

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

Tese de Doutorado

**INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS NA JIGAGEM A
SECO, VISANDO À ADOÇÃO DE NOVAS ESTRATÉGIAS DO PROCESSO**

Fortunato Lucas Quembo Raposo
Engenheiro Químico

Porto Alegre

2023

Fortunato Lucas Quembo Raposo

INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS NA JIGAGEM A SECO, VISANDO À ADOÇÃO DE NOVAS ESTRATÉGIAS DO PROCESSO

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.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Otávio Petter

Co-orientador: Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós

Porto Alegre

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Profa. Dra. Patrícia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Profa. Dra. Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Prof. Dr. Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Vice - Coordenadora: Profa. Dra. Andréa Moura Bernardes

Raposo, Fortunato Lucas Quembo

Investigação das Características Operacionais na
Jigagem a Seco, Visando à Adoção de Novas Estratégias
do Processo / Fortunato Lucas Quembo Raposo. --2023.

83 f.

Orientador: Carlos Octávio Petter.

Coorientador: Weslei Monteiro Ambrós.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Jigagem. 2. Separação a seco. 3. Estratégia. 4. Pulsação
transiente. 5. Consumo de energia. I. Petter, Carlos Octávio, orient.
II. Ambrós, Weslei Monteiro, coorient. III. Título.

Fortunato Lucas Quembo Raposo

INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS NA JIGAGEM A SECO, VISANDO À ADOÇÃO DE NOVAS ESTRATÉGIAS DO PROCESSO

Esta tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador, Coorientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Nome e Titulação do coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter
PPGE3M - UFRGS

Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós
PPGE3M - UFRGS

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio
PPGE3M - UFRGS

Prof. Dr. Moacir Medeiros Veras
Instituto Federal do Amapá

Prof. Dr. Gerson Luiz Miltzarek
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
EPÍGRAFE	iv
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	18
1.3 Pergunta de pesquisa	18
1.4 Hipóteses de pesquisa	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Método de jigagem: conceito e evolução	20
2.2 Fundamentos da teoria de jigagem	23
2.2.1 Teoria fluidodinâmica	23
2.2.2 Teoria de Energia potencial	27
2.2.3 Pulsação do leito	34
2.2.4 Particularidades da jigagem a seco	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 Equipamento	40
3.2 Configuração do leito	42
3.3 Análise da estratificação	46
3.4 Perfil de pulsação do ar e consumo energético	47
3.5 Estudo da cinética de estratificação	49
3.6 Pulsação transiente	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 Caracterização da pulsação do ar	51
4.2 Perfil de consumo energético	56

4.3 Cinética de jigagem	59
4.4 Pulsação transiente	65
4.5 Pulsação transiente e segregação: mecanismo preliminar	70
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	74
5.1 Conclusões.....	74
5.2 Recomendações.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Ivone F. Nhamande, meus filhos, Fortunato Júnior, Sérgio e Camila, pelo encorajamento, compreensão, amor e carinho nos momentos da minha ausência durante à minha formação no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Fica expressa a minha gratidão:

- A Deus pela saúde concedida ao longo da minha carreira estudantil a nível de doutorado no Brasil;
- Ao meu orientador Prof. Doutor Carlos Otávio Petter, pelo seu apoio científico, moral e especialmente a confiança depositada, a partir do momento em que me aceitou como orientando no curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPG3M);
- Ao co-orientador Prof. Doutor Weslei Monteiro Ambrós, pelo apoio científico, moral e paciência e sobretudo por acreditar em mim na superação dos desafios da minha tese;
- Ao meu ex - orientador de mestrado e doutorado Prof. Doutor Carlos Hoffmann Sampaio, pelo seu apoio científico e moral e por acreditar mais uma vez no meu projeto de vida que se tornou uma realidade;
- A pesquisadora Dra Gelsa Edith Navarro Hidalgo, pelo apoio científico e moral;
- Ao pesquisador do Dr. Gerson Miltzarek pelo ensinamento na operação do jigue pneumático e hidráulico e apoio moral;
- A Universidade Púngué-Moçambique, especialmente a reitora Emília Nhalevilo ao apostar na formação do quadro docente para o crescimento institucional;
- Aos colegas do curso de Química, pelo suporte no período da minha formação e apoio moral;
- A CNPq, pelo financiamento da bolsa de estudo a nível de doutorado e assistência ao longo da minha formação;
- A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Laboratório de Processamento mineral (LAPROM), pela excelência no ensino, pesquisa e extensão, sobretudo na qualidade dos seus laboratórios do LAPROM;
- A minha esposa Ivone e aos meus filhos (Fortunato Júnior, Sérgio e Camila), pela força, amor, paciência e carinho durante a minha ausência;
- Aos meus familiares, irmãos: Paulo; Lázaro; Sérgio, Judite, Emília, Lucia, Benvôlio, Catarina, Jovêncio; sobrinhos: Flávio, Maneia, Lucas (1), Lucas (2), Estrela, Eugênia, Quembo, etc; Tio: José, etc, pelo apoio moral.

- Ao casal António Marques e Sónia, proprietários da residencial JK-Universitários, onde morei ao longo da minha formação no Brasil, pelos conselhos, apoio moral e sobretudo pela amizade;
- Ao casal Marcos Cardoso e Dulce que se constituíram como pais, pelos seus ensinamentos de vida, apoio de várias ordens e sobretudo pela amizade, ao longo da minha formação no Brasil;
- Aos meus amigos: Alexandre Gambeta, Cremildo Coutinho, José Fidel Matos, Abdul Luís Hassane, Fulgêncio, Manuel Oliveira, Daniel Nanicuacua, Edson Fernandes Raso, José Lopes, David Selemene, Hector, Mateus, Christian, Jorge Fister, e outros que não foram citados, pelo apoio moral.

EPÍGRAFE

Só sei que nada sei.
Sócrates

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo compreender os atributos operacionais que permitam o desenvolvimento de novas estratégias de operação dos equipamentos de jigagem a seco, que visem a melhoria da estratificação. Portanto, devido aos problemas ambientais decorrentes do uso da água na indústria mineira, a jigagem por via seca tem sido bastante valorizada nos últimos anos por possuir menor impacto, apesar de esta possuir baixa eficiência na separação de minérios por densidade. Contudo, embora a diferença de fluido de trabalho seja comumente apontada como a principal diferença em relação à jigagem tradicional, não existem estudos que explorem a possibilidades de haver diferenças fundamentais em seus mecanismos. O estudo foi desenvolvido baseado em ensaios de estratificação, usando traçadores densimétricos distribuídos em 11 faixas de densidades ($0,4-2,4\text{g/cm}^3$) e utilizando um leito base (brita) para análise de sua segregação em jigagem a seco (*AllAirS-500*). Nesse estudo foi instalado um sistema de aquisição de dados (*FieldLogger*) que armazena todas as informações em tempo real de sensores de pressão e medidor de energia instalados. Esses últimos permitem medir a queda de pressão e a potência no processo de jigagem e conseqüentemente estimar os ciclos de jigagem e o consumo energético da jigagem. Em relação a jigagem em diferentes condições operacionais, as condições estacionárias de pulsação demonstraram uma cinética oscilatória e instável, com distribuições de traçadores e coeficientes de partição variando ao longo do tempo, especialmente no caso da fração *new gravity material* (NGM), e assim se diferenciando da cinética reportada na literatura para o caso específico de jigues hidráulicos. Portanto, os testes de estudos transientes para vazão crescente ou frequência decrescente obtiveram uma qualidade de separação e uma redução significativa na flutuação dos índices de partição ao longo do tempo de jigagem em relação aos estudos transientes de vazão decrescente ou frequência crescente. Com base nos resultados obtidos, foi proposto um mecanismo preliminar de descrição do efeito da pulsação transiente sobre a segregação de partículas isoladas no leito do jigage. O mecanismo considera o efeito de pulsos de intensidades coordenados que variam a energia potencial e cinética, que altera a amplitude e a porosidade do leito, reduzindo rapidamente a energia potencial das partículas no sistema, conforme a teoria de energia potencial.

Palavras - chave: Jigagem. Separação a seco. Estratégia. Pulsação transiente. Consumo de energia.

ABSTRACT

This work aims to understand the operational attributes that allow the development of new operating strategies for dry jigging equipment, aimed at improving stratification. Therefore, due to the environmental problems arising from the use of water in the mining industry, dry jigging has been highly valued in recent years because it has less harmful impact, despite its low efficiency in separating ores by preferential density. However, although the difference in working fluid is commonly pointed out as the main difference in relation to traditional jigging, there are no studies that explore the possibility of fundamental differences in its mechanisms. The study was developed based on stratification tests, using densimetric tracers distributed in 11 (eleven) density ranges (0.4-2.4g/cm³) and using a base bed (gravel) for analysis of its segregation in dry jig (AllAirS-500). In this study, a data acquisition system (FieldLogger) was installed, which stores all the information in real time from pressure sensors and energy meters installed. The latter allow measuring the pressure drop and the power in the jigging process and, consequently, estimating the jigging cycles and the energy consumption of the jigging. Regarding jigging under different operating conditions, stationary pulsation conditions demonstrated oscillatory and unstable kinetics, with tracer distributions and partition coefficients varying over time, especially in the case of the new gravity material (NGM) fraction, and thus differing from the kinetics reported in the literature for the specific case of hydraulic jigs. Therefore, the tests of transient studies for increasing flow or decreasing frequency obtained a quality of separation and a significant reduction in the fluctuation of the partition indices along the jigging time in relation to the transient studies of decreasing flow or increasing frequency. Based on the results obtained, a preliminary mechanism for describing the effect of transient pulsation on the segregation of isolated particles in the jig bed was proposed. The mechanism considers the effect of coordinated intensity pulses that vary the potential and kinetic energy, which alters the amplitude and porosity of the bed, rapidly reducing the potential energy of the particles in the system, according to the potential energy theory.

Key words: Jigging. Dry separation. Strategy. Transient pulsation. Energy consumption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Estágios de concentração mineral do primeiro registro do uso método de jigagem..	21
Figura 2-Esquema básico de funcionamento de jigues	22
Figura 3-Mecanismos de segregação de acordo com a teoria fluidodinâmica clássica.....	24
Figura 4-Balanços das forças que atuam na partícula em meio fluido	25
Figura 5-Posição do centro de gravidade em uma mistura binária de partículas com diferentes densidades.....	28
Figura 6-Segregação de partículas intrusas com diferentes propriedades em relação ao leito que as contém	29
Figura 7-Perfil de estratificação de equilíbrio para leito com partículas de diferentes densidades e tamanho uniforme	32
Figura 8-Representação da (a) velocidade do fluido e (b) deslocamento do fluido do leito ao longo de um ciclo de pulsação senoidal em um jigue	35
Figura 9-Velocidade mínima de fluidização de carvão (1300 kg/m ³) e quartzo (2600 kg/m ³) calculadas segundo a Equação (1) para diferentes diâmetros de partícula.....	38
Figura 10-Esquema geral das etapas envolvidas no estudo.....	40
Figura 11-(a) foto do jigue a seco a ser utilizado nos ensaios; (b) componentes principais: painel de controle (1), válvula de ar (2), câmara de separação (3) e duto de sucção de poeira para filtro manga(4).....	41
Figura 12-Traçadores densimétricos, usados para ensaios de estratificação.....	44
Figura 13-Curvas de partição obtidas em testes exploratórios de jigagem a seco e a úmido...	45
Figura 14-(a) Esquema geral da instrumentação para coleta de dados de pressão e energia do jigue e (b) orifícios para inserção de mangueiras e ilustração dos pontos de tomada de pressão	48
Figura 15-Variação de ΔP ao longo do tempo a partir do início de pulso de 95% e 85 CPM .	52
Figura 16-Variação da vazão de ar ao longo do tempo, calculada a partir dos dados de ΔP apresentados na Figura 15.	53
Figura 17-Variação de ΔP para dois pulsos com vazões de ar distintas e frequência de pulsação de 20 CPM (período de 3s).....	54
Figura 18-Variação de ΔP instantâneo ao longo do tempo (incrementos de 0,1 s) à medida que a vazão de ar do soprador era aumentada de 0 a 100% (intervalos não regulares)	55
Figura 19-Potência ativa (kWh) e reativa (kVar) consumidas no jigue durante o aumento da vazão de ar de 0% até seu limite máximo (1kVar=1,25kwh).....	57

Figura 20-Curva de potência útil demandada no soprador de ar do jigge.....	58
Figura 21-Curva de potência útil total aproximada demandada durante a operação do jigge..	59
Figura 22-Curvas de partição de testes de cinética de jigagem realizados com $f = 70$ CPM e vazão de $2,9\text{m}^3/\text{s}$	60
Figura 23-Variação da densidade de separação (ρ_{50}) e dos índices de partição ao longo do tempo	62
Figura 24-Curvas de partição de testes preliminares de cinética de jigagem realizados com $f = 153$ CPM e vazão de $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$	62
Figura 25-Variação da concentração de traçadores no produto leve, considerando uma concentração inicial de 50% (mistura perfeita)	63
Figura 26-Variação do teor de NGM no produto leve.....	64
Figura 27-Comparação entre critério de concentração para separação em ar de traçadores de leito de brita e a concentração de traçadores de diferentes densidades no produto leve, considerando o teste com $t=90\text{s}$	65
Figura 28-Curvas de partição para pulsação transiente com vazão decrescente (a) e frequência crescente (b).....	66
Figura 29-Comparação entre os valores de E_p ao longo do tempo	67
Figura 30-Curvas de partição para pulsação transiente vazão crescente(a) e frequência decrescente (b).....	68
Figura 31-Comparação de valores de E_p ao longo do tempo.....	69
Figura 32-Proporções de NGM no produto leve sob diferentes condições de jigagem	70
Figura 33-Ilustração da sequência de eventos associada ao mecanismo proposto.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Características dos traçadores densimétricos utilizados.....	43
Tabela 2-Variação das condições de pulsação para ensaio com tempo de jigagem de 60s	50
Tabela 3-Densidade de separação e índices de partição de testes preliminares de cinética de jigagem.	60
Tabela 4-Índices de partição para testes com pulsação transiente(a)	66
Tabela 5-Índices de partição para testes com pulsação transiente (b).	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Critério de concentração;
CPM	Ciclo por minuto;
EP	Erro provável;
Eq	Equação;
F	Frequência;
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i> ;
kvar	Unidade de medição da potência reativa da rede no registrador;
kwh	Unidade de medição da potência ativa consumida no registrador;
mbar	Unidade de medição da pressão no registrador;
pág.	Página
PET	Polietileno;
PLA	Poliácido láctico;
P _{reativa}	Potência reativa;
t(s)	Tempo por segundos;
Wh	Watts por hora;
ΔP	Variação de pressão e
Δt	Variação de tempo.

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos recursos minerais possuem graus de impurezas que não permitem sua utilização direta. Nesse sentido, o beneficiamento de minérios é imprescindível a fim de adequá-los ao uso na indústria ou para viabilizar a extração de seus elementos-alvos. Dentre as técnicas de beneficiamento mineral, a concentração gravimétrica (ou gravítica), baseada na exploração das diferenças de densidades entre minerais, se destaca como um dos métodos mais versáteis (SAMPAIO; TAVARES, 2005). A jigagem, uma das principais operações de concentração gravimétrica, baseia-se na separação de partículas através de movimentos de pulsação ascendente de um fluido, no qual o leito é estratificado de acordo com diferenças de densidade entre seus componentes (SAMPAIO *et al.*, 2016). Esse método é bem conhecido desde tempos remotos, sendo aplicado na concentração de minérios grosseiros, carvões, e na reciclagem de resíduos sólidos (LOCKHART, 1984; BURT; MILLS, 1984; SAMPAIO *et al.*, 2016; AMBRÓS *et al.*, 2017 ; AMBRÓS, 2020 ; SAMPAIO *et al.*, 2021).

A jigagem pode ser operada a úmido ou a seco. Contudo, no processamento mineral de modo geral, é comum ser efetuado em jigues hidráulicos, que são mais eficientes do que jigues a seco (KUMAR;KUMAR, 2018 ; HUGHES; ROUX ; CAMPBELL, 2019). Apesar disso, os crescentes problemas ambientais relacionados ao uso e manejo de água em plantas de beneficiamento, em conjunto com as pautas de responsabilidade social e ambiental, tem gerado uma procura por opções mais sustentáveis de beneficiamento (SARDANA *et al.*, 2020 ; SOUZA *et al.*, 2022). Nesse sentido, destacam-se particularmente as técnicas de jigagem a seco e *sensor-based sorting* (SBS) (SAMPAIO *et al.*, 2008; CAZACLIU *et al.*, 2014; AMBRÓS *et al.*, 2017 ; GÜLCAN, 2020; VERAS *et al.*, 2020).

Em nível operacional, considera-se que a menor eficiência da jigagem a seco está fundamentalmente relacionada à menor densidade do ar em relação à água, a qual precisa ser compensada por maiores velocidades de fluidização do ar, tornando a dinâmica do processo mais complexa do que em jigues hidráulicos. Apesar disso, existem muito poucos estudos voltados ao desenvolvimento de estratégias específicas voltadas a otimização da jigagem a seco. Os poucos trabalhos existentes, em sua grande maioria, descrevem apenas estudos de caso, pouco aprofundando as particularidades da jigagem a seco, cujos modelos teóricos permanecem sendo validados com base nos jigues hidráulicos. Ainda, para além dos estudos referentes a eficiência técnica, a otimização do consumo de energia em operações de beneficiamento é um fator de peso equiparável a redução do uso de água de processamento, não podendo assim ser

ignorado do ponto de vista econômico e ambiental. No caso da jigagem a seco, destaca-se o fato que os dois únicos estudos envolvendo o tema publicados por Coelho e De Brito (2013a; 2013b), indicam altíssima demanda energética (e, conseqüentemente, pegada de carbono) associada a técnica, podendo mesmo superar operações reconhecidamente dispendiosas, como a britagem.

Neste contexto, o presente trabalho se propõe a mapear características operacionais (como a relação entre vazão, potência e ciclo de jigagem em jigues à seco, fatores ainda inexplorados em estudos observados na literatura) e investigar novas estratégias de processo, como a jigagem transiente, que forneçam indicativos sobre a possibilidade de melhoria da eficiência da jigagem a seco, aproximando da jigagem hidráulica. De modo geral, pretende-se fornecer contribuições a compreensão do fenômeno de estratificação a seco que permitam uma melhor viabilização da aplicação da técnica em rotas de beneficiamento à seco.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento tecnológico associado ao crescimento da população gera maior demanda pelos recursos minerais de vários tipos. Por essas razões urge a necessidade de desenvolver novas estratégias de processamento mineral, com vista a aprimorar a eficiência operacional das empresas mineradoras, de modo a:

- ✓ reduzir de custos de energéticos;
- ✓ aumentar da produtividade e
- ✓ aumentar de lucros e
- ✓ maximizar a responsabilidade social e ambiental.

Portanto, à medida que aumenta a demanda dos recursos minerais, os minérios de alto teor mineral tendem a diminuir, ficando parte significativa de minérios de baixo teor. De acordo com Saramak(2021), crescente o número de empresas do ramo minério está enfrentando problemas relacionados à diminuição dos teores de mineralização nos corpos de minério, devido ao esgotamento dos depósitos. Esse fato, exige o desenvolvimento de tecnologias avançadas para a concentração e pré-concentração de minérios, de modo a redução dos custos de produção e maximização dos lucros. Por conseguinte, com o decorrer do tempo vários equipamentos tradicionais, estão sendo atualizados com alta tecnologia, além de passar por modificação de configurações para atenderem esses desafios na indústria de mineração e reciclagem(COELHO; DE BRITO, 2013a; JAINSA-JOIUIELA, 2019;AMBRÓS, 2020). Por exemplo, como citado anteriormente, o jigge é um equipamento de referência, mais antigo da história mundial da mineração, mas continua sendo a força motriz atualmente, devido a sua capacidade de beneficiar altas toneladas de minérios e simplicidade na operação. Esse equipamento, tem vindo a sofrer modificações significativas.(KUMAR; KUMAR,2018;WOOLLACOTT;TRIPATHY;POTGIETER, 2021a). Apesar da jigagem da hidráulica ser mais eficiente que à jigagem a seco, sabe que os crescentes problemas ambientais causados pelo uso da água na indústria mineira têm consequências nefastas tais como:

- a) a geração de efluentes líquidos de mineração que necessita de um tratamento especial que acarreta custos avultados aos empreendimentos minérios de reparo dos passivos ambientais;
- b) contaminação do solo e lençol freático por resíduos perigosos;
- c) desastres ambientais, por exemplo, rompimento da barragem de contenção de rejeitos, caso específico, a barragem de Brumadinho em 2019;

- d) redução dos lucros do empreendimento, e conseqüente redução de recursos financeiros das empresas para atender as pautas de responsabilidade social e ambiental.

Neste contexto, o uso da jigagem a seco pode minimizar todos os impactos negativos mencionados anteriormente. Outro fato, tem que ver com a escassez de estudos específicos sobre aspectos de eficiência de separação *vs* consumo energético focados na jigagem no geral, fato que também foi considerada como uma das motivações do estudo. Portanto, com base na revisão de literatura, apenas estão disponíveis dois estudos desenvolvidos por Coelho e de Brito (2013a; 2013b), os quais indicam a ocorrência de altos custos energéticos na jigagem por via seca. Por outro lado, poucos estudos são feitos no sentido de compreender os atributos operacionais que permitam o desenvolvimento de novas de estratégias alternativas de operação de jigues a seco, que visem a melhoria da estratificação, aproximando-a aquela jigagem tradicional, a jigagem a úmido (AMBRÓS; CAZACLIU; SAMPAIO, 2016; AMBRÓS *et al.*, 2019).

Da mesma forma, a maioria dos trabalhos disponíveis se limitam a estudos de casos, fornecendo apenas informações pontuais sobre as possibilidades de melhoria do processo de jigagem à seco (SAMPAIO *et al.*, 2008; CAZACLIU *et al.*, 2014; HU *et al.*, 2019; SAMPAIO *et al.*, 2020; WASKOW *et al.*, 2020). Para além das razões citadas anteriormente, como pontos fortes que justificam a relevância deste estudo, está a proposição de uma nova estratégia de jigagem baseada em pulsos transientes.

De modo geral, o tema de pesquisa é atual e enquadra-se na agenda 2030, que preconiza o desenvolvimento sustentável e a indústria de mineração não está alheia a isso. Assim, o conhecimento específico do perfil de pulsação do ar e consumo energético relacionado com o perfil de estratificação; cinética de jigagem com base em pulsação fixa e transiente, sob diferentes condições operacionais dos jigues tem potencial de trazer grandes contribuições para a técnica de jigagem por via seca.

1.2 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- ✓ Compreender os atributos operacionais que permitam o desenvolvimento de novas de estratégias alternativas de operação de jigues a seco, que visem a melhoria da estratificação, aproximando-a aquela da jigagem a úmido.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar o perfil de pulsação da jigagem a seco com base na medição da queda de pressão do leito de jigagem em diferentes condições operacionais;
- ✓ Avaliar eficiência energética do jigue a seco através da calibração das curvas de potência útil demandada no soprador de ar do jigue e de potência útil total demandada durante a operação do jigue.
- ✓ Investigar a cinética da estratificação, tendo como base o uso de traçadores densimétricos;
- ✓ Investigar a possibilidade de melhoria do processo de estratificação em jigues a seco por meio do uso de pulsações transientes.

1.3 Pergunta de pesquisa

Quais são atributos operacionais na jigagem por via seca que possam contribuir para o desenvolvimento de novas estratégias operacionais, visando a melhoria de eficiência do processo de separação em jigues a seco?

1.4 Hipóteses de pesquisa

Com base na questão acima colocada pode se elaborar as seguintes hipóteses:

- a) HIPÓTESE 1: Atributos tais como a estabilidade da rede elétrica, perfil do ciclo de jigagem, e tempo para o alcance da operação nominal do soprador influenciam no perfil de estratificação, contribuindo para a melhoria ou prejuízo da estratificação, reduzindo ou aumentando à remistura.

