UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE EMPACOTAMENTO, FLUIDIZAÇÃO E TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE CASCALHOS DA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS

HEITOR OTACÍLIO NOGUEIRA ALTINO

Uberlândia - MG
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE EMPACOTAMENTO, FLUIDIZAÇÃO E TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE CASCALHOS DA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS

Heitor Otacílio Nogueira Altino

Orientador:
Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química;

Uberlândia - MG

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFUcom dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A468 2023

Altino, Heitor Otacílio Nogueira, 1993-
Estudo das Características de Empacotamento, Fluidização e Transporte Pneumático de Cascalhos da Perfuração de Poços de Petróleo e Gás [recurso eletrônico] / Heitor Otacílio Nogueira Altino. - 2023.

Orientador: Claudio Roberto Duarte.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.47
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química. I. Duarte, Claudio Roberto, 1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 01/2023, PPGEQ				
Data:	13 de fevereiro de 2023	Hora de início:	13:30	Hora de encerramento:	15:48
Matrícula do Discente:	11913EQU005				
Nome do Discente:	Heitor Otacílio Nogueira Altino				
Título do Trabalho:	Estudo das características de empacotamento, fluidização e transporte pneumático de cascalhos da perfuração de poços de petróleo e gás				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo de alternativas para transporte pneumático, separação e secagem de cascalho em ambientes offshore				
ODS-ONU:	ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Doutor: André Leibsohn Martins - PETROBRAS S.A., Professores Doutores: Maria do Carmo Ferreira - DEQ/UFSCar, Ricardo Amâncio Malagoni - FEQUI/UFU, Marcos Antônio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU e Cláudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/02/2023, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Amâncio Malagoni**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/02/2023, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **MARIA DO CARMO FERREIRA**, **Usuário Externo**, em 13/02/2023, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/02/2023, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Andre Leibsohn Martins**, **Usuário Externo**, em 13/02/2023, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4223057** e o código CRC **86D38138**.

Referência: Processo nº 23117.005220/2023-12 SEI nº 4223057

Dedico este trabalho ao meu orientador e
amigo Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde que
lutou para o desenvolvimento deste projeto,
mas infelizmente não pode ver sua conclusão.
Deus te abençoe meu amigo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado à vida, amor, força e as pessoas magníficas com quem eu convivo. Toda honra e glória seja dada a Ele.

A minha amada esposa Sarah Arvelos Altino e minha filha Cecília Arvelos Altino, por todo amor, carinho, conselhos e suporte.

Aos meus pais e irmã, Gilson Altino da Fonseca, Cleonice Nogueira Altino e Mísia Nogueira Altino, pelo amor e suporte durante toda minha trajetória de vida.

Ao meu querido orientador Prof. Carlos Henrique Ataíde (FEQ/UFU), que propôs e deu inicio ao desenvolvimento desse projeto, porém, infelizmente não pode ver sua conclusão.

Ao Prof. Cláudio Roberto Duarte (FEQ/UFU) por ter assumido a minha orientação em circunstâncias tão adversas e por ter dado continuidade ao projeto com tanto empenho.

Ao Prof. Giovani Aud Lourenço (IFG), que foi como um orientador para mim e me ajudou em diversas partes ao longo do desenvolvimento desse projeto.

A Profª. Renata Nepomuceno da Cunha (UNIPAM) por me iniciar e incentivar a prosseguir na carreira acadêmica.

Aos demais professores da área de operações unitárias da FEQ/UFU, Marcos Antônio de Souza Barroso, Marina Seixas Pereira e Ricardo Amâncio Malagoni.

Ao eletricista Edmilson Rodrigues (LCL Automações), o especialista em usinagem Roberto Martins (Martins Usinagem) e o engenheiro Joaquim Moroni (DESPA) por toda ajuda e suporte técnico ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) (processo n° 88887.338479/2019-00), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPMIG) pelo apoio financeiro.

À empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras®) por todo apoio financeiro e técnico durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e colegas de laboratório Vinícius Pimenta, Leonardo Carvalho e Thais Logetto pelo auxilio no desenvolvimento deste trabalho.

“Porque me viste, creste?
Bem-aventurados os que não viram e creram.”
(João 20:29)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **i**
LISTA DE TABELAS ..... **v**
RESUMO ..... **vi**
ABSTRACT ..... **viii**
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO **1**
1.1 Objetivo geral 3
1.2 Objetivos específicos 3
1.3 Apresentação do trabalho 4
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **6**
2.1 Sistema de controle de sólidos 6
2.2 Comportamento *bulk* de materiais granulares úmidos 10
2.2.1 Estados de saturação 10
2.2.2 Agregação e desagregação de partículas 12
2.2.3 Influência da umidade no comportamento de cascalhos de perfuração 14
2.3 Propriedades *bulk* de leitos fixos 15
2.3.1 Definições das propriedades bulk 15
2.3.2 Métodos e normas de determinação da densidade bulk 17
2.4 Indicadores de escoabilidade de materiais granulares 19
2.5 Características de fluidização de materiais granulares 21
2.6 Características de desaeração de materiais granulares 26
2.7 Transporte pneumático de materiais granulares 28
2.7.1 Elementos principais de sistemas de transporte 29
2.7.2 Tipos de sistemas de transporte 31
2.7.3 Modos e regimes de transporte 34
2.7.4 Diagramas de estado 37
2.7.5 Predição do modo de transporte pneumático através das propriedades do material 40
2.7.6 Sistemas inovadores 44
2.7.6.1 Vasos de pressão 45
2.7.6.2 Sistemas de formação de destruição de plugues 50
2.7.7 Sistemas de transporte pneumático de cascalhos de perfuração 54

CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE DENSIDADE *BULK* DE MATERIAIS GRANULARES.....63
3.1 Introdução.....63
3.2 Materiais e métodos.....64
3.2.1 Materiais granulares.....64
3.2.2 Caracterização dos materiais granulares.....66
3.2.3 Desenvolvimento de sistema para determinação da densidade bulk.....67
3.2.4 Calibração e verificação do sistema de medição de densidade bulk.....71
3.2.5 Planejamento experimental.....73
3.2.6 Otimização da densidade bulk compactada.....74
3.3 Resultados e discussão.....75
3.3.1 Análise estatística dos resultados do planejamento experimental.....75
3.3.2 Determinação da região de densidade bulk compactada ótima.....79
3.3.3 Influência das variáveis operacionais na densidade bulk compactada.....83
3.3.4 Influência das características das partículas nas propriedades do leito empacotado.....87
3.4 Conclusão.....87
CAPÍTULO 4 – INFLUÊNCIA DO CONTEÚDO DE UMIDADE NAS PROPRIEDADES DE MANEJO DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO.....89
4.1 Introdução.....89
4.2 Materiais e métodos.....90
4.2.1 Cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás.....90
4.2.2 Frações de óleo, água e sólidos.....91
4.2.3 Composição química do óleo.....92
4.2.4 Caracterização dos cascalhos secos.....92
4.2.4.1 Densidade aparente e real.....92
4.2.4.2 Esfericidade das partículas.....93
4.2.4.3 Distribuição de tamanho de partículas.....93
4.2.4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS) 94
4.2.4.5 Espectrometria de fluorescência de raios X.....94
4.2.5 Procedimento de umidificação do material.....94
4.2.6 Microscopia óptica.....95
4.2.7 Determinação das propriedades bulk de leitos fixos.....96
4.2.8 Indicadores de escoabilidade.....97

4.2.9 Fluidização e desaeração 98
4.3 Resultados e discussão 102
4.3.1 Características de cascalhos de perfuração secos 102
4.3.2 Efeitos do conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração 104
4.3.2.1 Agregação e desagregação de partículas 104
4.3.2.2 Propriedades bulk de leitos fixos 106
4.3.2.3 Indicadores de escoabilidade 110
4.3.2.4 Comportamento de fluidização 111
4.3.2.5 Capacidade de desaeração 118
4.3.2.6 Previsão do regime de transporte pneumático 122
4.3.2.7 Comportamento geral de manejo 126
4.3.3 Correlações das propriedades de manejo de cascalhos 128
4.3 Conclusão 131
CAPÍTULO 5 – TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO 134
5.1 Estrutura física do sistema de transporte pneumático 134
5.2 Estruturas elétrica e eletrônica do sistema de transporte pneumático 144
5.2.1 Sistemas de controle de alimentação elétrica 144
5.2.2 Sistema de supervisão e controle (SCADA) da operação de transporte pneumático 145
5.2.3 Sistema de supervisão e aquisição de dados 148
5.3 Descrição da operação de transporte pneumático 150
5.4 Análise do comportamento de descarga do vaso de pressão e transporte pneumático dos cascalhos de perfuração 152
5.4.1 Planejamento experimental 152
5.4.2 Análise estatística dos resultados do planejamento experimental 159
5.4.3 Otimização das condições operacionais 162
5.4.4 Influência das variáveis operacionais no comportamento de descarga do vaso e transporte pneumático de cascalhos de perfuração 167
5.5 Conclusão 181
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES 184
6.1 Conclusões 184
6.2 Sugestões para trabalhos futuros 186
REFERÊNCIAS 188

APÊNDICE A 201
A.1 Estimativa de volume de material empacotado pelas medições do sensor de distância.. 201
A.2 Informações adicionais 203
APÊNDICE B 211
APÊNDICE C 215
APÊNDICE D 225

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrutura divisão e interligação entre os capítulos da tese. 5
Figura 2.1 – Esquema simplificado do processo de perfuração em sonda *offshore*. 7
Figura 2.2 – Esquema simplificado da planta brasileira de controle de sólidos. 9
Figura 2.3 – Ilustração dos três estados de saturação dos pós úmidos. 11
Figura 2.4 – Mecanismos de formação e crescimento de aglomerados de partículas sólidas. . 13
Figura 2.5 – Representação de um material granular empacotado em diferentes estados. 16
Figura 2.6 – Ilustração do ângulo de repouso de uma pilha de cascalhos. 20
Figura 2.7 – Queda de pressão sobre leitos fixos e fluidizados. 22
Figura 2.8 – Diagrama de classificação da fluidização de pós proposto por Geldart (1973). .. 24
Figura 2.9 – Comportamento típico de desaeração de um material granular genérico. 26
Figura 2.10 – Ilustração dos constituintes principais de um sistema de transporte pneumático. 30
Figura 2.11 – Diagrama dos diversos sistemas de transporte pneumático disponíveis. 31
Figura 2.12 – Ilustração dos diversos sistemas transporte pneumático disponíveis. 33
Figura 2.13 – Regimes de transporte em tubulações horizontais. 36
Figura 2.14 – Regimes de transporte em tubulações vertical. 37
Figura 2.15 – Diagrama de estado para o transporte horizontal. 38
Figura 2.16 – Diagramas de predição do regime de transporte: (a) Geldart (1973) alterado por Jones *et al.* (2008), (b) Molerus (1982) alterado por Jones *et al.* (2008), (e) Dixon (1979) alterado por Jones *et al.* (2008), (d) Pan (1999), (e) Mainwaring *et al.* (1987), (f) Chambers *et al.* (1998), (g) Fargette *et al.* (1997) alterado por Jones *et al.* (2008) e (h) Jones *et al.* (2008). 41
Figura 2.17 – Ilustração de um vaso de pressão. 45
Figura 2.18 – Ciclo típico para um único vaso de pressão operando sem válvula de descarga. 46
Figura 2.19 – Curvas características típicas de descarga de vaso de pressão. 49
Figura 2.20 – Sistema de vaso de pressão duplo com alimentação de helicoidal. 50
Figura 2.21 – Relação entre pressão e comprimento do plugue para transporte em fase densa. 51
Figura 2.22 – Sistema de transporte pulsante. 52
Figura 2.23 – Sistema de transporte em fase densa por plugues com injeção de ar por *boosters*. 53
Figura 2.24 – Sistema de transporte pneumático de cascalhos utilizando bombas. 54
Figura 2.25 – Sistema de transporte pneumático de cascalhos utilizando vasos de pressão. ... 56
Figura 2.26 – Sistema de transporte pneumático de cascalhos por múltiplos vasos de pressão. 57
Figura 2.27 – Diferentes sistemas de vasos de pressão: (a) vaso de pressão com alimentação helicoidal e (b) vaso de pressão com mecanismo de dosagem por pistão. 58

Figura 2.28 – Sistema de transporte pneumático de cascalhos por diferentes vasos de pressão.60
Figura 2. 29 – Sistema de controle de injeção de ar na linha de transporte de cascalhos. 61
Figura 3.1 – Imagens de microscopia dos materiais estudados: GLB (a), GSB (b), S50 (c), S100 (d), FCF (e) FCC (f), BCC (g), BRH (h), SC (d) e SC (e). 64
Figura 3.2 – Sistema experimental desenvolvido para a aquisição de dados do processo de compactação por batidas de materiais granulares.....68
Figura 3.3 – Volume inicial dos materiais para todos os experimentos realizados.....70
Figura 3.4 – Desvio do valor de referência de densidade *bulk* de todos os materiais estudados.72
Figura 3.5 – Influência da frequência (x_2) e amplitude (x_3) das batidas na densidade *bulk* de: GLB (a), GSB (b), S50 (c), S100 (d), FCF (e) FCC (f), BCC (g), BRH (h), SC (d) e SC (e). 82
Figura 4.1 – Imagens de MEV nas ampliações de 300x (a), 1000x (b) e 5000x (c).....91
Figura 4.2 – Micrografias dos cascalhos em diferentes conteúdos de umidade: 1,3% (a), 5,4% (b), 7,7% (c), 10,0% (d), 12,5% (e), 15,2% (f), 21,0% (g), 27,6% (h), 35,2% (i) e 44,0 (j).....95
Figura 4.3 Sistema experimental de medida do ângulo de repouso (*AoR*).....97
Figura 4.4 – Sistema experimental para fluidização e desaeração de cascalhos de perfuração.99
Figura 4.5 – Resultados da análise de EDS do cascalho de perfuração secos.....103
Figura 4.6 – Resultados de FRX do cascalho de perfuração seco.....104
Figura 4.7 – Diâmetro médio das partículas e quantidade de finos em função do conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração.....105
Figura 4.8 – Esquema de classificação do comportamento dos cascalhos de perfuração de acordo com o conteúdo de umidade. 106
Figura 4.9 – Efeito do conteúdo de umidade nas porosidades *bulk* aerada (ε_0) e compactada (ε_t) de cascalhos de perfuração. 108
Figura 4.10 – Efeito do conteúdo de umidade na porosidade *bulk* efetiva (ε_{eff}) de cascalhos.110
Figura 4.11 – Efeito do conteúdo de umidade na razão de Hausner (*HR*) de cascalhos.....111
Figura 4.12 – Curvas de fluidização dos cascalhos de perfuração agrupados por estado: seco (a), agregado/desagregado (b) e lama (c). 112
Figura 4.13 – Exemplos de desaeração (esquerda) e fluidização (direita) dos cascalhos nos estados: seco (1,3%) (a e b), agregado/desagregado (12,5%) (c e d) e pasta (35,2%) (e e f).113
Figura 4.14 – Efeito da umidade na taxa de expansão (BER) do leito de cascalhos. 115
Figura 4.15 – Efeito do conteúdo de umidade na permeabilidade (κ) de cascalhos. 117
Figura 4.16 – Efeito da umidade na velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) de cascalhos..118
Figura 4.17 – Curvas de desaeração dos cascalhos de perfuração agrupados por estado: seco (a), agregado/desagregado (b) e lama (c). 119

Figura 4.18 – Efeito do conteúdo de umidade no tempo de desaeração (t_{da}) dos cascalhos..120
Figura 4.19 – Efeito da umidade na predição do regime de transporte de cascalhos pelos diagramas: (a) Geldart (1973) modificado por Jones *et al.* (2008), (b) Molerus (1982) modificado por Jones *et al.* (2008), (c) Pan (1999), (d) Mainwaring *et al.* (1987), (e) Chambers *et al.* (1998), (f) Fargette *et al.* (1997) modificado por Jones *et al.* (2008) e (g) Jones *et al.* (2008). 124
Figura 4.20 – Resumo dos efeitos da umidade nos os parâmetros físico-químicos de cascalhos de perfuração, agrupados por estados: seco (a), agregado/desagregado (b) e lama (c).....127
Figura 5.1 – Diagrama ilustrativo do sistema de transporte pneumático construído. 135
Figura 5.2 – Vaso de pressão (Hydronics®, DPG-3B-AC). 139
Figura 5.3 – Auxiliador de descarga (*vibrapad*).....140
Figura 5.4 – Sistema de compressão do tipo parafuso (Gardner Denver®, ESM26).....140
Figura 5.5 – Reservatório de ar comprimido.....141
Figura 5.6 – Curva do tipo bola.....142
Figura 5.7 – Injetor de linha (*booster*). 143
Figura 5.8 – Tela do supervisório de operação do sistema de transporte pneumático. 146
Figura 5.9 – Diagrama ilustrativo de uma rede Modbus RTU. 147
Figura 5.10 – Sistema supervisório de monitoramento e aquisição de dados. 149
Figura 5.11 – Detalhes dos componentes do vaso de pressão de tubulação de transporte. 153
Figura 5.12 – Válvula de regulação da pressão (a) e válvula de regulação da vazão (b). 153
Figura 5.13 – Influência do grau de abertura das válvulas (19), (18) e (24) na vazão volumétrica nas tubulações (21), (17) e (27). 155
Figura 5.14 – Curvas massa (a) e pressão (b) em função do tempo durante a descarga do vaso. 157
Figura 5.15 – Influência das variáveis operacionais na resposta ótima da vazão de descarga (W), bem como pressão de descarga (P) e queda de pressão (ΔP/L) na linha esperados. 166
Figura 5.16 – Influência das variáveis q_2 e q_1 (a-c) e q_2 e q_3 (d-f) na vazão de descarga (W), pressão média de descarga (P) e queda de pressão na linha de transporte ($\Delta P/L$). 170
Figura 5.17 – Ilustração da influência de x_2 no comportamento de descarga do vaso momentos após o início da pressurização: $q_2 < 40$ m^3/h (1), $40 < q_2 < 160$ m^3/h (2) e $q_2 > 160$ m^3/h (3).171
Figura 5.18 – Influência das variáveis m e q_1 para $q_2 = 0{,}0$ m^3/h (a-c) e $q_2 = 195$ m^3/h (d-f) na vazão de descarga (W), pressão média de descarga (P) e queda de pressão ($\Delta P/L$).....173
Figura 5.19 – Ilustração da influência da variável m no comportamento de descarga do vaso: m = 130 kg (1), m = 77 kg (2) e q_2 m = 30 kg (3).....175

Figura 5.20 – Influência das variáveis q_3 e m (a-c) e q_3 e q_1 (d-f) na vazão de descarga (W), pressão média de descarga (P) e queda de pressão na linha de transporte ($\Delta P/L$). 177
Figura 5.21 – Diagrama de estado do transporte pneumático de cascalhos de perfuração secos. 178

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificações da escoabilidade do material. 21
Tabela 2.2 – Características dos modos de transporte pneumático. 34
Tabela 3.1 – Materiais granulares analisados. 65
Tabela 3.2 – Resultados do planejamento experimental para densidade *bulk* compactada dos materiais estudados. 77
Tabela 3.3 – Verificação dos resultados ótimos previstos pelos modelos empíricos. 81
Tabela 4.1 – Características de cascalhos de perfuração secos. 90
Tabela 4.2 – Parâmetros obtidos da análise de regressão múltipla. 130
Tabela 5.1 – Resultados do planejamento composto central. 161
Tabela 5.2 – Resultados de confirmação dos pontos ótimos preditos. 167

RESUMO

O processo de transporte pneumático dos cascalhos gerados durante a perfuração de poços de petróleo e gás sofre influência de diversos fatores associados às características do material e condições operacionais. O objetivo principal dessa tese foi aprofundar os estudos do transporte pneumático de cascalhos, além de investigar as condições ideais de operação, considerando o efeito da umidade nas propriedades de manejo do material, regime de transporte mais adequado e condições operacionais relacionadas ao processo. Para tal propósito, inicialmente foi desenvolvido um dispositivo preciso de determinação das propriedades *bulk* de leitos fixos de materiais granulares. Utilizando-se esse dispositivo, buscou-se avaliar o efeito do número, frequência e amplitude das batidas de leitos fixos empacotados com materiais granulares nos resultados de densidade *bulk* compactada. Em um segundo momento, buscou-se verificar a influência da umidade dos cascalhos na dinâmica de agregação/desagregação das partículas, propriedades *bulk* de leitos fixos (mensuradas com o dispositivo desenvolvido), escoabilidade, características de fluidização e comportamento de desaeração. As propriedades obtidas nessas análises foram denominadas propriedades de manejo. Com base nos dados obtidos, procurou-se estabelecer uma classificação dos diferentes comportamentos de manejo dos cascalhos conforme a umidade e realizar previsões da influência da umidade no regime de transporte pneumático mais adequado. Os resultados obtidos mostraram que o dispositivo desenvolvido permitiu a determinação das densidades *bulk* aerada e compactada com alta precisão (0,002 $g.cm^{-3}$) e exatidão (0,001 $g.cm^{-3}$). Além disso, a densidade *bulk* compactada foi mais influenciada pela frequência e amplitude das batidas. Quanto à influência do conteúdo de umidade nas propriedades de manejo dos cascalhos, os resultados permitiram a identificação de quatro estados característicos, denominados: seco (1,3-7,7%), agregado (7,7-15,2%), desagregado (15,2-27,6%) e de lama (27,6-44,0%). De forma geral, o incremento da umidade até 15,2% promoveu a formação de estruturas interparticulares mais aeradas, que apresentaram menor resistência ao escoamento de ar. No entanto, essas estruturas se mostraram mais estáveis, apresentando maior dificuldade para escoar, bem como para fluidizar e reter ar. O incremento da umidade além de 15,2% propiciou estruturas interparticulares mais densas e resistentes ao escoamento de ar. O material pôde fluir mais facilmente, retendo mais ar e sendo relativamente mais fácil de fluidizar. As previsões do regime de transporte indicaram que os cascalhos nos estados seco e de lama podem ser transportados apenas em fase diluída, enquanto aqueles no estado agregado/desagregado podem ser transportados em fase densa por plugues. Em geral, os cascalhos no estado seco apresentaram propriedades de manejo boas e estáveis em comparação

aos outros estados, sendo desejáveis para operações de manejo de cascalhos. Por fim, buscou-se apresentar o processo de dimensionamento, construção, instrumentação e controle de um sistema de transporte pneumático em fase densa e diluída de escala industrial de cascalhos no estado seco. Em seguida, utilizou-se a técnica de regressão múltipla vinculada a experimentos planejados para quantificar os efeitos das vazões de ar utilizadas para a pressurização do vaso, fluidização do material e aeração do material descarregado, bem como da massa de material carregado no vaso, nas variáveis: vazão de descarga, pressão média de descarga e queda de pressão na linha de transporte. Os resultados desse estudo permitiram mapear uma ampla faixa operacional de transporte em fase densa dos cascalhos de perfuração no estado seco, bem como identificar os pontos ótimos de operação nos quais as vazões de descarga eram elevadas e as quedas de pressão na linha não eram excessivas. Além disso, o estabelecimento do diagrama de estado em conjunto com a análise do sinal de pressão na linha de transporte em função do tempo, permitiram inferir sobre os regimes de transporte mais prováveis nos quais o material estava sendo transportado.

Palavras-chave: cascalhos; transporte pneumático; conteúdo de umidade.

ABSTRACT

The pneumatic conveying process of cuttings generated during the drilling of oil and gas wells is influenced by several factors associated with the characteristics of the material and operating conditions. The main objective of this thesis was to study the pneumatic conveying of drilling cuttings, in addition to investigating the ideal operating conditions, considering the effect of moisture on the material handling properties, the most adequate pneumatic conveying flow regime, and operational conditions for conveying. For this purpose, it was initially necessary to develop an accurate device to determine the bulk properties of fixed beds of granular materials. In addition, using this device, it was sought to evaluate the effect of the number, frequency, and amplitude of the taps of fixed beds packed with granular materials on the tapped bulk density results obtained. In a second moment, it was verified the influence of cuttings moisture content on the dynamics of aggregation/disaggregation of particles, bulk properties of fixed beds (measured with the developed device), flowability, fluidization characteristics, and de-aeration behavior. The properties obtained in these analyzes were called handling properties. Based on the data obtained, it was pursued to establish a classification of the different handling behaviors of cuttings according to the moisture content and to make predictions of the influence of moisture in the most suitable conveying flow regime. The results obtained showed that the developed device allowed the determination of loose and tapped bulk densities with high precision (0.002 $g.cm^{-3}$) and accuracy (0.001 $g.cm^{-3}$). In addition, the tapped bulk density was more influenced by the frequency and amplitude of the taps. Regarding the influence of moisture content on the drilling cuttings handling properties, the results allowed the identification of four characteristic states, named: dry (1.3-7.7%), aggregate (7.7-15.2%), disaggregate (15.2-27.6%), and slurry (27.6-44.0%). It is possible to notice that the increment of moisture up to 15.2% promoted the formation of looser interparticle structures, which showed less resistance to airflow. However, these structures were steadier, showing greater difficulty to flow, as well as, fluidizing and retaining air. The continuous increment of moisture beyond 15.2%, propitiated denser and more resistant to airflow interparticle structures. The material could flow more easily, retaining more air and being relatively easier to fluidize. The conveying flow regime predictions indicated that cuttings in dry and slurry states can be conveyed only in the lean phase, while those in aggregate/disaggregated state can be conveyed in the dense phase plug flow. In general, cuttings in the dry state showed good and stable handling properties as compared to other states, being desirable for cuttings handling operations. Finally, it was presented the process of design, construction, instrumentation, and

control of a pneumatic conveying system in the dense and lean phase of industrial-scale for cuttings in the dry state. Then, the multiple regression technique linked to designed experiments was used to quantify the effects of air flows used for blow tank pressurization, material fluidization, and aeration of the discharged material, as well as the mass of material loaded in the blow tank, in the variables: discharge flow rate, average discharge pressure and pressure drop in the conveying line. The results obtained allowed mapping a wide operational range in which it was possible to pneumatically convey in the dense phase drilling cuttings in the dry state. It was also possible to identify the optimal operating points in which the discharge flow rates were high and the pressure drops in the conveying line were not excessive. In addition, the establishment of the state diagram, together with the analysis of the pressure signal in the conveying line as a function of time, allowed to infer about the most probable conveying regimes that took place during the experiments.

Keywords: drilling cuttings; pneumatic conveying; moisture content.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A produção de petróleo e gás contribui para uma importante parte da quantidade de energia necessária para atender a demanda global, com previsão de crescimento de produção total para 17 milhões de barris de óleo por dia até 2025. A expectativa é que a produção *offshore* seja responsável por aproximadamente 5 milhões de barris de óleo em 2025, representando 29% da produção total (ENSCOROWAN, 2019). No decorrer do processo de perfuração de poços de petróleo e gás natural ocorre a geração de cascalhos contaminados com fluidos de perfuração. Esses detritos são rochas produzidas pela broca ao perfurar o poço e retornam para a superfície sendo carregados pelo fluido de perfuração. Uma vez na superfície, a mistura de cascalhos e fluido de perfuração é encaminhada ao sistema de controle de sólidos, e submetida a diversas operações unitárias, como: desgaseificadores, peneiras vibratórias (*shale shakers*) primárias, hidrociclones, peneiras vibratórias secundárias e secadores Vortex, as quais visam a recuperação do fluido de perfuração e o tratamento dos cascalhos. Os cascalhos são descontaminados de modo a reduzir o teor residual orgânico a valores menores do que o limite máximo de 6,9% em massa, estipulado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Devido às limitações de espaço em uma sonda de perfuração, ocorre a transferência dos cascalhos da sonda *offshore* para uma embarcação de transporte, a qual se encarrega de fazer o transporte e o correto descarte em local georreferenciado pelo IBAMA. Para tal propósito, diversos métodos são utilizados: transporte pneumático, transporte hidráulico, *skip-and-ship*, correias transportadoras e transportadores helicoidais. Dentre estes, o transporte pneumático (fase diluída ou densa) é uma alternativa econômica e eficiente, notadamente para pequenas distâncias, podendo atingir altas cargas de transferência de sólidos (GERRARD *et al.*, 1999; IOGP, 2016).

Um dos principais desafios do manejo de cascalhos de perfuração, principalmente no transporte pneumático é a sua natural heterogeneidade, variando tanto o conteúdo de umidade quanto a faixa granulométrica. Isso é causado por diversos fatores, como taxas e condições de perfuração, fluidos de perfuração usados e eficiência do sistema de controle de sólidos (IOGP, 2016; SEATON; MORRIS, 2005). Em particular, o conteúdo de umidade (*MC*) dos cascalhos de perfuração é uma variável crítica, podendo variar desde pastas com mais de 60% de umidade em peso, até cascalhos secos (< 5%) com boa escoabilidade. Tais umidades são dependentes de diversos fatores, mas principalmente de qual etapa do sistema de controle de sólidos os cascalhos são originários. Por exemplo, os cascalhos provenientes de peneiras vibratórias são descritos com muito coesivos, com umidades variando de 10 a 20% em peso de uma mistura

de água e óleo. Por outro lado, cascalhos de perfuração provindos do fundo de secadores Vortex são geralmente sólidos de boa escoabilidade, com cerca de 5% de umidade. Tais variações na umidade acarretam mudanças nas propriedades de manejo dos cascalhos, o que, se não bem previsto e controlado, pode causar o entupimento de tubos, curvas e alimentadores (IOGP, 2016; SEATON; MORRIS, 2005).

Poucos são os trabalhos disponíveis na literatura abordando o transporte pneumático de cascalhos de perfuração, de modo que diversas questões ainda não foram esclarecidas: as faixas e mecanismos de mudança de comportamento dos cascalhos frente a umidade ainda não foram estabelecidos, a umidade ideal para o transporte não foi determinada, o regime e condições operacionais mais adequadas para o transporte do material ainda não foram estudados, e as condições operacionais que levam ao entupimento de tubulações ainda são desconhecidos. Assim, para responder essas questões é necessário aprofundar o estudo dos fenômenos envolvidos no transporte de cascalhos, bem como superar alguns gargalos tecnológicos, envolvidos nas medidas de propriedades do material e operação do sistema.

Em uma primeira etapa, é importante compreender como a umidade dos cascalhos influencia suas propriedades de manejo, como: densidade *bulk*, porosidade *bulk*, escoabilidade, fluidização e desaeração. Através de tal estudo é possível estabelecer uma classificação de comportamento do material frente ao conteúdo de umidade. A determinação de tais parâmetros permite utilizar diagramas de previsão do regime de transporte do material, sendo possível prever como a umidade pode influenciar o comportamento de transporte. Entretanto, para tal propósito é necessário desenvolver sistemas e técnicas de medição mais precisas da densidade e porosidade *bulk*. Os atuais sistemas de medição através de cilindros graduados possuem baixa precisão e exatidão, e o número, frequência e intensidade das batidas influenciam nos resultados, podendo levar a conclusões errôneas. Além disso, é preciso viabilizar metodologias para o estudo das características de fluidização e desaeração de materiais com alto conteúdo de umidade, uma vez que o comportamento pastoso do material acarreta dificuldades de medida.

Em uma segunda etapa, é necessário identificar o melhor regime de transporte pneumático, em fase diluída ou densa, sendo necessário ponderar quanto à umidade do material, desgaste das tubulações, capacidade de transporte, entupimentos e confiabilidade do sistema. Assim, mapas de operação do sistema, bem como as regiões ótimas de operação devem ser estabelecidos. Contudo, para o desenvolvimento de tal estudo é necessário realizar o dimensionamento, construção e instrumentação de um sistema de transporte pneumático que opere em fase densa e também em fase diluída. Tal conhecimento não é de fácil acesso na literatura e apresenta diversos desafios, como a escolha e dimensionamento de alimentadores,

separadores, tanques, injetores de linha e compressores adequados. Além disso, é necessário realizar a instrumentação do sistema através de válvulas atuadoras, sensores de vazão, pressão, umidade e temperatura e criar redes de comunicação para o controle e aquisição de dados entre os dispositivos.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal dessa tese foi aprofundar os estudos do transporte pneumático de cascalhos de poços de perfuração de petróleo e gás, além de investigar as condições ótimas de operação, considerando a umidade do material, regimes de transporte e condições operacionais.

1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema para a determinação das densidades e porosidades *bulk* aerada e compactada, utilizando medidas do volume do material durante o processo de compactação por batidas. Utilizar a técnica de regressão múltipla vinculada a experimentos planejados para quantificar os efeitos do número, frequência e amplitude das batidas na densidade *bulk* compactada. Assim, almeja-se estabelecer a região de densidade *bulk* compactada ótima de diferentes classes de materiais, principalmente para areias semelhantes aos cascalhos.
- Analisar a influência do conteúdo de umidade nas propriedades de manejo de cascalhos de perfuração. Para tanto, busca-se verificar a influência da umidade dos cascalhos de perfuração na dinâmica de agregação/desagregação das partículas, propriedades *bulk* de leitos fixos, escoabilidade, características de fluidização e comportamento de desaeração. Estabelecer uma classificação das diferentes características de manejo dos cascalhos de acordo com a umidade e realizar previsões da influência da umidade no regime de transporte pneumático de cascalhos de perfuração. Obter modelos preditivos dos parâmetros de manejo de cascalhos de perfuração para uma ampla faixa de conteúdo de umidade.
- Apresentar o processo de dimensionamento, construção, instrumentação e controle de um sistema de transporte pneumático em fase densa e diluída de escala industrial. Analisar a influência de condições operacionais, como: carga de material, vazão de ar e pressão de operação no comportamento de descarga de um vaso de pressão e transporte pneumático do material. Avaliar o regime mais adequado para o transporte dos cascalhos (fase densa ou diluída) levando-se em conta: umidade do material, possibilidade de desgaste e entupimento das tubulações, capacidade de transporte e queda de pressão na linha de transporte.

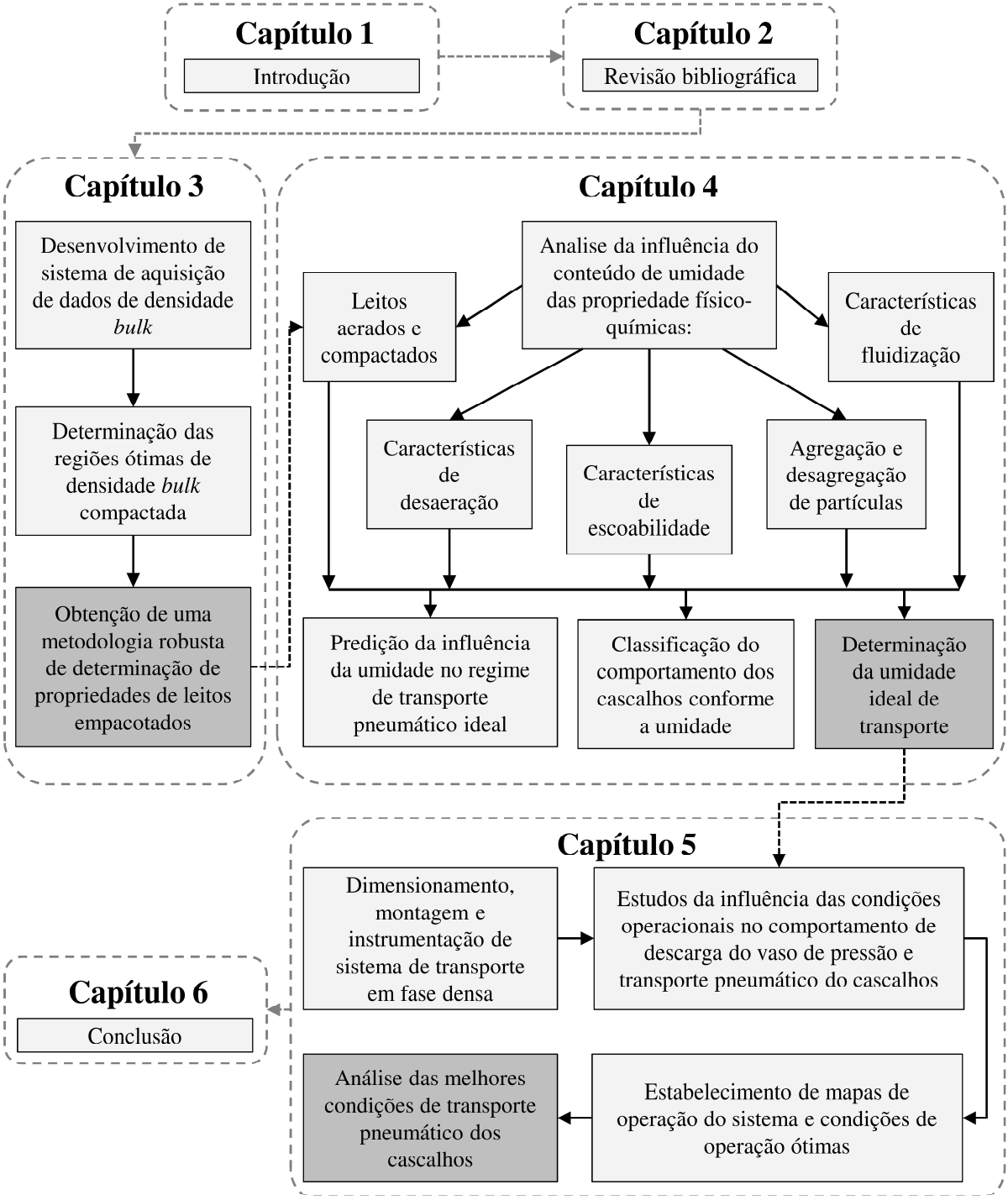
Estabelecer mapas de operação do sistema de modo a determinar as condições ótimas de operação, aumentando a confiabilidade da operação.

1.3 Apresentação do trabalho

A Figura 1 apresenta a estrutura de divisão e interligação entre os capítulos da tese. O desenvolvimento deste trabalho seguiu seis capítulos principais. No Capítulo 1, realizou-se uma breve introdução ao tema de transporte pneumático de cascalhos de perfuração, bem como as diversas variáveis relacionadas ao processo. Já no Capítulo 2 buscou-se apresentar os conceitos relevantes que foram empregados, de modo a nortear as atividades desenvolvidas no trabalho. No Capítulo 3, apresentou-se o desenvolvimento de um sistema de determinação automática das densidades e porosidades *bulk* aerada e compactada de materiais granulares. Utilizou-se a técnica de regressão múltipla vinculada a experimentos planejados para quantificar os efeitos do número, frequência e amplitude das batidas na densidade *bulk* compactada de dez diferentes materiais. Tal estudo permitiu estabelecer a região de densidade *bulk* compactada ótima de cinco diferentes classes de material. Assim, este dispositivo, em conjunto com as condições de compactação ótima de areias semelhantes ao cascalho, foi utilizado nos estudos do comportamento de empacotamento dos cascalhos em diferentes umidades no Capítulo 4. Neste, por sinal, o comportamento de agregação/desagregação das partículas, propriedades *bulk* de leitos fixos, escoabilidade, fluidização e desaeração foi avaliado para cascalhos com dez umidades diferentes. A partir desta análise foi possível estabelecer uma classificação das diferentes características de manejo dos cascalhos de acordo com o conteúdo de umidade. Além disso, previsões da influência da umidade no regime de transporte pneumático de cascalhos de perfuração foram realizadas. Por fim, discutiu-se a melhor faixa de conteúdo de umidade para se transportar os cascalhos de perfuração, a qual foi utilizada para a realização dos estudos do Capítulo 5. Tal capítulo foi iniciado com a apresentação do processo de dimensionamento, construção e instrumentação de um sistema de transporte pneumático em fase densa e diluída. Em seguida, utilizou-se a técnica de regressão múltipla vinculada a experimentos planejados para quantificar os efeitos das vazões de ar utilizadas para a pressurização do vaso, fluidização do material e aeração do material descarregado, bem como da massa de material carregado no vaso, nas variáveis resposta: vazão de descarga, pressão média de descarga e queda de pressão na linha de transporte. Os resultados desse estudo permitiram mapear uma ampla faixa operacional de transporte em fase densa dos cascalhos de perfuração, bem como identificar os pontos ótimos de operação nos quais as vazões de descarga eram elevadas e as quedas de

pressão na linha não eram excessivas. Além disso, o estabelecimento do diagrama de estado em conjunto com a análise do sinal de pressão na linha de transporte em função do tempo, permitiram inferir sobre os regimes de transporte mais prováveis nos quais o material estava sendo transportado. Por fim, no Capítulo 6 apresentou-se as principais conclusões do trabalho.

Figura 1.1 – Estrutura divisão e interligação entre os capítulos da tese.



Fonte: Autoria própria (2023).

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo buscou-se revisar os principais conceitos empregados no decorrer do trabalho. Tal revisão se iniciou com uma breve apresentação sobre o funcionamento do sistema de controle de sólidos de uma plataforma *offshore*. Em seguida, tendo em vista a variabilidade do conteúdo de umidade dos cascalhos, os principais mecanismos de influência da umidade no comportamento de materiais granulares foram expostos. Realizou-se então uma revisão dos conceitos fundamentais envolvendo as propriedades *bulk* de leitos fixos de materiais granulares, incluindo uma análise crítica dos métodos de determinação dessas propriedades. Posteriormente, os conceitos básicos de fluidização de desaeração de materiais granulares foram exibidos. Por fim, buscou-se apresentar os conceitos teóricos envolvidos em transporte pneumático, incluindo classificações básicas, diagramas de predição, sistemas não convencionais e os principais sistemas de transporte pneumático de cascalhos, bem como os desafios envolvendo esses sistemas.

2.1 Sistema de controle de sólidos

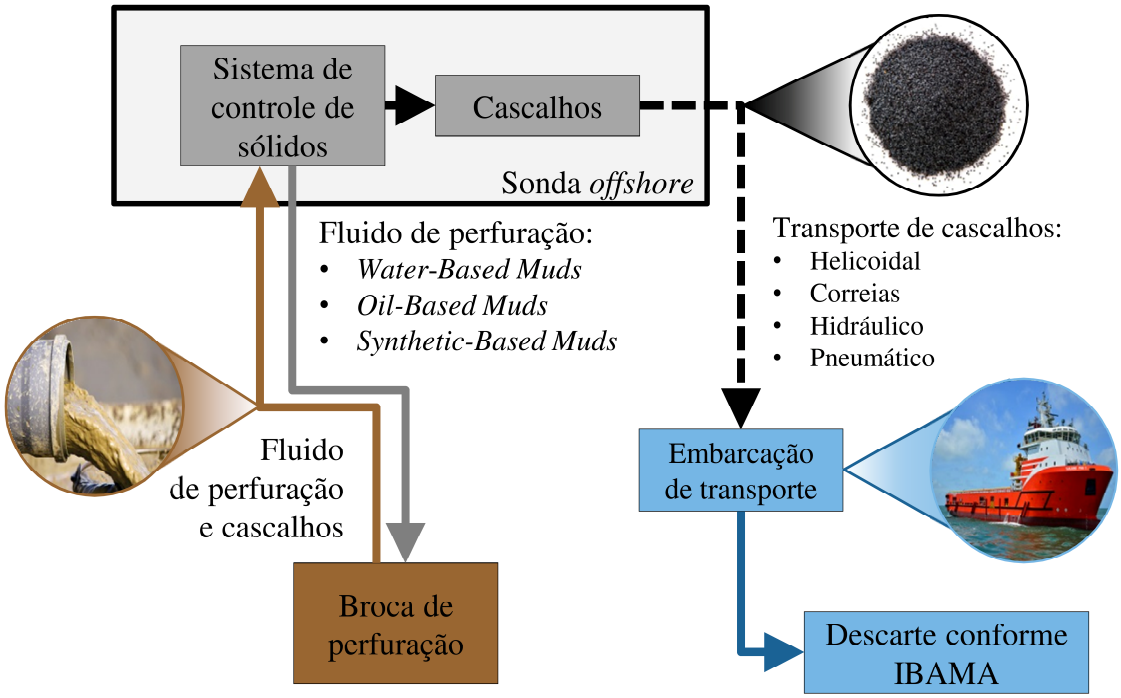
Para a obtenção de petróleo e gás, os poços *offshore* são perfurados por meio de uma broca, conectada a uma plataforma de perfuração por um tubo oco, que é rotacionado por meio de um motor elétrico ou hidráulico. Para manter a pressão, lubrificar e reduzir a temperatura da broca, um fluido de perfuração é injetado no interior do tubo oco e retorna à plataforma através da região anular entre a coluna de perfuração e a parede do poço. Os fluidos de perfuração são classificados de acordo com o seu constituinte principal. Os tipos mais comuns são:

i. Base água ou *Water-Based Muds* (WBMs), que emprega nas suas formulações água.
ii. Base óleo ou *Oil-Based Muds* (OBMs), que emprega nas suas formulações óleo mineral ou óleo diesel.
iii. Base sintética ou *Synthetic-Based Muds* (SBMs), que emprega nas suas formulações parafinas, olefinas internas, ésteres, acetais e etc.

Com o advento das leis e regulações ambientais mais restritivas, o uso de fluidos de perfuração não aquosos ou *Non-Aqueous Drilling Fluids* (NADFs) foi regulamentado nas perfurações *offshore*. Além disso, foi proibida a utilização de fluidos de base diesel ou óleo mineral. Os fluidos de base sintética são atualmente os mais utilizados nas perfurações no Brasil, notadamente em áreas marítimas, por apresentarem inúmeros benefícios incluindo elevado grau de lubricidade, boa estabilidade e biodegradação.

À medida que a broca gira e tritura as formações rochosas, pequenas partículas de rochas, conhecidas como cascalhos de perfuração, são geradas e ficam suspensas no fluido de perfuração, retornando à plataforma junto com o fluido. Os cascalhos são então separados por um sistema de controle sólido na plataforma e o fluido de perfuração retorna ao processo de perfuração. Dependendo da legislação ambiental do país, os cascalhos separados podem ser descartados de diferentes maneiras: reinjeção em poços *offshore*, tratamento e descarte *onshore* e descarte em ambientes marinhos após tratamento adequado. No Brasil, essa última técnica é predominantemente utilizada. Para isso, além de separar os sólidos, o sistema de controle de sólidos também visa reduzir o teor de olefinas presentes nos cascalhos a valores menores que 6,9% em peso, conforme regulamentado pelo IBAMA. Posteriormente o cascalho tratado é transferido para a embarcação de transporte e descartado em local georreferenciado pelo IBAMA (GERRARD *et al.*, 1999; IOGP, 2016). Um esquema ilustrativo do processo descrito acima é mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Esquema simplificado do processo de perfuração em sonda *offshore*.



Fonte: Autoria própria (2023).

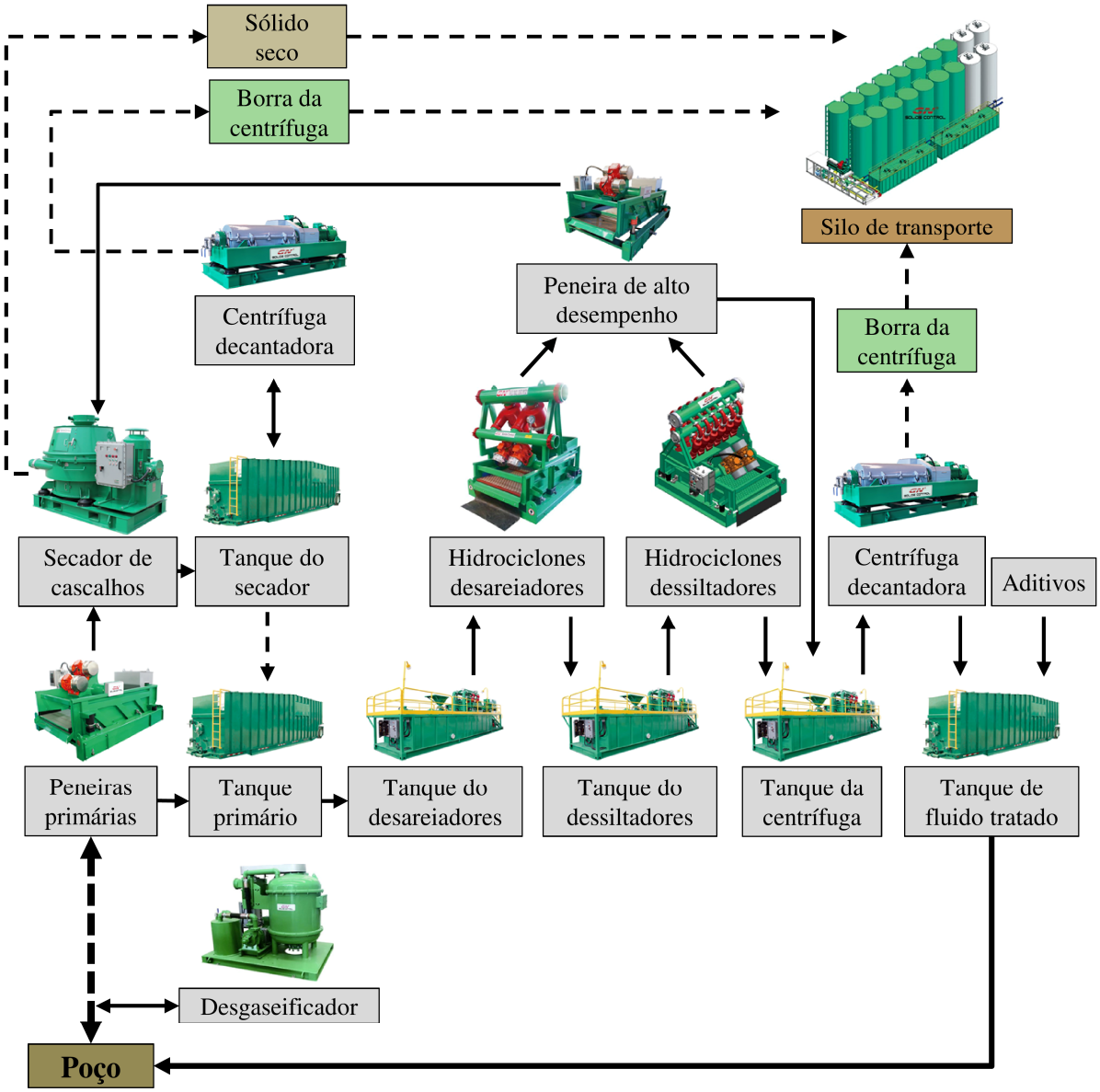
Em parte, as características dos cascalhos a serem transportados são dependentes do sistema de controle de sólidos utilizado. Em especial, a umidade dos cascalhos é uma variável importante e dependente de qual etapa do processo de separação o material é proveniente. Tais

variações de umidade influenciam nas características físico-químicas do material e, consequentemente, no comportamento de transporte pneumático, o que será objeto de estudo do Capítulo 4. Assim, cabe aqui realizar uma breve revisão das etapas do sistema de controle de sólidos de utilizado em plataformas brasileiras.

No Brasil, os equipamentos comumente encontrados nesse sistema são ilustrados na Figura 2.2. Inicialmente, a mistura de partículas sólidas e fluido de perfuração é direcionada a um desgaseificador atmosférico, visando a remoção de possíveis gases que estejam dispersos na mistura. Em seguida, a mistura passa pelas peneiras primárias, as quais promovem a movimentação das partículas sólidas, buscando uma rápida separação entre fluido e sólidos (PETRI JÚNIOR, 2014, 2017). Em geral, tais peneiras utilizam telas com aberturas entre 10 e 40 mesh, de forma a reter sólidos em uma faixa granulométrica que pode ser classificada como areias e cascalhos, 60 μm a 2000 μm, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (ABNT, 1995). Vale destacar aqui que diversas patentes reportam que os sólidos retidos nessas peneiras são materiais coesivos e apresentam entre 10 e 20% em peso de conteúdo líquido.

De modo a reduzir a umidade, os sólidos retidos na peneira primária são levados ao secador de cascalhos, enquanto que a mistura passante da peneira é direcionada para um tanque primário. Neste tanque, o líquido transbordado é levado para o tanque da bateria de hidrociclones desareiadores, os quais ainda buscam remover sólidos na faixa granulométrica classificada como areia (ABNT, 1995; PETRI JÚNIOR, 2014, 2017). O resíduo que sai do *underflow* desses hidrociclones e enviado às peneiras de alto desempenho. Já o líquido do *overflow* é transferido ao tanque da bateria hidrociclones dessiltadores, os quais visam remover partículas na faixa granulométrica classificada como silte, ou seja, 2 μm a 60 μm (ABNT, 1995; MOREIRA, 2011). Os resíduos do *underflow* destes hidrociclones também são transferidos às peneiras de alto desempenho, enquanto que o líquido do *overflow* é encaminhado ao tanque da centrífuga decantadora. Essa, por sua vez, busca recuperar o restante do fluido entremeado aos cascalhos e remover partículas com diâmetro entre 5 μm e 10 μm (MOREIRA, 2011). O fluido recuperado pela centrífuga é transferido a um tanque de fluido tratado que, após receber aditivos para recuperar suas propriedades físico-químicas, é injetado novamente no processo de perfuração (PETRI JÚNIOR, 2014, 2017). Já os sólidos separados são chamados de borra da centrífuga, possui conteúdo de umidade em torno de 20% em peso e é misturado a outros sólidos no silo de transporte (LIU; CHENG, 2016).

Figura 2.2 – Esquema simplificado da planta brasileira de controle de sólidos.



Fonte: Autoria própria (2023). Miniaturas de GN® Solids Control (www.gnsolidscontrol.com).

O material retido pela peneira de alto desempenho é enviado ao secador de cascalhos, enquanto que o líquido é direcionado ao tanque da centrífuga decantadora e posteriormente a própria centrífuga. Os sólidos provindos da peneira primária e de alto desempenho então são tratados pelo secador de cascalho. Os sólidos secos que atingem conteúdos de umidade menores que 5% também são direcionados ao silo para transporte (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT *et al.*, 2004; MEYER, 1971). Caso o líquido recuperado no secador de cascalho apresente sólidos, ele será encaminhado ao tanque do secador e posteriormente a uma centrífuga decantadora dedicada, a qual visa recuperar o restante do fluido e separar os sólidos mais finos. A borra da centrífuga dedicada será então

enviada ao silo de transporte e o líquido retornará para o tanque primário fechando o ciclo de processo. Porém, caso líquido recuperado no secador não apresente sólidos ou esteja dentro dos padrões, não será necessário utilizar a centrífuga decantadora e o líquido retornará para o tanque primário.

Por fim, no silo de transporte, os cascalhos são misturados para atingir o limite em peso de 6,9% de olefina, de modo atender a legislação e posteriormente serem transportados para a embarcação de transporte.

2.2 Comportamento *bulk* de materiais granulares úmidos

Como mostrado na seção anterior o conteúdo de umidade dos cascalhos pode variar demasiadamente, influenciando seu comportamento *bulk*. Assim, é importante entender como o conteúdo de umidade pode afetar as forças de interação entre partículas de um material granular, o que será revisado nessa seção.

