estratificação horizontal do leito, no qual os componentes leves se concentraram nas bordas do compartimento enquanto os densos se concentraram na porção central do estrato. Também, a análise da evolução do

processo mostrou que o perfil de estratificação horizontal se estabeleceu rapidamente após o início da jigagem, permanecendo aproximadamente constante à medida que a jigagem evoluiu, ao passo que a estratificação vertical continuou evoluindo ao longo do tempo de jigagem. Do ponto de vista prático, isso indica que a convecção pode afetar significativamente a composição dos produtos do jigue se tempos de jigagem curtos forem utilizados.

De modo similar, os resultados indicaram que a taxa de estratificação foi rápida durante os primeiros instantes após o início da pulsação do leite ($t \leq 15$ s), podendo ser aproximada como um processo linear ao longo do tempo de jigagem durante o restante do processo ($t > 15$ s). A evolução da compacidade do leite também sugere que o processo de estratificação inicia na base do leite e se propaga pelas camadas superiores.

Com base nos resultados obtidos, um modelo preditivo do estado final de estratificação do leite foi elaborado. As previsões do modelo mostraram boa correlação com os dados experimentais, especialmente para longos tempos de jigagem ($t = 120$ s). A análise individual dos pressupostos do modelo reforçou a importância da segregação horizontal (e, por consequência, da convecção) no rearranjo final do sistema.

Do mesmo modo, os resultados experimentais foram usados na proposição de um mecanismo de formação do fluxo convectivo observado nos jiques. A causa originária da corrente convectiva foi atribuída à sobreposição entre o deslocamento vertical diferencial nas bordas do leite e a dissipação diferencial de energia nas paredes durante as fases de elevação (maior dissipação) e consolidação do sistema (menor dissipação), as quais dão origem a dois eventos: (1) a expansão do leite com um perfil côncavo, em forma de arco, que induz o movimento das partículas contidas no topo do sistema em direção às bordas; (2) a consolidação adiantada das partículas próximas às bordas, que induz o movimento das partículas contidas no fundo do leite em direção à zona central. O efeito líquido é o aparecimento do movimento circular ordenado que caracteriza a convecção granular.

5. EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE A ESTRATIFICAÇÃO A SECO

Neste capítulo são mostrados os resultados e as conclusões parciais referentes a análise da influência da classe de tamanho e da distribuição granulométrica do leito sobre a estratificação do sistema. Ainda, as possíveis razões responsáveis envolvidas no comportamento observado são discutidas.

5.1 VARIAÇÃO DA CLASSE DE TAMANHO DO LEITO

A influência da granulometria das partículas constituintes do sistema sobre a estratificação para o caso de leitos com distribuição estreita de tamanhos é mostrada esquematicamente na Figura 50. Ao contrário do que se poderia considerar a priori, a precisão da separação aumentou à medida que se diminuiu a classe de tamanho das partículas do sistema. Ainda, uma precisão de separação consideravelmente alta foi obtida para a classe miúda (8 – 4,75 mm), sendo esta 15% maior do que aquela observada para a fração grosseira (19,1 – 12,7 mm). Uma descrição mais detalhada das mudanças geradas pela alteração da granulometria de partícula pode ser obtida mediante análise dos perfis de estratificação exibidos na Figura 50. Na camada de base, o teor em massa de brita aumentou apreciavelmente ($\approx 6\%$) quando a classe de tamanho grosseira deu lugar à classe intermediária, experimentando um aumento mais discreto ($\approx 3\%$) para o caso da granulometria miúda. Por outro lado, a diminuição do tamanho de partícula ocasionou uma queda no teor de gesso na camada de topo, resultante da maior contaminação do estrato leve por partículas dos componentes mais densos (especialmente material cerâmico). Esta ocorrência está de acordo com a reportada tendência de contaminação do produto leve por densos finos em concentradores gravimétricos pneumáticos (SAMPAIO; TAVARES, 2005; WEINSTEIN; SNOBY, 2007).

Além disso, enquanto as variações no teor de produto em função da granulometria observadas nas camadas extremas (topo e base) estiveram na ordem de 10%, as alterações no teor de material cerâmico na camada intermediária foram muito maiores, próximas de 40%. Deste modo, considerando que o aumento no teor do produto denso foi contrabalanceado pela diminuição no teor de produto leve no topo, o contínuo aumento da proporção de material cerâmico na camada intermediária, ocasionado pela diminuição da granulometria do leito, pode ser

apontado como o fator principal que causou a elevação do nível de estratificação no sistema.

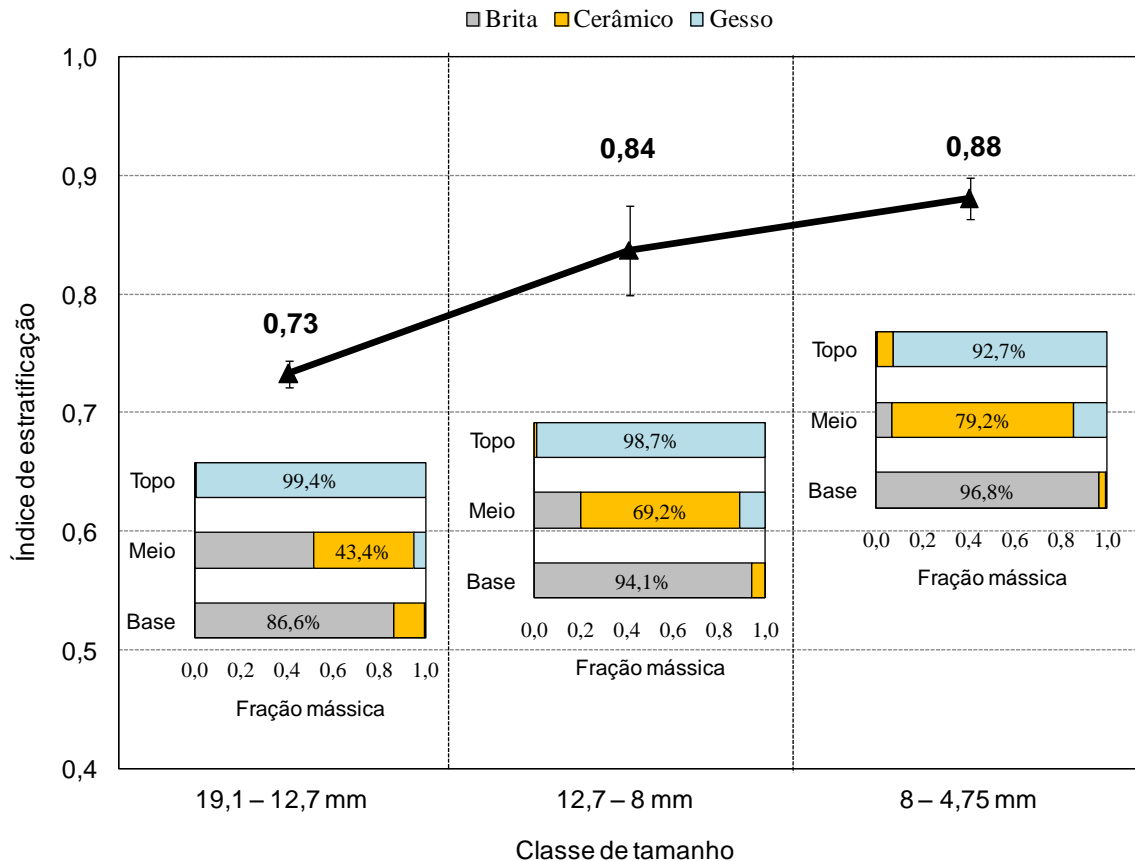


Figura 50: Índice e perfis de estratificação relativos aos ensaios realizados com leitos formados por diferentes classes de tamanho. Os dados referem-se aos valores médios obtidos para 3 repetições de cada ensaio⁵.

5.2 VARIAÇÃO DA FAIXA DE TAMANHO DO LEITO

A precisão de separação bem como os perfis de estratificação obtidos nos testes com leitos formados por diferentes faixas granulométricas são mostrados na Figura 51. Os resultados revelaram que leitos formados por uma distribuição granulométrica mais ampla apresentaram maiores eficiências de separação, dentro dos limites de tamanho máximo e mínimo estabelecidos (isto é, 19,1 e 4,75 mm). Além disso, a precisão aumentou à medida que maiores proporções de material miúdo estiveram presentes na mistura inicial. O efeito global do aumento da faixa de

⁵ Os perfis de estratificação relativos a todos os ensaios podem ser observados nos Apêndices 1 e 2.

tamanhos presente no sistema sobre a estratificação foi similar ao observado para leitos de tamanho uniforme, quando da diminuição do tamanho de partícula do sistema. Assim, um aumento do teor de material denso (brita) na camada de base foi acompanhado por um decréscimo no teor de material leve (gesso) na camada de topo, ao passo que o teor do componente intermediário (material cerâmico) se elevou sucessivamente na camada intermediária. Deste modo, é razoável considerar que a elevação do grau de concentração do componente de densidade intermediária foi, mais uma vez, o principal benefício decorrente da diminuição da fração de grosseiros na mistura. De modo geral, a estratificação foi sensivelmente inferior em comparação àquela obtida com sistemas monodispersos (formados por uma só classe de tamanhos).

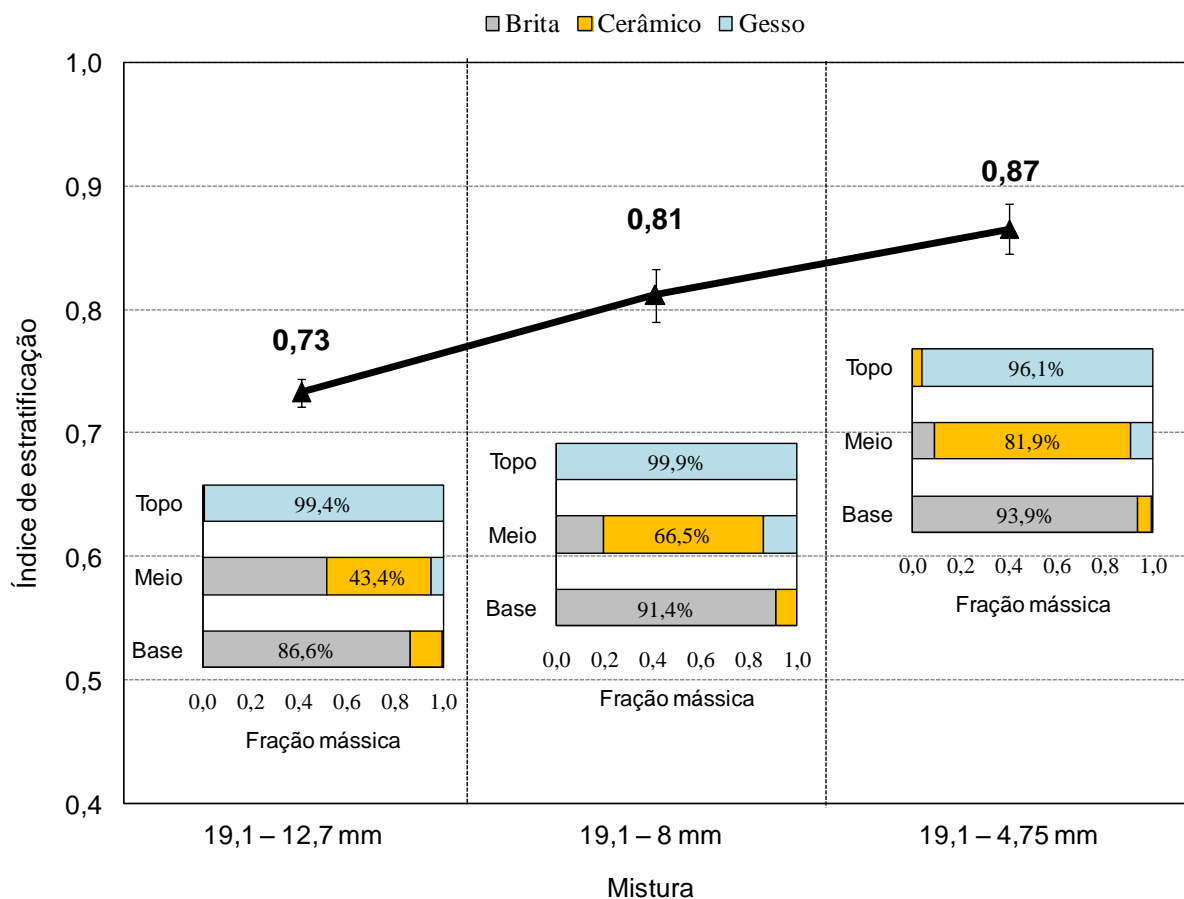


Figura 51: Índice e perfis de estratificação relativos aos ensaios realizados com leitos formados por diferentes faixas de tamanho. Os dados referem-se aos valores médios obtidos para 3 repetições de cada ensaio.

A Figura 52 apresenta o perfil de distribuição dos componentes da mistura M1 ao longo dos estratos verticais do leito. As proporções mostradas referem-se à razão entre a quantidade de material contido em um dado estrato e a quantidade total de material presente no sistema, o que equivale à recuperação mássica do componente na camada em questão. Esse perfil de distribuição é comparado com aqueles obtidos para cada material individual nas misturas M2 e M3, conforme ilustrado nas Figuras 53 e 54.

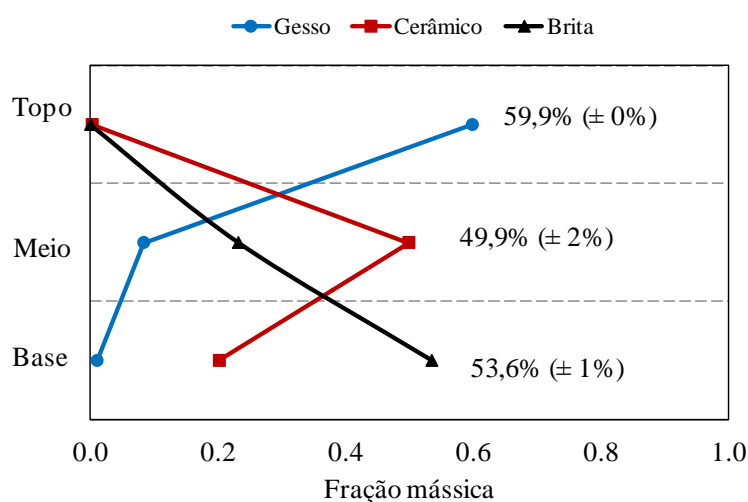


Figura 52: Perfil de distribuição dos componentes da mistura M1 após a estratificação. Os valores mostrados referem-se à recuperação mássica média de cada componente (gesso no topo, material cerâmico no meio e brita na base) e o desvio-padrão associado referente aos três ensaios realizados.

Comparada à mistura M1, o padrão de distribuição da mistura M2 mostra que a segregação dos componentes em geral foi mais elevada em ambas as classes de tamanho, isto é, grosseira (12,7 – 19,1 mm) e intermediária (8 – 12,7 mm). Exceção a isso ocorreu na camada de topo, onde a mistura M1 apresentou uma maior recuperação do gesso. Todavia, convém ressaltar a considerável influência do rebaixamento do leito sobre a recuperação do produto de topo. Uma vez que as misturas mais polidispersas em relação ao tamanho tenderam a uma maior compactação, o rebaixamento das mesmas ao fim da jigagem foi maior, o que implicou em perda de volume do produto de topo, uma vez que o ponto de corte foi fixo (a extração foi invariavelmente realizada na mesma altura do leito).

Ainda, é possível notar a existência de um padrão diferenciado de distribuição entre as duas faixas granulométricas presentes. Em suma, a fração intermediária esteve mais bem concentrada, apresentando maiores proporções do componente

predominante do que a fração grosseira em todas as camadas, com destaque para as camadas de meio (concentração de material cerâmico 20% mais alta) e de base (concentração de brita aproximadamente 15% maior). É possível afirmar que a faixa de tamanho intermediária apresentou uma tendência levemente maior que a grosseira de se concentrar em camadas profundas, conforme sugere o número relativamente maior de partículas de material cerâmico da faixa intermediária que reportou a camada de base (Figura 53.b). Ainda, é interessante notar que a fração grosseira da mistura M2 foi mais bem separada do que na mistura M1, indicando que a inserção da fração intermediária na mistura foi benéfica não somente para a separação como um todo, mas também para segregação individual da fração grosseira contida no sistema.