No processo de jigagem, os jigues a seco incorporam características ainda desconhecidos e inexplorados quando comparadas com os jigues a úmido. Portanto, a base da hipótese acima é levantada por duas razões: a primeira, consiste na ausência de estudos sobre o ciclo de jigagem em jigues a seco, sua detecção e avaliação, e as características de operação dos sopradores que fornecem o fluxo de ar; a segunda razão origina-se das evidências originalmente apresentadas nos estudos de Coelho e De Brito (2013a; 2013b) sobre o elevado consumo energético da jigagem à seco. Os autores indicaram que à jigagem a seco incorreria na maior demanda energética em usinas de reciclagem (282,5 kWh no jigue), maior do que a demanda

do setor de britagem (252,6 kWh). Esta informação, em conjunto com a ausência de dados sobre o perfil de consumo energético de jigues, tornam a abordagem deste assunto relevante.

b) HIPÓTESE 2: Aplicação de pulsos transientes específicos, influenciam o perfil de estratificação e a cinética de estratificação, contribuindo para a melhoria ou prejuízo da estratificação em jigagem a seco, podendo se aproximar ou distanciar da jigagem convencional, a úmida.

Os “Pulsos transientes”, no presente contexto, significam a variação de um (1) dos parâmetros reguláveis do processo (vazão ou frequência) do equipamento de forma *progressiva* ou *regressiva*, enquanto uma mesma mistura de partículas de diferente densidade está sendo jiguada. A base desta hipótese está na relação entre as forças de estratificação e dispersivas, conforme definido no modelo de KING (1987), o qual considera o fluido pulsante como sendo tanto o “liberador” da energia potencial latente quanto o responsável pela remistura do leito estratificado. Deste modo, supõe-se aqui que uma regulação das condições de pulsação do leito à medida que ele se estratifica poderia, teoricamente, maximizar a ação liberadora e minimizar a ação de remistura oriundas da pulsação. Como resultado, a estratificação poderia ser mais acentuada em condições transientes específicas do que em condições fixas de pulsação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Método de jigagem: conceito e evolução

A concentração gravítica é um processo de separação de partículas baseada em diferenças de densidade, tamanho e forma manifestadas sob a ação da força de gravidade e/ou centrífugas. (SAMPAIO; TAVARES, 2005). A densidade é a principal propriedade diferenciadora entre os materiais, apesar do tamanho e a forma ter sua influência no processo de estratificação. Por isso, alguns autores definem a separação gravítica como sinônimo de separação por densidade. (GHOSH, *et al*, 2014; WILLS; FINCH, 2016; HE *et al.*, 2019). As aplicações da separação gravítica englobam diversas técnicas, incluindo a separação em meios densos, em película d'água, em sistemas oscilatórios e centrífugos, e a jigagem, respectivamente. Esta última consiste na aplicação de repetidas expansões e contrações verticais de um leito de partículas, através de movimento pulsante causado pela água ou ar, resultando na estratificação do mesmo devido a formação de camadas de densidades crescentes desde o topo até a base, as quais podem ser posteriormente separadas (SAMPAIO; TAVARES, 2005 ; SAMPAIO *et al.*, 2016).

De acordo com Lyman(1992), o método de jigagem foi descoberto por um artesão egípcio que constatou que a pilha de pedras de várias cores que havia selecionado para colocar em um piso estava sujo por lama, após uma tempestade. Em seguida, ele achou conveniente lavar as pedras com a água do leito do rio em um cesto amarrado a um mastro através de uma corda e movido verticalmente para cima e para baixo. Após a lavagem, o artesão observou uma separação estratificada de acordo com a cor de cada grupo de pedras (LYMAN, 1992).

O primeiro registro incontestável da jigagem foi fornecido por Agricola (1556), em sua famosa obra *De Re Metallica* (1556). De acordo com ele, o processamento mineral era praticado principalmente por mineiros alemães que se fixaram no reino da Hungria, no século XIII. Nessa altura, em Neusohl, nos Cárpatos (atual Banská Bystrica, na Eslováquia), existiam minas onde os veios de cobre se encontravam nas cristas e cumes das montanhas. Como é de praxe, nessa região o processo de mineração iniciava com a retirada do minério bruto na mina, e após a sua cominuição o material era colocado em calhas e deslizava por uma distância de cerca de 45 metros da mina até a planta de beneficiamento e a nomenclatura dos utensílios usados (Vide Figura 1a) e b).

As calhas terminavam em caixas perfuradas em formato de cesto retangular que permitia uma classificação preliminar do minério. O passante era coletado e submetido a sucessivos mergulhos (lavagens) em cubas com água, utilizando como suporte do leito peneiras (crivos)

de diferentes tamanhos. Ainda na figura 1 acima, é possível observar 03 estágios sucessivos de lavagens em cubas, cujo produto do 3º estágio (material denso passante no último crivo) era recolhido, seco e posteriormente fundido.

A Inglaterra foi um dos primeiros países a colocar em operação equipamentos mais familiarizados com os jigues modernos para o processamento de minerais metálicos (LYMAN, 1992). Pressupõe-se que a introdução do método de jigagem em solo inglês foi influenciada pelo alemão William Humfrey, que era ourives e representante da *Royal Mint of Elizabeth I* (Casa da Moeda Real), o qual contratou um conterrâneo seu, com alta experiência em metalurgia do ouro, chamado Christopher Schutz, que pode ter introduzido pela primeira vez o conceito moderno de jigagem (LYMAN, 1992).

Figura 1-Estágios de concentração mineral do primeiro registro do uso método de jigagem



a)

b)

A- Peneira; B-Alças; C- Cuba; D-Fundo de peneira feito de fios de ferro; E-Aro; F-Varas; G- Aros; H - Mulher sacudindo a peneira; I-Menino que lhe fornece material que requer lavagem e K-Homem com pá retirando da cuba o material que passou pela peneira.

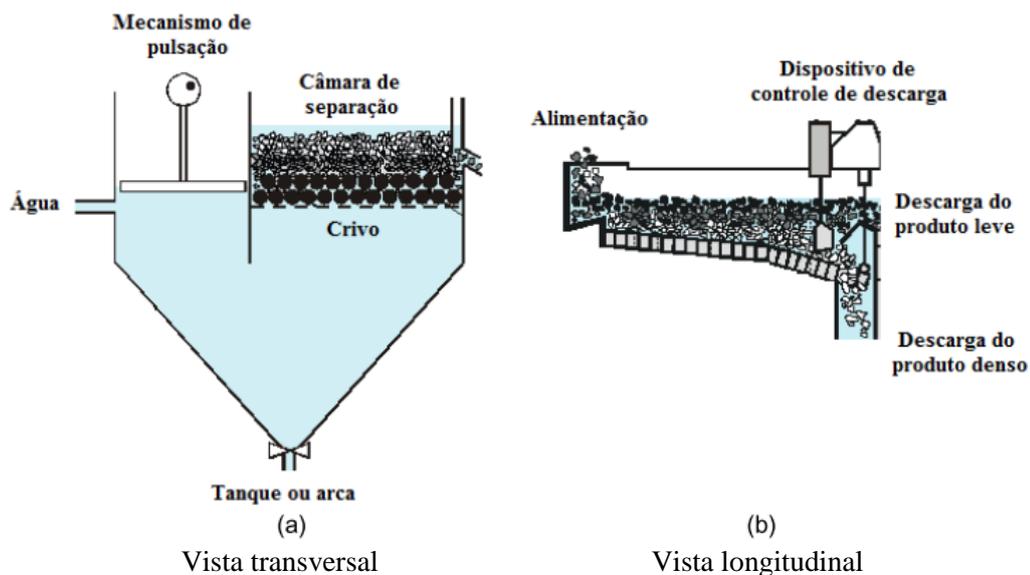
Fonte: Modificado Agricola (1556)

Após a revolução industrial e, mais intensamente a partir do início do século XX, os jigues hidráulicos de pulsação manual foram substituídos por jigues de pulsação mecânica, iniciando com os jigues de pistão e chegando até os modernos jigues pulsados à ar. O modo de operação também evoluiu à medida que se desenvolveram sistemas automáticos de separação de material

denso e de reposição de água de arca (SAMPAIO; TAVARES,2005; SAMPAIO et al., 2016; AMBRÓS,2020; WOOLLACOTT; TRIPATHY; POTGIETER, 2021a).

A configuração atual dos jigues hidráulicos consiste em um tanque dividido em duas seções, uma delas contendo uma tela de suporte (crivo), responsável pela sustentação do leito de partículas e onde ocorre a estratificação, e outra seção onde as pulsações do fluido são geradas (Figura 2) (SAMPAIO; TAVARES,2005; WOOLLACOTT; TRIPATHY; POTGIETER,2021a). A pulsação do fluido pode ser produzida de diferentes maneiras dependendo do tipo de jigue, sendo os jigues pulsados a pistão ou diafragma (selos de borracha) os mais antigos. Atualmente, sistemas pneumáticos que empregam uma câmara de ar pressurizada, que funciona como um “pistão de ar”, permitem um controle preciso do nível de água na câmara do jigue, sendo este sistema cada vez mais utilizado em jigues industriais (WOOLLACOTT; TRIPATHY; POTGIETER, 2021a).

Figura 2-Esquema básico de funcionamento de jigues



Fonte: Ambrós (2017)

No século XX, devido ao desenvolvimento da flotação e concentração magnética, o método de jigagem sofreu um relativo declínio em seu uso para produção de concentrados finais, mas apesar disso se manteve em destaque no beneficiamento mineral devido a sua relativa simplicidade, não uso de reagentes químicos, e adequação a processos com diferentes portes (RONG; LYMAN, 1992; BURT, 1999; WILLS; FINCH, 2016; SAMPAIO *et al.*, 2021).

Nas últimas décadas, a jigagem tem ultrapassado as fronteiras do beneficiamento mineral, sendo empregada no processamento de alimentos, reciclagem de resíduos sólidos e

separação de materiais particulados em geral (HUGHES; ROUX; CAMPBELL, 2019). À medida que técnicas como a classificação automática por sensores (*sensor-based sorting*) surgem como fortes competidores no beneficiamento de minerais grosseiros, novos modelos de jigues são desenvolvidos para lidar com minerais finos (como o *InLine Pressure Jig* e o jigue centrífugo) e com materiais peculiares (como os jigues RETAC e híbrido) (JAINSA-JOIUIELA, 2019; AMBRÓS, 2020). Portanto, a jigagem à seco, em especial, incorpora diversas potencialidades ainda não exploradas, destacando-se como a técnica mais consagrada de beneficiamento gravimétrico à seco.

2.2 Fundamentos da teoria de jigagem

Apesar de sua antiguidade e vasto uso, ainda não existe uma descrição teórica unificada do método de jigagem (e, menos ainda, da jigagem à seco). Todavia, existem duas correntes fundamentais que descrevem a estratificação em jigues sob diferentes pontos de vista, cada qual oferecendo significativas contribuições no entendimento do processo. Deste modo, essas teorias, a teoria fluidodinâmica clássica e da energia potencial, vem sendo estudado a longa data (MAYER,1964; SAMPAIO;TAVARES,2005; WOOLLACOTT; TRIPATHY; POTGIETER, 2021a). Essas teorias serão brevemente descritas e discutidas a seguir.

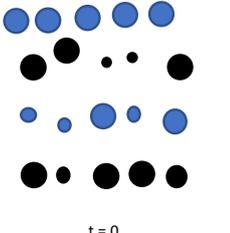
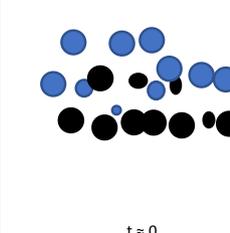
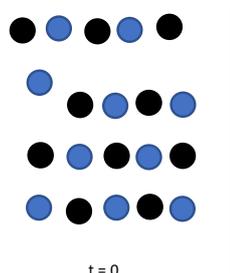
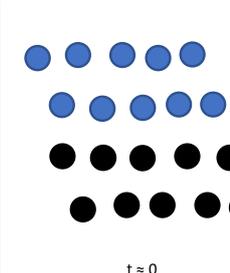
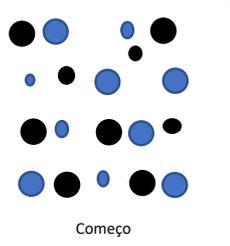
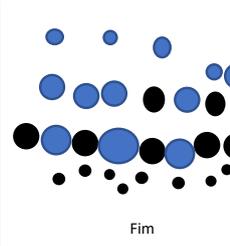
2.2.1 Teoria fluidodinâmica

Segundo Sampaio e Tavares (2005), a teoria fluidodinâmica, considera a análise do movimento de uma partícula de modo individual no leito do jigue, para depois relacionar este ao movimento de todas as partículas do sistema. Com base nessa teoria, a estratificação das partículas de diferentes densidades no leito depende do resultado da combinação de três mecanismos principais: aceleração diferencial no início da queda, sedimentação retardada diferencial e consolidação intersticial (GAUDIN,1939; CARRISSO; CHAVES,2002; SAMPAIO; TAVARES,2005; CHAVES; FILHO,2013). Estes três mecanismos e suas características estão ilustrados na Figura 3.

O mecanismo de percolação (ou consolidação) intersticial representa a tendência das partículas menores de um leito de jigagem de percolarem através dos interstícios das partículas maiores, reportando assim ao fundo do leito ou mesmo atravessando o crivo, se suficientemente finas, fenômeno este que constitui a chamada jigagem “através do crivo” (SAMPALIO; TAVARES, 2005). O autor complementa que a percolação intersticial é particularmente influenciada pela duração da fase de sucção em jigues hidráulicos, sendo tão mais intensa

quanto mais demorada for a etapa de sucção. Uma vez que em jiges a seco essa fase é quase inexistente, sua influência na estratificação pode ser considerada mínima.

Figura 3-Mecanismos de segregação de acordo com a teoria fluidodinâmica clássica

Mecanismos Atuantes	Características do movimento das partículas	
a) Aceleração diferencial no início da queda	 t = 0	 t = 0
b) Sedimentação retardada diferencial	 t = 0	 t = 0
c) Consolidação intersticial	 Começo	 Fim
		

Fonte: autoria própria

O mecanismo de aceleração diferencial inicial se relaciona ao fato que, durante os primeiros momentos da inversão do movimento das partículas que compõem o leito do jige (isto é, no interlúdio entre os pulsos, quando a partícula inverte a direção do movimento), a influência do tamanho é diminuída ou mesmo suprimida (LINS, 1998; VENKOBA RAO, 2021). Matematicamente, isto pode ser expresso da seguinte forma:

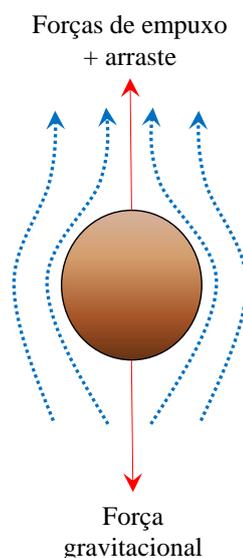
$$a = \frac{dv(0)}{dt} = \frac{2(\rho_s - \rho_f)}{2\rho_s + \rho_f} g \quad (1)$$

onde ρ_s , ρ_f , e g são a densidade da partícula, do fluido e a aceleração gravitacional,

respectivamente. A Eq (1) demonstra que a aceleração da partícula nos primeiros instantes do movimento depende apenas da diferença relativa entre sua densidade e a densidade do fluido, não sofrendo qualquer influência do tamanho. Assim, a exploração desse mecanismo permitiria, a priori, suprimir a influência do tamanho na movimentação da partícula e, portanto, na segregação em jigues. Essa hipótese costuma ser descartada no caso de jigues hidráulicos, uma vez que a influência do mecanismo de aceleração diferencial se limita a uma fração de segundo após a inversão do movimento, o que exigiria frequências de pulsação impraticáveis. Uma vez que a jigagem à seco geralmente opera com frequências maiores (centenas de ciclos por minuto versus dezenas de ciclos por minuto na jigagem hidráulica), é possível que o efeito da aceleração diferencial inicial seja mais acentuado. Todavia, ainda não existem estudos que avaliem essa possibilidade.

Dentre os três mecanismos, o mecanismo de sedimentação retardada diferencial é talvez o mecanismo mais útil para uma compreensão básica do processo de segregação em jigues. Entende-se por sedimentação “retardada” o movimento de deposição de partículas em polpas cujo teor de sólidos em volume seja maior que 15% (TAGGART,1945 ; WILLS; FINCH, 2016). Uma vez que jigues operam com leitos empacotados, as condições de sedimentação retardada prevalecem. Sob condições idealizadas, a velocidade terminal de sedimentação retardada de uma partícula pode ser calculada mediante o balanço das forças principais que atuam sobre a mesma em um leito de jigagem (Figura 4), isto é: a força gravitacional, de empuxo e de arraste (AMBRÓS, 2020).

Figura 4-Balanços das forças que atuam na partícula em meio fluido



Fonte: adaptado de Ambrós (2020)

A força de arraste depende da viscosidade do fluido, o qual, por sua vez, é função do regime de escoamento (número de Reynolds) da partícula no fluido. Considerando que a jigagem é geralmente praticada com partículas grosseiras, pode-se admitir que o regime de Newton é predominante. Nesse caso, a velocidade terminal é dada por:

$$V = \frac{3gd(\rho_s - \rho_p)}{\rho_p} \quad (2)$$

Onde d é o diâmetro da partícula (considerada esférica) e ρ_p é a densidade do meio. A Eq. (2) expressa que o movimento da partícula depende de dois fatores principais: seu tamanho e a relação entre sua densidade e a densidade do meio em que se encontra. Deste modo, pode-se inferir que, em uma mistura de partículas leves e densas de diferentes tamanhos, as partículas grosseiras leves e finas densas em faixas de tamanho específicas poderão possuir velocidades terminais similares. Essa sobreposição de influências entre tamanho e densidade pode ser mensurada por meio da comparação das velocidades terminais das partículas leves e densas em um certo sistema. Desta forma, se considerarmos duas partículas minerais de densidades *leve* – ρ_a e *denso* – ρ_b e diâmetros *leve* – d_a e *denso* – d_b , respectivamente, caindo em um fluido de densidade ρ_f , é possível estimar o tamanho mínimo de partícula a partir do qual a partícula leve possui a mesma velocidade terminal da partícula densa. Assim, igualando as equações de velocidade terminal no regime de Newton (Eq. 2) para ambas as partículas, tem-se o seguinte:

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right)^{n=1} \quad (3)$$

onde d_a ; d_b ; ρ_b , ρ_a e ρ_f , são diâmetro/tamanho partículas leves; diâmetro/tamanho de partículas densas; densidade de partícula densa; densidade leve e densidade aparente da polpa ou fluido, respectivamente.

A qual é conhecida como “razão de sedimentação”, uma vez que fornece a razão de tamanhos entre partículas de diferentes densidades com a mesma velocidade terminal. O expoente $n = 1$ foi incluído porque o mesmo é válido apenas para o regime de Newton, sendo que $n = 0,5$ para o regime de Stokes e $0,5 \leq n \leq 1$ em regime intermediário (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Segundo Wills e Finch (2016), a Eq. 3, também chamada de critério de concentração (CC), oferece uma perspectiva preliminar da facilidade de separação gravimétrica de certo grupo de partículas. Ainda, permite concluir que quanto mais próxima for a densidade do fluido da densidade da partícula leve, tanto maior será o valor de CC e a facilidade de separação por densidade. Uma vez que o ar possui densidade várias ordens de grandeza menor que a água ($1,2 \text{ kg/m}^3$ versus 1000 kg/m^3), o valor de CC é sempre menor na jigagem à seco em comparação com a jigagem hidráulica de uma mesma mistura.

Na prática, a teoria fluidodinâmica clássica fornece apenas indicativos qualitativos sobre os fenômenos que ocorrem durante a jigagem. O critério de concentração é possivelmente sua principal contribuição, e mesmo assim fornece apenas uma medida bastante preliminar sobre a possibilidade de aplicação da separação gravimétrica, uma vez que não considera a presença de mistos e o formato de partícula. No caso da jigagem à seco, os valores obtidos de CC tendem a subestimar a real capacidade de separação do processo. Sampaio et al. (2016) e Waskow *et al.*, (2020), mostram ser possível separar por meio de jigagem à seco e com relativa eficiência misturas polidispersas de concreto e cerâmicos com valores de $CC \approx 1$, ao passo que Sampaio e Tavares (2005), indicam que valores de $CC < 1,2$ podem inviabilizar mesmo a separação hidráulica em certos casos.

2.2.2 Teoria de Energia potencial

O modelo termodinâmico relaciona o processo de estratificação do leito de jigagem com a variação da energia global do sistema durante o processo. De acordo com Mayer (1964), a causa física da estratificação não se fundamenta na energia fornecida pelos movimentos de pulsação do jigues, mas sim na redução da energia potencial gravitacional, a qual é liberada durante o processo de abertura do leito. O autor cita que, o leito de jigagem pode ser visto como um sistema mecânico móvel, que tende a se direcionar para um estado de mais baixa energia potencial à medida que se move, resultando na diminuição do centro de massa do leito estratificado.