2.2.1 Estados de saturação

A mobilidade das partículas de um material particulado é regida por complexas interações entre campos de força internos e externos. Se as forças externas são maiores do que as forças interparticulares, as partículas irão se movimentar com facilidade, do contrario, um comportamento coesivo é esperado (CROUTER; BRIENS, 2014; SCHULZE, 2008; WOODCOCK; MASON, 1987). A fricção e a coesão são as maiores forças interparticulares atuantes no material. A fricção atua nos pontos de contato das partículas, opondo-se ao movimento relativo entre elas. Nesse caso, a forma e a morfologia superficial das partículas afetam diretamente as forças de fricção. Já as forças de coesão se referem às forças de atração entre as partículas, incluindo as forças de van der Waals, ligações químicas locais, cargas eletroestáticas e forças de ponte líquida, originárias da tensão superficial líquida (ALTHAUS; WINDHAB, 2012; CROUTER; BRIENS, 2014). No caso de materiais não porosos, como por exemplo, as areias, a umidade é aderida preferencialmente na superfície das partículas, influenciando ambas as forças de fricção e coesão (CROUTER; BRIENS, 2014; MILLS, 2004). Inicialmente as forças de coesão são as mais afetadas pelo aumento de umidade, devido ao fortalecimento das ligações de pontes líquidas entre as partículas, o que acaba por reduzir mobilidade delas (ALTHAUS; WINDHAB, 2012; CROUTER; BRIENS, 2014; EMERY *et al.*, 2009). Contudo, a umidade também age simultaneamente como um lubrificante das partículas,

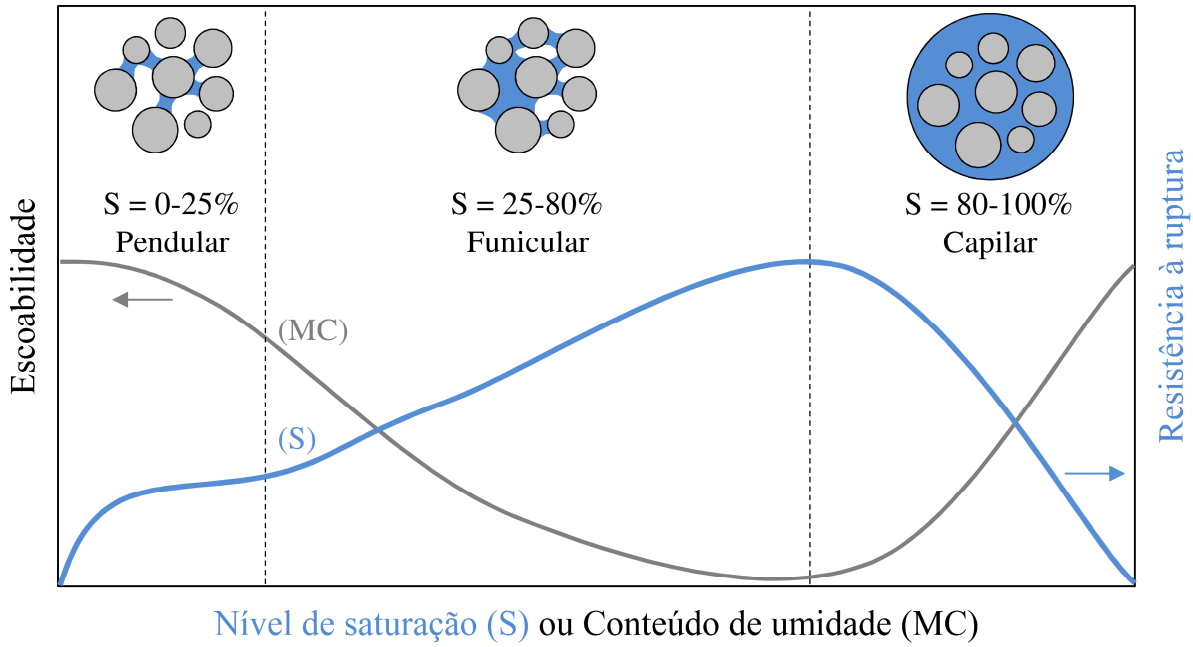
reduzindo as forças de fricção e aumentando a mobilidade delas (ALTHAUS; WINDHAB, 2012; COELHO; HARNBY, 1978; CROUTER; BRIENS, 2014).

A atuação da umidade em ambas as forças foi estudada por diversos autores para diferentes tipos de materiais granulares (ALTHAUS; WINDHAB, 2012; COELHO; HARNBY, 1978; FLEMMER, 1991; PIERRAT; CARAM, 1997). Conforme esses trabalhos, os materiais úmidos podem ser encontrados em três diferentes estados, conforme nível de saturação (*S*), ilustrados na Figura 2.3; pendular, funicular e capilar. O nível de saturação pode ser definido como a fração do volume interparticular de um leito empacotado que é preenchido por um líquido, conforma a equação:

$$S(\%mL.mL^{-1}) = \frac{V_l}{V_t - V_s} 100 \qquad (2.1)$$

em que: V_l é o volume total de líquido (água + olefina) no leito, V_t é o volume total do leito seco e V_s é o volume ocupado pelo sólido (baseado na densidade real).

Figura 2.3 – Ilustração dos três estados de saturação dos pós úmidos.



Fonte: Autoria própria (2023).

Em geral, quando o nível de saturação dos espaços interparticulares varia entre 0% e 25%, o material se encontra no estado pendular, onde a umidade está presente principalmente

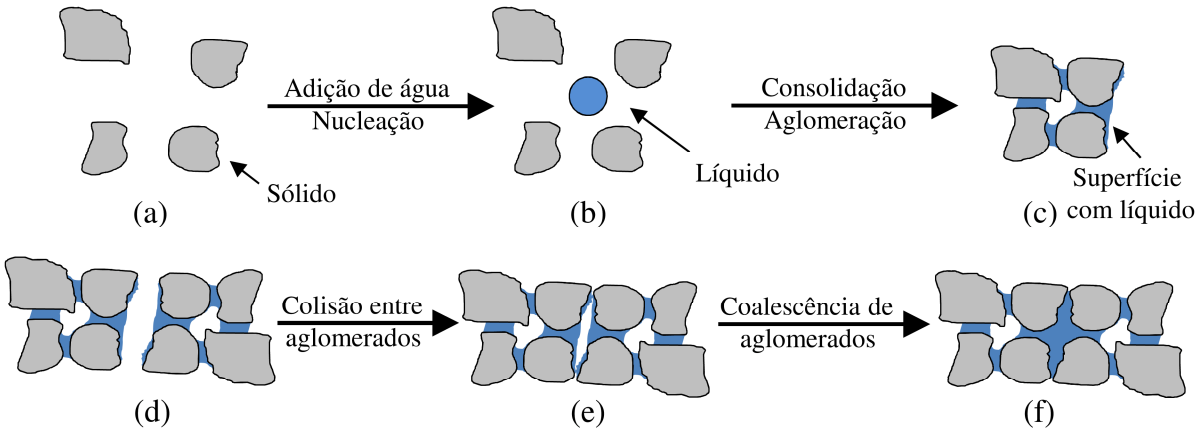
na forma de pontes líquidas nos pontos de contato entre as partículas. Nesse estado, um aumento no nível de saturação resulta em pouca intensificação das forças de coesão. Esse aumento se reflete no desenvolvimento da resistência à ruptura, geralmente ocasionado um aumento acentuado em pequenas saturações ate 10%, seguido de um platô entre 10% e 25%. A escoabilidade, aqui utilizada com um indicador da mobilidade das partículas, se reduz pouco. Quando o nível de saturação aumenta para faixa de 25% a 80%, o material se encontra no estado funicular. As forças coesivas se intensificam, clusters de partículas e pontes líquidas coexistem, formando uma continua rede de líquido intercalado com ar. Nesse estado, a resistência à ruptura do material sofre um aumento pronunciado, enquanto a escoabilidade se reduz. Tal fenômeno ocorre até um ponto de máximo, o qual marca o início do estado capilar, no qual o líquido interparticular lubrifica as partículas e aumenta o espaço entre elas, reduzindo as forças de coesão e fricção. A resistência à ruptura sofre uma gradual queda até um ponto de mínimo, enquanto a escoabilidade volta a aumentar continuamente até um ponto de máximo. Tais pontos são alcançados quando se atinge 100% de saturação, ou seja, quando todos os espaços porosos estão completamente preenchidos pelo líquido (ALTHAUS; WINDHAB, 2012; COELHO; HARNBY, 1978; FLEMMER, 1991; PIERRAT; CARAM, 1997).

2.2.2 Agregação e desagregação de partículas

Compreender a aglomeração/agregação de partículas e os mecanismos que causam tais fenômenos é importante em uma ampla gama de processos e aplicações. Em especial, no transporte pneumático, alterações no tamanho das partículas podem modificar completamente o comportamento de transporte (MILLS, 2004). Agregação e aglomeração são dois termos que são usados para descrever o agrupamento de partículas em uma amostra. Embora esses dois termos tenham significados distintos, eles têm sido usados de forma intercambiável, levando a uma confusão. De forma simplificada, o agrupamento via agregação é reversível, enquanto o agrupamento via aglomeração é irreversível (SINGER *et al.*, 2019).

A aglomeração/agregação de partículas por ação de um líquido ocorre por diferentes mecanismos os quais são dependentes das propriedades das partículas e do líquido. De forma geral, esse fenômeno corre por dois mecanismos principais: (i) nucleação de partículas e (ii) coalescência entre aglomerados/partículas. Tais mecanismos são ilustrados na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Mecanismos de formação e crescimento de aglomerados de partículas sólidas.



Fonte: Autoria própria (2023).

Durante o processo de mistura entre um líquido e um sólido, a aglomeração ocorre em meio a um balanço de forças entre o crescimento dos aglomerados/agregados e sua degradação. Assim, durante a nucleação, o líquido tem a função de prover as forças de ligação necessárias para resistir às forças de degradação e unir as partículas (a-b). Quando as ligações de ponte líquida se consolidam, os primeiro aglomerados são formados (c). Entretanto, para que o crescimento do aglomerado/agregado prossiga, é necessário que haja líquido livre na superfície dos aglomerados/agregados para que ocorra formação de novas pontes líquidas. Assim, a quantidade de líquido adicionado influencia diretamente a disponibilidade de líquido livre e, consequentemente, a extensão de crescimento do aglomerado/agregado por esse mecanismo. Nesse ponto (c), o aglomerado/agregado pode crescer tanto pela adesão de partículas na superfície com líquido livre, quanto pela colisão com outros aglomerados (d) com líquido livre. No momento da colisão (e), uma ligação com força suficiente para resistir às forças de separação deve ser formada. A qual é sucedida pela consolidação dos aglomerados (f) devido às forças exercidas pela fase líquida. Tal mecanismo prossegue até que as forças de ponte líquida formadas na colisão não sejam suficientes para contrabalancear as forças de separação (KRISTENSEN, 1995; KRISTENSEN; SCHAEFER, 1987; KRISTENSEN, 1996).

Por outro lado, a dispersão de um aglomerado/agregado de partículas ocorre quando as forças internas do aglomerado não são suficientes para manter as partículas unidas. Isso pode ocorrer, por exemplo, por saturação dos espaços interparticulares de modo a reduzir as forças de ponte líquida e afastar as partículas umas das outras. Assim, o aglomerado/agregado pode se desintegrar em diversos aglomerados menores, que posteriormente se dispersam em partículas. Alternativamente, um grande aglomerado pode erodir para formar pequenas partículas

diretamente. A dispersão termina quando o aglomerado/agregado está totalmente disperso em partículas primárias, considerando que as partículas primárias idealmente permanecem intactas (ALTHAUS; WINDHAB, 2012; LITSTER, 2017).

2.2.3 Influência da umidade no comportamento de cascalhos de perfuração

Até onde foi consultado, poucos trabalhos estão disponíveis na literatura abordando a influência do conteúdo de umidade nas características de manejo de cascalhos de perfuração. Malagalage (2018) estudou a influência do conteúdo de fluido de perfuração no comportamento de fluidização de areias com diferentes diâmetros, simulando cascalhos de perfuração (MALAGALAGE, 2018). O autor concluiu que, para todos os diâmetros, pequenas quantidades de fluido adicional (1%) foram suficientes para reduzir o coeficiente de atrito da mistura e aumentar a velocidade mínima de fluidização. Incrementos adicionais do conteúdo de fluido levaram a alterações insignificantes desses parâmetros até 6%, quando então um estado saturado foi alcançando onde o coeficiente de atrito ar-partícula foi significativamente aumentado, enquanto a velocidade mínima de fluidização foi reduzida.

A influência da umidade nas características de manejo dos cascalhos de perfuração também é descrita por várias patentes (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT *et al.*, 2004; MEYER, 1971), dependendo de qual parte do sistema de controle de sólidos os cascalhos são provenientes, como anteriormente citado na seção 2.1 e posteriormente na seção 2.7.7 Os cascalhos de perfuração provenientes de peneiras vibratórias são relatados como coesivos, possuindo umidades entre 10 e 20% em peso. Durante a perfuração, os cascalhos provenientes do processador de cascalhos podem variar de uma pasta com boa escoabilidade ou não, dependendo da quantidade de fluido removido pelo equipamento. Por outro lado, cascalhos de perfuração originários do fundo de secadores Vortex são geralmente sólidos de boa escoabilidade, com cerca de 5% de *MC*. Morris *et al.* (2005) também relatam que as propriedades de manejo dos cascalhos de perfuração podem ser melhoradas pela adição da quantidade correta de fluido de diluição. No entanto, a diluição dos cascalhos de perfuração aumenta o volume de material que precisa ser tratado, transportado e descartado. Na maioria dos casos, o custo dessas operações é baseado em volumes e, portanto, a técnica de diluição aumenta os custos das operações.

2.3 Propriedades *bulk* de leitos fixos

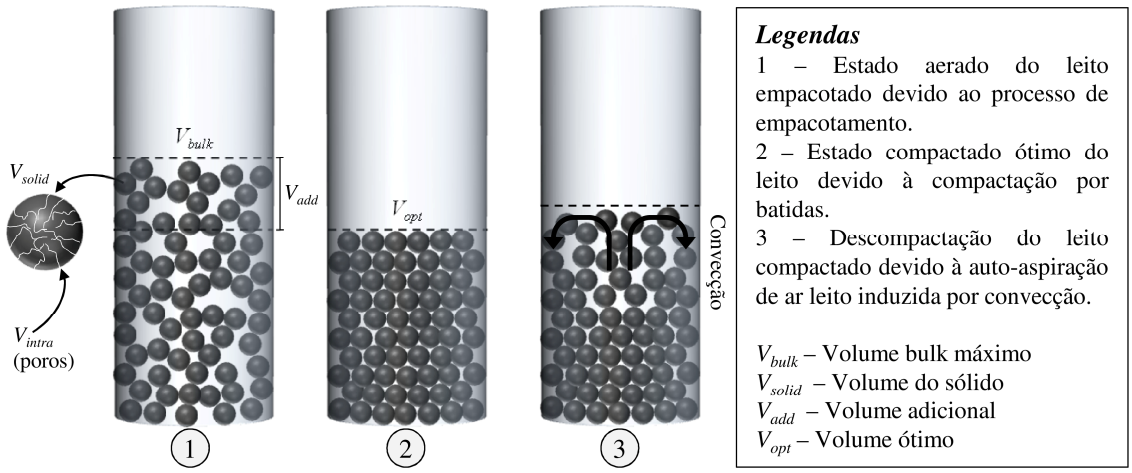
Durante o processo de tratamento, transporte e descarte dos cascalhos, em diversas ocasiões o material tem de ser empacotado em silos, tanques e vasos de pressão. Assim, é necessário revisar quais são as principais propriedades *bulk* de leitos fixos (empacotados) de materiais granulares, como será realizado na seção presente.

2.3.1 Definições das propriedades bulk

A densidade *bulk* é uma propriedade de materiais granulares que expressa a massa do material que pode ser empacotado em um volume específico (ABDULLAH; GELDART, 1999). Tal propriedade pode variar drasticamente durante o transporte, manipulação e armazenamento de materiais granulares, o que é causado por diversos fatores, como vibrações, batidas e métodos de empacotamento. Portanto, é importante estudar o comportamento de compactação e descompactação de materiais granulares, visando dimensionar a capacidade de abastecimento e logística de manejo desses materiais (EMAMI; TABIL, 2007; FASINA, 2006; WOODCOCK; MASON, 1987). A definição de densidade *bulk* pode ser classicamente dividida em duas partes, densidade *bulk* aerada e compactada. A primeira é a densidade obtida pela introdução do material em um recipiente na ausência de qualquer compressão aplicada. A segunda é a densidade aparente resultante da aplicação de compressão, por exemplo, impacto por batidas ou vibração (ASTM D7481-09, 2009; UNITED STATES PHARMACOPEIA, 2018).

O volume *bulk* (V_{bulk}) de materiais granulados empacotados apresenta dois componentes principais, mostrados na Figura 2.5 e Equação (2.2). O primeiro é o volume do sólido ocupado pelas partículas (V_{solid}), e o segundo é composto por três componentes: volume intraparticular (V_{intra}), composto por poros abertos e fechados, volume ótimo (V_{opt}), que corresponde a soma dos vazios interparticulares quando o sistema granular está em um estado compactado ótimo (2) e, por último, o volume adicional (V_{add}), que corresponde à quantidade adicional de ar retido no material empacotado (1) (TRAINA *et al.*, 2013).

Figura 2.5 – Representação de um material granular empacotado em diferentes estados.



Fonte: Autoria própria (2023).

O processo de compactação de um recipiente cilíndrico com material empacotado visa liberar o ar aprisionado no leito, reduzindo o V_{add} a zero, de modo que o material atinja um estado de compactação ótima do leito (2), permitindo determinar a densidade *bulk* compactada ótima (ρ_{opt}) e a porosidade *bulk* compactada ótima (ε_{opt}). O conhecimento deste estado proporciona ainda a determinação da porosidade adicional do material (ε_{add}), que reflete a capacidade de aeração do mesmo. Descontando V_{solid} da Equação (2.2), esta pode ser reescrita em termos da porosidade *bulk* aerada do material (ε_0), conforme a Equação (2.3). Sabendo que ε_{opt} e ε_{add} são dados respectivamente pelo primeiro e segundo termos da Equação (2.3), é possível determinar ε_{add} a partir da Equação (2.4) (TRAINA *et al.*, 2013). Vale ressaltar que o estado de empacotamento ótimo descrito acima indica apenas o estado de empacotamento experimental, que difere do estado de empacotamento teórico ótimo estatístico.

$$V_{bulk} = V_{solid} + V_{intra} + V_{opt} + V_{add} \tag{2.2}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{intra} + V_{opt}}{V_{bulk}} + \frac{V_{add}}{V_{bulk}} \tag{2.3}$$

$$\varepsilon_{add} = \varepsilon_0 - \varepsilon_{opt} \tag{2.4}$$

No caso de materiais particulados úmidos, a porosidade efetiva (ε_{eff}) é um parâmetro de grande importância que representa a fração do volume interparticular preenchido com ar em

comparação com o volume total do leito, como descrito pela Equação (2.5). No caso de leitos percolados por correntes de ar esse parâmetro é importante, pois a medida que volume interparticular é gradualmente preenchidos pelo líquido (V_{liq}), os caminhos interparticulares preenchidos com ar através dos quais o gás pode percolar mais facilmente são reduzidos (WRIGHT, PHILLIP C.; RAPER, 1998).

$$\varepsilon_{eff} = \frac{V_{intra} + V_{opt} + V_{add} - V_{liq}}{V_{bulk}} \tag{2.5}$$

2.3.2 Métodos e normas de determinação da densidade bulk

Devido à diversidade de fatores que influenciam na obtenção das densidades *bulk* aerada e compactada, como método de empacotamento, número, frequência e amplitude de batidas, além da precisão na medição do volume do material, a aquisição dessas propriedades deve ser realizada de forma metódica (FAYED; OTTEN, 1997; FIGURA; TEIXEIRA, 2007; RIBIÈRE *et al.*, 2007; SCHULZE, 2008). Para isso, os métodos de obtenção das densidades *bulk* aerada e compactada são regidos por diversas normas (ASTM D7481-09, 2009; UNITED STATES PHARMACOPEIA, 2018; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012). Embora existam algumas diferenças entre as normas, os métodos podem ser resumidos no procedimento a seguir. Introduzir uma massa conhecida de material em um cilindro graduado. Ler o volume inicial de material a olho nu. Sujeitar o cilindro a um processo de compactação batendo-o contra uma superfície plana até atingir um estado estacionário, onde a variação do volume do material é menor que a incerteza da medição. Ler o volume final do material. Calcular a densidade *bulk* aerada pela razão entre a massa e o volume inicial, e a densidade *bulk* compactada pela razão entre a massa e o volume final.

Este método apresenta três grandes desvantagens: o método de empacotamento do leito não é padronizado, o volume de material é medido a olho nu, que tem baixa precisão e é suscetível a medições incorretas do operador, e a dinâmica de compactação do leito, entre as medidas inicial e final, é completamente perdida. Para solucionar esses problemas, várias técnicas têm sido desenvolvidas na literatura, como por exemplos: o uso de câmeras para medir o volume do material (LUMAY; DORBOLO; VANDEWALLE, 2009; LUMAY; VANDEWALLE, 2004, 2009), o uso de métodos capacitivos e varredura de raios X para medir a densidade *bulk* (KNIGHT *et al.*, 1995; MENDEZ; ROMANSKI; TOMASSONE, 2011; NOWAK *et al.*, 2001; PHILIPPE; BIDEAU, 2002; RIBIÈRE *et al.*, 2007; RICHARD *et al.*,

2005) e o uso de sensores de distância para a medição indireta do volume do material a cada batida, conforme relatado em alguns artigos (FISCINA *et al.*, 2010; LUMAY *et al.*, 2012; LUMAY *et al.*, 2013; SAKER *et al.*, 2019; TRAINA *et al.*, 2013) e registrado em patentes (HEYA; EITOKU; SANADA, 2004; SASABE *et al.*, 2011). Este último método se destaca, sendo descrito como rápido, preciso e confiável por alguns fabricantes, além de permitir a obtenção da dinâmica de compactação (GRANUTOOLS, 2020; SASABE *et al.*, 2011).

Outro destaque é que as normas citadas mencionam duas condições de frequência e amplitude de batidas que podem ser utilizadas: 300 batidas/min e 14,0 ± 2,0 mm ou 250 batidas/min e 3,0 ± 0,3 mm. Pohorecki *et al.* e Mendez *et al.* destacam que a frequência e amplitude das batidas devem ser suficientes para que as forças interparticulares sejam superadas e o material sofra compactação adequada (MENDEZ; ROMANSKI; TOMASSONE, 2011; POHORECKI *et al.*, 2010). No entanto, em frequências e amplitudes muito altas, alguns autores (PHILIPPE; BIDEAU, 2002; RIBIÈRE *et al.*, 2007; ROSATO; ZHANG, 2006; SAKER *et al.*, 2019) reportam que as partículas viajaram de forma coletiva do topo do leito para o fundo, conforme esquematizado na Figura 2.5 (3). Tal fenômeno é conhecido como convecção (RICHARD *et al.*, 2005; ROSATO; ZHANG, 2006; SAKER *et al.*, 2019), e corresponde à transição entre os comportamentos do tipo sólido e do tipo fluido. O movimento das partículas acaba gerando auto-aspiração de ar para o leito, induzindo um aumento dos espaços interparticulares e resultando na descompactação do leito. Portanto, as condições utilizadas na determinação da densidade *bulk* podem levar a resultados diferentes, mesmo que o critério do número de batidas seja atendido (FIGURA; TEIXEIRA, 2007; RIBIÈRE *et al.*, 2007). Tendo, para cada material, condições de frequência e amplitude das batidas que proporcionam a máxima densidade *bulk* compactada (ótima) (ROSATO; ZHANG, 2006; SAKER *et al.*, 2019), o que vem sendo estudado por diversos autores (KNIGHT *et al.*, 1995; RIBIÈRE *et al.*, 2007; ROSATO; ZHANG, 2006; SAKER *et al.*, 2019).

Saker *et al.* (2019) analisaram a influência do número (*n*), frequência (*f*) e amplitude (*a*) das batidas na densidade *bulk* e razão de Hausner de diferentes tipos de pós farmacêuticos e alimentícios. Mendez *et al.* (2011) estudaram a influência de *n*, *f* e *a* no comportamento da densidade *bulk* de pós farmacêuticos. O comportamento de compactação das esferas de vidro também foi investigado em diferentes condições operacionais por diversos autores (KNIGHT *et al.*, 1995; PHILIPPE; BIDEAU, 2002; RIBIÈRE *et al.*, 2007). Entretanto, nos estudos citados, pequenos intervalos operacionais foram analisados, não contemplando todos os intervalos descritos nas normas (ASTM D7481-09, 2009; UNITED STATES PHARMACOPEIA, 2018; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012), o que pode limitar a

aplicabilidade dos resultados. Além disso, as influências das variáveis foram examinadas individualmente, o que inibe o estudo das interações entre as variáveis. Apenas algumas classes de materiais foram analisadas individualmente em estudos separados, o que impede que se tenha uma ampla compreensão de como essas variáveis operacionais influenciam o comportamento de compactação de diferentes materiais granulares.

Assim, no Capítulo 3, buscou-se desenvolver um dispositivo para obtenção de medidas mais precisas das densidades *bulk* aerada e compactada de forma automatizada. Além disso, tal dispositivo foi utilizado para realizar um estudo aprofundando de como as condições operacionais (n, f e a) influenciam os resultados de densidade *bulk* compactada de diversos materiais, incluindo areias semelhantes aos cascalhos de perfuração. Por fim, um estudo de otimização dessas variáveis foi realizado de modo a obter a densidade *bulk* compactada ótima (ρ_{opt}) dos materiais.

2.4 Indicadores de escoabilidade de materiais granulares

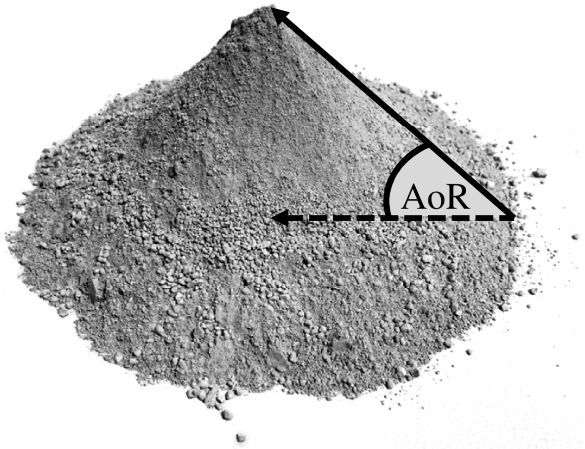
Durante o manejo dos cascalhos em plataformas de perfuração é necessário escoar o material através de silos, vasos de pressão e tubulações de transporte. Sendo então importante conhecer as propriedades de escoabilidade do material para o dimensionamento e realização dessas operações. Assim, na presente seção serão revisados dois dos principais indicadores de escoabilidade de materiais granulares e pós, os quais aplicam-se para materiais que não sofrem compactação por ação de forças normais, permitindo inferir sobre a escoabilidade destes.

O máximo ângulo estável formado entre a horizontal e a inclinação natural de uma pilha cônica de material é chamado de ângulo de repouso (*AoR*), ilustrado na Figura 2.6. Esse parâmetro está relacionado à resistência ao movimento relativo entre as partículas, refletindo, mesmo que indiretamente, a atuação das forças de coesão e fricção. No geral, quanto menor o ângulo de repouso, menor é a resistência ao movimento e mais fluível é o material, sendo, portanto, um indicativo importante de escoabilidade. Um dos métodos clássicos de determinação desse parâmetro é chamado de método do funil, normatizado pela American Society for Testing and Materials (ASTM) (ASTM, 2000). Nesse método, o material é despejado em um funil e, posteriormente, descarregado por gravidade em uma folha de papel branca de modo a formar uma pilha cônica. A altura da pilha é medida por um paquímetro. A circunferência da base cônica é marcada com uma caneta e o diâmetro da circunferência é medido pelo menos quatro vezes, fornecendo um valor médio. O ângulo de repouso é então calculado pela Equação (2.6).

$$AoR = \tan^{-1}\left(\frac{2H}{D_A - d}\right) \tag{2.6}$$

em que: H é a altura do cone, D_A é o diâmetro médio da base do cone e d é o diâmetro do orifício de saída do funil. Conforme o ângulo obtido, o material pode ser classificado quanto sua escoabilidade de acordo com a Tabela 1 (GAISFORD; SAUNDERS, 2012).

Figura 2.6 – Ilustração do ângulo de repouso de uma pilha de cascalhos.



Fonte: Autoria própria (2023).

As interações interparticulares que influenciam as propriedades *bulk* de um material empacotado também são as interações que interferem no escoamento das partículas. Assim, uma comparação entre as densidades *bulk* aerada e compactada pode fornecer uma medida da importância relativa dessas interações. Tal comparação é frequentemente realizada através da razão de Hausner (*HR*) a qual é um indicador que reflete a capacidade do material de escoar. A razão de Hausner pode ser determinada com base nos valores de densidade *bulk* aerada e compactada, conforme descrito pela Equação (2.7) (LETURIA *et al.*, 2014; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012). A Tabela 2.1 também pode ser utilizada para realizar para a classificação de escoabilidade do material (GAISFORD; SAUNDERS, 2012).

$$HR = \frac{\rho_t}{\rho_0} \tag{2.7}$$

em que: HR é a razão de Hausner, ρ_t é a densidade *bulk* compactada e ρ_0 a densidade *bulk* aerada. A razão de Hausner pode ainda ser utilizada para classificar um material quanto a sua

coesividade: arenoso (1,00 < HR < 1,25), fundível (1,25 < HR < 1,40) e coesivo (1,40 < HR) (LI, PAR MING, 2017).

Tabela 2.1 – Classificações da escoabilidade do material.

Classificação	AoR (°)	HR
Excelente	< 25	1,00-1,11
Boa	35-30	1,12-1,18
Razoável	31-35	1,19-1,25
Passível	36-40	1,26-1,34
Pobre	41-45	1,35-1,45
Muito pobre	46-55	1,46-1,59
Muito, muito pobre	> 56	> 1,60

Fonte: Adaptado de Gaisford *et al.* (2012).

2.5 Características de fluidização de materiais granulares

Como será mostrado na seção 2.7, durante a descarga de cascalhos por vasos de pressão, por diversas vezes é necessário introduzir ar comprimido na lateral tronco-cônica do vaso para realizar a fluidização do material e facilitar a descarga. Além disso, a partir de testes de fluidização em bancada é possível obter parâmetros úteis para predição do regime de transporte do material. Portanto, nessa seção são revisados os principais conceitos relacionados à fluidização de materiais particulados.

Quando um fluido, gás ou líquido, passa ascendentemente através de um leito de partículas empacotadas, nenhum movimento relativo entre as partículas ocorre, a menos que a orientação inicial das partículas seja instável. Entretanto, as partículas do leito oferecem resistência à passagem do fluido, principalmente por arrasto friccional na superfície das partículas em baixas velocidades, gerando uma queda de pressão. Por consequência, nesse caso, a queda de pressão através do leito é diretamente proporcional à velocidade do fluido, como representado pela equação (COULSON; RICHARDSON, 2002; HAGOORT, 1988):

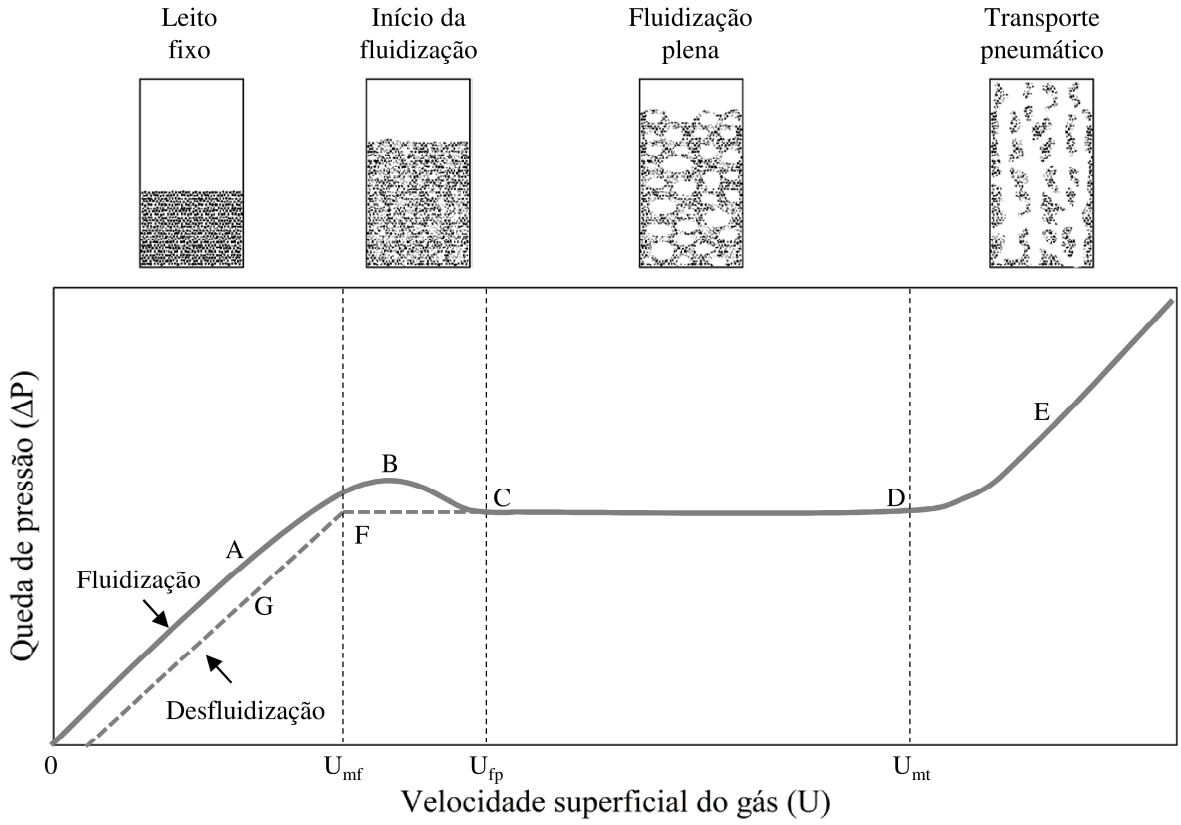
$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\kappa_l} U \tag{2.8}$$

em que: ΔP é a queda de pressão, L é o comprimento do leito, U é a velocidade superficial do gás e κ_l é a permeabilidade do leito e μ é a viscosidade molecular do gás.

Quando, no entanto, o arrasto friccional nas partículas for grande o suficiente para se equiparar ao peso aparente do leito, ou seja, o peso real for igual força de empuxo, as partículas

se reorganizam, oferecendo menos resistência ao escoamento do fluido e o leito começa a se expandir com um aumento correspondente nos espaços vazios. Este processo continua com o aumento da velocidade, sendo que arrasto friccional total permanece igual ao peso das partículas, até que o leito tenha assumido sua forma estável de empacotamento mais aerado. Se a velocidade for aumentada ainda mais, as partículas individuais se separam umas das outras e ficam livremente suportadas no fluido. Nesta fase, o leito é descrito como estando em fluidização plena (COULSON; RICHARDSON, 2002).

Figura 2.7 – Queda de pressão sobre leitos fixos e fluidizados.



Fonte: Modificado de Coulson e Richardson (2002).

A Figura 2.7 ilustra o processo descrito acima em termos da queda de pressão através do leito em função da velocidade superficial do fluido, e pode ser interpretada como se segue (COULSON; RICHARDSON, 2002; SCHULZE, 2008; WOODCOCK; MASON, 1987):

(A): Uma relação linear é obtida até o ponto onde a expansão do leito começa a ocorrer. A partir de U_{mf} a inclinação da curva diminua gradualmente à medida que o leito se expande e sua porosidade aumenta.

(B): A queda de pressão chega a um valor máximo com o aumento da velocidade. Destaca-se que ponto B fica acima de FCD porque as forças de atrito entre as partículas precisam ser superadas durante o rearranjo inicial do leito.

(B-C): A queda de pressão cai ligeiramente e atinge um valor aproximadamente constante que é independente da velocidade do fluido.

(C): A velocidade do fluido (U_{fp}) é tal que, a partir dela, a queda de pressão permanece constante com o aumento da velocidade, atingindo o estado de fluidização plena.

(C-D): A queda de pressão se mantém constante e independente da velocidade do gás.

(E): A velocidade do fluido (U_{mt}) é grande o suficiente para começar a transportar as partículas. Nesse momento, a queda de pressão começa a aumentar com a velocidade devido ao arrasto friccional na superfície das tubulações.

(F): Nesse ponto, a velocidade do fluido foi reduzida de modo que o leito se contraiu até atingir a condição em que as partículas estão apenas repousando umas sobre as outras. Tal velocidade é a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}). A porosidade tem então o valor máximo estável que pode ocorrer para um leito fixo das partículas.

(F-G): Para uma mesma velocidade, a queda de pressão através deste leito fixo rearranjado é então menor do que antes da fluidização, devido ao estado mais aerado que o leito alcançou depois da fluidização.

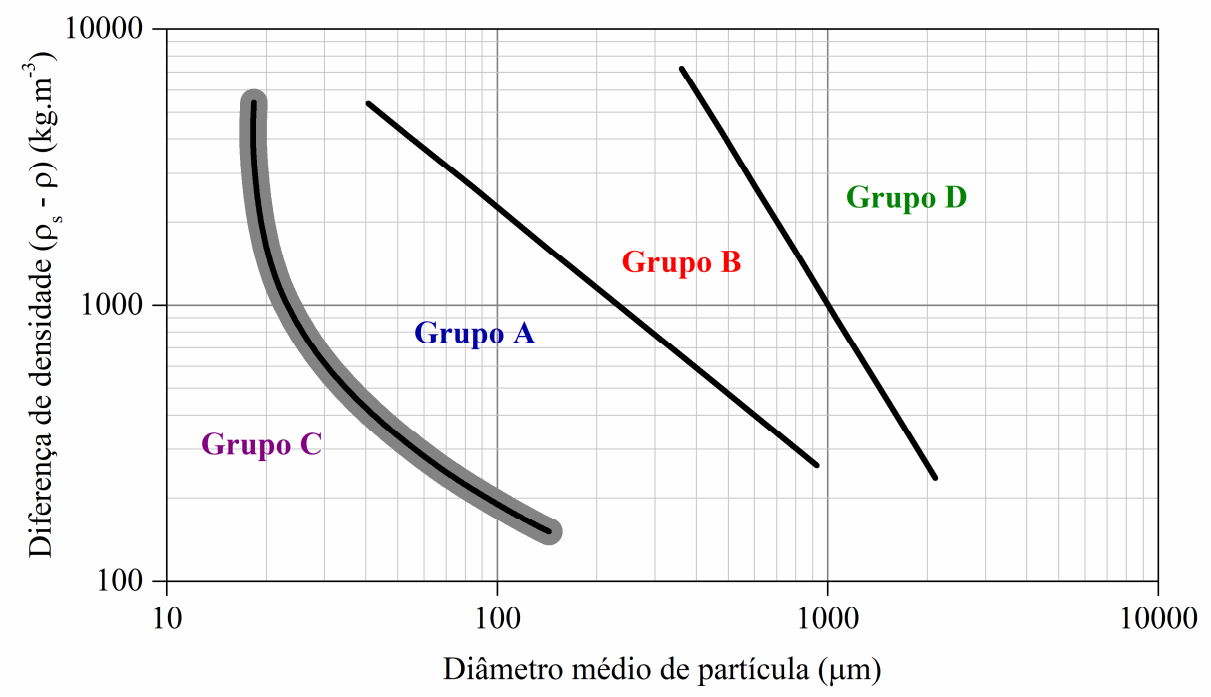
Na ausência de canais preferenciais, a forma e o tamanho das partículas que irão determinar a porosidade máxima e a queda de pressão ao longo de certa altura do leito. Em um leito fluidizado ideal, a queda de pressão correspondente ao FCD é igual ao peso efetivo das partículas por unidade de área. Assim, a queda de pressão esperada no estado de fluidização plena pode ser calculada pela Equação (2.9). Na prática, a queda de pressão observada pode desviar-se do valor calculado devido à formação de canais preferenciais e do efeito do atrito partícula-parede (COULSON; RICHARDSON, 2002; LEVENSPIEL, 2014).

$$\Delta P = L_{mf}\left(1-\varepsilon_{mf}\right)\left(\left|\rho_r-\rho_g\right|\right) \tag{2.9}$$

em que: L_{mf} é a altura do leito na condição de fluidização mínima, ε_{mf} é a porosidade na condição de fluidização mínima, ρ_r é a densidade do sólido e ρ_g é a densidade do gás.

A facilidade com que um material pode ser fluidizado por um gás é dependente das propriedades das partículas. Embora não seja possível prever exatamente como um determinado material irá fluidizar sem realizar testes em uma amostra, é possível indicar algumas tendências. Em geral, as partículas finas de baixa densidade fluidizam mais uniformemente do que as grandes e densas, desde que não sejam tão pequenas que as forças atrativas de van der Waals sejam grandes o suficiente para que as partículas se adiram fortemente. Geralmente, quanto mais esféricas forem as partículas, melhor elas irão fluidizar. A este respeito, as partículas longas em forma de agulha são as mais difíceis de fluidizar. Partículas de tamanhos mistos geralmente fluidizam mais uniformemente do que aquelas de tamanho uniforme. Além disso, a presença de uma pequena proporção de finos frequentemente auxilia na fluidização de partículas grossas (COULSON; RICHARDSON, 2002; WOODCOCK; MASON, 1987). A classificação mais clássica do comportamento do fluidização com base nas características das partículas foi realizada por Geldart (GELDART, 1973). Esse autor categorizou o comportamento de fluidização dos materiais com base no tamanho principal de partícula (D_p) e na diferença entra a densidade da partícula e do fluido, conforme mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Diagrama de classificação da fluidização de pós proposto por Geldart (1973).



Fonte: Modificado de Geldart (1973).

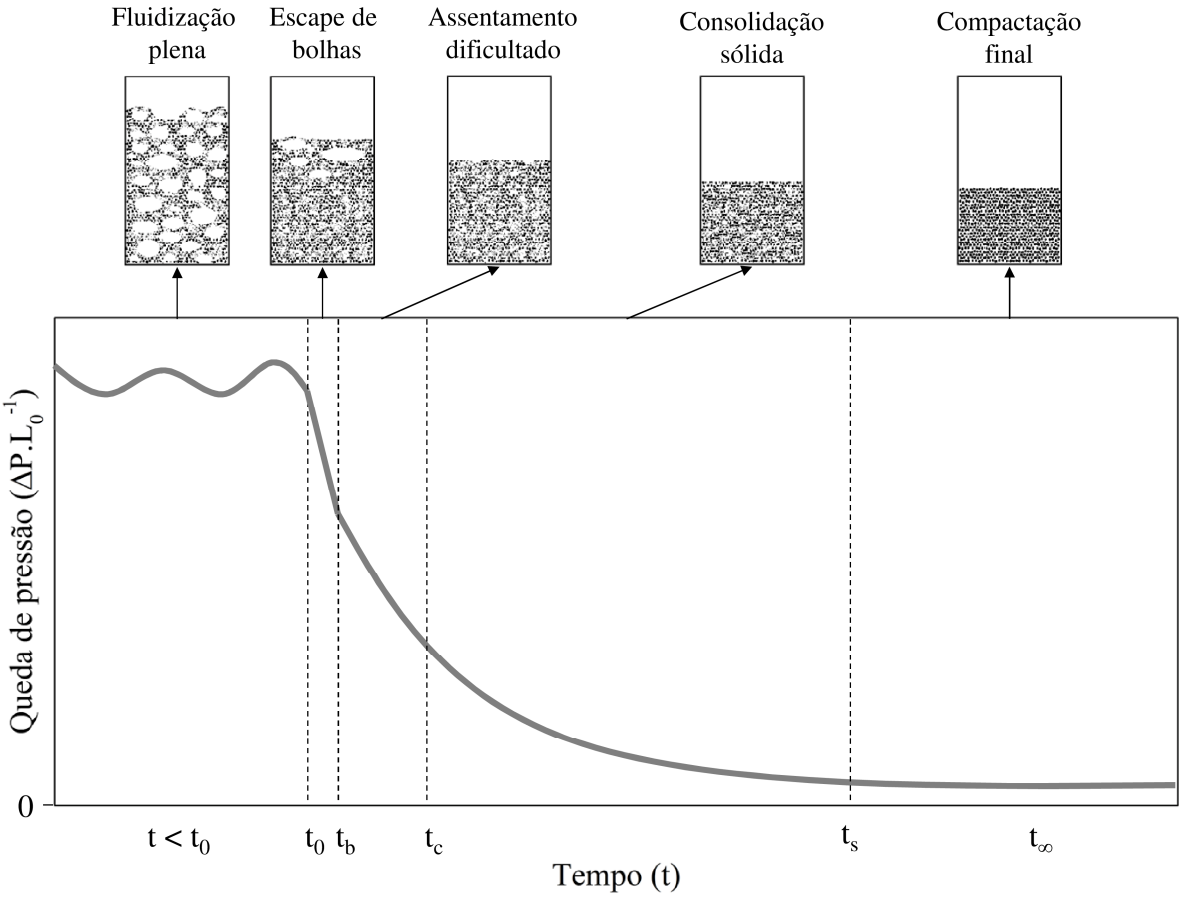
Os materiais foram então classificados em quatro grandes grupos com diferentes comportamentos de fluidização (COULSON; RICHARDSON, 2002; WOODCOCK; MASON, 1987):

Grupo A D_p: 30–100 μm	Em geral são materiais com partículas pequenas e/ou de baixa densidade (inferior a cerca de 1400 $kg.m^{-3}$). Os materiais deste grupo mostram uma expansão considerável do leito entre a velocidade mínima de fluidização e a velocidade de fluidização plena, e uma desaeração relativamente lenta do leito quando a corrente de ar é interrompida. Em velocidades acima de U_{mf}, o leito borbulha livremente e em velocidades mais altas, *slugging* axissimétrico tende a ocorrer. Um exemplo clássico desse tipo de material são alguns catalisadores para o craqueamento de petróleo.
Grupo B D_p: 100–800 μm	Esse grupo inclui materiais em uma ampla faixa granulométrica com densidade de partícula variando entre 1400 e 4000 $kg.m^{-3}$. Em velocidades de fluido acima de U_{mf}, a expansão do leito é pequena e o borbulhamento geralmente ocorre na velocidade mínima de fluidização ou logo acima dela. A desaeração do leito é rápida quando o suprimento de ar é interrompido. À medida que a velocidade aumenta, o leito borbulha livremente e, eventualmente, tende a formar *slugging* axissimétrico. As areias são os materiais mais típicos desse grupo.
Grupo C D_p: 20 μm	Esse grupo é formado por pós-coesivos de difícil fluidização plena, o que se deve às intensas forças interparticulares resultantes de diversos fatores, como: pequeno tamanho das partículas, efeitos eletrostáticos e alto conteúdo de umidade. As tentativas de fluidizar tais materiais geralmente resultam na formação de canais estáveis ou em todo o leito subindo como um *plug*, embora algum sucesso possa ser alcançado com o auxílio de vibradores mecânicos ou agitadores.
Grupo D D_p: 1000 μm	Tal grupo inclui materiais com grande tamanho médio de partícula e/ou alta densidade de partícula. O comportamento de fluidização é de certa forma semelhante aos materiais do Grupo B.

2.6 Características de desaeração de materiais granulares

A desaeração de leitos fluidizados é basicamente o escape de ar pelos espaços interparticulares e pode se dar na forma de bolhas ou colapso de canais preferenciais com jorro de partículas, dependendo da forma de fluidização do material. Visualmente, esse fenômeno é acompanhado pela queda na altura do leito, podendo continuar por certo período depois do aparente colapso final do leito (KENNEDY, 1998). Quando um manômetro diferencial é conectado para medir a queda de pressão no leito, a desaeração é observada pela queda de pressão, como ilustrado na Figura 2.9. Diferentes curvas de desaeração/colapso podem ser observadas dependendo das propriedades do material (GELDART; WONG, 1985; GELDART, 1973).

Figura 2.9 – Comportamento típico de desaeração de um material granular genérico.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 2.9 ilustra a curva de queda de pressão do leito em função do tempo de um material genérico, bem como os cinco estágios geralmente observados: plena fluidização,

escape de bolhas, assentamento dificultado, consolidação sólida e compactação final. O comportamento de queda de pressão em cada estágio pode ser atrelado a classificação de Geldart da seguinte forma (GELDART; WONG, 1985; GELDART, 1973).

Grupo A Fluidização plena ($t < t_0$): o material se encontra fluidizado com oscilações típicas na queda pressão devido ao borbulhamento.

Escape de bolhas ($t_0 - t_b$): colapso inicial rápido devido à saída de bolhas pela parte de cima do leito.

Assentamento dificultado ($t_b - t_c$): estágio intermediário, onde a fase densa colapsa linearmente com o tempo até que o leito se aproxime da altura de fluidização incipiente. Desse período em diante o leito age como um "filtro" do ar percolante.

Consolidação sólida ($t_c - t_s$): estágio final onde a consolidação das partículas sólidas é então observada.

Grupo B/D Fluidização plena ($t < t_0$): o material se encontra fluidizado com oscilações típicas na queda pressão devido ao aos borbulhamento.

Escape de bolhas ($t_0 - t_b$): as bolhas saem quase que instantaneamente do leito, de modo que esse período é mais curto do que aqueles apresentados pelos materiais do Grupo A.

Assentamento dificultado ($t_b - t_c$): a taxa de colapso nesse período é muito mais rápida do que para os materiais do Grupo A, uma vez que, para esses materiais, a aerabilidade se dá principalmente pela presença de bolhas.

Consolidação sólida ($t_c - t_s$): a consolidação se da de maneira rápida, por vezes, não sendo nem possível sua observação.

Grupo C Fluidização plena ($t < t_0$): o material se encontra fluidizado com oscilações grandes na queda pressão devido à natureza coesiva desses materiais.

Escape de bolhas ($t_0 - t_s$): praticamente inexistente, uma vez que materiais do grupo C não apresentam borbulhamento, e sim cavidades e rachaduras.

Assentamento dificultado ($t_b - t_c$): quase inexistente.

Consolidação sólida ($t_c - t_s$): longa e domina quase que totalmente o tempo de desaeração. As rachaduras maiores se fecham rapidamente e o colapso ocorre mais lentamente, de modo que a queda de pressão do leito diminui exponencialmente com o tempo.

A partir dos dados de queda de pressão em função do tempo (Figura 2.9) é possível ainda determinar parâmetros indicativos sobre a capacidade do material de reter o gás, bem como sobre a existência de outras forças opostas ao assentamento do leito. O tempo de desaeração (t_{da}) é um desses parâmetros e reflete a característica do material em reter ar, podendo ser estimado por diferentes métodos. Fargette *et al.* (1997) estimou o tempo de desaeração como o tempo (expresso em segundos) entre o fechamento da válvula e a queda de pressão atingir zero. Já Mainwaring *et al.* (1987) e Chambers *et al.* (1998) determinaram esse parâmetro pelo o ajuste de diferentes modelos aos dados experimentais de queda de pressão em função do tempo. O modelo proposto por esses primeiros autores é dado pela Equação (2.10), o qual, em geral, apresenta baixo poder de predição dos dados. Por outro lado, o modelo de Chambers *et al.* (1998) geralmente se ajusta muito bem a dados de queda de pressão exponencial, como constatado por Sanchez *et al.* (2003), sendo representado pela Equação (2.11).

$$\frac{\Delta P}{\Delta L_0} \sim \frac{-t}{t_{da}} \tag{2.10}$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta L_0} \sim \exp\left(\frac{-t}{t_{da}}\right) \tag{2.11}$$

2.7 Transporte pneumático de materiais granulares

O transporte pneumático pode ser definido como a movimentação de materiais granulares usando um gás, geralmente o ar, através de tubulações, por meio da aplicação de pressão positiva ou negativa (GERICKE, 2019). Esse modo de transporte oferece diversas vantagens, como: possibilidade de realizar o transporte livre de poeira, flexibilidade de poder transportar o material verticalmente e horizontalmente, capacidade de distribuição e coleta de materiais de múltiplos locais, baixo custo relativo de manutenção e mão de obra, possibilidade de transportar produtos de alto valor com segurança e facilidade relativa de automação e controle. Por outro lado, também existem algumas desvantagens, como: alto consumo de energéticos, desgaste e abrasão de tubulações e equipamentos, possibilidade de degradação das partículas, limitações de distância que podem ser transportadas e dificuldade de

dimensionamento e operação devido à complexidade dos fenômenos envolvidos (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990).

A gama de materiais que podem ser pneumaticamente transportados é extensa. Variando de pós extremamente finos até rochas de até 70 mm de tamanho. Geralmente, quanto maior e mais densas as partículas de um material, maior a velocidade do gás necessária para o transporte, acarretando um maior consumo de energia. Outra regra prática, frequentemente utilizada, é de que o diâmetro interno do tubo de transporte deve ser pelo menos três vezes maior do que o tamanho das partículas do material transportado, visando evitar o entupimento da tubulação. Os candidatos considerados ideais para o transporte pneumático, em geral, são materiais com boa escoabilidade, não abrasivos e não fibrosos. No entanto, com o desenvolvimento de novos tipos de transportadores operando em baixas velocidades de gás, até mesmo os materiais coesivos, abrasivos e frágeis podem ser transportados (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990). Tais sistemas são descritos por Mills (2004) como "inovadores", enquanto que nos sistemas "convencionais", o material a ser transportado é simplesmente alimentado na tubulação e então soprado ou aspirado até o ponto de descarga (MILLS, 2004).

Nessa seção, buscou-se realizar uma pequena revisão sobre os principais sistemas de transporte pneumático, bem como regimes de transporte, sistemas inovadores e diagramas de predição desses regimes com base nas características do material. Por fim, os principais sistemas de transporte pneumático de cascalhos descritos na literatura foram apresentados e discutidos.

2.7.1 Elementos principais de sistemas de transporte

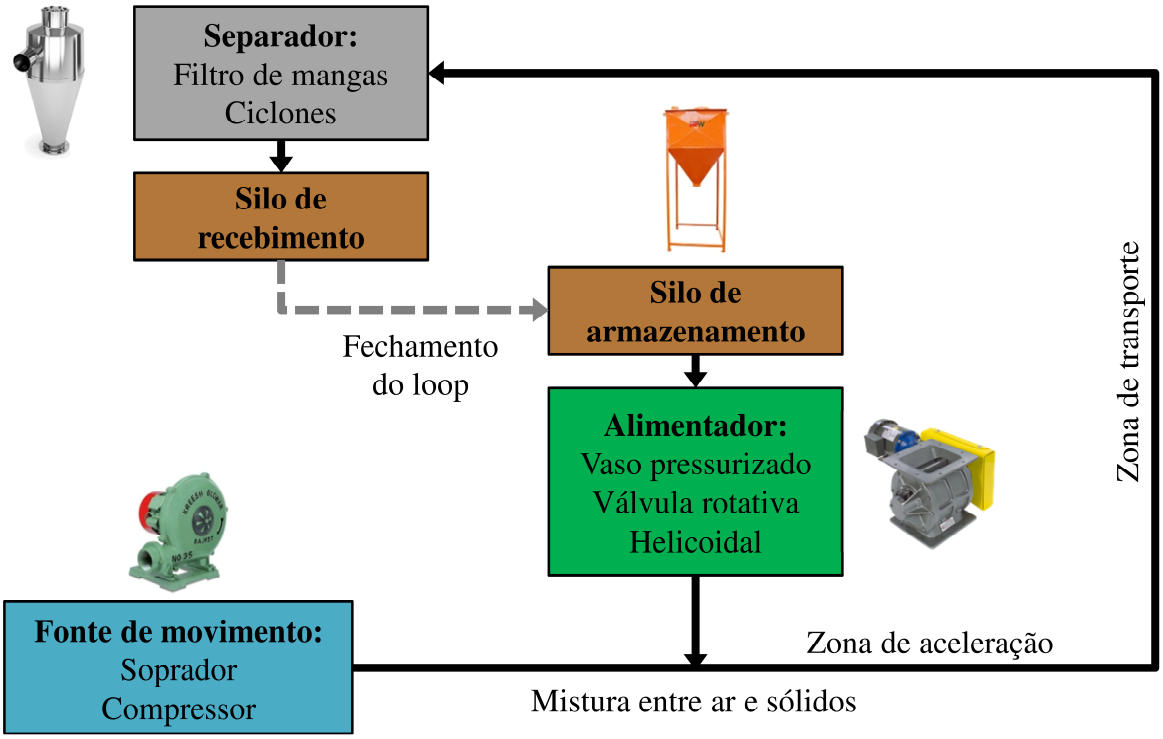
De forma simplificada, um sistema de transporte pneumático é constituído por quatro zonas distintas, cada uma exigindo seu próprio equipamento para efetuar a operação necessária, como ilustrado na Figura 2.10. A função de cada parte é descrita abaixo.