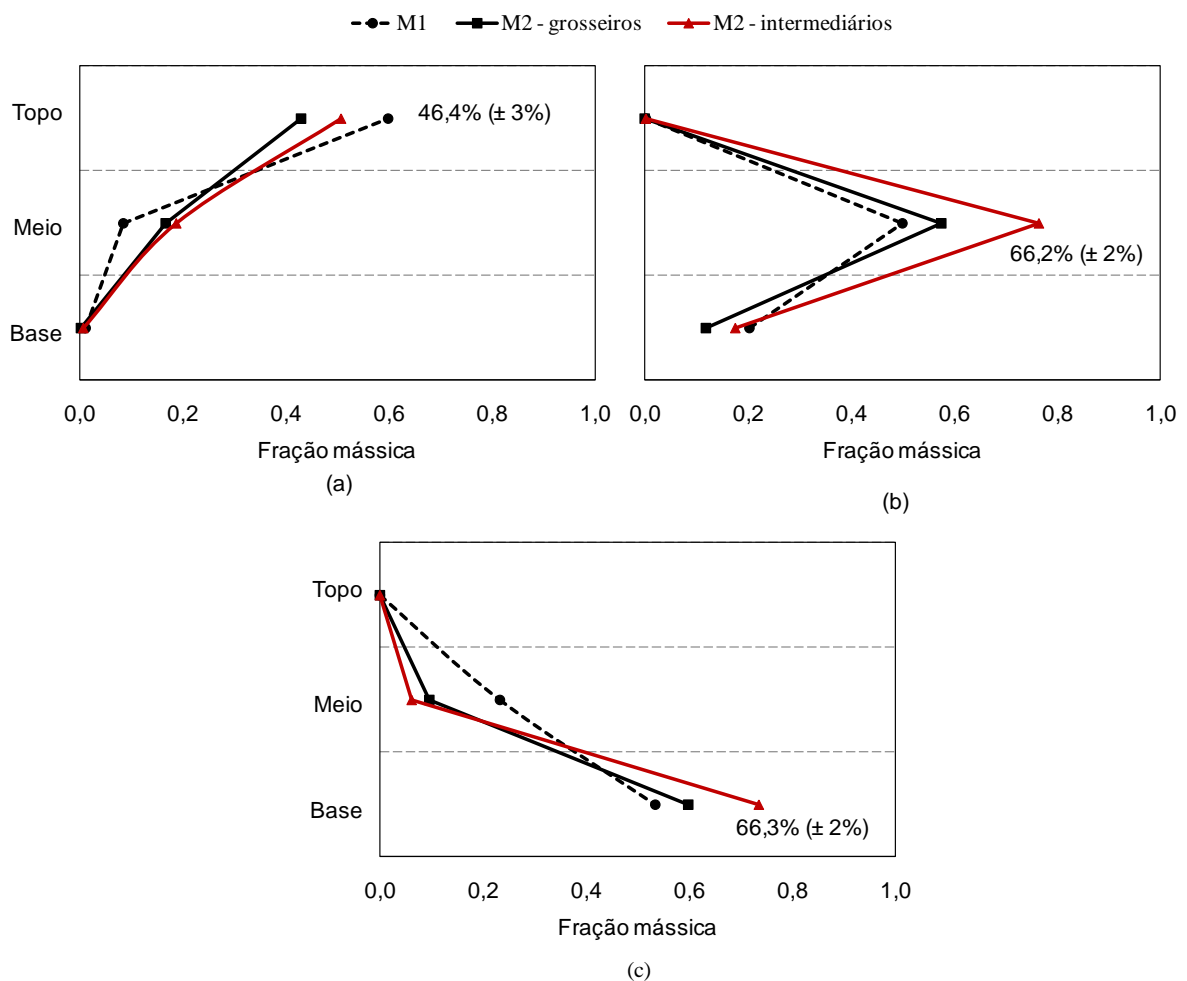


Figura 53: Perfil de distribuição do (a) gesso, (b) material cerâmico e (c) brita contidos na mistura M2 após a estratificação. Os valores mostrados referem-se à recuperação mássica média (para três ensaios) de cada componente na camada de concentração predominante e o desvio-padrão associado.

De modo similar, a mistura M3 também apresentou uma melhor concentração dos componentes predominantes de cada camada em comparação a mistura M1 (Figura 54) e, de modo geral, também em relação à mistura M2. Esta assertiva pode ser verificada pela concentração relativamente maior de gesso no topo e brita na base em contraste com a mistura M2 (Figura 53). Além disso, a fração grosseira neste caso apresentou uma concentração mais elevada que a fração intermediária na camada do meio (7% maior), e equivalente na camada de base.

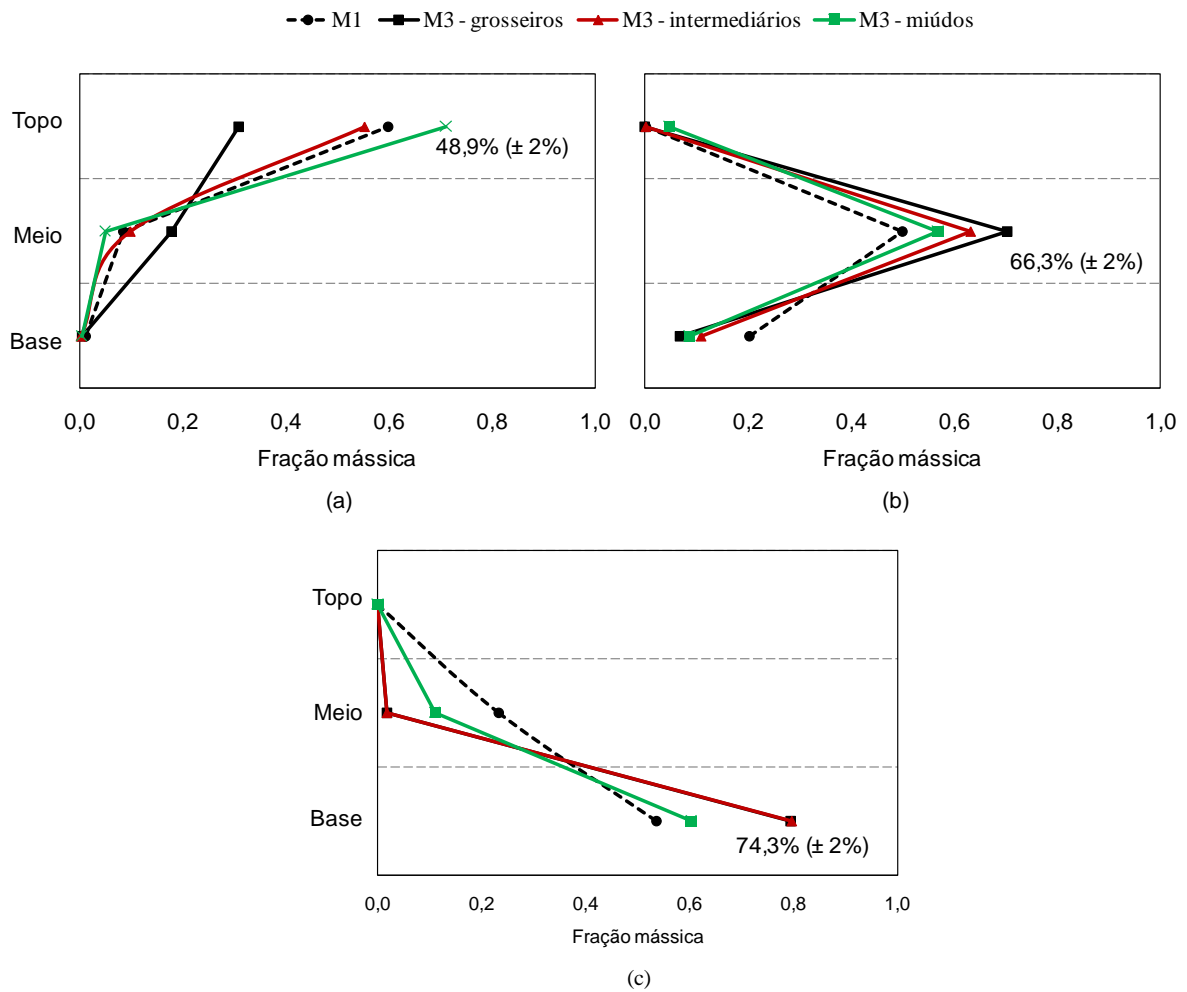


Figura 54: Perfil de distribuição do (a) gesso, (b) material cerâmico e (c) brita contidos na mistura M3 após a estratificação. Os valores mostrados referem-se à recuperação mássica média (para três ensaios) de cada componente na camada de concentração predominante e o desvio-padrão associado.

É interessante notar que o padrão de segregação da brita na mistura M3 foi praticamente o mesmo para as faixas de tamanho grosseira e intermediária (Figura 54.c). Por outro lado, as partículas miúdas de todos os componentes tenderam a ocupar posições mais elevadas no leito, conforme indicam as maiores proporções de

gesso e material cerâmico miúdo no topo, e de brita miúda na camada intermediária. Isso sugere que, conforme antecipado, o arraste das partículas mais finas pela corrente ascendente de ar sobrepõe o efeito local de percolação das partículas menores em direção ao fundo do leito, resultando em uma tendência maior de classificação direta do sistema⁶ (SAMPAIO; TAVARES, 2005). O gesso, em particular, exemplificou essa tendência, uma vez que a proporção de partículas miúdas e intermediárias no topo foi mais que o dobro da proporção de partículas grosseiras, que estiveram concentradas mais profundamente no leito (Figura 54.a). Entretanto, ressalta-se novamente que a comparação das proporções de material no topo com a mistura M1 deve ser vista com cautela devido à influência não quantificada do rebaixamento do leito.

5.3 EFEITO DA INSERÇÃO DE MIÚDOS LEVES

Conforme revelado pelos resultados, a estratificação das misturas ternárias de agregados aumentou à medida que mais material da classe miúda estava presente no sistema. Contudo, os resultados obtidos referem-se a misturas contendo quantidades equivalentes de cada constituinte em uma mesma faixa de tamanho. Assim, um conjunto de testes foi conduzido a fim de verificar como seria a concentração, particularmente do produto denso, para o caso em que quantidades crescentes de material miúdo apenas dos componentes leves (gesso e material cerâmico) eram adicionadas ao leito ternário de grosseiros (12,7 - 19,1 mm). Os resultados obtidos encontram-se ilustrados na Figura 55 em termos da variação do teor e recuperação dos produtos. É possível observar que a crescente adição de material miúdo leve ao sistema teve um efeito mínimo sobre a composição da camada de base, com uma variação relativa do teor de brita (desvio-padrão) igual a $\pm 3\%$. Ainda que o teor de brita para a fração de miúdos de 20% tenha diminuído em aproximadamente 8% em relação ao sistema sem miúdos, o mesmo volta a aumentar quando a fração de miúdos é elevada para 30% em massa. Assim, não é possível indicar se esta variação se deveu especificamente à adição de miúdos leves ao sistema ou simplesmente a flutuações de composição inerentes ao erro

⁶ Na classificação direta, as partículas menores tendem a reportar junto ao produto leve.

experimental dos ensaios. Por outro lado, considerando os miúdos leves como componentes indesejáveis, pode-se observar que o teor de gesso decaiu continuamente com o aumento da proporção de miúdos na mistura. A análise conjunta do comportamento nos estratos de base e de topo reforça a tendência supramencionada de classificação direta em leitos de jigagem à seco.

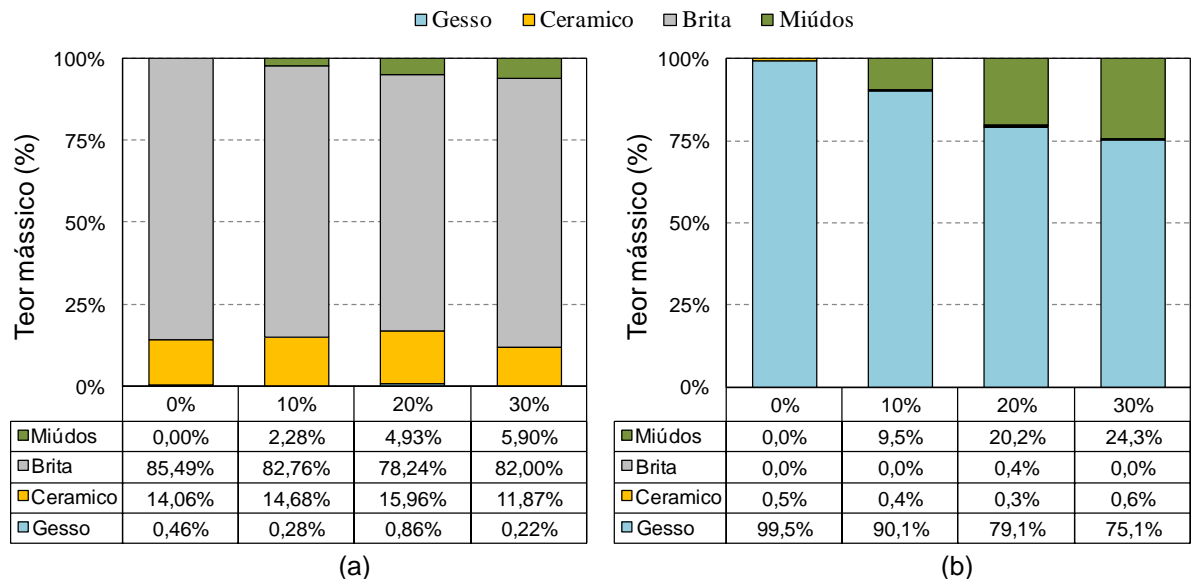


Figura 55: Composição mássica das camadas de base (a) e de topo (b) em função do aumento da proporção de miúdos leves no sistema.

Convém analisar também a influência da proporção de miúdos leves sobre a estratificação da fração grosseira. Conforme exibido na Figura 56, esta foi praticamente inexistente uma vez que os teores de brita e gesso em seus respectivos estratos de predominância mantiveram-se praticamente inalterados. Isto sugere que, na prática, a contaminação da alimentação grosseira por frações moderadas de material miúdo leve não afetaria significativamente a estratificação, tendo como única inconveniência a necessidade de classificação do(s) produto(s) do jigue a fim de remover a fração miúda indesejada.

Por fim, enquanto os teores dos produtos foram pouco afetados pela crescente presença de miúdos leves, a recuperação mássica sofreu alterações significativas. Conforme mostra a Figura 57, a adição de apenas 10% de miúdos leves ocasionou uma perda de 5% na recuperação em massa de brita na base, embora os sucessivos acréscimos de miúdos leves ao sistema tenham causado poucas perdas relativas na recuperação. Em contraste, a adição de 10% de miúdos

leves aumentou em cerca de 8% a recuperação de gesso no topo, enquanto a adição de 30% representou uma elevação maior que 15%. Ressalta-se, novamente, que a elevação da altura do leito decorrente da maior adição de material ao sistema foi provavelmente a principal razão por trás do aumento da recuperação no topo, uma vez que as partículas de gesso na mistura em questão tendem a se deslocar para o topo do leito independente da espessura do mesmo. Assim, mantendo-se a altura de corte inalterada, é esperado que a jigagem de leitos mais espessos resulte em uma maior recuperação do componente leve.

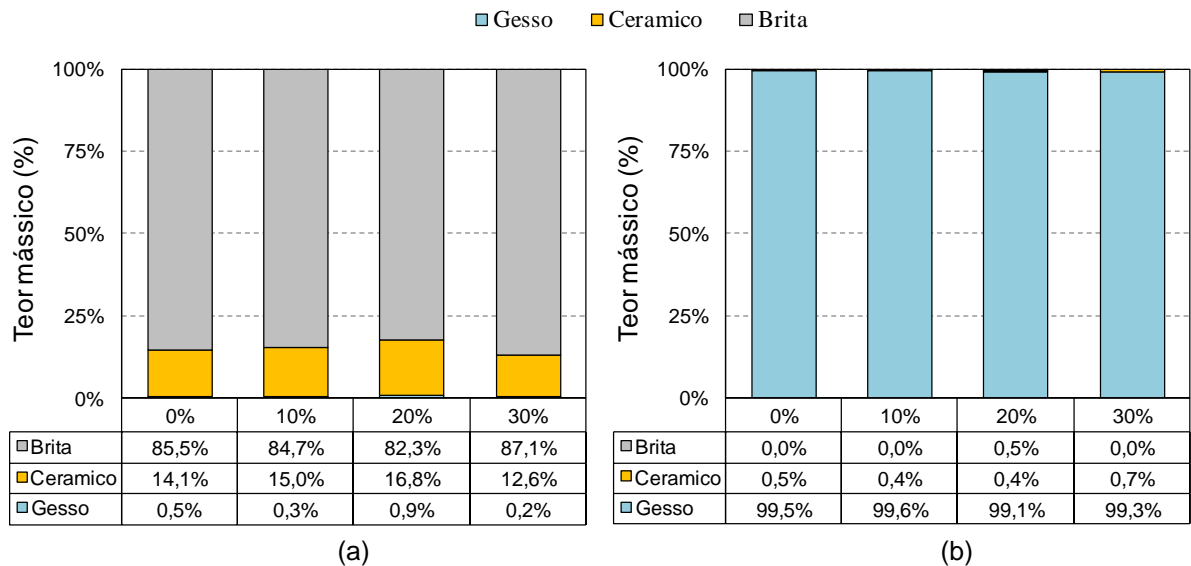


Figura 56: Composição mássica da fração grosseira nas camadas de base (a) e de topo (b) em função do aumento da proporção de miúdos leves no sistema.