A Figura 5 ilustra o processo de estratificação em jigues conforme entendido pela teoria da energia potencial (Mayer, 1964), mostrando os estados do leito antes (I) e após (II) a estratificação. O centro de gravidade (SI) da posição do leito de partículas não estratificadas, considerando uma mistura perfeita, fica na metade da altura do leito ($\frac{H}{2}$), constituído por dois grupos de materiais que representa pesos diferentes ($m_l \cdot g + m_d \cdot g$), onde m_l , m_d e g , são as massas do componente leve e denso contida na mistura, respectivamente. Após o processo de jigagem, formam-se duas camadas de material leve por cima e pesado abaixo cada um com

seus próprios centros de gravidade (S_l e S_d , respectivamente), resultando em um rebaixamento do centro de gravidade do estado (I) para o estado (II). A energia potencial do estado (I) é dada por:

$$E_I = \frac{H}{2}(m_l + m_d)g \quad (4)$$

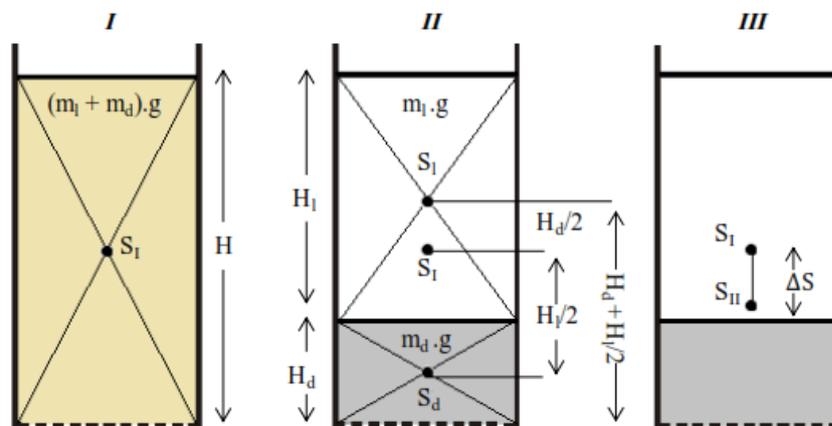
Após a estratificação, ocorre uma redução do conteúdo energético. Assim, a sua energia potencial gravitacional é dada por:

$$E_{II} = m_l \cdot g \cdot \left(\frac{H_l}{2} + H_d \right) + m_d \cdot g \cdot \frac{H_d}{2} \quad (5)$$

A diferença de energia potencial entre os estados estratificado (II) e misturado, que é a força motriz por trás do processo de estratificação, é dada por:

$$\Delta E = E_I - E_{II} = \frac{1}{2} (m_d \cdot g \cdot H_l - m_l \cdot g \cdot H_d) \quad (6)$$

Figura 5-Posição do centro de gravidade em uma mistura binária de partículas com diferentes densidades



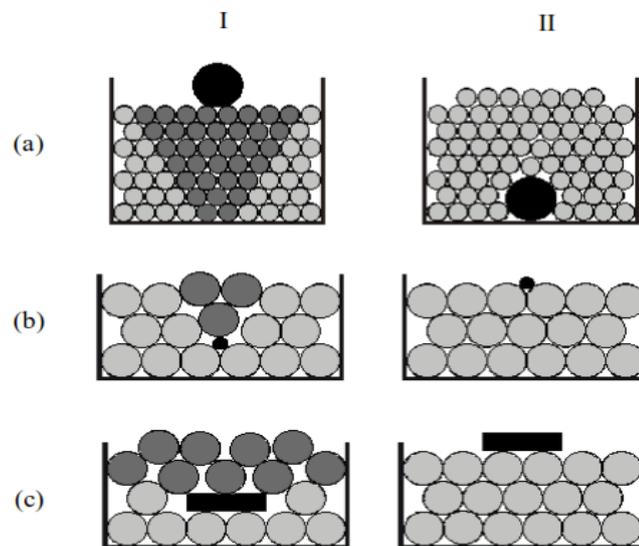
I- Mistura homogênea; II-estratificação perfeita e o último; III-rebaixamento do centro de gravidade

Fonte: Adaptado de Mayer; Sampaio, Tavares; Ambrós(1964; 2005; 2017)

Conforme explicado por Mayer (1964), o rebaixamento do centro de gravidade resultante da estratificação está relacionado ao maior empacotamento do leito à medida que o processo de jigagem progride. Portanto, como o empacotamento não depende apenas da densidade, mas também do tamanho e geometria das partículas, alguma estratificação também

deverá ocorrer em função de diferenças dessas propriedades. Por exemplo, imaginemos uma partícula grossa localizada sobre a superfície de um leito formado por partículas finas tende a afundar à medida que as pulsações do leito ocorrem. Esse fenômeno ocorre, porque a partícula grosseira tem uma maior densidade de compactação do que o conjunto de partículas finas ocupando o mesmo volume conforme a Figura 6a. Em outra situação a figura 6b, considerando uma partícula fina contida no interior de um leito de partículas grosseiras, a partícula fina tenderia a ascender continuamente no leito até ser expulsa do meio, uma vez que o distúrbio causado pela sua presença geraria uma zona de baixo empacotamento no interior do leito.(AMBRÓS; CAZACLIU;SAMPAIO, 2016;AMBRÓS, 2017). De modo análogo, Figura 6c, a presença de uma partícula com geometria tabular em um leito de partículas esféricas causaria um distúrbio no empacotamento, devido ao aumento do número de espaços vazios ao longo do leito, após alguns ciclos de jigagem. Neste contexto, esta partícula seria deslocada para o topo do leito, minimizando, assim a energia total do sistema.

Figura 6-Segregação de partículas intrusas com diferentes propriedades em relação ao leito que as contém



(a) Partícula grosseira em um leito de miúdos;(b) partícula miúda em um leito de grosseiros; (c) partícula tabular em um leito de partículas esféricas.

Fonte: Adaptado de Sampaio; Tavares (2005)

Tavares(1999), desenvolveu um procedimento que utiliza a técnica de Monte Carlo e baseando-se no princípio de Mayer, através da simulação do processo de jigagem de misturas usando duas variáveis independentes tais como densidade e tamanho. Os resultados permitem verificar que, quando partículas de diferentes tamanhos e densidades encontram-se no leito, a condição de menor energia potencial gravitacional do leito nem sempre coincide com a

estratificação perfeita com relação à densidade, alguma remistura entre minerais de diferentes densidades inevitavelmente ocorre (TAVARES, 1999; SAMPAIO ;TAVARES, 2005). Por sua vez Woollacott e Silwamba(2016), observaram o mesmo fenômeno, apesar de o leito ter partículas de tamanho e geometria uniformes.

Uma situação simples, que ilustra o conceito de estratificação de equilíbrio, envolve um leito com dois tipos de partículas de mesmo tamanho e densidades diferentes submetidas ao processo de jigagem, e cujo padrão de estratificação de equilíbrio consistirá em uma camada de partículas densas abaixo e partículas mais leves acima, com uma região intermediária difusa na qual a concentração muda rapidamente, mas não repentinamente de um tipo para o outro (ao contrário da estratificação perfeita previsto no modelo original de Mayer).

A fim de levar em conta esta imperfeição, King (1987) expandiu o modelo original de Mayer (1964), incluindo a influência de forças dispersivas que contrapõem as força motriz de estratificação. Num outro estudo similar Tavares e King (1995), consideram um leito compactado de partículas esféricas de tamanho único cujas densidades variam em uma ampla faixa. O gradiente de energia potencial causada por uma partícula de densidade ρ em um leito de partículas com densidade média $\bar{\rho}$ é dada pela Eq.7:

$$\frac{dU}{dH} = V_{\rho} g(\rho - \bar{\rho}) \quad (7)$$

onde V_{ρ} é o volume da partícula, U é a energia potencial gravitacional, H é a altura da partícula no leito medida a partir do crivo do leito. O sinal da partícula($\rho - \bar{\rho}$), define o movimento vertical de qualquer partícula de volume V_{ρ} no leito, se ela deslocará para cima ou para baixo dependendo do valor da densidade média ($\bar{\rho}$) das partículas circundantes. A densidade média das partículas, $\bar{\rho}$, na altura H é dada pela Eq.8:

$$\bar{\rho} = \int_0^{\infty} \rho C_{\rho} d\rho \quad (8)$$

onde C_{ρ} , é a concentração volumétrica de partículas dentro da fase sólida com densidade ρ na altura H . O gradiente de energia potencial faz com que uma partícula migre para cima ou para baixo no leito irregular, dependendo do sinal de ($\rho - \bar{\rho}$). Se ($\rho > \bar{\rho}$), a partícula se moverá para baixo e se ($\bar{\rho} < \rho$), a partícula moverá para cima. A taxa na qual as partículas se movem

em relação ao leito é proporcional ao gradiente de energia potencial, de modo que o fluxo de partículas de densidade ρ , devido ao gradiente de energia potencial é dada pela Eq.9:

$$n_s = -u C_\rho \frac{dU}{dH} \quad (9)$$

Onde n_s é o fluxo de estratificação e u é a mobilidade específica da partícula que é definida como a velocidade de penetração alcançada por uma partícula na ausência de quaisquer forças dispersivas sob um gradiente de energia potencial unitário. Tavares e King (1995) elucidaram esse conceito a partir de um exemplo específico, considerando a razão da velocidade média relativa de duas partículas esféricas de densidades diferentes, densa=4.610kg/m³ e leve=2.700kg/m³, respectivamente. Nesse cenário, a partícula densa afundaria no leito do jigue 1.000 vezes mais rápido do que a partícula leve. Reorganizando a equação, substituindo (7) em (9), tem-se o *fluxo de estratificação*, dada pela Eq.10:

$$n_s = u C_\rho V_\rho g(\rho - \bar{\rho}) \quad (10)$$

Em oposição ao fluxo de estratificação, existe o fluxo difusivo devido às interações partícula-partícula e partícula-fluido. É descrito por uma equação do tipo Fickiana, o qual é dada pela Eq.11:

$$n_D = -D \frac{dC_p}{dH} \quad (11)$$

Onde n_D é o fluxo difusivo (m³/m².s), D é o coeficiente de difusividade, tal qual o adotado na Lei de Fick, conforme Ghajar e Çengel (2015) e que depende do tamanho e forma da partícula, bem como do mecanismo de expansão do leito(DONG *et al.*, 2021).

De acordo com o Tavares e King (1995), o perfil de estratificação de Mayer ideal que minimiza a energia potencial do leito nunca é alcançado na prática, mas é atingido um equilíbrio de equilíbrio dinâmico do leito que é estabelecido quando o fluxo de estratificação para cada tipo de partícula for exatamente balanceado pelo fluxo difusivo correspondente. Essa condição é atingida quando o fluxo difusivo é igual ao fluxo de estratificação, conforme a Eq.12:

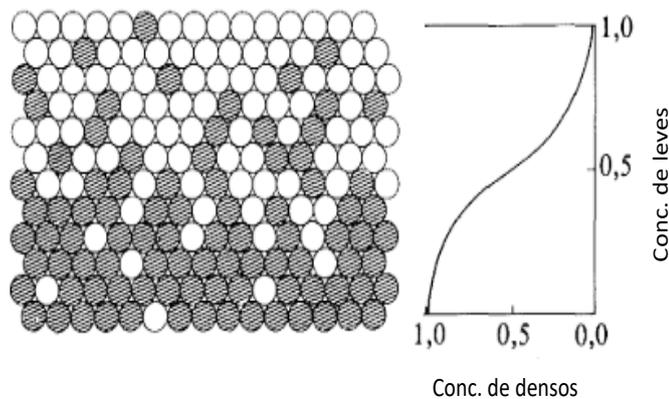
$$n_D = -n_s \quad (12)$$

A equação 12, também pode ser descrita pela Eq. 13:

$$\frac{dU}{dH} = -\frac{uV_p g}{D} C_p (\rho - \bar{\rho}) \quad (13)$$

Portanto, pode se concluir que à medida que a pulsação do leito evolui, um estado de equilíbrio entre o fluxo de estratificação e de dispersão tende a ser alcançado, correspondendo a estratificação de equilíbrio do sistema, conforme se observa na Figura 7.

Figura 7-Perfil de estratificação de equilíbrio para leito com partículas de diferentes densidades e tamanho uniforme



Fonte: King (1987)

De acordo com Sampaio e Tavares (2005), desde sua introdução, o modelo de dispersão, como ficou conhecido o modelo de King e tem sido considerado o estado da arte no âmbito do entendimento teórico da jigagem. Uma validação do mesmo foi efetuada por Tavares e King (1995) para misturas multicomponentes de carvões (diversas densidades), de tamanho uniforme, e sob jigagem contínua e descontínua. Além de validar o modelo, a ideia do estudo foi oferecer um método mais direto de avaliação da eficiência de jigues do que as tradicionais curvas de partição. Para isso, esses autores propuseram um índice específico de estratificação, que representa a razão entre as forças de estratificação e dispersivas, dada pela Eq. 14:

$$\alpha = \frac{uV_p g H_b}{D} \quad (14)$$

Portanto, o índice estratificação específica (α), quantifica a atuação de estratificação do jigue e conforme a equação é independente da densidade de partículas. Em um leito de

partículas de tamanho único com formas semelhantes, todas as partículas têm o mesmo valor de α . O índice de estratificação é calculado, em função da altura relativa do leito $h = H/H_b$, onde H_b é a profundidade total do leito.

Posteriormente, Tavares (1999), utilizando a técnica de Monte Carlo para simular diversos leitos de jigagem de tamanho único e densidades variáveis, obteve resultados idênticos aqueles observados por King(1987) e Tavares e King (1995). Embora com ressalvas para sistemas contendo muitas partículas com densidades diferentes, o estudo independente devolvido por Woollacott; Bwalya e Mabokela(2015), também ratificou a capacidade do modelo de dispersão em estimar o perfil de estratificação em equilíbrio e assim prever o teor e a recuperação de produtos para uma determinada altura de corte.

Os estudos anteriormente mencionados ignoraram o efeito de diferenças de tamanho sobre o modelo de dispersão. Por sua vez outros autores incorporam a segregação por tamanho e constataram resultados conflitantes que têm sido observados na literatura. Rao (2007), no seu estudo incluiu o efeito da segregação por tamanho ao modelo de King, posteriormente validando esse modelo expandido (RAO *et al.*, 2017). Em contraposição, o estudo de Woollacott (2018) sugeriu, ao contrário da posição assumido pelo próprio King (1987), o modelo de dispersão não é significativamente afetado pelo tamanho de partícula, sendo, portanto, mais versátil do que se pressupõe e colocando assim em causa o modelo de dispersão estendido, que inclui a segregação por tamanho, proposto por Rao (2007).

Num outro estudo relacionado Woollacott(2019), vai além e contesta a capacidade da própria teoria termodinâmica em descrever a estratificação por tamanho em jiges. Valendo-se de dados de tomografia de raios-X de leitos estratificados de esferas de vidro, os resultados de seu estudo demonstraram que, em certas circunstâncias, a energia potencial do leito não diminui, mas sim aumenta em decorrência da estratificação por tamanho, podendo também permanecer aproximadamente constante para misturas de diversos tamanhos. Estes resultados, apontaram para a necessidade de uma nova concepção sobre o processo de segregação por tamanho em jiges, contudo não corroboram com os estudos de desenvolvidos por Rao *et al.*, 2017). Rao (2021) em seu comentário a respeito ao estudo de Woollacott(2019), afirmou que este contém limitações e vieses, sendo a principal delas, o uso de faixas de tamanho restritas, muito próximas, e não representativas da alimentação típica de jiges industriais¹. Tendo em conta as dúvidas existentes quanto a validade do modelo termodinâmico no que diz respeito à estratificação por tamanho em jiges. Em outro estudo Woollacott (2022) reexaminou a base

¹ Informação fornecida pelo professor Doutor B. Venkoba Rao, num comentário na página de revista da *Minerals*, disponível em: www.mdpi.com/2075-163X/10/11/998#

conceitual do modelo de dispersão, afirmando que, embora a segregação por densidade de fato resulte em uma redução na energia potencial do sistema, o mesmo não ocorre para segregação por tamanho. Neste âmbito, ele propõe sua versão estendida do modelo de King baseando-se nas diferenças entre velocidades terminais de partículas com diferentes tamanhos. Contudo, o próprio autor indica que seu modelo se vale de diversos pressupostos arbitrários, de modo que, para todos os efeitos, a capacidade dos modelos termodinâmicos em prever a estratificação por tamanho em jigsaw permanece em aberto. De acordo com Ambrós (2020), o modelo de King é incapaz de estabelecer uma ligação com parâmetros operacionais de jigsaw, como frequência e amplitude de pulsação do leito, que sem dúvida influenciam no resultado da estratificação. Portanto, esse modelo, a semelhança a teoria original de Mayer, limita-se apenas a prever a estratificação de equilíbrio e não constitui um modelo cinético de jigsaw.

Wollacott *et al.*, (2021a; 2021b) abordaram esta questão, testando leitos com variadas propriedades (densidade, tamanho e proporção) e diversas condições operacionais (amplitude, frequência de pulsação, tempo de jigsaw, forma do ciclo e tempo de abertura de válvulas). Sua inusitada conclusão foi que o perfil de estratificação de equilíbrio é *independente* das condições operacionais de jigsaw (desde que promovam um movimento mínimo do leito), sendo influenciado apenas pelas propriedades dos materiais que compõem a mistura (densidade, tamanho, forma e proporção). Assim, as condições de pulsação do leito afetariam apenas a cinética de estratificação (descrita segundo uma função exponencial pelo autor), mas não a estratificação inerentemente possível de ser obtida. Os recentes desenvolvimentos relacionados ao modelo termodinâmico da jigsaw indicam que o mesmo está longe de ser definitivo, além de reiterarem a natureza complexa do processo de estratificação em jigsaw.

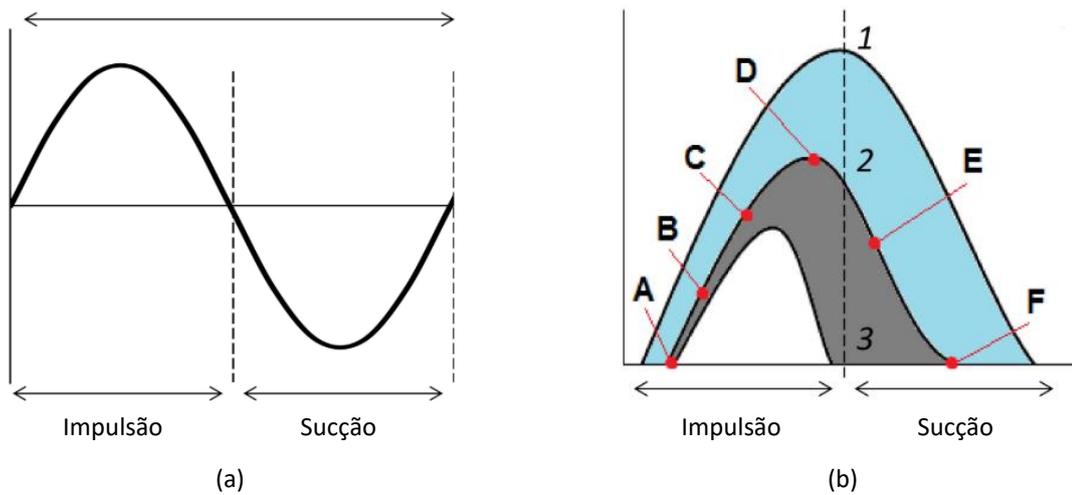
2.2.3 Pulsação do leito

Os modelos teóricos da jigsaw anteriormente discutidos dedicam grande esforço à compreensão do fenômeno de estratificação do leito de jigsaw, mas pouco abordam o papel do fluido pulsante no processo. A jigsaw pode ser aproximada como um processo de fluidização do leito realizada em ciclos (AMBRÓS, 2020). De acordo com Sampaio e Tavares (2005) ; Alarcón e Rúa (2015), o ciclo de jigsaw mais comum tem a forma de uma onda senoidal modulada, conforme ilustra a Figura 8, cuja amplitude e frequência determinam a velocidade de pulsação do fluido, dada pela Eq.15:

$$U(t) = \pi f A \sin(2\pi f t) \quad (15)$$

Onde U é a velocidade superficial do fluido (água ou ar), f a frequência do pulso e A a amplitude do pulso. $U_{max} = \pi f A$ representa a velocidade máxima do fluido. Embora seja o mais ilustrativo, o ciclo senoidal é apenas um dentre vários tipos de ciclos, sendo o trapezoidal e os ciclos tipo dente-de-serra também bastante comuns (AMBRÓS, 2020).

Figura 8-Representação da (a) velocidade do fluido e (b) deslocamento do fluido do leito ao longo de um ciclo de pulsação senoidal em um jigue



Fonte: Modificado do Ambrós (2020).

Para que o leito se movimente, é necessário que o fluido pulsante o atravessasse com uma velocidade suficiente para abrir o leito (aumentar sua porosidade), permitindo assim a manifestação dos mecanismos que resultam em sua segregação. A velocidade mínima de fluidização é dada em função de regime de escoamento e de queda de pressão causada pela passagem do fluido pelo leito de partículas. O regime de escoamento pode ser determinado através do número de Reynolds para leitos empacotados pela expressão seguinte:

$$Re = \frac{U_f \rho_f d_p}{\mu(1 - \varepsilon)} \quad (16)$$

onde U_f , ρ_f , μ , ε e d_p são a velocidade superficial, densidade do fluido, viscosidade do fluido, porosidade do leito e diâmetro médio das partículas do leito, respectivamente, para o caso de partículas esféricas. A equação (16) é funcional quando há passagem de fluido pelo leito estático e não ocorre nenhuma fluidização das partículas do leito. Quanto a queda de pressão, a mesma pode ser descrita pela equação de Carman-Kozeny (SMITH, 1980;

MAURAN; RIGAUD; COUDEVYLLE,2001; AMBRÓS,2020;TASHAKORI-ASFESTANI *et al.*, 2023). Assim, para o caso de fluxo laminar ($Re < 2000$, correspondendo ao início do processo de elevação do leito):

$$\frac{-\Delta p}{h} = \frac{-180\mu(1 - \varepsilon)^2}{d^2\varepsilon^3} U_f \quad (17)$$

onde h é a altura do leito. Desta forma, quando maior for a altura do leito, maior é a queda de pressão. A velocidade mínima de fluidização ocorre quando a força de arrasto (representada pela queda de pressão) é igual força de peso aparente do leito:

$$-\Delta P = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f)hg \quad (18)$$

onde, ρ_s e ρ_f são as densidades dos sólidos que compõem o leito e do meio fluido respectivamente, e g é a aceleração da gravidade ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$). A expressão contida no segundo termo da equação representa a força de gravidade aparente por unidade de área do leito (kN/m^2). Ao substituir a equação (17) na equação (18) pela velocidade mínima de fluidização, obtém-se à Eq.19:

$$U_{f,min} = \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \frac{(\rho_s - \rho_f)gd_p^2}{180\mu} \quad (19)$$

Se relacionarmos a equação (19) com a vazão, considerando $Q_{f,min} = U_{f,min} \times A$, teremos a vazão mínima ($Q_{f,min}$):

$$Q_{f,min} = \frac{\varepsilon A}{(1 - \varepsilon)} \frac{(\rho_s - \rho_f)gd_p^2}{180\mu} \quad (20)$$

Onde A é a área da seção transversal do leito do jig. A equação (20) permite observar que a vazão mínima de para elevação do leito será tanto maior quanto menor for a densidade e viscosidade do fluido.

Conforme inicia a elevação do leito, o mesmo tende a se movimentar, por alguns instantes (frações de segundo), como um bloco único (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Em seguida, tem início o movimento individual de partículas, o qual depende da ação conjunta das

interações partícula-partícula e partícula-fluido. Essas interações ocorrem a medida que $Q_f > Q_{f,min}$ e imediatamente após o pico de velocidade do fluido, ponto a partir do qual o leito tende a retornar ao estado de repouso, reiniciando assim um novo ciclo, já ilustrado pela Figura 7, anteriormente.

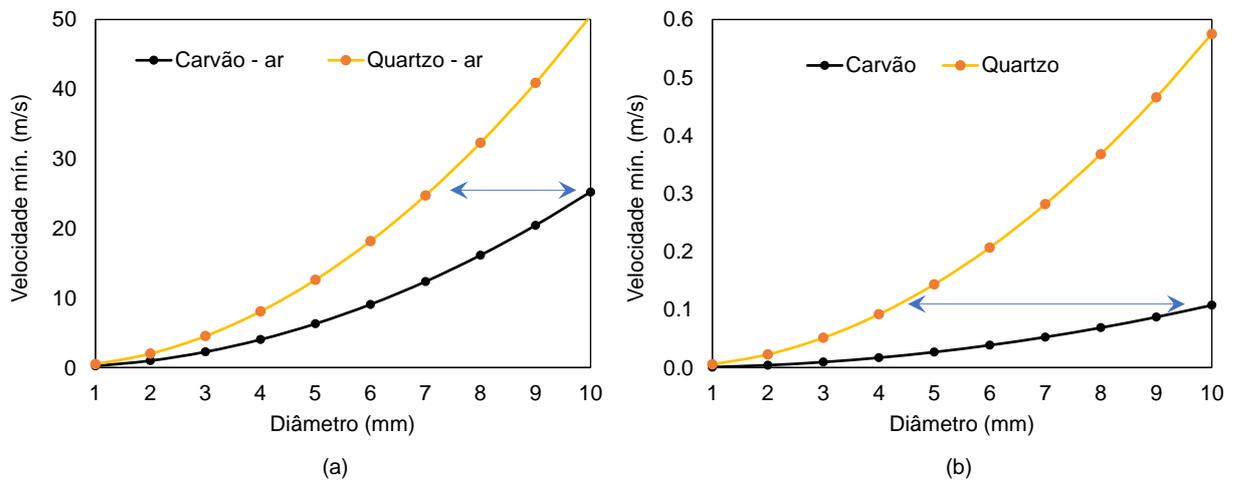
2.2.4 Particularidades da jigagem a seco

Os jiges à seco possuem características construtivas e operacionais únicas, as quais podem afetar sua dinâmica de estratificação quando comparado a jiges hidráulicos. A mais óbvia delas está relacionada ao uso de ar ao invés de água como fluido pulsante, o que afeta diretamente a separação por densidade. A título de exemplo, se considerarmos a separação de carvão ($\rho_s = 1,3 \text{ g/cm}^3$) e quartzo ($\rho_s = 2,6 \text{ g/cm}^3$) grosseiros, os valores de CC^2 (eq. 3) em água e ar seriam de 5,33 e 2, respectivamente, indicando uma dificuldade claramente maior de separação no último caso. Vale citar, nesse sentido, que os valores de CC muitas vezes subestimam a capacidade de separação em jiges, inclusive no processo a seco. Waskow *et al.* (2020) e Sampaio *et al.* (2021), por exemplo, tiveram bons resultados na separação em jiges a seco de resíduos de construção e demolição (concreto e cerâmicos) mesmo para valores de CC bem abaixo de 1,25. Os autores sugerem que a densidade de empacotamento, influenciada pela geometria de partículas, pode ser um fator decisivo que contribuiu para a separação.