Fonte de movimento: a fonte de movimento é um elemento primordial em um sistema de transporte pneumático, sendo usada para fornecer a energia necessária ao gás de transporte. A escolha da fonte de movimento irá depender diversos fatores como: vazão de gás necessária, pressão de operação (positiva ou negativa), queda de pressão através de dutos e necessidade de secagem, resfriamento e filtragem do gás (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990).

Sistema de alimentação: nesta região os sólidos são alimentados na corrente de gás que flui através da tubulação. Para tal propósito tem-se um dispositivo de alimentação conectado a um silo de alimentação. A escolha do dispositivo irá depender das características do material a

ser transportado, regime de transporte, pressão de operação (positiva ou negativa), carga de sólidos a ser transportada, dentre outros fatores. Exemplos dos principais dispositivos de alimentação são: válvula rotativa, alimentador helicoidal, alimentador Venturi, bicos de sucção e vaso de pressão. Devido a grande mudança na quantidade de movimento dos sólidos no momento da mistura com o ar é necessário fornecer uma zona de aceleração. Tal zona normalmente consiste em um pedaço horizontal de tubo com certo comprimento projetado de modo que os sólidos sejam acelerados até um estado estacionário (KLINZING *et al.*, 2010; MILLS, 2004).

Figura 2.10 – Ilustração dos constituintes principais de um sistema de transporte pneumático.



Fonte: Autoria própria (2023). Miniaturas de Sunmach® (www.sunmach.net), MFW Máquinas® (mfwmaquinas.com.br), Indiamart® (www.indiamart.com) e Meyer® (www.meyerindustrial.com).

Zona de transporte: após os sólidos terem sido acelerados até o estado estacionário, eles entram na zona de transporte a qual é constituída de uma tubulação. A seleção de tal tubulação é baseada em vários fatores, incluindo a abrasividade do produto e requisitos de pressão e regime de transporte. De modo a alterar a direção do fluxo, a zona de transporte pode ter várias curvas e válvulas de desvio, os quais também podem variar conforme o sistema de transporte e características do sólido a ser transportado. Em virtude da desaceleração dos sólidos

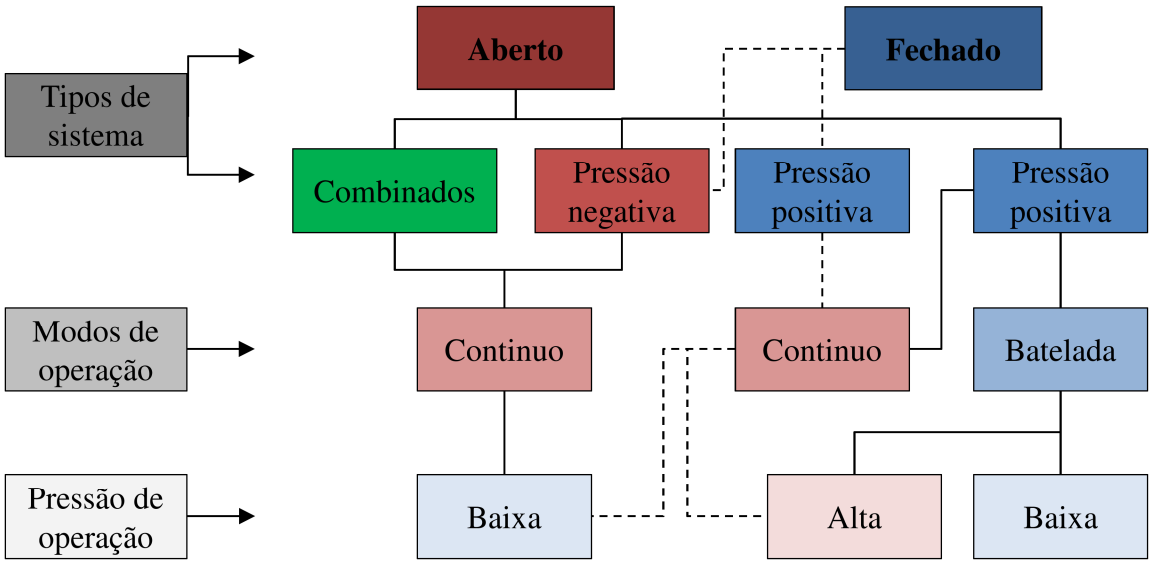
através de uma curva, é normalmente necessária uma nova zona de aceleração na saída de cada curva (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990).

Separador: nesse equipamento os sólidos são separados da corrente de gás na qual foram transportados. A seleção de um sistema de separação gás-sólido adequado depende de vários fatores, sendo o fator primário o tamanho dos sólidos que precisam ser separados da corrente de gás. Várias configurações diferentes de sistemas de separação gás-sólido são usadas em sistemas de transporte pneumático. Alguns exemplos de separadores são ciclones e filtros de mangas (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990).

2.7.2 Tipos de sistemas de transporte

A combinação entre os elementos mostrados na seção anterior deu origem a uma ampla diversidade de sistemas de transporte pneumático. A maioria dos sistemas de transporte é convencional, operando de forma contínua, abertos e em um local fixo. Contudo, para se adequar ao material que está sendo transportado, ou ao processo, sistemas inovadores operando em batelada, utilizando uma configuração fechada podem ser utilizados. Esses sistemas podem ser de pressão positiva ou negativa, ou uma combinação dos dois. A Figura 2.11 esquematiza as principais classificações dos sistemas de transporte pneumático, as quais serão discutidas a seguir. Já a Figura 2.12 ilustra alguns exemplos típicos de configurações.

Figura 2.11 – Diagrama dos diversos sistemas de transporte pneumático disponíveis.



Fonte: Autoria própria (2023).

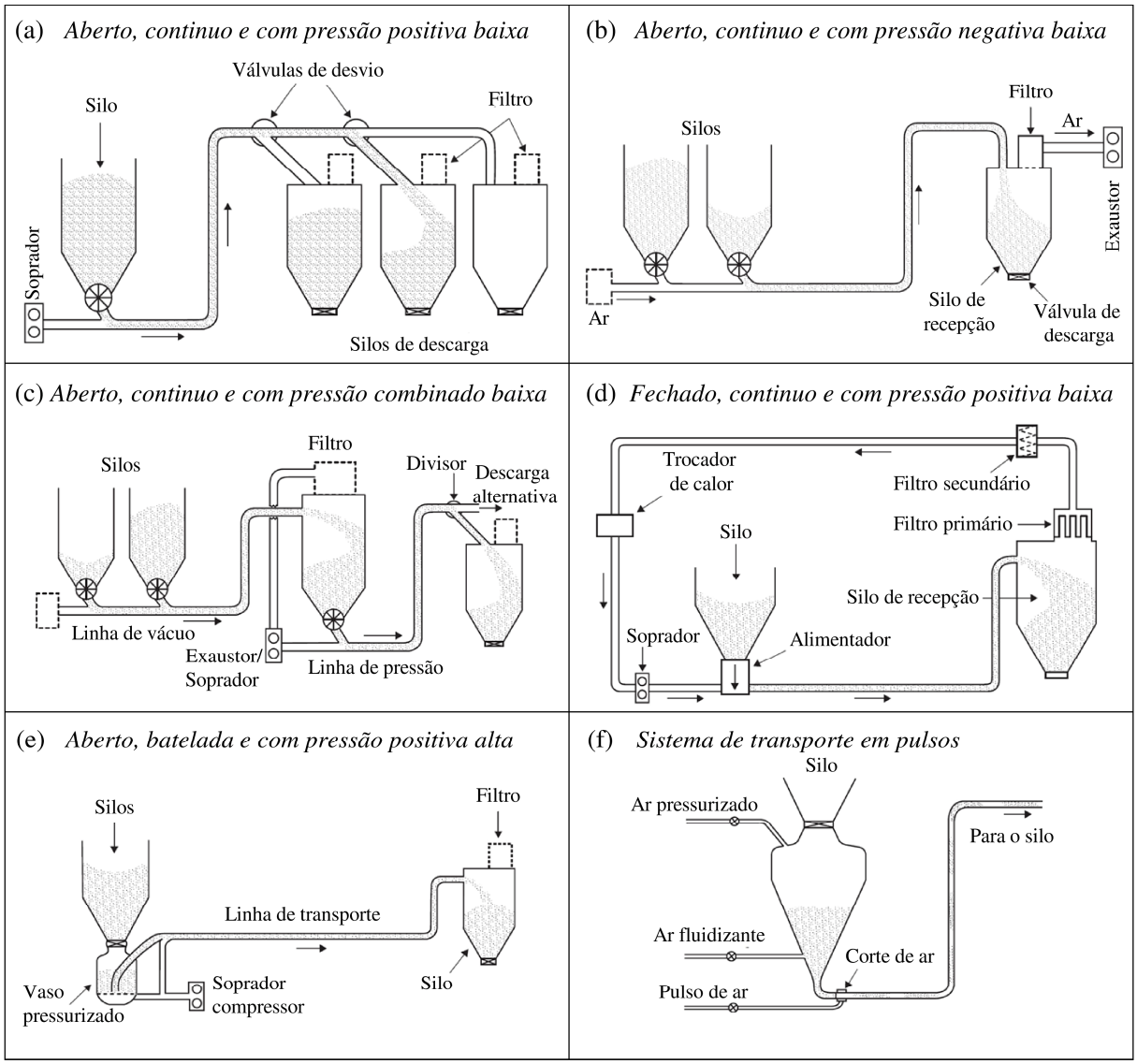
Sistemas abertos e fechados: são classificados como fechados àqueles sistemas nos quais o gás de transporte é recirculado, já nos sistemas abertos o gás sai do sistema, sendo, geralmente lançado na atmosfera. As Figuras 2.12 (a)-(c) mostram exemplos de sistemas abertos e que Figura 2.12 (d) ilustra um sistema fechado. Os sistemas abertos são normalmente utilizados para o transporte pneumático com ar de materiais inertes. Já os sistemas fechados são empregados em circunstâncias muito específicas, como materiais altamente tóxicos e potencialmente explosivos. Por exemplo, se o pó de um material for potencialmente explosivo, gases inertes como nitrogênio podem ser usado para o transporte. Em um sistema aberto o controle ambiental para se realizar essa operação pode se tornar muito caro, sendo mais viável um sistema fechado, onde o gás pode ser recirculado e assim os custos operacionais, em termos de gás inerte, reduzidos (MILLS, 2004; MILLS; JONES; AGARWAL, 2001).

Sistemas de pressão positiva e pressão negativa: os materiais podem ser aspirados e soprados e, portanto, pressões positivas ou negativas (vácuo) podem ser empregadas para o transporte pneumático. A escolha de um ou de outro irá depender a aplicação em si do sistema de transporte. No caso de pressões positivas, pode-se utilizar válvulas de desvio para realizar a entrega do material em múltiplos pontos de recepção, como ilustrado na Figura 2.12 (a). Já no caso de pressões negativas, a Figura 2.12 (b) ilustra que é possível realizar a coleta de material em múltiplos pontos e reuni-los em um silo de recebimento. Existem ainda os sistemas combinados de pressão negativa e positiva, os quais compartilham um mesmo compressor/exaustor. Tais sistemas, ilustrado na Figura 2.12 (c), representam um tipo muito versátil de transporte pneumático, podendo ser utilizado para transferir material de várias fontes para vários locais de descarga, sendo frequentemente chamados de sistemas *suck–blow* ou *push–pull*. (KLINZING *et al.*, 2010; MILLS, 2004).

Sistemas contínuos e em batelada: os sistemas de transporte podem ser ainda classificados quanto ao modo de operação. No modo continuo o material é continuamente alimentado, transportado e separado pelo sistema, como ilustrado nas Figuras 2.12 (a)-(d). Já as Figuras 2.12 (e) e (f) mostram que, em batelada, o material é alimentado e transportado em cargas isoladas. Vale destacar que o modo de operação é, em grande parte, ditado pela escolha do dispositivo de alimentação. A maioria dos sistemas de transporte em batelada é baseada em vasos pressurizados (Figura 2.12 (f)), os quais são selecionados devido à sua capacidade de transporte em alta pressão ou devido à natureza do material alimentado na tubulação. Por outro lado, válvulas rotativas e alimentadores helicoidais são mais utilizados em sistemas contínuos, devido controle preciso de material alimentado na linha. Alternativamente, vasos de pressão

também podem ser utilizados para operar de forma contínuo, como será tratado em maiores detalhes na seção 2.7.6.1 (MILLS, 2004; MILLS; JONES; AGARWAL, 2001).

Figura 2.12 – Ilustração dos diversos sistemas transporte pneumático disponíveis.



Fonte: Adaptado de Mills (2004).

Sistemas de alta e baixa pressão: em transporte pneumático, normalmente considera-se alta pressão sistemas operando com pressão manométrica acima de cerca de 1,0 bar. As Figuras 12.2 (a)-(d) ilustram sistemas de baixa pressão, enquanto que a Figura 12.2 (e) esboça um de alta. Para sistemas que transportam materiais para locais à pressão atmosférica, geralmente a pressão manométrica de 6,9 bar é o limite superior de operação, devido a problemas de expansão do ar. Contudo, pressões muito mais altas (tipicamente 20,7 a 27,6 bar) podem ser utilizadas ao se transportar materiais para pontos de recepção pressurizados, como,

por exemplo, reatores químicos e sistemas de combustão (MILLS, 2004; MILLS; JONES; AGARWAL, 2001).

2.7.3 Modos e regimes de transporte

Em transporte pneumático é importante fazer a distinção entre modos e regimes de transporte. O modo de transporte pneumático se refere à concentração de sólidos na tubulação, sendo classificado como fase densa ou diluída. Já o regime de transporte trata do perfil de distribuição de sólido e gás no interior da tubulação durante o transporte, havendo diversas classificações para o transporte horizontal e vertical, conforme mostrado nas Figuras 2.13 e 2.14. Para classificar o modo de transporte, um parâmetro comumente utilizado é a carga de sólidos (C_s), sendo definido como a razão entre a massa de sólidos e a massa de ar de transporte. Assim, pode-se considerar que um sistema opera em fase diluída quando C_s varia entre 0 e 15, já os sistemas em fase densa operam com C_s maiores que 15. Existem diversas outros critérios que podem ser utilizados para diferenciar um modo de transporte do outro. Alguns deles são mostrados na Tabela 2.2 (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990). A escolha de um modo de transporte depende da necessidade particular do processo, sendo necessário ponderar suas vantagens e desvantagens. Além disso, apesar de a maioria dos materiais poderem ser transportados em fase diluída, nem todos podem ser transportados em fase densa sem a utilização de sistemas inovadores, os quais serão tratados na seção 2.7.6. As principais características dos dois modos de transporte foram resumidas na tabela abaixo.

Tabela 2.2 – Características dos modos de transporte pneumático.

Descrição	Fase densa	Fase diluída
Carga de sólidos	Maior que 15	Menor que 15
Velocidade do ar	Menor que 10 $m.s^{-1}$	Maior que 10 $m.s^{-1}$
Pressão de operação	Menor que 1 bar	Maior que 1 bar
Vantagens	• Baixa relação de energia consumida por quilograma de sólido transportado. • Baixa erosão da tubulação. • Baixa degradação do produto.	• Baixo custo de aquisição e manutenção.
Desvantagens	• Elevado custo de aquisição e manutenção.	• Elevada erosão na parte inferior da tubulação e em curvas.

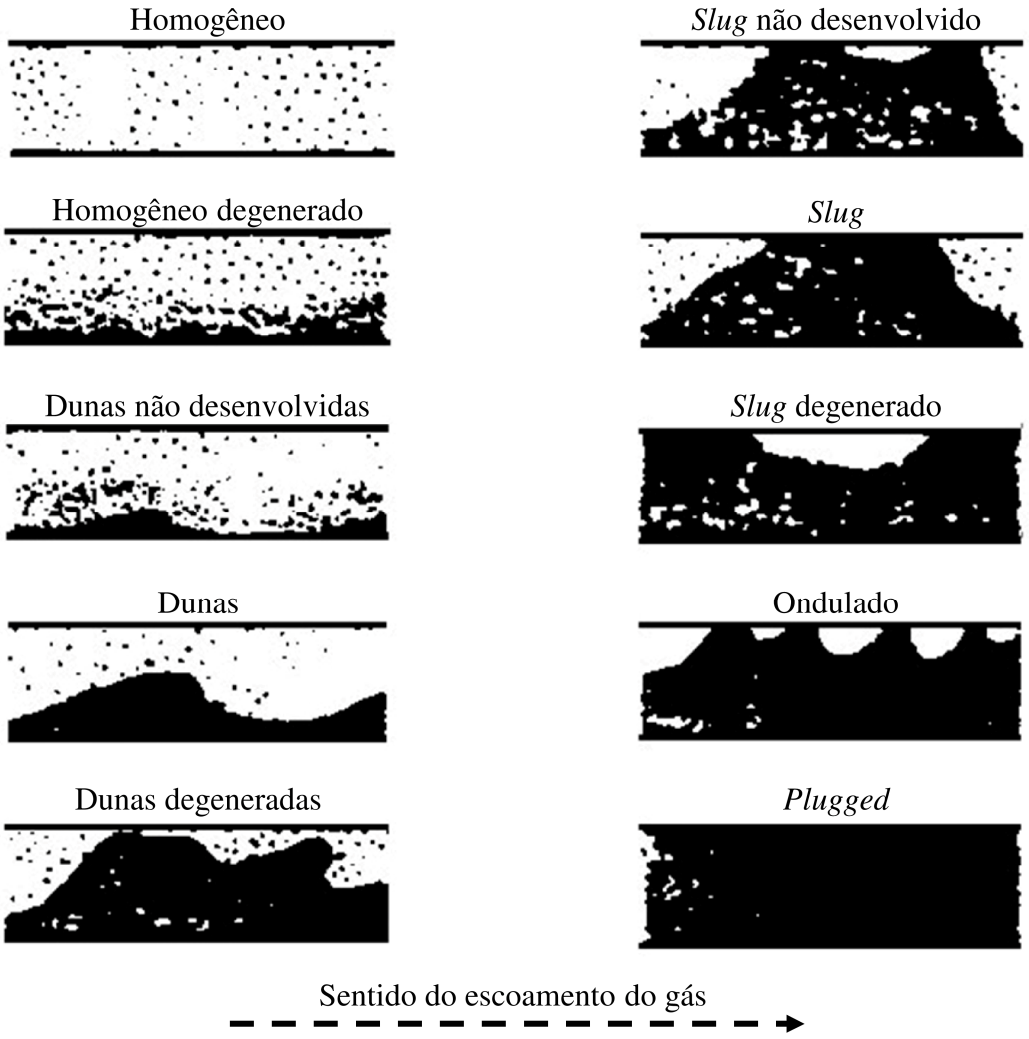
Fonte: Adaptado de Moraes (2012).

Em geral, os sistemas em fase diluída empregam grandes volumes de gás em altas velocidades, geralmente, acima de 10 $m.s^{-1}$, gerando uma baixa queda de pressão (< 1 bar). O gás transporta os materiais como partículas discretas por meio de forças de sustentação e arrasto que atuam nas partículas individuais. Tal sistema constitui o mais amplamente utilizado de todos os sistemas de transporte pneumático, principalmente devido ao baixo custo de aquisição e manutenção. Em contra partida, o desgaste das tubulações é elevado devido à erosão (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990; MORAES, 2012).

Por outro lado, nos sistemas em fase densa, devido à baixa velocidade, em geral, menores que 10 $m.s^{-1}$, ocorre uma distribuição não uniforme de sólidos ao longo da seção transversal do tubo de transporte, acarretando altas quedas de pressão (> 1 bar). Assim, dependendo das características dos sólidos, da velocidade do gás, da vazão de sólidos, rugosidade e tamanho do tubo, diferentes padrões de comportamento podem ser observados. Tais padrões podem variar de condições em que os sólidos empacotam completamente o tubo e se movem como um plugue denso contínuo, até situações em que os sólidos no fundo do tubo se movem como uma série de dunas, enquanto que uma camada em fase diluída de sólidos flui por cima delas. Os sistemas em fase densa apresentam diversas vantagens, como baixo consumo energético, erosão da tubulação e degradação do produto. Em contrapartida, esses sistemas apresentam um elevado custo de aquisição e manutenção (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990; MORAES, 2012).

Diversos autores buscaram estabelecer os diferentes padrões/regimes de distribuição de sólido e gás no interior da tubulação de transporte para diferentes materiais. Sendo que os perfis observados dependem das características do material e também das condições de operação e do tipo de sistema de transporte. Uma visão geral dos diversos perfis possíveis no transporte horizontal é mostrada na Figura 2.13, obtida por Wen (1959) *apud* Klizing *et al.* (2010). Esse autor constatou visualmente esses perfis ao realizar testes em um sistema no qual a vazão mássica de sólidos foi mantida constante, enquanto a vazão de gás foi reduzida. Tal redução induziu mudanças drásticas no regime de transporte, variando desde um regime "homogêneo" onde as partículas estão dispersas em fase diluída, até o completo preenchimento da tubulação com partículas em um regime de fase densa "*plugged*". Evidentemente, existe um ponto de transição entre os modos de transporte, o que será abordado na próxima seção.

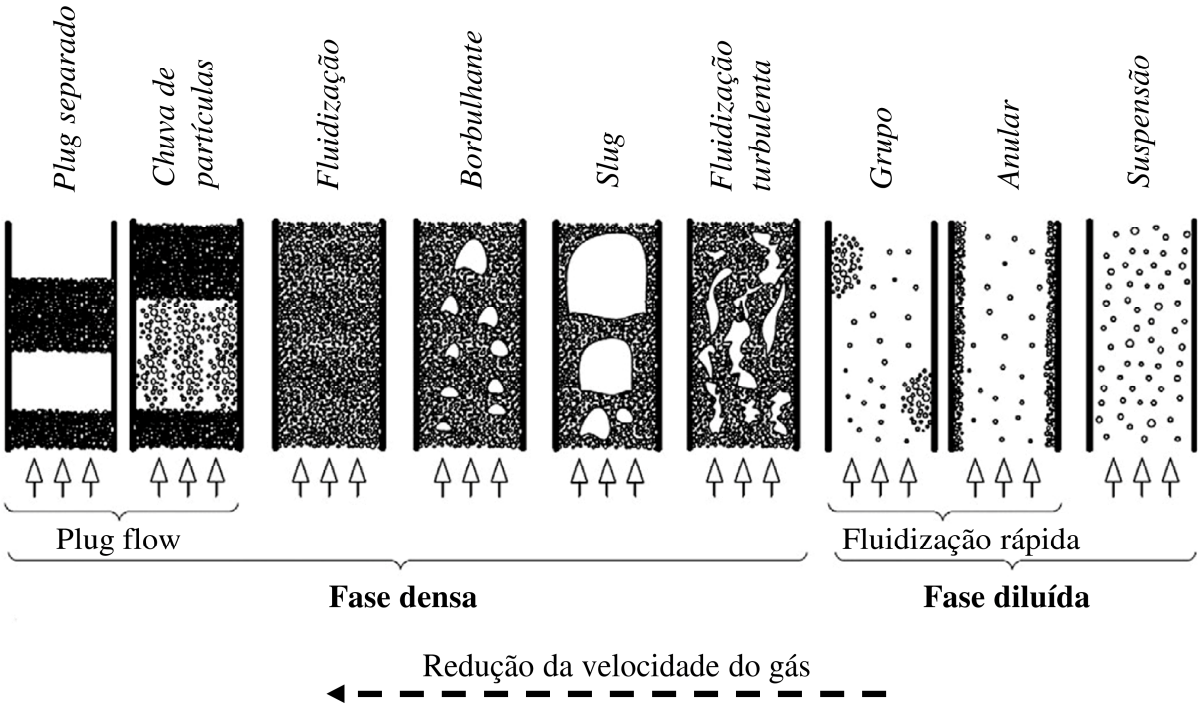
Figura 2.13 – Regimes de transporte em tubulações horizontais.



Fonte: Adaptado de Klizing *et al.* (2010).

No transporte vertical a força gravitacional está direcionada no sentido oposto a corrente de gás, havendo, portanto, mudanças nos regimes observados. Na Figura 2.14 são mostradas as classificações dos regimes de transporte vertical, também considerando a redução da velocidade do gás em função de uma vazão mássica fixa de sólidos (RABINOVICH; KALMAN, 2011). Destaca-se aqui a grande semelhança de certos regimes com aqueles observados na fluidização (seção 2.5), o que faz sentido quando interpretamos o material transportado verticalmente como um leito fluidizado sendo arrastado.

Figura 2.14 – Regimes de transporte em tubulações vertical.



Fonte: Adaptado de Rabinovich *et al.* (2011).

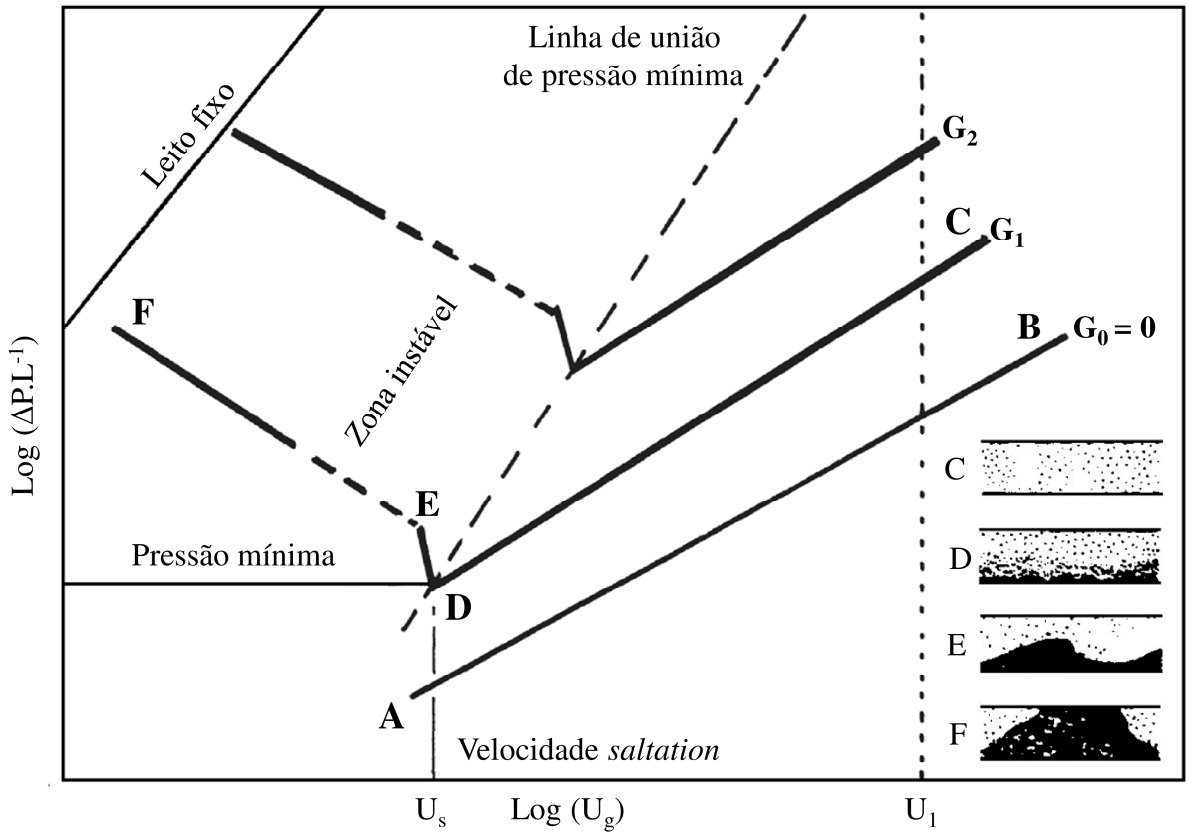
2.7.4 Diagramas de estado

Como citado na seção 2.7.3, ao se reduzir a velocidade do gás, utilizando uma vazão constante de sólidos, ocorre a transição do modo de transporte de fase diluída para fase densa. Tal fenômeno pode ser observado através de um gráfico de queda de pressão por comprimento ($\Delta P.L^{-1}$) de tubulação horizontal em função da velocidade do gás (U_g), como mostrado na Figura 2.15. Esta pode ser interpretada por seções como se segue (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990; PAN, 1999):

Linha A-B Representa a queda de pressão por atrito do fluido com as paredes de um tubo horizontal transportando somente gás.

Ponto C A uma velocidade do ar U_1, partículas sólidas de tamanho homogêneo são introduzidas na tubulação com uma taxa de alimentação constante G_1. A queda de pressão aumenta de B para C, devido ao arrasto nas partículas sólidas e também devido às interações partícula-partículas e partícula-parede (atrito de sólidos). Nesse ponto, o material se encontra em fase diluída e as partículas são distribuídas homogeneamente por toda a seção transversal do tubo.

Figura 2.15 – Diagrama de estado para o transporte horizontal.



Fonte: Adaptado de Marcus *et al.* (1990).

Ponto C-D Reduzindo-se a velocidade do ar ao longo da linha C-D, a velocidade da partícula é reduzida e a carga de sólidos (C_s) é aumentada, resultando em menor atrito entre sólidos e, consequentemente, menores quedas de pressão.

Ponto D O ponto D representa a condição de velocidade mínima para transportar os sólidos em fase diluída. Tal velocidade é frequentemente chamada de velocidade *saltation*, e corresponde ao ponto de mínima queda de pressão para uma dada vazão de sólidos. Neste ponto, surge uma camada de partículas que é transportada em fase diluída ao longo do fundo da tubulação.

Ponto E A partir do ponto D, uma ligeira diminuição na velocidade do gás resultará em uma deposição substancial de sólidos, acarretando um aumento na resistência por fricção, a qual e refletida na queda de pressão, como mostrado no ponto E. Neste ponto, algumas partículas ficam estacionárias ao longo do fundo da tubulação e a maior parte do material é transportada em pequenos aglomerados ou dunas em fase densa (fase densa fluidizada).

Zona Instável À medida que a vazão de ar diminui ainda mais, além do ponto E, a velocidade do ar se torna insuficiente para mover todas as partículas e algumas se acumulam no fundo da tubulação, formando plugues longos. Quando forçados através da tubulação, tais plugues produzem altas flutuações de pressão e vibração, gerando uma zona de instabilidade, podendo ocorrer entupimentos.

Ponto F Reduzindo-se mais ainda a velocidade do ar, o atinge-se o ponto F, no qual as partículas são transportadas suavemente na forma de *slugs/*plugues. Ao longo da tubulação horizontal, o plugue engloba as partículas da camada estacionárias imediata à sua frente no fundo da tubulação e deposita a mesma quantidade de partículas atrás dela. Nesse fenômeno, geralmente, não há movimento interparticular dentro do próprio plugue. Reduções de velocidade do ar além do ponto F levem ao empacotamento do sólido em um leito fixo.

Curva G_2 Destaca-se que o mesmo comportamento descrito anteriormente é observado aumentando-se a vazão de sólido. No entanto, a maior quantidade de sólidos acarreta uma elevação geral na queda de pressão, bem como o deslocamento de do ponto de velocidade *saltation* para uma velocidade e pressão maior.

Cabe aqui destacar que enquanto no transporte horizontal o ponto de mínima queda de pressão é chamado de velocidade *saltation*, no transporte vertical essa velocidade é chamada de velocidade *choking*. Havendo uma nítida diferença entre as duas no sentido em que, no geral, a velocidade *saltation* é maior que a velocidade *choking*, como pode ser observado:

Tabela 2.3 - Velocidade mínima em linhas de transporte vertical e horizontal de diferentes materiais.

Material	Densidade *bulk* ($g.cm^{-3}$)	Tamanho médio de partícula (mm)	Velocidade *choking* ($m.s^{-1}$)	Velocidade *saltation* ($m.s^{-1}$)
Carvão	720	13	12,0	15,0
Carvão	720	6	9,0	12,0
Trigo	753	5	9,0	12,0
Cubos de polietileno	480	3	9,0	12,0
Cimento	1400	90	1,5	7,6
Farinha	560	150	1,5	4,6
Carvão pulverizado	720	75	1,5	4,6
Cinza pulverizada	720	150	1,5	4,6
Terra argilosa	640	106	1,5	6,1
Bentonita	900	75	1,5	7,6
Barita	1750	63	4,6	7,6
Pó de sílica	880	106	1,5	6,1

Fonte: Adaptado de Klizing *et al.* (2010).

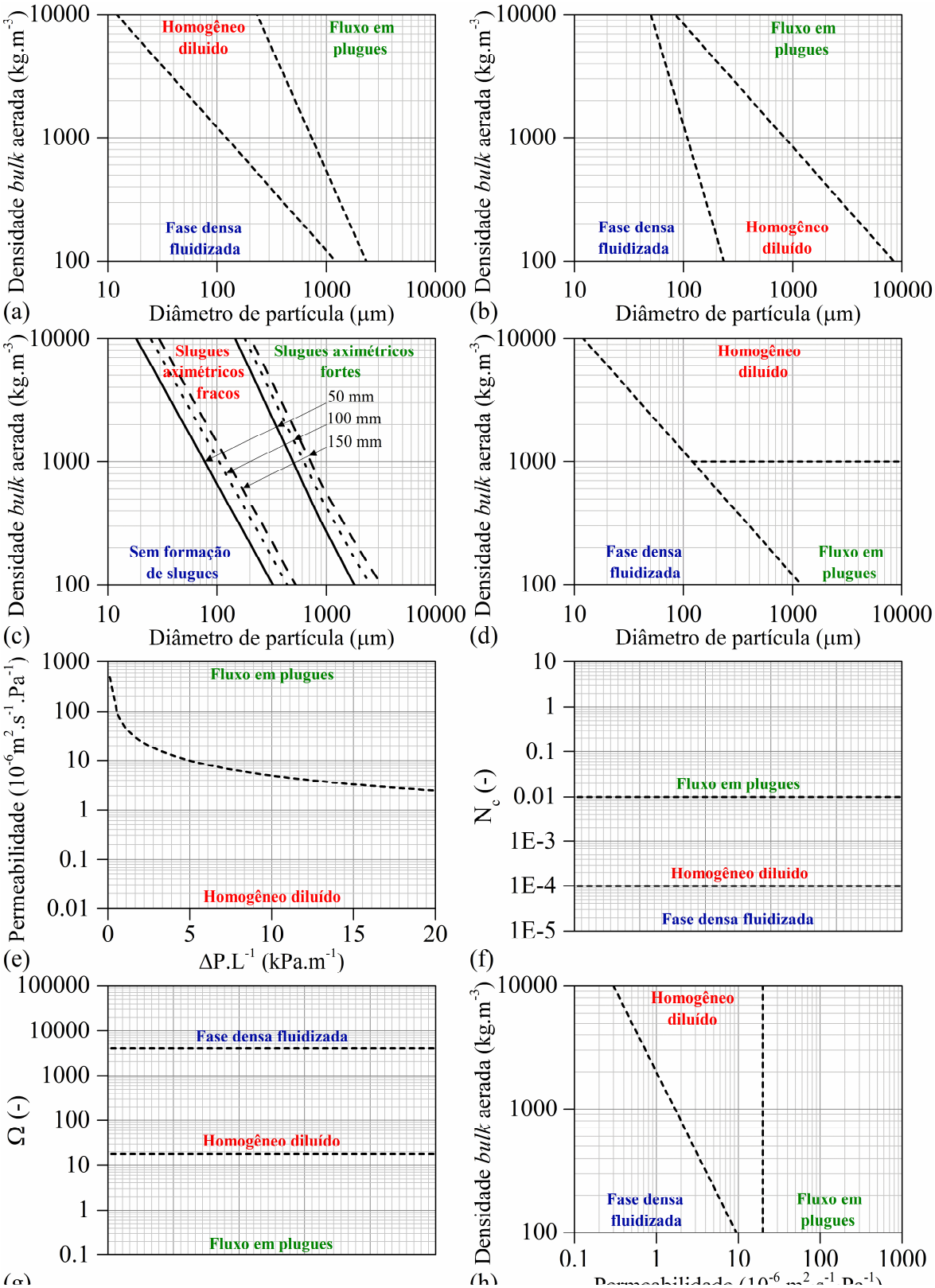
2.7.5 Predição do modo de transporte pneumático através das propriedades do material

A partir das propriedades do material é possível utilizar diagramas de previsão do regime de transporte pneumático mais adequado, os quais são geralmente categorizados em três por esses diagramas: diluído (fase diluída), fase densa fluidizada (fase densa) e fase densa em plugues (fase densa). Existem diversos diagramas disponíveis na literatura, os quais podem ser basicamente divididos em duas categorias com base nas propriedades em que se baseiam: (i) propriedades básicas do material (básicos) (Figura 2.16 (a-e)) e (ii) propriedades da mistura ar-partículas (Figura 2.16 (f-h)) (CHAMBERS; KEYS; PAN, 1998; DIXON, 1979; FARGETTE; JONES; NUSSBAUM, 1997; GELDART, 1973; JONES; WILLIAMS, 2008; MAINWARING; REED, 1987; MOLERUS, 1982; PAN, 1999). Na Figura 2.16 são mostrados os principais diagramas encontrados na literatura.

O primeiro dos diagramas básicos foi baseado no diagrama de Geldart (1973) de previsão do comportamento de fluidização do material, anteriormente mostrado na Figura 2.8. Tal analogia foi realizada partindo-se do princípio de que os comportamentos de fluidização categorizados por Geldart, de certo modo, são semelhantes ao comportamento de transporte. Por exemplo, uma comparação do diagrama de Geldart com os dados de regime de transporte de diversos materiais realizada por Jones *et al.* (2008) mostrou que materiais do tipo A e C, capazes de serem fluidizados, também podem ser transportados em fase densa fluidizada. Além disso, materiais do tipo D relativamente leves (< 2000 $kg.m^{-3}$) podiam ser transportados por fluxo em plugues. Contudo, o regime de transporte referente aos materiais do Tipo B não ficou claro. Além disso, não foi possível obter uma clara distinção entre os regimes de transporte utilizando os limites entre grupos proposto por Geldart (1973) para fluidização. Assim, Jones *et al.* (2008) propôs a substituição da densidade da partícula pela densidade *bulk* aerada do material nesse diagrama, uma vez que esse último parâmetro reflete melhor as características *bulk* do material. O diagrama modificado de Geldart é mostrado na Figura 2.16 (a). O principal avanço obtido por Jones *et al.* (2008) foi uma melhoria na distinção entre os materiais do tipo D, capazes de serem transportados em fase densa por plugues, e os materiais do tipo B.

Antes de Jones *et al.* (2008), diversos outros autores buscaram modificar os limites do diagrama de Geldart. Morelus (1982) investigou a aplicação de equações de forças de adesão entre partículas para definir novos limites. Entretanto, assim como Geldart, Molerus estava olhando para o comportamento de fluidização dos materiais, e não para o desempenho de transporte pneumático deles. Assim, pouca melhoria na previsão do regime de transporte é obtida ao se utilizar o diagrama de Molerus.

Figura 2.16 – Diagramas de predição do regime de transporte: (a) Geldart (1973) alterado por Jones *et al.* (2008), (b) Molerus (1982) alterado por Jones *et al.* (2008), (e) Dixon (1979) alterado por Jones *et al.* (2008), (d) Pan (1999), (e) Mainwaring *et al.* (1987), (f) Chambers *et al.* (1998), (g) Fargette *et al.* (1997) alterado por Jones *et al.* (2008) e (h) Jones *et al.* (2008).



Fonte: Autoria própria (2023).

Jones *et al.* (2008) também buscou modificar esse diagrama (Molerus) pela substituição da densidade da partícula pela densidade *bulk* aerada, como mostrado na Figura 2.16 (b). Porém, resultados semelhantes àqueles conseguidos pelo diagrama de Geldart modificado foram obtidos.

Dixon (1979) também procurou alterar os limites do diagrama de Geldart. Nesse caso, esse autor buscou desenvolver um diagrama para previsão da capacidade de um material para formar *slugs* axissimétricos, *slugs* axissimétricos fracos (dunas) ou não forma *slugs* no processo de fluidização. Uma vez que formação ou não de *slugs* depende do diâmetro da tubulação, tal autor vinculou o diâmetro da tubulação às equações de definição dos limites entre comportamentos de *slug*, como mostrado na Figura 2.16 (c). Jones *et al.* (2008) ao modificar esse diagrama pela introdução da densidade *bulk* aerada observou que materiais que não têm capacidade de *slug* são excelentes candidatos para o transporte de fase densa fluidizada para os diâmetros de 50-100 mm. Entretanto, o diagrama apresentou baixa capacidade preditiva para os regimes de transporte diluído e fase densa em plugues.

Pan (1999) desenvolveu um diagrama no qual a densidade da partícula foi substituída pela densidade *bulk* aerada, sendo este o único diagrama básico projetado especificamente para previsão do regime de transporte de materiais granulares, o qual é mostrado na Figura 2.16 (d). Pan classificou os três potenciais regimes de transporte em: fase densa fluidizada, o qual chamou de PC1, fase densa em plugues, PC2, e fase diluída, PC3. Vale destacar que fronteira entre os materiais PC2 e PC3 foi determinada empiricamente. Jones *et al*. (2008) ao testar a capacidade de predição do diagrama, encontrou bons resultados, principalmente para materiais transportados em fase densa fluidizada.

De modo a melhorar a previsibilidade do regime de transporte, diversos pesquisadores investigaram o comportamento de misturas ar-partículas, em particular, utilizando parâmetros associados aos testes de fluidização e desaeração em escala de bancada e buscaram correlacionar esses parâmetros aos regimes de transporte.

Um dos primeiros e mais importantes diagramas foi proposto Mainwaring *et al.* (1987), o qual é apresentado na Figura 2.16 (e). Tal diagrama se baseia na queda de pressão ($\Delta P.L^{-1}$) do estado estacionário de fluidização (fluidização plena) e na permeabilidade (κ) do material. Ambos, os parâmetros sendo determinados utilizando testes de fluidização em escala de bancada. O diagrama baseia-se no princípio que materiais com alta permeabilidade podem ser transportados em regime de fase densa por plugues, enquanto que materiais com baixa permeabilidade podem ser transportados em fase diluída ou fase densa fluidizada. A linha de fronteira que divide os dois comportamentos é aquela de velocidade mínima de fluidização

constante igual a 50 mm.s^{-1}. Jones *et al.* (2006) e Sanchez *et al.* (2003), ao analisarem esse diagrama para diversos materiais particulados, observaram boa divisão entre os materiais que podem ser transportados em fase densa em plugues e os outros regimes.

Chamber *et al.* (1998) propuseram um parâmetro adimensional único (*Nc*) baseado na densidade de partículas (ρ_r), permeabilidade (κ) e tempo de desaeração (t_{da}), definido como:

$$Nc = \frac{\rho_r \kappa}{t_{da}} \tag{2.12}$$

Vale destacar que t_{da} foi obtido por esses autores pelo ajuste da Equação (2.11) aos dados. No diagrama, mostrado na Figura 2.16 (f), os autores definiram que valores de *Nc* maiores 0,01 sugerem que o material é um bom candidato para o transporte em fase densa na forma de plugues. Já valores *Nc* menores que 0,001 indicam que o material pode ser transportado em fase densa fluidizada. Enquanto que valores moderados de *Nc*, entre 0,01 e 0,001, indicam que o modo de transporte mais adequado é em fase diluída. Tal diagrama também foi analisado por Jones *et al.* (2006) e Sanchez *et al.* (2003), encontrando um poder de previsão bem superior àqueles observados nos diagramas básicos.

Fargette *et al.* (1997) foram outros autores que propuseram um diagrama de predição baseado em um parâmetro adimensional único (Ω). Nesse caso, tal parâmetro é baseado no tempo desaeração (t_{da}) (determinado pela Equação (2.11)), permeabilidade (κ) e densidade *bulk* aerada (ρ_0) de acordo com a equação:

$$\Omega = \frac{t_{da}}{\rho_0 \kappa} \tag{2.13}$$

Para a criação desse diagrama, Fargette *et al.* (1997) também compararam a coesividade dos materiais estudados com os valores de Ω obtidos. Segundo esses autores, com valores de Ω abaixo de 0,1 e baixos valores de coesividade, os materiais podem ser transportados em fase densa em plugues. Com valores de Ω acima de 190 e alta coesividade, os materiais podem ser transportados em fase densa fluidizada. Para valores pequenos de Ω (em torno de 0,5) e baixa coesividade, espera-se que os materiais possam ser transportados somente em fase diluída. Jones *et al.* (2006) e Sanchez *et al.* (2003), ao analisarem esse diagrama encontraram resultados semelhantes àqueles obtidos pelo diagrama de Chamber *et al.,* ou seja, um excelente poder de

previsão. De modo a aperfeiçoar ainda mais o poder de previsão desse diagrama, Jones *et al.* (2006) propôs uma modificação nas linhas de fronteira que definem a região de fase diluída para $18 < \Omega < 4000$, como mostrado na Figura 2.16 (g). Com isso, o diagrama foi capaz de separar praticamente todos os materiais estudados por Jones *et al.* (2006) que podiam ser transportados apenas em fase diluída nessa região.

Por fim, Jones *et al*. (2006) também propôs um diagrama, baseado na densidade *bulk* aerada e na permeabilidade do material. A escolha desses dois parâmetros em particular foi devido à dificuldade de uma padronização no método de determinação da constante de desaeração de materiais granulares. Assim, os autores buscaram obter um diagrama de previsão dos regimes de transporte sem a necessidade de determinar um valor de desaeração. Tal diagrama é mostrado na Figura 2.16 (h) onde os limites que separam os regimes foram empiricamente propostos por esses autores. Os resultados obtidos com esse diagrama foram semelhantes àqueles obtidos pelos diagramas básicos em relação à previsão dos regimes em fase densa fluidizada e em plugues. Contudo, diferentemente daqueles, os autores obtiveram uma clara região de fase diluída.

2.7.6 Sistemas inovadores

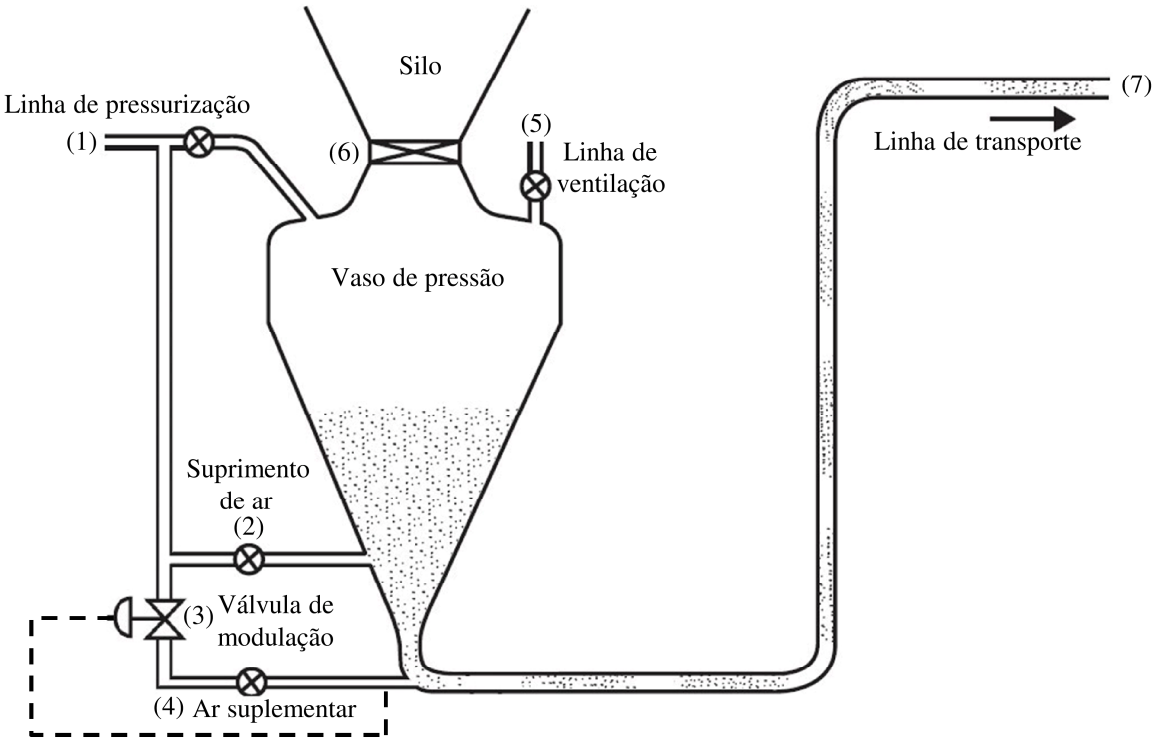
Em geral, materiais que possuem baixa capacidade de retenção de ar e permeabilidade dificilmente podem ser transportados em baixa velocidade em fase densa, mesmo utilizando sistemas de alta pressão, uma vez que, a capacidade de transporte do material em fase densa é fortemente relacionada a estas propriedades. Em especial, no caso de materiais abrasivos, como é o caso de cascalhos de perfuração, se os materiais não podem ser naturalmente transportados em fase densa a baixas velocidades, alternativas aos sistemas convencionais devem ser estudadas. O transporte em fase diluída não é uma opção interessante para esses materiais, visto que, devido a alta velocidade das partículas, ocorre uma elevada erosão de curvas na tubulação e outras superfícies da planta sujeitas ao impacto de partículas (MILLS, 2004).

Assim, devido à necessidade de transportar diferentes materiais sem capacidade natural de transporte de fase densa, diversos trabalhos foram desenvolvidos na literatura. Os resultados desses trabalhos deram origem a sistemas que buscam o condicionamento do material para o transporte, seja no ponto de alimentação ou ao longo da tubulação. Sendo esse condicionamento realizado através de modificações baseadas na tubulação e sistemas de alimentação, as quais serão abordadas nessa seção, com um foco direcionado ao sistema de transporte pneumático de cascalhos (MILLS; JONES; AGARWAL, 2001).

2.7.6.1 Vasos de pressão

O vaso de pressão pode ser descrito como um vaso de fundo tronco-cônico equipado com válvulas e conexões necessárias para atender aos requisitos específicos de alimentação e pressão, como ilustrado na Figura 2.17. Os vasos de pressão podem ser categorizados pelo local de descarga do material como: superior ou inferior. Os vasos de descarga inferior são os mais comuns de serem encontrados. Já os vasos de descarga superior dependem de uma fluidização eficiente e do arrasto do material no tubo de descarga, sendo utilizados apenas em situações em que os requisitos de espaço são limitados ou onde uma configuração de descarga superior é mais adequada para todo o sistema de transporte (KLINZING *et al.*, 2010).

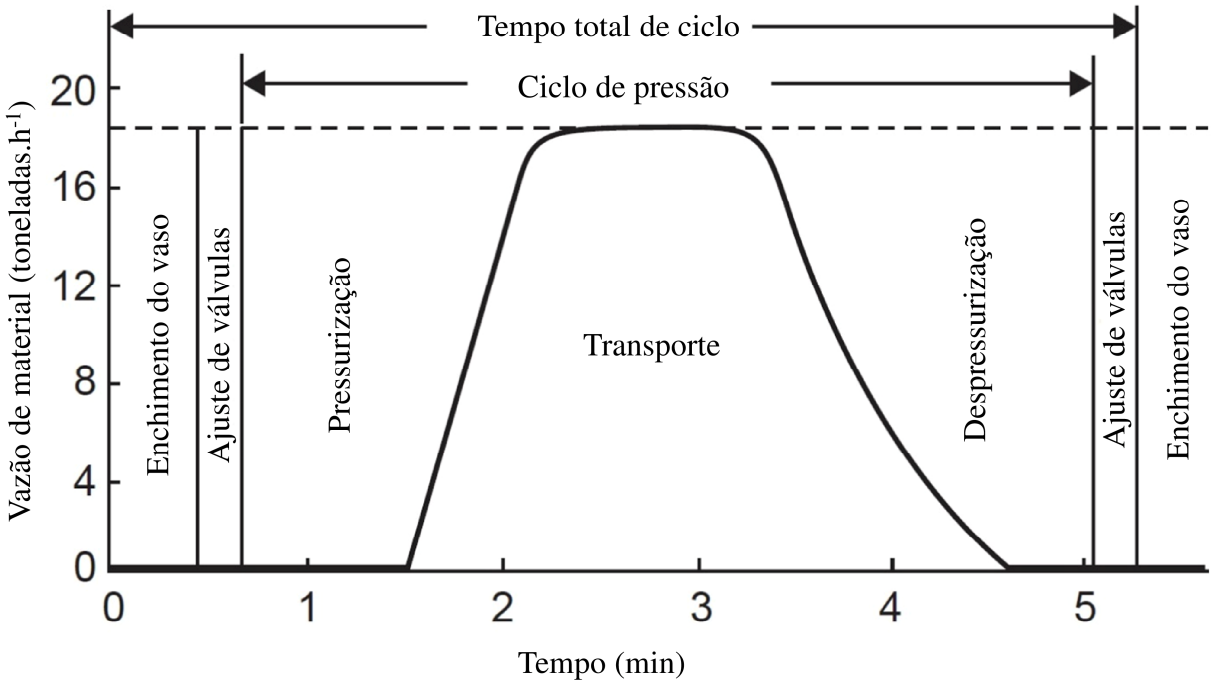
Figura 2.17 – Ilustração de um vaso de pressão.



Fonte: Adaptado de Mills (2004).

O ciclo de operação de um vaso de pressão é de extrema importância para o projeto de sistemas de transporte pneumático, pois sua duração influencia diretamente na capacidade de transporte do sistema. A Figura 2.18 apresenta um ciclo genérico de um vaso de pressão sem válvula de descarga.

Figura 2.18 – Ciclo típico para um único vaso de pressão operando sem válvula de descarga.



Fonte: Adaptado de Mills (2004).

O ciclo mostrado na Figura 2.18 pode ser interpretado utilizando o vaso da Figura 2.17 como se segue (KLINZING *et al.*, 2010; MILLS, 2004):

Enchimento do vaso Processo no qual a válvula (6) entre o silo e o vaso é aberta dando início ao enchimento do vaso até atingir o *setpoint* desejado. Nesse caso, a variável de processo pode ser uma dada massa de material ou uma altura específica que o material deve atingir ao encher o vaso, dependendo da instrumentação do vaso. Nesse processo é importante que uma válvula (5) permanece aberta durante todo o processo de enchimento para o escape de ar, caso contrário, o processo se dará de forma lenta.

Ajuste de válvulas Após o enchimento do vaso com a carga desejada, as válvulas (6) e (5) são fechadas e a válvula de pressurização (1) é aberta. Nesse ponto, caso o vaso possua uma válvula de descarga ela permanecerá fechada e o processo de pressurização ocorre de forma rápida. Porém, caso ele não possua, deve-se trabalhar com materiais que formem uma resistência natural ao escoamento do ar, o que causará um aumento de pressão no recipiente até que o transporte ocorra. Materiais do grupo B, o qual os

cascalhos fazem parte, tendem a "inundar" a saída do vaso de pressão e são mais bem manejados sem uma válvula de descarga. Quando descarregados por meio de válvulas de descarga, tais produtos tendem a bloquear instantaneamente a tubulação.

Transporte Nesse ponto, o material começa a ser descarregado do vaso, espontaneamente devido à pressão, e/ou pela abertura das válvulas (2) e (4) que fluidizam a auxiliam na descarga do material. A vazão de material descarregado aumentar rapidamente até alcançar um estado estacionário, e então se reduz novamente a zero.