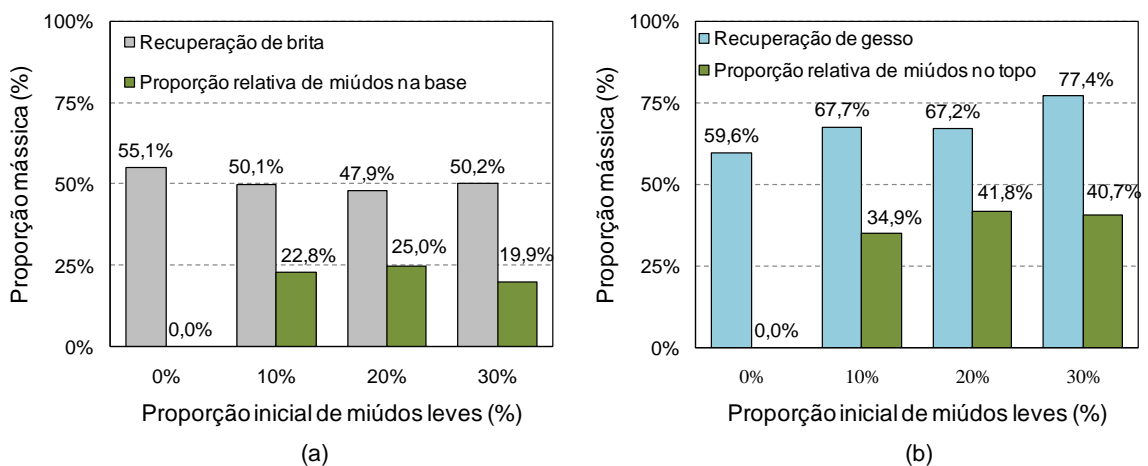


Figura 57: Recuperação mássica de (a) brita na camada de base e (b) gesso na camada de topo, juntamente com a fração mássica de material miúdo (em relação ao total presente na mistura) que reportou em cada um dos estratos.

5.4 GRANULOMETRIA E COMPACIDADE

Os resultados obtidos demonstraram que na jigagem pneumática de misturas ternárias formadas por diferentes classes de tamanho, o desempenho obtido na estratificação foi maior quando o leito era composto por partículas de menores tamanhos. Do mesmo modo, a precisão de separação de misturas em faixas granulométricas mais amplas foi maior do que para misturas menos dispersas em relação ao tamanho de partícula. Ainda que em um primeiro momento essas observações vão de encontro ao comportamento esperado para a maioria dos separadores gravimétricos (isto é, que a separação piora para materiais de menores tamanhos e presentes em uma ampla faixa granulométrica, vide item 2.3.2), convém notar que a variação da granulometria do sistema deve alterar o empacotamento das partículas do leito, podendo gerar benefícios para a concentração se um leito mais compacto se formar ao fim do processo. A fim de analisar essa premissa, a compactidade final (equação 49) do estrato de base do leito para os ensaios com diferentes classes e faixas de tamanho foi comparada aos respectivos índices de estratificação (Figura 58). É possível observar que a precisão de separação foi maior para os sistemas que, após a jigagem, apresentaram uma maior compactidade na camada de base. Com base na teoria proposta por Mayer (1950; 1964), depreende-se disso que a formação de leitões mais compactos nas misturas com menor granulometria e maior dispersão de tamanho implicou em um maior decréscimo absoluto da energia potencial gravitacional do sistema, o que, nos casos estudados, resultou em uma melhor estratificação do leito.

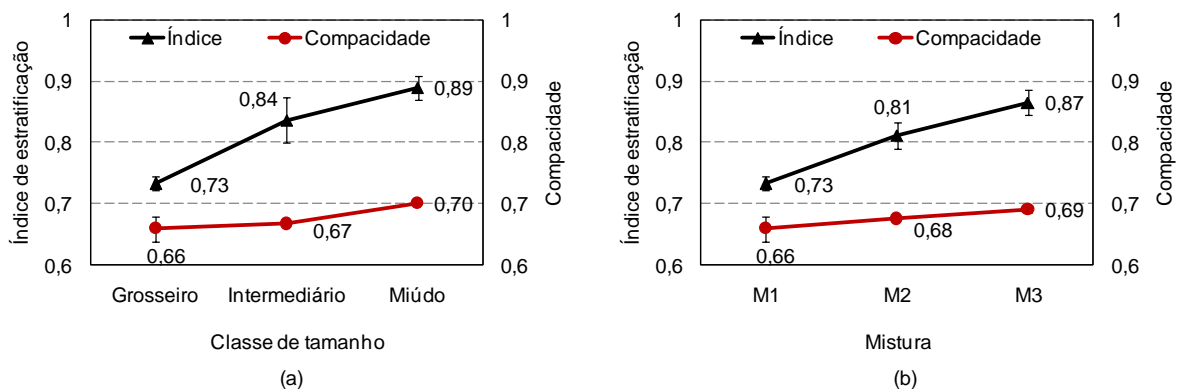


Figura 58: Comparação da variação da compactidade da camada de base do leito em função da classe e da faixa de tamanhos de partícula componentes do sistema com o índice de estratificação.

Ainda que um maior empacotamento seja esperado em sistemas com maiores distribuições granulométricas em decorrência da percolação das partículas menores (ROSATO; LAN; WANG, 1991; SCHRÖTER et al., 2006), o maior empacotamento de leitos formados unicamente por partículas menores de um mesmo componente não é necessariamente antecipado *a priori*. O estudo clássico realizado por Sohn e Moreland (1968) da relação entre o tamanho de partícula e a densidade de empacotamento revelou, por exemplo, que esta é independente do tamanho de partícula, sendo função somente da distribuição de tamanhos presente em um dado sistema. Neste caso, contudo, a compacidade final da camada de base para as três diferentes classes de tamanho utilizadas deveriam ser similares, e não aumentar quando do uso de classes menores de tamanho. Um possível esclarecimento a esse comportamento é fornecido no recente estudo de Zhao et al. (2017), o qual demonstra que o tamanho do container no qual leitos de granulometria uniforme estão inseridos afeta a compacidade final do sistema após certo período de vibração (Figura 59). Em particular, quanto maior for o tamanho do container em relação ao tamanho das partículas constituintes do leito, maior tende a ser a compacidade final do sistema. Segundo os autores, isto ocorre devido a menor influência dos distúrbios de empacotamento causados pelas paredes laterais do container. Os resultados são particularmente interessantes visto que foram utilizados containeres e partículas com tamanhos da mesma ordem de magnitude que aqueles deste estudo.

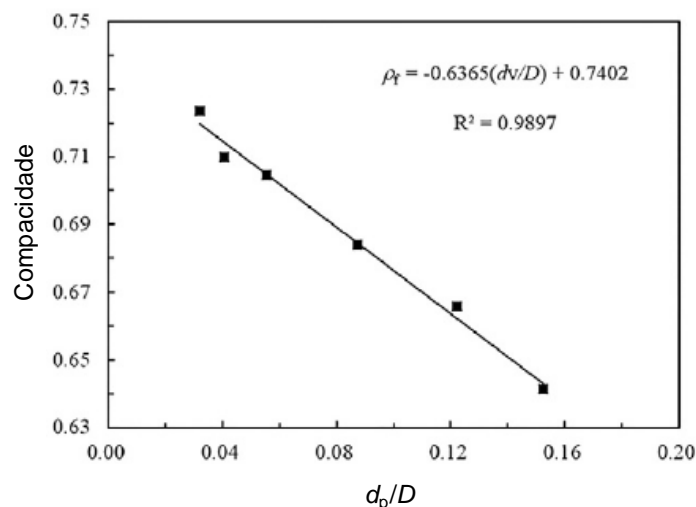


Figura 59: Variação da compacidade em função da razão entre o diâmetro das partículas do sistema ($d_p = 30$ mm) e a largura do container (D).
Fonte: modificado de Zhao et al. (2017)

Deste modo, poder-se-ia supor que o aumento do tamanho relativo do compartimento do jigue decorrente da diminuição da classe de tamanhos das partículas do leito (de grosseira para intermediária e desta para miúda) resultou em uma maior compacidade final do sistema. Esta, por sua vez, esteve relacionada a um rearranjo das partículas que resultou em uma melhor estratificação do sistema.

É importante notar que outros fatores podem estar relacionados aos resultados obtidos. Por exemplo, partículas menores são mais sujeitas a força de arraste da corrente de ar, deslocando-se assim mais intensamente durante a pulsação do leito do que partículas maiores. Como efeito, o maior espaço livre existente entre as partículas durante a dispersão do leito poderia facilitar o alcance das posições de equilíbrio dos componentes, inclusive de partículas grosseiras presentes no sistema. De fato, Richardson, Harker e Backhurst (2002) afirmam que a presença de certas proporções de finos em leitos fluidizados à seco auxiliam na fluidização de partículas grosseiras por atuarem como uma camada 'lubrificante'. Isto esclareceria em parte a melhor estratificação das partículas grosseiras observadas experimentalmente para sistemas com maior distribuição de tamanhos.

5.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados mostraram que, dentro dos limites de tamanhos trabalhados nos testes (19,1 – 4,75 mm), a estratificação foi melhor para leitos formados por partículas de menores tamanhos, sendo o melhor resultado obtido foi para a classe miúda (8 – 4,75 mm), seguido da classe intermediária (12,7 – 8 mm) e, finalmente, da classe grosseira (19,1 – 12,7 mm). Do mesmo modo, o aumento da faixa granulométrica do leito resultou em uma melhor estratificação, sendo o melhor resultado obtido para o leito contido na faixa de 19,1 a 4,75 mm. Em ambos os casos, a melhor estratificação pode ser atribuída a uma compactação mais elevada do leito quando da presença de maiores frações volumétricas das classes de tamanho menores (intermediária e miúda).

Os perfis de distribuição das diferentes classes de tamanho no leito revelaram que partículas menores de um mesmo material tenderam a se concentrar em estratos superiores do leito, ao passo que partículas maiores tenderam a se

concentrar em camadas mais profundas, descrevendo assim uma tendência de classificação direta no jigge pneumático.

A contaminação do leito de grosseiros (19,1 – 12,7 mm) por miúdos leves (gesso e tijolo entre 8 e 4,75 mm) teve um efeito marginal no teor global do produto denso, porém afetou significativamente o teor global do produto leve no topo. Por outro lado, o teor da fração grosseira (somente) de ambos os produtos não foi afetado pela contaminação com miúdos leves. Em contrapartida, a recuperação mássica dos produtos foi afetada, diminuindo na base (produto denso) e aumentando no topo (produto leve). Este último caso, todavia, deve ser visto com cautela, uma vez que a maior recuperação no topo foi influenciada pelo aumento da espessura do leito decorrente da adição de um maior volume de material no sistema (os miúdos leves).

Na prática, os resultados sugerem que o uso de maiores distribuições granulométricas de alimentação podem resultar em melhores resultados de separação em jigues pneumáticos, reduzindo assim o número de estágios de classificação prévia do material. Ainda, para o caso em que o produto final precise estar em uma granulometria específica, a classificação poderia ser feita no produto do jigge e não na alimentação, o que reduziria o volume de material processado.

Por fim, foi proposto um índice para avaliar o grau de estratificação do sistema, com base na variância das concentrações dos componentes ao longo dos estratos, constituindo uma ferramenta útil para a análise global da precisão da separação.

6. USO DE JIGUES COMO MULTI-SEPARADORES PNEUMÁTICOS

Neste capítulo são mostrados os resultados e as conclusões parciais referentes a análise da viabilidade técnica de emprego de jiges pneumáticos na separação, em estágio único, de materiais rochosos de não-rochosos enquanto paralelamente realiza a estratificação do leito contendo o material rochoso.

6.1 EVOLUÇÃO GERAL DA ESTRATIFICAÇÃO

Na Figura 60 são exibidas imagens do progresso da classificação de uma das misturas contendo concreto, cerâmico, gesso, madeira e papel ao longo do tempo de operação. É possível observar que o arraste para o alto dos fragmentos de papel inicia tão logo o fluxo de ar entra no compartimento do jigue (Figura 60.b). Após alguns poucos segundos, praticamente todos os pedaços de papel foram removidos do leito, permanecendo em um estado de fluidização instável, visto que os mesmos estavam impedidos de deixar o sistema devido ao prato perfurado posicionado na abertura superior do compartimento do jigue (Figura 60.c). Para o caso específico de 9% em massa de contaminantes (3,6% de gesso; 3,6% de madeira e 1,7% de papel), o prato perfurado que cobria o compartimento foi removido, e praticamente todo o papel inicialmente presente na mistura foi sugado pelo coletor de poeira do jigue. Paralelamente, foram observados um acúmulo considerável de pedaços de madeira em conjunto com uma progressiva concentração de gesso no topo (estrato 5) e concreto na base (estrato 1). Deste momento em diante ($t \approx 15$ s), a maior parte do material não rochoso (papel e madeira) foram expelidos para fora do sistema. Os estágios subsequentes do processo consistiram na concentração de gesso na camada de topo ($t \approx 30$ s) e da lenta, porém progressiva, separação entre o concreto e o material cerâmico até o ponto em que um estágio de segregação próximo do estacionário fosse atingido ($t \approx 45$ s). Após o fim da pulsação, os fragmentos de madeira e papel se encontraram depositados sobre a superfície do leito (Figura 60.f). O gesso se concentrou principalmente nos dois estratos superiores enquanto partículas de concreto preencheram em grande quantidade as duas camadas

inferiores. Em contraste, o material cerâmico apresentou uma perceptível dispersão ao longo das três camadas intermediárias.

A separação final do leito pode ser melhor observada a partir da vista superior dos estratos de cada camada (Figura 61). Como pode ser visto, a camada de topo esteve quase que completamente composta por pedaços de madeira e partículas de gesso. A camada intermediária estava repleta de material cerâmico, com uma notável quantidade de concreto (Figura 61.b). Em contraste, a camada de fundo foi composta principalmente por partículas de concreto, com baixa proporção de material cerâmico, e alguns grãos de gesso. Conforme ilustrado na Figura 61(c), a maior parte do material cerâmico se concentrou nas bordas laterais, o que está possivelmente relacionado a ocorrência de correntes convectivas no sistema (Capítulo 4). Este perfil horizontal de segregação permaneceu constante para todos os casos examinados.

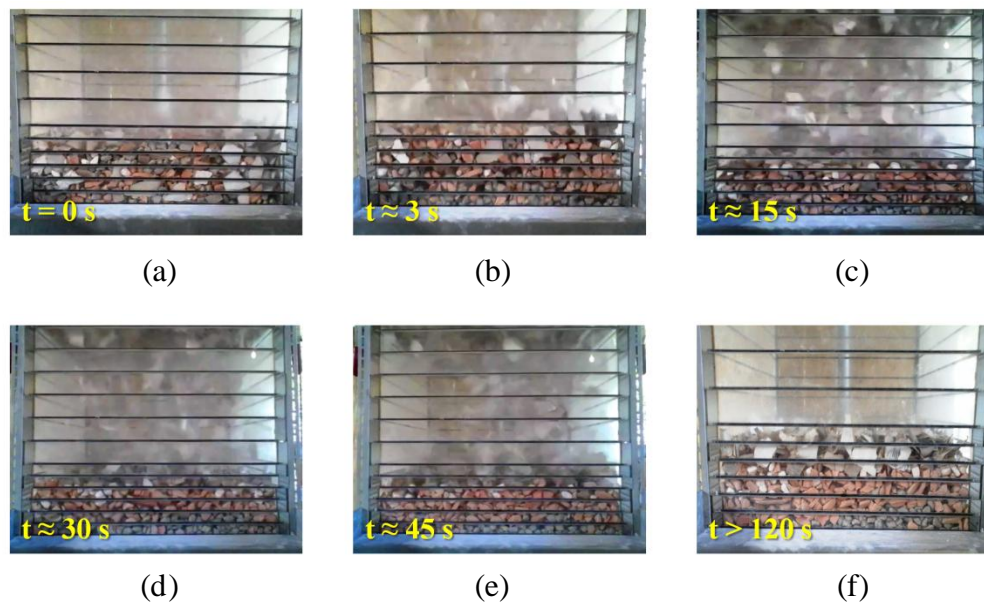


Figura 60: Evolução do processo de classificação no jigge pneumático. A sequência de imagens corresponde ao ensaio com 4,6% de impurezas.

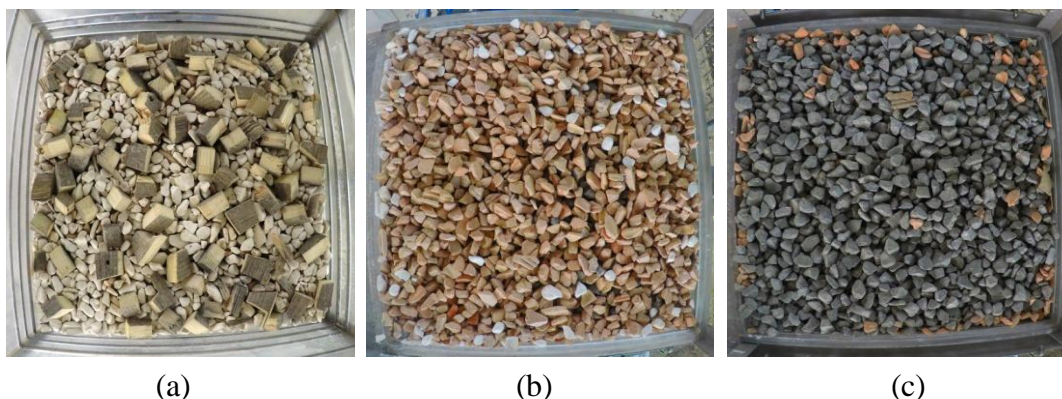


Figura 61: Vista superior dos estratos após o ensaio com 9% de impurezas. (a) Camada 5 (topo); (b) Camada 3 (intermediária); (c) Camada 1 (base). Os fragmentos de papel inicialmente presentes no sistema foram carregados para fora do compartimento do jigue pelo sistema coletor de poeira.