O fato de a densidade do ar ser centenas de vezes menor que a da água resulta na necessidade de se utilizar altas velocidades para movimentação do leito. Conforme ilustra a Figura 9(a), a fluidização a seco de leitos de carvão exige velocidades até 240 vezes maiores do que na fluidização hidráulica (Figura 9.b). Pode-se observar também que a fluidização em ar exige separações em intervalos mais estreitos de tamanho para um desempenho similar ao da separação em água. Ressalta-se que as curvas de velocidade de fluidização exibidas na Figura 9 e calculadas conforme a Equação (19) consideram um regime laminar de escoamento, o que provavelmente não é o caso na jigagem a seco. Na prática, o leito de jigagem é composto por materiais de formato irregular, gerando distorções no empacotamento que podem dar origem a caminhos preferenciais da corrente de ar e curtos-circuitos. Todos esses fatores contribuem para uma dinâmica de pulsação mais turbulenta e tornam a manutenção de uma pulsação uniforme do leito um desafio muito maior do que na jigagem hidráulica tradicional.

² Critério de concentração

Figura 9-Velocidade mínima de fluidização de carvão (1300 kg/m³) e quartzo (2600 kg/m³) calculadas segundo a Equação (1) para diferentes diâmetros de partícula



- (a) Fluidização em ar ($\mu = 1,85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$); (b) Fluidização em água ($\mu = 1,0 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$). O cálculo foi feito considerando leito de partículas esféricas com porosidade de 0,35. A seta azul relaciona o diâmetro equivalente do leito de quartzo com velocidade mínima de fluidização igual a um leito de carvão de 10 mm.

Fonte: autoria própria

A injeção de um fluxo ascendente contínuo de ar, sobreposto ao fluxo pulsante que movimenta o leito, é uma estratégia usada por fabricantes que visa minimizar a influência de curtos-circuitos decorrentes do empacotamento do material (WEINSTEIN; SNOBY,2007). Esse fluxo, de menor magnitude que o pulsante, visa abrir o leito, aumentando assim sua porosidade e facilitando a distribuição do pulso de ar. Além disso, esse fluxo permanente de ar implica que o fluido está ininterruptamente injetando energia cinética no sistema, o que do ponto de vista do modelo de dispersão da jigagem, pode auxiliar na remistura do leito estratificado.

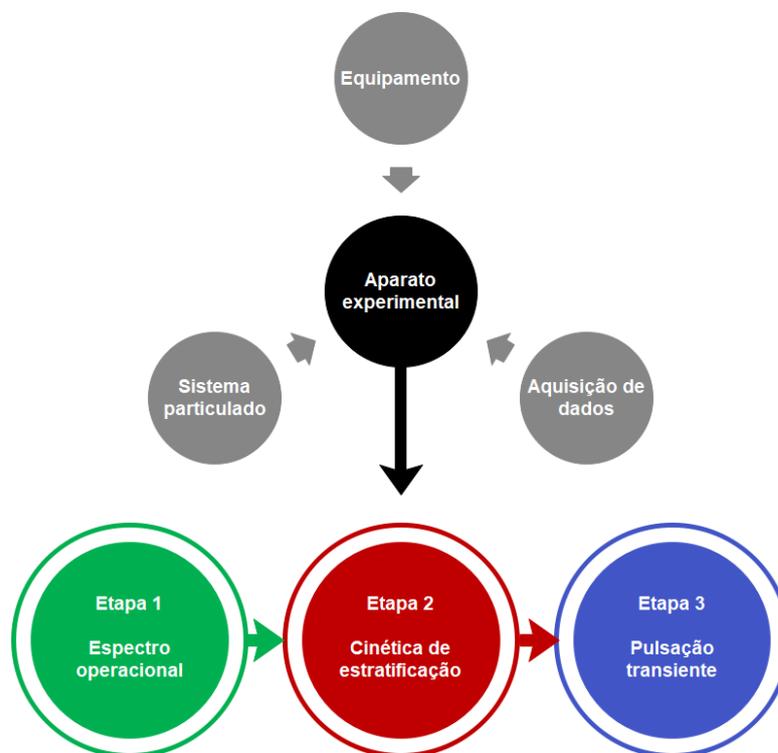
Outro fator diferencial é o fato de não existir uma fase de sucção aparente na jigagem a seco, uma vez que o pulso de ar, ao contrário da água, não possui fluxo de retorno após a passagem pelo jig. No contexto da teoria hidrodinâmica clássica, isso permite inferir que o mecanismo de percolação intersticial possui menor influência, e a segregação em jigues a seco tende a ser mais direta, isto é, as partículas finas tendem a se concentrar com as leves, conforme definido por Sampaio e Tavares (2005). Essa tendência foi também observada experimentalmente por Ambrós *et al.*, (2019). Finalmente, conforme apontado por Ambrós (2017), assim como na jigagem hidráulica, a jigagem a seco está sujeita a influência de correntes convectivas que dão origem a um padrão horizontal de estratificação do leito, podendo contribuir para a remistura do mesmo. Essas correntes convectivas são proporcionais a

dinâmica de movimentação do leito (amplitude e frequência de pulsação), a qual, conforme referenciado anteriormente, é mais turbulenta na jigagem a seco. O fenômeno de convecção granular pode estar relacionado as forças de remistura definidas no modelo de King (1987), embora seja necessária uma melhor compreensão de seus mecanismos para sua eventual incorporação aos atuais modelos de descrição da jigagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desdobramento desta investigação tomou como base o plano de trabalho, a figura 10, mostra as etapas principais do plano de estudo que inicialmente, focou na preparação do sistema do experimento, planejamento dos procedimentos experimentais, coleta, tratamento de dados. Posteriormente, ensaios direcionados foram realizados a fim de atender os objetivos específicos do estudo. As seções seguintes descrevem cada etapa em detalhes.

Figura 10-Esquema geral das etapas envolvidas no estudo



Fonte: autoria própria

3.1 Equipamento

Os testes foram realizados em um jigue a seco de escala piloto e operação em batelada, modelo *AllAir S-500* da fabricante *allmineral* (Figura 11), localizado no Laboratório de Processamento Mineral da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPROM/UFRGS). O jigue é composto por uma câmara formada por quadros sobrepostos de *plexiglass* e montada sobre um crivo de 1 mm de abertura, através do qual um fluxo ascendente de ar atravessa a câmara de separação. Portanto, durante os ensaios amostras de minérios ou de materiais particulados em geral, com granulometria de, + 1 mm, são posicionadas dentro da câmara e

submetidas ao fluxo pulsante de ar por tempo definido, sendo a intensidade e frequência do pulso reguladas em um painel de controle.

Figura 11-(a) foto do jigge a seco a ser utilizado nos ensaios; (b) componentes principais: painel de controle (1), válvula de ar (2), câmara de separação (3) e duto de sucção de poeira para filtro manga(4)



Fonte: autoria própria

A injeção de ar no jigge é feita por meio de um soprador centrífugo modelo COMBIMAC[®]49631/B1Y1 de 15 kW, com pressão de saída de até 6 kPa. Antes de atravessar a câmara de contendo o leito particulado, o ar passa por um duto metálico circular que possui uma conexão dupla em formato “Y” que divide o fluxo em duas correntes, uma contínua e outra descontínua. A corrente de ar contínua tem a finalidade de promover a expansão preliminar do leito a fim de minimizar a formação de “curtos-circuitos” e garantir uma expansão do leito tão uniforme quanto possível durante as pulsações. A corrente de ar descontínua, por sua vez, é controlada pela atuação de uma válvula borboleta, na qual os ciclos de abertura e fechamento permitem a geração de pulsos de ar com frequências de até 6,6 Hz (AMBRÓS, 2017).

O fluxo de ar é ajustado no painel de controle em termos da porcentagem da rotação máxima do ventilador, no intervalo de 0 a 100%, não sendo, portanto, de conhecimento direto. A frequência de pulsação é regulada em função da frequência de rotação da válvula borboleta, podendo variar no intervalo de 0 a 400 CPM (ciclos por minutos). 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 contido na câmara do jigge.

A câmara de separação é a parte principal do jigge, uma vez que é o local onde ocorre o processo de estratificação do leito. Ela é composta por 14 compartimentos quadrangulares de

plexiglass (acrílico de alta resistência) sobrepostos um sobre os outros. Destes, oito compartimentos possuem dimensões de (530 x 530 x 50) mm, enquanto outros seis são de menor espessura e possuem dimensões de (530 x 530 x 25) mm. Após os ensaios, o fluxo de ar é interrompido, a pulsação do leito é suspensa, e cada compartimento pode ser removido individualmente, permitindo a coleta e análise isolada de fatias (estratos) verticais do leito estratificado. Essa análise é fundamental em estudos de jigagem, pois a partir dela é possível determinar a distribuição diferencial de materiais ao longo dos estratos e assim medir o nível de estratificação do leito resultante do processo. Quando a separação por densidade é o alvo (maior parte dos casos), as frações contidas em cada estrato são separadas manualmente e individualmente pesadas e ponderadas. Se por acaso a separação por tamanho for objeto de análise, então é possível peneirar o conteúdo dos estratos a fim de avaliar sua distribuição granulométrica.

Ressalta-se que o processo de fatiamento do leito em jigsawes descontínuos (presente caso) gera distúrbios na posição das partículas próximas a interface entre dois estratos. Conforme indicado por Ambrós (2017), esses distúrbios podem resultar em erros de até 9,1% na composição dos produtos do jigage.

3.2 Configuração do leito

Na seleção do leito de jigagem para os testes, três fatores foram preponderantes. O primeiro foi a escolha de um sistema composto por partículas de diversas densidades, que pudessem ser recolhidas e contadas individualmente, permitindo assim a construção de curvas de partição. O segundo foi a busca por um procedimento mais ágil de avaliação da estratificação do leito, uma vez que cada ensaio no jigage requer dezenas de quilogramas de material particulado, usualmente abaixo de 20 mm, de modo que a contagem grão a grão de toda a massa de leito após cada teste é um procedimento demorado e tedioso. Finalmente, buscou-se uma estratégia que minimizasse o erro de arraste (Ambrós, 2017), dos compartimentos mencionados na seção anterior, o qual, supõe-se, é proporcional a massa de material arrastado durante a remoção do estrato.

Deste modo, definiu-se que os ensaios de jigagem seriam realizados utilizando traçadores densimétricos misturados a um leito base, constituído por material de características uniformes (isto é, sem variações significativas em sua densidade, tamanho e forma). Assim, após cada ensaio de jigagem, o foco foi analisar a distribuição dos traçadores com diferentes densidades no leito estratificado, os quais, por estarem em número muito menor que os grãos

que compõem o leito, tornou o processo de coleta e avaliação da estratificação muito mais ágil, além de minimizar o efeito do erro na remoção dos estratos.

Os traçadores densimétricos utilizados foram fabricados por meio do método FDM (*Fused Deposition Modelling*) de impressão 3D, conforme Warke e Puranik (2022), e consistem em esferas de poliácido láctico (PLA) de 20 mm de diâmetro (Figura 12). Os traçadores possuem as seguintes massas específicas: 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; e 2,4 g/cm³. Durante sua fabricação, a densidade dos traçadores foi regulada por meio da espessura da cavidade interna da esfera para as densidades inferiores ($\rho < 1,2 \text{ g/cm}^3$), enquanto para densidades superiores ($\rho \geq 1,2 \text{ g/cm}^3$) foi também necessário ajustar o diâmetro de microesferas de aço introduzidas na cavidade interna para garantir o alcance da densidade desejada e fácil recuperação magnética dos traçadores (Tabela 1). Essa necessidade de ajuste limitou o diâmetro mínimo dos traçadores no valor adotado de 20 mm. Cada uma das onze massas específicas compreende 20 esferas de diferentes cores e marcação em relevo da densidade nominal, totalizando 220 traçadores densimétricos (Figura 12).

Tabela 1- Características dos traçadores densimétricos utilizados

Densidade (g/cm ³)	Cor	PLA (g)	Metal (g)	Total (g)	Ø esfera de aço (mm)
0,4	Prata	1,6	0,1	1,7	3
0,6	Azul claro	2,4	0,1	2,5	3
0,8	Branco	3,3	0,1	3,4	3
1,0	Mármore	4,1	0,1	4,2	3
1,2	Amarelo	2,5	2,5	5,0	8,5
1,4	Azul escuro	3,4	2,5	5,9	8,5
1,6	Verde	4,2	2,5	6,7	8,5
1,8	Vermelho	2,2	5,4	7,5	11
2,0	Coral	3	5,4	8,4	11
2,2	Incolor	3,8	5,4	9,2	11
2,4	Preto	4,0	6,3	10,1	11,5

Fonte: autoria própria

Figura 12-Traçadores densimétricos, usados para ensaios de estratificação



(a) Esquema de fabricação de traçadores de alta densidade ($+1,2\text{g/cm}^3$) por inserção de esfera de aço e imagem de um traçador de $1,4\text{ g/cm}^3$; (b) traçadores distribuídos sobre a superfície do leito imóvel do jig.

Fonte: autoria própria

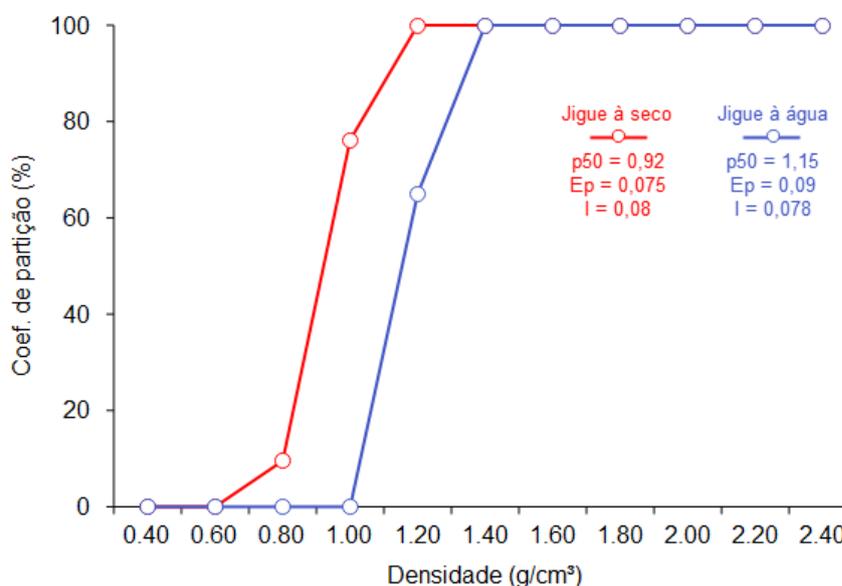
Em um primeiro momento, considerou-se utilizar como leito base partículas de polietileno (PET), com 3mm de diâmetro, densidade de $1,4\text{ g/cm}^3$, e geometria cilíndrica uniforme. De fato, os traçadores foram fabricados para uso em leito base de PET, justificando-se assim o intervalo de massas específicas escolhido ($0,4 - 2,4\text{ g/cm}^3$). Entretanto, testes exploratórios revelaram vários inconvenientes decorrentes do uso de PET como leito base. O primeiro em decorrência da grande diferença de tamanho entre os traçadores e o PET, o que fazia que a maior parte dos traçadores se concentra-se no fundo do leito, inclusive aqueles com densidades bastante leves (até $\rho = 0,8\text{ g/cm}^3$), intensificando assim a influência do tamanho na separação.

Reduzir a influência do tamanho na segregação em leito de PET mostrou-se uma tarefa difícil: a construção de traçadores menores era uma impossibilidade, enquanto a aquisição de PET com granulometria mais próxima dos traçadores (20 mm) foi inviável.

Outro inconveniente observado no uso do leito de PET foi a estabilidade (isto é, pouca variação) do perfil de segregação dos traçadores mesmo sob diferentes condições operacionais. A Figura 13 ilustra isso ao comparar as curvas de partição na jigagem a seco e jigagem a úmido

(realizada em jigge Baum laboratorial), obtidas em testes exploratórios. É possível notar que, apesar da diferença significativa no valor de ρ_{50} (densidade de separação), os índices de separação (tratados na seção seguinte), em especial a imperfeição (I), são bastante similares. Considerou-se isso indesejável, visto que, uma vez que a separação dos traçadores no leito de PET é significativamente “fácil”, torna-se mais difícil avaliar modificações sutis no perfil de segregação do leito ao se utilizar diferentes condições operacionais de jigagem. Nesse sentido, um leito no qual a segregação é mais difícil foi considerado mais conveniente.

Figura 13-Curvas de partição obtidas em testes exploratórios de jigagem a seco e a úmido usando leito de PET



Fonte: autoria própria

Testes exploratórios adicionais revelaram que um leito de brita ($\rho = 2,89 \text{ g/cm}^3$, medido em picnômetro de hélio) na faixa $-19 + 12,7 \text{ mm}$ demonstrou ser mais apropriado para condução dos ensaios. Primeiramente, porque a segregação por tamanho é minimizada devido a granulometria mais grosseira da brita; em segundo lugar, por ser a brita mais densa que o PET, há uma redução da concentração excessiva na camada de fundo observada no último caso. A própria concentração de traçadores na camada de fundo do leito pode ser indicativa de ineficiências na jigagem, uma vez que a brita é mais densa que os traçadores, sendo a concentração destes no topo do leito a tendência esperada em uma estratificação ideal.

3.3 Análise da estratificação

Todos os ensaios de jigagem foram realizados com espessura fixa de leito de 150 mm, correspondente a 03 estratos maiores do jigue (50 mm de altura) completamente cheios. Essa espessura foi adotada pois ensaios preliminares indicaram que espessuras maiores resultam em baixa movimentação de leito mesmo sob condições intensas de pulsação (100% da potência do soprador). Por outro lado, espessuras menores (100 mm, por exemplo) resultariam em uma razão espessura/top size de apenas 5, podem assim não serem suficientes para analisar as nuances das diferenças de segregação (isto é, distribuição vertical dos traçadores no leito segregado) sob diferentes condições operacionais.

Ensaio preliminares demonstraram uma maior tendência de concentração dos traçadores no estrato superior do leito de brita. Assim, definiu-se a seguinte configuração de produtos: o estrato superior classificado como “produto leve” e os dois estratos inferiores como “produto denso”. Essa nomenclatura é adotada doravante no texto. Assim, ao término da jigagem, os produtos leve e denso eram separadamente recolhidos e os traçadores presentes nos mesmos coletados e contados. O nível de estratificação foi medido pela análise da partição dos traçadores entre os produtos, calculada conforme a fórmula a seguir:

$$P_i = \frac{n_{\rho_i,denso}}{N_{\rho_i}} \times 100\% \quad (21)$$

Onde P_i é o coeficiente de partição, $n_{\rho_i,denso}$ é o número de traçadores de massa específica ρ_i recolhido no produto denso, e N_{ρ_i} é o número total de traçadores de massa específica ρ_i presente no leito. A plotagem de $P_i \times \rho_i$ ilustra a curva de partição do processo, a partir da qual dois parâmetros podem ser obtidos como indicadores da eficiência de separação da jigagem. Esses dois parâmetros, conforme Sampaio e Tavares (2005) e Wills e Finch (2016), são o desvio provável médio:

$$E_p = \frac{\rho_{75} - \rho_{25}}{2} \quad (22)$$

e a imperfeição:

$$I = \frac{E_p}{\rho_{50} - \rho_{ar}} \quad (23)$$

Onde ρ_{25} , ρ_{50} , e ρ_{75} representam as densidades correspondentes as partições de 25%, 50% e 75%, respectivamente.

Além da análise de partição, outros índices foram utilizados para casos específicos. Na análise da cinética de estratificação, por exemplo, foi avaliada a variação da distribuição de traçadores de diferentes densidades em diferentes estratos ao longo do tempo de jigagem.

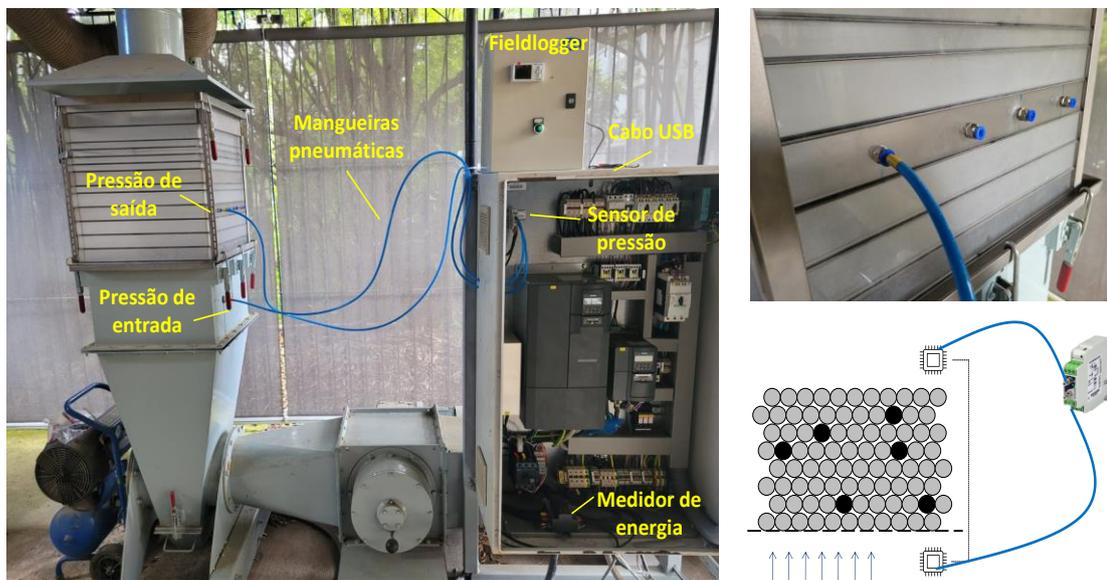
3.4 Perfil de pulsação do ar e consumo energético

Nesta etapa, o foco foi identificar os parâmetros operacionais do jigue a seco (vazão de ar e, de maneira preliminar, o ciclo de jigagem) e calibrar as curvas de consumo energético do equipamento (vazão vs potência e frequência vs potência). Para tanto, foram realizados registros da queda de pressão durante a passagem do pulso do ar na câmara do jigue. A análise do sinal de Δp permitiu determinar a velocidade e vazão de ar, bem como o perfil de variação da velocidade do pulso de ar ao longo do ciclo de jigagem. Como a vazão de ar que se pretendia medir é aquela diretamente entregue pelo soprador de ar, as coletas de dados foram realizadas com o jigue vazio (sem leito e sem crivo), a fim de se obter um sinal de Δp mais limpo, ou seja, ausente de distúrbios decorrentes da perda de carga no crivo e no leito.

A queda de pressão no leito durante o processo de jigagem foi medida por meio de um sensor de pressão diferencial modelo NP785-68, da fabricante Novus®, com faixa de medição de -68 a +68 mbar, erro de medição máximo de $\pm 2\%$, resolução de leitura de 11,6 bits e tempo de atualização de medida (taxa de aquisição) de até 50 milissegundos. A taxa de aquisição utilizada nos ensaios (isto é, o passo de tempo) foi de 0,1 s.