Despressurização Nesse ponto, se o vaso possuir uma válvula de descarga é possível isolar a linha de transporte do vaso de pressão e realizar a despressurização separada dela pela abertura da válvula (5). Por outro lado, caso a válvula não esteja presente, a despressurização só ocorrerá quando o material for completamente transportado e a pressão na linha se reduzir. Após a despressurização o ciclo se inicia novamente.

Vale destacar que os períodos mostrados na Figura 2.18 podem sofrer influência de diversos fatores como tamanho do vaso, quantidade de material ser descarregado, tipo de material utilizado, diâmetro da tubulação de descarga, tipos de válvulas utilizadas, suprimento de ar disponível, relação entre vazão de ar injetada no vaso e injetada na tubulação de transporte, entre outros fatores. Assim, havendo para cada vaso, descarregando um material especifico, em condições próprias, uma curva característica de descarga (MILLS, 2004).

A capacidade máxima de descarga de um vaso de pressão é limitada pelo volume do vaso e pelo tempo total do ciclo de acordo com a equação a seguir (KLINZING *et al.*, 2010):

$$\dot{m}_V = \frac{\rho_0 V_V}{t_T} \tag{2.14}$$

em que: m_v é a taxa de descarga , V_V é o volume total do vaso, t_T é o tempo total de descarga e ρ_0 é a densidade bulk aerada. O tempo total de descarga é dado pela equação:

$$t_T = t_E + t_P + t_D \tag{2.15}$$

em que: t_E é o tempo de enchimento, t_P é o tempo de pressurização e t_D é o tempo de descarga. Sendo desejável que t_E e t_P sejam os mínimos possíveis.

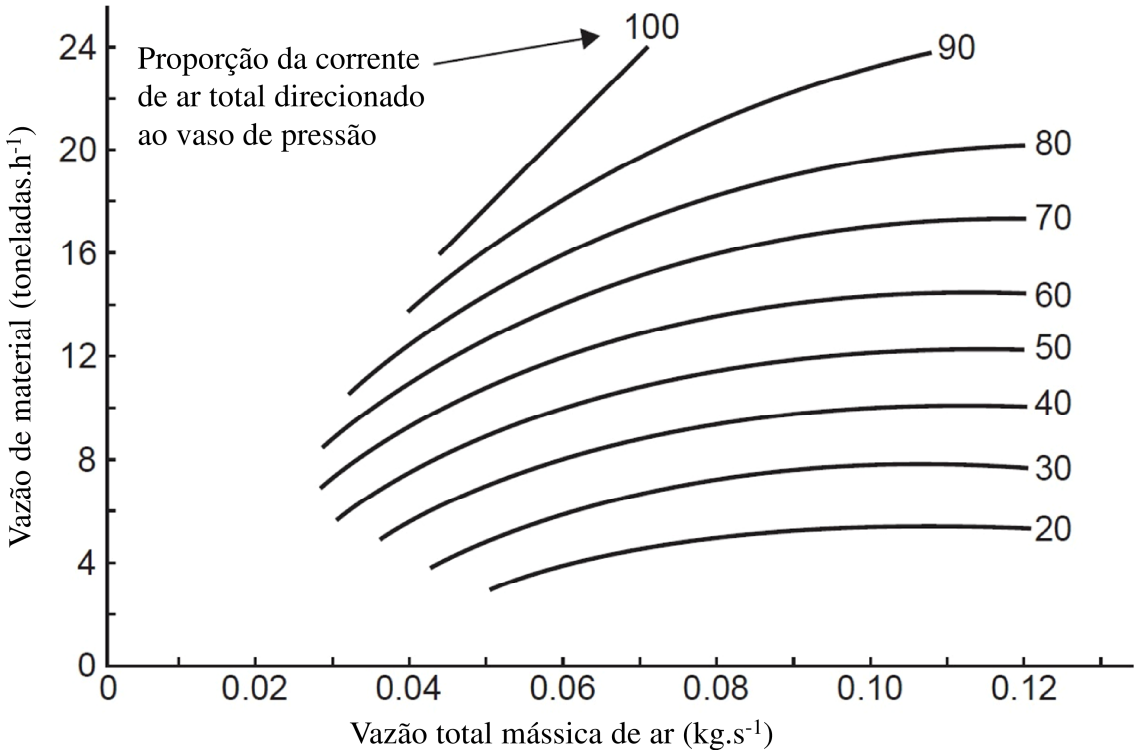
Os vasos de pressão são largamente utilizados em sistemas inovadores devido a uma série de fatores. Uma característica importante desse dispositivo é a ausência de partes moveis, sendo, portanto, ideal para a alimentação de materiais abrasivos e frágeis. Quando comparado a outros alimentadores, como Venturi, os vasos de pressão alimentam os sólidos a uma baixa velocidade, o que corrobora ainda mais sua utilização para materiais abrasivos e frágeis. Outro fator de destaque é a sua alta versatilidade, podendo, sem qualquer modificação, alimentar materiais com alta e baixa densidade. Além disso, apesar dos vasos de pressão estarem associados ao transporte em alta pressão, eles possuem pressão de operação variando desde valores baixos, menores 1,0 bar, até altos valores, bem acime a de 5,0 bar (MILLS, 2004; MILLS; JONES; AGARWAL, 2001).

Assim, também pode-se utilizar vasos de pressão para o transporte de fase diluída a baixa pressão, sendo necessário apenas controlar o fluxo de alimentação dos sólidos. Nesse caso, por não ter partes móveis, o controle de fluxo é feito por meio de dosagem de ar (MILLS, 2004; MILLS; JONES; AGARWAL, 2001). Como mostrado na Figura 2.17, parte do ar é direcionado para pressurizar o vaso (1) e arejar/fluidizar o material (2), o que facilita o escoamento e descarga, enquanto o restante é usado para diluir as altas concentrações de material descarregado na linha (4). Esta última corrente de ar é muitas vezes referida como ar suplementar. O controle das correntes de ar pode ser feito por uma válvula de modulação (3) conectada em um sistema *feedback*, onde a variável de processo é a pressão na linha de ar suplementar (4). De modo que se a pressão monitorada estiver abaixo do *setpoint*, a válvula moduladora restringirá o escoamento do ar para a linha suplementar e assim mais ar será direcionado para o vaso de pressão. Com uma proporção maior do suprimento de ar direcionado ao vaso de pressão, a taxa de alimentação aumentará. Se a pressão aumentar além do *setpoint*, a válvula moduladora abrirá um pouco para permitir a entrada de mais ar suplementar e, portanto, a vazão do material será reduzida, reduzindo a pressão na linha (MILLS, 2004). Vale destacar que diversos outros *layouts* de tubulações para a alimentação de ar e sistemas de controle podem ser utilizando, dependendo das características do sistema de transporte e aplicações específicas.

A Figura 2.19 mostra curvas típicas de descarga de cimento de um vaso de pressão para várias proporções da corrente de ar total direcionado ao vaso de pressão. Observa-se que o equipamento é capaz de realizar a alimentação do material em uma ampla faixa de vazões. As linhas de proporção de ar constante terminam devido ao limite de transporte para o material

considerado. Este limite é ditado pela velocidade mínima do ar de transporte e, portanto, pela vazão de ar necessária para atingir esse valor de velocidade. A linha 100% representa a capacidade máxima de descarga do vaso de pressão (MILLS, 2004).

Figura 2.19 – Curvas características típicas de descarga de vaso de pressão.

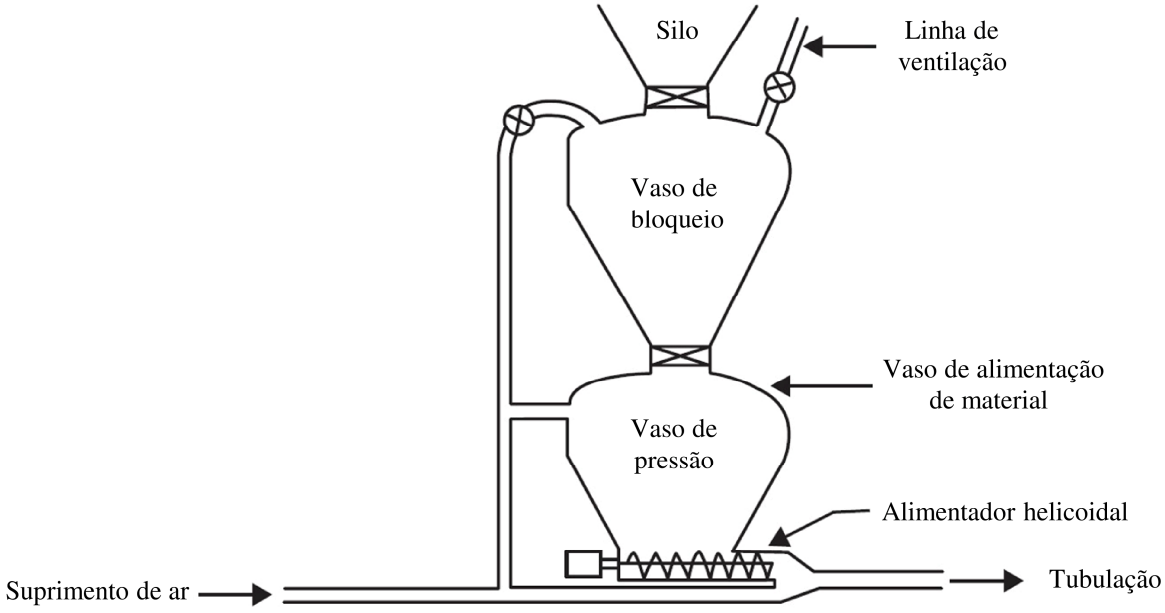


Fonte: Adaptado de Mills (2004).

Os sistemas de vaso de pressão mostrados até agora permitiam que o material fosse transportado em bateladas intermitentes. Contudo, existem situações em que é necessário transportar o material continuamente pelo uso de vasos de pressão, como é o caso de diversas operações de transporte de cascalhos. Para isso pode-se associar dois vasos de pressão, como mostrado na Figura 2.20. O vaso de cima, comumente chamado de silo de bloqueio, fica localizado entre o silo de abastecimento, que geralmente estará à pressão atmosférica para permitir o carregamento contínuo de material, e o vaso de alimentação de material, que pode estar em qualquer pressão necessária. A operação consiste no enchimento do silo de bloquei a partir do silo de alimentação, o qual é então pressurizado à mesma pressão que o vaso de pressão. Quando a pressão entre os dois está balanceada, o vaso de pressão é reabastecido para manter um fluxo contínuo de material. O vaso de pressão é então selado e realiza o processo de alimentação na linha, enquanto o vaso de bloqueio é despressurizado por meio de uma válvula de alivio para pressão atmosférica, estando pronto para um novo ciclo.

Nesses sistemas, como o vaso de bloqueio está separando do vaso de pressão, e este está à mesma pressão que a linha de transporte, a queda de pressão no alimentador é muito baixa. Nesse sentido, na saída do vaso de pressão pode-se acoplar uma válvula rotativa ou um alimentador helicoidal para controlar a vazão de descarga do material na linha com maior precisão. Vela destacar que, devido ao equilíbrio das pressões entre alimentador e linha de transporte, os problemas de vazamento comumente encontrados utilizado sistemas convencionais com alimentadores desse tipo são mínimos (MILLS, 2004). Uma das vantagens desses sistemas é que a velocidade de rotação, por exemplo, da válvula rotativa, pode ser acoplada a um controle *feedback* de controle de pressão na linha. Assim, se muito material está sendo alimentado, uma maior queda de pressão será detectada por transdutores de pressão, e a velocidade de rotação da válvula poderá ser reduzida proporcionalmente.

Figura 2.20 – Sistema de vaso de pressão duplo com alimentação de helicoidal.



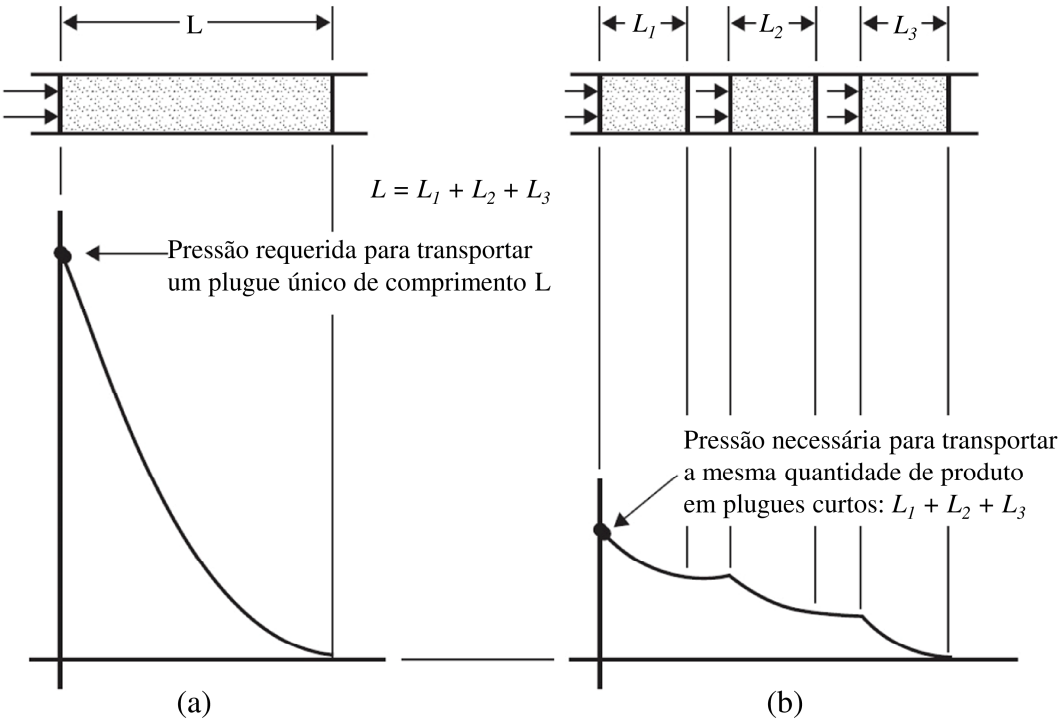
Fonte: Adaptado de Mills (2004).

2.7.6.2 Sistemas de formação de destruição de plugues

No caso de materiais com características naturais pouco favoráveis para o transporte em fase densa, após o material ser descarregado na linha, em diversas situações, eles são transportados na forma de plugues ou dunas pelas tubulações. A diferença de pressão, entre a parte de trás do plugue e a parte da frente, necessária para movimentar o material varia

exponencialmente com o comprimento do plugue, conforme ilustrado na Figura 2.21. Assim, o transporte de materiais como um plugue inteiro (Figura 2.20 (a)) por distâncias razoáveis é impraticável devido às pressões extremamente elevadas que são alcançadas. Neste ponto, vale destacar que quanto mais areável, permeável e expansivo for o material, menor será o atrito dos sólidos e consequentemente, menor a queda de pressão através do plugue. Se, por outro lado, o material for transportado como vários plugues curtos (Figura 2.21 (b)), separados por bolsões de ar, os requisitos de pressão podem ser reduzidos substancialmente. Ao aumentar o comprimento dos bolsões de ar e, assim, diminuir o número de plugues na tubulação, para uma determinada pressão do sistema, é possível transportar o material por distâncias maiores (MILLS, 2004; MILLS; JONES; AGARWAL, 2001). Para a realização do transporte em fase densa em plugues, diversos sistemas inovadores são descritos na literatura, os quais podem ser basicamente divididos em sistemas de formação e destruição de plugues.

Figura 2.21 – Relação entre pressão e comprimento do plugue para transporte em fase densa.



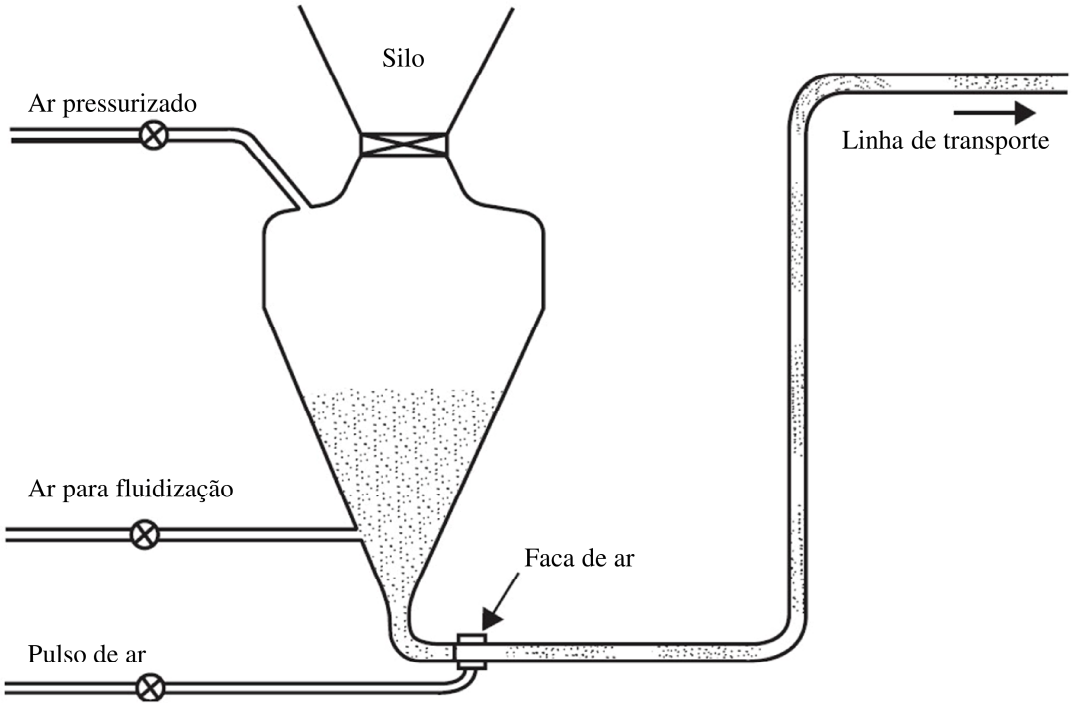
Fonte: Adaptado de Mills (2004).

De forma simplificada os sistemas de formação de plugues buscam criar o plugue do tamanho desejado já na saída do vaso de pressão. Nesses sistemas, em geral, o vaso de pressão descarrega um plugue contínuo, o qual é cortado por um dispositivo auxiliar na saída do vaso, ou o vaso realiza descargas intermitentes de plugues. Os dispositivos auxiliares são diversos,

como “facas de ar”, válvulas de descarga intermitentes e sistemas de injeção de ar intermitente no vaso e no bocal de saída para a descarga controlada do material.

Um exemplo clássico é o sistema de formação de plugues por corte de ar desenvolvido pelos laboratórios Warren Spring, mostrado na Figura 2.21. Nesse sistema, quando o suprimento de gás para a faca de ar está "ligado", o pulso de gás divide o plugue, interrompe o fluxo de material do recipiente e empurra o plugue cortado a uma curta distância ao longo da tubulação de transporte. O processo de transporte consiste em uma série de plugues de material intercalados por um intervalo de gás. A grande vantagem de sistemas como este é que os plugues já saem formados para o transporte, dando mais estabilidade para a operação. Porém, tais sistemas não são recomendados para materiais que possuem facilidade de entupimento, pois não há qualquer método para desobstruir facilmente a tubulação entupida (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990).

Figura 2.22 – Sistema de transporte pulsante.

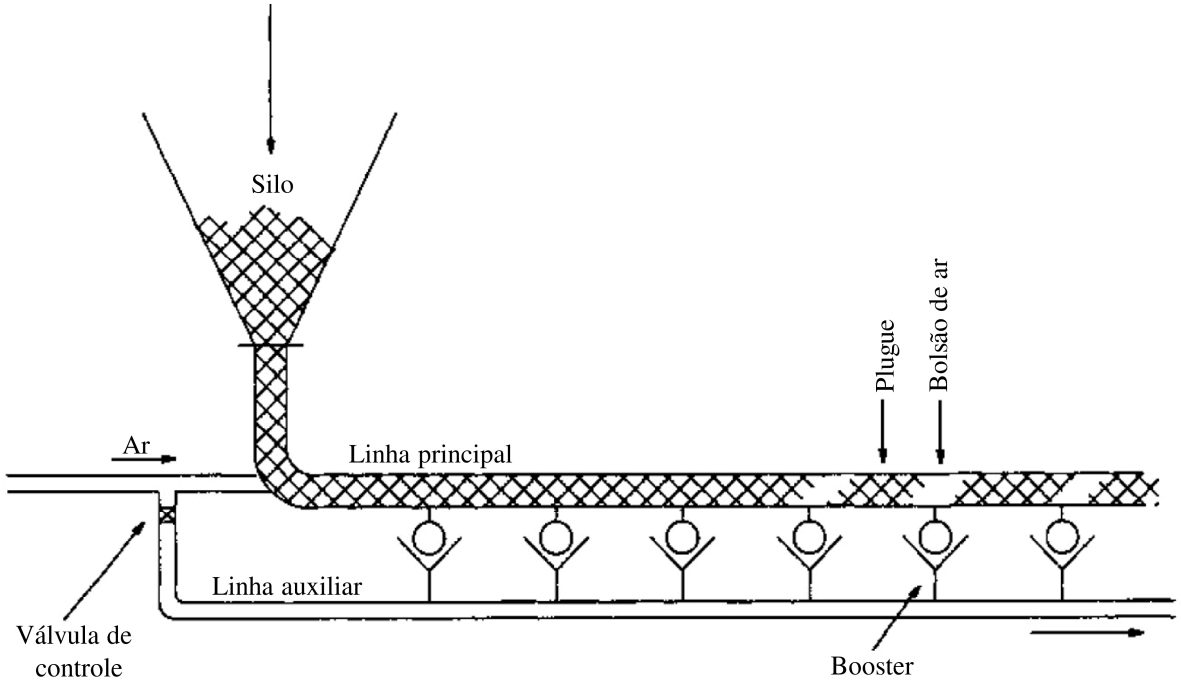


Fonte: Adaptado de Mills (2004).

Por outro lado, nos sistemas de destruição de plugues, o material é descarregado pelo vaso de pressão e então cortado/separado ao longo da linha de transporte pela injeção de ar através de dispositivos auxiliares. Basicamente, esses sistemas consistem em uma série de estações de injeção de gás ao longo do tubo de transporte, sendo que a distância entre cada

estação é governada tanto pelo tamanho da linha quanto pela natureza do produto transportado, geralmente variando entre 3 e 15 m, como ilustrado na Figura 2.23. As estações de injeção (*booster*) podem ser internas a tubulação de transporte, nesse caso uma tubulação auxiliar interna de suprimento de pressurizado percorre todo o comprimento da linha de transporte, com pontos específicos de injeção de ar. Esse tipo de sistema é mais recomendando quando se deseja realizar o transporte em regime de fase densa em dunas (Figura 2.13), uma vez que, a tubulação interna auxiliar atrapalha a formação de plugues. Alternativamente, as estações (*booster*) podem ser externas, como mostrado na Figura 2.23, com uma tubulação auxiliar correndo paralelamente a tubulação de transporte. Sendo esse sistema mais indicado para o transporte em plugues de materiais que possuem tendência a entupimentos (KLINZING *et al.*, 2010; MILLS, 2004).

Figura 2.23 – Sistema de transporte em fase densa por plugues com injeção de ar por *boosters*.



Fonte: Adaptado de Klizing *et al.* (2010).

Ambos os sistemas têm como vantagem principal a injeção seletiva por pulsos de ar comprimido somente em pontos selecionados, geralmente na saída de curvas, de modo a prevenir entupimentos. A frequência e a intensidade dos pulsos devem ser escolhidas de modo a apenas separar a junção de plugues, ou cortar um plugue extenso já existente. Pode-se ainda, em cada estação, utilizar uma válvula acoplada a um sensor de pressão, de maneira a detectar

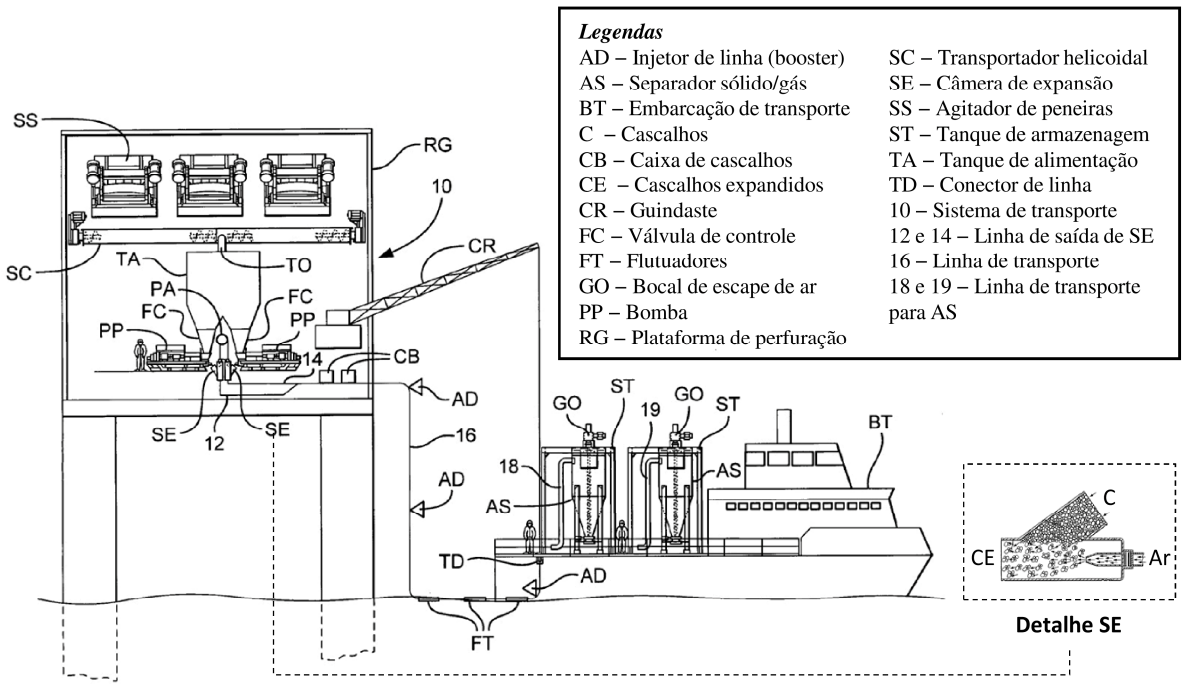
automaticamente as mudanças de pressão e ajustar a pressão do reforço para manter o escoamento de material (KLINZING *et al.*, 2010; MILLS, 2004).

2.7.7 Sistemas de transporte pneumático de cascalhos de perfuração

Devido a natural inconsistência dos cascalhos quanto à umidade, distribuição granulométrica e coesividade, diversos sistemas de transporte podem ser encontrados em patentes, de modo a atender diferentes demandas. Na presente seção, buscou-se apresentar os principais sistemas utilizados para o transporte cascalhos.

O primeiro sistema abordado é mostrado na Figura 2.24 e se destina ao transporte pneumático de cascalhos provindos de peneiras vibratórias com umidades entre 10% e 20% em peso de líquido (água e óleo). Melhorias nesse sistema foram descritas ao longo de diversas patentes (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007; BURNETT *et al.*, 2006). Em geral, tal sistema visa o transporte dos cascalhos para o tratamento *onshore* e posterior descarte.

Figura 2.24 – Sistema de transporte pneumático de cascalhos utilizando bombas.



Fonte: Adaptado de Burnett *et al.* (2007).

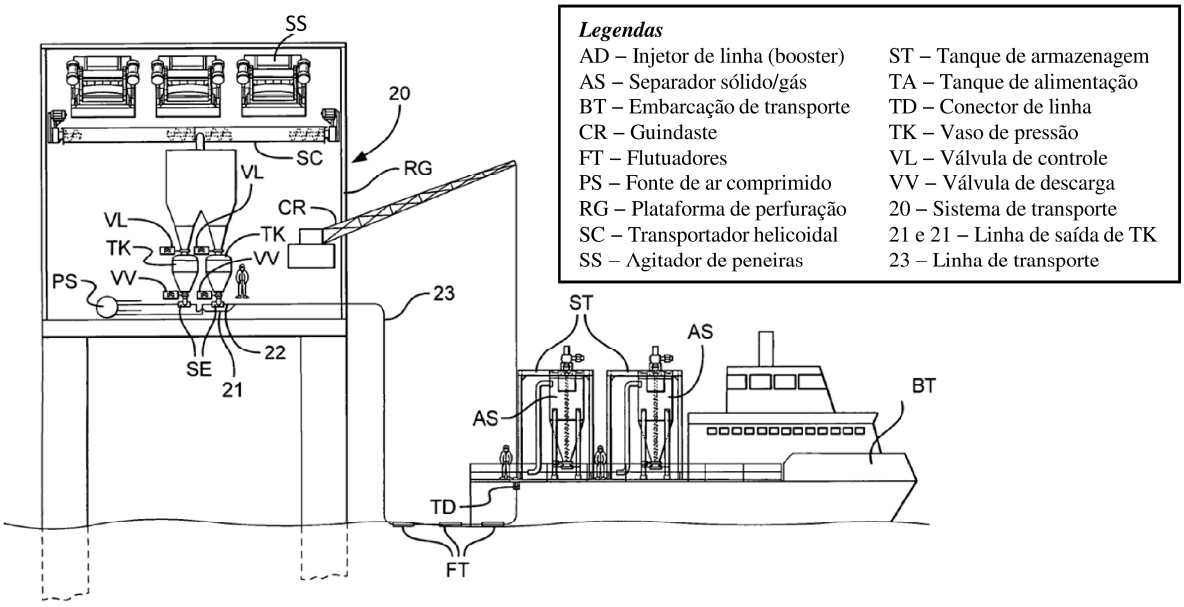
No sistema mostrado (10), os cascalhos (C) separados nas peneiras vibratórias (SS) da plataforma de petróleo (RG) são transportados através de transportadores helicoidais (SC) até

um tanque ou silo de alimentação (TA). Do tanque, os cascalhos são controladamente alimentados, por meio de válvulas de controle (FC), em bombas de alimentação (PP). Tais bombas injetam os cascalhos em câmeras de expansão (SE), as quais visam reduzir a densidade da mistura (aeração) para valores na faixa de 120-240 $kg.m^{-3}$, o que acarreta um menor atrito dos sólidos nas tubulações de transporte. O funcionamento básico da câmera de expansão é mostrado no detalhe da Figura 2.24. Os cascalhos (C) são injetados por uma extremidade em uma câmera, em formato de Y ou T, entrando em contato com o ar pressurizado (1-3,5 bar), a uma vazão de 500-1000 $m^3.h^{-1}$, o qual é alimentado por outra extremidade, formando os cascalhos expandidos (CE) na saída da câmera. Os cascalhos expandidos são então conduzidos através de tubulações de transporte (12 e 14) por ação do ar pressurizado como um plugue único. Quando então na tubulação de transporte (16) da plataforma (RG) para a embarcação (BT), o plugue único começa a ser cortado por ação de injetores de linha (AD) (*boosters*) em plugues menores. Na embarcação de transporte, o material é direcionado através de tubulações (18 e 19) para separadores de mistura (AS). Nos separadores (AS), o ar que expandia os cascalhos é removido e saí por um bocal superior (GO). Já os cascalhos, na sua forma densa, escoam por gravidade até tanques de armazenagem (ST) e posteriormente para tanques de contenção da embarcação. A qual leva os cascalhos para o destino adequado.

Alternativamente, esse mesmo sistema pode ser utilizado para outros propósitos. Por exemplo, na própria plataforma, os cascalhos expandidos podem ser transportados para um tanque separador, o qual funciona de maneira semelhante a AS e então alimentado em um secador Vórtex. Em seguida, os cascalhos secos podem ser transferidos para caixas de cascalho (CT) para serem transportados para a embarcação (BT) por meio de guindastes (CR). Nesse caso, se o teor da fase orgânica atender a legislação ambiental os cascalhos poderão ser descartados sem futuros tratamentos pela embarcação. Outra possibilidade é pular o passo de secagem e transportar os cascalhos úmidos diretamente para caixas de cascalhos (CT) e então transferir as caixas para a embarcação (BT).

Na Figura 2.25 é mostrado um sistema de transporte de cascalhos bem semelhante àquele mostrado na Figura 2.24. Tal sistema também é descrito nas patentes citadas acima. A principal diferença é que neste, ao invés de bombas e câmaras de expansão, vasos de pressão são utilizados.

Figura 2.25 – Sistema de transporte pneumático de cascalhos utilizando vasos de pressão.



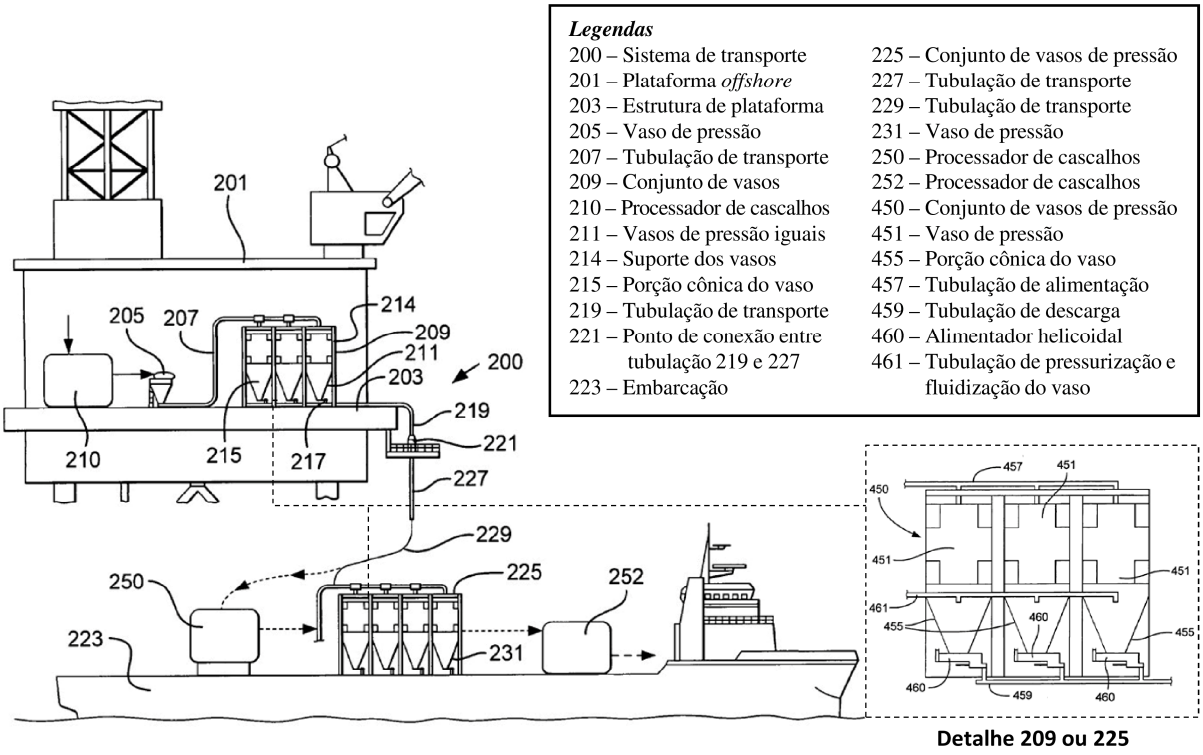
Fonte: Adaptado de Burnett *et al*. (2007).

No sistema acima (20), novamente os cascalhos separados em SS são transferidos através de SC até TA. Os cascalhos escoam por gravidade do tanque TA para o vaso de pressão (TK). Uma válvula de controle (VL) é utilizada para dosar a quantidade de material desejada. Os sólidos são alimentados na tubulação de transporte (21 e 22) através de ciclos de pressurização e despressurização do vaso, semelhante àquele ilustrado na Figura 2.18. Vale destacar que esse vaso de pressão possui válvula de descarga, o que facilita sua pressurização e controle de formação de plugues. Os cascalhos são então transportados por ação do ar pressurizado (PS) até a tubulação de transporte (23). Tal tubulação realiza a condução dos cascalhos por ação pneumática de RG para BT. Os cascalhos são então separados em AS, transferidos para ST e armazenados na embarcação que realiza o transporte. De forma alternativa, esse sistema também pode ser utilizado para o transporte de cascalhos para secadores Vórtex e/ou caixas de cascalhos (CT), com posterior transporte das caixas (CT) por guindastes (RG) para a embarcação (BT).

As mesmas patentes citadas ainda descrevem um sistema que utiliza múltiplos vasos de pressão para alimentação e recepção de material, como mostrado na Figura 2.26. Diferentemente dos sistemas acima, antes de serem transportados, os cascalhos passam por um processador de cascalhos (210). De modo simplificado esse equipamento é uma centrífuga vibradora na qual uma mistura de cascalhos e fluido de perfuração é inserida na superfície interna de uma tela de filtro anular. A tela anular, tendo diversas aberturas, gira e vibra de modo que o fluido de perfuração possa passar pelas aberturas, mas os cascalhos de perfuração sejam

impedidos. O processador de cascalhos pode reduzir significativamente a quantidade de fluido nos cascalhos perfurados. Por exemplo, conteúdos de fluido entre 15% a 20% em peso presente em cascalhos podem ser reduzidos para 1% a 3%, transformando o cascalho em um material que pode ser considerado seco.

Figura 2.26 – Sistema de transporte pneumático de cascalhos por múltiplos vasos de pressão.



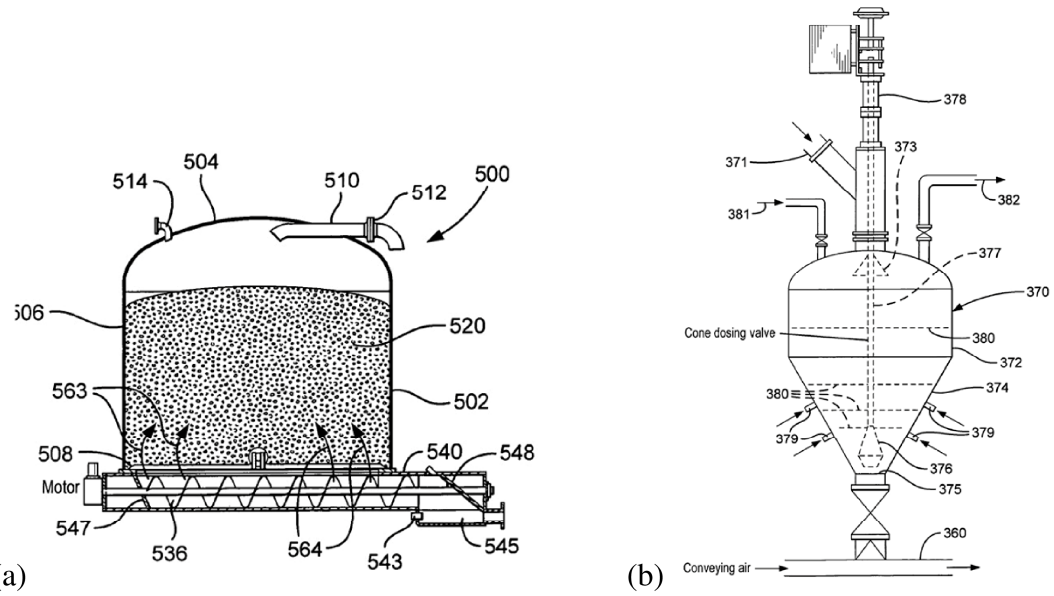
Fonte: Adaptado de Burnett *et al*. (2007).

Em seguida, os cascalhos provindos do processador de cascalhos (210) são transferidos para um vaso de pressão (205). Tal vaso segue um ciclo de enchimento e descarga de material, sendo, em certos aspectos, semelhante àquele mostrado na Figura. 2.17. No início do ciclo, a válvula de entrada de material é fechada e uma válvula de ventilação é aberta para equalizar a pressão do vaso com o ar ambiente. A válvula de entrada é aberta e os cascalhos são alimentados. A válvula de ventilação é simultaneamente aberta para o escape de ar deslocado do recipiente. Quando o vaso está cheio de material, as válvulas de entrada e ventilação são fechadas, selando o recipiente. Vale destacar que esse vaso não possui válvula de descarga, de modo que o próprio material sela o bocal de saída durante a pressurização. Uma válvula de entrada de ar é aberta, o vaso se pressuriza e o material começa a escoar pelo bocal de saída do vaso em direção a um tubo (207) que leva o material para o um conjunto de vasos de pressão (209), mostrado no detalhe dessa figura. Os vasos de pressão mostrado em 209 são diferentes

daquele exibido em 205. Esse primeiro é semelhante àquele mostrado em detalhes na Figura 2.27 (a). Como pode ser observado nessa figura, o material (520) é carregado nesse vaso (500) por um tubo na parte superior (510), sob o controle de uma válvula (512). Após o completo carregamento, o vaso é selado e ar pressurizado é introduzido por um bocal de entrada (514). Após alcançar a pressão de trabalho (7 bar), o mecanismo helicoidal (536) é acionado por meio de um motor, direcionando o material para uma câmera de saída (545), conectada a tubulação de transporte (Figura 2.26 (219)). Ar comprimido também pode ser introduzido na lateral do vaso (Figura 2.26 (461)), para fluidizar o material, e na câmera de descarga (Figura 2.27 (543)), para aerar o material.

Figura 2.27 – Diferentes sistemas de vasos de pressão: (a) vaso de pressão com alimentação helicoidal e (b) vaso de pressão com mecanismo de dosagem por pistão.

Legendas			
500 – Vaso de pressão	536 – Helicoide de alimentação	360 – Tubulação de transporte	378 – Cilindro atuador
502 – Casco do vaso	543 – Bocal de entrada de ar	370 – Vaso de dosagem	379 – Bocal de entrada de ar para fluidização
504 – Domo do vaso	545 – Câmera de descarga	371 – Tubulação de entrada	380 – Cerdas radiais
506 – Parede cilíndrica	547 – Placa inclinada	372 – Vaso de pressão	381 – Bocal de entrada de ar
508 – Fundo do vaso	548 – Placa inclinada	373 – Válvula de enchimento	382 – Bocal de ventilação
510 – Tubulação de entrada	563 – Sentido de rotação	374 – Porção tronco-cônica	
512 – Válvula de controle	564 – Sentido de rotação	375 – Abertura de dosagem	
514 – Tubo de entrada de gás		376 – Válvula de descarga	
520 – Cascalhos de perfuração		377 – Pistão	



Fonte: Adaptado de Burnett *et al*. (2007).

Prosseguindo na Figura 2.26, o material é então conduzido por ação do ar comprimido através da tubulação de transporte (219, 221 e 227) da plataforma (201) para a embarcação de transporte (223). Caso necessário, o material pode ser direcionado para tratamento em outro

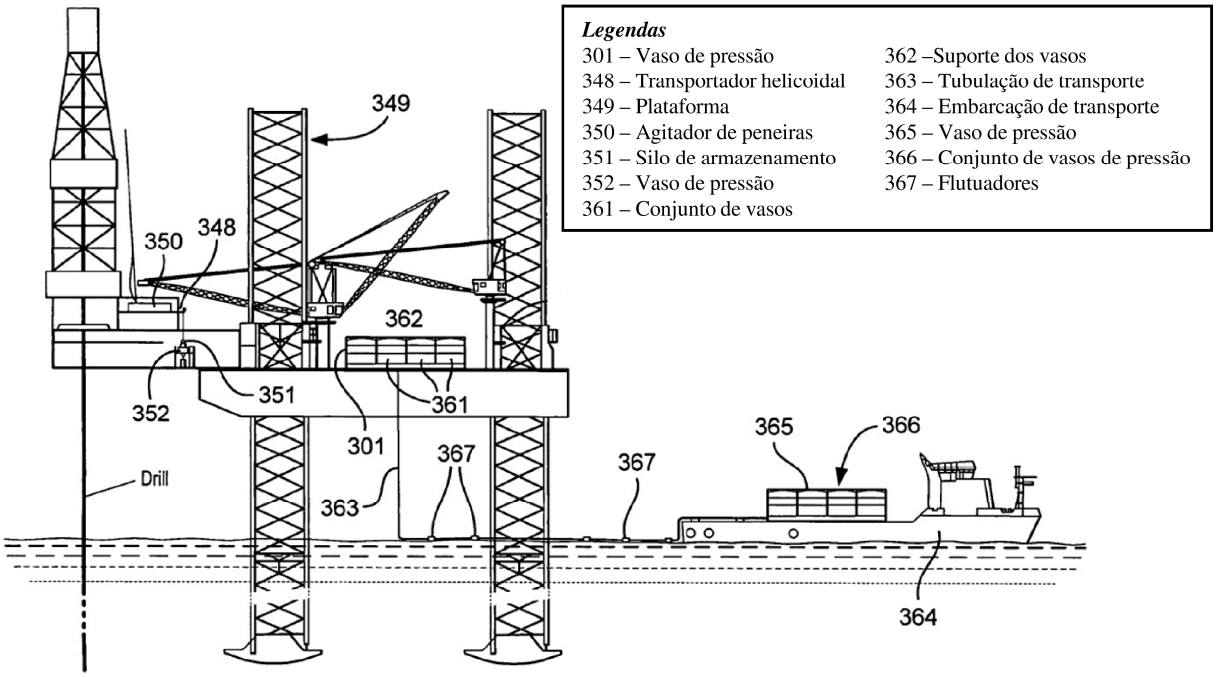
processador de cascalhos (250), ou ser enviado para o armazenamento em um conjunto de vasos de pressão (225). Desse conjunto o material pode ser facilmente transportado para sistemas *onshore* e descarte *offshore* por ação de ar comprimido presente no barco. Outro caminho é transferir os cascalhos presentes no conjunto de vasos (225) para outro processador de cascalhos (252), trata-los e então armazena-los em tanques de contenção da embarcação.

Outro sistema de transporte é mostrado na Figura 2.28, pouco se diferindo do sistema da Figura 2.26, tendo sido descrito por várias patentes, com pequenas modificações (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT *et al.*, 2006). Nesse sistema, os cascalhos separados pelas peneiras vibratórias (350) são transferidos por um transportador helicoidal (348) para um silo de armazenamento (351), o qual alimenta um vaso de pressão (352). Tal vaso, mostrado em maiores detalhes na Figura 2.27 (b), também é conhecido com vaso de dosagem. O recipiente (370) tem uma entrada de detritos (371) que conduz o material para o vaso (372) através de uma válvula de enchimento (373). A extremidade inferior do vaso (372) possui uma porção tronco-cônica (374) que leva a uma abertura (375), de modo que uma válvula de descarga (376) possa abrir ou fechar seletivamente a abertura (375). A válvula de descarga (376) e a válvula de enchimento (373) são controladas em sincronia por um pistão (377), o qual é acionado por um motor. Em uso, a válvula de enchimento (373) abre para permitir que o vaso de pressão (372) seja carregado com cascalhos de perfuração por gravidade, enquanto a válvula de descarga (376) permanece fechada para inibir a entrada de cascalhos de perfuração na tubulação de transporte. Após o enchimento, a válvula de descarga (376) é aberta pela atuação do pistão (377), que fecha a válvula de enchimento (373). Ar pressurizado (1 e 8 bar), entre pelo bocal de pressurização (381) e aplica uma pressão positiva ao topo da carga de cascalhos, empurrando o material através do bocal de saída (375) em direção a tubulação de transporte (360). Pode-se injetar ar na parte cônica do vaso (379) para fluidizar o material e facilitar o descarregamento. Devido ao pequeno volume do vaso (0,3 m^3) tal ciclo pode ocorrer diversas vezes por minuto para atender a vazão demandada.

Dando continuidade no sistema da Figura 2.28, os cascalhos descarregados pelo vaso (351) são então pneumaticamente transportados para um conjunto de vasos (361) semelhantes àqueles mostrados na Figura 2.27 (a). Alternativamente, os cascalhos podem passar por um processo de tratamento em um processador de cascalhos e depois seguir para o conjunto de vasos (361). Do conjunto de vasos, os cascalhos são descarregados na tubulação de transporte (363), conforme o ciclo de operação do vaso da Figura 2.27 (a). Por ação pneumática, os cascalhos são transportados da plataforma (349) para a embarcação de transporte (364). Na

embarcação um conjunto e vasos de pressão (366) recebe o material, os quais podem armazenar o material para posterior descarga *onshore* ou o descarte *offshore*.

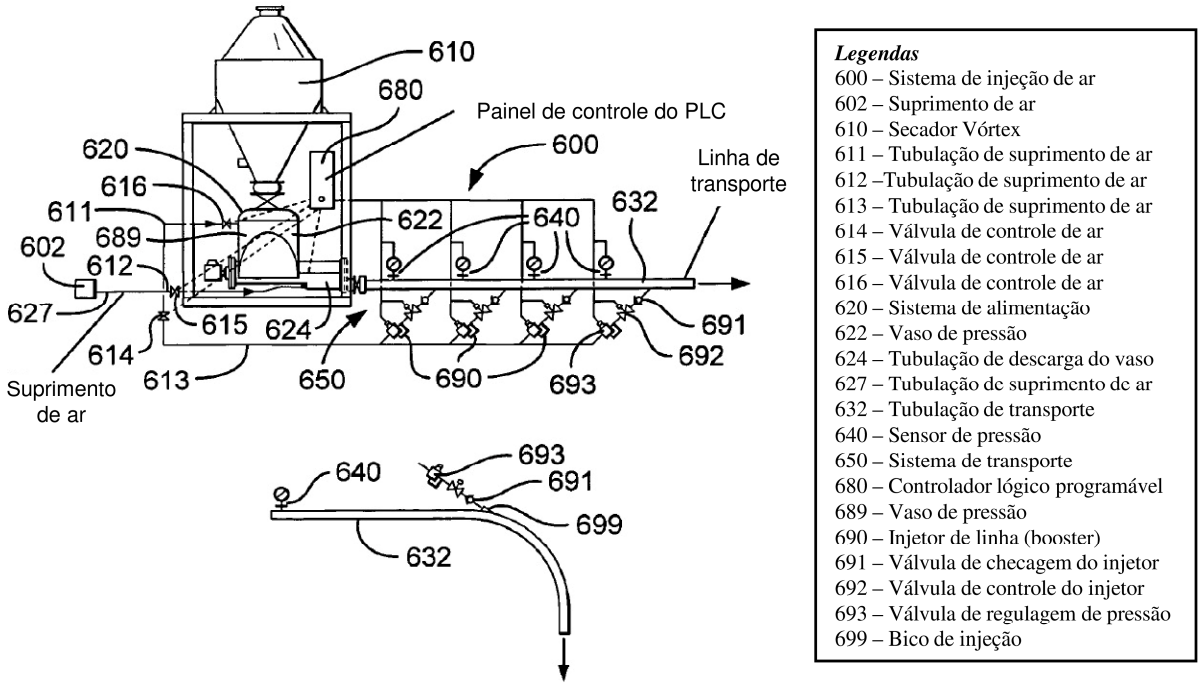
Figura 2.28 – Sistema de transporte pneumático de cascalhos por diferentes vasos de pressão.



Fonte: Adaptado de Burnett *et al*. (2007).

Vale ainda dedicar uma atenção especial ao sistema de controle de injeção de ar na linha de transporte, o qual é apresentado em detalhes na Figura 2.29. Tal sistema pode ser considerado um dos mais versáteis, sendo aprimorado ao longo de muitas patentes (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT *et al.*, 2006). Isso porque os cascalhos podem ser transportados úmidos, secos ou com umidades intermediárias. Em diversos aspectos, esse sistema é semelhante àquele mostrado na Figura 2.23, porém, funciona de forma mais inteligente e automatizada. Basicamente, esse sistema é constituído por um secador Vórtex (610), acoplado a um vaso de pressão com alimentação helicoidal (620) (Figura 2.27 (a)) e uma tubulação de transporte (632) com sensores de pressão (640) e injetores de linha (690) em locais estratégicos. Destaca-se que ao invés do secador Vórtex, um silo de alimentação poderia ser utilizado e o vaso de pressão poderia ser qualquer outro que permitisse um controle de alimentação.

Figura 2. 29 – Sistema de controle de injeção de ar na linha de transporte de cascalhos.



Fonte: Adaptado de Burnett *et al*. (2007).

Após o carregamento do vaso de pressão (620) pelo secador Vórtex (610), o sistema alimenta material na linha de transporte conforme descrito anteriormente para o vaso da Figura 2.27 (a). O material pode ser alimentado na linha (632) em plugues inteiriços, cujo tamanho é determinado pelas características físicas do helicoide e pela velocidade de rotação dele. Assim, a taxa de alimentação é diretamente proporcional à velocidade de rotação do helicoide. Além disso, na câmera de saída do alimentador (624) cada plugue é aerado de modo a facilitar seu transporte. O gerenciamento dessa operação é realizado por um controlador lógico programável (PLC) (680), o qual realiza o controle baseado no regime de pressão dentro da linha de transporte (632), que é fortemente dependente do regime de transporte. De forma simplificada, cascalhos úmidos tendem a ser coesivos sendo preferencialmente transportados em regime de fluxo em plugues, como é o caso de cascalhos provindos de peneiras vibratórias. Por outro lado, cascalhos secos, como àqueles provindos de secadores Vórtex e, em alguns casos, processadores de cascalhos, tendem ao transporte em fase diluída. Para identificar a umidade do material, sensores de umidade são acoplados na saída de secadores Vórtex e ao longo do vaso de pressão, de modo a alterar o regime de transporte conforme a necessidade.

Um dos mecanismos de controle do processo pelo PLC é através dos injetores de linha. Tais injetores tem função principal de ajustar a queda de pressão máxima através da tubulação pela injeção de ar comprimido. A queda de pressão é medida por sensores de pressão (640) e

os valores são comparados pelo PLC (680) com um *setpoint* previamente estabelecidos. Para o transporte em fase diluída, os *setpoints* de pressão são baixos, geralmente em torno de 2 bar. Já para cascalhos úmidos esse *setpoint* sobe para entorno de 4 bar. Por exemplo, em fase densa se a pressão desejada for acima do *setpoint* pode estar ocorrendo a junção de dois plugues, o que leva a um entupimento da linha, assim o PLC aciona a injeção de ar. Outra variável manipulada pelo PLC (680) é a velocidade de rotação do helicoide, de modo a alimentar a linha de transporte (632) e permitir que a queda de pressão seja mantida a um nível definido monitorado pelos sensores. Para trabalhar em fase diluída baixas velocidades de rotação são utilizas com altas vazões de ar, de modo que os cascalhos se movem a uma velocidade aproximada de 30 m/s. Já para o transporte de fase densa, altas velocidades de rotação são utilizadas com baixas vazões de ar, de modo que o material seja transportado em velocidades em torno de 10 m/s.

A partir da análise desses sistemas, é possível identificar alguns pontos que demandam maior estudo e aprofundamento:

1. A umidade dos cascalhos é uma variável de grande importância que influencia até mesmo os regimes de transporte. Contudo, não se sabe em quais faixais específicas as mudanças de comportamento acontecem, nem como as características *bulk* de empacotamento, de fluidização e de aeração são afetadas pela umidade. Além disso, a faixa de umidade ideal para o manejo de cascalhos não foi estabelecida.
2. Apesar dos cascalhos poderem ser transportados pneumaticamente com relativo sucesso, entupimentos podem ocorrer, não havendo mapas de operação específicos delimitando as regiões operacionais seguras.
3. Nos sistemas mostrados os cascalhos secos são preferencialmente transportados em fase diluída, o que não é ideal, tendo em vista que a carga de sólidos é consideravelmente menor e, devido à abrasividade dos cascalhos, curvas e tubulações sofrem maiores desgastes. Contudo, não foram encontrados trabalhos que reportassem a possibilidade de transporte de cascalhos em fase densa. Vale destacar que o manejo de cascalhos secos (menos de 5 % de umidade) é de grande interesse, pois o volume de material a ser manipulado bem como os custos associados ao processo são menores.
4. Apesar de existirem sistemas de injeção de ar inteligentes, a frequência e intensidade ideal das injeções, bem como a distanciamento mínimo entre injetores não são conhecidos.

CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE DENSIDADE *BULK* DE MATERIAIS GRANULARES

3.1 Introdução

Como destacado na seção 2.3.2 observa-se a necessidade de metodologias específicas para a correta determinação da densidade *bulk*, principalmente em função das diferentes propriedades do material e condições operacionais, que influenciam consideravelmente nos resultados. É importante destacar que, do ponto de vista prático; a medição incorreta da densidade *bulk* pode levar à estimativa equivocada do volume mínimo *bulk* do material que pode ser armazenado em silos e vasos de pressão, bem como à variação de volume que pode ser esperada durante o transporte. Desta forma, o desenvolvimento de um sistema para aquisição precisa de dados de densidade *bulk* aerada e compactada se destaca. A possibilidade de controlar o número, a frequência e a amplitude das batidas nas respectivas faixas operacionais descritas nas normas (ASTM D7481-09, 2009; UNITED STATES PHARMACOPEIA, 2018; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012): 500-1750 batidas, 250-300 batidas/min, 3-16 mm, é uma característica importante, que não é geralmente contemplada pelos sistemas convencionais descritos na literatura (FISCINA *et al.*, 2010; HEYA; EITOKU; SANADA, 2004; LUMAY *et al.*, 2012; LUMAY *et al.*, 2013; SAKER *et al.*, 2019; SASABE *et al.*, 2011; TRAINA *et al.*, 2013). A alta precisão (0,001 $g.cm^{-3}$) é outro fator desejável, pois, para alguns materiais, a variação na densidade *bulk* induzida pelo processo de batidas é muito pequena. Tal sistema permitiria quantificar a influência de variáveis operacionais, e a interação entre elas, na determinação da densidade *bulk* de materiais com diferentes características físico-químicas, bem como o estabelecimento de condições de compactação ótima do leito, ainda pouco exploradas. Consequentemente, o desenvolvimento deste sistema contribui diretamente para a redução da variabilidade dos resultados que podem ser obtidos através das medidas de densidade *bulk* compactada utilizando os padrões disponíveis.

Nesse contexto, o objetivo deste capítulo foi apresentar o desenvolvimento de um sistema para determinação das densidades *bulk* aerada e compactada, utilizando medidas do volume do material durante o processo de compactação por batidas. Além disso, a técnica de regressão múltipla vinculada a experimentos planejados foi utilizada para quantificar os efeitos do número, frequência e amplitude das batidas na densidade *bulk* compactada. Dez materiais com diferentes umidades, formas, densidades, coesividade e tamanhos de partículas foram

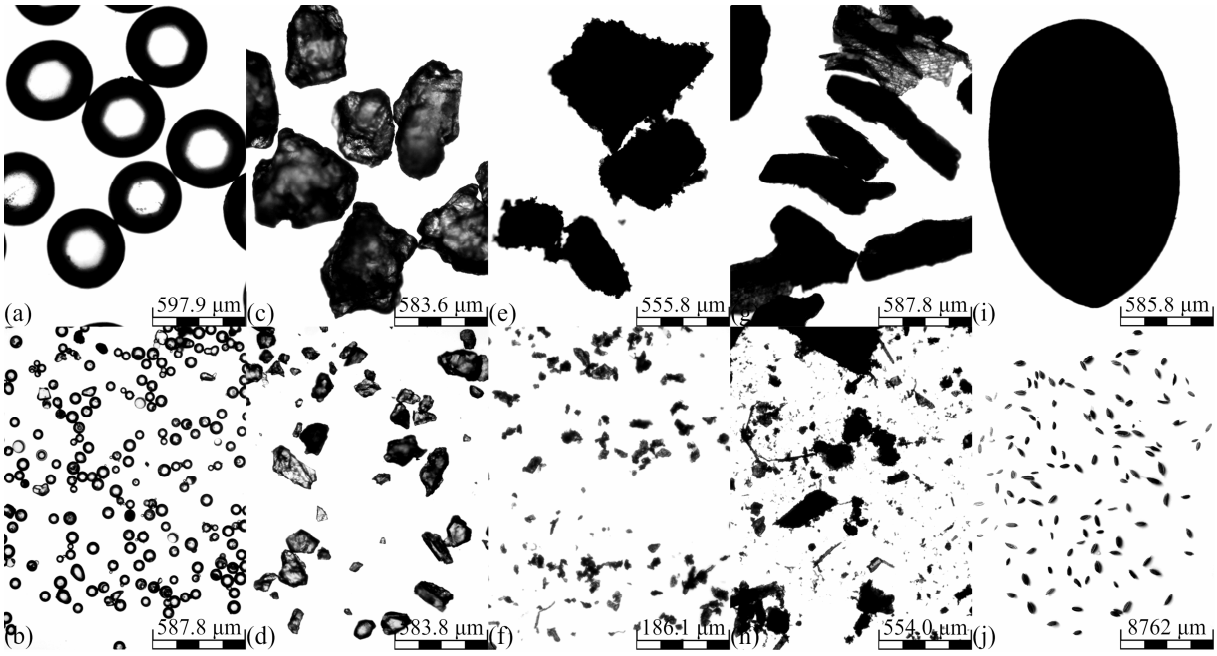
analisados, incluindo areais, as quais, assim como os cascalhos, são do grupo B da classificação de Geldart. Um estudo de otimização foi realizado para estabelecer as condições operacionais que levam a densidade *bulk* compactada ótima de cada material. Por fim, as regiões ótimas obtidas foram interpoladas para materiais de uma mesma classe.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Materiais granulares

A Tabela 3.1 e a Figura 3.1 mostram detalhes da caracterização dos dez diferentes materiais estudados, os quais foram divididos em cinco classes diferentes. Buscou-se estudar materiais em uma ampla gama de esfericidades, densidades e tamanhos de partículas visando testar os limites do sistema desenvolvido. As esferas de vidro foram obtidas de Potters Industries LLC, as areias foram fornecidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e o sabugo de milho moído foi fornecido pela JC Rações e Insumos Siderúrgicos. As sementes, cascas de arroz moídas e pós-alimentícios foram adquiridos em um mercado local em Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. Para facilitar a identificação dos materiais ao longo deste trabalho, os mesmos foram codificados de acordo com a tabela supracitada.

Figura 3.1 – Imagens de microscopia dos materiais estudados: GLB (a), GSB (b), S50 (c), S100 (d), FCF (e) FCC (f), BCC (g), BRH (h), SC (d) e SC (e).



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 3.1 – Materiais granulares analisados.

Classe	Material	Código	Grupo Geldart	Umidade ($g.g^{-1}$ %)	ρ_r ($g.cm^{-3}$)	φ	D_{Sauter} (μm)	Modelo RRB		
								x_0 (μm)	n	R^2
Esferas de vidro	Grandes	GLB	B	0,20 ± 0,05	2,524 ± 0,001	0,92 ± 0,02	527,35 ± 0,60	560,56	5,21	0,999
	Pequenas	GSB	A	0,21 ± 0,05	2,403 ± 0,003	0,91 ± 0,02	65,05 ± 0,65	70,04	4,76	0,999
Areias	IPT 50	S50	B	0,12 ± 0,04	2,681 ± 0,001	0,77 ± 0,02	509,25 ± 17,16	561,66	4,20	0,999
	IPT 100	S100	B	0,11 ± 0,06	2,676 ± 0,002	0,76 ± 0,02	176,06 ± 4,18	229,44	2,59	0,999
Pós-alimentícios	Café	FCF	A	4,39 ± 0,06	1,041 ± 0,010	0,51 ± 0,02	194,70 ± 1,52	512,97	1,81	0,994
	Cacau	FCC	A	6,02 ± 0,01	1,468 ± 0,003	0,68 ± 0,02	19,30 ± 2,74	45,39	1,25	0,998
Biomassas	Sabugo de milho	BCC	B	6,47 ± 0,05	1,444 ± 0,004	0,67 ± 0,02	501,52 ± 81,77	1088,92	1,76	0,997
	Casca de arroz	BRH	B	7,55 ± 0,04	1,547 ± 0,002	0,63 ± 0,02	247,77 ± 40,89	970,19	2,91	0,996
Sementes	Chia	SC	B	6,60 ± 0,06	1,188 ± 0,001	0,90 ± 0,01	835,69 ± 0,28	836,61	14,29	0,999
	Endro	SD	D	8,20 ± 0,02	1,205 ± 0,002	0,59 ± 0,02	1369,18 ± 20,96	1666,56	7,59	0,999

Fonte: Autoria própria (2023).

3.2.2 Caracterização dos materiais granulares

O conteúdo de umidade dos materiais foi determinado em triplicata por secagem em estufa microprocessada (Quimis®, Q314M252) com circulação de ar a 105°C por 24 h. A relação entre a massa de água retirada por secagem e a massa total inicial do material forneceu o conteúdo de umidade em base úmida (BALA, 2016).

Para determinar a densidade real dos materiais, inicialmente, eles foram secos em estufa (Quimis®, Q314M252) a 105°C por 24 h. Em seguida, a densidade real (ρ_r) dos materiais foi determinada em triplicata usando um picnômetro de gás (He) (Micromeritics®, Accupyc 1330).

A esfericidade (φ) de sessenta ou mais partículas foi determinada por análise de imagens. Um microscópio óptico (Nikon®, Eclipse E-200) equipado com uma câmera digital (Motic®, Moticam 5) foi utilizado na captura das imagens nas ampliações de 4x e 100x. O *software* Image-Pro Plus® 6.0 foi utilizado no estabelecimento da área projetada (A) e perímetro (P) das partículas. A esfericidade foi calculada pela equação (LOURENÇO *et al.*, 2019):

$$\varphi = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{3.1}$$

Já para determinar a distribuição de tamanho das partículas dos materiais, duas técnicas foram utilizadas. Materiais com partículas maiores que 2,0 mm (SD e BRH na Tabela 1) foram analisados em duplicata pelo método de peneiramento, com base nos procedimentos descritos pela ASTM e RETSCH (ASTM C136-06, 2015; RETSCH, 2015). A análise foi realizada em um agitador de peneiras (Retsch®, AS 300), operando com 10 peneiras de aço inoxidável padrão Tyler de 12″, frequência de 60 Hz, amplitude de 1,0 mm e tempo de 20 min. Os demais materiais foram analisados pela técnica de difração a laser (modelo Fraunhofer), através de um analisador de tamanho de partículas (Malvern Instruments®, Mastersizer 2000) equipado com um alimentador a seco (Scirocco 2000). Para descrever a distribuição granulométrica, o modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB), dado pela Equação (3.2), foi ajustado aos dados experimentais (MACÍAS-GARCÍA; CUERDA-CORREA; DÍAZ-DÍEZ, 2004; VESILIND, 1980).

$$Y(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n} \tag{3.2}$$

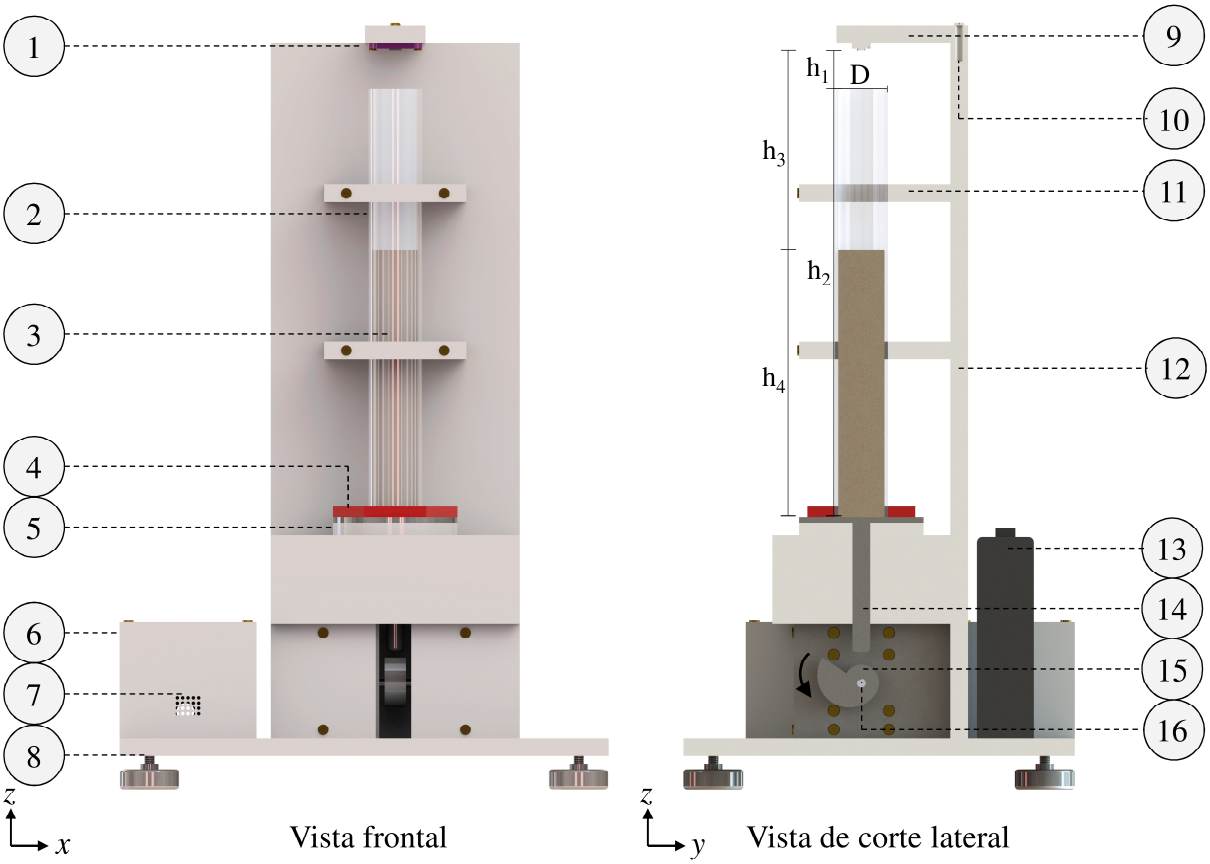
em que: $Y(x)$ é a fração cumulativa em peso de material com partículas menores que o tamanho x, x é o tamanho de partícula (μm), n é a constante de uniformidade e x_0 é o tamanho de partícula característico correspondente a 63,2% da distribuição cumulativa (μm).

3.2.3 Desenvolvimento de sistema para determinação da densidade bulk

A Figura 3.2 mostra o sistema desenvolvido para aquisição de dados do processo de compactação por batidas. O sistema foi desenvolvido com base nas principais normas para estabelecimento de densidade *bulk*, com a adição de algumas modificações para melhor precisão das medições e controle das batidas (ASTM D7481-09, 2009; UNITED STATES PHARMACOPEIA, 2018; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012). O procedimento para determinação das densidades *bulk* aerada e compactada consistiu em determinar inicialmente a massa da proveta graduada (2) utilizando uma balança digital (Shimadzu®, AUY220) (precisão de 0,0001 g). Em seguida, o material foi passado por uma peneira de aço com aberturas de 1,00 mm (malha ASTM 18) para dispersar os maiores aglomerados existentes. Para materiais com partículas maiores, utilizou-se peneiras com aberturas de 2,00 mm ou até 3,36 mm (ASTM 10 ou 6 mesh).

O sistema foi nivelado utilizando os pés de ajuste (8) com auxílio de um nível de bolha. A base removível do cilindro graduado (4) foi colocada acima da superfície superior do *follower* (14). O suporte do sensor de distância (9) foi girado para próximo da estrutura do sistema (12) permitindo a introdução do cilindro graduado (2) no suporte (11) até o encaixe com a base removível (4). Vale ressaltar que o suporte do sensor de distância (9) foi fixado na estrutura do sistema por apenas um parafuso central (10), permitindo que ele gire em torno do parafuso no plano *xy*, mantendo-se constante em *z*. Em todos os experimentos o material foi despejado em quantidades constantes, de uma mesma altura, e com auxílio de um funil (Vitlab®, Art. 709), na proveta graduada (2) até a graduação de 100 mL. O suporte do sensor de distância (9) foi novamente girado para que o sensor (1) ficasse centralizado com o cilindro graduado (2). O volume inicial de material (V_0) foi então lido (média de mais de 500 dados) através do sensor de distância (1), de acordo com o método descrito na seção 3.2.4. Os dados foram processados por um microcontrolador (Arduino®, Nano V3) (6), transferidos para um computador (Dell®, Inspiron 15) e apresentados e registrados por meio de um *software* supervisório (National Instruments®, Labview™ 2017), mostrado nas Figuras A.1 e A.2 do Apêndice A. A Figura 3.3 mostra a leitura inicial do volume do material de todos os experimentos. Foi realizado um teste *Z* entre os valores de V_0, obtidos pelo equipamento, e o valor de referência de 98,89 mL, obtido medindo-se o diâmetro e a altura do cilindro graduado até o grau de 100 mL com paquímetro digital (MTX®, 316119). Observou-se, com 95% de confiabilidade, que não há diferença significativa entre os dados (*p-valor* = 0,444), o que indica que o método de empacotamento adotado foi reprodutível e confiável.

Figura 3.2 – Sistema experimental desenvolvido para a aquisição de dados do processo de compactação por batidas de materiais granulares.



Legendas

1 – Sensor de distância a laser (ST®, VL53L0XV2)
2 – Cilindro graduado de vidro (Laborglas®, 100 mL)
3 – Material analisado
4 – Base removível do cilindro graduado
5 – Anel de ajuste da amplitude de batida
6 – Estojo de proteção de polietileno para:
Microcontrolador (Arduino®, Nano V3)
Driver do motor de passo (Popolu®, DRV8825)
Sensor de umidade/temperatura (TE®, HTU21D)
Conversor *boost step up* (XLSEMI®, XL6009E1)
7 – Entrada de ar
8 – Pé de ajuste de nível
9 – Suporte de polietileno para sensor de distância
10 – Parafuso de suporte do sensor
11 – Suporte de polietileno do cilindro graduado
12 – Estrutura de polietileno do dispositivo
13 – Fonte de energia (Delta®, D0116888, 24 V, 2,5 A)
14 – *Follower* de aço inoxidável
15 – *Snail cam* de aço inoxidável
16 – Eixo do motor de passo (JKong®, Nema 17, 6,5 kgf.cm/1,2 A)

Fonte: Autoria própria (2023).

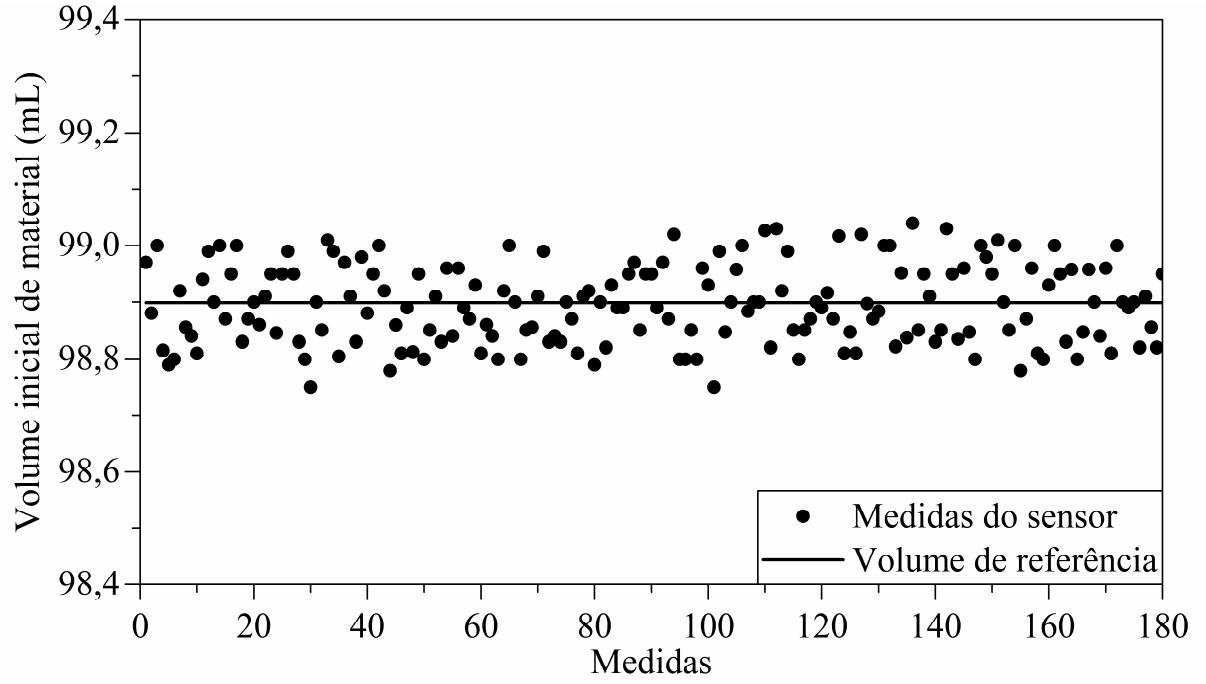
Vale ressaltar que não se sabe se o método adotado promove o empacotamento mais aerado possível para cada material. No entanto, como mostrado por Ribière *et al*. (2007), a densidade *bulk* no estado estacionário, que foi o foco principal deste trabalho, não depende das condições iniciais de empacotamento do material. Cabe aqui contextualizar que o termo estado estacionário está sendo utilizado para indicar a condição em que, a variação no volume do material devido a compactação induzida pelas batidas é menor do que a incerteza da medida do volume utilizada. Ou seja, a densidade *bulk* compactada do material não varia mais quando submetida a batidas adicionais. Contudo, a densidade *bulk* compactada obtida nesse estado não necessariamente é a densidade *bulk* compactada máxima (ótima) do material. Visto que para alcançar a compactação máxima, o material deve ser compactado até o estado estacionário utilizando as condições ótimas de frequência e amplitude das batidas.

Para verificar as constatações de Ribière *et al*. (2007), os resultados de densidade *bulk* no estado estacionário obtidos usando a metodologia de empacotamento do leito descrita acima, e outro método que forneceu um empacotamento inicial mais denso, foram comparados. BRH e S50 foram tomados como exemplos de um material coesivo e um arenoso, respectivamente. As condições operacionais estavam na região ótima de cada material (Figura 3.6): n = 3000, f = 270 batidas.min^{-1} e a = 16,0 mm e n = 3000, f = 245 batidas.min^{-1} e a = 14,3 mm, para BRH e S50, respectivamente. Os resultados são mostrados na Figura A.4 do Apêndice A. Um teste t de Student, realizado entre os valores de densidade *bulk* obtidos no estado estacionário (n = 3000) usando ambos os métodos de empacotamento, mostrou, com 95% de confiabilidade, que não há diferença estatisticamente significativa entre os dados (*p-valor* = 0,175 para BRH e *p-valor* = 0,696 para S50). Esses resultados reforçam a ideia de que a densidade *bulk* no estado estacionário dos materiais estudados não depende das condições iniciais.

Para realizar as batidas do cilindro graduado, a peça (14) que suportava o cilindro graduado (2) foi alinhado a uma peça excêntrica (15), que foi acoplada ao eixo de um motor de passo (16), alimentado por uma fonte de energia de corrente contínua (13). Enquanto o eixo do motor e a peça excêntrica (15) giravam no sentido anti-horário, a ponta do eixo da peça (14) deslizava sobre a superfície da peça excêntrica (15), elevando o cilindro graduado até certa altura, quando então, devido ao formato da peça excêntrica (15) e à força gravitacional, ele sofria uma queda. A velocidade e o número de rotações do eixo do motor e, consequentemente, a frequência e o número de batidas do cilindro graduado puderam ser escolhidos e controlados através do *software* supervisório. O computador transmitia os dados para o microcontrolador, que os retransmitia para um driver de motor de passo (6), que controlava efetivamente a velocidade e o número de rotações do eixo do motor (16). A amplitude das batidas do cilindro

graduado foi controlada por meio de anéis de polietileno (5). Os anéis possuíam as espessuras de 1,70, 6,50, 11,30 e 13,00 mm, que, considerando o desnível de 16,00 mm da peça excêntrica (15), produziram as respectivas amplitudes de batida de 14,30, 9,50, 4,70, 3,00 mm. O diâmetro interno dos anéis (10 mm) foi o mesmo do eixo da peça (14), de modo que os anéis ficaram justos ao eixo.

Figura 3.3 – Volume inicial dos materiais para todos os experimentos realizados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Ao final do número de batidas escolhido (n), o sistema realizava, através de um sensor de distância, a medição (média de mais de 500 dados) do volume do material ($V(n)$) e indicava por um sinal sonoro que o processo havia terminado. O suporte do sensor (9) foi então girado e a proveta foi retirada e pesada em balança digital (Shimadzu®, AUY220). A massa do material (M_m) foi determinada, descontando-se a massa da proveta graduada, e então fornecida ao referido *software*, que calculava as densidades *bulk* aerada (ρ_0) e compactada ($\rho_t(n)$) através das respectivas Equações (3.3) e (3.4). Ressalta-se que no estabelecimento das curvas de compactação o volume do material foi lido em intervalos específicos entre as batidas, e a massa do material foi determinada apenas ao final do processo.

$$\rho_0 = \frac{M_m}{V_0} \tag{3.3}$$

$$\rho_t(n) = \frac{M_m}{V(n)} \tag{3.4}$$

Os dados de temperatura e umidade do ar foram obtidos ao longo de todo o processo por meio de um sensor de umidade e temperatura (6), que também foi conectado ao microcontrolador. Os experimentos foram realizados em temperatura ambiente (26,0 ± 0,3°C) com umidade relativa do ar de 40,7 ± 1,7%, o que foi suficiente para eliminar visualmente as cargas estáticas.

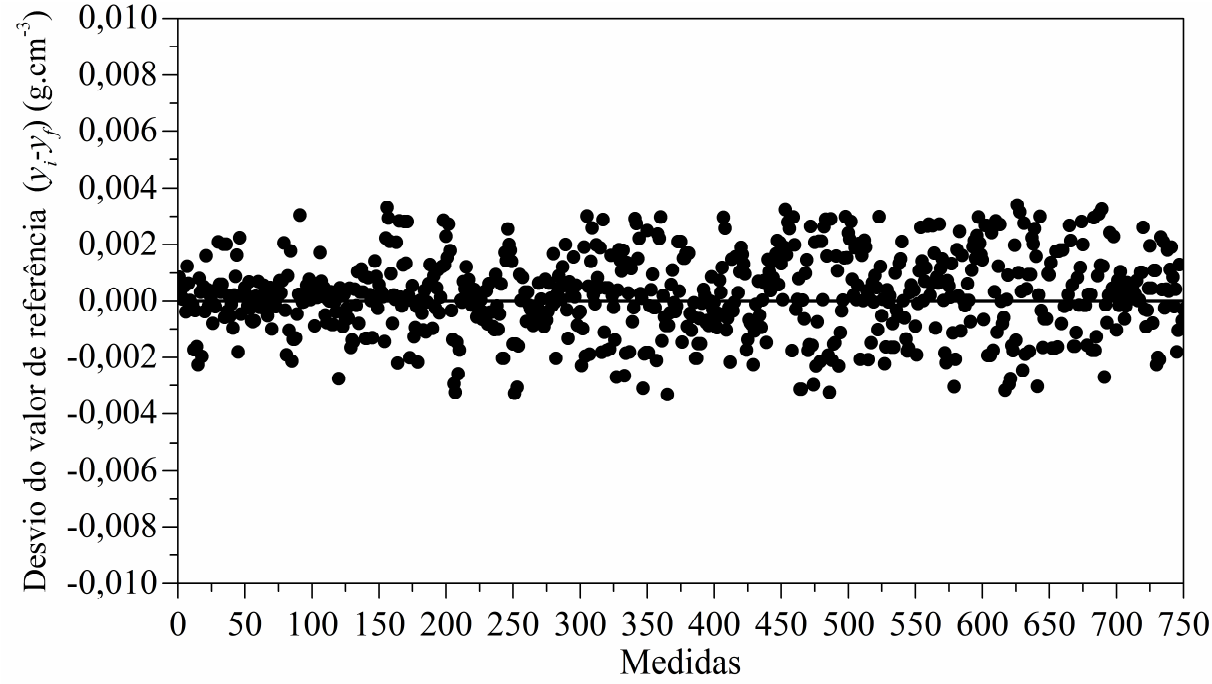
3.2.4 Calibração e verificação do sistema de medição de densidade bulk

O sensor de distância a laser realizou medições da distância desde a posição em que foi instalado (1) até a superfície do material empacotado no cilindro graduado. A metodologia de obtenção das equações de conversão das medidas do sensor em volume de material empacotado na proveta graduada foi apresentada na seção A.1 do Apêndice A.

Vale ressaltar que buscou-se desenvolver um sistema em que não fosse necessário o auxílio de um diabolô para ajudar a garantir uma superfície plana do material empacotado. Conforme descrito por Saker *et al*. (2019), a presença de um diabolô pode alterar os padrões de tensão na coluna de material, o que pode impactar na reorganização das partículas e, consequentemente, nos resultados obtidos. Portanto, quando necessário, o nível do material no cilindro graduado foi cuidadosamente nivelado, sem causar compactação. Este procedimento é recomendado pela American Society for Testing and Materials (ASTM D7481-09, 2009).

Para verificar a confiabilidade das medidas de densidade *bulk*, foram realizadas diversas medições da densidade *bulk* aerada em cada um dos materiais estudados, utilizando todos os anéis de ajuste da amplitude das batidas. Em cada uma das medições, o material foi empacotado e nivelado no cilindro graduado até um volume específico da graduação (60, 70, 80, 90 e 100 mL). O volume de material foi estimado simultaneamente pelo sensor de distância (média de mais de 500 dados) e por medidas da altura e diâmetro do material na proveta graduado com paquímetro digital (média de 3 dados) (MTX®, 316119). Em seguida, a massa do material foi determinada em balança digital (Shimadzu®, AUY220) e a densidade *bulk* foi calculada pela razão entre massa e volume do material. As densidades *bulk* obtidas por medidas de volume do material com o paquímetro foram utilizadas como referência. Todos os experimentos foram realizados em triplicata. Os desvios entre os valores de densidade *bulk* obtidos utilizando medições do sensor de distância e os valores de referência são mostrados na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Desvio do valor de referência de densidade *bulk* de todos os materiais estudados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Os dados foram analisados utilizando os principais indicadores de desempenho das medidas, como precisão, exatidão e erro médio. A precisão representa os erros aleatórios do sistema e quantifica quão bem uma medição pode ser realizada sem um valor de referência real (KILPELA, 2004; LI, XIAOLU *et al.*, 2018). No presente trabalho, a precisão foi estimada pelo desvio padrão (*SD*) entre os dados obtidos pelos sensores (y_i) e a média entre eles ($\bar{y}$):

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \overline{y})^2} \tag{3.5}$$

A exatidão representa os erros sistemáticos e pode ser definida como o grau de conformidade de uma média em relação ao seu valor real (KILPELA, 2004; LI, XIAOLU *et al.*, 2018). A exatidão foi estimada através do desvio médio absoluto (*MAD*) entre os dados obtidos pelo sensor (y_i) e os valores de referência (y_f), conforme a equação:

$$MAD = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - y_f) \tag{3.6}$$

Outro indicativo da exatidão do método utilizado foi o erro percentual médio absoluto (*MAPE*), que foi calculado pela equação:

$$MAPE = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{y_i - y_f}{y_f}\right| \tag{3.7}$$

Os resultados obtidos mostraram os respectivos baixos valores de 0,002 g.cm^{-3}, 0,001 g.cm^{-3} e 0,2% para *SD*, *MAD* e *MAPE*, que indicam uma baixa dispersão dos dados, além de um pequeno desvio em relação ao valor de referência. Tais resultados mostraram que a metodologia desenvolvida era confiável, precisa e exata, sendo adequada para o estabelecimento da densidade *bulk* de diversos materiais.

3.2.5 Planejamento experimental

Os efeitos das variáveis operacionais na densidade *bulk* dos materiais estudados foram investigados por meio de um planejamento composto central ortogonal (PCC) com três repetições no ponto central, conforme apresentado na Tabela 3.2 (α = 1,353). As massas que proporcionaram um volume de material empacotado de 100 mL no cilindro graduado foram fixadas entre os experimentos de cada material. Tomando como referência as faixas de condições operacionais mencionadas nas normas, o número (*n*), frequência (*f*) e amplitude (*a*) das batidas foram variados nas respectivas faixas de 500-3000 batidas, 150-300 batidas.min^{-1} e 3,0-16,00 mm (ASTM D7481-09, 2009; UNITED STATES PHARMACOPEIA, 2018; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012). A Equação (3.8) foi utilizada para obter as equações de adimensionalização (Equações (3.9)-(3.11)) das variáveis *n*, *f* e *a*, em x_1, x_2 e x_3 respectivamente.

$$x_i = \frac{v - \left(\frac{v(+\alpha) - v(-\alpha)}{2} + v(-\alpha)\right)}{\left(\frac{v(+1) - v(-1)}{2}\right)} \tag{3.8}$$

$$x_1 = \frac{n - 1750,0}{924,0} \tag{3.9}$$

$$x_2 = \frac{f - 225,0(batidas/\min)}{55,2(batidas/\min)} \tag{3.10}$$

$$x_3 = \frac{a - 9,50(mm)}{4,80(mm)} \tag{3.11}$$

em que: x_i é a variável adimensional, v é a variável dimensional, x_1, x_2 e x_3 são as formas adimensionais das variáveis n, f e a, respectivamente, e $v(+\alpha)$, $v(-\alpha)$, $v(+1)$ e $v(-1)$ correspondem aos níveis das variáveis utilizadas no planejamento composto central, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Os experimentos foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na seção 3.2.3. Os dados coletados foram analisados no *software* STATISTICA 7.1™ por meio de regressões múltiplas não lineares, com seus parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005; KHURI, 1996). A equação empírica ajustada à variável resposta de cada material é dada em notação matricial por:

$$\hat{y} = b_0 + x'b + x'Bx \tag{3.12}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & b_{13}/2 \\ b_{12}/2 & b_{22} & b_{23}/2 \\ b_{13}/2 & b_{23}/2 & b_{33} \end{bmatrix}$$

em que: $\hat{y}$ é a variável de resposta prevista, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{23} e b_{23} são os coeficientes da regressão e x_1, x_2 e x_3 representam as variáveis codificadas.

3.2.6 Otimização da densidade bulk compactada

Como revisado na seção 2.3.1 o processo de compactação por batidas de um material empacotado em um recipiente cilíndrico visa liberar o ar aprisionado no leito, reduzindo o volume adicional a zero, de modo que o material atinja um estado de empacotamento ótimo do leito. Conteúdo, a obtenção de tal estado depende das condições operacionais do processo de compactação por batidas. Assim, de modo determinar esse estado ótimo, aplicou-se a técnica de análise canônica as equações empíricas ajustadas aos resultados do planejamento experimental (SANTANA *et al.*, 2008). A análise envolve a translação da origem da superfície

de resposta para o ponto estacionário (x_1, x_2 e x_3 = 0, 0 e 0), dado pela Equação (3.13). A função resposta é então reformulada em termos de novas variáveis w_1, w_2 e w_3, cujos eixos correspondem aos eixos principais do sistema e contornos. A função em termos de novas variáveis (Equação (3.14)) é chamada de forma canônica.

$$x_0 = -\frac{1}{2} B^{-1} b \tag{3.13}$$

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \lambda_3 w_3^2 \tag{3.14}$$

em que: $\hat{y}_0$ é a resposta estimada no ponto estacionário e λ_1, λ_2 e λ_3 são constantes.

Após a mudança para a forma canônica, pode-se fazer a seguinte interpretação: se $\lambda_i < 0$, um movimento em qualquer direção a partir do ponto estacionário resulta em uma diminuição de $\hat{y}$, o que indica que o ponto estacionário é máximo, se $\lambda_i > 0$, o ponto estacionário é mínimo. Se os λ's diferem em sinais, o ponto estacionário não é máximo nem mínimo. A análise canônica foi realizada por meio de uma rotina implementada no *software* Maple® 2015.1.

Após a predição das condições operacionais que levam a compactação ótima de cada um dos materiais, tais condições foram verificadas experimentalmente. A partir desses experimentos, a densidade *bulk* compactada ótima (ρ_{opt}) de cada material foi determinada. Consequentemente, a porosidade aerada (ε_0) e adicional (ε_{add}) também puderam ser estimadas pelas Equações (2.3) e (2.4), respectivamente. Além disso, ρ_{opt} foi utilizado para determinar a razão de Hausner pela Equação (2.7), e classificar o material quanto a sua coesividade.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Análise estatística dos resultados do planejamento experimental

A Tabela 3.2 apresenta os resultados do PCC para cada material estudado da Tabela 3.1. Exceto para FCC e SD, a condição 1 forneceu os menores valores de densidade *bulk* compactada, enquanto a condição 8 forneceu os maiores valores. Conforme as condições operacionais foram alteradas, a densidade *bulk* compactada sofreu alterações em diferentes proporções para cada material, atingindo o máximo de 21,1% no caso de FCC e o mínimo de 1,3% para SC.

Os resultados apresentados na Tabela 3.2 foram analisados estatisticamente. Os efeitos das variáveis com nível de significância inferior a 0,05 são apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A. Observa-se que em todos os casos x_1, x_2 e x_3 influenciaram significativamente, e de diferentes formas, a densidade *bulk* dos materiais, com efeitos lineares e quadráticos na maioria dos casos. A presença de efeitos negativos da interação entre x_2 e x_3 para GSB, S100 e SD, e entre x_1 e x_2 para S50 também foi observada. Os materiais estudados possuem diferentes formas, distribuições granulométricas e densidades, conforme apresentado na Tabela 3.1, portanto, era esperado que eles fossem influenciados de diferentes formas pelas variáveis operacionais. Para a maioria dos materiais, a frequência e amplitude das batidas foram os fatores mais influentes, o que está de acordo com o que foi relatado por vários autores (FAYED; OTTEN, 1997; FIGURA; TEIXEIRA, 2007; MENDEZ; ROMANSKI; TOMASSONE, 2011; RIBIÈRE *et al.*, 2007). Tais variáveis estão relacionadas à energia aplicada ao leito de material para provocar o rearranjo das posições relativas das partículas e, consequentemente, a densificação do leito (MENDEZ; ROMANSKI; TOMASSONE, 2011; PODCZECK; JONES, 2007).

A partir dos resultados experimentais e das análises estatísticas, dez equações, semelhantes à Equação (3.12), foram ajustados aos dados para representar a densidade *bulk* em função de x_1, x_2 e x_3, conforme as Equações (3.15)-(3.24) para os respectivos materiais: GLB, GSB, S50, S100, FCF, FCC, BCC, BRH, SC e SD. Nessas equações, os parâmetros apresentados foram aqueles significativos em um teste de hipótese com distribuição *t* de Student (erro máximo de 5,0%). Os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram 0,948, 0,960, 0,968, 0,978, 0,974, 0,978, 0,975, 0,980, 0,955 e 0,935 respectivamente para as Equações (3.15)-(3.24). A análise dos resíduos de regressão indicou que os resíduos estavam distribuídos aleatoriamente e independentemente em torno de zero. Tais resultados indicam que as equações ajustadas são representativas dos dados experimentais.

$$\hat{y}_{GLB}(g.cm^{-3}) = 1{,}563 + x'b + x'Bx \tag{3.15}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0{,}006 \\ 0{,}007 \\ 0{,}006 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0{,}004 & 0{,}0 & 0{,}0 \\ 0{,}0 & -0{,}004 & 0{,}0 \\ 0{,}0 & 0{,}0 & -0{,}005 \end{bmatrix}$$

Tabela 3.2 – Resultados do planejamento experimental para densidade *bulk* compactada dos materiais estudados.

#	Condições operacionais			Resultados experimentais de densidade *bulk* compactada ($g.cm^{-3}$)									
				Esferas de vidra		Areias		Pós-alimentícios		Biomassas		Sementes	
	Número de batidas (x_1) (-)	Frequência de batidas (x_2) ($batidas.min^{-1}$)	Amplitude de batidas (x_3) (mm)	GLB	GSB	S50	S100	FCF	FCC	BCC	BRH	SC	SD
1	(-1) 826	(-1) 170	(-1) 4,70	1,531	1,445	1,421	1,440	0,391	0,476	0,307	0,320	0,704	0,563
2	(-1) 826	(-1) 170	(+1) 14,30	1,541	1,459	1,440	1,468	0,433	0,564	0,313	0,340	0,707	0,569
3	(-1) 826	(+1) 280	(-1) 4,70	1,549	1,467	1,449	1,460	0,402	0,470	0,314	0,332	0,707	0,590
4	(-1) 826	(+1) 280	(+1) 14,30	1,554	1,471	1,460	1,480	0,439	0,555	0,318	0,349	0,710	0,579
5	(+1) 2674	(-1) 170	(-1) 4,70	1,542	1,452	1,462	1,465	0,398	0,497	0,311	0,328	0,708	0,572
6	(+1) 2674	(-1) 170	(+1) 14,30	1,556	1,467	1,481	1,494	0,439	0,569	0,316	0,347	0,710	0,578
7	(+1) 2674	(+1) 280	(-1) 4,70	1,562	1,476	1,472	1,489	0,404	0,486	0,316	0,337	0,710	0,607
8	(+1) 2674	(+1) 280	(+1) 14,30	1,567	1,481	1,489	1,501	0,439	0,561	0,321	0,353	0,713	0,591
9	(-α) 500	(0) 225	(0) 9,50	1,547	1,464	1,448	1,465	0,423	0,517	0,314	0,336	0,708	0,589
10	(+α) 3000	(0) 225	(0) 9,50	1,564	1,477	1,489	1,494	0,433	0,534	0,317	0,345	0,712	0,603
11	(0) 1750	(-α) 150	(0) 9,50	1,549	1,464	1,464	1,482	0,422	0,541	0,312	0,336	0,708	0,589
12	(0) 1750	(+α) 300	(0) 9,50	1,565	1,479	1,480	1,490	0,434	0,525	0,318	0,345	0,711	0,600
13	(0) 1750	(0) 225	(-α) 3,00	1,542	1,455	1,459	1,461	0,400	0,476	0,312	0,331	0,709	0,580
14	(0) 1750	(0) 225	(+α) 16,00	1,567	1,478	1,483	1,491	0,439	0,566	0,319	0,350	0,711	0,584
15	(0) 1750	(0) 225	(0) 9,50	1,563	1,478	1,472	1,492	0,431	0,554	0,317	0,344	0,711	0,602
16	(0) 1750	(0) 225	(0) 9,50	1,564	1,478	1,473	1,493	0,432	0,551	0,316	0,345	0,712	0,601
17	(0) 1750	(0) 225	(0) 9,50	1,562	1,478	1,472	1,494	0,431	0,553	0,317	0,346	0,711	0,600

Fonte: Autoria própria (2023).

$$\hat{y}_{GSB}(g.cm^{-3}) = 1,478 + x'b + x'Bx \tag{3.16}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,004 \\ 0,008 \\ 0,006 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,004 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & -0,003 & -0,001 \\ 0,0 & -0,001 & -0,006 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_{S50}(g.cm^{-3}) = 1,475 + x'b + x'Bx \tag{3.17}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,016 \\ 0,007 \\ 0,008 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,006 & -0,002 & 0,0 \\ -0,002 & -0,004 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & -0,004 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_{S100}(g.cm^{-3}) = 1,492 + x'b + x'Bx \tag{3.18}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,012 \\ 0,006 \\ 0,011 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,007 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & -0,003 & -0,001 \\ 0,0 & -0,001 & -0,008 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_{FCF}(g.cm^{-3}) = 0,432 + x'b + x'Bx \tag{3.19}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,002 \\ 0,003 \\ 0,018 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,003 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & -0,003 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & -0,008 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_{FCC}(g.cm^{-3}) = 0,549 + x'b + x'Bx \tag{3.20}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,006 \\ -0,005 \\ 0,038 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,010 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & -0,006 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & -0,013 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_{BCC}(g.cm^{-3}) = 0,317 + x'b + x'Bx \tag{3.21}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,001 \\ 0,002 \\ 0,002 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,001 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & -0,001 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & -0,001 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_{BRH}(g.cm^{-3}) = 0,345 + x'b + x'Bx \tag{3.22}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,003 \\ 0,004 \\ 0,008 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,002 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & -0,002 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & -0,002 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_{SC}(g.cm^{-3}) = 0,711 + x'b + x'Bx \tag{3.23}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,002 \\ 0,001 \\ 0,001 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,001 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & -0,001 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & -0,001 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_{SD}(g.cm^{-3}) = 0,602 + x'b + x'Bx \tag{3.24}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,006 \\ 0,008 \\ 0,0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,004 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & -0,005 & -0,002 \\ 0,0 & -0,002 & -0,012 \end{bmatrix}$$

3.3.2 Determinação da região de densidade bulk compactada ótima

Para analisar as superfícies de resposta e determinar a região de densidade *bulk* compactada ótima em face das variáveis operacionais, uma análise canônica das Equações (3.15)-(3.24) foi realizada. As equações na forma canônica foram expressas em termos das novas variáveis w_1, w_2 e w_3 de acordo com as Equações (3.25)-(3.34). Ao analisar as raízes características (λ_i) dessas equações, observa-se que todas apresentaram valores negativos, indicando a presença de pontos de densidade *bulk* máxima para todos os materiais. As condições operacionais e os valores dos pontos ótimos são apresentados na Tabela 3.3.

$$\hat{y}_{GLB}(g.cm^{-3}) = 1,571 - 0,005w_1^2 - 0,004w_2^2 - 0,004w_3^2 \tag{3.25}$$

$$\hat{y}_{GSB}(g.cm^{-3}) = 1,484 - 0,006w_1^2 - 0,004w_2^2 - 0,003w_3^2 \tag{3.26}$$

$$\hat{y}_{S50}(g.cm^{-3}) = 1,491 - 0,007w_1^2 - 0,004w_2^2 - 0,003w_3^2 \tag{3.27}$$

$$\hat{y}_{S100}(g.cm^{-3}) = 1,503 - 0,009w_1^2 - 0,007w_2^2 - 0,003w_3^2 \tag{3.28}$$

$$\hat{y}_{FCF}(g.cm^{-3}) = 0,444 - 0,007w_1^2 - 0,003w_2^2 - 0,003w_3^2 \quad (3.29)$$

$$\hat{y}_{FCC}(g.cm^{-3}) = 0,579 - 0,013w_1^2 - 0,010w_2^2 - 0,006w_3^2 \quad (3.30)$$

$$\hat{y}_{BCC}(g.cm^{-3}) = 0,321 - 0,001w_1^2 - 0,001w_2^2 - 0,001w_3^2 \quad (3.31)$$

$$\hat{y}_{BRH}(g.cm^{-3}) = 0,356 - 0,002w_1^2 - 0,002w_2^2 - 0,002w_3^2 \quad (3.32)$$

$$\hat{y}_{SC}(g.cm^{-3}) = 0,713 - 0,001w_1^2 - 0,001w_2^2 - 0,001w_3^2 \quad (3.33)$$

$$\hat{y}_{SD}(g.cm^{-3}) = 0,602 - 0,012w_1^2 - 0,004w_2^2 - 0,004w_3^2 \quad (3.34)$$

As equações (3.15)-(3.24) foram utilizadas para a construção das superfícies de resposta na forma decodificada, apresentadas na Figura 3.5. Nesta figura, optou-se por mostrar apenas a influência da frequência (x_2) e amplitude (x_3) das batidas, uma vez que essas foram as variáveis mais influentes na maioria dos casos. Assim, x_1 foi fixado nos valores ótimos de cada material (Tabela 3.3). Levando em conta a precisão do sistema de medição (seção 3.2.4), curvas de nível foram marcadas em torno do ponto ótimo de cada material da Figura 3.5, formando as regiões ótimas. Vale destacar que o conhecimento da região ótima, por vezes, é mais importante do que o ponto ótimo em si, pois permite explorar uma gama de condições que fornecem respostas ótimas. Para confirmar os pontos ótimos previstos, foram realizados experimentos utilizando condições operacionais dentro das regiões ótimas de cada material. As curvas de compactação obtidas nestas condições são mostradas na Figura A.5 do Apêndice A e os resultados experimentais (ρ_{opt}), bem como os desvios (D_{pred}) em relação aos dados ótimos previstos pela análise canônica (ρ_{pred}), são mostrados na Tabela 3.3. Os baixos desvios obtidos, inferiores a 1%, confirmam a presença dos pontos ótimos previstos.

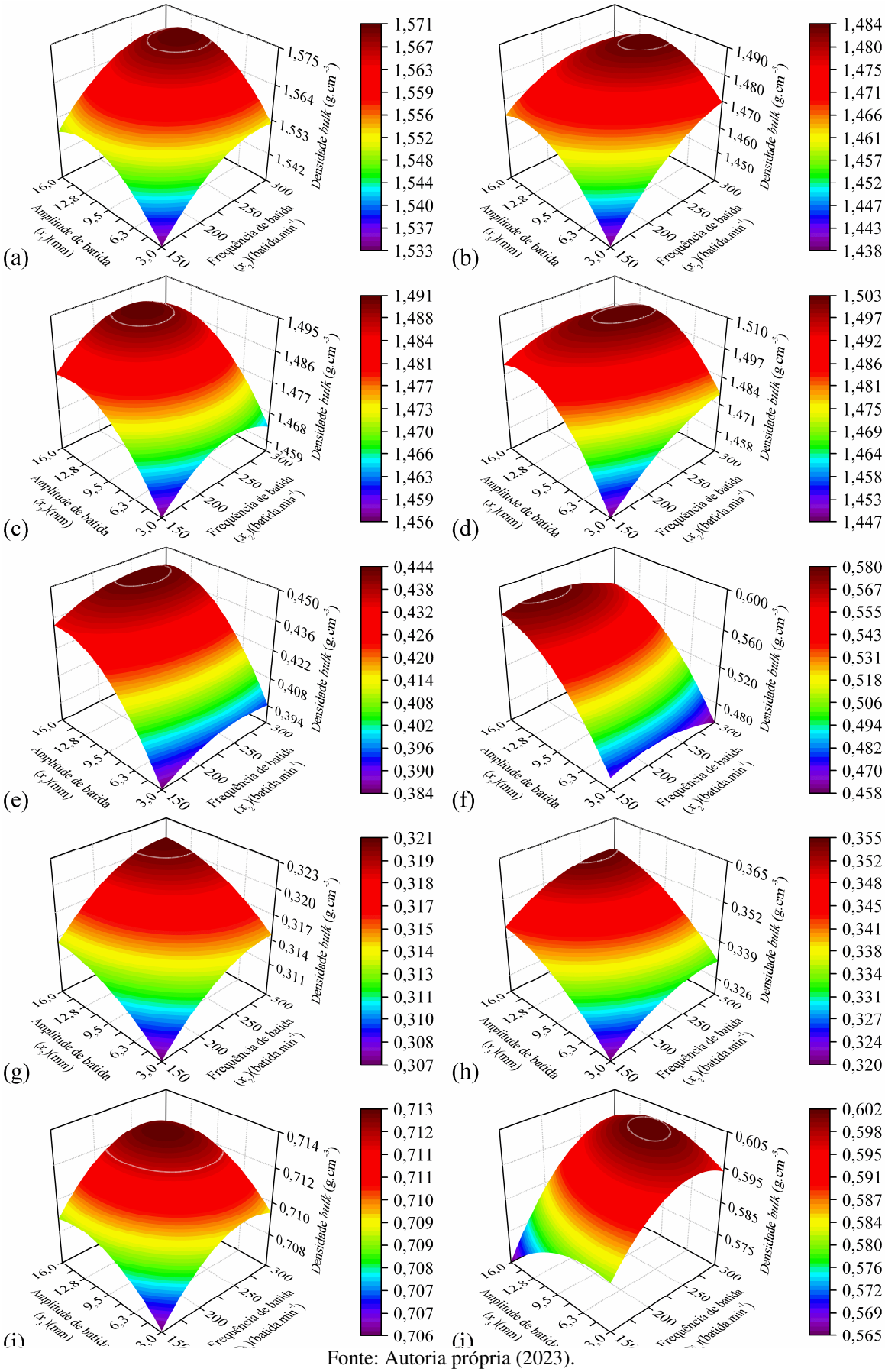
Os valores de ρ_{opt} foram comparados com os valores de densidade *bulk* assintótica (ρ_∞), obtidos através da fração de empacotamento assintótica (η_∞). Este último parâmetro foi obtido pelo ajuste do modelo KWW (Equação (3.35)) aos dados experimentais da Figura A.5 do Apêndice A (PHILIPPE; BIDEAU, 2002). Este modelo foi escolhido por representar melhor os fenômenos de compactação e convecção, evidenciados durante os experimentos (RICHARD *et al.*, 2005).

Tabela 3.3 – Verificação dos resultados ótimos previstos pelos modelos empíricos.

Classe	Código	Fatores máximos			Modelo KWW					Resultados experimentais			D_∞ (%)	D_{pred} (%)
		x_1 (-)	x_2 (batida/min)	x_3 (mm)	ρ_{pred} (g.cm^{-3})	n_∞	β	τ	R^2	ρ_{opt} (g.cm^{-3})	ε_{opt} (-)	ε_{add} (-)		
Esferas de vidro	GLB	0,74 (2433)	0,98 (279)	0,59 (12,35)	1,571	0,622	0,393	18,64	0,980	1,571 ± 0,001	0,378 ± 0,001	0,083 ± 0,001	0,12	0,03
	GSB	0,57 (2272)	1,06 (284)	0,27 (10,77)	1,484	0,616	0,408	7,72	0,984	1,484 ± 0,002	0,383 ± 0,001	0,104 ± 0,001	0,16	0,03
Areias	S50	1,28 (2934)	0,36 (245)	0,95 (14,07)	1,491	0,556	0,377	69,24	0,988	1,490 ± 0,001	0,444 ± 0,001	0,141 ± 0,001	0,08	0,11
	S100	0,88 (2566)	0,51 (268)	0,51 (11,96)	1,503	0,563	0,314	21,89	0,998	1,506 ± 0,003	0,437 ± 0,002	0,130 ± 0,003	0,10	0,23
Pós-alimentícios	FCF	0,41 (2125)	0,57 (256)	1,16 (15,05)	0,444	0,424	0,417	25,46	0,982	0,443 ± 0,001	0,574 ± 0,001	0,309 ± 0,001	0,36	0,20
	FCC	0,29 (2019)	-0,38 (204)	1,50 (16,72)	0,579	0,395	0,656	53,80	0,997	0,581 ± 0,002	0,604 ± 0,001	0,397 ± 0,001	0,05	0,21
Biomassas	BCC	1,11 (2775)	1,31 (297)	1,89 (18,59)	0,321	0,223	0,379	17,53	0,994	0,322 ± 0,001	0,777 ± 0,001	0,207 ± 0,002	0,14	0,12
	BRH	0,74 (2433)	0,92 (276)	1,84 (18,31)	0,356	0,231	0,425	27,77	0,999	0,357 ± 0,001	0,769 ± 0,001	0,287 ± 0,001	0,04	0,41
Areias	SC	0,95 (2624)	0,70 (264)	0,77 (13,21)	0,713	0,600	0,327	17,50	0,990	0,713 ± 0,001	0,400 ± 0,001	0,093 ± 0,001	0,02	0,02
	SD	0,71 (2408)	1,00 (281)	-0,22 (8,45)	0,602	0,499	0,480	21,33	0,996	0,603 ± 0,001	0,500 ± 0,001	0,165 ± 0,003	0,18	0,10

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3.5 – Influência da frequência (x_2) e amplitude (x_3) das batidas na densidade *bulk* de: GLB (a), GSB (b), S50 (c), S100 (d), FCF (e) FCC (f), BCC (g), BRH (h), SC (d) e SC (e).



Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados exibidos na Tabela 3.3 e na Figura A.5 do Apêndice A mostram bons ajustes do modelo aos dados, como evidenciado pelo alto R^2. Os baixos desvios entre ρ_{opt} e ρ_∞ ($D_\infty < 1\%$) indicam que o número de batidas fornecido para alcançar o ponto densidade *bulk* compactada ótima de cada material foi suficiente para atingir o estado estacionário previsto pelo modelo.

$$\eta(n) = \eta_\infty - (\eta_\infty - \eta_0)e^{\left[-\left(\frac{n}{\tau}\right)^\beta\right]} \tag{3.35}$$

em que: η é a fração de empacotamento (razão entre $\rho_t(n)$ e ρ_r) para n batidas, η_∞ é a fração de empacotamento assintótica, η_0 é a fração de empacotamento inicial (razão entre ρ_0 e ρ_r), τ é o número característico de batidas e β é o alongamento da exponencial ($0 < \beta < 1$).

3.3.3 Influência das variáveis operacionais na densidade bulk compactada

Observou-se que para todos os materiais a densidade *bulk* aumentou com o número de batidas até atingir o estado estacionário, conforme amplamente relatado na literatura (FAYED; OTTEN, 1997; MENDEZ; ROMANSKI; TOMASSONE, 2011; RIBIÈRE *et al.*, 2007; ROSATO; ZHANG, 2006; SAKER *et al.*, 2019; TRAINA *et al.*, 2013). O número de batidas necessárias para atingir o estado estacionário depende da velocidade e amplitude das batidas (FIGURA; TEIXEIRA, 2007). Como cada material apresentou suas próprias condições ótimas de operação, diferentes dinâmicas de compactação foram evidenciadas na Figura A.5 do Apêndice A e na Tabela 3.3, sem correlações claras entre as características dos materiais e o número de batidas ótimo.

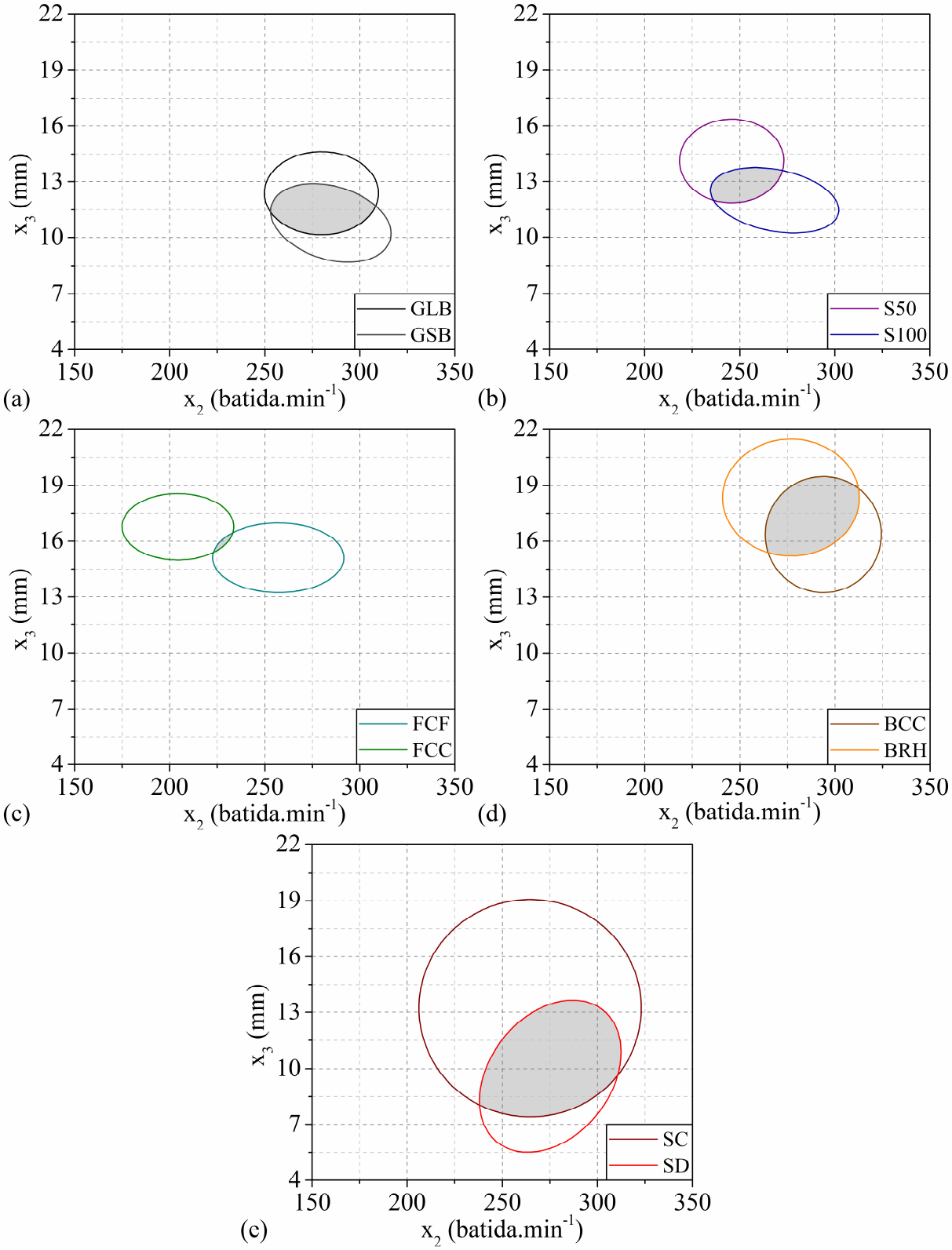
Observou-se que a densidade *bulk* aumentou com a frequência e amplitude das batidas até a região ótima, quando então sofreu uma redução para frequências e amplitudes maiores (Figura 3.5). A frequência e amplitude das batidas estão relacionadas com a energia fornecida ao leito para superar as forças interparticulares e rearranjar as partículas em uma configuração de leito mais denso, conforme ilustrado na Figura 2.5 (2) (MENDEZ; ROMANSKI; TOMASSONE, 2011). Tais variáveis devem permitir que as partículas tenham um contato mínimo umas com as outras durante o "salto forçado", de modo que as forças de coesão e atrito sejam mínimas e as partículas possam alterar suas posições relativas (PODCZECK; JONES, 2007). No entanto, em frequências e amplitudes elevadas observou-se que, em alguns casos, as partículas viajaram de forma coletiva do topo do leito para o fundo, conforme esquematizado

na Figura 2.5 (3). Tal fenômeno é conhecido como convecção (RICHARD *et al.*, 2005; ROSATO; ZHANG, 2006; SAKER *et al.*, 2019), e corresponde à transição entre os comportamentos do tipo sólido para o tipo fluido. O movimento das partículas acaba gerando auto-aspiração de ar para o leito, induzindo um aumento dos espaços interparticulares e resultando na descompactação do leito. Em termos práticos, tais condições de operação devem ser evitadas, visto que estas levam a resultados errôneos referentes a compactação máxima que o leito pode atingir.

Como mencionado anteriormente, os materiais estudados sofreram diferentes influências da frequência e amplitude das batidas, o que pode estar ligado às diferentes características dos materiais. No entanto, como observado por Mendez *et al*. (2011) a coesividade é um fator dominante. Analisando a Tabela 3.3 e a Figura 3.5, observa-se que BRH e BCC, classificados como coesivos na Figura A.6 do Apêndice A, apresentaram regiões ótimas em condições extremas de amplitude e frequência de batidas, sendo necessário um número elevado de batidas para atingir este estado. Os materiais coesivos FCF e FCC também apresentaram regiões ótimas em condições de grande amplitude de batidas, sendo que, em alguns casos, os pontos ótimos desses materiais encontravam-se até mesmo fora das condições operacionais analisadas. Isso significa que os materiais coesivos precisavam de mais energia sendo fornecida ao leito para que as forças interparticulares fossem superadas e a compactação ocorresse. É importante destacar que a baixa esfericidade das partículas de BRH, BCC, FCF e FCC (Tabela 3.1) também pode contribuir para esses resultados, uma vez que, a forma irregular das partículas pode dificultar seu rearranjo em uma configuração de leito mais denso (GERMAN, 1989).

A fim de procurar uma região operacional que promova a compactação máxima (ótima) de todos os materiais estudados no estado estacionário, as regiões ótimas mostradas na Figura 3.5 foram interpoladas. No entanto, não foi encontrada uma região ótima comum entre os materiais, o que é justificável considerando suas diferentes propriedades. Assim, as regiões ótimas dos materiais da mesma classe foram interpoladas e os resultados foram destacados em cinza na Figura 3.6. Para a maioria das classes, observou-se a presença de regiões ótimas comuns relativamente amplas. Vale ressaltar que tais resultados não representam as regiões ótimas definitivas ou gerais para cada classe de material. No entanto, podem direcionar a escolha das melhores condições de amplitude e frequência de batidas para um material que pertença a uma dessas classes.

Figura 3.6 – Interpolação das regiões de densidade *bulk* ótimas em estado estacionário de acordo com as classes de material: esferas de vidro (a), areias (b), pós alimentícios (c), biomassas (d) e sementes (e).



Fonte: Autoria própria (2023).

No caso de cascalhos, por exemplo, a região (cinza) de condições operacionais que levam a densidade *bulk* compactada ótima da classe das areias poderia ser utilizada, visto que tais areais possuem características (Tabela 3.1) relativamente semelhantes àquelas presentadas pelos cascalhos seco (Tabela 4.1). Contudo, como será visto no próximo capítulo, o aumento do conteúdo de umidade dos cascalhos promove uma intensificação das forças de coesão interparticular. Assim, como observado em pré-testes, uma maior amplitude de batida é requerida para vencer as forças interparticulares de promover a compactação ótima. Por esses motivos, nos estudos que serão realizados com o cascalho em diferentes umidades no capítulo 4, optou-se por selecionar a maior amplitude de batida possível para areia S50, sem causar a descompactação, como se segue: n = 3000, f = 250 batidas.min^{-1} e a = 16,00 mm.

De maneira geral, observou-se que as regiões ótimas de densidade *bulk* compactada dos materiais estudados não foram alcançadas com menos de 1585 batidas (Figura A.7 do Apêndice A, SC). Quanto às outras duas variáveis operacionais, as regiões ótimas só foram alcançadas com frequências e amplitudes de batida superiores a 175 batidas.min^{-1} (Figura 3.6 (c), FCC) e 5,50 mm (Figura 3.6 (e), SD), respectivamente. Tais resultados concordam com os relatados por vários autores (PODCZECK; JONES, 2007; PODCZECK; SHARMA, 1996), que destacam que pequenas amplitudes de batidas, como os 3,0 mm popularmente utilizados, não permitem obter valores confiáveis de densidade *bulk* compactada, principalmente quando se analisa materiais coesivos.

Para verificar isso, dois materiais coesivos foram testados, FCF e FCC, nas condições operacionais de f = 250 batidas.min^{-1} e a = 3,00 mm. As batidas foram conduzidas até n = 3000 e depois estendidas para n = 6000 para confirmar a tendência. Os valores máximos (ótimos) de densidade *bulk* compacta previstos pelos modelos estatísticos (Equações (3.19) e (3.20)) nestas condições operacionais foram usados como referência (0,396 g.cm^{-3} para FCF e 0,477 g.cm^{-3} para FCC). Os resultados são exibidos na Figura A.8 do Apêndice A. Um teste t de Student, realizado entre os valores de densidade *bulk* obtidos no estado estacionário e os valores de referência, mostrou, com 95% de confiabilidade, que não há diferença estatisticamente significativa entre os dados (*p-valor* = 0,367 para FCF e *p-valor* = 0,163 para FCC). Esses resultados indicam que, em alguns casos, pequenas amplitudes de batida levam a um estado estacionário de densidade *bulk* compactada menor do que o ótimo, mesmo que o número de batidas seja aumentado. Para FCF e FCC, nessas condições, os valores de densidade *bulk* compactada foram respectivamente 11,7% e 20,1% inferiores aos ótimos (Tabela 3.3). Por outro lado, condições extremas dessas variáveis podem causar a descompactação do leito. No caso de FCC e GSB, por exemplo, 234 batidas.min^{-1} (Figura 3.6 (c)) e 12,90 mm (Figura 3.6 (a)),

respectivamente, já eram suficientes para causar a descompactação. As condições mais extremas para o início da descompactação, previstas pelos modelos, foram 324 batidas.min^{-1} e 21,38 mm para BCC e BRH, respectivamente (Figura 3.6 (d)).

3.3.4 Influência das características das partículas nas propriedades do leito empacotado

Ao analisar a influência das características do material (Tabela 3.1) na porosidade ótima (ε_{opt}) e adicional (ε_{add}) dos leitos (Tabela 3.3), é possível observar padrões de variação complexos, sem tendências claras correlacionadas com algum(s) parâmetro(s) específico(s). Isso pode ser atribuído ao fato de que as propriedades dos leitos empacotados são afetadas por vários fatores, incluindo tamanho, forma, densidade e rugosidade das partículas (GERMAN, 1989). No entanto, alguns resultados podem ser destacados. Observou-se que os leitos empacotados com FCF, FCC, BCC e BRH, apresentaram maiores valores de ε_{opt} e ε_{add}, o que pode estar relacionado aos menores valores de φ e D_{Sauter} observados na Tabela 3.1, aliados à alta coesividade desses materiais (Figura A.6 do Apêndice A). Tais características proporcionam estruturas de leito mais aeradas, principalmente devido aos efeitos de ponte e aumento das forças interparticulares (GERMAN, 1989; POHORECKI *et al.*, 2010). No caso de FCC e FCF, a presença de partículas menores que 100 μm pode colaborar com tais efeitos devido ao aumento das forças de van der Waals. Por outro lado, os leitos com partículas GLB, S50 e SC apresentaram baixos valores de porosidade, condizentes com as altas esfericidades, grandes diâmetros de partículas e baixa coesividade observada para esses materiais.

3.4 Conclusão

No presente capítulo foi apresentado o desenvolvimento de um sistema para determinação das densidades *bulk* aerada e compacta, utilizando medidas indiretas do volume do material durante o processo de compactação por batidas. Este sistema foi utilizado para quantificar os efeitos do número, frequência e amplitude das batidas na densidade *bulk* de dez materiais diferentes, o que foi realizado pela técnica de regressão múltipla vinculada a experimentos planejados. Essa metodologia também permitiu obter as faixas de operação que promoveram a compactação máxima (ótima) do leito de cada material e classe estudadas. Vale ressaltar que, do ponto de vista prático, o conhecimento da densidade *bulk* máxima (ótima) é muito importante para determinar o volume mínimo de material granular que pode ser armazenado em um silo ou vaso de transporte, bem como, a variação máxima de volume que

podem ser esperados durante operações de manejo do material. As seguintes conclusões podem ser tiradas deste estudo:

1. A densidade *bulk* pôde ser estimada com alta precisão (0,002 $g.cm^{-3}$) e exatidão (0,001 $g.cm^{-3}$) por medidas indiretas do volume de material empacotado usando um sensor de distância a laser.

2. A densidade *bulk* compactada dos materiais granulares não dependeu do estado inicial de empacotamento, mas foi altamente dependente das condições operacionais e das características físico-químicas dos materiais.

3. A densidade *bulk* dos materiais foi mais influenciada pela frequência e amplitude das batidas de tal forma que valores baixos dessas variáveis não foram suficientes para proporcionar a compactação adequada do leito, enquanto valores muito altos induziram a descompactação.

4. Altas amplitudes e frequências de batidas foram necessárias para promover a compactação ótima do leito de materiais classificados como coesivo e que apresentavam baixas esfericidades.

5. Em geral, as regiões de densidade *bulk* compactada máxima (ótimas) só foram alcançadas com número, frequência e amplitude de batidas superiores a 1585, 175 $batidas.min^{-1}$ e 5,50 mm respectivamente. Em alguns casos, valores de 234 $batidas.min^{-1}$ e 12,90 mm foram suficientes para proporcionar a descompactação do leito.

CAPÍTULO 4 – INFLUÊNCIA DO CONTEÚDO DE UMIDADE NAS PROPRIEDADES DE MANEJO DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO

4.1 Introdução

Um dos principais desafios relacionados ao manejo de cascalhos de perfuração, principalmente no transporte pneumático, é a sua variabilidade inerente, variando de pastas com alto conteúdo de líquido até materiais quase secos (SEATON; MORRIS, 2005). Isso é causado por diversos fatores, como condições de perfuração, fluidos de perfuração utilizados e eficiência do sistema de controle de sólidos (IOGP, 2016; SEATON; MORRIS, 2005). Em geral, o conteúdo de umidade (*MC*) dos cascalhos de perfuração pode variar entre 5% e 60% em peso de uma mistura de óleo e água (SEATON; MORRIS, 2005). As propriedades de manejo dos cascalhos de perfuração são descritas como variando significativamente com o conteúdo de umidade ao longo do processo de perfuração, o que, se não adequadamente previsto e controlado, pode causar entupimento de tubulações, curvas, válvulas de descarga e alimentadores de sistemas de transporte pneumático (IOGP, 2016; SEATON; MORRIS, 2005). Tais propriedades podem ser interpretadas como a capacidade do material de formar leitos empacotados, escoar, fluidizar e desaerar, as quais foram descritas nas seções 2.3 a 2.6 (SVAROVSKLY, 1987; WOODCOCK; MASON, 1987).

Alguns trabalhos buscaram elucidar a influência da umidade dos cascalhos nas propriedades de manejo desse material, como revisado na seção 2.2.3. Contudo, diversas questões ainda não foram esclarecidas, principalmente, como o conteúdo de umidade afeta as propriedades de manejo dos cascalhos de perfuração e os limites específicos nos quais as mudanças de comportamento relatadas ocorrem. É importante destacar que, do ponto de vista prático, a falta de conhecimento de como o comportamento do material muda de acordo com a umidade pode levar a baixas eficiências de processo e a problemas de entupimento dos sistemas de alimentação e transporte pneumático. Assim, uma análise comparativa de como o conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração influencia suas propriedades de empacotamento, escoabilidade, fluidização e desaeração se faz necessária. Esta análise pode ajudar a elucidar os diferentes efeitos da umidade sobre as propriedades de manejo de cascalhos. Além disso, a análise pode permitir uma classificação dessas propriedades de acordo com o *MC*. Consequentemente, do ponto de vista prático, contribuindo para o aprimoramento do conhecimento das operações de manejos de cascalhos secos e úmidos.

Nesse contexto, o objetivo deste capítulo foi analisar a influência do conteúdo de umidade nas propriedades de manejo de cascalhos de perfuração. Para tanto, estudou-se a influência de dez umidades distintas de cascalhos de perfuração na dinâmica de agregação/desagregação das partículas, propriedades *bulk* de leitos fixos, escoabilidade, características de fluidização e comportamento de desaeração. Essa extensa análise permitiu estabelecer uma classificação dos diferentes comportamentos de manejo dos cascalhos de acordo com a umidade. Além disso, previsões da influência da umidade no regime de transporte pneumático de cascalhos de perfuração foram realizadas e comparadas com operações reais relatadas na literatura. Por fim, foi realizado um estudo de regressão múltipla para obter modelos preditivos dos parâmetros de manejo de cascalhos de perfuração em diferentes umidades.

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 Cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás

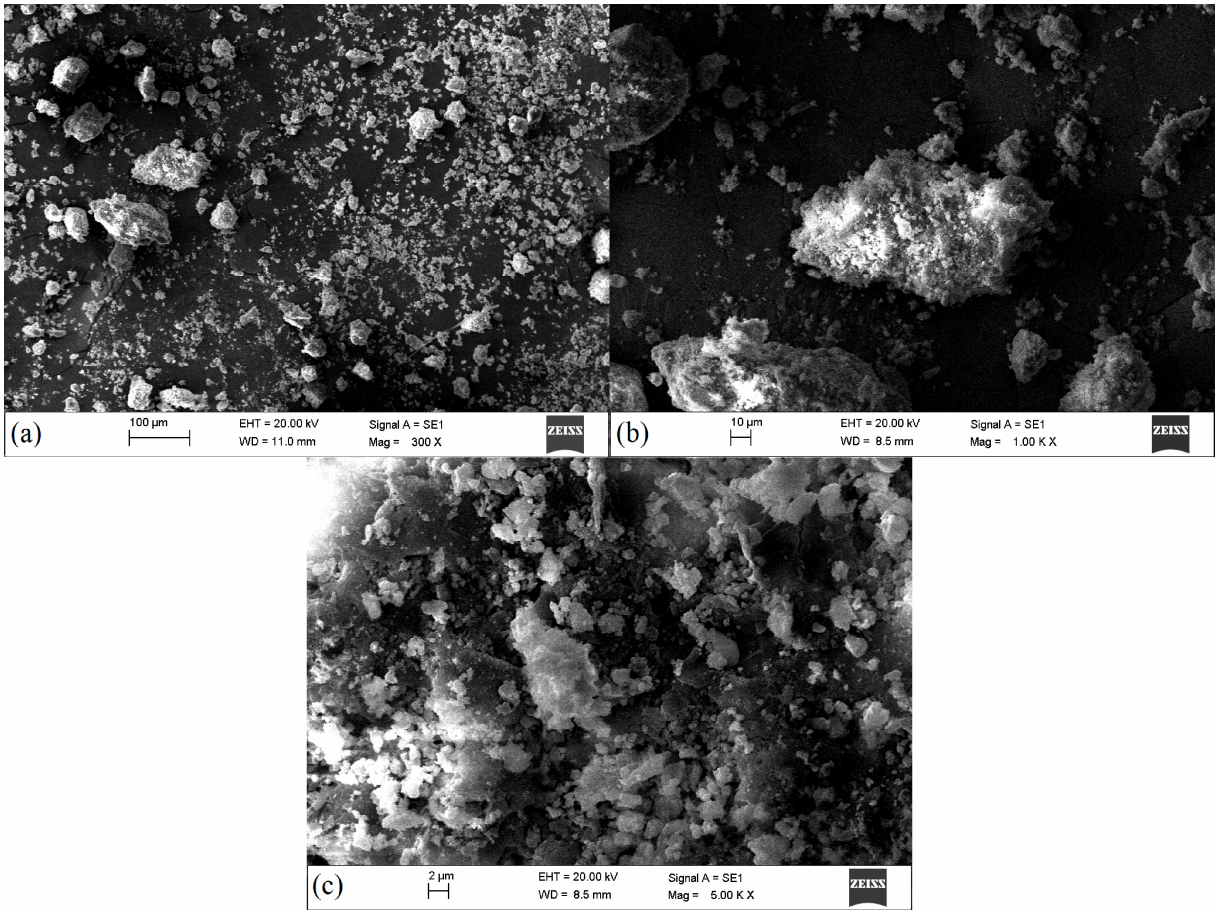
Os cascalhos de perfuração foram fornecidos por Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras®). O material foi amostrado a partir da perfuração de rochas carbonatadas na Bacia de Campos, Campos, Rio de Janeiro, Brasil. O processo de perfuração foi realizado utilizando um fluido de perfuração polimérico à base de água com goma xantana e amido modificado. A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram detalhes das características do material seco.

Tabela 4.1 – Características de cascalhos de perfuração secos.

Classificação de Geldart		B
φ		0,77 ± 0,01
D_{Sauter} (μm)		161,73 ± 20,56
ρ_a (g.cm^{-3})		2,6032 ± 0,0145
ρ_r (g.cm^{-3})		2,6990 ± 0,0061
ε_p		0,0355
Composição	F_o (% g,g^{-1})	0,86 ± 0,22
	F_a (% g,g^{-1})	0,45 ± 0,08
	F_s (% g,g^{-1})	98,70 ± 0,24
Modelo RRB	x_0 (μm)	615,96
	n	1,09
	R^2	0,9954
	RMSE	0,0260

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.1 – Imagens de MEV nas ampliações de 300x (a), 1000x (b) e 5000x (c).



Fonte: Autoria própria (2023).

4.2.2 Frações de óleo, água e sólidos

Os conteúdos de óleo, água e sólidos dos cascalhos de perfuração foram determinados pelo teste de retorta em duplicata, utilizando o método gravimétrico, conforme o American Petroleum Institute (API) (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2012). Para isso, foi utilizado um kit Retorta Fann de 50 mL. O procedimento consistiu em aquecer uma quantidade conhecida de cascalhos de perfuração até que todo o conteúdo de óleo e água fosse evaporado. Os vapores foram então condensados e coletados em uma proveta graduada, permitindo a determinação das frações de óleo (F_o), água (F_a) e sólidos (F_s) de acordo com as Equações (4.1)-(4.3), respectivamente.

$$F_o(\%g.g^{-1}) = \frac{m_o}{m_a + m_o + m_s} 100 \tag{4.1}$$

$$F_a(\%g.g^{-1}) = \frac{m_a}{m_a + m_o + m_s} 100 \tag{4.2}$$

$$F_s(\%g.g^{-1}) = \frac{m_s}{m_a + m_o + m_s} 100 \tag{4.3}$$

em que: m_a é a massa de água (g), m_o é a massa de óleo (g), m_s é a massa de sólido (g).

4.2.3 Composição química do óleo

Para determinar a composição química do óleo presente nos cascalhos de perfuração, foi realizada uma extração em Soxhlet por mais de 17 h com álcool isopropílico (Dinâmica®, PA). O extrato foi então concentrado em evaporador rotativo (IKA®, RV 10) a 95°C, 55 RPM e 910 mbar por 1 h, e analisado em cromatógrafo (Shimadzu®, GCMS-QP2010) equipado com coluna capilar de polímero de 30 m, modelo Rxi-1ms. O dissulfeto de carbono (Honeywell®, 99,9%) foi utilizado como diluente, com injeção de 0,2 µL. Foi utilizada uma rampa de aquecimento de 40 a 250°C com taxa de aquecimento de 10°C.min^{-1}. A temperatura do injetor foi de 300°C e a do detector de 250°C (PETRI, I. *et al.*, 2015). O cromatograma obtido, apresentado na Figura B.1 do Apêndice B, mostra a presença de 1-pentadeceno no conteúdo de óleo dos cascalhos de perfuração.

4.2.4 Caracterização dos cascalhos secos

4.2.4.1 Densidade aparente e real

A densidade aparente (ρ_a) foi estimada com base na massa (M_p) e volume (V_p) das partículas pela Equação (4.4), utilizando a técnica de picnometria líquida. Os experimentos foram realizados utilizando um picnômetro de 25 mL como recipiente de contenção e água destilada como líquido de deslocamento. Todas as análises foram realizadas à temperatura ambiente e em triplicata.

$$\rho_a(g.cm^{-3}) = \frac{M_p}{V_p} \tag{4.4}$$

Para determinação da densidade real, a umidade dos cascalhos de perfuração foi removida por secagem em estufa de secagem (Quimis®, Q314M252) a 105°C por 24 h. Em seguida, a densidade real (ρ_r) dos cascalhos de perfuração foi determinada em triplicata utilizando um picnômetro de gás (He) (Micromeritics®, Accupyc 1330). O estabelecimento das densidades aparente e real permite estimar a porosidade das partículas (ε_p) pela seguinte equação:

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \tag{4.5}$$

4.2.4.2 Esfericidade das partículas

A esfericidade (φ) de quinhentas partículas foi determinada pela técnica de análise de imagem (SCHULZE, 2008). Um microscópio óptico (Nikon®, Eclipse E-200) equipado com uma câmera digital (Motic®, Moticam 5) foi utilizado para a captura das imagens em aumentos de 4x e 100x. O *software* Image-Pro Plus® 6.0 foi utilizado no estabelecimento da área projetada (A) e perímetro (P) das partículas. A esfericidade foi calculada pela Equação (3.1).

4.2.4.3 Distribuição de tamanho de partículas

A distribuição do tamanho das partículas dos cascalhos de perfuração foi determinada em triplicata pelo método de peneiramento, com base nos procedimentos descritos por ASTM e RETSCH (ASTM C136-06, 2015; RETSCH, 2015). A análise foi realizada em um agitador de peneiras (Retsch®, AS 300), operando com 10 peneiras (6, 8, 12, 16, 25, 35, 60, 100, 200 e 400 mesh ASTM) com diâmetro de 30 cm, frequência de 60 Hz, amplitude de 1,0 mm e tempo de 20 min. Os dois últimos parâmetros foram escolhidos através de pré-testes, com aumentos graduais em seus valores, até que a distribuição granulométrica se tornasse independente. Para descrever a distribuição granulométrica, o modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB), especificado pela Equação (3.2), foi ajustado aos dados experimentais (MACÍAS-GARCÍA; CUERDA-CORREA; DÍAZ-DÍEZ, 2004; VESILIND, 1980).

4.2.4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

Inicialmente, as amostras foram revestidas com uma fina camada de ouro (75 nm) usando um dispositivo de pulverização (Leica®, EM SCD050). Em seguida, a caracterização foi realizada utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com um microscópio (Zeiss®, EVO MA10) e um detector de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) (Oxford®, 51-ADD0048). Foram avaliadas as ampliações de 300x, 1000x e 5000x.

4.2.4.5 Espectrometria de fluorescência de raios X

Uma análise semi-quantitativa dos principais óxidos presentes nos cascalhos secos foi realizada através da técnica de espectroscopia de fluorescência de raios X utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X (Bruker®, S8 Tiger).

4.2.5 Procedimento de umidificação do material

Neste trabalho, o conteúdo de umidade (*MC*) é referido como a soma dos teores de água e óleo, conforme mostrado pela Equação (4.6). O nível de saturação (*S*) pode ser definido como a fração do volume interparticular de um leito empacotado que é preenchido por um líquido e foi calculado pela Equação (2.1).

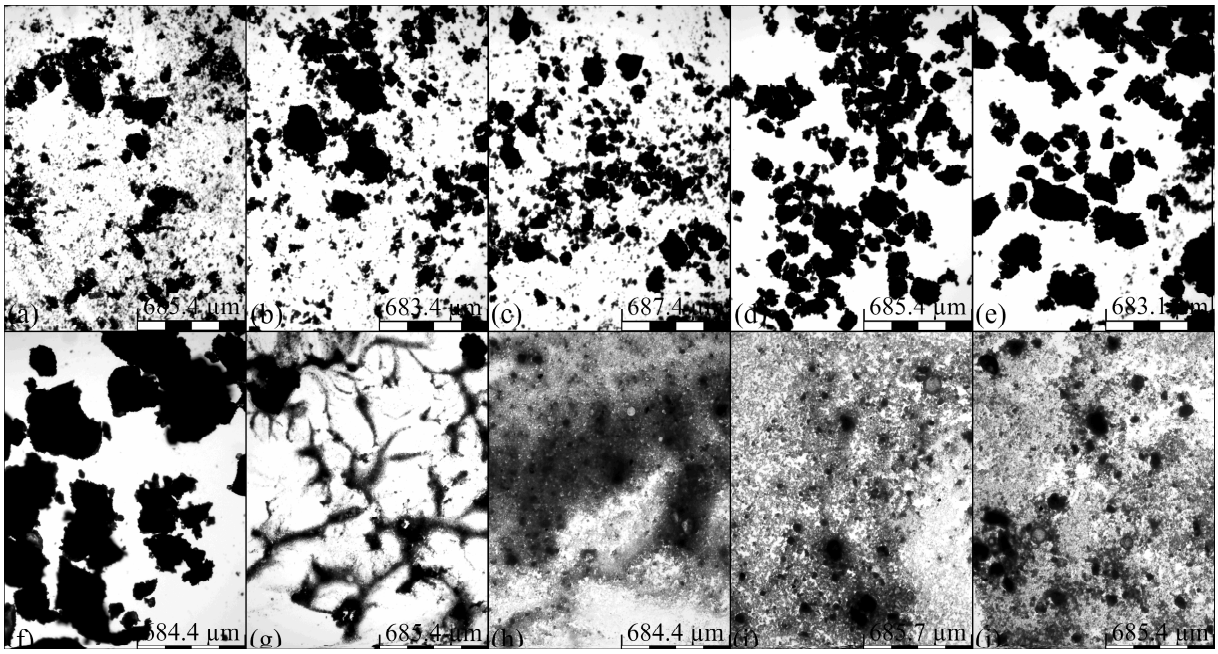
$$MC(\%g.g^{-1}) = \frac{m_w + m_o}{m_w + m_o + m_s} 100 \tag{4.6}$$

em que: m_w é a massa de água (g), m_o é a massa de óleo (g) e m_s é a massa de sólido (g).

Para avaliar a influência do conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração nas propriedades *bulk* de leitos fixos, escoabilidade, fluidização e desaeração, o material foi umidificado pela adição de água para atingir dez *MC*s diferentes: 1,3%, 5,4%, 7,7%, 10,0%, 12,5%, 15,2%, 21,0%, 27,6%, 35,2% e 44,0%, como pode ser visto na Figura 4.2. Esses conteúdos de umidade correspondem, respectivamente, aos níveis de saturação de: 5,4%, 18,9%, 25,7 %, 32,5%, 39,2%, 46,0%, 59,5%, 73,0%, 86,5% e 100,0%. Que abrange os três

estados característicos de pós úmidos: pendular (0% a 25%), funicular (25% a 80-90%) e capilar (80-90% a 100%) (ALTHAUS; WINDHAB, 2012; PIERRAT; CARAM, 1997).

Figura 4.2 – Micrografias dos cascalhos em diferentes conteúdos de umidade: 1,3% (a), 5,4% (b), 7,7% (c), 10,0% (d), 12,5% (e), 15,2% (f), 21,0% (g), 27,6% (h), 35,2% (i) e 44,0 (j).



Fonte: Autoria própria (2023).

O procedimento de umidificação consistiu em adicionar a quantidade necessária de material em um saco do tipo *zip-lock*. Em seguida, foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir o *MC* desejado. O saco foi selado e o processo de mistura manual da foi realizado por mais de 10 min. O saco permaneceu fechado por pelo menos 1 h para a completa homogeneização da mistura. Após este tempo, foram analisadas as propriedades desejadas do material (empacotamento, escoabilidade, fluidização e desaeração). É importante destacar que o material umidificado não foi reaproveitado de uma análise para outra. A cada análise, um novo processo de umidificação foi realizado. Para verificar se a umidade desejada foi atingida, o material foi submetido ao teste de retorta, conforme descrito na seção 4.2.2.

4.2.6 Microscopia óptica

Microscopia óptica foi utilizada para observar o efeito do *MC* no aspecto visual dos cascalhos de perfuração e quantificar a aglomeração/agregação das partículas. Um microscópio óptico (Nikon®, Eclipse E-200) equipado com uma câmera digital (Motic®, Moticam 5) foi

utilizado para a captura das imagens no aumento de 4x. O diâmetro médio de mais de cem partículas foi obtido por meio do *software* Image-Pro Plus® 6.0 para cada *M*C estudado.

4.2.7 Determinação das propriedades bulk de leitos fixos

As densidades *bulk* aerada e compactada dos cascalhos de perfuração foram determinadas em triplicata de acordo com as principais normas para o estabelecimento da densidade *bulk* (ASTM D7481-09, 2009; UNITED STATES PHARMACOPEIA, 2018; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012). O sistema automatizado para aquisição de dados de densidade *bulk* de materiais granulares descrito no Capítulo 3 foi usado para este propósito. O número, frequência e amplitude das batidas foram: 3000, 250 batidas.min^{-1} e 16,0 mm. Essas condições foram observadas na Figura 3.6 como sendo ótimas para a areia "S50". Assim, devido à semelhança entre cascalhos de perfuração e areias, e as fortes forças de coesão interparticular induzidas pela umidade, essas condições foram escolhidas para serem utilizadas neste trabalho. Para empacotar o material na proveta, um tubo plástico (diâmetro interno de 21,20 mm, diâmetro externo de 25,00 mm e altura de 275 mm) foi colocado concentricamente na proveta. O material foi introduzido no tubo plástico despejando quantidades constantes de material, da mesma altura, com o auxílio de um funil. Após o enchimento do tubo com o material, o tubo foi retirado a uma velocidade constante de 12,2 ± 1,5 mm.s^{-1}. O pó fluía gradualmente para fora do tubo e enchia o cilindro graduado. Para cada *MC* analisado, a massa de material foi selecionada para prover o volume inicial de empacotamento de 100 mL.

As densidades *bulk* aerada (ρ_0) e compactada (ρ_t) foram determinadas pelas Equações (3.3) e (3.4). As porosidades *bulk* aerada (ε_0), compactada (ε_t) e efetiva (ε_{eff}) foram determinadas respectivamente pelas Equações (2.3) a (2.5) (ALTINO; LOURENÇO; ATAÍDE, 2021; TRAINA *et al.*, 2013). Os cálculos envolvendo ε_0, ε_t e ε_{add} foram realizados descontando-se a massa de líquido da massa total do leito empacotado. Como a porosidade descreve a estrutura do leito, não faz sentido levar em conta a massa do líquido (KALMAN; PORTNIKOV, 2021).

É importante destacar que em *MC*s elevados (27,6%, 35,2% e 44,0%) a mistura de cascalhos e líquido tendia a respingar a cada batida, removendo material do cilindro graduado. Assim, nestes casos, foi necessário adicionar uma vedação emborrachada no topo da proveta graduada, de modo que apenas o ar pudesse passar ar por um orifício. Como consequência, a borracha de vedação impediu que o sensor de distância, do sistema automatizado de aquisição de dados de densidade *bulk*, medisse adequadamente o volume de material empacotado na

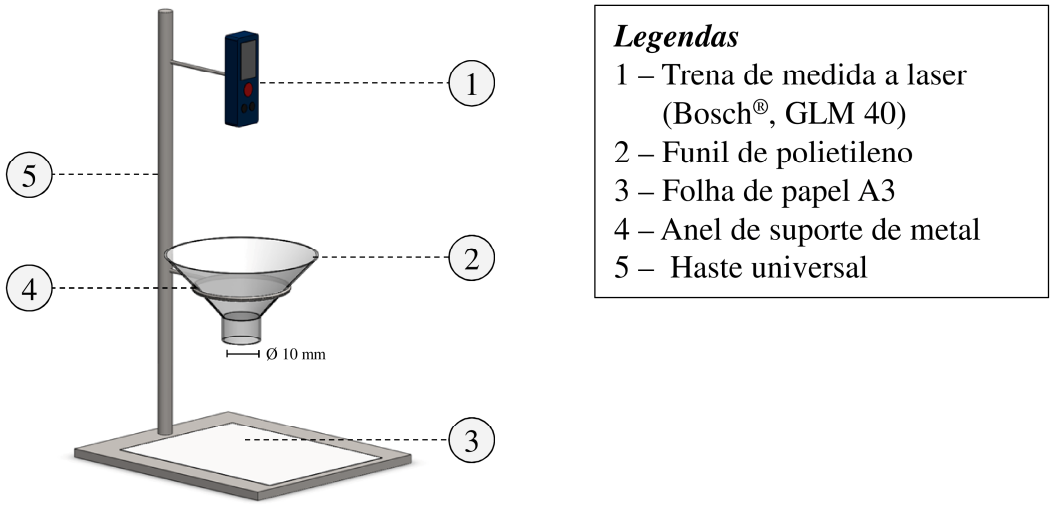
proveta graduada. Assim, foi necessário utilizar a graduação do cilindro para medir o volume de material nesses casos.

Os experimentos foram realizados em temperatura ambiente (25,2 ± 0,5°C) com umidade relativa do ar de 55,4 ± 2,7%, o que foi suficiente para eliminar visualmente as cargas estáticas.

4.2.8 Indicadores de escoabilidade

A escoabilidade dos cascalhos de perfuração foi analisada por dois indicadores: ângulo de repouso (*AoR*) e razão de Hausner (*HR*), em triplicata. A primeira foi determinada pelo método do funil descrito pela ASTM (ASTM, 2000). O material foi despejado em quantidades constantes em um funil de altura constante, e descarregado em uma folha de papel A3. A altura da pilha de material (H_p) foi medida por uma trena a laser (1) (Bosch®, GLM 40) fixada acima do funil e centralizada com ele. O sistema utilizado é mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 Sistema experimental de medida do ângulo de repouso (*AoR*).



Fonte: Autoria própria (2023).

A circunferência da base cônica foi marcada com uma caneta e o diâmetro foi medido em quatro posições diferentes por um paquímetro digital (MTX®, 316119), fornecendo um valor médio (D_a), que foi deduzido do diâmetro da saída de abertura de o funil (d = 1,0 cm). O ângulo de repouso foi então calculado pela Equação (2.6). É importante destacar que para cascalhos com umidades superiores a 15,2% não foi possível determinar o ângulo de repouso devido ao comportamento pastoso da mistura. O segundo indicador (*HR*) foi calculado pela

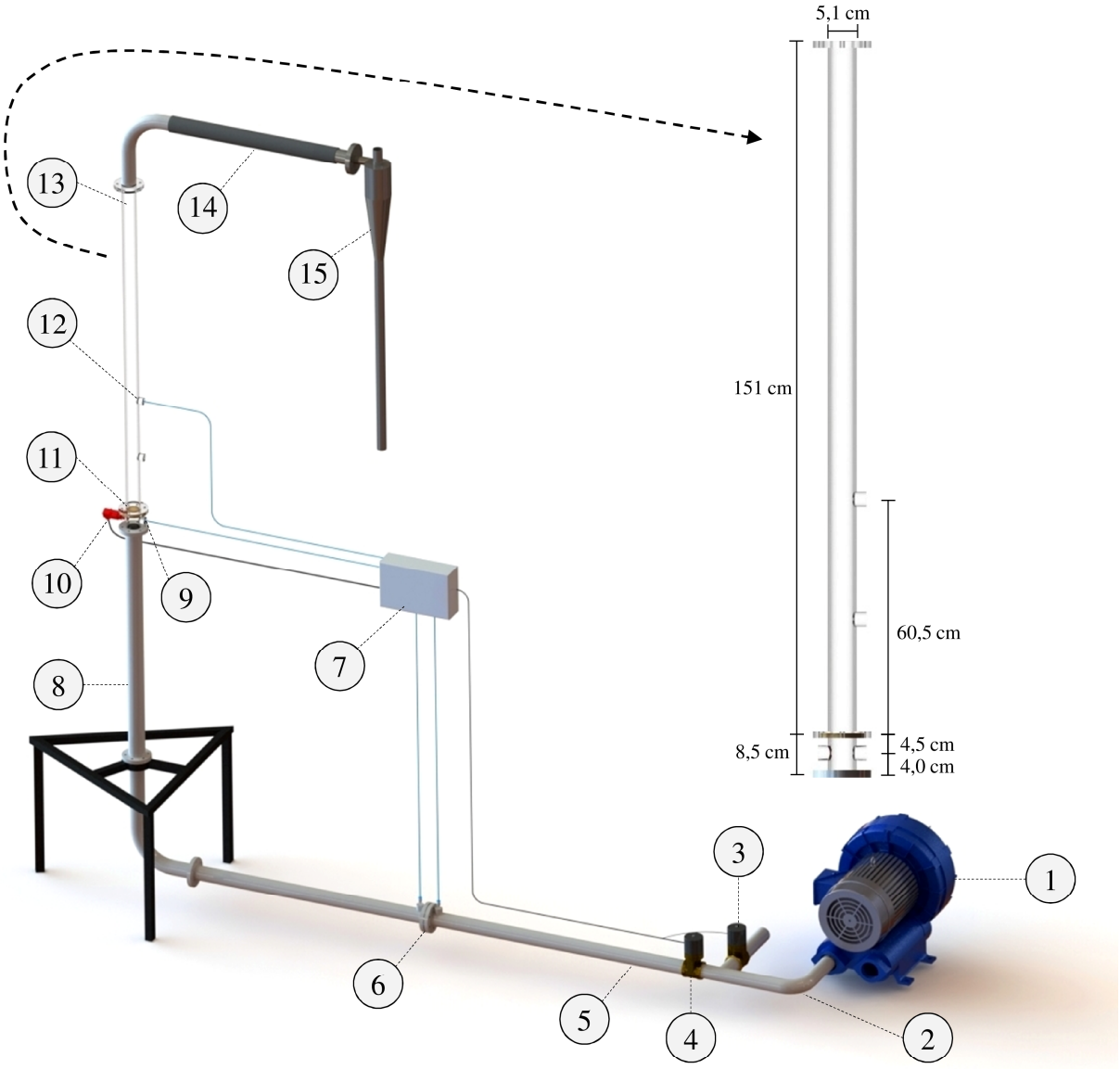
razão entre a densidade *bulk* compactada e aerada, de acordo com a Equação (2.7) (SCHULZE, 2008).

4.2.9 Fluidização e desaeração

Os experimentos de fluidização e desaeração foram realizados em triplicata no sistema experimental mostrado na Figura 4.4. O ar fornecido pelo compressor radial (1) era conduzido através do tubo principal (2) até a válvula solenoide principal (4), que controlava a passagem ou não de ar pela tubulação. Ao fechar esta válvula (4) o ar poderia, alternativamente, ir para uma válvula solenoide de *by-pass* (3), que controlava a passagem ou não de ar para o ambiente atmosférico. Após passar pela válvula solenoide principal (4), o ar era conduzido através de tubulações para um retificador de fluxo de ar (5) e, em seguida, para uma placa de orifício (6). A velocidade do ar foi estimada indiretamente pela diferença de pressão gerada na placa de orifício (6), que foi lida por um transdutor de pressão diferencial (7-c). A velocidade do ar foi controlada por um dispositivo de multifuncional I/O (7-a), associado a um inversor de frequência (WEG®, CFW500), que foi conectado ao compressor radial (1).

Em seguida, o ar era conduzido por tubulações para outro retificador de fluxo de ar (8) e para uma placa sinterizada de bronze (11), que auxiliava na distribuição do ar no leito fluidizado (13). É importante destacar que os flanges do tubo do leito de fluidização foram vedados por *o-rings*, de modo a evitar vazamentos do leito em altos *MC*s. Em seguida, o ar passava pelo leito fluidizado, e as partículas elutriadas eram conduzidas através de uma mangueira de borracha flexível (14) até um ciclone (15) para a separação da mistura. A queda de pressão do leito foi medida antes da placa sinterizada (9) e após o leito (12) por um sensor de pressão diferencial (7-d para baixas pressões e 7-b para altas pressões). A temperatura e a umidade do ar foram medidas por um sensor (10) antes da placa de sinterizada. Os sinais dos sensores foram processados por um dispositivo multifuncional I/O (7-a), encaminhados para um computador (DELL®, Inspiron 14, P74G) e apresentados e registrados por meio de um *software* supervisório (National Instruments®, LabView®, NI- DAQmx 19.6).

Figura 4.4 – Sistema experimental para fluidização e desaeração de cascalhos de perfuração.



Legendas	
1 – Compressor radial (Weg®, 7.5 CV)	8 – Retificador de fluxo de ar
2 – Tubo de policloreto de vinila (2”)	9 – Ponto de tomada de pressão
3 – Válvula solenoide de *by-pass* (Marcoval®, 2”, NF)	10 – Sensor de temperatura/umidade (Dwyer®, Series RH)
4 – Válvula solenoide principal (Marcoval®, 2”, NF)	11 – Placa porosa sinterizada de bronze
5 – Retificador de fluxo de ar	12 – Ponto de tomada de pressão
6 – Placa de orifício	13 – Leito fluidizado de plástico acrílico transparente
7 – Sistema de aquisição de dados:	14 – Mangueira de borracha flexível
• Dispositivo multifuncional I/O (National Instruments®, USB-6212)	15 – Ciclone de aço inoxidável
• Sensor de pressão (Freescale®, MPX5050DP)	
• Sensor de pressão (Freescale®, MPXV7002)	
• Sensor de pressão (TE Connectivity®, AST5100)	

Fonte: Autoria própria (2023).

O procedimento dos experimentos de desaeração consistiu, incialmente, na pesagem de 200 g de material em balança digital (Marte®, UX6200H). Em seguida, o material foi despejado em quantidades constantes no leito fluidizado (13) com auxílio de um funil, de uma altura fixa. O leito foi totalmente fluidizado por 5 s e, em seguida, a velocidade do ar foi reduzida a zero, permitindo que o leito se compactasse lentamente. Diferentes alturas de leito foram observadas (4,2-10 cm) dependendo do *MC* em questão. Este procedimento foi adotado para reduzir a influência do método de empacotamento. A altura do leito foi medida por uma fita métrica fixada no leito fluidizado. O material foi então totalmente fluidizado e quando a queda de pressão se estabilizou, a válvula solenoide principal (4) foi rapidamente fechada e a eletroválvula de *by-pass* (3) foi aberta, direcionando o ar para o ambiente atmosférico. A queda de pressão através do leito empacotado foi registrada ao longo do tempo até a estabilização (30 s). A cada 0,02 s o sistema registrava a média de 1000 dados. Para descontar a contribuição da queda de pressão da placa sinterizada, experimentos em branco foram realizados em triplicata antes e depois de cada replica, utilizando as mesmas condições. Após cada réplica, todo o leito (13) foi limpo e a placa sinterizada foi submetida à limpeza ultrassônica (Retsch®, UR2) por 30 min e posteriormente seca em estufa (Quimis®, Q314M252) a 105°C por 12 h.

O tempo de desaeração (t_{da}) foi usado para quantificar a capacidade de desaeração do material. Tal parâmetro pode ser estimado pelo ajuste de diferentes modelos aos dados experimentais de queda de pressão em função do tempo. Neste trabalho, observou-se por meio de pré-testes que os dados experimentais foram melhor correlacionados pelo modelo proposto por Chambers *et al.* (1998) (Equação (2.11)) do que pelo modelo descrito por Mainwaring *et al.* (1987) (Equação (2.10)), sendo este primeiro então selecionado para a estimativa de t_{da}. No entanto, para as condições em que o *MC* do material se aproximou da condição de saturação capilar: 27,6%, 35,2% e 44,0%, esse modelo não se ajustou bem aos dados, uma vez que fenômenos diferentes podem ter ocorrido nesses casos. Para estes *MC*s, as curvas de queda de pressão apresentaram dois períodos distintos (Figura 4.17 (c)), sendo o primeiro de decaimento exponencial rápido seguido de um segundo, de decaimento exponencial lento. Assim, um modelo de decaimento exponencial duplo é proposto neste trabalho para prever a queda de pressão dos dois períodos distintos. O modelo é representado pela Equação (4.7), e foi utilizado para estimar os tempos de desaeração observados para os *MC*s citados.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L_0} \sim \exp\left(\frac{-t}{t_{da1}}\right) + \exp\left(\frac{-t}{t_{da2}}\right) \tag{4.7}$$

em que: ΔP é a queda de pressão, ΔL_0 é a altura inicial do leito, t é o tempo, t_{da1} é o tempo de desaeração do período de decaimento rápido e t_{da2} é o tempo de desaeração do período de decaimento lento.

Atualmente, não existe uma técnica universal para determinar os parâmetros de desaeração (t_{da}) (JONES; WILLIAMS, 2008). Assim, as diferentes condições e equipamentos utilizados pelos pesquisadores dificultam a comparação dos valores de desaeração. Para verificar se os resultados obtidos pela metodologia adotada são, no mínimo, semelhantes aos de outros autores, o tempo de desaeração dos cascalhos de perfuração secos foi comparado com o tempo de desaeração de outros materiais do grupo B da classificação de Geldart, com características semelhantes. Os resultados, apresentados na Tabela B.1 do Apêndice B indicam que o tempo de desaeração obtido pela metodologia atual está de acordo com tempo relatado por outros autores (BARESCHINO *et al.*, 2007; MAINWARING; REED, 1987; SANCHEZ *et al.*, 2003), principalmente para materiais arenosos, como "areia (NY)" e "sólidos granulares piroclásticos"

Após realizar os experimentos de desaeração, o mesmo material empacotado foi usado para realizar os experimentos de fluidização. A velocidade do ar foi aumentada gradativamente alterando-se a velocidade de rotação do compressor radial em passos de 50 RPM ou 100 RPM, até a fluidização total do material, e depois reduzida gradativamente nos mesmos passos até zero. A velocidade superficial do gás, em geral, foi variada de 0,0 $m.s^{-1}$ a 1,4 $m.s^{-1}$, chegando até 4,0 $m.s^{-1}$ no caso de cascalhos com alta coesividade. Em cada passo, foram registradas as médias de 100.000 dados de velocidade do ar, queda de pressão do leito, altura do leito e umidade e temperatura do ar. Para minimizar as perdas de umidade por secagem e reduzir o tempo experimental, o critério de mudança de passo da velocidade de rotação do compressor foi a estabilização do desvio padrão da pressão e velocidade do ar. Este procedimento permitiu obter um tempo experimental de apenas 5 min. A redução do conteúdo de umidade dos materiais devido a secagem foram quantificadas conforme seção 4.2.2, sendo inferiores a 4,0 ± 1,7%. Os experimentos foram realizados em temperatura e umidade do ar de 26,6 ± 0,2°C e 42,9 ± 0,7%, respectivamente, o que foi suficiente para observar visualmente a ausência de cargas estáticas. Assim, com os experimentos de fluidização realizados, foi possível obter as curvas de fluidização e determinar as velocidades mínimas de fluidização (U_{mf}), os fatores de permeabilidade (κ) e as razões de expansão do leito (*BER*).

A velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) foi determinada analisando a velocidade superficial do gás na qual o desvio padrão das flutuações de pressão atingiu um máximo na desfluidização do material, conforme recomendado por Grace *et al.* para partículas

polidispersas (GRACE; AVIDAN; KNOWLTON, 1997). Isso significa que a velocidade mínima de fluidização foi definida neste trabalho como a velocidade na qual as flutuações (desvio padrão) da queda de pressão chegam a um valor máximo.

Os dados de queda de pressão da parte linear (leito fixo) das curvas de fluidização foram correlacionados com a velocidade superficial do gás pela Equação (4.8) (equação de Darcy), permitindo determinar o fator de permeabilidade (κ) (COULSON; RICHARDSON, 2002).

$$\frac{\Delta P}{L_{fb}} = \frac{1}{\kappa} U \tag{4.8}$$

em que: ΔP é a queda de pressão, L_{fb} é o comprimento do leito na condição de leito fixo e U é a velocidade superficial do gás.

A razão de expansão do leito (BER) pode ser definida como a razão entre a altura do leito fluidizado (H_f), nas condições de operação, e a altura inicial do leito fixo (H_0), conforme a Equação (4.9). Essas alturas foram determinadas a olho nu pela fita métrica acoplada na lateral do tubo de acrílico (Figura 4.4 (13)).

$$BER = \frac{H_f}{H_0} \tag{4.9}$$

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Características de cascalhos de perfuração secos

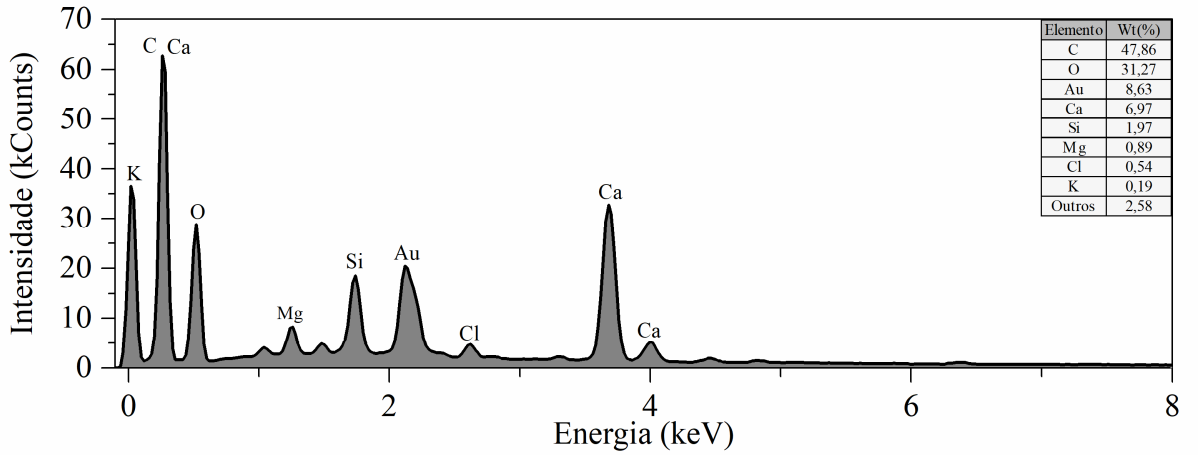
A Tabela 4.1 mostra que o material seco apresentava baixos conteúdos de água e óleo, sendo adequado para ser umidificado. No entanto, para entender como a umidade pode afetar o comportamento dos cascalhos de perfuração, é importante classificá-lo como um material poroso ou não-poroso. Em geral, em materiais porosos, a umidade preenche os poros das partículas e adiciona peso ao leito, aumentando a densidade do material. Por outro lado, para materiais não-porosos, a umidade se encontra preferencialmente na superfície das partículas e contribui para as forças de ponte líquida, alterando as forças interparticulares (forças de coesão) (KALMAN; PORTNIKOV, 2021). De acordo com Ishizaki *et al.*, materiais porosos possuem porosidades de partículas (ε_p) que variam entre 0,2 e 0,95 (ISHIZAKI; KOMARNENI;

NANKO, 1998). Assim, de acordo com a porosidade das partículas (ε_p), obtida pela Equação (4.5), os cascalhos de perfuração estudados podem ser classificados como um material não-poroso (Tabela 4.1).