6.2 PERFIS DE ESTRATIFICAÇÃO

A composição detalhada dos estratos resultantes dos ensaios de separação é mostrada na Figura 62. No geral, os resultados indicam que o jigue pneumático foi capaz de remover de modo eficaz o material não rochoso (madeira e papel) inicialmente presente no sistema. Também, a influência do teor inicial de contaminantes na mistura sobre a separação foi aparentemente desprezível. Na maioria dos casos, praticamente todo material não rochoso inicialmente presente sob o estrato 4 foi removido da fração rochosa pela ação do pulso de jigagem, com exceção de uma inesperada contaminação por papel do produto de base (estrato 1) quando o teor total de contaminantes foi de 2,3% em massa (Figura 62.c). Neste caso, é provável que um ou mais fragmentos de papel tenham permanecido confinados no leito denso e/ou tenham sido firmemente pressionados contra as paredes laterais do compartimento do jigue. A influência do ciclo de jigagem sobre esse episódio é discutido na seção 6.3.

Em relação ao gesso, era já antecipado que sua separação não seria tão simples quanto a de papel e madeira, uma vez que sua densidade é muito mais próxima da densidade do concreto. De fato, observou-se um sensível aumento no teor final de gesso das camadas inferiores à medida que se aumentou sua proporção inicial na mistura. Contudo, considerando o concreto presente na camada de base (estrato 1) como o produto desejado, foi possível obter um produto final com um teor médio de gesso menor que 0,2% em massa para todos os casos estudados. Ainda, dados obtidos em estudos prévios (CAZACLIU et al., 2014; SAMPAIO et al.,

2016) indicam que é possível obter um produto com baixo teor de gesso (menor que 1% em massa) mesmo para elevados níveis iniciais de contaminação (até aproximadamente 21% em massa de gesso).

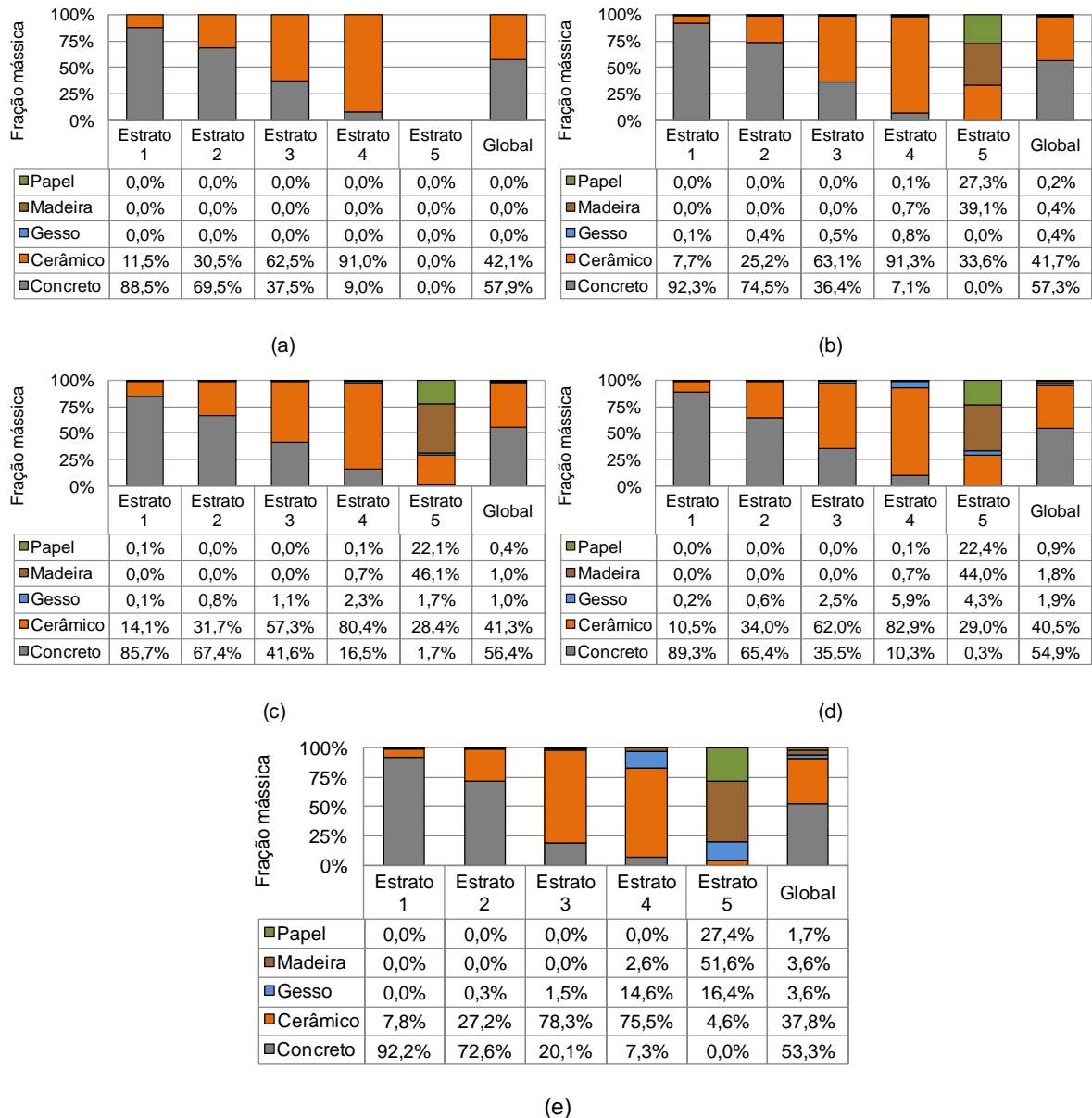


Figura 62: Composição mássica global e de cada estrato após separação em jigge pneumático de misturas contendo diferentes níveis de contaminação com material rochoso e não rochoso. (a) Mistura binária de concreto e material cerâmico; (b) 1% em massa de impurezas adicionais; (c) 2,3% em massa de impurezas adicionais; (d) 4,6% em massa de impurezas adicionais; (e) 9% em massa de impurezas adicionais.

A despeito da proximidade entre as densidades do concreto e do material cerâmico, a separação entre os mesmos ocorreu de modo satisfatório, a ponto de elevar a concentração de concreto (estrato 1) em mais de 30% em massa. Em contraste com os outros constituintes, nos quais a força motriz principal da

separação deve ter sido as diferenças específicas de densidade, a separação entre o concreto e o material cerâmico parece ser conduzida primariamente em função de diferenças na densidade de empacotamento (ou ainda, de compactidade), conforme sugerido por Cazacliu et al. (2014).

A Figura 63 mostra o teor e a recuperação de concreto referente aos testes. No estado misturado (antes dos testes), estes valores eram de 57,7% e 20% em massa, respectivamente. Após o processo de separação, o teor e a recuperação média de concreto no estrato 1 para os cinco casos estudados foram de 90% ($\pm 3\%$) e 49% ($\pm 2\%$) em massa, respectivamente. Aumentos significativos na recuperação do concreto podem ser obtidos às custas do teor se o ponto de corte do produto denso é elevado de modo a incluir também o estrato 2. Neste caso, a recuperação mássica média se eleva para 84% ($\pm 4\%$) enquanto o teor médio de concreto no produto diminui para 80% ($\pm 3\%$) em massa.

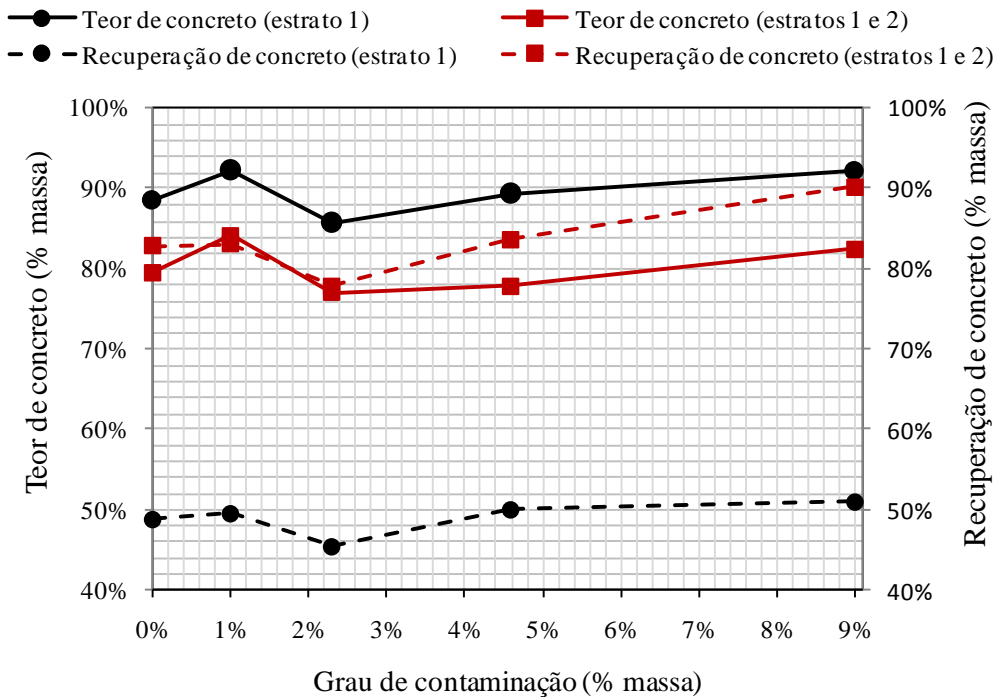


Figura 63: Variação do teor e recuperação do concreto em função do grau inicial de contaminação e da quantidade de produto coletada (1 ou 2 estratos).

O grau de remoção de contaminantes foi determinado da seguinte forma:

$$Remoção (\%) = 100 - \frac{(\% \text{ constituinte})_{\text{produto}}}{(\% \text{ constituinte})_{\text{alimentação}}} \quad (54)$$

De modo geral, papel e madeira foram removidos em grande quantidade das zonas inferiores do leito, conforme pode ser visto na Figura 64. Os resultados também revelam que a inclusão do estrato 2 na fração produto não teve efeito significativo sobre o grau de remoção de papel e madeira (97% para o papel em ambos os casos; 100% para a madeira no estrato 1 e 99% considerando os estratos 1 e 2 como produto). Por outro lado, o aumento na recuperação mássica de concreto pela inclusão do estrato 2 na camada de produto resultou em uma considerável queda no grau de remoção médio de gesso e material cerâmico, na ordem de 25% e 22%, respectivamente.

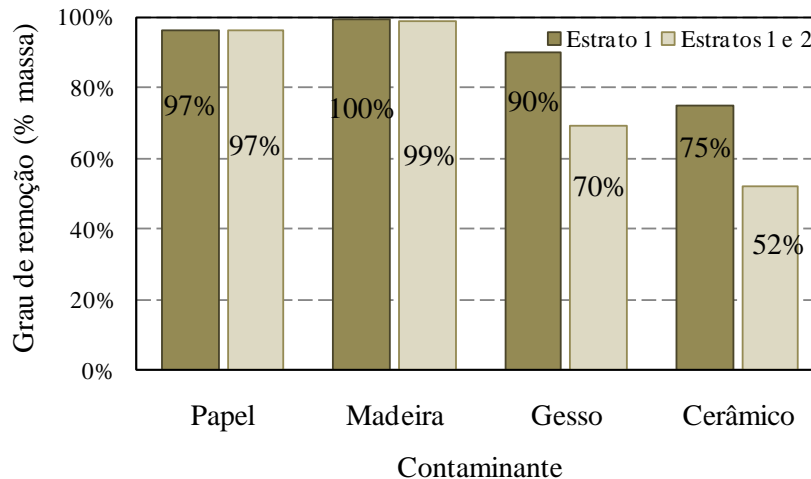


Figura 64: Comparação entre o grau médio de remoção de contaminantes do concreto no produto do estrato 1 e dos estratos 1 e 2.

6.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

Conforme supramencionado, houve um caso testado (2,3% em massa de contaminantes adicionais) no qual alguns fragmentos de papel permaneceram retidos no estrato 1 não obstante todo o papel inicialmente contido em camadas superiores (estratos 2 e 3) tenham sido removidos do interior do leito. Isso pode sugerir que o ciclo de jigagem utilizado pode não ter sido apropriado o suficiente a ponto de evitar a ocorrência de zonas confinadas nas camadas inferiores do leito e assim permitir a elevação dos fragmentos de papel ali presentes. Assim, variações pontuais no tempo de jigagem (número de ciclos), frequência de pulsação e no fluxo

de ar ascendente podem ser realizados a fim de verificar o efeito gerado na separação.

O efeito do tempo de jigagem na separação de misturas ternárias contendo concreto, gesso e material cerâmico encontra-se bem documentado na literatura (CAZACLIU et al., 2014; SAMPAIO et al., 2016). Como regra geral, o processo de segregação se sucede rapidamente, de modo que estado de segregação aproximadamente estável é alcançado quando $t \approx 30$ s. Conforme mencionado anteriormente, a remoção dos fragmentos de madeira e papel do leite ocorreu de maneira ainda mais rápida, sendo que, ainda assim, houve pedaços de papel retidos no estrato de fundo. Neste sentido, é razoável supor que maiores incrementos no tempo de jigagem não teriam efeitos significativos a partir do momento em que extensa parte do material não rochoso já tenha sido removido do sistema ($t \approx 15$ s).

A fim de verificar como variações na frequência de jigagem e na expansão do leite afetam a qualidade do produto, dois testes adicionais foram realizados para um grau de impurezas adicionais de 4,6% em massa. No primeiro, os parâmetros ótimos de jigagem foram utilizados, conforme definidos por Sampaio et al. (2016) para o caso da classificação de misturas ternárias contendo concreto, gesso e material cerâmico. Estes parâmetros consistiram em um fluxo de ar de 70%, frequência de pulsação de 160 CPM e tempo de jigagem de 120 s. Assim, o fluxo de ar foi reduzido em 10% em relação aos ensaios anteriores, o que resultou em uma menor amplitude de expansão do leite. Os resultados da separação para essas condições é mostrado na Figura 65(a). Pode-se observar que a separação de ambas as frações rochosa e não rochosa foi de desempenho inferior em comparação com aquelas obtidas com um maior fluxo de ar. Madeira e papel foram encontrados em todas as camadas, o teor de gesso no estrato 1 foi aproximadamente o dobro do teor obtido nos testes anteriores enquanto o teor de concreto foi 8% menor. Estes resultados indicam claramente que uma separação apropriada exige uma expansão suficiente do leite a fim de criar condições para o deslocamento dos contaminantes leves em direção ao topo do sistema.

No segundo caso, o fluxo de ar e o tempo de jigagem foram mantidos constantes em 80% e 120 s, respectivamente, enquanto a frequência de pulsação foi reduzida para 140 CPM (Figura 65.b). Nestas condições, o teor de concreto obtido no estrato 1 foi maior que 93% em massa e, com exceção do material cerâmico, todos os outros contaminantes foram removidos por completo. Este melhor resultado

pode decorrer do deslocamento do leito quando em uma menor frequência de pulsação, a qual implica em um maior período de entrada de ar na câmara de separação e, portanto, uma maior duração da fase de expansão do leito. Além disso, o uso de menores frequências de pulsação tende a aumentar a distância percorrida por uma dada partícula entre dois pulsos sucessivos (DE JONG; WITTEVEEN; DALMIJN, 1996), ocasionando um maior tempo disponível para o alcance da velocidade terminal das mesmas, e ampliando assim o predomínio de condições favoráveis à sedimentação retardada. Esta circunstância pôde ser observada visualmente no presente caso, no qual o tempo necessário para remoção abundante do material não rochoso do leito foi menor ($t \approx 10$ s) do que para o caso em que a frequência de pulsação foi de 160 cpm ($t \approx 15$ s).

É interessante notar que o efeito líquido da redução da frequência de jigagem sobre a remoção de contaminantes não rochosos é similar ao do aumento do fluxo de ar no sistema. Todavia, ao contrário deste caso, a diminuição da frequência não implica em maiores custos operacionais.