As tomadas de pressão foram realizadas em dois pontos distintos, sendo o primeiro referente a pressão de ar antes da entrada na câmara do jigue (pressão de entrada) e outro referente a pressão em um ponto superior da câmara do jigue (pressão de saída) (Figura 14a). Para tomada da pressão de entrada, foi usada uma mangueira pneumática instalada em um ponto fixo, em seção do duto localizada abaixo do crivo do jigue. A pressão de saída foi adquirida por meio de mangueira pneumática acoplada em um dos quatro orifícios presentes em um dos compartimentos de acrílico da câmara do jigue (Figura 14b). Os orifícios, munidos de anéis de vedação hidráulica e roscas de acoplamento, foram construídos especificamente para inserção das mangueiras pneumáticas na câmara do jigue, permitindo sua rápida fixação e retirada, conforme a necessidade. Além disso, por existirem quatro orifícios dispostos horizontalmente, é possível mapear a existência de diferenças no valor de ΔP ao longo da seção horizontal da câmara de jigagem.

Figura 14-(a) Esquema geral da instrumentação para coleta de dados de pressão e energia do jigue e (b) orifícios para inserção de mangueiras e ilustração dos pontos de tomada de pressão



Fonte: autoria própria

As pressões transmitidas pelas mangueiras pneumáticas são medidas pelo sensor de pressão e armazenadas em um registrador FieldLogger modelo 512K da fabricante Novus®. O FieldLogger possui 8 canais analógicos (de entrada de dados) e memória interna de 512.000 registros, com uma taxa de leitura de até 1000 registros/segundos por canal. No presente caso, foram utilizados apenas 03 canais, um para registro do valor de ΔP (em mbar), outro para registro da potência ativa consumida (em kWh), e outro para registro da potência reativa da rede (em kVar). O FieldLogger possui uma tela de 2,4" para visualização de dados em tempo real, módulo ethernet de transmissão remota de dados e porta USB para download de dados. Durante os testes, a aquisição de dados foi feita por meio de um cabo USB conectado ao FieldLogger e a um laptop, no qual o software de aquisição FieldChart® permite o gerenciamento e a exportação dos dados. Os valores de ΔP registrados foram utilizados para calcular a velocidade do pulso de ar no jigue por meio da Eq.24:

$$v_{\infty} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ar}}} \quad (24)$$

onde v_{∞} e ρ_{ar} são a velocidade (m/s) e a densidade do ar (1,225 kg/m³ a 25°C e 101,325 kPa). A vazão de ar foi calculada da multiplicação de v_{∞} pela área da seção transversal da câmara do jigue, igual a 0,25 m².

A medição do consumo de energia durante os testes foi realizada por meio de multimedidor de energia trifásico modelo Delta DPM-D520I, com capacidade de carga de 63A e precisão de medição de $\pm 0,5\%$ do valor nominal de corrente ou tensão. O medidor de energia transmite os dados de consumo (corrente e tensão) ao FieldLogger, sendo que sua interface já está programada para o cálculo e registro da potência ativa e reativa da rede, permitindo assim a medida da potência útil consumida no jigüe. Ainda, por meio do software do FieldChart, a taxa de aquisição dos valores de ΔP e de potência podem ser ajustadas a fim correlacionar as duas grandezas. O medidor de energia foi instalado dentro do painel do jigüe e está conectado diretamente a fonte de alimentação do equipamento. Deste modo, foi possível medir não apenas a demanda energética de pulsação do leito, mas também discriminar o consumo individual de energia associado aos periféricos do equipamento (soprador, válvula borboleta, filtro manga, etc).

3.5 Estudo da cinética de estratificação

Nesta etapa, testes foram realizados a fim de analisar variações no perfil de segregação do leito com o tempo sob condições fixas de pulsação, uma vez que tal comportamento é pouco conhecido para a jigagem a seco. Para tanto, os ensaios de jigagem foram conduzidos sob as seguintes condições fixas de pulsação: frequência de pulso de 70 CPM e vazão relativa de ar de 95%. Essas condições foram ajustadas em testes exploratórios, e mostraram-se apropriadas por permitirem uma dilatação suficiente do leito durante o pulso, sem causar demasiada turbulência aparente. Os ensaios foram realizados dentro do intervalo de tempo de jigagem de 30 a 300 s, com $\Delta t = 30$ s (totalizando 10 tempos de jigagem). O tempo mínimo de jigagem de 30 s foi definido por questões discutidas no item 4.1. Todos os ensaios de jigagem foram realizados em duplicata, a fim de se avaliar o erro experimental associado. Os resultados foram analisados quanto a distribuição dos traçadores nos produtos leve e denso e dos índices de partição para diferentes tempos de jigagem.

3.6 Pulsação transiente

Os ensaios de jigagem com pulsação transiente envolveram uma bateria de testes no qual as condições de pulsação do leito (frequência e vazão de ar) foram modificadas de modo cadenciado segundo uma ordem crescente ou decrescente. Conforme discutido na subseção 1.1.3, a ideia desses testes foi verificar se a estratificação do leito poderia ser melhorada ao variar-se as condições de pulsação à medida que o leito modifica seu arranjo (no caso, à medida

que os traçadores se distribuem até seus pontos de equilíbrio ou quase equilíbrio ao longo do leito de brita).

Os testes foram realizados considerando cinco tempos de jigagem: 60, 120, 180, 240, e 300 segundos. Em cada um dos tempos de jigagem, foram avaliadas quatro condições de pulsação transientes distintas:

- *Pulsos de frequência crescente*: a vazão relativa de ar foi mantida em 95%, enquanto a frequência de pulsação do leito foi variada no intervalo 55 – 85 CPM a cada quarto de tempo e a uma taxa de $(85 - 55) / 3 = + 10$ CPM.

- *Pulsos de frequência decrescente*: a vazão relativa de ar foi mantida em 95%, enquanto a frequência de pulsação do leito foi variada no intervalo 85 – 55 CPM a cada quarto de tempo e a uma taxa de $(55 - 85) / 3 = - 10$ CPM.

- *Pulsos de amplitude crescente*: a frequência de pulsação foi mantida em 70 CPM, enquanto a vazão relativa de ar foi variada no intervalo 90% - 100% a cada quarto de tempo e a uma taxa de $(100 - 90) / 3 = + 3,3\%$.

- *Pulsos de amplitude decrescente*: a frequência de pulsação foi mantida em 70 CPM, enquanto a vazão relativa de ar foi variada no intervalo 100% - 90% a cada quarto de tempo e a uma taxa de $(90 - 100) / 3 = - 3,3\%$.

A Tabela 2 exemplifica o ajuste das condições de pulsação para o caso de teste com tempo de jigagem de 60 s. O perfil de estratificação em condições transientes foi comparado com aqueles obtidos sob condição fixa de pulsação (isto é, sem variação durante a jigagem) na qual a frequência manteve-se igual a 70 CPM e vazão de ar em 95%.

Tabela 2-Variação das condições de pulsação para ensaio com tempo de jigagem de 60s

t (s)	Δt (s)	Freq. crescente F (CPM)	Freq. decrescente F (CPM)	Amplitude crescente Vazão (%)	Amplitude decrescente Vazão (%)
0	0	55	85	90	100
15	15	65	75	93,3	96,6
30	15	75	65	96,6	93,3
45	15	85	55	100	90
60	15	-	-	-	-

Fonte: autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos e suas principais implicações. Aborda-se, primeiramente, o mapeamento das condições operacionais por meio do sistema de aquisição de dados, os quais forneceram subsídios para implementação dos ensaios de cinética de estratificação e pulsação transiente que são apresentados a seguir.

4.1 Caracterização da pulsação do ar

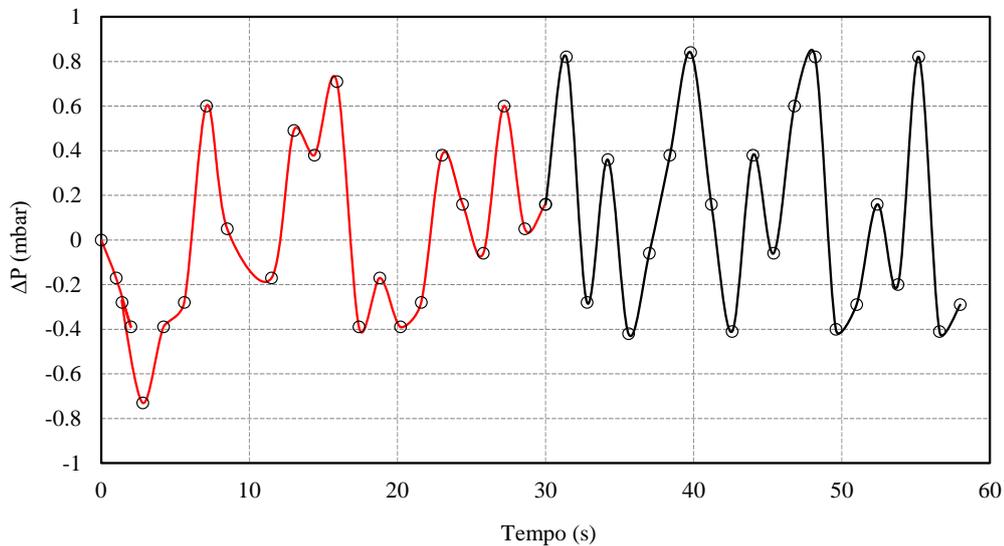
O jigue a seco utilizado nos testes, tanto como os jigues a seco em geral, possui dois parâmetros reguláveis no painel de controle do equipamento: a vazão e a frequência do pulso de ar. O painel de controle do equipamento, contudo, oferece apenas uma indicação indireta desses parâmetros, uma vez que a vazão é expressa em termos da porcentagem utilizada da potência do soprador (0 a 100%), enquanto a frequência indicada refere-se à frequência de rotação da válvula borboleta que controla o pulso de ar. Embora esta frequência possa ser diretamente igualada à frequência do pulso, ela não é necessariamente igual a frequência de pulsação do leito. Diferente de jigues hidráulicos, onde a variação do nível de água pode ser diretamente associada a amplitude de pulsação, essa relação é mais difícil de estabelecer, uma vez que o ar não tem uma fase de “retorno”. Por meio do sensor de pressão, foi possível mapear o intervalo de vazões utilizáveis, bem como o perfil preliminar do ciclo de jigagem aplicado no jigue a seco.

Contudo, um jigue a seco laboratorial tal qual o usado nos testes apresenta uma diferença fundamental em relação a um jigue industrial: a operação em batelada, ou descontínua. Conforme descrito na subseção 3.1, todos os ensaios invariavelmente têm início com o jigue desligado, de modo que decorre um intervalo de tempo até que as condições de pulsação atinjam o modo estacionário. Todavia, a estratificação começa a ocorrer mesmo nos primeiros momentos, por mais mínima que seja a movimentação do leito. Deste modo, uma preocupação inicial do estudo foi definir o intervalo de tempo a partir do qual a pulsação pudesse ser considerada estacionária ou “fixa” ou, dito de outra forma, quando a operação do jigue se tornava estável. Para tanto, foi realizada a leitura de ΔP nos primeiros 60 segundos imediatamente após ligar o jigue para uma pulsação fixa de 85 CPM e vazão de 95%, condições próximas aquelas adotadas nos ensaios posteriores.

A Figura 15 mostra a variação do sinal de ΔP ao longo do tempo. É possível notar que, para as condições de pulsação definidas, são necessários aproximadamente 30 s para uma

estabilização do sinal de ΔP . Entende-se por “sinal estável” a repetição dos picos e vales e da forma (assinatura) do sinal de ΔP ao longo do tempo.

Figura 15-Variação de ΔP ao longo do tempo a partir do início de pulso de 95% e 85 CPM



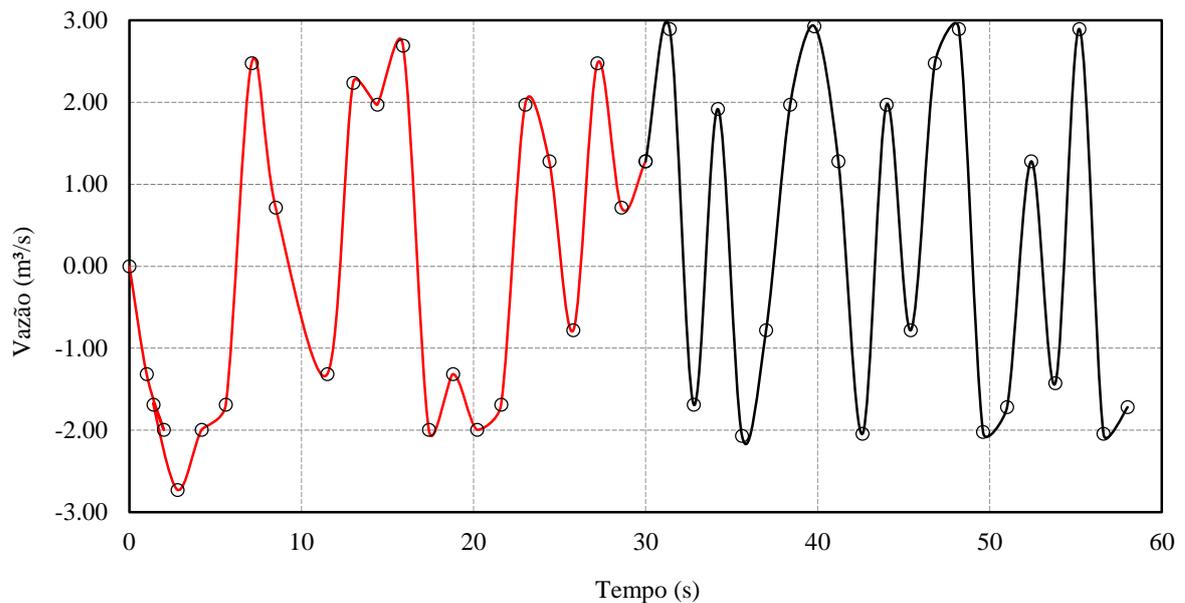
Fonte: autoria própria

A linha vermelha denota o intervalo no qual ΔP é instável, enquanto a linha escura destaca o instante a partir do qual a operação pode ser considerada estável. Uma vez que a queda de pressão está diretamente relacionada com a velocidade da corrente de ar e a frequência do pulso, isto é um forte indicador de que a pulsação leva um tempo considerável, na ordem de dezenas de segundos, para atingir as condições de vazão e frequência definidas no painel de controle do equipamento. A causa da instabilidade no início da operação é multifatorial: está certamente relacionada ao próprio tempo que o soprador de ar necessita para atingir a operação nominal, porém, oscilações na rede elétrica e a posição de repouso da válvula borboleta no início do pulso são fatores que podem influenciar as características iniciais do pulso.

No presente caso, interpretou-se que ensaios realizados em tempos de jigsaw menores que 30 s não seriam representativos das condições de jigsaw definidas no equipamento. Por esta razão, todos os ensaios de segregação no jigsaw foram realizados com tempo mínimo de 30s. A Figura 15 ilustra valores negativos de ΔP , o que possivelmente está relacionado a onda de pressão gerada pela repentina mudança da velocidade de ar durante os instantes de fechamento da válvula borboleta que regula o pulso. Essa evidência é importante no sentido de implicar a possível existência de alguma sucção sobre o leito durante certos instantes do ciclo

de jigagem, o que vai de encontro ao descrito por Ambrós et al. (2019). Isto fica mais evidente na Figura 16, a qual mostra a vazão de ar calculada em função dos valores de ΔP (equação 24). Nesta, o pico de vazão do pulso foi de aproximadamente $3 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto vazões negativas (em sentido contrário ao pulso) tiveram picos de até $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (cerca de 67% da magnitude dos picos do pulso).

Figura 16-Variação da vazão de ar ao longo do tempo, calculada a partir dos dados de ΔP apresentados na Figura 15.



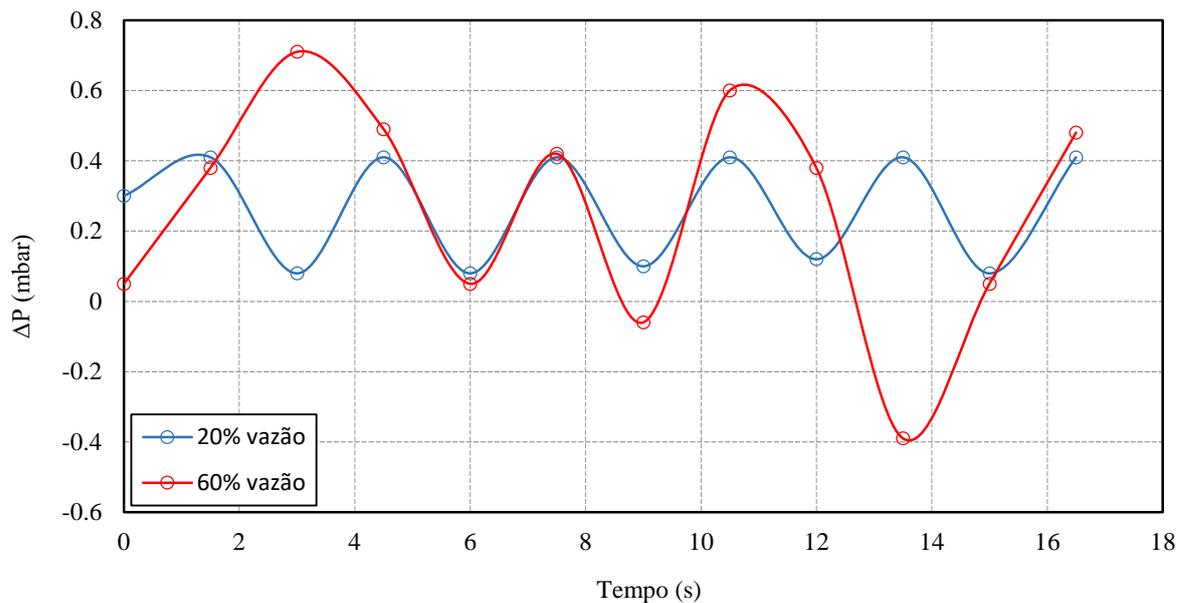
Fonte: autoria própria

Tanto a Figura 15 (ΔP x tempo) quanto a Figura 16 (vazão x tempo) podem ser utilizadas para avaliar o perfil do ciclo de pulsação no jigue a seco. É interessante notar que após a estabilização da operação ($t > 30 \text{ s}$) existem dois picos de vazão do pulso que se alternam repetidamente, sendo um pico de maior intensidade ($\approx 3 \text{ m}^3/\text{s}$) e outro de menor intensidade ($\approx 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ou menor). Esse comportamento parece inesperado quando se leva em conta que a válvula que controla o pulso do jigue é do tipo borboleta (uma haste central que gira sobre um eixo, abrindo ou fechando totalmente a cada 90° de giro), sendo esperado, idealmente, a repetição de picos similares.

A fim de verificar se o comportamento observado ocorria em diferentes condições de pulsação, curvas de ΔP para diferentes vazões foram comparadas, conforme exibido na Figura 17. Observa-se que para baixas vazões de ar a curva apresenta comportamento harmônico e bem definido ao longo do tempo, com picos e vales bem definidos e similares, além de um

período e frequência de onda de 3 s e 0,33 Hz (≈ 20 CPM, próximo ao valor definido no painel de comando), respectivamente. Entretanto, para uma vazão significativamente maior, o perfil de ΔP é inconstante, apresentando picos e vales de módulo variado, incluindo um marcadamente negativo. O período e a frequência da onda também são variáveis e não estão em consonância com a rotação da válvula borboleta.

Figura 17-Variação de ΔP para dois pulsos com vazões de ar distintas e frequência de pulsação de 20 CPM (período de 3s)



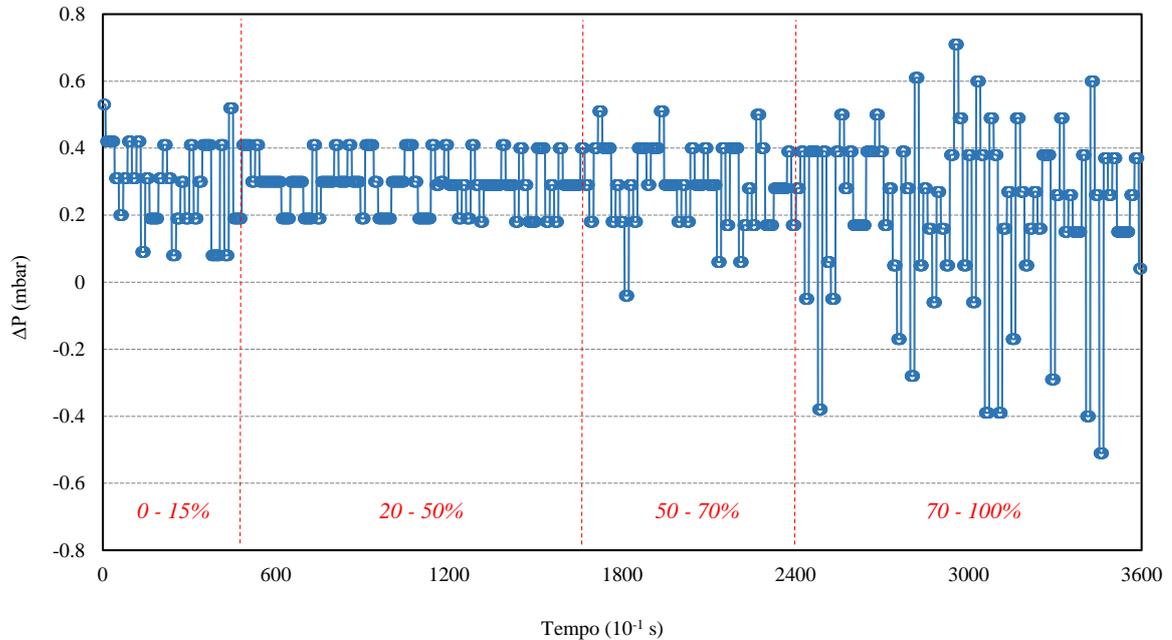
Fonte: autoria própria

Ao menos dois fatores podem estar relacionados a discrepância descrita: (1) a rotação da válvula não corresponde aquela indicada no painel; (2) à medida que se aumenta a vazão de ar, o aprisionamento momentâneo do mesmo durante a fração de segundos que a válvula permanece fechada gera um “golpe” de pressão cada vez maior, gerando um aumento súbito da impulsão (e da sucção) que ocasiona um descompasso entre a frequência de pulso e a frequência de rotação da válvula. Uma vez que para baixas vazões as frequências (de ΔP e da válvula) estiveram em sintonia, é razoável assumir que a primeira hipótese não se aplica.

Avaliar as variações de ΔP para todo o espectro de vazões do jigge, conforme mostrado na Figura 18, pode ser uma maneira de estimar a importância da segunda hipótese. Nota-se que o sinal de ΔP apresenta quatro fases distintas: (a) uma leve instabilidade inicial nos primeiros instantes ($t < 40$ s), possivelmente devido as razões previamente discutidas relativas ao startup do jigge (portanto, não necessariamente relacionado as vazões específicas iniciais); (b) um

período de aparente estabilidade na faixa de 20 – 50% de vazão; (c) início de instabilidades na faixa 50 – 70% de vazão, com picos destoantes de ΔP ; (d) curvas de picos variáveis de ΔP , indicando um nível alto de instabilidade no pulso.

Figura 18-Variação de ΔP instantâneo ao longo do tempo (incrementos de 0,1 s) à medida que a vazão de ar do soprador era aumentada de 0 a 100% (intervalos não regulares)



NB: Os índices em vermelho referem-se ao intervalo de vazões conforme a notação indicada no painel de controle do jigge (% da potência do ventilador).

Fonte: autoria própria

Em suma, os resultados sugerem que a determinação do *ciclo de jigagem*, no caso da jigagem a seco, envolve fatores tão ou mais complexos que no caso da jigagem hidráulica convencional. Por ser um fluido compressível (ao contrário da água), o ar sofre significativas variações de pressão ao longo do processo, especialmente devido a compressão/sucção produzida durante os instantes de fechamento da válvula, quando ocorre a inversão do ciclo. Como a compressão de ar durante seu aprisionamento depende do tempo de fechamento da válvula, é possível inferir que a vazão de ar e a frequência de pulsação não são independentes, conforme explicado na figura 17 anteriormente. No jigge a seco utilizado para os testes, em particular, existe um fator adicional que contribui as instabilidades da pulsação, conforme será discutido a seguir.