A esfericidade (φ) observada para os cascalhos de perfuração estava de acordo com o valor relatado por Hyun *et al.* (0,80) (HYUN; SHAH; OSISANYA, 2000). As densidades aparente (ρ_a) e real (ρ_r) dos cascalhos também foram semelhantes à densidade real relatada por Petri *et al.* (2,6830 g.cm^{-3}) (PETRI *et al.*, 2015). Já o valor do diâmetro médio de Sauter (D_{Sauter}) obtido foi inferior àquele relatado por Petri *et al.* (238 μm) (PETRI *et al.*, 2015). Com base nos valores de densidade real e diâmetro médio de Sauter, os cascalhos de perfuração secos podem ser classificados como sendo do grupo B da classificação de Geldart (GELDART, 1973).

As micrografias obtidas por MEV exibidas na Figura 4.1 mostraram partículas sem poros definidos com uma ampla variedade de tamanhos e formas, bem como superfícies ásperas. A presença de aglomerados de partículas também pode ser observada, o que indicou certo grau de coesividade do material. Os resultados da análise de EDS (Figura 4.5) evidenciam a existência de diversos elementos presentes nas partículas de cascalhos de perfuração.

Figura 4.5 – Resultados da análise de EDS do cascalho de perfuração secos.

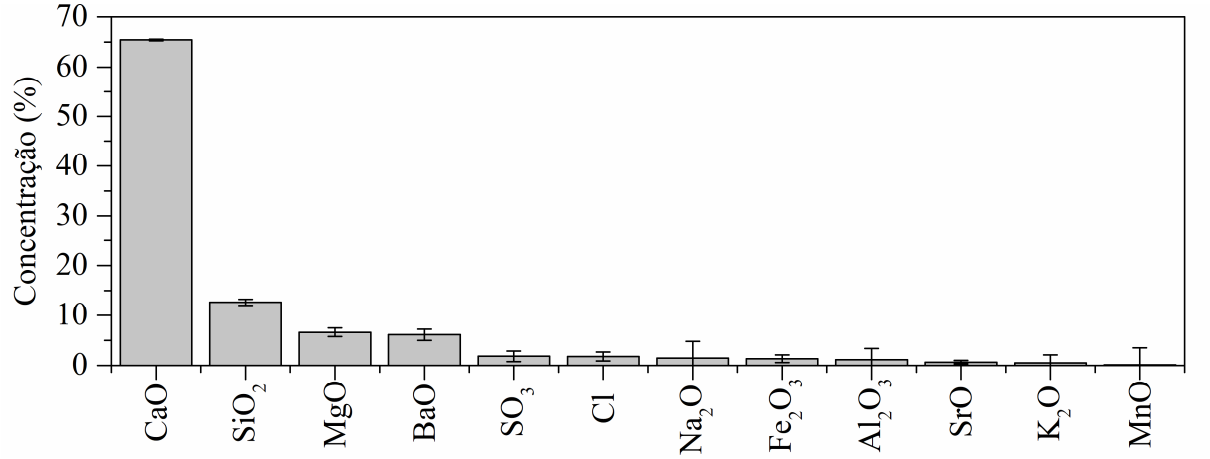


Fonte: Autoria própria (2023).

Os elementos carbono e ouro aparecem em quantidades significativas, porém, é importante destacar que as partículas foram revestidas com ouro e presas a uma fita adesiva condutora de carbono (Nisshin®, Nem Tape) para realizar as análises. Também é possível observar quantidades significativas de cálcio, oxigênio e magnésio. Os cascalhos de perfuração analisados foram provenientes de rochas carbonatadas. Segundo Reeder (1983), essas rochas são formadas principalmente por calcita ($CaCO_3$), dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) e aragonita

($CaCO_3$). Entretanto, os resultados da análise de FRX (Figura 4.6) não mostram esses componentes, e sim a presença principal de CaO, SiO_2, MgO e BaO, em ordem decrescente de quantidade. Vale destacar que essa mesma ordem foi observada para Ca, Si e Mg na análise de EDS, o que, de certa forma, corrobora esses resultados.

Figura 4.6 – Resultados de FRX do cascalho de perfuração seco.



Fonte: Autoria própria (2023).

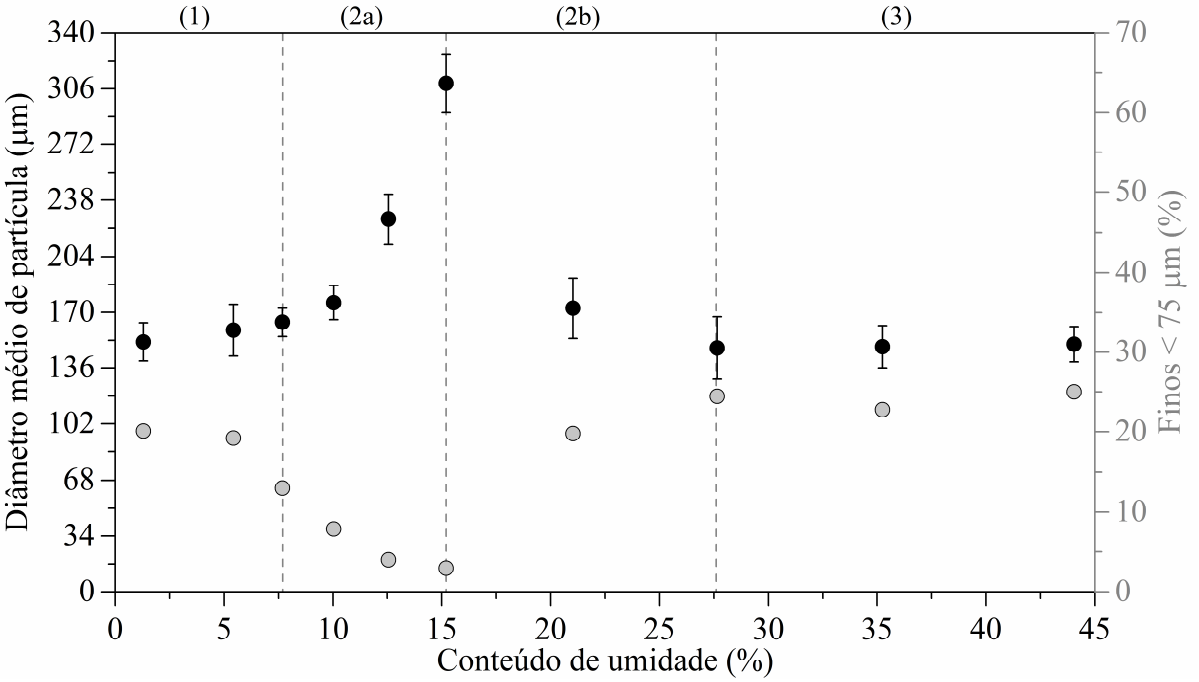
4.3.2 Efeitos do conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração

4.3.2.1 Agregação e desagregação de partículas

O efeito do *MC* no aspecto visual dos cascalhos de perfuração é mostrado nas micrografias da Figura 4.2. As pequenas variações entre as escalas das micrografias permitiram realizar uma análise comparativa da influência do *MC* no aspecto visual dos cascalhos. O aumento do *MC* até 15,2% (Figura 4.2 (f)) promoveu uma redução na quantidade de partículas finas, enquanto o tamanho das partículas aumentou. Para maiores *MC*s, o material passou a se tornar pastoso, aumentando a quantidade de finos enquanto o tamanho das partículas se reduziu. O aumento do tamanho das partículas e a redução dos finos com o aumento do *MC* podem ser caracterizados como aglomeração ou agregação (KRISTENSEN; SCHAEFER, 1987; SINGER *et al.*, 2019). No entanto, como o agrupamento das partículas mostrou-se reversível pelo aumento do *MC*, o fenômeno pode ser classificado como agregação (SINGER *et al.*, 2019). A agregação de partículas ocorre por interações muito complexas entre aumento e redução de tamanho do agregado, o que significa um equilíbrio entre forças de ligação e ruptura (KRISTENSEN, 1995). No caso de materiais não porosos, para que os agregados se formem e

cresçam, é necessário: (i) uma quantidade suficiente de líquido de superfície livre (por exemplo, gotas de água) para estabelecer ligações líquidas e (ii) agregados que contenham líquido superficial suficiente para permitir a coalescência entre outros agregados (KRISTENSEN; SCHAEFER, 1987; KRISTENSEN, 1996). Assim, a umidade tem forte influência no crescimento do agregado. Para quantificar as alterações do tamanho das partículas em função do *MC*, foram analisados o diâmetro médio das partículas e a quantidade de finos menores que 75 μm (KRISTENSEN; SCHAEFER, 1987). Os resultados são apresentados na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Diâmetro médio das partículas e quantidade de finos em função do conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração.

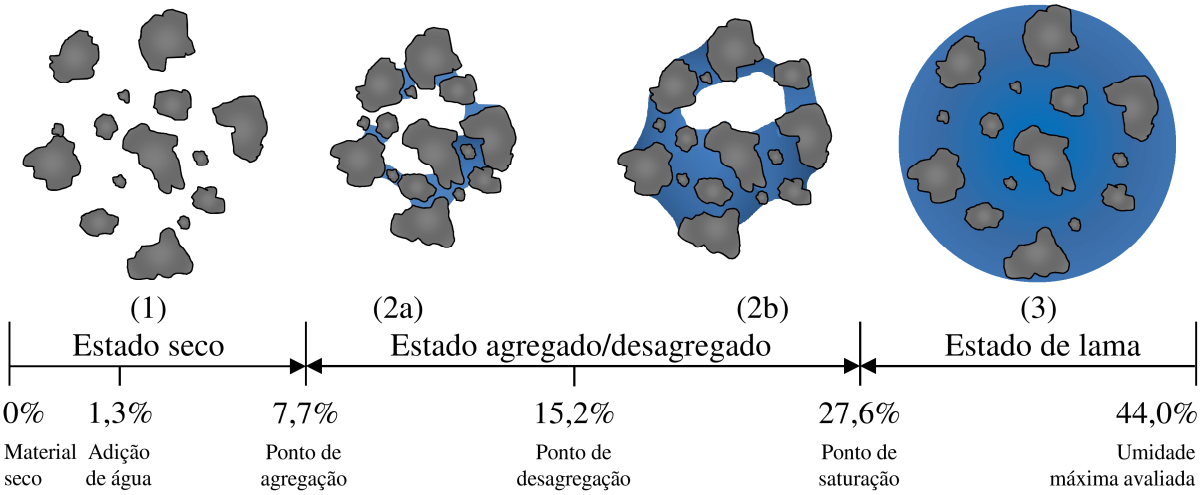


Fonte: Autoria própria (2023).

Um esquema, mostrado na Figura 4.8, foi criado para melhor elucidação dos fenômenos. Os limites de umidade, estados e sub-estados ilustrados na Figura 4.8 foram estabelecidos neste trabalho com base em comportamentos semelhantes das partículas considerando: características de agregação/desagregação, propriedades *bulk* de leitos fixos, fluidização e desaeração. Esses limites também foram marcados na Figura 4.7. No estado seco (1) (Figura 4.8 (1)), a faixa de nível de saturação é de um estado pendular. As partículas estavam dispersas e o diâmetro médio das partículas permaneceu quase constante com o incremento do *MC*. Isso é esperado, considerando as fracas forças de ponte líquida geralmente observadas no estado pendular (ALTHAUS; WINDHAB, 2012). Observe que, neste estado, o tamanho médio das partículas é

muito semelhante ao diâmetro médio de Sauter (Tabela 4.1) obtido pela análise por peneiramento.

Figura 4.8 – Esquema de classificação do comportamento dos cascalhos de perfuração de acordo com o conteúdo de umidade.



Fonte: Autoria própria (2023).

Prosseguindo para o sub-estado agregado (2a) (Figura 4.8 (2a)), à medida que o *MC* foi acrescido, o tamanho médio das partículas aumentou e a quantidade de finos reduziu até o *MC* de 15,2% (2a). A faixa de nível de saturação é de um estado funicular. Assim, o aumento do *MC* pode ter induzido a formação de pontes líquidas, aumentando as forças interparticulares e promovendo a agregação de finos e pequenas partículas em aglomerados de maior tamanho. Prosseguindo para o sub-estado desagregado (2b) (Figura 4.8 (2b)), a quantidade de líquido parecia ser suficiente para iniciar uma redução gradual das forças de coesão e atuar como lubrificante, iniciando a dispersão dos agregados em partículas de menor diâmetro e finos. Finalmente, em 27,6% um ponto de saturação foi alcançado, iniciando o estado de lama (3) (Figura 4.8 (3)), onde o nível de saturação é de um estado capilar. É possível observar que os agregados foram dispersos de tal forma que o tamanho médio das partículas e a quantidade de finos eram semelhantes aos do estado seco (1) (CAPES, 1980; LITSTER, 2017).

4.3.2.2 Propriedades bulk de leitos fixos

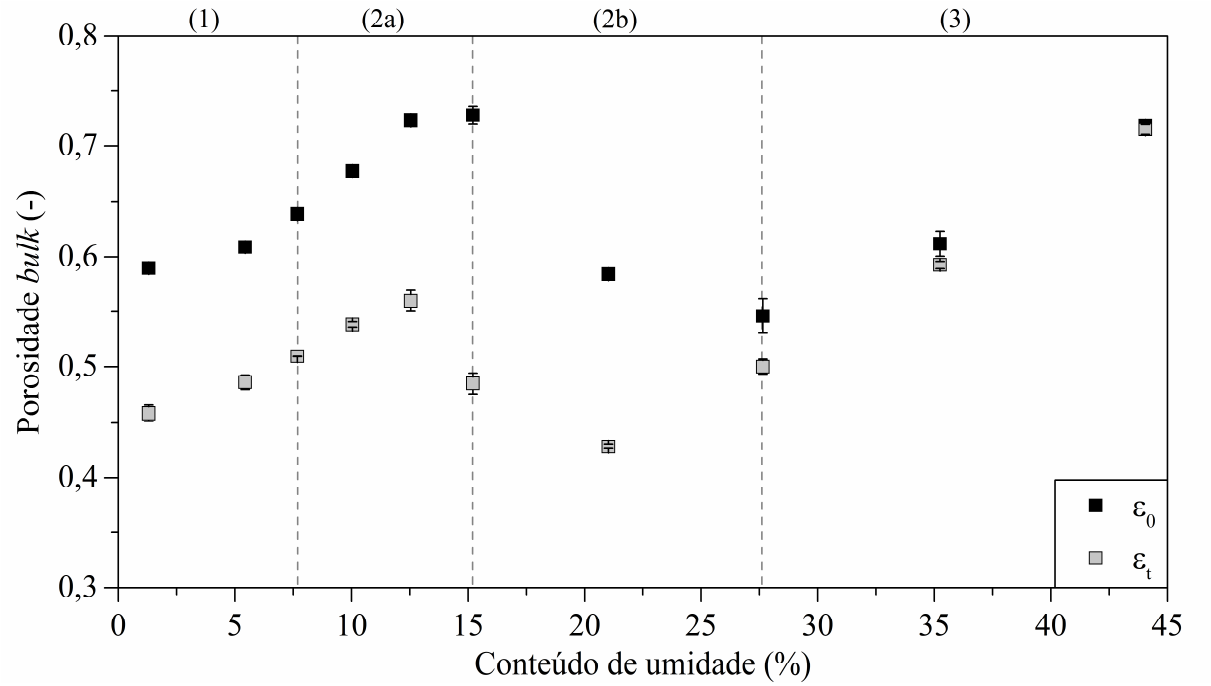
A Figura B.2 (a) do Apêndice B mostra a influência do *MC* nas densidades *bulk* aerada (ρ_0) e compactada (ρ_t) dos cascalhos de perfuração. Para verificar se o número de batidas foi suficiente para atingir o estado estacionário, os valores de ρ_t experimentalmente obtidos foram

comparados com valores de densidade *bulk* compactada assintótica (ρ_∞). Este último parâmetro foi obtido pelo ajuste do modelo KWW (PHILIPPE; BIDEAU, 2002) (Equação (3.34)) aos dados experimentais da Figura B.3 do Apêndice B. Os resultados apresentados na Tabela B.2 do Apêndice B mostram bons ajustes do modelo aos dados, conforme demonstrado pelos altos valores do coeficiente de determinação (R^2). Um teste *t* de Student, realizado entre ρ_t e ρ_∞, mostrou, com 95% de confiabilidade, que não há diferença estatisticamente significativa entre os dados, como pode ser evidenciado pelos valores de *p-value* desta tabela. Assim, o número de batidas fornecido para a obtenção da densidade *bulk* compactada foi suficiente para atingir o estado estacionário previsto pelo modelo KWW para cada *MC* analisado.

O efeito do *MC* nas propriedades *bulk* do material pode ser mais bem interpretado analisando as porosidades *bulk* aerada (ε_0) e compactada (ε_t), exibidas na Figura 4.9. Os limites de estados da Figura 4.8 foram marcados nessa figura para melhor análise dos dados. É importante destacar que o peso da umidade foi descontado nos cálculos destes parâmetros, assim, eles podem refletir com mais precisão a influência da umidade apenas na estrutura interparticular do leito. Portanto, essas porosidades representam a fração do volume de vazios em relação ao volume total do leito, não importando se esses vazios são preenchidos com líquido, ar ou uma mistura entre os dois.

Nos estados (1) e (2a), é possível observar que as porosidades *bulk* aerada e compactada aumentaram com o incremento de umidade até 15,2% para ε_0 e 12,5% para ε_t. Este comportamento também foi observado por muitos autores (FENG; YU, 1998; KALMAN; PORTNIKOV, 2021; LU *et al.*, 2018) para diferentes materiais não-porosos e é geralmente atribuído ao aumento das forças de coesão através do fortalecimento das pontes líquidas entre as partículas, conforme ilustrado na Figura 4.8 (2a). Como consequência, a mobilidade relativa das partículas é reduzida, resultando em leitos mais aerados (CROUTER; BRIENS, 2014). Pode-se esperar que ε_t também apresentasse um ponto de virada no *MC* de 15,2%, como foi observado para ε_0. No entanto, no processo de compactação, energia é aplicada ao leito empacotado para provocar o rearranjo das posições relativas das partículas. Assim, à medida que o processo de compactação avança, os espaços vazios interparticulares são reduzidos e o nível de saturação é gradualmente aumentado (SCHULZE, 2008). Estima-se que o nível de saturação tenha aumentado devido à compactação de 46,0% para 53,3% no *MC* de 15,2%. Nesse nível de saturação mais alto, as forças de coesão e atrito podem ter sido reduzidas, permitindo que as partículas se rearranjem em uma configuração de leito mais denso.

Figura 4.9 – Efeito do conteúdo de umidade nas porosidades *bulk* aerada (ε_0) e compactada (ε_t) de cascalhos de perfuração.



Fonte: Autoria própria (2023).

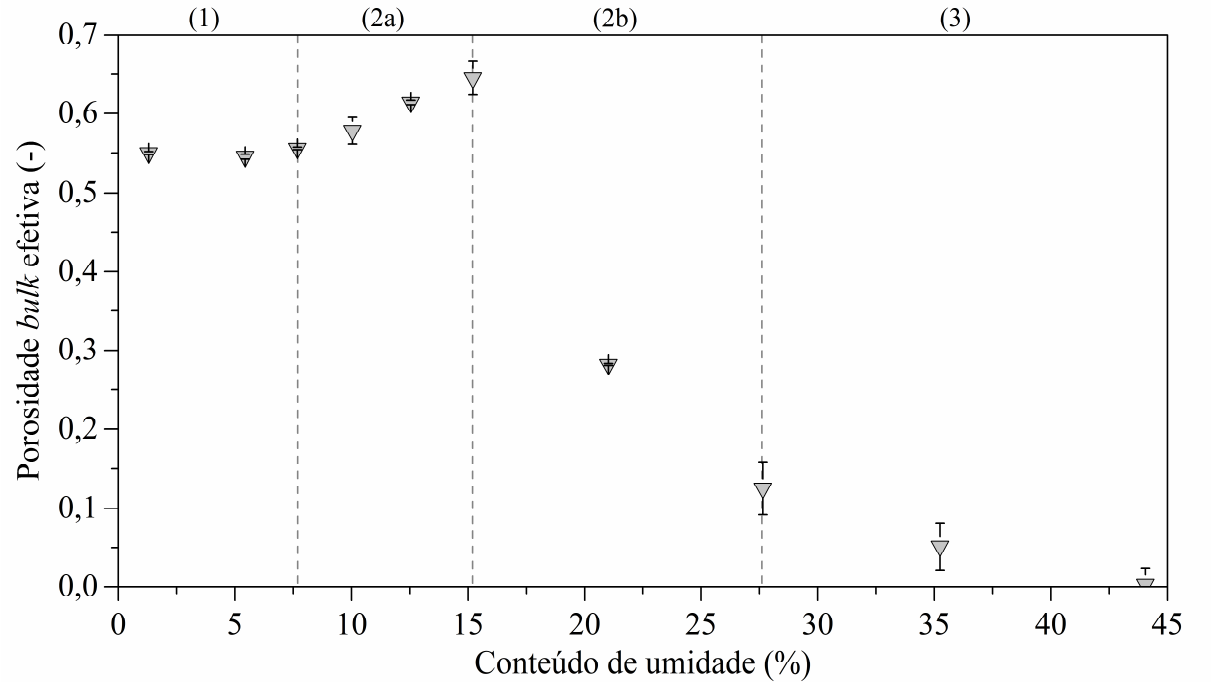
Após este ponto, no sub-estado (2b) da Figura 4.9, o aumento do *MC* reduziu ε_0 e ε_t, provavelmente devido à redução das forças de coesão mencionadas anteriormente, como também observado por alguns autores (KALMAN; PORTNIKOV, 2021; LU *et al.*, 2018). Essa redução ocorreu até 27,6% para ε_0 e 21,0% para ε_t. É interessante destacar que, nesses pontos, as porosidades observadas foram semelhantes às do material seco (1,3%). Mais uma vez pode-se esperar que ε_t apresentasse um ponto de virada em 27,6%, conforme percebido para ε_0. No entanto, como citado anteriormente, o processo de compactação induz um aumento no nível de saturação. Neste caso, calcula-se que o nível de saturação tenha aumentado por compactação de 73,0% para 100,0%, passando de um estado de saturação funicular para um estado capilar. Já no estado (3), o incremento do *MC* induziu o aumento de ε_0 e ε_t. Nessa condição, o material está saturado e suas propriedades passam a ser definidas pelo comportamento reológico da mistura e não mais pelas características das partículas. Observe, inclusive, que nessa condição a presença do líquido impede a compactação do leito de modo que ε_0 e ε_t tendem a ficar iguais. Assim, a maior quantidade de líquido com aumento de *MC* pode ter causado um efeito de diluição da mistura, reduzindo a sua densidade e, consequentemente, aumentando a porosidade. A porosidade *bulk* é inversamente relacionada com a densidade *bulk* (OSMAN, 2013). Portanto, como esperado, os efeitos observados para as porosidades *bulk* aerada e compactada foram

respectivamente inversamente observados para as densidades *bulk* aerada e compactada (Figura B.2 (a) do Apêndice B).

A influência do *MC* na porosidade *bulk* adicional (ε_{add}) dos cascalhos de perfuração é mostrada na Figura B.2 (b) do Apêndice B. Este parâmetro reflete a quantidade adicional de ar retido no leito compactado (TRAINA *et al.*, 2013). O incremento de *MC* resultou no aumento de ε_{add} até o final do sub-estado (2a). Conforme discutido anteriormente, neste sub-estado, o incremento de *MC* pode induzir a formação de estruturas mais aeradas de leitos não compactados. Assim, um maior volume de ar pode ficar retido no processo de empacotamento, o qual é posteriormente liberado no processo de compactação, aumentando ε_{add}. No sub-estado (2b), acredita-se que as partículas podem ter se movido mais facilmente e formado estruturas de leitos não compactados mais densos e semelhantes aos compactados, reduzindo ε_{add}. Finalmente, no estado (3) os espaços vazios estavam completamente saturados, criando uma mistura líquido-sólido de tal forma que pequenos volumes de ar ficavam retidos na mistura, provavelmente na forma de bolhas, reduzindo a porosidade *bulk* adicional para valores próximos à zero.

A porosidade *bulk* efetiva (ε_{eff}) foi similarmente afetada pelo *MC*, como mostrado na Figura 4.10. Este parâmetro representa a fração do volume interparticular preenchido com ar em comparação com o volume total do leito. À medida que o *MC* aumentou, a ε_{eff} permaneceu quase constante no estado (1), o que pode ser esperado devido às baixas forças interparticulares mencionadas anteriormente para este estado. Este resultado também sugere que o aumento de ε_0 com a umidade (Figura 4.9) neste estado é provavelmente devido ao incremento dos volumes de vazios preenchidos com líquido. Já no sub-estado (2a), o aumento de *MC* pareceu ser suficiente para intensificar as forças de coesão e promover a formação de leitos mais aerados com ar. No sub-estado (2b), o aumento de *MC* promoveu uma redução da ε_{eff}, o que pode ser creditado à redução das forças citadas, permitindo que as partículas se orientassem em configurações interparticulares mais densas. A ε_{eff} continuou diminuindo com o aumento da umidade no estado (3) até valores próximos à zero. Este resultado sugere que, como esperado, à medida que o material ficava saturado a quantidade de ar contida no leito era gradualmente reduzida.

Figura 4.10 – Efeito do conteúdo de umidade na porosidade *bulk* efetiva (ε_{eff}) de cascalhos.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.3.2.3 Indicadores de escoabilidade

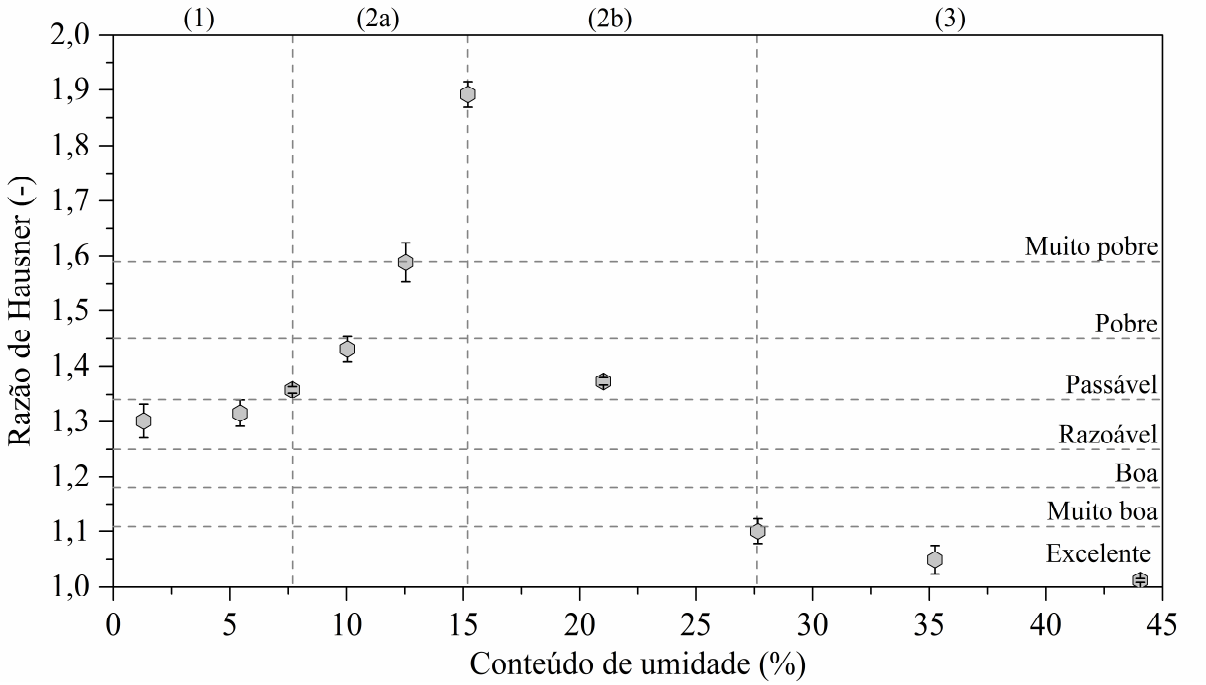
A correlação entre a razão de Hausner e o ângulo de repouso para todos os conteúdos de umidade analisados é apresentada na Figura B.4 do Apêndice B, juntamente com as classificações de escoabilidade da Tabela 2.1 (GAISFORD; SAUNDERS, 2012). Como observado por diversos autores para diferentes materiais secos (GELDART *et al.*, 2006; SANTOMASO; LAZZARO; CANU, 2003; XU *et al.*, 2018), foi percebida uma fraca tendência logarítmica. Assim, a Equação (4.10) (XU *et al.*, 2018) foi ajustada aos dados com R^2 de 0,996, o que indica um bom ajuste. Observa-se que ambos os indicadores forneceram valores de escoabilidade apontando na mesma direção. Isso significa que uma classificação de escoabilidade determinada a partir do *HR* correspondeu àquela determinada pelo *AoR*, o que evidencia a coerência entre os dados.

$$AoR(°) = 47,4ln(HR) + 25,9 \tag{4.10}$$

A Figura 4.11 mostra a razão de Hausner de cascalhos de perfuração com diferentes *MC*s, juntamente com as classificações de escoabilidade da Tabela 2.1 e limites de estados da Figura 4.8. As mesmas tendências também foram similarmente observadas para *AoR*. O incremento da

umidade, desde o estado seco (1), até o final do sub-estado agregado (2a), resultou na redução da escoabilidade do material de “razoável” para “muito pobre”. Este fenômeno também foi observado de forma semelhante por distintos autores (CROUTER; BRIENS, 2014; KALMAN, 2021; LU *et al.*, 2018), analisando diferentes materiais, e geralmente é atribuído ao aumento das forças de coesão. O incremento dessas forças pode gerar uma redução da mobilidade entre partícula-partícula e partícula-parede, resultando em uma menor escoabilidade. Nos estados desagregado (2b) e lama (4) a escoabilidade gradualmente aumentou de “muito pobre” para “excelente” com o incremento da umidade. Acredita-se que esse fenômeno se deve à lubrificação das superfícies das partículas e à redução do efeito relativo das forças de coesão, o que acabou aumentando a escoabilidade.

Figura 4.11 – Efeito do conteúdo de umidade na razão de Hausner (*HR*) de cascalhos.



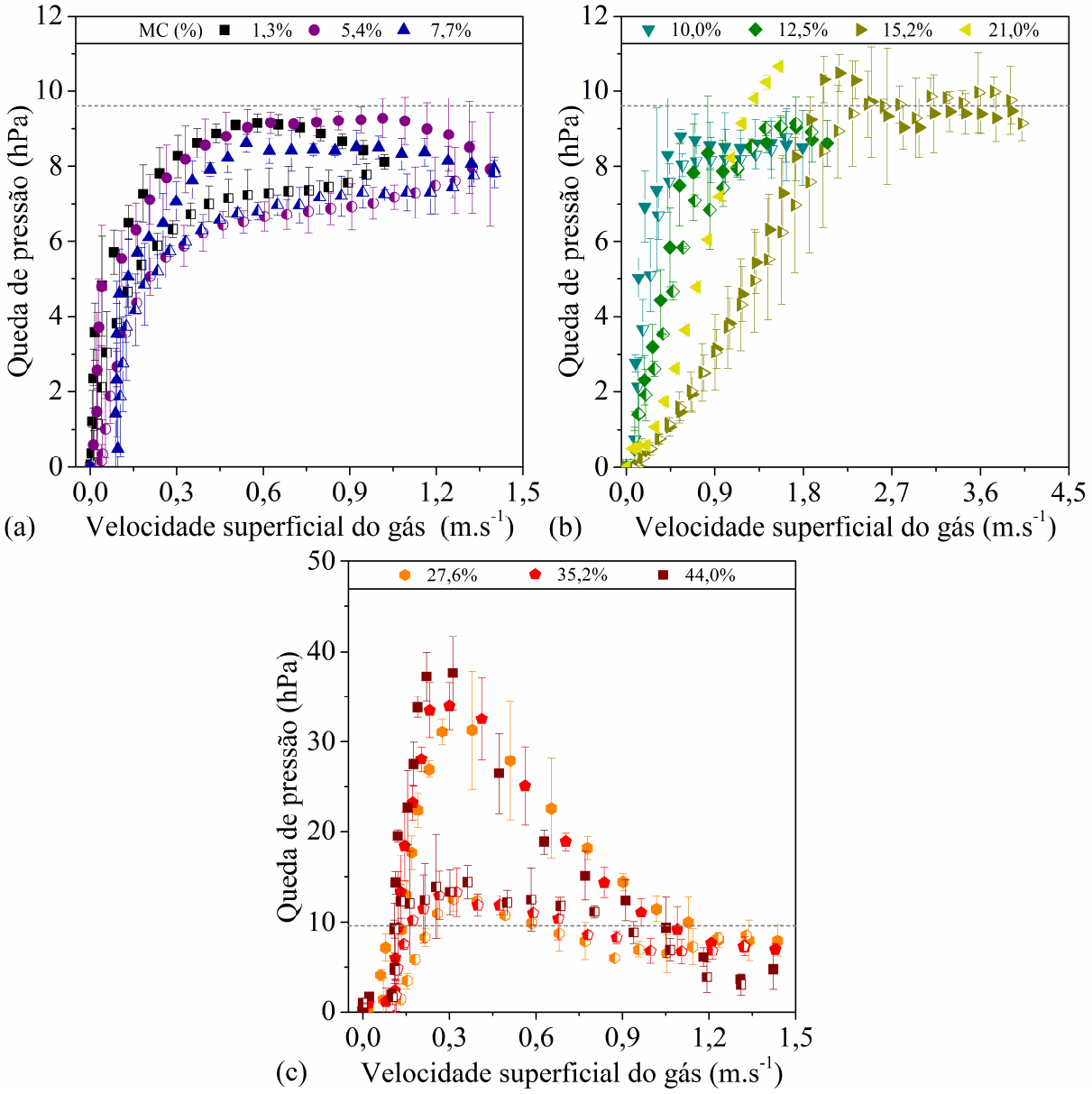
Fonte: Autoria própria (2023).

4.3.2.4 Comportamento de fluidização

A influência da umidade no comportamento de fluidização dos cascalhos de perfuração é mostrada na Figura 4.12. As curvas foram separadas seguindo os estados ilustrados na Figura 4.8: estado seco (Figura 4.12 (a)), estado agregado/desagregado (Figura 4.12 (b)) e estado de lama (Figura 4.12 (c)). Os pontos preenchidos representam a fluidização do material, enquanto os pontos meio preenchidos representam a desfluidização. Para exemplificar os

comportamentos gerais observados em cada estado, a influência da velocidade superficial do gás no aspecto visual de fluidização de cascalhos com *MC*s de 1,3% (seco), 12,5% (agregado/desagregado) e 35,2% (lama) é exibida na Figura 4.13.

Figura 4.12 – Curvas de fluidização dos cascalhos de perfuração agrupados por estado: seco (a), agregado/desagregado (b) e lama (c).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.13 – Exemplos de desaeração (esquerda) e fluidização (direita) dos cascalhos nos estados: seco (1,3%) (a e b), agregado/desagregado (12,5%) (c e d) e pasta (35,2%) (e e f).



Fonte: Autoria própria (2023).

Para os cascalhos no estado seco é possível observar um comportamento semelhante ao dos materiais do grupo B da classificação de Geldart (GELDART, 1973), onde as partículas tendem a não sofrer fluidização suave, havendo a formação de pequenas e grandes bolhas. Constatou-se também a presença de pequenos canais preferenciais (Figura 4.13 (b) (0-0,03 $m.s^{-1}$)), os quais destacam a natureza coesiva do material mesmo em baixos *MC*s. As curvas de fluidização mostram que à medida que a velocidade superficial do gás se aproximou de U_{mf}, ocorreu uma redução gradual da queda de pressão com o aumento da velocidade do gás. Isso pode ser devido à grande faixa de tamanho de partículas demonstrada pelo material, tendo finos menores que 19 μm até partículas maiores que 3350 μm. De acordo com Woodcock (1987), partículas pequenas tendem a fluidizar em velocidades mais baixas do que as maiores devido à maior área superficial das partículas por unidade de volume do leito. Richardson e Coulson

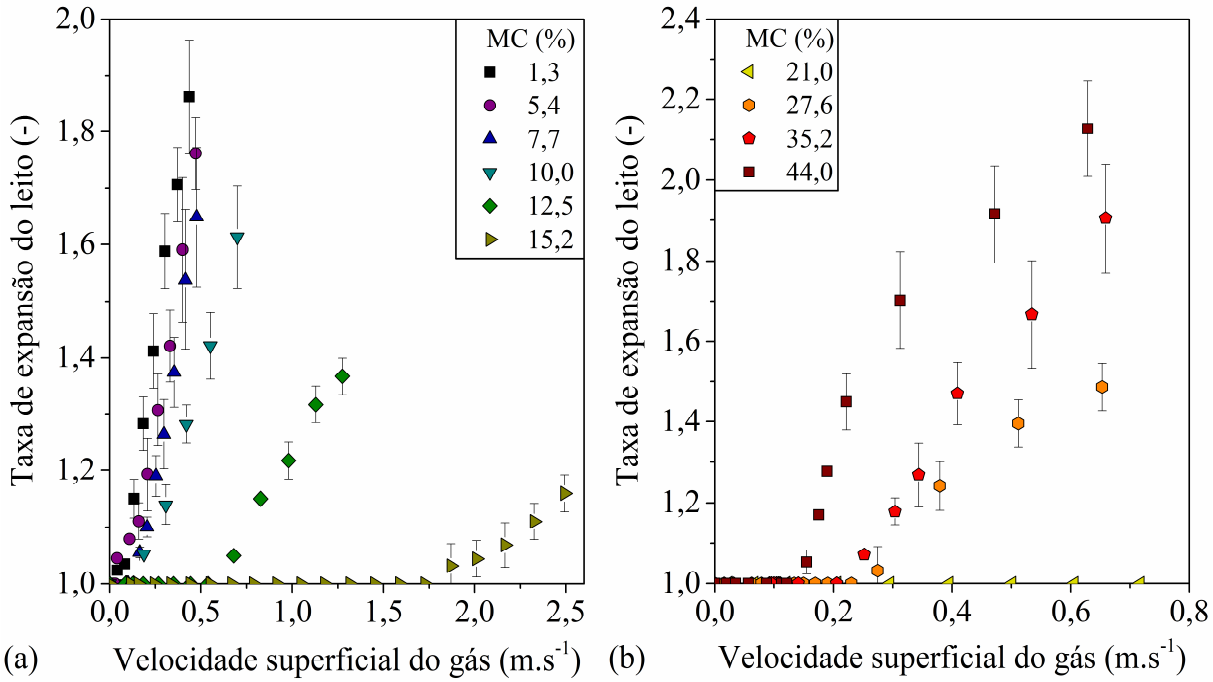
(2020) também destacam que, se finos estiverem presentes no leito, a fluidização pode ocorrer em uma velocidade superficial de gás menor. Este fenômeno pode ser evidenciado na Figura 4.13 (b), as partículas menores no topo do leito começaram a fluidizar antes das maiores no fundo, reduzindo gradativamente a queda de pressão até a condição de fluidização total. A linha tracejada em cinza na Figura 4.12 (a) representa a queda de pressão média calculada pela Equação (2.9) nas condições mínimas de fluidização (LEVENSPIEL, 2014). Uma boa concordância entre as quedas de pressão previstas e observadas pôde ser constatada. Por outro lado, a curva de desfluidização mostra que ocorreu uma redução gradual e de valores muito mais baixos de quedas de pressão com a redução da velocidade do gás, formando uma grande histerese. Este fenômeno é entendido como sendo devido à elutriação de finos, os quais estavam em maior quantidade no estado seco (Tabela 4.1 e Figura 4.7) (COULSON; RICHARDSON, 2002). Acredita-se que a remoção das pequenas partículas acabou reduzindo o peso do leito e, consequentemente, a queda de pressão na condição de fluidização plena.

No estado agregado/desagregado, percebe-se que o comportamento de fluidização das partículas se assemelhou ao dos materiais do grupo C da classificação de Geldart (GELDART, 1973). Grandes dificuldades para fluidização de forma suave foram observadas, havendo a formação de canais preferenciais e um movimento pistonado do leito. Em geral, a fluidização ocorreu de forma abrupta, o que pode ser constatado como o aparecimento de sobrepressão logo antes da condição da fluidização plena e o jorro repentino de partículas na Figura 4.13 (d) a 0,68 m/s. A natureza instável deste tipo de fluidização também se refletiu no aumento dos intervalos de confiança nas curvas de fluidização. Apesar disto, foi encontrada uma boa concordância com a queda de pressão esperada (linha cinza tracejada). Destaca-se também a redução da histerese anteriormente observada, que pode ser creditado à redução da quantidade de finos devido à agregação de partículas, como observado no estado (2) da Figura 4.7. O aumento das forças de coesão induzidas pela umidade na fluidização trifásica de diferentes materiais não porosos foi estudado por diversos autores (JAIN; SHI; MCCARTHY, 2004; WANG *et al.*, 2020; WRIGHT, P.C.; RAPER, 1998; YEHUDA; KALMAN, 2020; ZHOU *et al.*, 2013) e geralmente é atribuído ao fortalecimento das forças de ponte líquida. Neste trabalho, as mudanças observadas nos comportamentos de fluidização estão de acordo com o incremento dessas forças, como teorizado anteriormente. Consequentemente, uma rede interparticular mais estável pode ter se formado, dificultando a expansão do leito compactado com o aumento da velocidade superficial do gás. Como resultado, grande parte do gás pode ter passado através do leito por canais preferenciais ou o gás não passava adequadamente pelo leito, suspendendo ele como um plugue. Esta é uma condição instável porque os canais, que oferecem uma resistência

relativamente baixa ao escoamento do gás, tendem a se abrir à medida que a vazão de gás aumenta, enquanto regiões do leito podem permanecer não fluidizadas (COULSON; RICHARDSON, 2002).

Os resultados da razão de expansão do leito mostrados na Figura 4.14 (a) corroboram essas hipóteses. É possível observar que o aumento do *MC* reduziu continuamente a taxa de expansão do leito. A velocidade na qual o leito iniciava sua expansão aumentou com o *MC*, o que indica que uma maior força motriz era necessária para induzir o movimento das partículas e a expansão do leito (ZHOU *et al.*, 2013). Este fenômeno teve um ponto crítico no *MC* de 21,0%, onde as forças interparticulares eram fortes o suficiente para manter o leito fixo unido e mesmo em altas velocidades superficiais do gás a fluidização não ocorria. Conforme mostrado na Figura 4.12 (b), a queda de pressão aumentou continuamente até o ponto em que o leito empacotado subiu como um plugue e a queda de pressão foi ligeiramente reduzida, provavelmente devido à passagem de gás através da região próxima à parede.

Figura 4.14 – Efeito da umidade na taxa de expansão (BER) do leito de cascalhos.



Fonte: Autoria própria (2023).

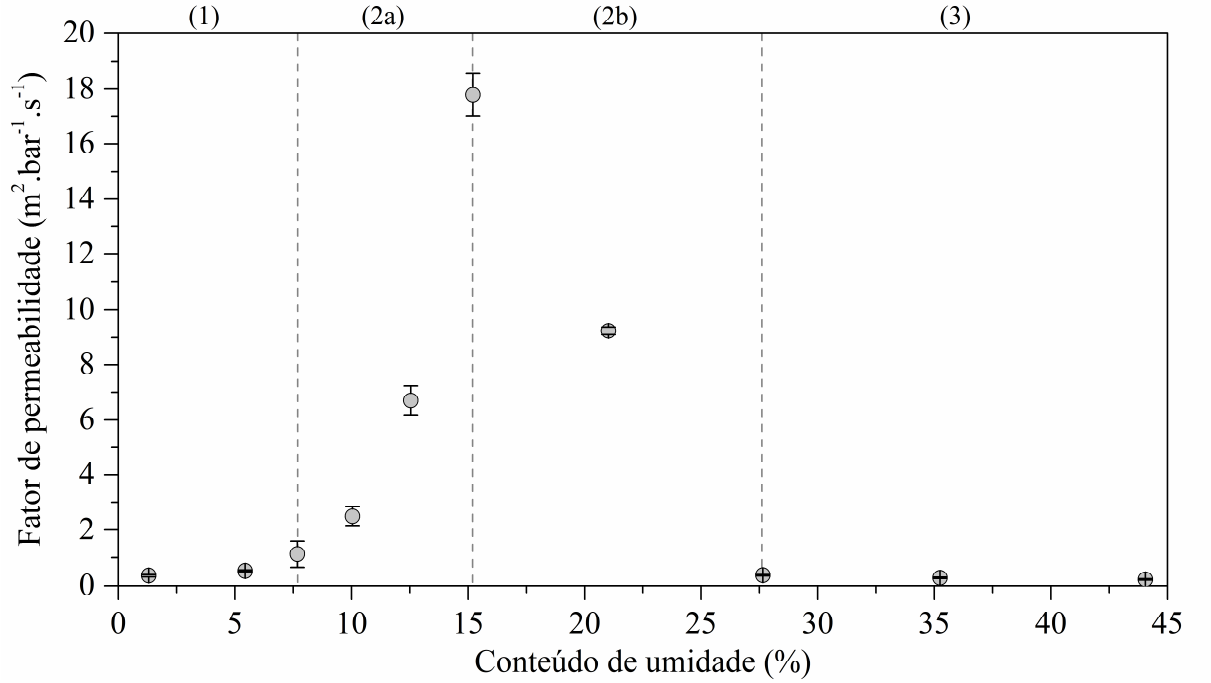
Aumentos adicionais do *MC* levaram o material para o estado de lama (3). A Figura 4.13 (f) mostra o desaparecimento dos canais preferenciais e a presença de bolhas novamente. Embora a classificação de Geldart não tenha sido projetada para materiais com *MC* tão alto, o comportamento geral observado pode ser considerado semelhante aos materiais do grupo B

(GELDART, 1973). No estado de lama, acredita-se que a quantidade de líquido era suficiente para saturar o material, de modo que ele se comportava como uma mistura de líquido com partículas. Como resultado, o ar passava pelo leito de forma mais fácil em relação ao estado anterior na forma de bolhas. Ou seja, o leito apresentava uma maior mobilidade em relação ao estado (2) devido ao caráter pastoso do material. A Figura 4.14 (b) corrobora esta análise, à medida que o *MC* aumentava, maiores expansões do leito eram observadas a partir de velocidades mais baixas. As curvas de fluidização (Figura 4.12 (c)) mostram que a queda de pressão inicialmente aumentava abruptamente com a velocidade, gerando altas quedas de pressão antes que ocorresse a fluidização. Comportamento semelhante a este foi observado por Malagalage (2018) para altas concentrações de fluido adicionado. Em certa extensão, este fenômeno pode ser atribuído às baixas porosidades efetivas observadas neste estado (Figura 4.10). À medida que o líquido gradualmente saturava o material, os caminhos interparticulares preenchidos com ar através dos quais o gás podia percolar mais facilmente eram reduzidos (WRIGHT, PHILLIP C.; RAPER, 1998). Assim, antes do início da fluidização o leito permanecia estático, com quase nenhuma passagem visual de ar através dele (Figura 4.13 (f)), o que gerava altas quedas de pressão. À medida que a velocidade do gás se aproximava da velocidade mínima de fluidização, as forças de arrasto que atuavam sobre o leito começavam a neutralizar sua força peso, iniciando o processo de fluidização. À medida que a fluidização ocorria, o leito ficava mais aerado por borbulhamento e, consequentemente, a queda de pressão diminuía fortemente e se estabilizava em valores próximos aos previstos pela Equação (2.9) (linha cinza tracejada). No processo de desfluidização, o leito já estava em um estado mais aerado/expandido. Assim, baixas sobrepressões eram observadas com a redução da velocidade do gás. As grandes histereses e intervalos de confiança observados nesta figura também podem ser creditados ao espalhamento da mistura enlameada nas paredes do tubo, que fluía lentamente de volta para o leito. Assim, o peso efetivo do leito era alterado ao longo do processo de fluidização.

A Figura 4.15 mostra a influência do *MC* dos cascalhos de perfuração na permeabilidade do leito. O aumento do *MC* nos estados (1) e (2a) resultou no incremento da permeabilidade em até 15,2%. Este resultado é consistente com o aumento dos espaços vazios interparticulares observado na Figura 4.10. Ao aumentar o *MC* nos estados (2b) e (3), a permeabilidade diminuiu acentuadamente, o que vai de encontro ao aumento da porosidade *bulk* aerada com o *MC* no estado (3) da Figura 4.9. No entanto, como pode ser visto na Figura 4.10, nos estados (2b) e (3) a porosidade efetiva foi continuamente reduzida até valores próximos à zero. Assim, os

caminhos interparticulares cheios de ar foram reduzidos, o que pode ter dificultado a passagem do gás e refletido em valores de permeabilidade mais baixos.

Figura 4.15 – Efeito do conteúdo de umidade na permeabilidade (κ) de cascalhos.

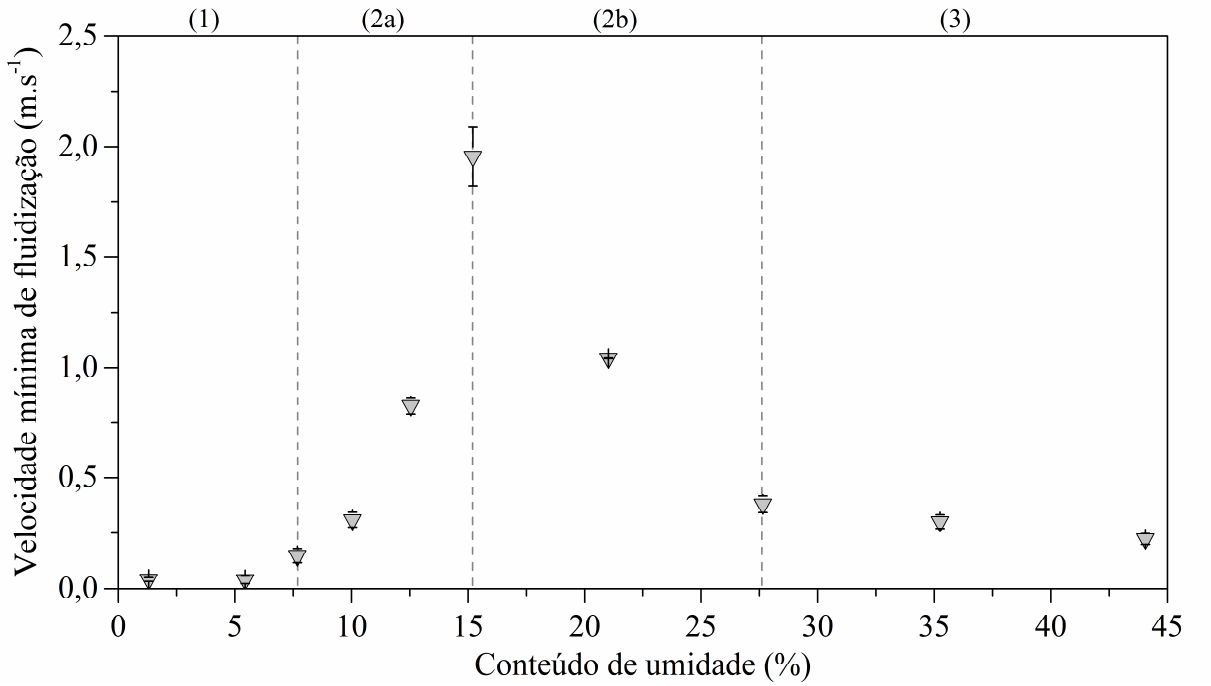


Fonte: Autoria própria (2023).

O efeito do *MC* dos cascalhos na velocidade mínima de fluidização é apresentado na Figura 4.16. Aumentando o *MC* nos estados (1) e (2a), a velocidade mínima de fluidização dos leitos atingiu valores maiores. Este fenômeno também foi observado por muitos autores analisando materiais não porosos (JAIN; SHI; MCCARTHY, 2004; SEVILLE; CLIFT, 1984; WRIGHT; RAPER, 1998; WRIGHT e RAPER, 1998; ZHOU *et al.*, 2013). Geralmente é teorizado por esses autores que as forças de pontes líquidas parecem proporcionar a formação de leitos mais aerados e estáveis, como corroborado pelos resultados da Figura 4.10 e Figura 4.13. Assim, velocidades de gás maiores são necessárias para dar a mesma velocidade intersticial e, portanto, o arrasto adequado para promover a fluidização. Por outro lado, aumentos adicionais do *MC* nos estados (2b) e (3) resultaram na redução da velocidade mínima de fluidização. De acordo com Wright *et al.* (1998), para uma mesma velocidade superficial do gás, à medida que o líquido preenche os vazios interparticulares, a porosidade efetiva diminui, conforme observado na Figura 4.10, e as forças de arrasto do fluido aumentam proporcionalmente. Ao mesmo tempo, nos estados (2b) e (3), acredita-se que os leitos sejam

menos estáveis, devido ao enfraquecimento das forças de ponte líquida. Assim, a corroboração entre esses fenômenos pode refletir em menores velocidades mínimas de fluidização.

Figura 4.16 – Efeito da umidade na velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) de cascalhos.



Fonte: Autoria própria (2023).