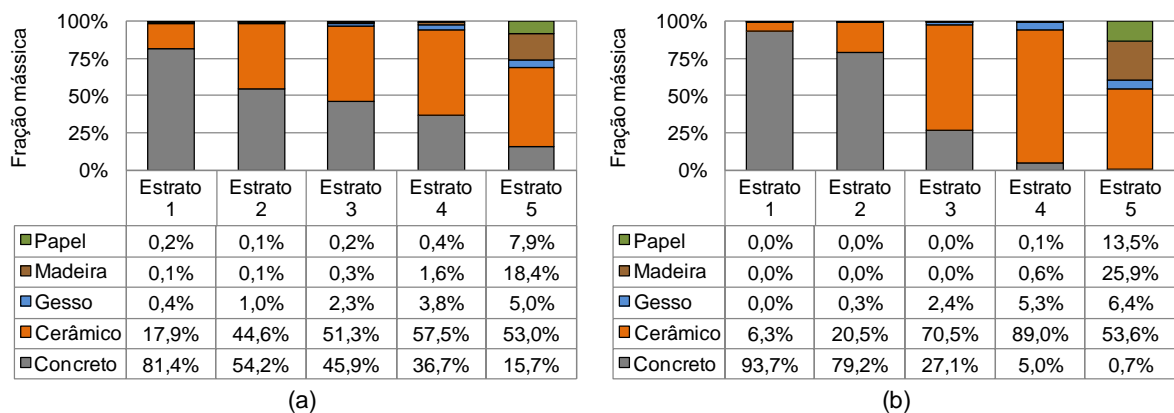


Figura 65: Efeito da variação dos parâmetros operacionais. (a) Fluxo de ar reduzido para 70%. (b) Frequência de pulsação reduzida para 140 CPM.

6.4 PERFIS DE DISTRIBUIÇÃO

Após o fim do processo de jigagem, praticamente todo material não rochoso foi removido do interior do leito, cobrindo a superfície do mesmo (com exceção do caso com 10% de contaminantes adicionais, no qual o papel foi sugado pelo coletor de poeira). Por outro lado, o gesso e o material cerâmico, ainda que consideravelmente segregados em relação à condição inicial, estiveram distribuídos

ao longo de todo o volume do leito. A distribuição relativa dos mesmos em função da altura do leito é mostrada na Figura 66. Pode-se observar que ambos os componentes se concentram progressivamente nos estratos superiores, especialmente os estratos 3 e 4 (espessura do leito de 75 mm e 100 mm, respectivamente). Conforme já mencionado, o estrato 5 esteve bastante preenchido com papel e madeira, de modo que a concentração de gesso e especialmente material cerâmico foi baixa. Exceções à este comportamento puderam ser observadas para o gesso quando as duas condições operacionais extras descritas na seção 6.3 foram consideradas. Em ambos os casos, o teor relativo de gesso continuou a aumentar do estrato 4 para o estrato 5, ainda que uma substancial diferença entre o nível de separação tenha sido observado para as duas condições.

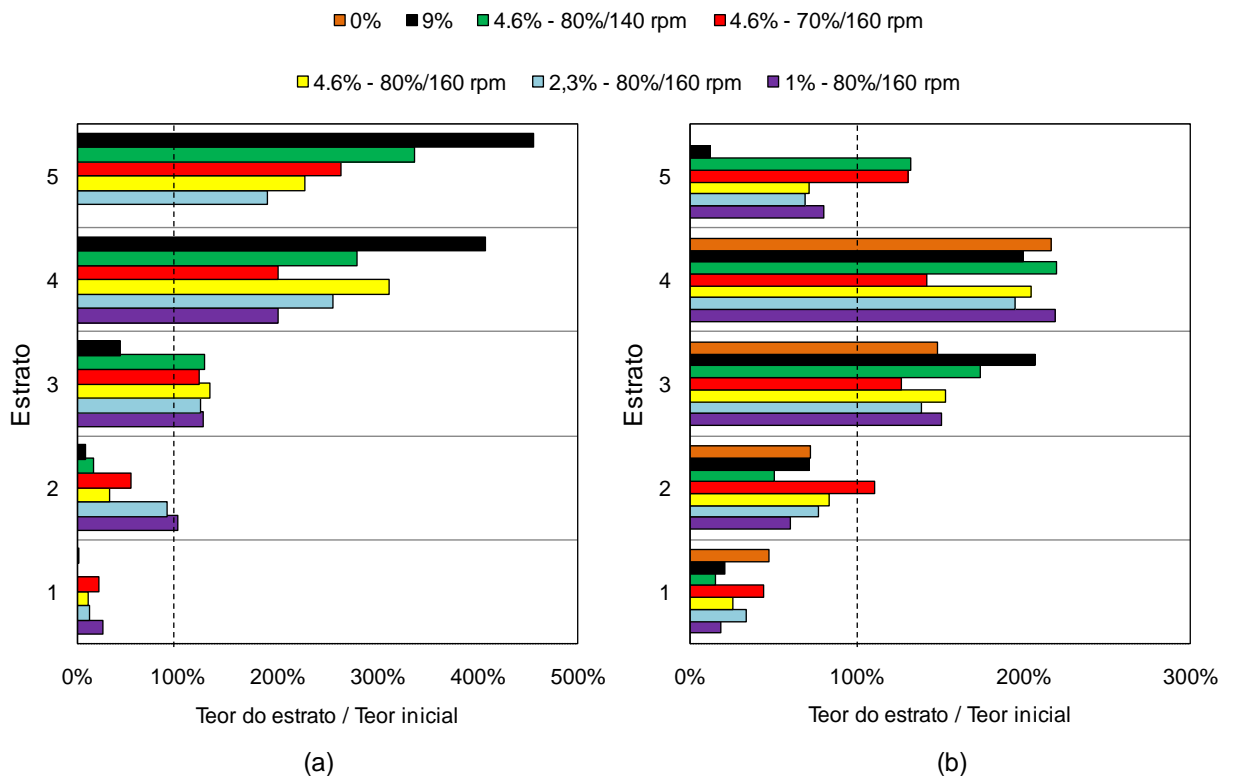


Figura 66: Perfis de distribuição do gesso (a) e do material cerâmico (b) após a separação no jig. A linha pontilhada corresponde à condição inicial de cada componente no sistema.

A influência do teor inicial de impurezas adicionais sobre a separação da fração rochosa é demonstrado na Figura 67, na qual é exibido os teores de gesso e material cerâmico em cada estrato. Em conjunto com o aumento do grau de contaminantes (de 1% à 9% em massa), o teor de gesso no estrato 4 aumentou em dezesseis vezes, enquanto seu teor no estrato 1 permaneceu praticamente

inalterado. Por outro lado, a análise da variação dos teores de material cerâmico revelou alterações mais discretas, apresentando uma menor estratificação para a condição de mais baixo fluxo de ar (70%) e uma estratificação mais pronunciada, com maior concentração no estrato 3, quando o grau de contaminação adicional foi de 9% em massa. Entre estes dois limites não houve uma tendência bem definida, podendo mesmo ser admitido que a influência do grau adicional de contaminação foi mínima.

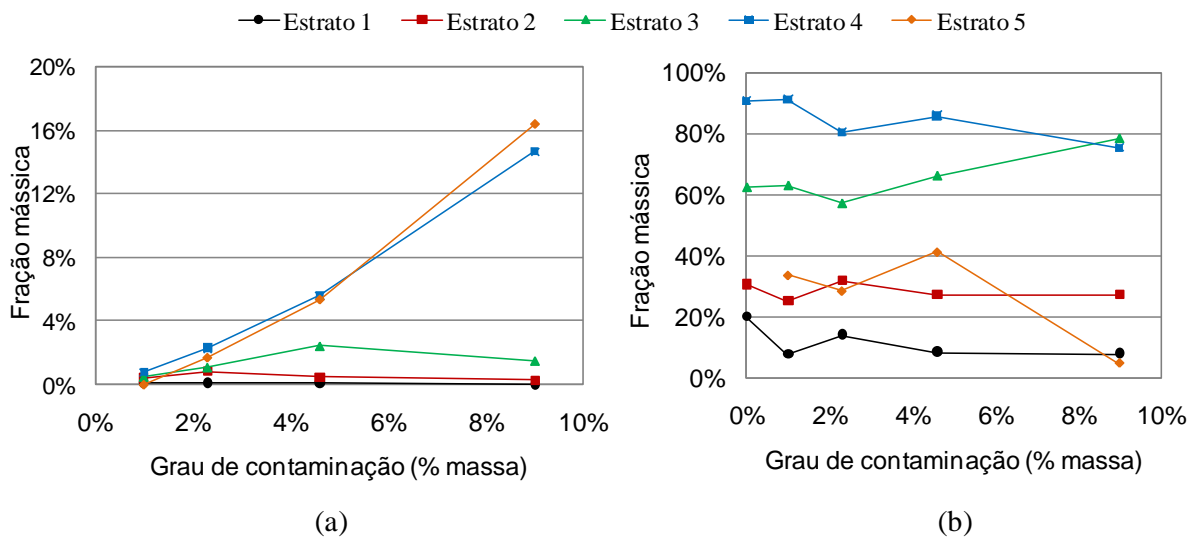


Figura 67: Influência do grau de contaminação adicional sobre o teor de gesso (a) e material cerâmico (b) em cada estrato.

6.5 ASPECTOS TECNOLÓGICOS GERAIS

Em todos os casos testados, o produto obtido após a jigagem (estrato 1) conteve menos de 1% em massa de constituintes indesejáveis (papel, madeira e gesso) e aproximadamente 90% em massa de concreto, o que cumpre os padrões de qualidade exigidos por diversos países referente à composição de agregados reciclados de concreto (MARTÍN-MORALES et al., 2013). Além disso, o emprego de condições operacionais ótimas de separação bem como de estágios adicionais de jigagem tem potencial de fornecer um produto com graus ínfimos de contaminação e com um teor possivelmente maior que 95% em massa de concreto. Em termos da recuperação de produto, ao considerar somente gesso, madeira e papel como

impurezas (uma vez que concentrações de material cerâmico abaixo de 10% em massa são toleráveis), um grau de remoção maior que 99% em massa pôde ser obtido (considerando os estratos 1 e 2 como produtos). Este desempenho é comparável aquele de classificadores pneumáticos comerciais comumente empregados na reciclagem de resíduos leves (NIHOT, 2015), levando em conta o fato que esses equipamentos não são capazes de efetuar a separação de contaminantes rochosos (como o gesso). Ainda, o jigue pneumático apresentou desempenho similar aquele de sistemas de *sensor-based sorting*. Vegas et al. (2015) utilizaram um classificador automático munido de sensor de infravermelho-próximo a fim de separar contaminantes indesejáveis (gesso, madeira, plástico, borracha, etc.) de uma mistura contendo concreto, asfalto e materiais cerâmicos, obtendo um grau de remoção máximo de 97% em massa. Neste caso, ainda que o *sorter* tenha operado com uma ampla variedade de contaminantes, a jigagem apresenta a vantagem adicional de promover a separação por densidade entre os componentes rochosos da mistura simultaneamente à remoção dos contaminantes não rochosos.

Deve-se enfatizar que a viabilidade do uso de jigues para separações multicomponentes em plantas de reciclagem exige a observância de certas condições. Por exemplo, a ausência de grandes fragmentos de resíduos (pedaços de papel, tábuas, etc.) na alimentação é condição obrigatória a fim de se obter uma separação apropriada. Deste modo, estágios precedentes de classificação e/ou coleta manual necessitam ser realizados cuidadosamente a fim de evitar a entrada de materiais volumosos no compartimento de jigagem. Deve considerar, também, a destacada sensibilidade da separação pneumática à umidade da fração rochosa, o que exige a manutenção da mesma na alimentação (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Ainda, visto que fragmentos de materiais leves (papel e plásticos) tendem a serem arrastados pela corrente ascendente de ar, ajustes são necessários no sistema de coleta destes resíduos, a fim de prevenir a obstrução do sistema de coleta de poeira em jigues industriais. Além disso, modificações no ciclo de jigagem visando uma maior amplitude de expansão do leito podem ser desejáveis na remoção de impurezas, tal como papel. Considerando o uso de dois estágios de jigagem, o emprego de uma pulsação mais vigorosa no primeiro estágio poderia ser uma opção favorável para remoção em grande escala de contaminantes leves, ao passo que um segundo estágio poderia ser totalmente otimizado focando uma melhor separação

dos componentes rochosos. Finalmente, melhorias adicionais poderiam ser obtidas mediante ajustes no dispositivo de descarga dos produtos (TSUNEKAWA et al., 2012) e no controle do ciclo de jigagem (LYMAN; JONKERS, 2000).

6.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados indicaram a viabilidade técnica do uso de jigues pneumáticos na remoção de contaminantes orgânicos indesejados (papel e madeira) em conjunto com a estratificação convencional em uma única batelada. Ainda, o teor inicial de contaminantes teve uma influência desprezível no desempenho do jigue.

Em todos os casos testados, o produto denso obtido apresentou níveis de contaminação menores que 1% em massa, e um teor total de aproximadamente 90%. Os graus de remoção de contaminantes observados indicam que o jigue pneumático têm potencial de atingir desempenhos similares ao de classificadores pneumáticos e de sistemas de sorting automático normalmente empregados, com a vantagem adicional de promover a separação dos componentes rochosos presentes na mistura. Observou-se também que o desempenho do jigue pode ser melhorado se parâmetros ótimos de operação forem utilizados.

A possibilidade de combinar duas etapas da separação no estágio de jigagem a seco pode ser uma estratégia útil para redução dos custos de processamento, particularmente em usinas de reciclagem de resíduos, em função do normalmente baixo valor agregado dos produtos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

A despeito de sua importância e variedade de utilizações nos segmentos mineral e industrial, são poucos os estudos que tratam da fenomenologia envolvida na estratificação em leitos de jigues. A jigagem pneumática, em particular, sofre com uma maior escassez de trabalhos na área, uma vez que a maior parte dos existentes é voltada à jigagem hidráulica convencional. Deste modo, certos fenômenos envolvidos no processo de jigagem são pouco compreendidos e o real potencial de aplicação de jigues permanece ainda desconhecido.

Neste contexto, as principais contribuições do presente trabalho foram as seguintes: (1) identificar a ocorrência de convecção granular em leitos de jigagem, além de realizar uma análise geral do fenômeno e da influência do mesmo sobre a estratificação final de misturas ternárias; (2) Propor um mecanismo de formação do fluxo convectivo em leitos de jigues, bem como um modelo preditivo do perfil final de estratificação; (3) examinar a evolução da estratificação ao longo do tempo de jigagem, obtendo *insights* a respeito da cinética do processo; (4) analisar a influência da granulometria do leito sobre a estratificação em jigues pneumáticos; (5) Demonstrar o potencial da aplicação de jigues como equipamentos multi-separadores por meio da separação conjunta de materiais rochosos e não rochosos.

Os resultados relativos à ocorrência de convecção granular em jigues são, em um primeiro momento, de interesse teórico. O impacto do fenômeno na estratificação em jigues industriais permanece uma questão em aberto, sendo necessários estudos mais aprofundados sobre o fenômeno. Os resultados obtidos na análise da influência da granulometria sobre a estratificação são de interesse prático, uma vez que fornecem informações úteis para processos que envolvem classificação por tamanho e jigagem à seco. Por fim, os resultados referentes aos ensaios na multi-separação de materiais indicam uma aplicação potencial da jigagem pneumática.

7.2 ESTUDOS COMPLEMENTARES E FUTUROS

O presente estudo está longe de abordar todas as particularidades envolvidas na estratificação em jiges, de modo que estudos complementares estão em andamento, enquanto outros se encontram em fase de planejamento.

Em relação à convecção granular, testes preliminares foram realizados a fim de avaliar sua influência sobre a estratificação de leitos não-uniformes quanto à granulometria, porém uniforme quanto à densidade. Os resultados até então gerados indicam que partículas maiores tendem a se concentrar na zona central do leito enquanto partículas menores tendem a se agrupar ao longo das bordas. Posteriormente, deve-se avaliar o efeito conjunto sobre a estratificação em leitos contendo partículas de diferentes densidades e tamanhos.

Resultados particularmente interessantes foram obtidos para um conjunto de testes que, a princípio, visavam analisar a cinética de remistura em jiges hidráulicos. Para tal, foram usados leitos binários formados por brita natural e por brita colorida com tinta (ambas com propriedades idênticas), que inicialmente foram postas em camadas separadas no jigue a fim de analisar a mistura das mesmas ao longo dos ciclos. Contudo, de modo inesperado, a pulsação do leito resultou na estratificação parcial do sistema, com as partículas de brita colorida concentradas no topo e as de brita natural na base. Ensaio de angularidade (NF EN 933-6, 2014) realizados com as frações individuais revelaram que o modo de escoamento da brita colorida foi 10% mais lento do que da brita natural. Na ausência de diferenças na geometria das partículas, isso deve ocorrer devido a alterações na textura das partículas causadas pela tinta. Assim, se confirmado esse fato, o mesmo constituiria uma característica adicional do leito que pode ocasionar segregação em jiges, além das já conhecidas diferenças de densidade, tamanho e forma de partículas. Um sumário do procedimento experimental e dos resultados até então obtidos é apresentado no Apêndice 3.

Em relação à convecção granular, estudos posteriores deverão analisar a influência do compartimento do jigue e o efeito da convecção no caso de jiges operando continuamente. Dados de literatura indicam que o aumento da razão de aspecto do sistema, H/L (onde H é a espessura do leito e L a largura do compartimento que o contém) resulta em um aumento da intensidade da convecção

no sistema (WASSGREN, 1997; FERNANDO; WASSGREN, 2003). Deste modo, leitões mais profundos seriam mais sujeitos à influência da convecção. Também, uma vez que correntes convectivas se manifestam nas proximidades das paredes do compartimento, é razoável supor que quanto maior for a largura do mesmo, menor será o efeito da convecção sobre a estratificação como um todo. Ainda, considerando que a aparição da convecção está atrelada à dissipação de energia junto as paredes, é esperada uma maior intensidade da convecção em compartimentos compostos por materiais com alto coeficiente de atrito. Dados de literatura revelam que o coeficiente de atrito para o contato acrílico-acrílico (material do compartimento dos jigsawes usados nos testes) é de $\mu = 0,096$, bastante próximo do coeficiente de atrito do contato aço inoxidável-aço inoxidável (material típico usado em equipamentos industriais), igual a $\mu = 0,099$ (SEVILLE; WU, 2016). Todavia, deve-se considerar que os materiais que compõem o leito possivelmente terão uma interação distinta com o material das paredes, o qual também pode possuir algum tipo de revestimento (tinta, resina, etc.) que pode alterar o coeficiente de atrito nominal do material.