4.2 Perfil de consumo energético

O jigue a seco possui dois componentes-chave que exigem energia elétrica: a válvula rotativa e o soprador de ar. O sistema de jigagem pode ainda incluir um ventilador para canalização de poeira visando sua coleta em filtros manga ou deposição em precipitadores eletrostáticos. O jigue em batelada usado nos testes dispõe de sistema de sucção e coleta por filtros manga.

Por serem equipamentos que suportam altas tonelagens e com aplicações voltadas ao início da cadeia de processamento mineral, em operações típicas de pré-concentração de minerais grosseiros, jigues a seco podem demandar uma quantidade significativa de energia. Conforme observado por Coelho e Brito (2013), os jigues a seco podem possuir os maiores custos energéticos em plantas de processamento simples, como no caso de resíduos de construção e demolição. Nesse caso, se fez necessário uma investigação maior sobre o perfil de consumo energético dessa operação.

Em um sistema elétrico, a potência total consumida é dada pela soma da potência ativa e reativa. A potência ativa é a quantidade de energia elétrica realmente consumida por um equipamento ou rede elétrica, sendo medida em watt (W) ou watt-hora (Wh). No caso do jigue, é a responsável por realizar o trabalho útil, como acionar a válvula borboleta e movimentar o motor do soprador. A potência reativa é a quantidade de energia elétrica consumida por um equipamento ou rede elétrica que não resulta em trabalho útil, mas é necessária para manter o campo magnético de motores elétricos e transformadores, sendo medida em volt-ampere reativo (VAR). Ambas as potências são calculadas conforme as equações 25 e 26, abaixo:

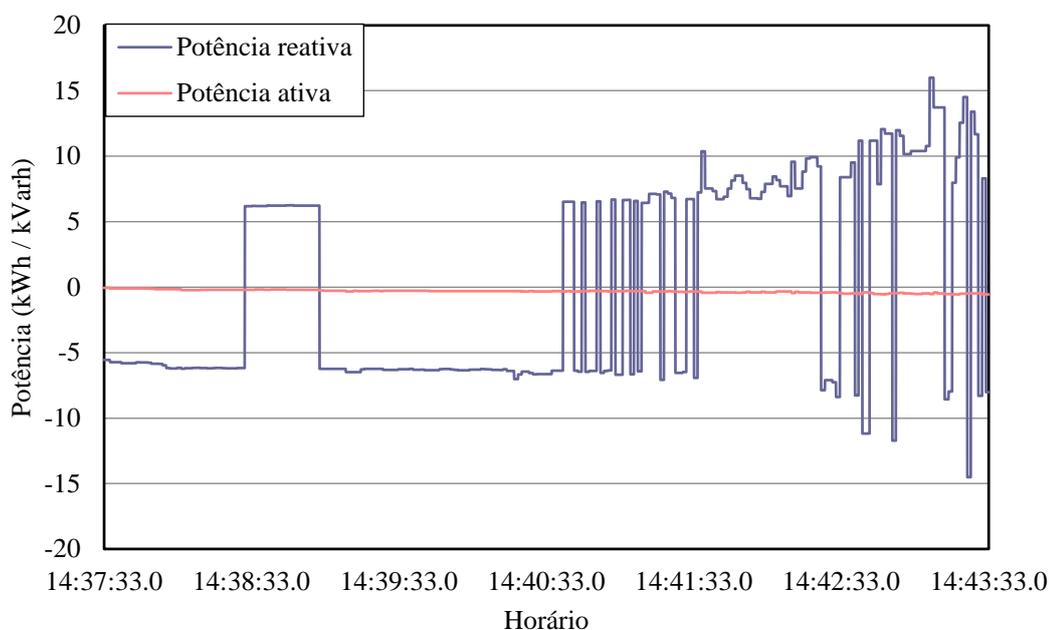
$$P_{ativa} = V.I.\cos(\varphi) \quad (25)$$

$$P_{reativa} = V.I.\sen(\varphi) \quad (26)$$

Onde V e I são a voltagem e a corrente de alimentação do equipamento. O fator de potência $\cos(\varphi)$ representa a porção de energia elétrica que está sendo usada para realização de trabalho útil, como previamente definido, sendo assim conveniente que seu valor seja o mais próximo possível de 1. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), um fator de potência mínimo de 0,92 é exigido para instalações industriais, sendo o excedente reativo taxado (ANEEL, 2010).

A Figura 19 mostra a variação de consumo de potência ativa e reativa ao longo do teste de varredura do intervalo de vazões do soprador (cujo sinal de ΔP se encontra na Figura 18). É marcante a predominância da potência reativa durante todo o espectro de funcionamento do equipamento, correspondendo a um valor de $\cos(\varphi) \approx 0,08$ até uma vazão de ar de 50%. Após esse limite, a curva de potência reativa se tornam instáveis, oscilando entre picos positivos e negativos. Essa oscilação significa que o equipamento varia entre momentos de consumo de energia reativa da rede (picos positivos) e de geração (picos negativos, significando a liberação da corrente elétrica excedente). Uma rede sobrecarregada com equipamentos indutivos (motores, compressores, etc) e instalações elétricas inadequadas figuram entre os motivos que contribuem para o baixíssimo fator de potência encontrado.

Figura 19-Potência ativa (kWh) e reativa (kVar) consumidas no jigue durante o aumento da vazão de ar de 0% até seu limite máximo (1kVar=1,25kwh)



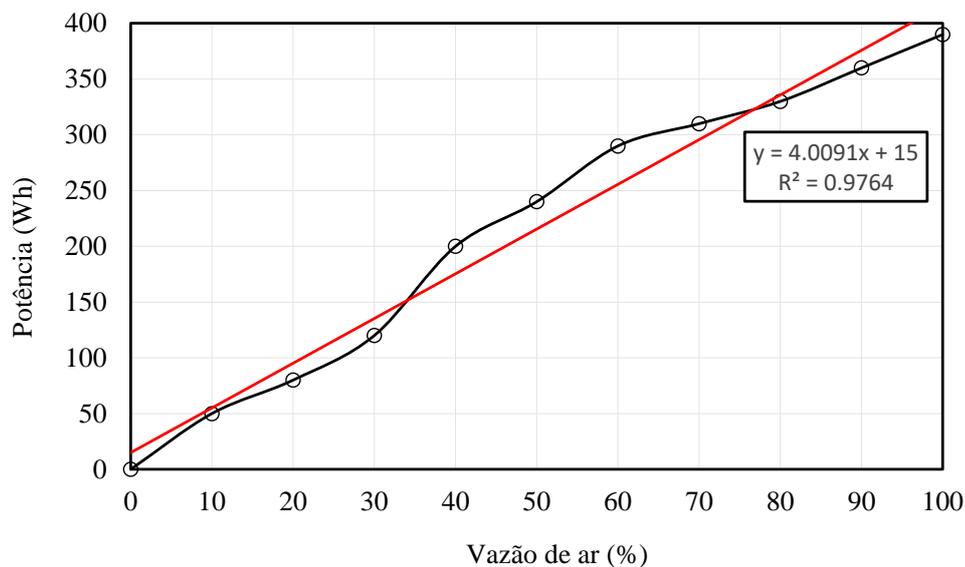
Fonte: autoria própria

É interessante notar as similaridades no comportamento das curvas de ΔP x tempo (Figura 18) e Potência x tempo (Figura 19). Em particular, a faixa operacional na qual os valores de ΔP se tornam instáveis (vazões acima de 50%) coincide com a faixa de instabilidade e progressiva oscilação da potência reativa no jigue, indicando uma possível relação entre as duas. Assim, é possível inferir que a crescente instabilidade da rede elétrica que alimenta o jigue afeta a operação do soprador, seu principal componente, à medida que este se aproxima da operação em carga máxima. Por consequência, ocorrem instabilidades nas medições de ΔP , na

vazão de ar e, em última instância, no próprio ciclo de jigagem (formato do pulso). Embora essa circunstância possa decorrer de fatores associados a rede local, isto é, que não necessariamente ocorrem em outras instalações, ela atenta para o importante impacto da rede elétrica sobre a operação dos sopradores, equipamento principal do sistema de jigagem à seco. Esse fator vinha sendo, até o presente momento, ignorado em estudos sobre o tema.

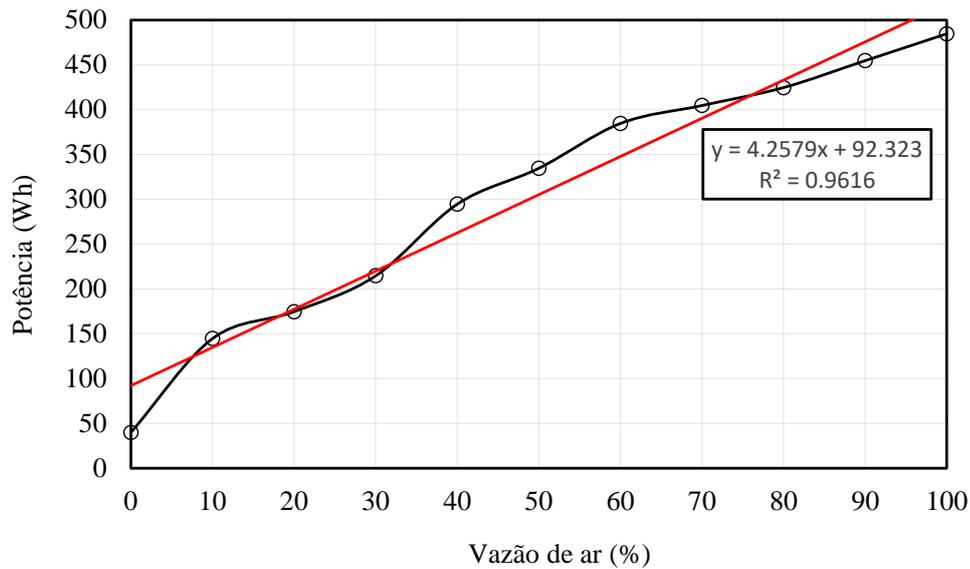
A Figura 20 apresenta a curva de potência útil (ativa) em função da porcentagem de vazão de ar do soprador. Observa-se um crescimento aproximadamente linear no consumo de energia à medida que se aumenta o fluxo no soprador, sendo o pico de consumo correspondente a cerca de 400 Wh. Ressalta-se que a curva considera apenas a potência associada ao soprador de ar. Para operação da válvula rotativa do jigue, a potência útil média demandada dentro de todo o intervalo operacional (10 até 400 CPM) é de $54,74 \pm 5,41$ Wh. A pouca variação do consumo com a rotação se deve ao fato que a maior parte da potência é consumida no acionamento da válvula. O sistema de coleta de poeira, mais especificamente o ventilador que gera a sucção no duto do coletor, apresentou consumo fixo de 40 Wh. A Figura 21 apresenta a curva de potência total aproximada, incluindo o consumo da válvula e do sistema coletor. Na curva, considera-se que a operação inicia com o coletor de poeira ligado e que a potência relativa à válvula corresponde ao valor médio de 54,74 Wh.

Figura 20-Curva de potência útil demandada no soprador de ar do jigue



Fonte: autoria própria

Figura 21-Curva de potência útil total aproximada demandada durante a operação do jigge



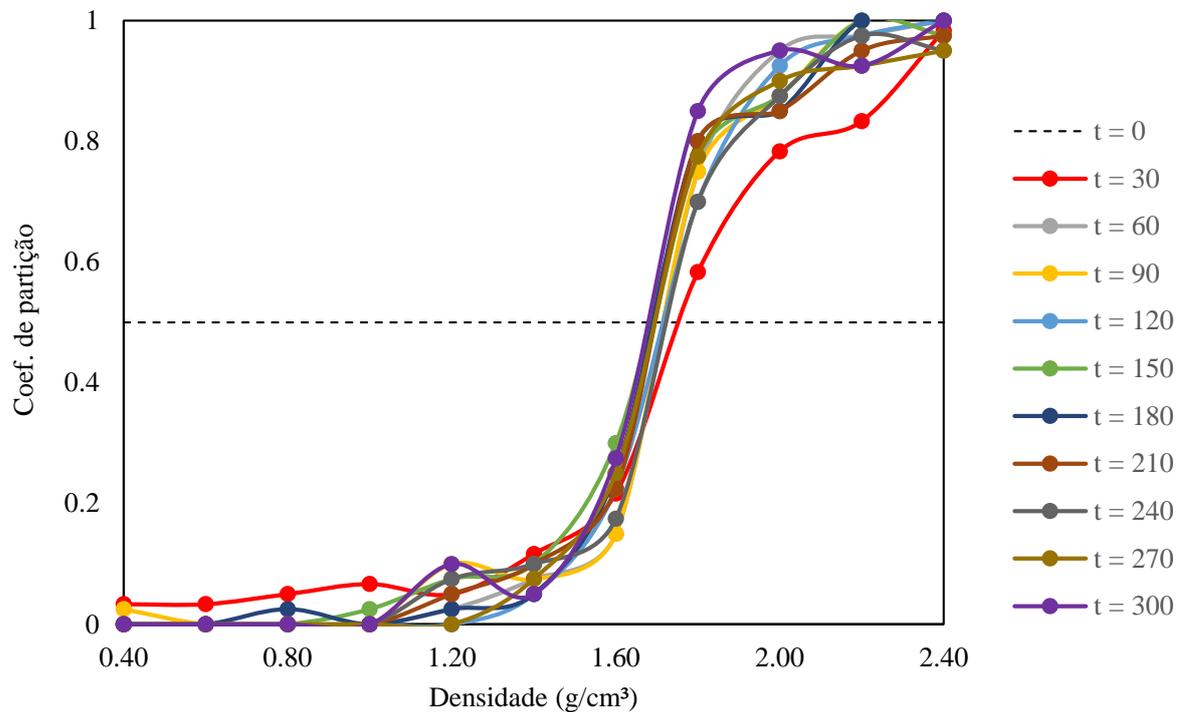
Fonte: autoria própria

Para as condições de pulsação usada nos testes com os traçadores, o consumo de energia medido no jigge foi de 496,82 Wh. Considerando que o peso do leito de brita mais os traçadores totalizava 46,6 kg de material, o consumo específico de energia foi de 10,66 Wh/kg de material jigado. Assim, se fossem processados 30 ton/h de resíduos de construção e demolição em jigge à seco, conforme descrito por Coelho e Brito (2013), a energia requerida seria de 319,8 kWh, cerca de 12% maior do que aquela indicada pelos autores (282,5 kWh/jigge). O consumo maior detectado no presente trabalho pode decorrer de características das instalações elétricas locais, conforme mencionado.

4.3 Cinética de jigagem

Foram realizados experimentos de jigagem a seco nas condições descritas na subseção 3.5 para os tempos de jigagem de 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 e 300 s. As condições de pulsação foram mantidas fixas em 70 CPM, com pico de vazão de ar de 2,9 m³/s (correspondente a 95% da vazão máxima do ventilador). A Figura 22 e a Tabela 3 mostram as curvas de partições conjuntas e os índices de eficiência de separação resultantes, respectivamente.

Figura 22-Curvas de partição de testes de cinética de jigagem realizados com $f = 70$ CPM e vazão de $2,9\text{m}^3/\text{s}$



Fonte: autoria própria

Tabela 3-Densidade de separação e índices de partição de testes preliminares de cinética de jigagem.

Índice	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s	270 s	300 s
ρ_{50} (g/cm ³)	1,75	1,72	1,72	1,72	1,68	1,69	1,70	1,72	1,70	1,68
E_p	0,17	0,08	0,08	0,12	0,12	0,09	0,09	0,11	0,10	0,09
Imperfeição	0,099	0,049	0,049	0,068	0,071	0,054	0,051	0,066	0,056	0,056

Fonte: autoria própria

De modo geral, os resultados indicam um comportamento não assintótico da estratificação em jiges a seco. Dito de outro modo, a estratificação não parece evoluir até um equilíbrio definido, com uma distribuição estável dos traçadores ao longo do leito estratificado, mas sim a variar continuamente com o tempo devido a possível remistura de traçadores previamente segregados.

Com exceção de $t = 30$ s, as curvas de partição mostram-se mais ou menos sobrepostas dentro da faixa de cálculo do desvio provável médio (entre ρ_{25} e ρ_{75}). Por outro lado, há uma variação significativa nos perfis de partição para as faixas de maior densidade ($> \rho_{75}$), fator

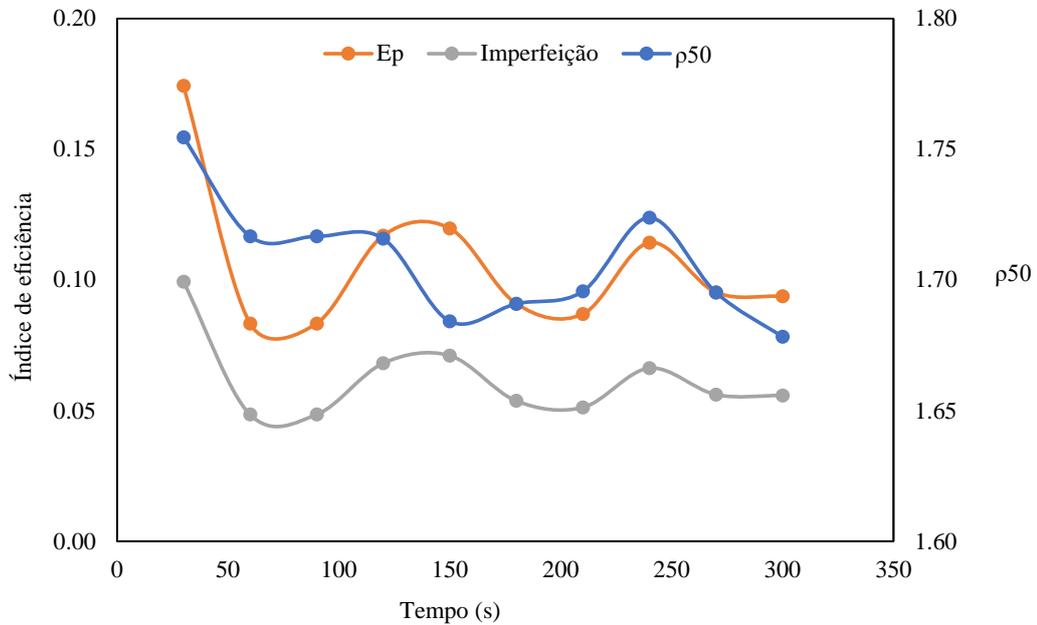
este que será discutido adiante. A partir de 60 s é possível observar um comportamento oscilatório nos valores de desvio provável médio e imperfeição, ora diminuindo e ora aumentando a cada intervalo de + 60 s. Para os tempos de 60 e 90 s, temos que $E_p = 0,08$, aumentando nos dois tempos seguintes, voltando a um patamar de $E_p < 0,1$ em seguida, e finalmente voltando a se elevar para $t = 270$ e 300 s. Os valores de imperfeição acompanham essa tendência, conforme pode ser mais bem visualizado na Figura 23. Os resultados fortalecem o fato de que a remistura é um fenômeno evidente na jigagem a seco, que se configura como um dos fatores da baixa eficiência da estratificação. É razoável presumir que isto está associado a necessidade de utilização de altas velocidades do pulso do ar, em comparação a pulsos de água, devido a densidade vastamente menor do primeiro em relação ao último. Portanto, para a jigagem a seco, devido as características específicas do ar, o efeito de remistura é mais evidente, dificultando alcançar um estado final de equilíbrio dinâmico específico, mesmo com grandes tempos de jigagem. Em relação a variação das imperfeições das partições, pode-se observar alternâncias na partição que ocorreram a cada 60 s, sugerindo que esse seja um fenômeno intrínseco ao processo de jigagem a seco.

O valor de $E_p = 0,1$ é emblemático pois, de acordo com Sampaio e Tavares (2005), distingi os equipamentos de concentração gravimétrica de alto desempenho (ciclones a meio denso, separadores centrífugos etc., onde $E_p < 0,1$) daqueles de menor desempenho (separadores autógenos, alguns jigues, etc, onde $E_p > 0,1$). Assim, o comportamento oscilatório demonstrado pela partição ao longo do tempo pode ser grosseiramente aproximado a uma alternância entre estados de alto e baixo desempenho da separação no jigue. Os resultados, até certo ponto, divergem da afirmação de Wollacott *et al.* (2021a; 2021b) sobre a independência da estratificação em relação ao tempo de jigagem (mais especificamente, que um perfil de estratificação de equilíbrio seria estabelecido tão logo o tempo de jigagem fosse suficiente), ao passo que para o presente estudo o perfil de estratificação, indicado pela partição, varia mesmo em longos tempos de jigagem.

Convém apontar outro comportamento que diferiu das observações de Wollacott *et al.* (2021a; 2021b): o fato de as condições de pulsação afetarem significativamente o perfil de estratificação/partição (os autores concluíram que a pulsação afetaria apenas a cinética de estratificação, mas não a sua extensão). Nesse sentido, a Figura 24 apresenta curvas de partições para testes realizados com a mesma vazão de ar dos resultados previamente mostrados ($2,9 \text{ m}^3/\text{s}$), porém utilizando uma frequência de pulsação de 153 CPM (mais que o dobro do outro caso). É possível notar um nível de partição substancialmente inferior aos testes efetuados com $f = 70$ CPM, juntamente ao comportamento oscilatório previamente observado nessa condição

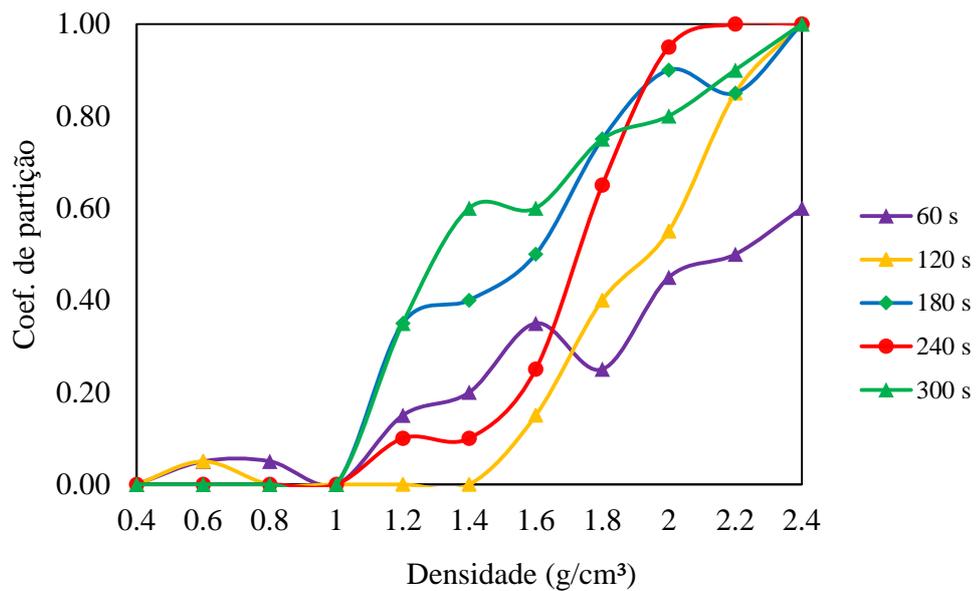
operacional. Os resultados desses testes foram desconsiderados na análise subsequente, pois se identificou que a frequência de pulso adotada era demasiado alta considerando que o leito era composto de material bastante grosseiro.