Ao contrário dos testes realizados em batelada, quando operado continuamente o leito do jigsaw não estará sujeito a restrição imposta por arestas, uma vez que o compartimento jaz aberto na carga e descarga. Considerando um tempo de residência de 1 minuto em jigsawes hidráulicos operando a 80 CPM (KOWOL; MATUSIAK, 2015) e uma média observada de 0,6 aparições dos traçadores na superfície do leito para $f = 90$ CPM (vide seção 4.2), poder-se-ia supor certa influência da convecção na segregação quando em operação contínua. Neste caso, tendo em conta o movimento longitudinal do leito, a trajetória descrita por uma célula convectiva hipotética seria semelhante a um helicóide no sentido do portão de descarga.

Entre outros fatores que podem influenciar a ocorrência e/ou a intensidade do fluxo convectivo estão o formato e elasticidade de partículas, inclinação da parede lateral do jigsaw e altura da película d'água sobre o leito. A influência da convecção na separação em jigsawes industriais, caso existente, dependerá tanto da intensidade do fluxo convectivo quanto do alcance da célula dentro do sistema. Para avaliar isso, são necessários metodologias de análise que quantifiquem a corrente convectiva no interior do leito.

Por fim, estudos futuros relacionados à influência da granulometria sobre a estratificação devem focar no efeito da variação da fração volumétrica das diferentes classes de tamanho e nas composições individuais dos componentes leve e denso.

REFERÊNCIAS

ABREU, Charles R.A.; TAVARES, Frederico W.; CASTIER, Marcelo. Influence of particle shape on the packing and on the segregation of spherocylinders via Monte Carlo simulations. **Powder Technology**, [s.l.], v. 134, n. 1-2, p.167-180, ago. 2003. Elsevier BV.

AGRICOLA, Georgius (1556). **De Re Metallica**. Nova York: Dover Publications, 1950. Tradução do latim por H.C. Hoover e L.H. Hoover.

ALEXANDER, A.; MUZZIO, F. J.; SHINBROT, T.. Segregation patterns in V-blenders. **Chemical Engineering Science**, [s. L.], v. 58, p.487-496, 2003.

ALIZADEH, Ebrahim; BERTRAND, François; CHAOUKI, Jamal. Discrete element simulation of particle mixing and segregation in a tetrapodal blender. **Computers & Chemical Engineering**, [s.l.], v. 64, p.1-12, maio 2014. Elsevier BV.

ALLMINERAL (Germany) (Org.). **PRODUCTS**. 2017. Disponível em: <<http://www.allmineral.com/en/loesungen/produkte/>>. Acesso em: 05 ago. 2017.

ARANSON, Igor S.; TSIMRING, Lev S.. Patterns and collective behavior in granular media: Theoretical concepts. **Reviews Of Modern Physics**, [s.l.], v. 78, n. 2, p.641-692, 1 jun. 2006. American Physical Society (APS).

BECK, A.J.G; HOLTHAM, P.N. Computer simulation of particle stratification in a two-dimensional batch jig. **Minerals Engineering**, Great Britain, v. 6, n. 5, p.523-536, 1993.

BEN-AÏM, R. **Study of the Texture of Packings of Grains**: Applications to the Determination of the Permeability of Binary Mixtures in the Molecular, Intermediate, Laminar Regime. 1970. Tese (Doutorado) - University Of Nancy, Nancy, 1970.

BOYLU, F. et al. Effect of fluidizing characteristics on upgrading of lignitic coals in gravity based air jig. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 129, p.27-35, jun. 2014. Elsevier BV.

BRITO, R. et al. Segregation induced by inelasticity in a vibrofluidized granular mixture. **Physical Review e**, [s.l.], v. 77, n. 6, p.1-7, 3 jun. 2008. American Physical Society (APS).

BROWN, Douglas. **Tracker Video Analysis and Modeling Tool**. 2017. Disponível em: <<http://physlets.org/tracker/>>. Acesso em: 03 jul. 2017.

BURT, Richard O. **Gravity concentration technology**. Amsterdam, New York: Elsevier, 1984.

CANO-PLEITE, E. et al. Reversal of gulf stream circulation in a vertically vibrated triangular fluidized bed. **Powder Technology**, [s.l.], v. 316, p.345-356, jul. 2017. Elsevier BV.

CARLSON, J. T.; EISELE, T. C.; KAWATRA, S. K.. Design of a jig for separating minerals of very similar densities. In: SME ANNUAL MEETING AND EXHIBIT, [], 2010, Phoenix. **Proceedings of a meeting held 28 February - 3 March 201**. Phoenix: Society For Mining, Metallurgy, And Exploration (sme), 2010. p. 1 - 4.

CAZACLIU, Bogdan et al. The potential of using air jigging to sort recycled aggregates. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 66, p.46-53, mar. 2014. Elsevier BV.

CHEN, W.I. Batac jig cleaning in five U.S. plants. **Mining Engineering**, [s. L.], v. 32, p.1346-1350, 1980.

CHEN-LONG, Duan et al. Development and application of the active pulsing air classification. **Procedia Earth And Planetary Science**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.667-672, set. 2009. Elsevier BV.

CIAMARRA, Massimo Pica et al. Granular Species Segregation under Vertical Tapping: Effects of Size, Density, Friction, and Shaking Amplitude. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 96, n. 5, 8 fev. 2006. American Physical Society (APS).

CIERPISZ, S.; KRYCA, M.; SOBIERAJSKI, W.. Control of coal separation in a jig using a radiometric meter. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 95, p.59-65, set. 2016. Elsevier BV.

COELHO, A.; BRITO, J. de. Preparation of concrete aggregates from construction and demolition waste (CDW). **Handbook Of Recycled Concrete And Demolition Waste**, [s.l.], p.210-245, 2013a. Elsevier.

COELHO, André; BRITO, Jorge de. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 39, p.338-352, jan. 2013b. Elsevier BV.

COELHO, André; BRITO, Jorge de. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. **Waste Management**, [s.l.], v. 33, n. 5, p.1258-1267, maio 2013c. Elsevier BV.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **NF EN 1097-6**: Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. France: Association Francaise de Normalisation, 2014.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **NF EN 933-6**: Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 6 : évaluation des caractéristiques de surface - Coefficient d'écoulement des granulats. [s. L.]: Association Francaise de Normalisation, 2014.

CONWAY, Stephen L. et al. Granular flowand segregation in a four-bladed mixer. **Chemical Engineering Science**, [s. L.], v. 60, p.7091-7107, 2005.

COUPER, James R. et al. **Chemical Process Equipment**. 2. ed. Oxford, UK: Elsevier, 2005. 833 p.

CRESPO, E.F. Modeling segregation and dispersion in jigging beds in terms of the bed porosity distribution. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 85, p.38-48, jan. 2016. Elsevier BV.

DDI, International (Org.). **Mechanisation of Alluvial Artisanal Diamond Mining**: Barriers and success factors. [s. L.]: Bonanza Printing And Copying Centre, 2010.

DE JONG, T.P.R.; WITTEVEEN, H.J.; DALMIJN, W.L. Penetration velocities in a homogeneous jig bed. **International Journal of Mineral Processing**, [s.l.], v. 46, p.277-291, 1996, Elsevier BV.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T.; ANGOT, D. Prèvision de la compacité des melanges granulaires par le modèle de suspension solide. II : Validations et Cas des mèlanges confinés, **Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, n° 194, pp. 71-86, 1994.

DUAN, Chenlong; HE, Yaqun; ZHAO, Yuemin. The fundamental study on the reutilization of electronic scrap by passive pulsed air classifiers. **Proceedings Of The 2005 Ieee International Symposium On Electronics And The Environment, 2005.**, [s.l.], p.107-115, 2005. IEEE.

ELLENBERGER, J.; VANDU, C.o.; KRISHNA, R.. Vibration-induced granular segregation in a pseudo-2D column: The (reverse) Brazil nut effect. **Powder Technology**, [s.l.], v. 164, n. 3, p.168-173, jun. 2006. Elsevier BV.

ESCUDIÉ, R.; EPSTEIN, N.; GRACE, J.R.; BI, H.T. Effect of particle shape on liquid-fluidized beds of binary (and ternary) solids mixtures: segregation vs. mixing. **Chemical Engineering Science**, [s.l.], v. 61, n. 5, p.1528-1539, mar. 2006. Elsevier BV.

EVERETT, J.W.; PEIRCE, J.J.. The development of pulsed flow air classification theory and design for municipal solid waste processing. **Resources, Conservation And Recycling**, [s. L.], v. 4, p.185-202, 1990.

EVESQUE, P.; RAJCHENBACH, J.. Instability in a Sand Heap. **Physical Review Letters**, The American Physical Society, v. 62, n. 1, p.44-46, 02 jan. 1989.

TOO, J.R.; RUBISON, R.M.; FAN, L. T.; LAI, F.S. Studies on Multicomponent Solids Mixing and Mixtures: Part III. Mixing Indices. **Powder Technology**, Netherlands, v. 24, p.73-89, 1979.

FARADAY, M. On a Peculiar Class of Acoustical Figures; and on Certain Forms Assumed by Groups of Particles upon Vibrating Elastic Surfaces. **Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London**, Londres, v. 121, p.299-340, jan. 1831.

FEIL, N. Ferreira; SAMPAIO, C. Hoffmann; WOTRUBA, H.. Influence of jig frequency on the separation of coal from the Bonito seam — Santa Catarina, Brazil. **Fuel Processing Technology**, [s.l.], v. 96, p.22-26, abr. 2012. Elsevier BV.

FERNANDO, D. N.; WASSGREN, C. R.. Effects of vibration method and wall boundaries on size segregation in granular beds. **Physics Of Fluids**, [s.l.], v. 15, n. 11, p.3458-3467, nov. 2003. AIP Publishing.

FRAIGE, Feras Y.; LANGSTON, Paul A.; MATCHETT, Andrew J.; DODDS, John. Vibration induced flow in hoppers: DEM 2D polygon model. **Particuology**, [s.l.], v. 6, n. 6, p.455-466, dez. 2008. Elsevier BV.

GALLAS, J. A. C.; HERRMANN, H. J.; SOKOFOWSKI, S. Convection Cells in Vibrating Granular Media. **Physical Review Letters**, The American Physical Society, v. 69, n. 9, p.1371-1374, 31 ago. 1992.

GARCIMARTÍN, A.; PASTOR, J.M.; ARÉVALO, R.; MAZA, D. Convection in a vibrated granular layer. **The European Physical Journal Special Topics**, [s.l.], v. 146, n. 1, p.331-340, jul. 2007. Springer Nature.

GAUDIN, A. M.. **Principles of mineral dressing**. Nova York: Mcgraw-hill, 1939. 554 p.

LYMAN, G. J.; JONKERS, A. **Dynamic Monitoring and Control of Jigs**. US nº 6070738, 06 ago. 1998, 06 jun. 2000. 2000. Disponível em: <<https://www.google.ch/patents/US6070738>>. Acesso em: 23 out. 2016.

GREEN, Don W.; PERRY, Robert H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8. ed. New York: Mcgraw-hill, 2008.

HABASHI, Fathi. A Short History of Mineral Processing. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 23., 2006, Istambul. **Proceedings...** Istambul: Selected Works, 2006. p. 03 - 08. Disponível em: <http://works.bepress.com/fathi_habashi/45/>. Acesso em: 16 abr. 2017.

HE, Jingfeng; TAN, Mingbing; ZHAO, Yuemin; ZHU, Ran; DUAN, Chenlong. Density-based segregation/separation performances of dense medium gas–solid fluidized bed separator (DMFBS) for coal cleaning and upgrading. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, [s.l.], v. 59, p.252-261, fev. 2016. Elsevier BV.

HENDERSON, James (1858). **Methods of Tin and Copper Dressing in Cornwall**. [s. L.]: Blaize Bailey Books, 2016. 48 p. Transcrito do Proceedings of the Institution of Civil Engineers por Lynne Mayers. Disponível em: <<http://www.balmaiden.co.uk/BalMaidenGallery.htm>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

HENN, Érico Lopes. **Máquinas de Fluido**. Santa Maria: Editora UFSM, 2001. 476 p.

HONG, Daniel C.; QUINN, Paul V.; LUDING, Stefan. Reverse Brazil Nut Problem: Competition between Percolation and Condensation. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 86, n. 15, p.3423-3426, 9 abr. 2001. American Physical Society (APS).

HORI, Kunihiro; TSUNEKAWA, Masami; HIROYOSHI, Naoki; ITO, Mayumi. Development of a New Gravity Separator for Plastics —a Hybrid-Jig—. **Materials Transactions**, [s.l.], v. 50, n. 12, p.2844-2847, 2009a. Japan Institute of Metals.

HORI, Kunihiro; TSUNEKAWA, Masami; UEDA, Masatsune; HIROYOSHI, Naoki; ITO, Mayumi; OKADA, Hideaki. Optimum water pulsation of jig separation for crushed plastic particles. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 92, n. 3-4, p.103-108, ago. 2009b. Elsevier BV.

HSIAU, Shu-san; CHEN, Wen-cheng . Density effect of binary mixtures on the segregation process in a vertical shaker. **Advanced Powder Technology**, [s. L.], v. 13, n. 3, p.301-315, 2002.

HSIAU, Shu-san; LIAO, Chun-Chung; SHENG, Po-Yen; TAI, Shih-Chang. Experimental study on the influence of bed height on convection cell formation. **Experiments In Fluids**, [s.l.], v. 51, n. 3, p.795-800, 28 abr. 2011. Springer Nature.

HUERTA, D. A.; RUIZ-SUÁREZ, J. C.. Vibration-Induced Granular Segregation: A Phenomenon Driven by Three Mechanisms. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 92, n. 11, 18 mar. 2004. American Physical Society (APS).

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6. ed. University Of Michigan: John Wiley & Sons, 2007.

ITO, Mayumi; TSUNEKAWA, Masami; ISHIDA, Emi; KAWAI, Koki; TAKAHASHI, Tatsuru; ABE, Naka; HIROYOSHI, Naoki. Reverse jig separation of shredded floating plastics — separation of polypropylene and high density polyethylene. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 97, n. 1-4, p.96-99, nov. 2010. Elsevier BV.

JAIN, Anchal; METZGER, Matthew J.; GLASSER, Benjamin J.. Effect of particle size distribution on segregation in vibrated systems. **Powder Technology**, [s.l.], v. 237, p.543-553, mar. 2013. Elsevier BV.

JUNGMANN, A.; NEUMANN, Th. Alljigs® for the Separation of Impurities out of Gravel, Sand and Recycling Material. **Aufbereitungs-technik**, [s. L.], v. 32, p.18-25, 1991.

KING, R. P. **Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems**. Oxford: Butterworth-heinemann, 2001.

KING, R.P. A quantitative model of gravity separation unit operations that rely on stratification. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF COMPUTERS AND MATHEMATICS IN THE MINERAL INDUSTRIES, 12., 1987, Johannesburg. **Proceedings...** . Johannesburg: Southern African Institute Of Mining And Metallurgy, 1987. p. 141 - 151.

KIRCHBERG, H.; HENTZSCHEL, W. A study of the Behaviour of Particles in Jigging. In: INTERNATIONAL MINERAL DRESSING CONGRESS, 1957, Stockholm. **Anais...** .Stockholm: Almqvist And Wiksell, 1958. p. 193 - 212.

KLEIN, M.; TSAI, L.L.; ROSEN, M.S.; PAVLIN, T.; CANDELA, D.; WALSWORTH, R.L. Interstitial gas and density segregation of vertically vibrated granular media. **Physical Review e**, [s.l.], v. 74, n. 1, p.1-4, 18 jul. 2006. American Physical Society (APS).

KNIGHT, James B.; JAEGER, H. M.; NAGEL, Sidney R. Vibration-Induced Size Separation in Granular Media: The Convection Connection. **Physical Review Letters**, The American Physical Society, v. 70, n. 24, p.3728-3731, 14 jun. 1993.

KOWOL, Daniel; MATUSIAK, Piotr. Badania Skuteczności Osadzarkowego Oczyszczania Kruszywa z Ziaren Węglanowych. **Mining Science: Mineral Aggregates**, Wrocław, v. 22, p.83-92, 2015.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S.. **Principles of Heat Transfer**. 7. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

LAPLANTE, A.; GRAY, S.. Advances in gravity gold technology. **Developments In Mineral Processing**, [s.l.], p.280-307, 2005. Elsevier.

LAROCHE, C.; DOUADY, S.; FAUVE, S.. Convective flow of granular masses under vertical vibrations. **Journal de Physique**, [s. L.], v. 50, n. 7, p.699-706, abr. 1989.