Figura 23-Variação da densidade de separação (ρ_{50}) e dos índices de partição ao longo do tempo



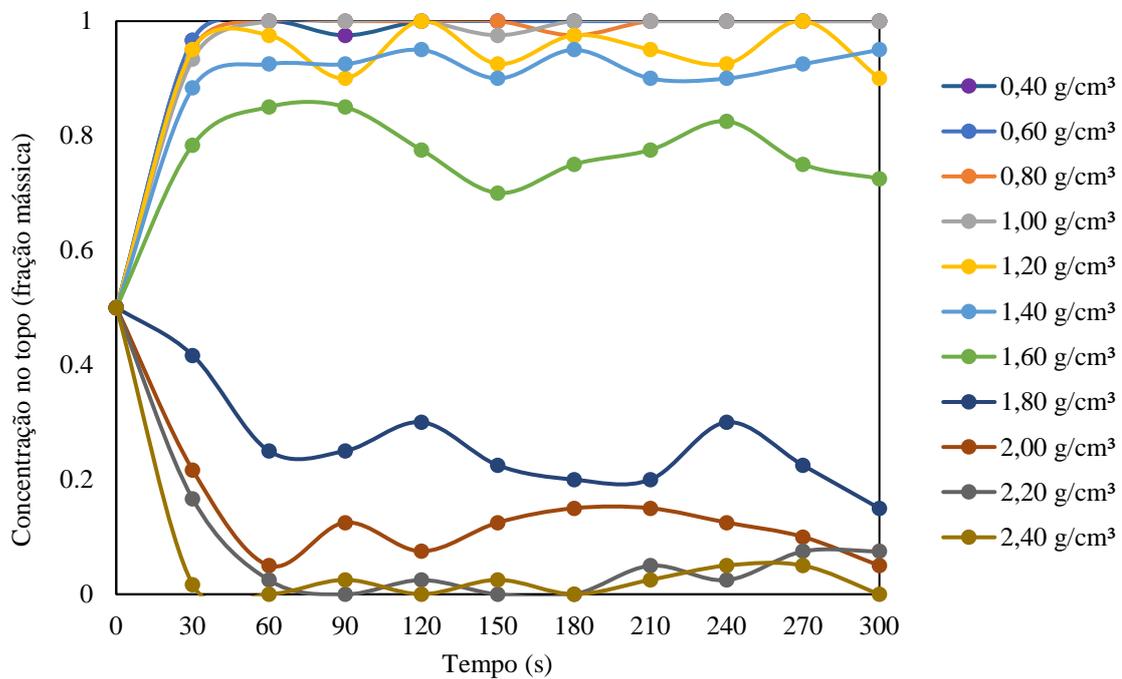
Fonte: autoria própria

Figura 24-Curvas de partição de testes preliminares de cinética de jigagem realizados com $f = 153$ CPM e vazão de $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$



Fonte: autoria própria

Figura 25-Variação da concentração de traçadores no produto leve, considerando uma concentração inicial de 50% (mistura perfeita)

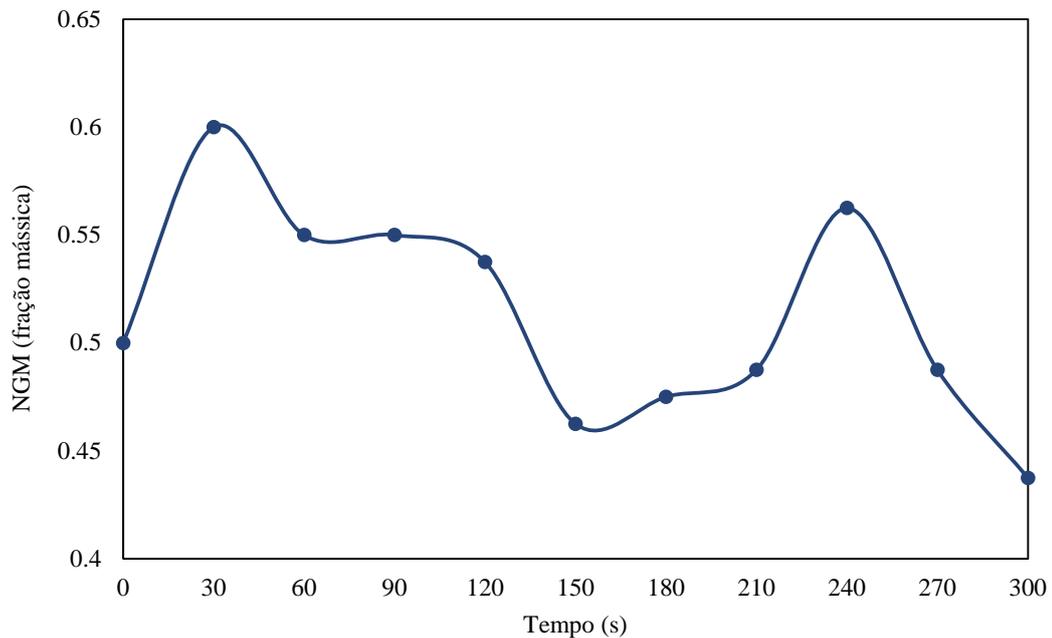


Fonte: autoria própria

A tendência verificada na análise de partição pode ser mais bem visualizada ao se considerar a distribuição dos traçadores no leito estratificado (Figura 25). É possível notar uma tendência geral de rápida concentração dos traçadores mais leves no produto leve, ao passo que os traçadores mais densos diminuem sua concentração, indicando sua transferência para a zona de produto denso. De fato, três comportamentos distintos podem ser observados: o de traçadores leves ($\rho < 1,4 \text{ g/cm}^3$), que rapidamente se concentram no produto leve do jigge; traçadores densos ($\rho > 2 \text{ g/cm}^3$), os quais se concentram no produto denso; e traçadores com densidades intermediárias ($\rho = 1,6 \text{ e } 1,8 \text{ g/cm}^3$), que apresentam um comportamento oscilatório mais denotado no que diz respeito a concentração ao longo do tempo.

Conforme previamente descrito na Tabela 3 (pág.60), os valores de ρ_{50} (densidade de separação) se mantiveram muito próximos, sendo de uma média de $1,71 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 1,34\%$ de desvio padrão). Os traçadores que apresentaram uma concentração mais oscilante ao longo do tempo foram justamente aqueles que se encontram na faixa de *near-gravity material* (NGM), isto é, em densidades distantes em $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ da densidade de separação (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Um comportamento interessante do NGM pode ser observado na Figura 26.

Figura 26-Variação do teor de NGM no produto leve



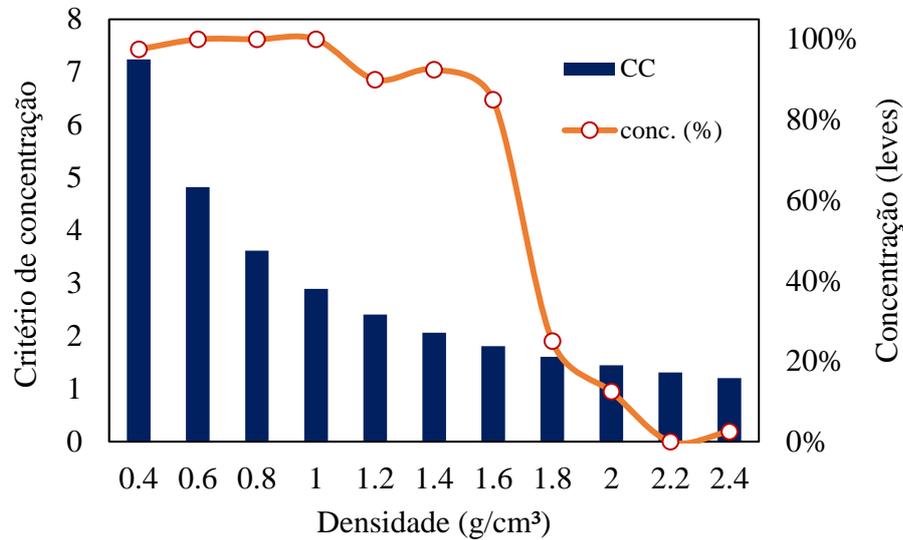
Fonte: autoria própria

Em certos intervalos, percebe-se picos de variação na concentração de NGM de até 10% a cada 60 s (entre 30 - 90 s, 90 - 150 s, e 180 - 240 s). Esse comportamento sugere que os traçadores nessa faixa de densidade não encontram posições estáveis à medida que o leito se estratifica, mas aparentemente permanecem em constante movimentação à medida que o leito pulsa, ora subindo e se concentrando em porções superiores (produto leve), ora descendo e penetrando na porção inferior do leito (produto denso, o que inclui 2 de 3 camadas do leito).

Uma outra forma de interpretar a distribuição dos traçadores no leito estratificado é apresentada na Figura 27. Nesta, é possível notar que a tendência de concentração no produto leve é proporcional ao critério de concentração, calculado para separação em ar no regime de Newton, conforme a equação (3), e para o caso de $\rho_{denso} = 2,89 \text{ g/cm}^3$ (densidade da brita). É possível notar que para $CC \geq 3$, para a faixa de densidade -1 g/cm^3 , a separação é quase total, enquanto para $CC < 1$, em relação a faixa de densidade $+2 \text{ g/cm}^3$, a separação é quase nula. Entre esses limites, a faixa de densidades $1,2 - 1,8 \text{ g/cm}^3$ diminui progressivamente sua concentração na fração leve à medida que o valor de CC diminui. A análise dos valores de CC confirma a possibilidade de que as diferenças de tamanho e geometria entre traçadores e leito, mesmo que pequenas, possam ter significativamente influenciado a segregação, sendo estas

diferenças mais importantes à medida que a densidade dos traçadores se aproximava da densidade do leito (especialmente para $CC < 1$).

Figura 27-Comparação entre critério de concentração para separação em ar de traçadores de leito de brita e a concentração de traçadores de diferentes densidades no produto leve, considerando o teste com $t=90s$



Fonte: autoria própria

4.4 Pulsação transiente

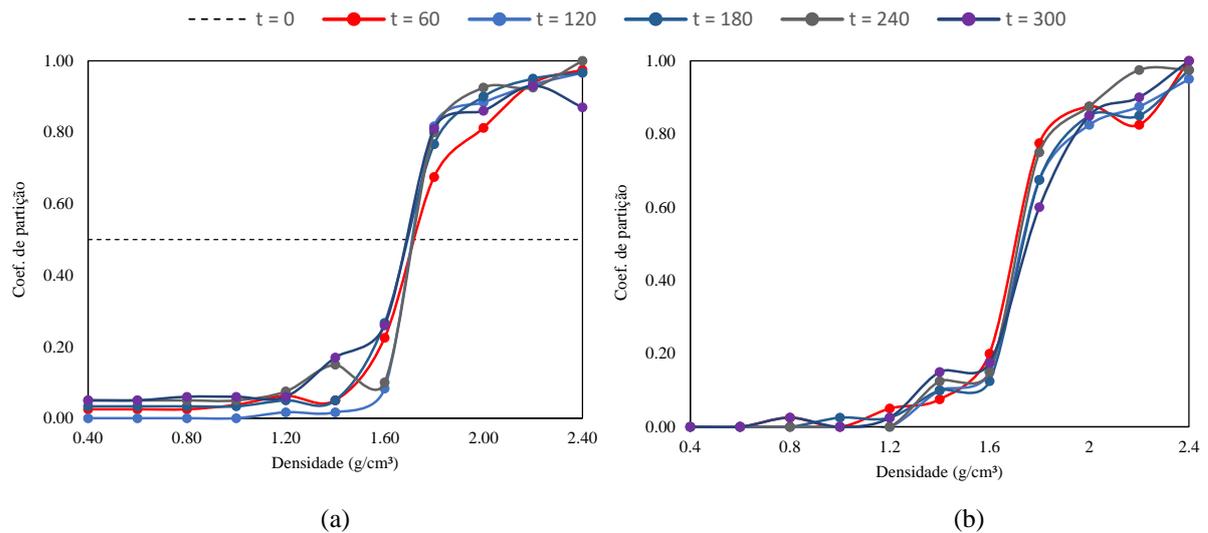
Os resultados dos ensaios com pulsação transiente se dividem em duas categorias, conforme a resposta geral observada para cada arranjo experimental. A seguir, cada um deles é abordado separadamente.

4.4.1 Pulso com vazão decrescente ou frequência crescente

A Figura 28 e a Tabela 4 mostram as curvas de partição e seus respectivos índices para os ensaios com pulso transiente de vazão decrescente e frequência crescente. De modo geral, e em relação à eficiência de separação somente, não foram notadas diferenças significativas entre as partições sob pulsação fixa e sob as condições de pulsação transientes consideradas. Algumas nuances, porém, foram observadas. A densidade de separação média para o uso de vazão decrescente manteve-se em $\rho_{50} = 1,71 \text{ g/cm}^3$, porém sob um nível de regularidade mais constante (desvio padrão de apenas 0,88% em relação ao valor médio versus 1,71% para o caso estacionário). Para a condição de frequência crescente, a densidade de separação foi levemente maior, igual a $1,73 \text{ g/cm}^3 (\pm 1,08\%)$. Por outro lado, conquanto os índices de partição mostraram valores próximos, novamente oscilando próximos de $E_p \approx 0,1$, por exemplo, sua variação ao

longo do tempo demonstrou uma inconstância maior ao longo do tempo (Figura 29). Em outras palavras, a cinética de jigagem tornou-se mais instável, sendo mais difícil prever a partição ao longo do tempo. O período de oscilação aproximado (entre máximos e mínimos) manteve-se em 60 s.

Figura 28-Curvas de partição para pulsação transiente com vazão decrescente (a) e frequência crescente (b)

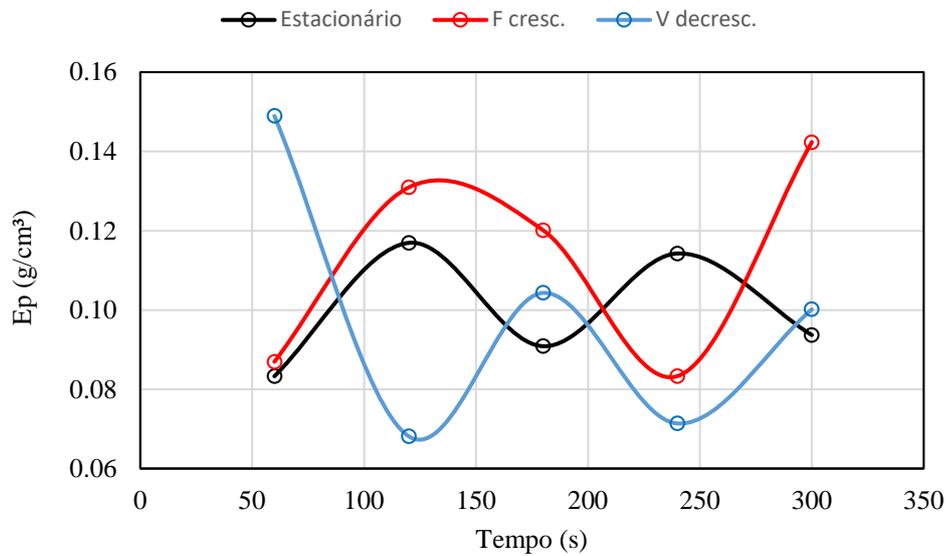


Fonte: autoria própria

Tabela 4-Índices de partição para testes com pulsação transiente(a)

Índice	Vazão decrescente					Frequência crescente				
	60 s	120 s	180 s	240 s	300 s	60 s	120 s	180 s	240 s	300 s
ρ_{50} (g/cm³)	1.72	1.71	1.69	1.71	1.69	1.70	1.73	1.74	1.72	1.75
Ep	0,15	0,07	0,10	0,07	0,10	0,09	0,13	0,12	0,08	0,14
Imperfeição	0,087	0,040	0,062	0,042	0,059	0,051	0,076	0,069	0,049	0,081

Fonte: autoria própria

Figura 29-Comparação entre os valores de E_p ao longo do tempo

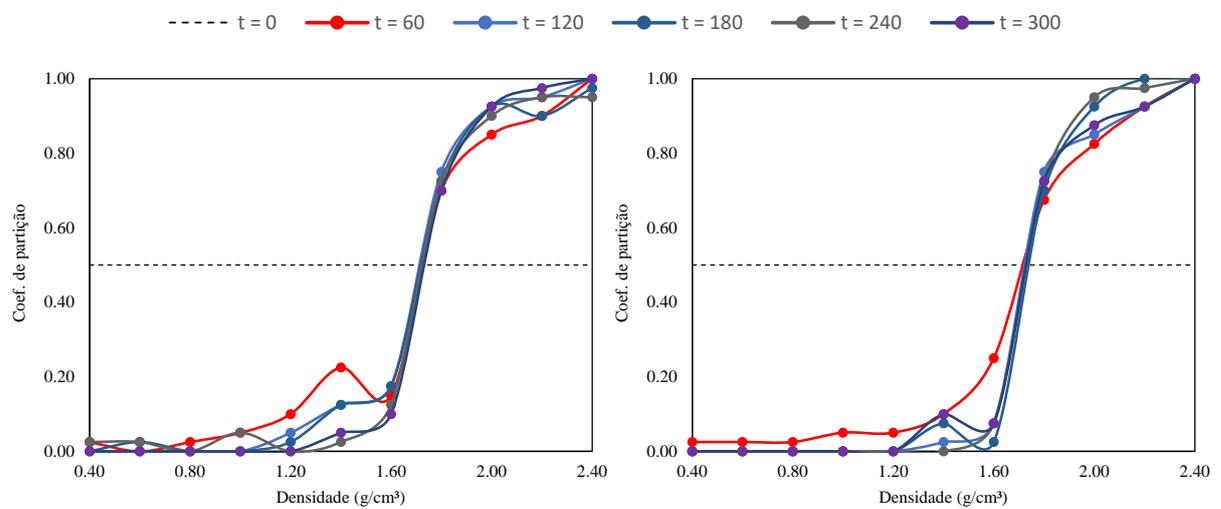
Fonte: autoria própria

4.4.2 Pulso com vazão crescente ou frequência decrescente

A Figura 30 e a Tabela 5 mostram as curvas de partição e seus respectivos índices para os ensaios com pulso transiente de vazão crescente e frequência decrescente. Apesar dos curtos-circuitos indicados nos limites das curvas (também apresentado em outras condições operacionais, indicando contaminações de produtos leve e denso), é interessante notar a sobreposição das diferentes curvas de partição no intervalo $\rho_{25} - \rho_{75}$, especialmente para a condição de pulso transiente com vazão crescente. Essa coincidência das curvas é um indicativo de estabilidade, uma vez que indica que a inclinação da curva de partição não foi significativamente afetada pelo tempo de jigagem, exceto nos primeiros instantes (assinalado na curva de frequência decrescente na Figura 30.b). Outra maneira de avaliar este comportamento é através da variabilidade do valor de ρ_{50} . Para os pulsos de frequência decrescente e vazão crescente, os valores médios e desvios padrões de ρ_{50} e foram de 1,73 g/cm³ ($\pm 1,08\%$) e 1,72 g/cm³ ($\pm 0,46\%$). Os baixos desvios-padrões em torno da média indicam baixíssima oscilação de valores, isto é, uma alta estabilidade da densidade de separação, praticamente independente do tempo de jigagem (para $t > 60$ s).

A Figura 31 mostra a evolução dos valores do desvio provável médio ao longo do tempo em comparação com a condição de pulsação estacionária. Mais importante do que os valores individuais de Ep é o fato da sua manutenção em valores bem próximos a partir de $t = 120$ s. Enquanto na condição de pulsação fixa a variação média de Ep a partir desse tempo foi de $\pm 22\%$ a cada 60 s, ela decaiu para $\pm 8\%$ (frequência decrescente) $\pm 7,7\%$ (vazão crescente) sob condições transientes.

Figura 30-Curvas de partição para pulsação transiente vazão crescente(a) e frequência decrescente (b)



Fonte: autoria própria

Tabela 5-Índices de partição para testes com pulsação transiente (b).

Índice	Vazão crescente					Frequência decrescente				
	60 s	120 s	180 s	240 s	300 s	60 s	120 s	180 s	240 s	300 s
ρ_{50} (g/cm ³)	1,73	1,71	1,72	1,73	1,73	1,72	1,73	1,74	1,73	1,73
Ep	0,12	0,09	0,10	0,09	0,10	0,12	0,07	0,09	0,08	0,09
Imperfeição	0,067	0,051	0,058	0,054	0,056	0,068	0,043	0,051	0,049	0,052

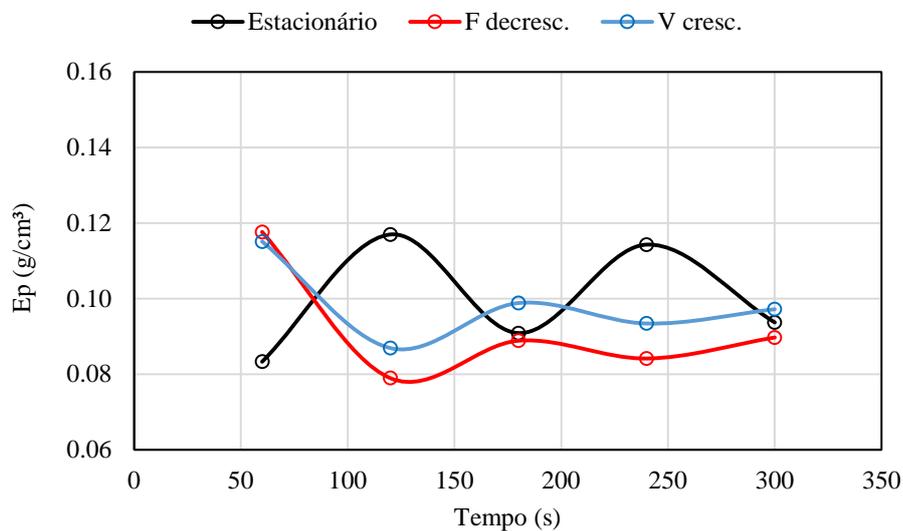
Fonte: autoria própria

A Figura 32 compara as proporções de NGM no produto leve em todas as condições testadas. Vale lembrar que a densidade do leito base (2,89 g/cm³) é maior do que a densidade de todos os traçadores, de modo que uma maior proporção de NGM no produto leve pode ser entendida como uma aproximação da separação ideal por densidade. A concentração dos traçadores mais densos no produto denso pode ser justificada devido ao efeito conjunto da

densidade, que é mais próxima da densidade do leito, bem como das diferenças de tamanho e geometria entre traçadores e leito, sendo os primeiros levemente mais grosseiros e com geometria esférica, o que favorece sua movimentação em direção a camadas inferiores do leito (SAMPAIO; TAVARES, 2005; AMBRÓS, 2020).