LILL, G.D.; SMITH, H.G. A study of the motion of particles in a jig bed. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 1960, London. **Anais...** . London: Institution Of Mining And Metallurgy, 1960. p. 515 - 535.

LIM, Eldin Wee Chuan. Density segregation in vibrated granular beds with bumpy surfaces. **Aiche Journal**, [s.l.], v. 56, n. 10, p.2588-2597, 20 abr. 2010. Wiley-Blackwell.

LINS, F. A.; SILVA, L. A.. **Aspectos do beneficiamento de ouro aluvionar**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1987.

LINS, F.A.F. Concentração gravítica. In: LUZ, A.B.; POSSA, M.V.; ALMEIDA, S.I.. **Tratamento de minérios**. 2. ed. [s.i]: CETEM/MCT, 1998. p. 259-295.

LLATAS, C. Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste. **Handbook Of Recycled Concrete And Demolition Waste**, [s.l.], p.25-52, 2013. Elsevier.

LYMAN, G. J. Review of Jigging Principles and Control. **Coal Preparation**, [s.l.], v. 11, n. 3-4, p.145-165, jan. 1992. Informa UK Limited.

MAJID, M.; WALZEL, P.. Convection and segregation in vertically vibrated granular beds. **Powder Technology**, [s.l.], v. 192, n. 3, p.311-317, jun. 2009. Elsevier BV.

MARTÍN-MORALES, M.; ZAMORANO, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; CUENCA-MOYANO, G.M.; SÁNCHEZ-ROLDÁN, Z. Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW). **Handbook Of Recycled Concrete And Demolition Waste**, [s.l.], p.270-303, 2013. Elsevier.

MAYER, F.W. A new theory concerning the mechanism of settling with its consequences for the rational shape of the diagram of the washing stroke and development of the corresponding regulator of a non-plunger jig. In: INTERNATIONAL COAL PREPARATION CONFERENCE, 1., 1950, Paris. **Anais....** Paris, 1950. p. 316 - 322.

MAYER, F.W. Fundamentals of potential theory of the jiggling process. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 7., 1964, Nova York. **Anais...** . Nova York: Part 2, 1964. p. 750 - 786.

MCWHIRTER, Jon D.; CRAWFORD, Michael E.; KLEIN, Dale E.. Wall Region Porosity Distributions for Packed Beds of Uniform Spheres with Modified and Unmodified Walls. **Transport In Porous Media**, Netherlands, v. 27, p.99-118, 1997.

METZGER, Matthew J.; REMY, Brenda; GLASSER, Benjamin J.. All the Brazil nuts are not on top: Vibration induced granular size segregation of binary, ternary and multi-sized mixtures. **Powder Technology**, [s.l.], v. 205, n. 1-3, p.42-51, jan. 2011. Elsevier BV.

MILLER, D. J.. Design and operating experience with the goldsworthy mining limited batac jig and spiral separator iron ore beneficiation plant. **Minerals Engineering**, Great Britain, v. 4, n. 3/4, p.411-435, 1991.

MISHRA, B.K.; MEHROTRA, S.P. Modelling of particle stratification in jigs by the discrete element method. **Minerals Engineering**, Great Britain, v. 11, n. 6, p.511-522, 1998.

MORI, Sukeyuki et al. Recovery of Non-Ferrous Metals from Car Scrap using the Jig Separator (ECHO Metal Jig, Type-SP). **Ecomaterials**, [s.l.], p.771-774, 1994. Elsevier.

MUKHERJEE, A.K.; BHATTACHARJEE, D.; MISHRA, B.K.. Role of water velocity for efficient jiggling of iron ore. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 19, n. 9, p.952-959, jul. 2006. Elsevier BV.

MUKHERJEE, A.K.; MISHRA, B.K.. An integral assessment of the role of critical process parameters on jiggling. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 81, n. 3, p.187-200, dez. 2006. Elsevier BV.

NAUDÉ, N.; LORENZEN, L.; KOLESNIKOV, A.V.; ALDRICH, C.; AURET, L. Observations on the separation of iron ore in a prototype batch jig. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 120, p.43-47, abr. 2013. Elsevier BV.

NIHOT (Org.). **Nihot Windshifters**. 2015. Disponível em: <<http://www.nihot.co.uk/products/windshifters/>>. Acesso em: 17 jul. 2016.

OLAJIDE, O.; CHO, E.H.. Study of the jigging process using a laboratory-scale Baum jig. **Minerals And Metallurgical Processing**, [s. L.], p.11-14, 1987.

PASTOR, J.M.; MAZA, D.; ZURIGUEL, I.; GARCIMARTÍN, A.; BOUDET, J.-F. Time resolved particle dynamics in granular convection. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, [s.l.], v. 232, n. 2, p.128-135, ago. 2007. Elsevier BV.

PEIRCE, J. Jeffrey; WITTENBERG, Nancy. ZIGZAG CONFIGURATIONS AND AIR CLASSIFIER PERFORMANCE. **J. Energy Eng.**, [s. L.], v. 110, p.36-48, 1984.

PITA, Fernando; CASTILHO, Ana. Influence of shape and size of the particles on jigging separation of plastics mixture. **Waste Management**, [s.l.], v. 48, p.89-94, fev. 2016. Elsevier BV.

RAMÍREZ, Rosa; RISSO, Dino; CORDERO, Patricio. Thermal Convection in Fluidized Granular Systems. **Physical Review Letters**, The American Physical Society, v. 85, n. 6, p.1230-1233, 07 ago. 2000.

RAO, B. Venkoba. Extension of particle stratification model to incorporate particle size effects. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 85, n. 1-3, p.50-58, dez. 2007. Elsevier BV.

RAO, D. V. Subba; GOURICHARAN, T.. **Coal Processing and Utilization**. Boca Raton: Crc Press, 2016. 508 p.

RIAZI, M.R.; GUPTA, R.. **Coal Production and Processing Technology**. Boca Raton: Crc Press, 2015. 535 p.

RICHARDS, R. H. **Ore dressing**. 2. ed. Nova York: Engineering And Mining Journal, 1906.

RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R. **Chemical Engineering: Particle Technology and Separation Processes**. 5. ed. Oxford: Butterworth-heinemann, 2002.

RITTINGER, P. Ritter von. **Lehrbuch der Aufbereitungskunde in ihrer neuesten Entwicklung und Ausbindung systematisch dargestellt**. Berlim: Ernst & Kern, 1867.

RONG, Rui X.; LYMAN, Geoffrey J.. The effect of jigging time and air cycle on bed stratification in a pilot scale Baum jig. **Fuel**, [s. L.], v. 71, p.115-123, 1992.

RONG, Rui. Analysis of jig behaviour in coal preparation plants in China. **Bull. Proc. Australas. Inst. Min. Metall.** [s. L.], p. 59-66. jun. 1986.

ROSATO, A. D.; LAN, Y.; WANG, D. T.. Vibratory particle size sorting in multi-component systems. **Powder Technology**, [s. L.], v. 66, p.149-160, 1991.

ROSATO, Anthony D.; BLACKMORE, Denis L.; ZHANG Ninghua; LAN Yidan. A perspective on vibration-induced size segregation of granular materials. **Chemical Engineering Science**, [s. L.], v. 57, p.265-275, 2002.

ROSATO, Anthony; STRANDBURG, Katherine J.; PRINZ, Friedrich; SWENDSEN, Robert H. Why the Brazil nuts are on top: Size segregation of particulate matter by shaking. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 58, n. 10, p.1038-1040, 9 mar. 1987. American Physical Society (APS).

SAMPAIO, C.H.; ALIAGA, W.; PACHECO, E.T.; PETTER, E.; WOTRUBA, H. Coal beneficiation of Candiota mine by dry jigging. **Fuel Processing Technology**, [s.l.], v. 89, n. 2, p.198-202, fev. 2008. Elsevier BV.

SAMPAIO, Carlos Hoffmann; CAZACLIU, Bogdan Grigore; MILTZAREK, Gérson Luiz; HUCHET, Florian; LE GUEN, Lauredan; PETTER, Carlos Otávio; PARANHOS, Régis; AMBRÓS, Wesley Monteiro; OLIVEIRA, Marcos Leandro Silva. Stratification in air jigs of concrete/brick/gypsum particles. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 109, p.63-72, abr. 2016. Elsevier BV.

SAMPAIO, Carlos Hoffmann; TAVARES, Luis Marcelo Marques. **Beneficiamento Gravimétrico: Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: Editora Ufrgs, 2005.

SAVAGE, Stuart B. Streaming motions in a bed of vibrationally fluidized dry granular material. **J. Fluid Mech.**, Great Britain, v. 194, p.457-478, 1988.

SCHNEIDER, Claudio Luiz. **Caracterização do beneficiamento de carvão por jigagem no Brasil**. 1987. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1987.

SCHRÖTER, Matthias; ULRICH, Stephan; KREFT, Jennifer; SWIFT, Jack B.; SWINNEY, Harry L. Mechanisms in the size segregation of a binary granular mixture. **Physical Review e**, [s.l.], v. 74, n. 1, 26 jul. 2006. American Physical Society (APS).

SEKITO, T.; MATSUTO, T.; TANAKA, N.. Application of a gas–solid fluidized bed separator for shredded municipal bulky solid waste separation. **Waste Management**, [s.l.], v. 26, n. 12, p.1422-1429, jan. 2006. Elsevier BV.

SEVILLE, Jonathan P.K.; WU, Chuan-yu. **Particle Technology and Engineering**. [s. L.]: Butterworth-heinemann, 2016. 294 p.

SHINBROT, Troy; MUZZIO, Fernando J.. Reverse Buoyancy in Shaken Granular Beds. **Physical Review Letters**, The American Physical Society, v. 81, n. 20, p.4365-4368, 16 nov. 1998.

SOHN, H. Y.; MORELAND. The Effect of Particle Size Distribution on Packing Density. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**, [s. L.], v. 46, p.162-167, 1968.

SRIPRIYA, R.; MURTY, Ch. V.G.K.. Recovery of metal from slag/mixed metal generated in ferroalloy plants—a case study. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 75, n. 1-2, p.123-134, jan. 2005. Elsevier BV.

SRIVASTAVA, J.P; PATHAK, P.N. Pre-concentration: a necessary step for upgrading tungsten ore. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 60, n. 1, p.1-8, ago. 2000. Elsevier BV.

TAGGART, Arthur F.. **Handbook of Mineral Dressing: Ores and Industrial Minerals**. Austin: John Wiley & Sons, 1945.

TAGUCHI, Y-h. New Origin of a Convective Motion: Elastically Induced Convection in Granular Materials. **Physical Review Letters**, [s. L.], v. 69, n. 9, p.1367-1372, 31 ago. 1992.

TAGUCHI, Y-H. New Origin of a Convective Motion: Elastically Induced Convection in Granular Materials. **Physical Review Letters**, The American Physical Society, v. 69, n. 9, p.1367-1370, 31 ago. 1992.

TAI, C.H.; HSIAU, S.S.; KRUELLE, C.A.. Density segregation in a vertically vibrated granular bed. **Powder Technology**, [s.l.], v. 204, n. 2-3, p.255-262, dez. 2010. Elsevier BV.

TAVARES, L.M.; KING, R.P. A Useful Model for the Calculation of the Performance of Batch and Continuous Jigs. **Coal Preparation**, Malaysia, v. 15, p.99-127, 1995.

TRIPATHY, Alok; PANDA, Lopamudra; SAHOO, A.K.; BISWAL, S.K.; DWARI, R.K.; SAHU, A.K. Statistical optimization study of jigging process on beneficiation of fine size high ash Indian non-coking coal. **Advanced Powder Technology**, [s.l.], v. 27, n. 4, p.1219-1224, jul. 2016. Elsevier BV.

TSUNEKAWA, Masami; KOBAYASHI, Riki; HORI, Kunihiro; OKADA, Hideaki; ABE, Naka; HIROYOSHI, Naoki; ITO, Mayumi. Newly developed discharge device for jig separation of plastics to recover higher grade bottom layer product. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 114-117, p.27-29, nov. 2012. Elsevier BV.

TURNER, J.F. Gravity concentration, past, present and future. **Minerals Engineering**, Great Britain, v. 4, p.213-223, 1991.

VEGAS, Iñigo; BROOS, Kris; NIELSEN, Peter; LAMBERTZ, Oliver; LISBONA, Amaia. Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 75, p.121-128, jan. 2015. Elsevier BV.

VIDUKA, Stephen; FENG, Yuqing; HAPGOOD, Karen; SCHWARZ, Phil. CFD–DEM investigation of particle separations using a sinusoidal jigging profile. **Advanced Powder Technology**, [s.l.], v. 24, n. 2, p.473-481, mar. 2013. Elsevier BV.

WANG, Z.; HALL, P.; MILES, N.J.; WU, T.; LAMBERT, P.; GU, F. The application of pneumatic jigging in the recovery of metallic fraction from shredded printed wiring

boards. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 33, n. 9, p.785-793, 12 jun. 2015. SAGE Publications.

WASSGREN, C. R.; BRENNEN, C. E.; HUNT, M. L.. Vertical Vibration of a Deep Bed of Granular Material in a Container. **Journal Of Applied Mechanics**, California Institute Of Technology, Pasadena, v. 63, p.712-719, set. 1996.

WASSGREN, Carl R. **Vibration of Granular Materials**. 1997. 231 f. Tese (Doutorado) - California Institute Of Technology, Pasadena, 1997.

WEINSTEIN, Richard; SNOBY, Richard. Advances in dry jigging improves coal quality. **Mining Engineering**. [s. L.], p. 29-34. jan. 2007.

WILLS, Barry A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 7. ed. Cornwall, Uk: Butterworth-heinemann, 2006.

WINDOWS-YULE, C. R. K.. **Convective and Segregative Mechanisms in Vibrofluidised Granular Systems**. 2015. 269 f. Tese (Doutorado) - University Of Birmingham, Birmingham, 2015.

WINDOWS-YULE, C. R. K.; DOUGLAS, G. J. M.; PARKER, D. J.. Competition between geometrically induced and density-driven segregation mechanisms in vibrofluidized granular systems. **Physical Review e**, [s.l.], v. 91, n. 3, 27 mar. 2015. American Physical Society (APS).

WINDOWS-YULE, C.R.K.; PARKER, D.J.. Self-diffusion, local clustering and global segregation in binary granular systems: The role of system geometry. **Powder Technology**, [s.l.], v. 261, p.133-142, jul. 2014. Elsevier BV.

WITTEVEEN, Hendrik Josephus. **The response of a uniform jig bed in terms of the porosity distribution**. 1995. 196 f. Tese (Doutorado) - Technische Universiteit Delft, Delft, 1995.

WOOLLACOTT, L.C.; BWALYA, M.; MABOKELA, L. A validation study of the King stratification model. **The Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy**, [s. L.], v. 115, p.93-101, fev. 2015.

WOOLLACOTT, L.C.; SILWAMBA, M.. An experimental study of size segregation in a batch jig. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 94, p.41-50, ago. 2016. Elsevier BV.

XIA, Yunkai; PENG, Felicia F.; WOLFE, Eric. CFD simulation of fine coal segregation and stratification in jigs. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 82, n. 3, p.164-176, abr. 2007. Elsevier BV.

XING, Weihong. **Quality Improvement of Granular Secondary Raw Building Materials by Separation and Cleansing Techniques**. 2004. 157 f. Tese (Doutorado) - Technische Universiteit Delft, Delft, 2004.

XING, Weihong; HENDRIKS, Charles. Decontamination of granular wastes by mining separation techniques. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 14, n. 8, p.748-753, jan. 2006. Elsevier BV.

XUE, Kun; ZHENG, Yixin, FAN, Baolong; LI, Fangfang; BAI, Chunhua. The origin of granular convection in vertically vibrated particle beds: The differential shear flow field. **The European Physical Journal e**, [s.l.], v. 36, n. 1, jan. 2013. Springer Nature.

YANG, S. C.; HSIAU, S. S. Simulation study of the convection cells in a vibrated granular bed. **Chemical Engineering Science**, [s. L.], v. 55, p.3627-3637, 2000.

YANG, S.C.. Density effect on mixing and segregation processes in a vibrated binary granular mixture. **Powder Technology**, [s.l.], v. 164, n. 2, p.65-74, maio 2006. Elsevier BV.

YANG, Xuejiao; ZHENG, Ning; WEN, Pingping; LI, Liangsheng; SHI, Qingfan. Confinement-induced horizontal segregation in a vertically shaken granular bed. **Powder Technology**, [s.l.], v. 286, p.629-635, dez. 2015. Elsevier BV.

ZEILSTRA, C.; HOEF, M. A. van Der; KUIPERS, J. A. M.. Simulation of density segregation in vibrated beds. **Physical Review e**, [s.l.], v. 77, n. 3, p.1-13, 20 mar. 2008. American Physical Society (APS).