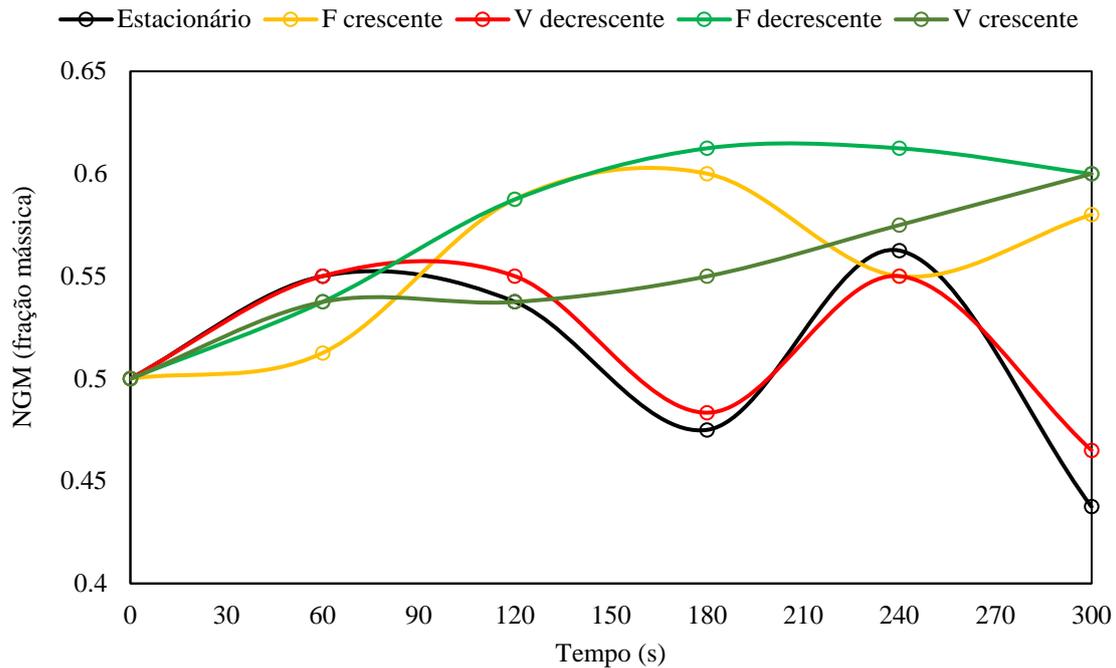
É possível observar que as condições de pulsação com frequência decrescente e vazão crescente forneceram as maiores proporções de NGM a partir de $t = 120$ s, além de descreverem um crescimento progressivo e não oscilatório ao longo do tempo. Nas outras condições, entretanto, se observa o comportamento oscilante, que pode ser interpretado como uma alternância da posição vertical dos traçadores (ora na zona dos leves, ora na zona dos densos).

Figura 31-Comparação de valores de E_p ao longo do tempo



Fonte: autoria própria

Figura 32-Proporções de NGM no produto leve sob diferentes condições de jigagem



Fonte: autoria própria

4.5 Pulsação transiente e segregação: mecanismo preliminar

Os resultados obtidos demonstraram que o uso de pulsos transientes, ou seja, pulsos onde condições de vazão ou frequência variam durante a segregação do material, são capazes de alterar o nível de segregação do leito bem como a cinética da jigagem a seco. De modo geral, observou-se que condições de pulsação transiente que tendem a diminuir a amplitude do movimento do leito (deslocamento vertical) durante a jigagem, como os ciclos com vazão de ar decrescente ou frequência crescente, tiveram um efeito aparentemente negativo sobre o processo, uma vez que acentuaram as flutuações do nível de segregação ao longo do tempo. Por outro lado, condições de pulsação que aumentam progressivamente o deslocamento vertical do leito, como nas condições de vazão crescente ou frequência decrescente, resultaram em níveis de segregação levemente melhores, e uma cinética de jigagem mais estável, com variações menos dramáticas dos índices de separação.

Com base no exposto, propõe-se, em caráter preliminar, um possível mecanismo que possa descrever o efeito do pulso transiente sobre a estratificação do leito de jigagem a seco. A chave desse mecanismo está na variação da porosidade do leito ao longo do ciclo de jigagem e da subsequente mobilidade de partículas com diferentes densidades enquanto o leito se encontra aberto. A Figura 33 apresenta uma situação hipotética representando um leito de jigagem

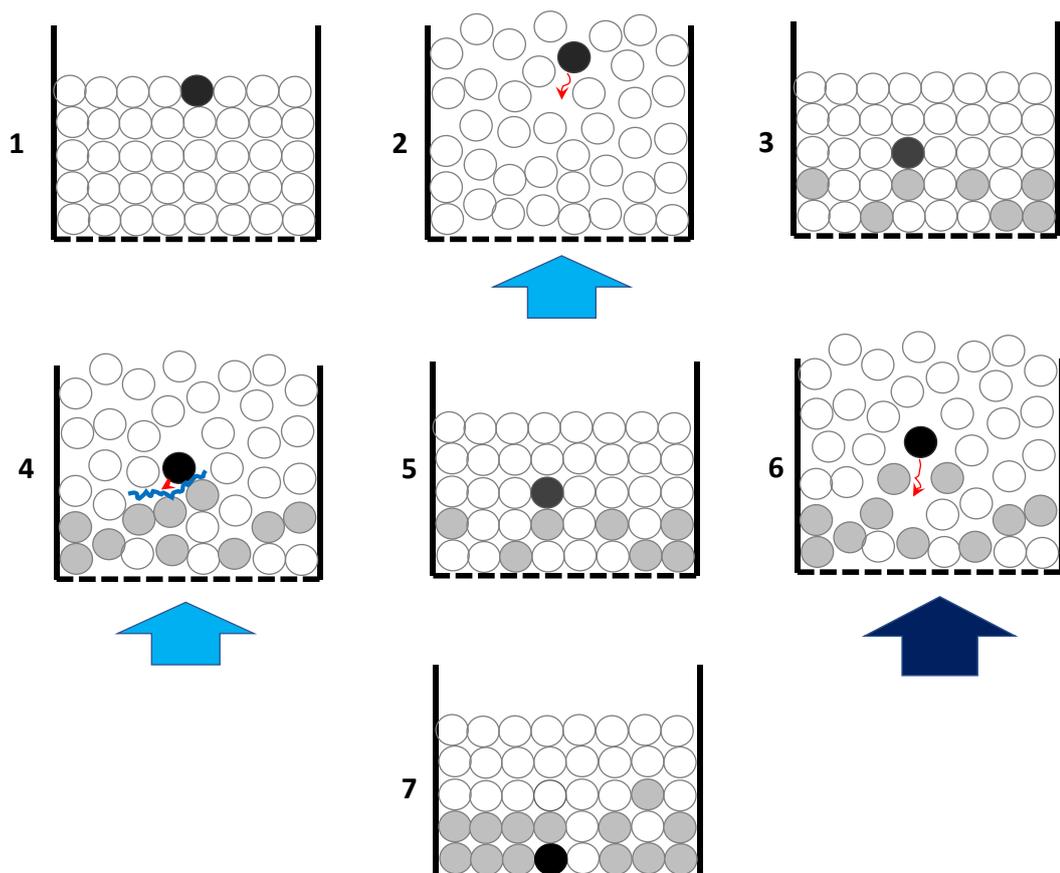
imediatamente antes do início do pulso. A numeração de 1 a 7 representa a sequência de eventos que se presume ocorrer durante a variação da magnitude do pulso que atravessa o leito (caso de pulsos com vazão crescente, por exemplo), tomando como referência a possível movimentação de uma partícula densa. Nesse caso, é possível conceber a seguinte sequência:

1. Uma partícula densa (coloração escura) está posicionada inicialmente na porção superior de um leito em repouso;
2. Um pulso de ar de intensidade Y dilata o leito, aumentando a porosidade (espaço livre entre partículas), permitindo que aquelas de maior peso (mais densas e grossas) se desloquem em direção a porções inferiores do leito;
3. Ao final do primeiro pulso, a partícula densa se encontra em uma altura intermediária no leito;
4. Um novo pulso de ar de intensidade Y atravessa o leito, novamente causando sua dispersão e aumento de porosidade. Contudo, o movimento da partícula densa encontra a concorrência de outras partículas densas, que devido ao seu peso, se movimentam menos que partículas leves presentes no sistema. Além disso, a compactação aumenta a medida que se desce no leito, de modo que a partícula densa encontra uma resistência cada vez maior ao seu deslocamento para baixo;
5. A partícula densa permanece aprisionada dentro de uma zona restrita conforme novos pulsos de intensidade Y atravessam o leito, com oscilações em pequena escala na posição vertical. Se ela for suficientemente densa (como, por exemplo, os traçadores com $\rho > 2,0 \text{ g/cm}^3$) ela permanecerá em uma posição de quase equilíbrio, enquanto se ela estiver dentro da faixa de NGM, pode alternar posições nas zonas de produto leve ou denso.
6. Um pulso de ar com intensidade $Z > Y$ percorre o leito, transferindo momento e causando uma dispersão maior que o pulso original. A maior magnitude do novo pulso aumenta a porosidade das zonas de acúmulo de material denso (zonas inferiores), liberando caminho para que a partícula densa possa alcançar uma porção do leito mais inferior que a anterior.

7. Uma nova configuração de quase-equilíbrio é estabelecida sob o pulso mais intenso, na qual a partícula densa se mantém em uma porção mais inferior do leito.

Uma representação análoga poderia ser feita considerando uma partícula leve inicialmente posicionada no fundo do leito, enquanto um comportamento oposto ocorreria caso a injeção de pulsos menos intensos fosse considerada. O mecanismo preliminar proposto basicamente considera que pulsos que progressivamente dilatam mais o leito auxiliam na acomodação das partículas, o que resulta no alcance mais eficiente das posições de equilíbrio das mesmas, ponto a partir do qual pulsos adicionais pouco afetam suas posições no sistema. Isso justifica, em partes, a alta estabilidade (isto é, baixa variação) observada na distribuição e na partição dos traçadores ao longo do tempo quando do uso de pulsos com vazão crescente ou frequência decrescente.

Figura 33-Ilustração da sequência de eventos associada ao mecanismo proposto



Fonte: autoria própria

Uma outra maneira de interpretar o fenômeno é a partir da linha de raciocínio adotada por Mayer (1964) em sua teoria da energia potencial. Considerando que a redução da energia potencial é a verdadeira força motriz de segregação do leito, a força cinética induzida nas partículas pelo pulso de ar tem apenas a função de liberar a energia potencial latente. Uma partícula densa no topo de um leito (1), vista desse modo, apresenta grande energia potencial devido a sua posição elevada, necessitando assim de um estímulo pequeno (pulso) para liberar essa energia. Uma vez liberada (2), parte da energia potencial, convertida em energia cinética de movimento da partícula, gera o rebaixamento da mesma no leito (3). Posicionada em menor altura, a partícula apresenta então uma menor energia potencial. Esta, quando liberada pelo pulso de ar, gera um movimento mais tênue da partícula que, devido a compactação do leito gerada pela própria redução de energia potencial, limita seu movimento (4 e 5). Ao injetar um pulso mais intenso que o inicial, um pacote extra de energia cinética é transferido as partículas, especialmente na porção inferior do leito, aumentando momentaneamente sua energia potencial (pois elas se elevam e o leito se torna menos compacto), que, todavia, é reduzida novamente quando o pulso é suspenso e as partículas se assentam entre os interstícios.

Vale ressaltar que o mecanismo proposto deve ser válido apenas para a operação dentro de um intervalo operacional (de pulsação restrito). Se o pulso injetado for, porventura, demasiadamente intenso, supõe-se que ele poderia causar uma remistura do leito, elevando partículas densas para porções superiores, resultando assim em uma elevação da energia potencial do sistema. Essa possibilidade foi, infelizmente, aventada apenas tardiamente no presente estudo e não pôde ser testada, uma vez que a quantidade de material utilizada resultou em um leito massivo (46,6 kg), sendo necessário operar o soprador sempre próximo da sua capacidade máxima (acima de 90%) para movimentar o leito. Em outras palavras, como o leito era muito pesado, o soprador não tinha potência suficiente para simular uma situação de sobre-vação. Ainda, o mecanismo proposto não leva em consideração outros fenômenos que podem estar presentes durante a movimentação do leito em jigue a seco, como a convecção granular e o efeito parede (AMBRÓS *et al.*, 2016). Finalmente, o mecanismo, assim como toda análise de resultados, se baseia no movimento de partículas isoladas (traçadores), sendo necessários testes adicionais a fim de verificar se as tendências observadas se reproduzem para uma estratificação em grande escala (altas proporções de densos e leves).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Entre os poucos estudos existentes sobre jigagem a seco, o foco tem sido a análise da estratificação considerando diferentes estudos de caso, não sendo dada a devida atenção as características específicas do processo como, por exemplo, sua pulsação e cinética. Um melhor entendimento dessas características poderia possibilitar o desenvolvimento de novas estratégias operacionais para melhoria do processo. No presente estudo, buscou-se analisar essas características e, com base nos resultados obtidos, foi proposta uma estratégia alternativa de uso de pulsos transientes. Portanto, as principais conclusões obtidas foram as seguintes:

- O uso de traçadores densimétricos distribuídos em um leito base se mostrou um método efetivo para analisar o nível de segregação na jigagem a seco, tendo a vantagem de agilizar os ensaios e permitir a calibração de curvas de partição;
- A detecção da queda de pressão na câmara de jigagem se mostrou como uma estratégia promissora para supervisão e regulagem da vazão de ar e do ciclo de jigagem em jigues a ar, permitindo a obtenção de *insights* a respeito da forma do pulso e do ciclo de jigagem empregado;
- A medição da potência útil requerida ao longo de todo o espectro operacional do jigue a seco, usado indicou que o acionamento do soprador representa o maior consumo energético. Com base nos dados, foi possível calibrar curvas de potência x vazão de ar e prever o consumo total (kW ou kWh) e o consumo específico (kW/kg de material processado);
- Os dados de medição de energia revelaram uma crescente instabilidade na operação do soprador à medida que sua vazão de operação máxima é aproximada, a qual foi confirmada pelas medições de ΔP em altas vazões (acima de 70%). Em particular, o fator de potência da rede se mostrou excessivamente baixo, o que pode agregar um viés relacionado às condições locais de operação do equipamento. De qualquer modo, os resultados atentam para a importância da manutenção de instalações elétricas robustas para uma operação estável do soprador de ar em jigues;

- Os testes com condições estacionárias (fixas) de pulsação demonstraram uma cinética oscilatória e instável, com distribuições de traçadores e índices de partição variando ao longo do tempo, especialmente no caso da fração NGM, e assim se diferenciando da cinética reportada na literatura para o caso de jigsawes hidráulicos tradicionais.
- Os testes com condições transientes de pulsação indicaram dois comportamentos em comparação ao uso de pulsação fixa: (1) para vazão decrescente ou frequência crescente ocorreu uma redução discreta na qualidade da separação e aumento significativo na flutuação dos índices de partição ao longo do tempo; (2) para vazão crescente ou frequência decrescente se observou um aumento discreto na qualidade da separação e uma redução significativa na flutuação dos índices de partição ao longo do tempo.
- Com base nos resultados obtidos, foi proposto um mecanismo preliminar de descrição do efeito da pulsação transiente sobre a segregação de partículas isoladas no leito do jigsaw. O mecanismo considera o efeito de pulsos de intensidades variadas sobre a porosidade do leito e sobre o intercâmbio de energia potencial e cinética, conforme o modelo original proposto por Mayer (1964).

5.2 Recomendações

Consideram-se válidas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- ✓ Testar diferentes perfis de variação do pulso transiente, com vista a encontrar outros pontos ótimos ao processo;
- ✓ Avaliar a cinética de estratificação e a pulsação transiente na separação de casos reais (minérios, carvões, resíduos, etc).
- ✓ Utilizar diferentes funções de ajustes das curvas de partição: no presente estudo, foi utilizada a função “média móvel”, que é a função base do *excel* para suavização de curvas. Contudo, existem modelos de ajuste específicos para curvas de partição (Sampaio e Tavares, 2005), os quais são especialmente úteis quando se pretende avaliar os limites inferiores e superiores da curva;
- ✓ Correlacionar o sinal de ΔP com a estratificação do leito, permitindo assim criar funções de regulação e controle da estratificação no jigsaw.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRICOLA, G. **De Re Metallica.**, Translated From the First Latin Edition of 1556, p.638.

ALARCÓ, M.A.O; Rúa, M.O.B. Hydrodynamic study of gravity concentration devices type JIG., **Prospect**, Vol 13, N° 1, 52-58, 2015. 2015.

AMBRÓS, W.M. Novos Aspectos da Estratificação de Partículas em Jigues Descontínuos. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de minas, Metalúrgica e de Materiais) - Programa de Pós- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

AMBRÓS, W.M. *et al.* Some observations on the influence of particle size and size distribution on stratification in pneumatic jigs. **Powder Technology**, [s. l.], v. 342, p. 594–606, 2019.

AMBRÓS, W.M. *et al.* Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste. **Waste Management**, [s. l.], v. 60, p. 75–83, 2017.

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, 2014.

BURT, R. Role of gravity concentration in modern processing plants. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 1291–1300, 1999.

BURT, R. O.; MILLS, C. Gravity Concentration Improving. [s. l.], p. 438–447, 1984.

CRESPO, E.F.J.N.V. Estratificação de leitos de jigagem, Modelo cinético Multicomponente. Tese de doutorado (Doutor em Engenharia de Minas), Universidade do Porto, Porto, 2003, 222p

CAZACLIU, B. *et al.* The potential of using air jigging to sort recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 66, p. 46–53, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.057>.

COELHO, A.; DE BRITO, J. 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, 2013.

COELHO, A.; BRITO, J. 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, 2013.

CHAVES, A. P.; FILHO, R.C.C, **Teoria e Prática do tratamento de minérios**, Oficinas de textos, São Paulo, 2013.

CARRISSO, R. C. C.; CHAVES, A. P. **Mecanismos atuantes na concentração gravítica e principais equipamentos utilizados na concentração centrífuga; Concentração gravítica. 2. Concentração centrífuga.** CETEM/MCT, Série Tecnologia Mineral, ISSN 0103-7382, Rio de Janeiro, 2002.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications.** MCGRAW HILL Education, New York, 2015.

DONG, Liang *et al.* Experimental and numerical study of the characteristics of the forced oscillation in a pulsation fluidized bed (PFB) for coal separation. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 234, p. 116459, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116459>.

GAUDIN, A.M. **Principles of Mineral Dressing.** McGraw-Hill, New York, N.Y., 1939 pp. 70-84.

GSCHWENTER, V. L.S. *et al.* Production of High-Quality Coarse Recycled Aggregates through a Two-Stage Jigging Process. **Minerals**, [s. l.], v. 12, n. 5, 2022.

GÜLCAN, E. A novel approach for sensor based sorting performance determination. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 146, n. June 2019, p. 106130, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106130>.

GHOSH, T. *et al.* Upgrading low-rank coal using a dry, density-based separator technology. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, [s. l.], v. 34, n. 3–4, p. 198–209, 2014.

JAINSA-JOIUIELA, Sirkka Liisa. Future Automation Systems in Context of Process Systems and Minerals Engineering. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 52, n. 25, p. 403–408, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.570>.

HE, J. *et al.* **Mineralogical characterization of the typical coarse iron ore particles and the potential to discharge waste gangue using a dry density-based gravity separation.** **Powder Technology**, [s. l.], v. 342, p. 348–355, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.010>.

HU, K. *et al.* Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste. **Waste Management**, [s. l.], v. 85, p. 396–404, 2019.

HUGHES,N.; ROUX, M.L.; CAMPBELL, Q.P. **Dry processing for coal preparation : a review.** [s. l.], n. 1, 2019.

KING, R.P. **A quantitative model for gravity separation unit operations that rely on stratification.** **APCOM 87 Proceedings of the 20th International ...**, [s. l.], v. 2, p. 141–151, 1987. Disponível em: <http://www.saimm.co.za/Conferences/Apcom87Metallurgy/141-King.pdf>.

KUMAR,D.; KUMAR, D. **Dry Cleaning Process.** *In:* SUSTAINABLE MANAGEMENT OF COAL PREPARATION. [S. l.]: Elsevier, 2018. p. 115–130.

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

LOCKHART, N.C. Dry beneficiation of coal, **Powder Technology**, Volume 40, Issues 1–3, 1984, p. 17–42, ISSN-0032-5910, [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(84\)85053-6](https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)85053-6).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032591084850536>

LINS, F. A. F. **Concentração gravítica**. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). *Tratamento de Minérios*. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 241–270.

MAYER, F.W., **Fundamentals of a Potential Theory of the Jigging Process**, Bochum, Alemanha, 1964.

MAURAN, S.; RIGAUD, L.; COUDEVYLLE, O. **Application of the carman-kotenzky correlation to a high-porosity and anisotropic consolidated medium: The compressed expanded natural graphite**. *Transport in Porous Media*, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 355–376, 2001.

RAO, B. Venkoba *et al.* **Experimental Validation of Extended Stratification Model Part B: Coal-Ash Segregation Studies in a Batch Jig Operation**. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, [s. l.], v. 70, n. 2, p. 375–394, 2017.

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, 2007.

RONG, R. X.; LYMAN, G. J. The effect of jigging time and air cycle on bed stratification in a pilot scale Baum jig. *Fuel*, [s. l.], v. 71, n. 1, p. 115–123, 1992.

SAMPAIO, C. H. *et al.* Coal beneficiation of Candiota mine by dry jigging. *Fuel Processing Technology*, [s. l.], v. 89, n. 2, p. 198–202, 2008.

SARAMAK, D. Challenges in raw material treatment at the mechanical processing stage. *Minerals*, [s. l.], v. 11, n. 9, 2021.

SAMPAIO, C.H. *et al.* Construction and demolition waste recycling through conventional jig, air jig, and sensor-based sorting: A comparison. *Minerals*, [s. l.], v. 11, n. 8, 2021.

SAMPAIO, C. H. *et al.* Stratification in air jigs of concrete/brick/gypsum particles. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 109, p. 63–72, 2016.

SARDANA, D. *et al.* CSR ‘sustainability’ practices and firm performance in an emerging economy. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 258, p. 120766, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120766>.

SMITH, P.G. A study of fluidised bed granulation. **Ramsay Laboratory of Chemical Engineering**, [s. l.], n. February, 1980. Disponível em: <http://discovery.ucl.ac.uk/1317871/>.

SOUZA, C. D *et al.* The complexity of stakeholder pressures and their influence on social and environmental responsibilities. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 358, n. April, p. 132038, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132038>.

TAGGART, A.F. **Handbook of Mineral Dressing**. New York: John Wiley, 1945.

TASHAKORI-ASFESTANI, F. *et al.* Effect of inter-particle forces on solids mixing in fluidized beds. **Powder Technology**, [s. l.], v. 415, n. July 2022, p. 118098, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118098>.

TAVARES, L. M. Monte Carlo simulations on the potential energy theory of jiggling. **Coal Preparation**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 71–83, 1999.

TAVARES, L. M.; KING, R. P. **A Useful Model for the Calculation of the Performance of Batch and Continuous Jigs**. **Coal Preparation**, [s. l.], v. 15, n. 3–4, p. 99–128, 1995.

VENKOBARAO, B. An improved stochastic model to describe partition surfaces of entire segregated batch jig bed. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 170, n. June, p. 107064, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107064>.

VERAS, M. M. *et al.* Affinity of dual energy X-ray transmission sensors on minerals bearing heavy rare earth elements. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 147, n. December 2019, 2020.

WARKE, S.; PURANIK, V. S. Comparison of energy consumption of ABS and PLA while 3 D printing with fused deposition modeling process. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], n. xxxx, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.509>.

WASKOW, R. P. *et al.* Optimization and dust emissions analysis of the air jiggling technology applied to the recycling of construction and demolition waste. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 266, n. August 2019, 2020.

WEINSTEIN, R; SNOBY R. **Advances in dry jiggling improves coal quality**. *Mining Engineering* 59.1 29-34. 2007.

WILLS, Barry A.; FINCH, James A. **Gravity Concentration**. **Wills' Mineral Processing Technology**, [s. l.], p. 223–244, 2016.

WOOLLACOTT, L. C. Accounting for the effect of particle density and size on stratification in mineral jigs: A preliminary model based on particle settling rates. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 178, n. January, p. 107404, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107404>.

WOOLLACOTT, L. C. The impact of size segregation on packing density in jig beds: An X-ray tomographic study. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 131, n. October 2018, p. 98–110, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.017>.

WOOLLACOTT, L. C.; BWALYA, M.; MABOKELA, L. A validation study of the King stratification model. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, [s. l.], v. 115, n. 2, p. 93–101, 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, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.04.003>.

WOOLLACOTT, L. C.; TRIPATHY, A.; POTGIETER, H. The effect of operating conditions on density stratification in a batch jig I: The influence on the equilibrium stratification profile. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 170, 2021.

WOOLLACOTT, L. C.; TRIPATHY, A. K.; POTGIETER, J. H. The effect of operating conditions on density stratification in a batch jig II: The influence on stratification kinetics. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 164, n. October 2020, p. 106846, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106846>.