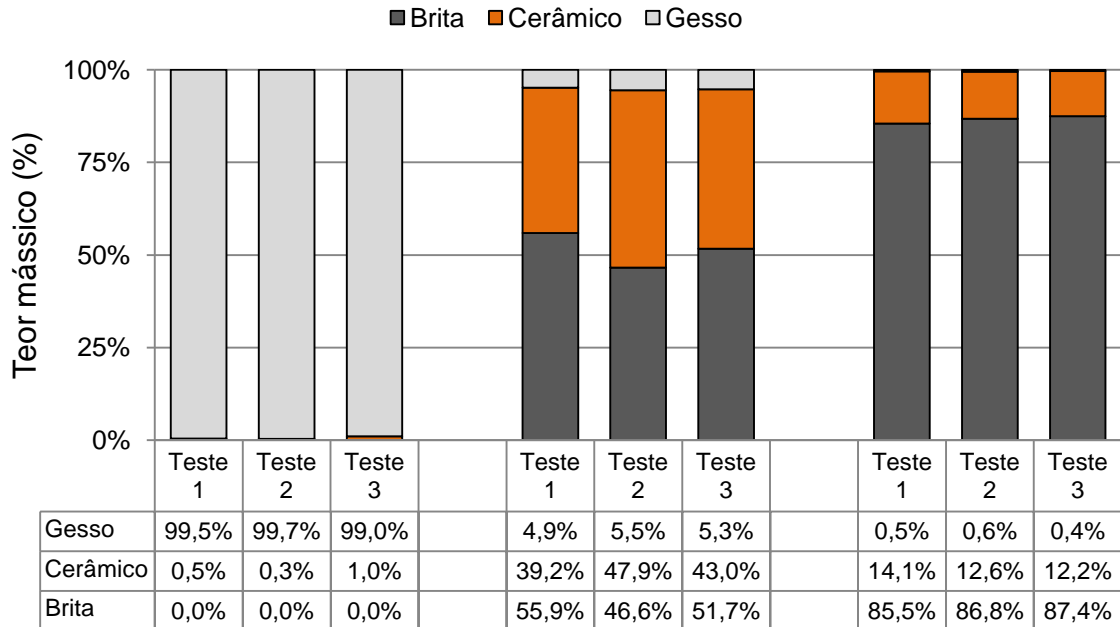
ZHANG, Fuweng; WANG, Li; LIU, Chuanping; WU, Ping; ZHAN, Shuai. Patterns of convective flow in a vertically vibrated granular bed. **Physics Letters A**, [s.l.], v. 378, n. 18-19, p.1303-1308, mar. 2014. Elsevier BV.

ZHAO, Bo; AN, Xizhong; WANG, Yang; QIAN, Quan; YANG, Xiaohong; SUN, Xudong. DEM dynamic simulation of tetrahedral particle packing under 3D mechanical vibration. **Powder Technology**, [s.l.], v. 317, p.171-180, jul. 2017. Elsevier BV.

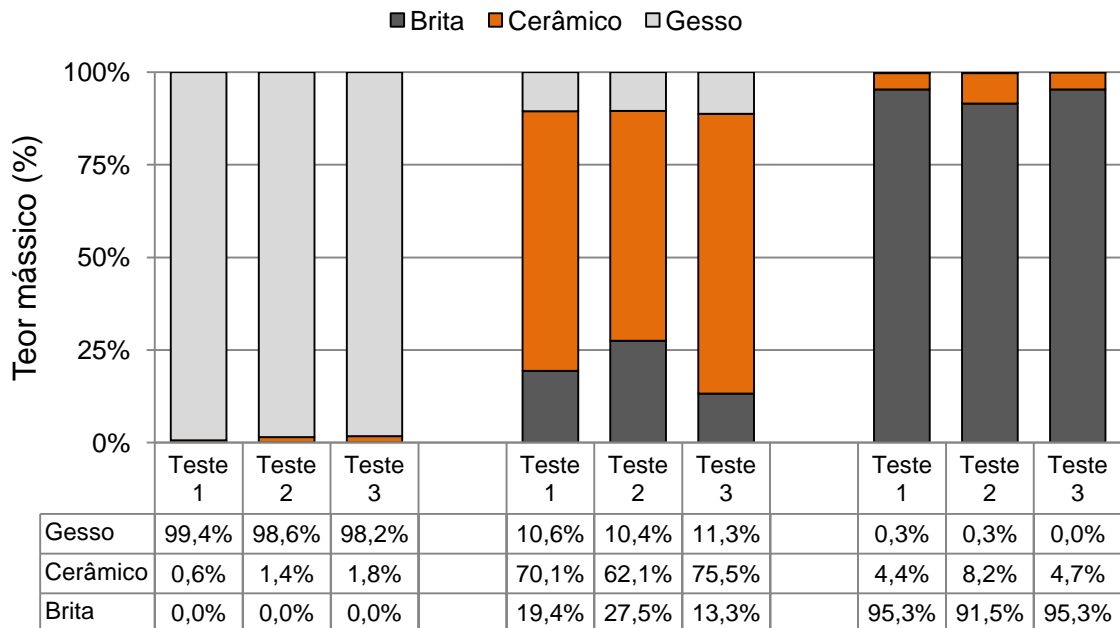
ZIDI, El-hachemi; HASSEINE, Abdelmalek; MOUMMI, Nouredine. The Effect of Vertical Vibrations on Heat and Mass Transfers Through Natural Convection in Partially Porous Cavity. **Arabian Journal For Science And Engineering**, [s.l.], p.1-10, 29 abr. 2017. Springer Nature.

APÊNDICE 1 - Perfis de estratificação dos testes com leitos contendo diferentes classes de tamanho.

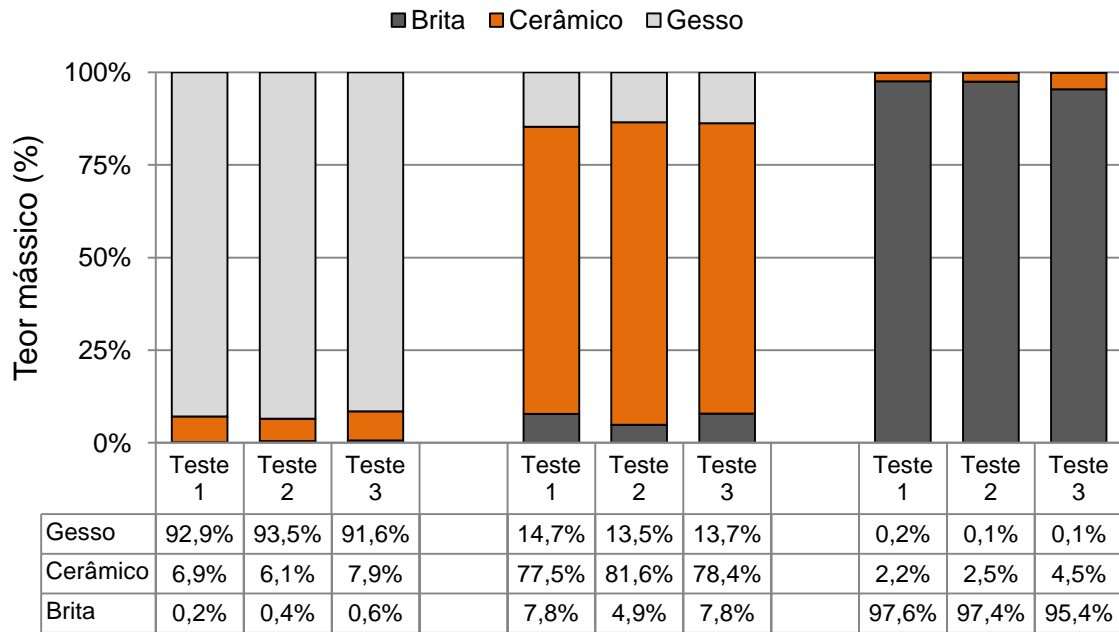
a) Classe grosseira (19,1 - 12,7 mm):



b) Classe intermediária (12,7 - 8 mm):

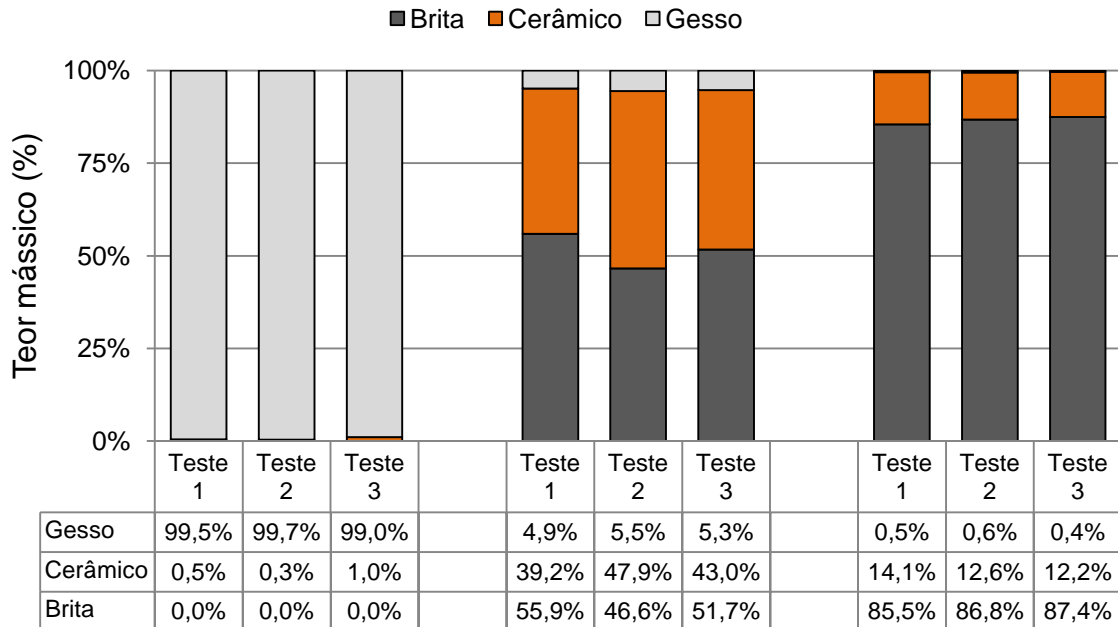


c) Classe miúda (8 - 4,75 mm):

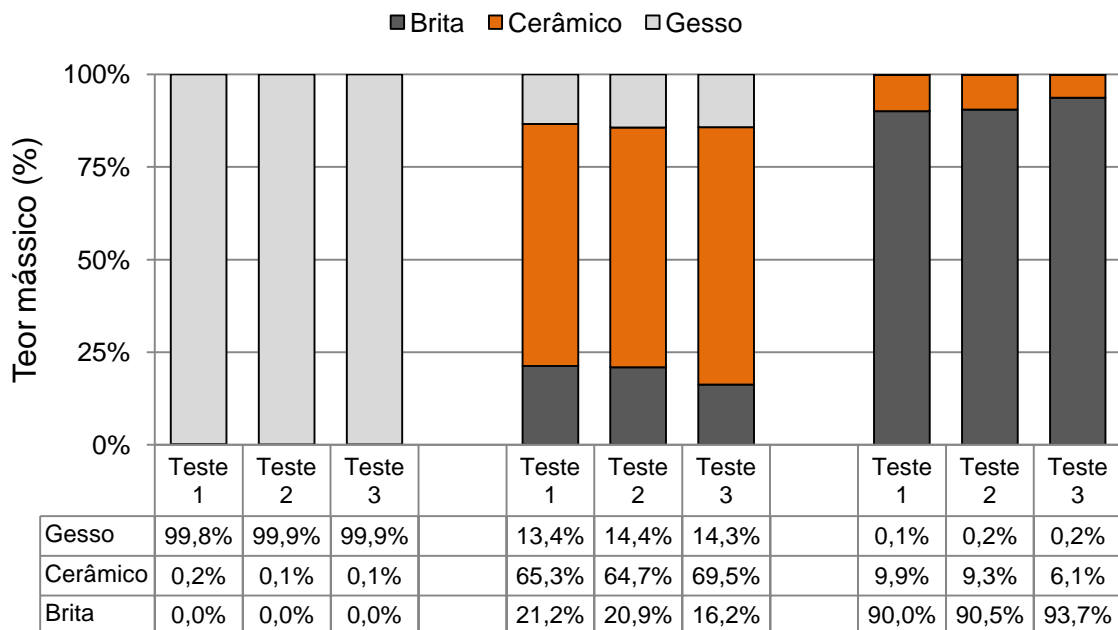


APÊNDICE 2 - Perfis de estratificação dos testes com leitos contendo diferentes distribuições granulométricas

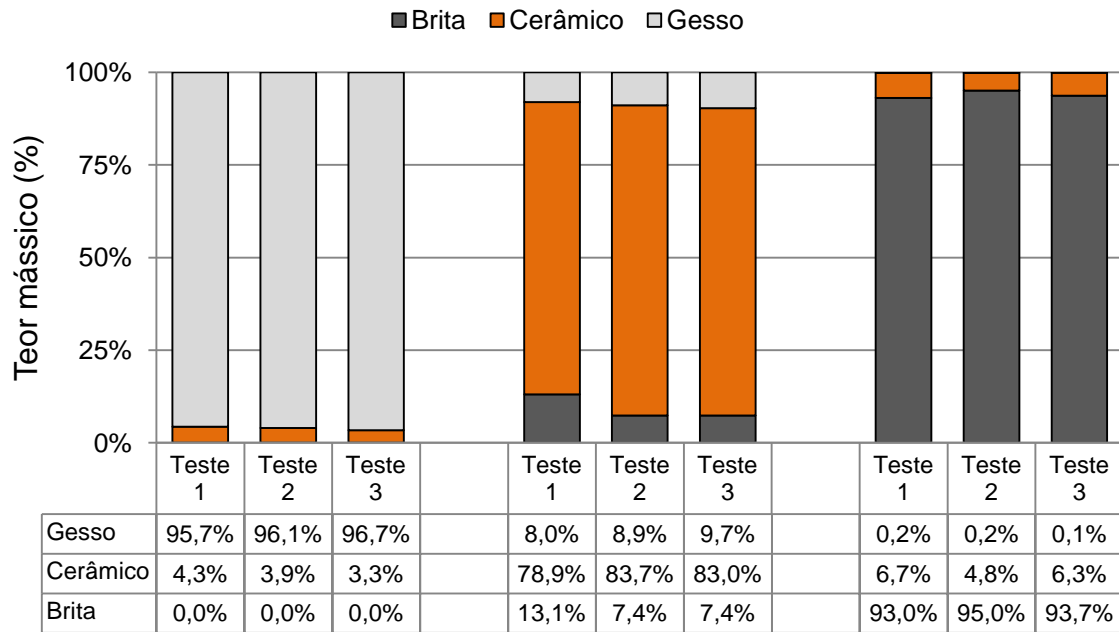
a) Mistura M1 (19,1 - 12,7 mm):



b) Mistura M2 (19,1 - 8 mm):



c) Mistura M3 (19,1 - 4,75 mm):



APÊNDICE 3 - Ensaio com leitos binários de cores distintas

Partículas de brita foram preparadas na faixa de tamanho de 10 a 14 mm. Parte das mesmas foi colorida mediante o uso de tinta cor lilás. As partículas coloridas foram posicionadas no leito do jigue hidráulico de modo a preencher completamente três gavetas menores (espessura de 75 mm). Esta camada foi coberta por mais três camadas de brita natural (espessura de 75 mm), conforme figura abaixo.



Configuração inicial do leito.

Três ensaios foram realizados nas seguintes condições de frequência de pulsação e ciclos de jigagem: 60 CPM e 100 ciclos de pulsação; 60 CPM e 300 ciclos de pulsação; 90 CPM e 300 ciclos de pulsação. A imagem abaixo ilustra a composição dos estratos para o teste com 60 CPM e 100 ciclos de pulsação.



Estrato 6 (topo)

Estrato 5

Estrato 4

Estrato 3

Estrato 2

Estrato 1 (base)

A fim de identificar diferenças de propriedades que poderiam ocasionar a estratificação, foram realizados ensaios de angularidade de agregados graúdos, segundo a norma NF EN 933-6 (2014). Neste ensaio, mede-se o tempo necessário para que uma massa determinada de agregado inicialmente posicionada em um tubo escoe através de uma abertura de dimensões conhecidas existente na base do mesmo. Para tal, uma balança é posicionada abaixo do tubo e um cronômetro é utilizado para medir o tempo necessário para o escoamento do material. Nos ensaios realizado, foram medidos os tempos necessários para que 7000 g de material escoasse através da abertura do tubo. A tabela abaixo mostra as condições gerais dos ensaios.

Ensaio de angularidade		
Material	Brita natural	Brita colorida
Tamanho	10 - 14 mm	10 - 14 mm
Massa inicial	10000.7 g	10151.0 g
Massa após testes	9998.2 g	10146.2 g
Altura da abertura	42 mm	42 mm

Conforme mostra a tabela abaixo, os resultados revelaram que a brita colorida levou um tempo em média 10% maior para escoar através do tubo. Uma vez que a angularidade de ambos os materiais (relacionado a suas geometrias) pode ser considerada a mesma, é razoável supor que o retardamento do escoamento deve ter ocorrido em função de mudanças na textura das partículas induzidas pelo revestimento de tinta.

Número do ensaio	Brita natural (s)	Brita colorida (s)
1	123,31	136,01
2	123,72	137,37
3	124,19	136,43
4	122,66	137,41
5	122,97	137,67
Média	123,37	136,97
Desvio absoluto	0,60	0,72