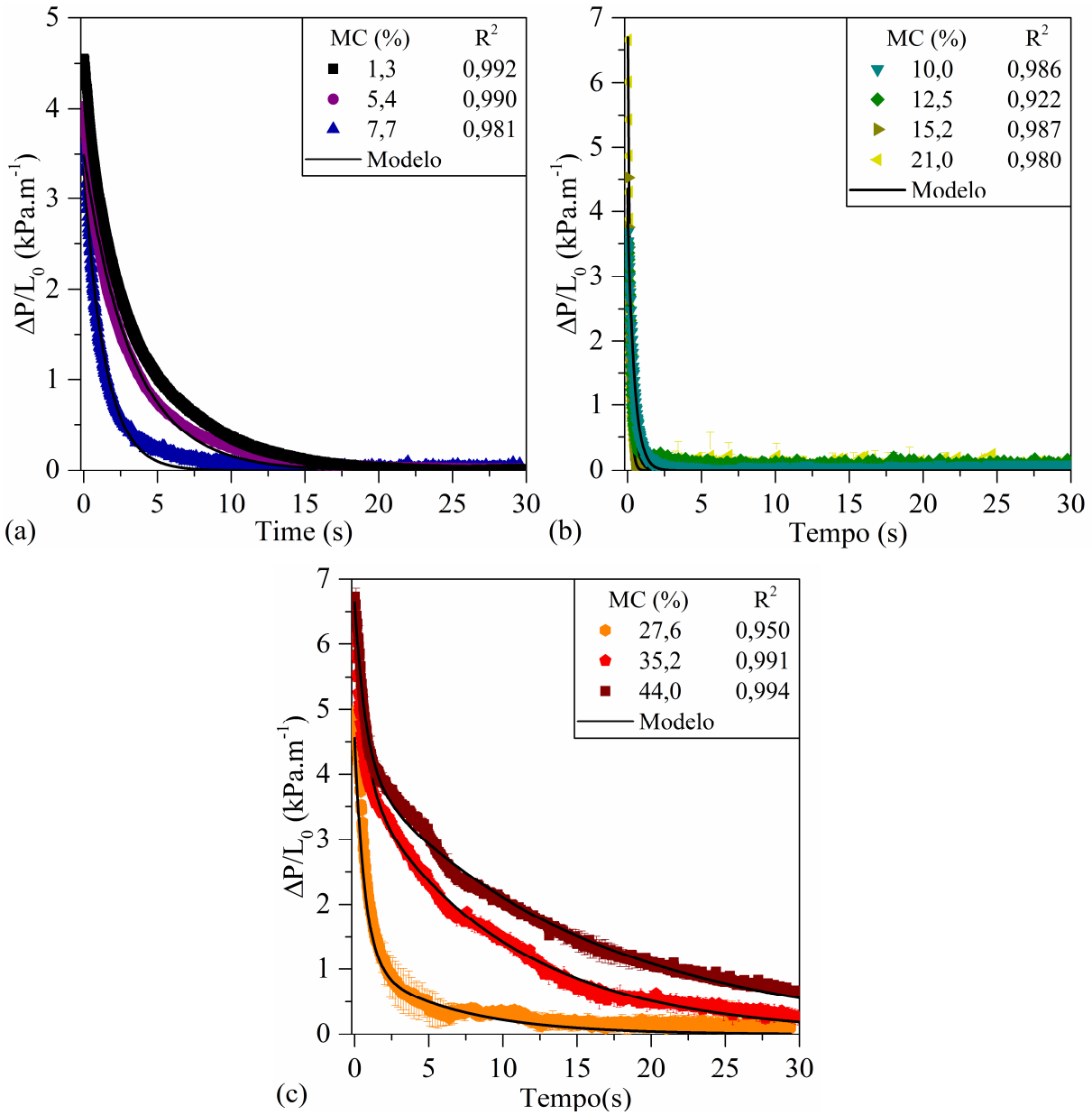
4.3.2.5 Capacidade de desaeração

A influência do *MC* nas curvas de desaeração dos cascalhos de perfuração é exibida na Figura 4.17. Os altos valores de R^2 evidenciam o bom ajuste das equações de desaeração (Equações (2.11) e (4.7)) aos dados. As constantes de tempo de desaeração obtidas pelo ajuste dessas equações são mostradas na Figura 4.18. A desaeração de partículas fluidizadas pode ser interpretada como o escape de ar através dos espaços vazios interparticulares (KENNEDY, 1998). À medida que o ar fornecido é desligado, os espaços vazios entre as partículas são reduzidos e as partículas se repousam umas sobre as outras. Neste ponto, o sólido *bulk* se comporta como um filtro e suas propriedades interparticulares irão determinar a facilidade com que o ar ira escapar, o que pode ocorrer, por exemplo, na forma de bolhas ou colapso de canais preferenciais (JONES, 1988; KENNEDY, 1998).

Para cascalhos de perfuração nos estados (1) e (2), o aumento do *MC* resultou em maiores reduções da queda de pressão ao longo do tempo (Figura 4.17 (a) e (b)) e, consequentemente, menores tempos de desaeração. Este comportamento é consistente com o

padrão de porosidade e permeabilidade efetiva observados nas Figuras 4.9 e 4.14 para esses estados. Como citado anteriormente, o incremento do *MC* parece reduzir a mobilidade das partículas, o que pode ter gerando leitos mais aerados (maiores porosidades), que oferecem menor resistência ao escape de ar (maiores permeabilidades).

Figura 4.17 – Curvas de desaeração dos cascalhos de perfuração agrupados por estado: seco (a), agregado/desagregado (b) e lama (c).

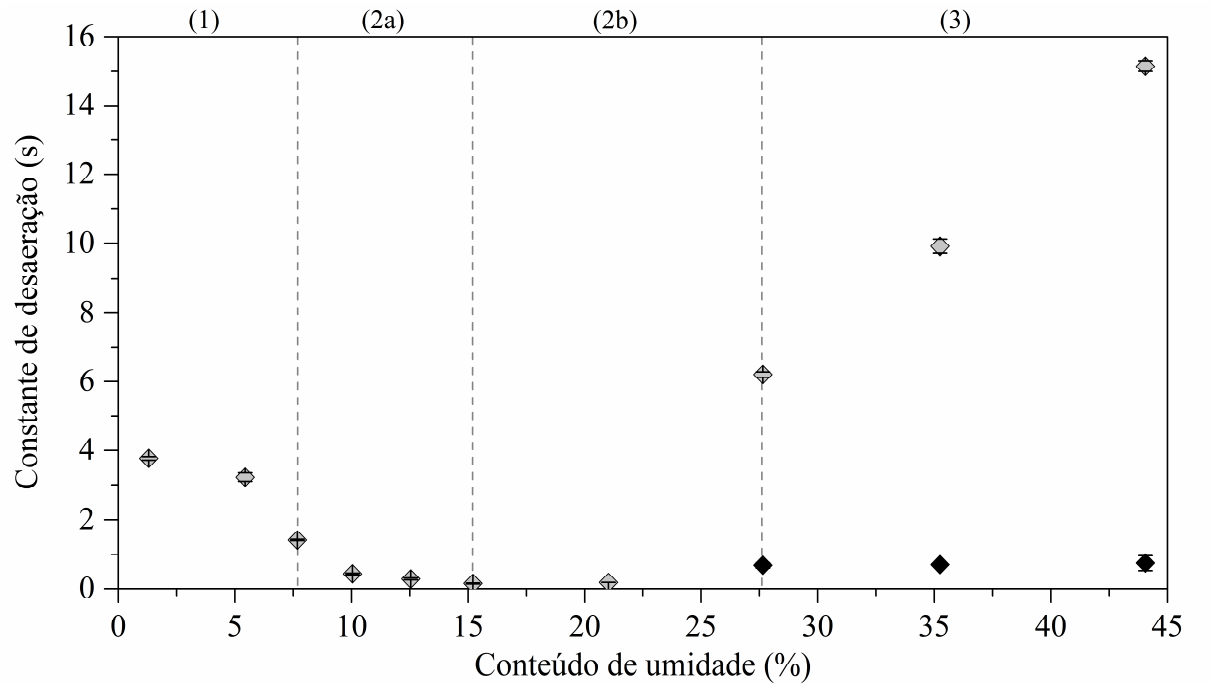


Fonte: Autoria própria (2023).

Este efeito pode ser exemplificado comparando os comportamentos de desaeração do material com *MC* de 1,3% (Figura 4.13 (a)) e 12,5% (Figura 4.13 (c)). Nos cascalhos mais secos

o ar escapa principalmente na forma de bolhas até 1,0 s, e então, a altura do leito reduz continuamente até o valor inicial antes da fluidização. Este é um comportamento típico de materiais do grupo B de Geldart (ABRAHAMSEN; GELDART, 1980; MACRÌ *et al.*, 2020). Por outro lado, para o material mais úmido, em apenas 0,25 s a altura do leito já é semelhante ao valor inicial. Observa-se que o ar escapa por canais preferenciais, jorrando partículas, o que também pode ter contribuído para a desaeração mais rápida observada. Essas características são geralmente evidenciadas em materiais do grupo C de Geldart. Para esses materiais, Geldart e colaboradores observaram que quando o suprimento de gás é desligado, as rachaduras/canais do leito se fecham rapidamente e um colapso adicional continua de forma mais lenta (ABRAHAMSEN; GELDART, 1980; GELDART; WONG, 1985). Nesse caso, a velocidade de colapso é controlada pela velocidade na qual o gás escapa pelos canais preferenciais. Ressalta-se que o leito não fluidizável de *MC* de 21,0%, como esperado, apresentou o menor tempo de desaeração.

Figura 4.18 – Efeito do conteúdo de umidade no tempo de desaeração (t_{da}) dos cascalhos.



Fonte: Autoria própria (2023).

O tempo necessário para o material desaerar também depende da altura pela qual a superfície do leito deve cair (BRUNI *et al.*, 2006). Para explicar a contribuição desta variável para a capacidade de aeração do material, Geldart e Wong (1985) propuseram um parâmetro chamado de tempo de colapso padronizado (*SCT*). O qual é calculado pela divisão entre a razão

de expansão do leito e sua taxa de colapso, determinada pela redução da altura do leito ao longo do tempo. No presente trabalho, a capacidade do leito de reter ar foi estimada pelo tempo de desaeração, e não pela taxa de colapso. Assim, parece mais razoável calcular o produto entre a razão de expansão do leito e o tempo de desaeração, como mostrado pela Equação (4.11). Este parâmetro foi denominado tempo de desaeração padronizado (*SDT*). Os resultados são exibidos na Figura B.5 do Apêndice B e corroboram a observação de que o incremento do *MC* nos estados (1) e (2) produz cascalhos com menor capacidade de retenção de ar.

$$SCT = BER \cdot t_{da} \tag{4.11}$$

Ao incrementar o *MC* no estado (3), foram observadas mudanças nas formas das curvas de desaeração (Figura 4.17 (c)). O decaimento exponencial homogêneo, uma vez observado para umidades mais baixa, agora dá origem a uma curva de dois períodos distintos. Um primeiro de decaimento exponencial rápido, seguido por um segundo, de decaimento exponencial mais lento e longo. A Figura 4.13 (e) exemplifica esse fenômeno. No momento em que o ar foi desligado, o leito estava aerado devido à fluidização, permitindo assim que o ar escapasse facilmente do leito na forma de grandes bolhas. Este fenômeno levava aproximadamente 1-2 s e gerava um decaimento rápido na queda de pressão. Ao mesmo tempo, a mistura começava a se assentar numa configuração mais densa (Figura 4.10). Nesta nova configuração, a resistência do leito para o escape ar era muito maior, como também pode ser similarmente evidenciado pela menor permeabilidade neste estado (Figura 4.15). Assim, o ar escapava do leito principalmente na forma de pequenas bolhas, evidenciadas na Figura 4.13 (e) de 2,5 s até 25 s. Como resultado, a queda de pressão decaia a uma taxa muito mais lenta.

Duas constantes de tempo de desaeração foram então obtidas neste caso (Figura 4.18). As de menor valor (pontos preenchidos em preto) correspondem ao primeiro período, enquanto as de maior valor (pontos preenchidos em cinza) ao segundo período. O aumento do *MC* não parece afetar a constante do primeiro período enquanto a do segundo aumenta quase que linearmente. Uma hipótese para esses resultados é que a fluidização aerava mais o leito, permitindo que o ar escapasse mais facilmente no primeiro período. À medida que o leito colapsava ele se tornava mais denso. Nesse estado (semelhante ao empacotamento *bulk* aerado), o aumento do *MC* promovia a redução da porosidade efetiva (Figura 4.10), o que pode ter contribuído para a retenção de ar e, consequentemente, maiores tempos de desaeração. O incremento de *SDT* com a umidade no estado (3) da Figura B.5 do Apêndice B sugere que a

maior *BER* observada para estes *MC*s também pode contribuir para este resultado. Os leitos fluidizados mais aerados podem ter retido mais ar no momento em que a mistura se assentava, levando mais tempo para o ar escapasse do leito.

4.3.2.6 Previsão do regime de transporte pneumático

Os dados mostrados ao longo deste trabalho foram usados para prever como o *MC* pode afetar o regime de transporte pneumático de cascalhos de perfuração, utilizando vários diagramas (CHAMBERS; KEYS; PAN, 1998; FARGETTE; JONES; NUSSBAUM, 1997; GELDART, 1973; JONES; WILLIAMS, 2008; MAINWARING; REED, 1987; MOLERUS, 1982; PAN, 1999; SANCHEZ *et al.*, 2003). O objetivo principal foi observar se os diagramas poderiam levar a uma conclusão comum sobre a influência do *M*C no regime de transporte dos cascalhos de perfuração. Os resultados são mostrados na Figura 4.19. Os pontos foram agrupados por cor de acordo com a classificação da Figura 4.8: azul para o estado seco (1), verde para o estado agregado/desagregado (2) e vermelho para o estado de lama (3). É importante destacar que, embora esses diagramas tenham sido propostos para prever o regime de transporte de materiais secos, a maioria deles utiliza propriedades *bulk* do material para realizar as predições. Estas propriedades mostraram-se fortemente afetadas pelas forças de coesão induzidas pela umidade, podendo assim influenciar as previsões de capacidade de transporte. No entanto, não se sabe a precisão dessas previsões em comparação com dados experimentais reais dos cascalhos de perfuração estudados. As previsões obtidas nesta seção foram confrontadas apenas com os regimes de transporte dos cascalhos de perfuração descritos na literatura.

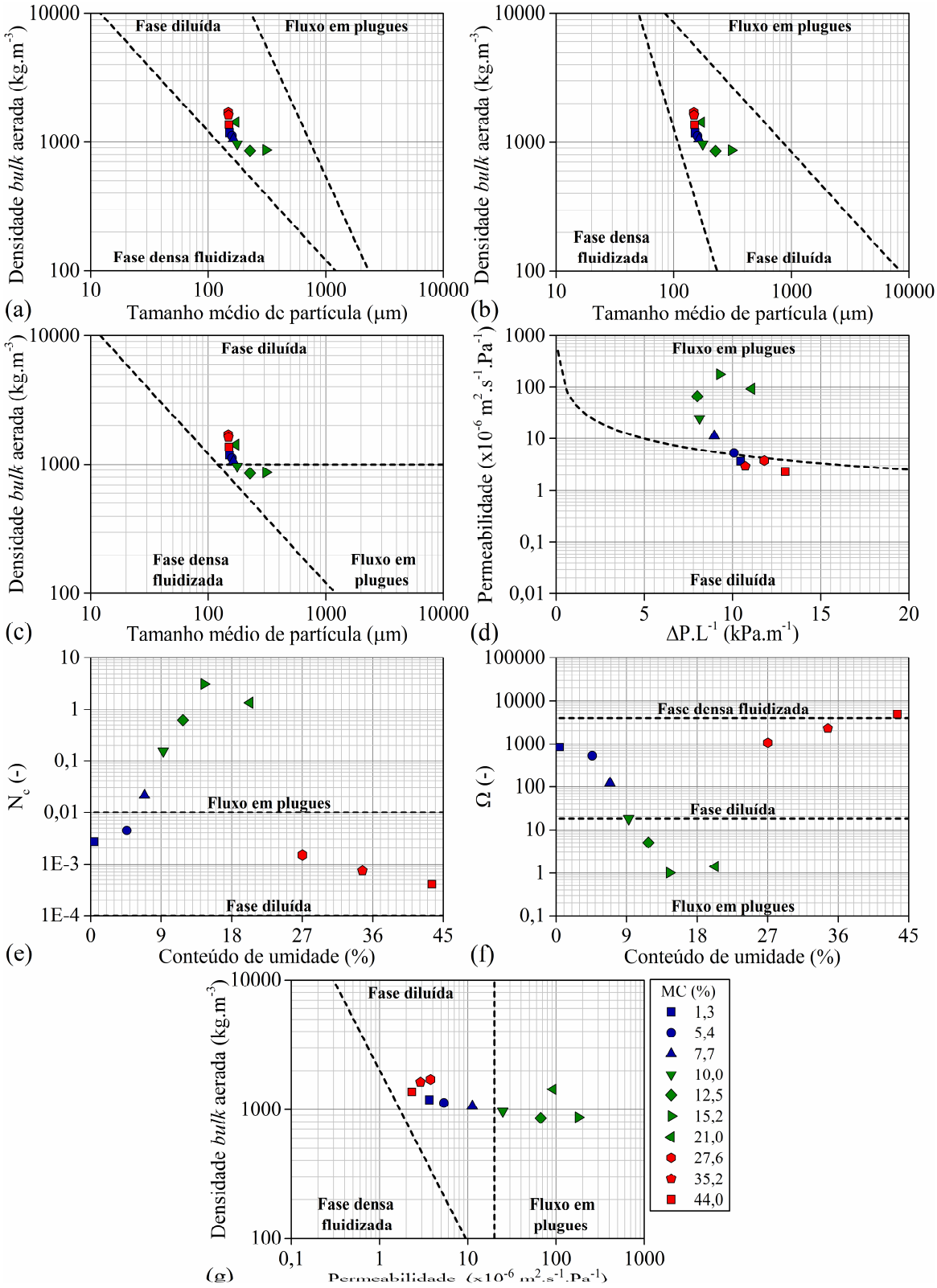
Em um primeiro momento, foram utilizados os diagramas de básicos de Geldart (1973) e Morelus (1982), conceitualmente criados para classificar o comportamento de fluidização de partículas secas e posteriormente modificados por Jones *et al.* (2008) para acessar os regimes de transporte. A Figura 4.19 (a) e (b) mostra que, independentemente do *MC*, os cascalhos de perfuração foram classificados como materiais do grupo B, capazes de serem transportados apenas em fase diluída. No entanto, como destacado por Jones *et al.* (2008) e Sanchez *et al.* (2003), esta é uma região pouco clara, porque os materiais dos três regimes clássicos de transporte estão todos dentro dos limites do grupo B desses diagramas. Como regra geral, esses autores afirmam que materiais com densidades aeradas maiores que 1000 $kg.m^{-3}$ são geralmente materiais granulares pesados e/ou triturados, que podem ser transportados apenas em fase diluída. Por outro lado, materiais com densidades *bulk* aeradas inferiores a 1.000 $kg.m^{-3}$ são

geralmente materiais granulares mais leves e de fluxo livre que podem ser transportados em fase diluída ou por fluxo em plugues. Nesse caso, a maioria dos cascalhos de perfuração do estado (2) se enquadram nesta segunda classificação. No entanto, como os pontos estão agrupados perto da região de 1000 $kg.m^{-3}$, nenhuma conclusão clara pode ser obtida. O diagrama de Pan (1999) (Figura 4.19 (c)) apresentou resultados semelhantes aos diagramas de Geldart (1973) e Morelus (1982). A única diferença é que uma divisão entre regimes de transporte de fase diluída e fase densa em plugues foi proposta por este autor em 1000 $kg.m^{-3}$.

Os diagramas baseados em propriedades ar-partículas de Mainwaring *et al.* (1987) (Figura 4.19 (d)), Chambers *et al*. (1998) (Figura 4.19 (e)), e Fargette *et al.* (1997) (com limites modificados por Jones *et al*. (2008)) (Figura 4.19 (f)) apresentaram resultados semelhantes, que estavam de acordo com diagramas básicos. No entanto, observou-se uma distinção mais clara entre estados classificados na Figura 4.8. A melhor distinção foi alcançada pelo diagrama de Jones *et al*. (2008), exibido na Figura 4.19 (g), o qual previu que os cascalhos de perfuração com *MC* no estado (2) (verde) podem ser transportados em fluxo por plugues. Mainwaring *et al.* (1987) e Jones *et al*. (2008), descrevem que os materiais transportados em plugues desaeram rapidamente e têm uma alta permeabilidade. Assim, as previsões observadas podem ser atribuídas à formação de estruturas interparticulares mais aeradas e estáveis com o incremento de *MC*, que oferecem menor resistência ao fluxo e capacidade de retenção de ar, conforme evidenciado no estado (2) das Figuras 4.15 e 4.17. Esta previsão também está de acordo com a tendência observada de formação de plugues nos experimentos de fluidização para cascalhos neste estado. Observe que para o *MC* de 21,0%, que forneceu um plugue ascendente não fluidizável (Figura 4.12 (b)), o material foi classificado como sendo apropriados para o transporte em plugues por todos os diagramas ar-partículas.

Os cascalhos de perfuração com *MC* no estado de lama (vermelho) foram previstos como sendo apropriados ao transporte apenas em fase diluída. Como os diagramas utilizados não foram concebidos para realizar previsões de materiais pastosos, não se sabe ao certo a confiabilidade dessa predição. Por fim, os cascalhos de perfuração no estado seco (azul), foram os mais indicados para serem transportados apenas na fase diluída. Alguns diagramas também previam a capacidade de transporte em fluxo por plugues, no entanto, está previsão não foi de comum acordo entre os diagramas.

Figura 4.19 – Efeito da umidade na predição do regime de transporte de cascalhos pelos diagramas: (a) Geldart (1973) modificado por Jones *et al.* (2008), (b) Molerus (1982) modificado por Jones *et al.* (2008), (c) Pan (1999), (d) Mainwaring *et al.* (1987), (e) Chambers *et al.* (1998), (f) Fargette *et al.* (1997) modificado por Jones *et al.* (2008) e (g) Jones *et al.* (2008).



Fonte: Autoria própria (2023).

Comparando as previsões da Figura 4.19 com operações reais de transporte de cascalhos de perfuração, algumas correlações interessantes foram encontradas. Os cascalhos de perfuração secos e úmidos são relatados como transportados pneumaticamente por várias patentes (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT *et al.*, 2004; MEYER, 1971). O *MC* dos cascalhos de perfuração depende do sistema de controle de sólidos da plataforma *offshore* e de qual estágio desse sistema os cascalhos de perfuração são provindos (seções 2.1 e 2.3.2). Por exemplo, cascalhos de perfuração provenientes de peneiras vibratórias são constituídos por aglomerados muito coesivos com faixa de *MC* de 10-20%. As patentes descrevem que os cascalhos de perfuração neste estado tendem a ser transportados em fase densa por fluxo em plugues. Os cascalhos criam um leito no fundo do tubo e, à medida que mais material é adicionado ao tubo, ocorre um volume crítico no qual os cascalhos criam espontaneamente uma camada móvel ou plugue de cascalhos. No entanto, o processo de manejo do material em um estado tão coesivo não simples. Para evitar o entupimento da tubulação é necessária uma pluralidade de dispositivos de injeção de gás (*boosters*), espaçados ao longo da linha de transporte, e injetando seletivamente gás sob pressão na linha. As condições operacionais relatadas foram: velocidades do ar inferiores a 10 m/s e altas pressões em torno de 4,0 bar. Essas observações estão de acordo com a previsão de que os cascalhos de perfuração na faixa de *MC* de 10,0-21,0% (estado agregado/desagregado (2)) podem ser transportados em fase densa por fluxo em plugues (Figura 4.19).

Por outro lado, cascalhos de perfuração que saem do fundo de secadores Vortex são descritos como sólidos de boa escoabilidade com 5% em peso de líquido na corrente de saída. Também concordando com as previsões realizadas pelos diagramas de regime de transporte, as patentes descrevem que os cascalhos com 5% em peso de líquido são transportados em fase diluída quando se usa um sistema de transporte pneumático de pressão positiva. Os cascalhos são transportados suspensos na corrente de ar a aproximadamente 30 m/s em baixas pressões, em torno de 1,5-2,0 bar. Malagalage (2018) também relatou a possibilidade de transportar cascalhos de perfuração secos e úmidos (areias) em fase diluída.

Os resultados mostrados indicam que, até certo ponto, os diagramas de regime de transporte analisados podem prever a capacidade de transporte de cascalhos de perfuração nos estados seco (1) e agregado/desagregado (2).

4.3.2.7 Comportamento geral de manejo

A Figura 4.20 foi criada para resumir o efeito geral do *MC* nas principais propriedades de manejo de materiais granulares estudadas: permeabilidade (κ), velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), tempo de desaeração (t_{da}), razão de Hausner (HR) e porosidade efetiva (ε_{eff}). Para melhor comparação, os dados foram normalizados para uma escala comum variando de zero a um usando a seguinte equação:

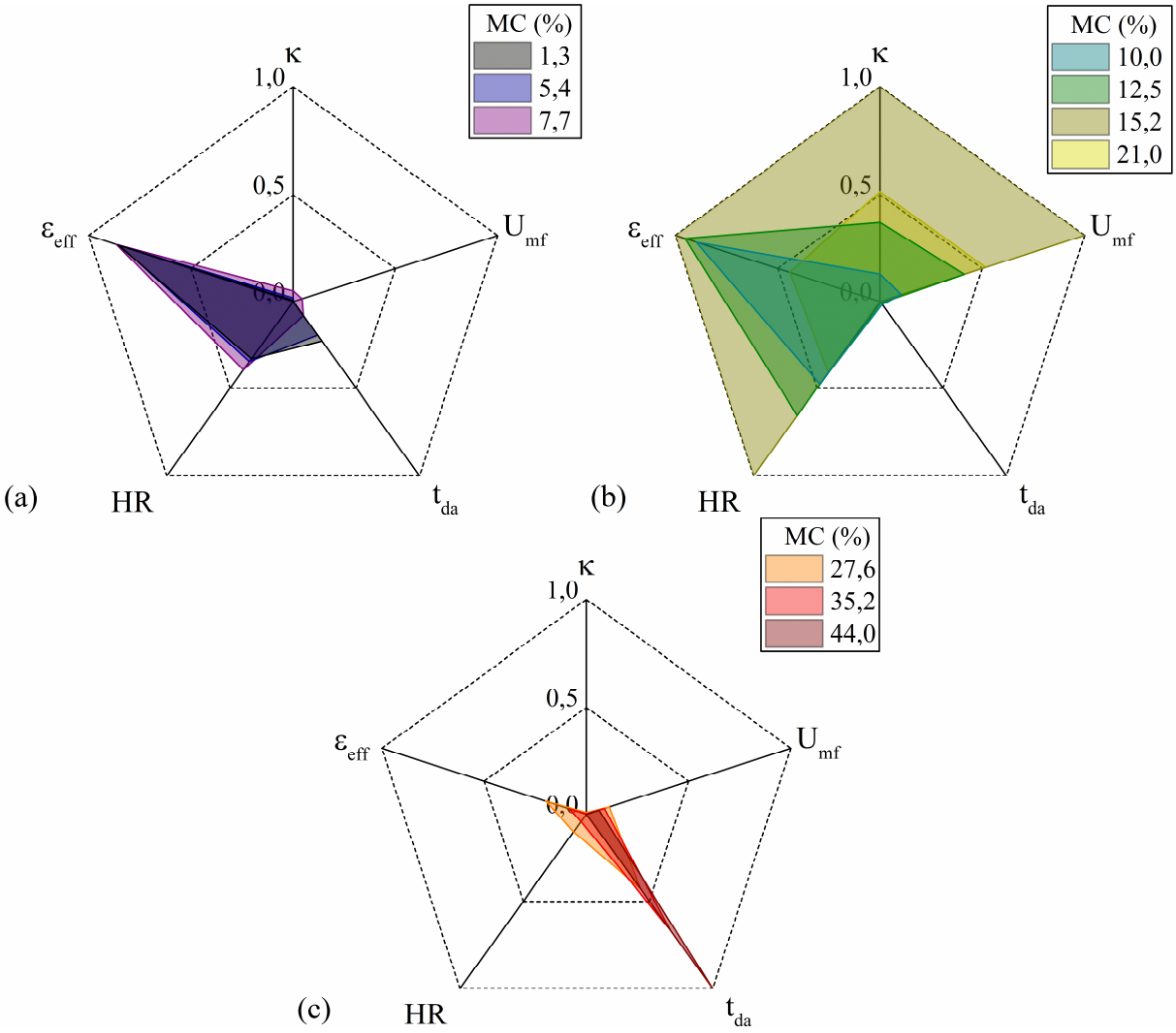
$$z_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{4.12}$$

em que: z_i é o valor normalizado, x_i é o valor não normalizado, x_{max} é o valor máximo não normalizado e x_{min} é o valor mínimo não normalizado. Os tempos de desaeração para cascalhos com *MC*s de 27,6%, 35,2% e 44,0% foram calculados pela soma de t_{da1} e t_{da2}.

É possível notar que o incremento de *MC* até 15,2% promoveu a formação de estruturas interparticulares mais aeradas, que apresentaram menor resistência ao escoamento de ar. No entanto, essas estruturas se mostraram mais estáveis, apresentando maior dificuldade para escoar, bem como para fluidizar e reter ar. Esses fenômenos foram atribuídos ao aumento das forças de coesão com o *MC*. O incremento contínuo do *MC* além de 15,2% promoveu uma mudança completa no comportamento do material. As estruturas interparticulares tornaram-se mais densas e mais resistentes ao escoamento de ar. O material pôde fluir mais facilmente, retendo mais ar e sendo relativamente mais fácil de fluidizar. Esses fenômenos foram atribuídos à redução das forças de coesão e atrito (ação de lubrificação).

Em uma visão geral, os cascalhos de perfuração no estado agregado/desagregado (Figura 4.20 (b)) apresentaram as piores propriedades. Embora os diagramas de previsão de regime de transporte indiquem a possibilidade de transportar os cascalhos nesse estado em fase densa por plugues, o manejo de cascalhos nessa faixa de *MC* não é facilmente realizado. Para transportar cascalhos neste estado, algumas patentes relatam que auxiliares de fluxo pneumáticos devem ser adicionados em silos, tanques de sopro e tubulações, caso contrário, entupimentos podem ocorrer facilmente (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT *et al.*, 2004; MEYER, 1971).

Figura 4.20 – Resumo dos efeitos da umidade nos os parâmetros físico-químicos de cascalhos de perfuração, agrupados por estados: seco (a), agregado/desagregado (b) e lama (c).



Fonte: Autoria própria (2023).

Embora ao material no estado de lama (Figura 4.20 (c)) tenha apresentado uma aparente melhoria das propriedades estudadas, o manejo de um material saturado em aplicações reais pode causar problemas inesperados. O material inicialmente parece escoar bem, mas logo após uma pequena quantidade de líquido ser drenada, um estado é alcançado (estado (2)) onde a escoabilidade se torna ruim novamente (SCHULZE, 2008). Para o transporte pneumático, não se sabe ao certo qual regime de transporte poderia ser utilizado para um material com conteúdo de umidade tão elevado. Outro problema é que, devido à alta densidade das partículas dos cascalhos de perfuração, o fenômeno de sedimentação pode ocorrer. Assim, o material deve ser homogeneizado durante todo o processo de manejo (PULLMAN, 2002). Nesta situação, o líquido da superfície pode fluir facilmente, enquanto o sólido depositado permanece parado.

Assim, o manejo dos cascalhos no estado seco (Figura 4.20 (a)) parece ser o mais indicado. Nesse estado, o material apresenta propriedades estáveis e previsão de regime de transporte em fase diluída. Além disso, os cascalhos secos apresentaram escoabilidade relativamente boa, facilidade de fluidização e boa capacidade de retenção de ar. O transporte em fase diluída de um material abrasivo como cascalhos de perfuração não é ideal devido ao desgaste de curvas e tubulações. Por outro lado, as propriedades do cascalho nesse estado não são adequadas para que o material possa ser transportado de forma natural em fase densa em plugues ou dunas, nesse caso, sendo necessária a utilização de um sistema inovador, como revisado na seção 2.7.6. Além dos fatores citados acima, o interesse especial em transportar os cascalhos secos em fase densa se deve a dois fatores principais. Conforme destacado por Burnett *et al.* (2006) e Crabb *et al*. (2007), o manejo de cascalhos secos reduz os volumes de resíduos e o conteúdo líquido, levando a uma redução geral no volume de armazenamento necessário, e nos custos de transporte e descarte. Outro fator é que o transporte pneumático em fase densa desse material é desejável frente à fase diluída, uma vez que, em fase densa o desgaste das tubulações é menor, a capacidade de transporte é maior e o consumo de ar é menor, reduzindo o custo geral da operação. Contudo, não foram encontrados trabalhos na literatura que realizassem o transporte em fase densa de cascalhos seco, somente em fase diluída. Assim, no próximo capítulo será apresentado um sistema de transporte inovador que foi projetado para estudar o transporte pneumático de cascalhos secos principalmente em fase densa.

Vale destacar que este trabalho tem o objetivo principal de estudar os fenômenos e condições operacionais ideais para o transporte de cascalhos, utilizando condições fixas e de forma sistemática. Porém, em operações reais de transporte pneumático, a umidade dos cascalhos pode mudar frequentemente durante o processo de perfuração. Assim, qualquer mudança no *MC* de cascalhos de perfuração deve ser detectada pelo uso, por exemplo, de um sensor de umidade, e um sistema de transporte pneumático adaptativo é desejável para lidar com essas mudanças (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007; BURNETT *et al.*, 2006; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2011).

4.3.3 Correlações das propriedades de manejo de cascalhos

Conforme observado neste trabalho, as propriedades de manejo estudadas são afetadas pelo *MC* e podem estar correlacionadas entre si. Assim, uma análise de regressão múltipla foi realizada para fornecer modelos de correlação entre os parâmetros: razão de Hausner (*HR*), porosidade efetiva (ε_{eff}), permeabilidade (κ), velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) e tempo

de desaeração (t_{da}). Esses três últimos parâmetros foram convertidos em parâmetros adimensionais de acordo com as seguintes equações descritas por Sanchez *et al.* (2003):

$$Fr = \frac{U_{mf}}{\sqrt{D_{Sauter}\, g}} \tag{4.13}$$

$$Grt = \frac{\mu_g t_{da}}{D_{Sauter}\left(\frac{\rho_s + \rho_g}{2}\right)} \tag{4.14}$$

$$P^* = \frac{\kappa \rho_s \sqrt{g D_{Sauter}}}{D_{Sauter}} \tag{4.15}$$

em que: Fr é o número de Froude, U_{mf} é a velocidade mínima de fluidização, D_{Satuer} é o diâmetro médio de Sauter, g é a aceleração gravitacional, Grt é um número adimensional correlacionado ao tempo de residência do gás no leito, μ_g viscosidade do gás, ρ_r é a densidade da partícula, ρ_g é a densidade do gás, P^* é um número adimensional e κ é o fator de permeabilidade.

Análises bidimensionais e tridimensionais foram realizadas para toda a faixa de *MC* analisada, ajustando-se às respectivas Equações (4.16) e (4.17) aos dados. Essas equações são semelhantes àquelas relatadas por Sanchez *et al.* (2003). Os parâmetros das regressões múltiplas com nível de significância (*p-value*) inferior a 0,05 são apresentadas na Tabela 4.2. Os resultados mostram que valores elevados de R^2 e valores baixos de *RMSE* (raiz do erro quadrático médio) foram obtidos para a maioria das correlações analisadas. Portanto, pode-se concluir que alguns números adimensionais podem ser previstos em função de outros. Isso significa que, ao determinar um desses parâmetros para um determinado *MC* de cascalhos de perfuração, os demais podem ser estimados.

$$Z_i = aX_i^{\,b} \tag{4.16}$$

$$Z_i = aX_i^{\,b} Y_i^{\,c} \tag{4.17}$$

em que: Z_i é a variável predita, X_i e Y_i são variáveis de estimativa e a, b e c são parâmetros de correlação.

Tabela 4.2 – Parâmetros obtidos da análise de regressão múltipla.

Equação	a	b	c	R^2	RMSE	p-valor
Análise tridimensional						
P*(Fr, HR)	$8{,}579\times10^{-1}$	$1{,}303\times10^{0}$	$-9{,}316\times10^{-2}$	0,974	4,526	$1{,}02\times10^{-8}$
P*(Fr, ε_{eff})	$1{,}434\times10^{0}$	$1{,}160\times10^{0}$	$1{,}196\times10^{-1}$	0,976	4,296	$8{,}30\times10^{-8}$
P*(Fr, Grt)	$1{,}261\times10^{-1}$	$6{,}267\times10^{-1}$	$-3{,}609\times10^{-1}$	0,991	2,622	$1{,}35\times10^{-9}$
P*(ε_{eff}, Grt)	$7{,}184\times10^{-4}$	$-4{,}381\times10^{-1}$	$-9{,}677\times10^{-1}$	0,997	1,572	$1{,}17\times10^{-4}$
P*(Grt, HR)	$1{,}591\times10^{-4}$	$-1{,}200\times10^{0}$	$-1{,}681\times10^{0}$	0,995	1,894	$2{,}70\times10^{-11}$
P*(ε_{eff}, HR)	$5{,}117\times10^{5}$	$1{,}926\times10^{1}$	$-6{,}590\times10^{-1}$	0,995	1,825	$2{,}22\times10^{-9}$
Grt(Fr, HR)	$3{,}646\times10^{-3}$	$-5{,}035\times10^{-1}$	$-1{,}181\times10^{1}$	0,943	0,000	$4{,}76\times10^{-7}$
Grt(ε_{eff}, HR)	$6{,}138\times10^{-4}$	$-2{,}244\times10^{-1}$	$-1{,}172\times10^{1}$	0,801	0,000	$5{,}79\times10^{-5}$
Grt(Fr, ε_{eff})	$2{,}692\times10^{-4}$	$-2{,}476\times10^{-1}$	$-4{,}248\times10^{-1}$	0,827	0,000	$2{,}04\times10^{-4}$
HR(Fr, ε_{eff})	$1{,}350\times10^{0}$	$7{,}960\times10^{-2}$	$1{,}178\times10^{-1}$	0,828	0,104	$2{,}49\times10^{-4}$
Análise bidimensional						
P*(Fr)	$9{,}131\times10^{-1}$	$1{,}270\times10^{0}$	-	0,974	4,536	$1{,}31\times10^{-7}$
Grt(ε_{eff})	$1{,}677\times10^{-4}$	$-4{,}481\times10^{-1}$	-	0,802	0,000	$4{,}47\times10^{-4}$
P*(ε_{eff})	$1{,}506\times10^{5}$	$1{,}739\times10^{1}$	-	0,994	1,867	$2{,}90\times10^{-9}$
P*(Grt)	$4{,}618\times10^{-3}$	$-8{,}293\times10^{-1}$	-	0,971	4,807	$2{,}05\times10^{-7}$
P*(HR)	$3{,}921\times10^{0}$	$4{,}851\times10^{0}$	-	0,800	14,581	$1{,}64\times10^{-3}$

Fonte: Autoria própria (2023).

Para as análises bi e tridimensionais, os melhores ajustes dos modelos foram obtidos ao se correlacionar os parâmetros *P**, *Grt* e ε_{eff}, o que destaca a forte correlação entre a porosidade efetiva e as características de permeação/retenção de ar do material. Em relação aos parâmetros obtidos, observa-se que para a predição de *P**, os parâmetros obtidos de correlação com *Fr* e ε_{eff} foram positivos, enquanto que a correlação com *HR* e *Grt* se deu com parâmetros negativos. Em todas as análises, os parâmetros relacionados a *Fr* para a predição de *P** foram os mais potentes. O número adimensional *P**, descrito por Sanchez *et al.* (2003), correlaciona a permeabilidade do leito com a densidade e diâmetro das partículas. Enquanto que *Fr* é o número de Froude, o qual representa a razão entre as forças inerciais e gravitacionais para se iniciar a fluidização do leito (KAY; NEDDERMAN, 1975). Assim, uma relação direta de *P** com *Fr* e ε_{eff} é esperada, visto que, em leitos mais porosos o fluido apresenta maior facilidade de permeação, contudo, o arrasto friccional nas partículas é menor, assim, maiores forças inerciais são necessárias para iniciar a fluidização (JAIN; SHI; MCCARTHY, 2004; SEVILLE; CLIFT, 1984; WRIGHT, P.C.; RAPER, 1998; WRIGHT, PHILLIP C.; RAPER, 1998; ZHOU *et al.*, 2013). Por outro lado, observou-se uma relação inversa de *P** com *Grt.* Ressalta-se que este último parâmetro, correlaciona as características do fluido, como viscosidade e densidade, e das

partículas, como diâmetro e densidade, com o tempo de desaeração do leito (SANCHEZ *et al.*, 2003). Assim, quanto menor a capacidade de retenção do ar no leito (menor *Grt*) tem-se uma menor resistência sendo oferecida a permeação (maior *P**) do fluido, o que poderia explicar a correlação observada entre esses parâmetros.

Em relação a predição de *Grt*, os parâmetros obtidos de correlação com *Fr*, ε_{eff} e *HR* foram todos negativos, sendo àqueles associados a *HR* os mais potentes. Tal correlação provavelmente se deve ao fato de que, quanto menor a porosidade do leito, maior será a dificuldade do fluido escapar através dos espaços interparticulares (maior *Grt*). Ao mesmo tempo, quanto maior for a mobilidade das partículas (menor *HR*), mais facilmente o leito irá se rearranjar em uma configuração mais densa na qual a retenção de ar será maior (maior *Grt*). Além disso, quanto menor forem as forças inerciais atuantes no leito após o interrompimento do fornecimento de ar, mais rapidamente o leito irá se assentar em uma configuração mais densa onde a retenção de ar será favorecida (maior *Grt*).

Por fim, os parâmetros obtidos de correlação de *HR* com *Fr* e ε_{eff} foram todos positivos, sendo àquele associado a ε_{eff} o mais potente. A correlação direta entre *HR* com *Fr* pode estar associada a necessidade de maiores forças inerciais para realizar a fluidização do leito formado por partículas que possuam pouca mobilidade (maior *HR*), as quais formam estruturas interparticulares mais estáveis. Já a relação direta entre *HR* e ε_{eff} é esperada, visto que partículas que apresentam maior dificuldade de deslizamento umas sobre as outras (maior *HR*) tendem a formar leitos empacotados mais aerados (maior ε_{eff}) (CROUTER; BRIENS, 2014).

4.3 Conclusão

Uma extensa análise da influência do conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração na dinâmica de agregação/desagregação de partículas, propriedades *bulk* de leitos fixos, escoabilidade, características de fluidização e comportamento de desaeração foi realizada. Esta análise permitiu estabelecer uma classificação das diferentes características apresentadas pelos cascalhos de acordo com a umidade. Além disso, também foi possível realizar previsões da influência da umidade no regime transporte de cascalhos de perfuração. Os parâmetros de manejo obtidos foram correlacionados por modelos de regressão múltipla para toda a faixa de umidade estudada. As seguintes conclusões podem ser feitas deste estudo:

1. Foram identificados quatro estados característicos, considerando os parâmetros de manejo e comportamento das partículas de cascalho, denominados: seco (1,3-7,7%), agregado (7,7-15,2%), desagregado (15,2-27,6%) e de lama (27,6-44,0%).

2. O incremento de umidade promoveu a agregação gradativa das partículas em aglomerados de maiores diâmetros do estado seco para o agregado, os quais foram desagregados em maiores umidades nos estados desagregado e de lama.

3. Estruturas interparticulares mais aeradas foram formadas pelo aumento da umidade no estado seco. Aumentos adicionais, no sub-estado agregado, promoveram a formação de estruturas mais aeradas com espaços vazios preenchidos por ar. No sub-estado desagregado, os vazios preenchidos por ar foram reduzidos, em detrimento do aumento dos espaços vazios preenchidos por líquido, tornando as estruturas mais densas. No estado de lama, os espaços cheios de líquido eram grandes o suficiente para saturar o material.

4. A escoabilidade dos cascalhos foi reduzida com o aumento da umidade de "passível" no estado seco, para "muito pobre" no final do sub-estado agregado. Ao aumentar novamente a umidade, observou-se uma melhoria gradual da escoabilidade nos estados desagregado e de lama até "excelente".

5. Foram identificados três comportamentos distintos de fluidização. No estado seco, observou-se um comportamento do grupo B de Geldart. A velocidade mínima de fluidização e a permeabilidade do leito aumentaram pouco com a umidade, enquanto a capacidade de expansão do leito foi reduzida. No estado agregado/desagregado, o comportamento de fluidização das partículas mudou para o grupo C de Geldart. Um incremento mais acentuado da velocidade mínima de fluidização e da permeabilidade foi notado com o aumento da umidade, até um valor máximo de 15,7%, após o qual passou a diminuir. Um comportamento do grupo B de Geldart das partículas foi observado novamente no estado de lama, com altas sobrepressões antes da fluidização plena. O aumento da umidade promoveu a formação de leitos menos permeáveis e mais expansíveis, fluidizando em velocidades mais baixas.

6. A capacidade de retenção de ar do material foi gradualmente reduzida com o aumento da umidade nos estados seco e agregado/desagregado até um mínimo, em uma condição não fluidizável. Notou-se que o ar escapava principalmente na forma de bolhas neste primeiro estado e por canais no segundo. No estado de lama, o material passou a ser capaz de reter mais ar com o aumento da umidade, apresentando dois mecanismos distintos de desaeração, um primeiro de escape rápido de ar por grandes bolhas, seguido por um segundo de escape mais lento por pequenas bolhas.

7. Os diagramas de previsão do regime de transporte analisados puderam prever bem os regimes de transporte pneumático de cascalhos de perfuração nos estados seco (1) e agregado/desagregado (2). Foi previsto que os cascalhos no estado seco seriam transportados apenas em fase diluída, enquanto o transporte em fase densa por plugues foi previsto para o

material no estado agregado/desagregado. Tais previsões foram confirmadas por comparação com a literatura.

8. Análises bi e tridimensionais dos parâmetros estudados mostraram que alguns parâmetros podem ser previstos em função de outros. Assim, determinando um parâmetro para um certo conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração, os demais poderiam ser estimados para essa mesma umidade.

9. Em geral, cascalhos de perfuração no estado seco apresentaram propriedades de manejo boas e mais estáveis em comparação com o material nos estados agregado/desagregado e de lama, sendo desejável para operações de manejo de cascalhos.

CAPÍTULO 5 – TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO

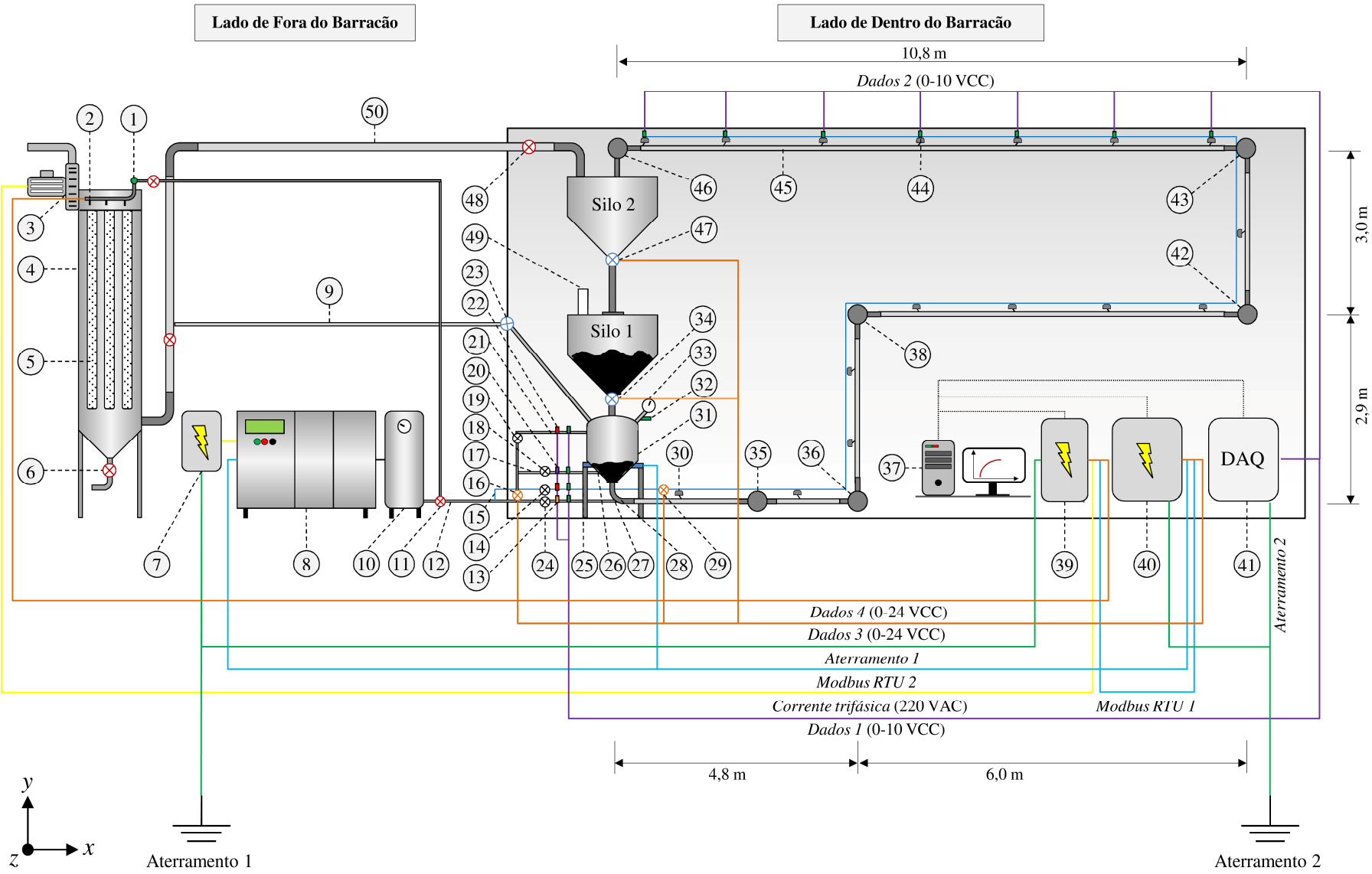
Nesse capítulo buscou-se apresentar o processo de dimensionamento e montagem do sistema de transporte pneumático utilizado. De modo a facilitar o entendimento, o capítulo foi dividido em três grandes partes, estrutura física do sistema de transporte, estrutura elétrica/eletrônica do sistema de transporte e experimentos planejados de transporte pneumático. Essa primeira aborda os elementos principais do sistema de transporte, isto é, a fonte de movimento, o sistema de alimentação, a zona de transporte e o separador. Já a segunda parte descreve os sistemas de controle de alimentação elétrica, bem como os sistemas de supervisão, controle da operação e aquisição de dados. Por fim, na terceira, um planejamento experimental foi apresentado buscando analisar a influência da vazão de ar direcionada ao vaso e a linha, bem como a massa de material utilizado, na vazão de descarga do vaso, pressão durante a descarga e queda de pressão ao longo da tubulação de transporte.

5.1 Estrutura física do sistema de transporte pneumático

A Figura 5.1 apresenta, de forma simplificada, o sistema de transporte pneumático utilizado, ilustrando as estruturas físicas e elétricas/eletrônicas o sistema. De forma geral, o sistema contava com um silo de armazenamento (Silo 1) à pressão atmosférica, o qual carregava o vaso de pressão (31). Tal vaso era pressurizado por meio de ar comprimido gerado em um compressor (8), de modo que o material era descarregado na linha de transporte (45). Na linha, o material era transportado por 25,6 m, passando por 6 curvas (35, 36, 38, 42, 43 e 46), quando então chegava ao silo de recebimento (Silo 2). O ar era separado dos sólidos por meio de um filtro de mangas (4), retornando à atmosfera. O silo de recebimento alimentava então o silo de armazenamento, fechando o loop. Com base nessas características, tal sistema pode ser classificado como: aberto, de pressão positiva, operando em batelada, a baixa ou alta pressão.

O projeto detalhado do sistema de transporte é mostrado na Figura C.2 do Apêndice C. Iniciando-se pelo silo de armazenamento (Silo 1), esse foi projetado visando a realização de diversas cargas do vaso sem a necessidade de reabastecimento, bem como atender a oferta de espaço disponível na Unidade de Pesquisa da FEQ/UFU. Assim, o silo foi projetado em um formato cilíndrico/tronco-cônico com volume interno total de 0,930 m^3, ângulo de descarga de 30° e diâmetro de bocal de descarga de 0,213 m (34). As dimensões detalhadas do silo são mostradas na Figura C.2, o qual foi construído em aço-carbono.

Figura 5.1 – Diagrama ilustrativo do sistema de transporte pneumático construído.



Legenda

1 – Sistema de limpeza do tipo *pulse-jet*

2 – Solenoides de acionamento do sistema *pulse-jet* (Asco®, 400325-242, 24 VCC)

3 – Ventilador centrífugo (Hydronics®, BC 270329-30)

- 3.1 Motor elétrico (WEG®, W22, 3 CV, Trifásico 220 VCA)
- 3.2 Vazão de gás movimentado: 2.000 $m^3.h^{-1}$
- 3.3 Temperatura de operação: 50°C
- 3.4 Pressão estática na aspiração: -200 mmCA

4 – Filtro de mangas (Hydronics®, 4x4xT-185-050-250-PE)

- 4.1 Vazão de operação: 2.000 $m^3.h^{-1}$
- 4.2 Temperatura de operação: 40-60°C
- 4.3 Pressão de operação 150-500 mmCA
- 4.4 Área de filtragem: 16 m^2

5 – Mangas

- 5.1 Feltro agulhado de polipropileno, gramatura de 550 $g.m^{-2}$
- 5.2 Quantidade de mangas: 16

6 – Válvula borboleta de descarga do filtro

7 – Soft-starter (Allen Bradley®, Rockwell®, 150-F135NBD)

8 – Compressor de parafuso lubrificado (Gardner Denver, ESM 26)

- 8.1 Vazão de ar: 4,89 $m^3.min^{-1}$
- 8.2 Pressão: 7,5 bar
- 8.3 Potência motor: 35 HP
- 8.4 Tensão: 220 VAC trifásico

9 – Tubulação de ventilação do vaso (3”)

10 – Reservatório de ar comprimido (Schulz®, SCS 500, 480 L, 14,48 bar, 29°C)

11 – Conjunto de 3 válvulas globo (Deca®, 1¼”, ½”, 1”)

12 – Tubulação de ar (1”)

13– Transmissor de velocidade do ar (Dwyer®, Série 641)

14 – Conjunto de válvula globo (Deca®, 1”) e reguladora de pressão (IMI Norgren®, R17-800-RNLG)

15 – Linha auxiliar de ar comprimido para injetores de linha (1”)

16 – Válvula com atuador pneumático (Varb®, 4V310-08B)

17 – Linha de ar comprimido para *Vibrapads* (1”)

18 – Conjunto de válvula globo (Deca®, 1”) e reguladora de pressão (IMI Norgren®, R17-800-RNLG)

19 – Conjunto de válvula globo (Deca®, 1”) e reguladora de pressão (IMI Norgren®, R17-800-RNLG)

20 – Transmissor de velocidade do ar

21 – Linha de ar comprimido para vaso de pressão (1”)

22 – Anemômetro de fio quente (TSI®, VelociCalc 8345)

23 – Válvula globo (Deca®, 1”)

24 – Conjunto de válvula globo (Deca®, 1”) e reguladora de pressão (IMI Norgren®, R17-800-RNLG)

25 – Conjunto de pesagem do vaso de pressão:

- 25.1 Células de carga: 3 unidades (L-2T/R4 703)
- 25.2 Suporte célula vaso: 3 unidades (Alfa®, Smael-2CF)
- 25.3 Caixa de junção (Alfa®, 4134A)
- 25.4 Indicador de pesagem (Alfa®, 3107C)

26 – Dispositivo auxiliador de fluxo *Vibrapad*
27 – Bocal de injeção de ar na válvula em J
28 – Bocal de descarga em J do vaso de pressão
29 – Válvula (IMI Norgren®, Nº 8450400.0000)
com atuador pneumático (IMI Norgren®, V5B417A-A2000)
30 – Injetor de linha (*booster*)
31 – Vaso de pressão (DPG-3B-AC)
31.1 Capacidade de transporte : 1200 $kg.h^{-1}$
31.2 Pressão de operação : 2,0 a 5,0 bar
31.3 Volume do vaso : 84 litros
31.4 Número de ciclos : 15 $ciclos.hora^{-1}$
32 – Sensor/transmissor de pressão (Hilitand®, BX052218M0100)
33 – Pressostato (Danfoss®, KPI35)
34 – Válvula com atuador pneumático (Varb®, 4V310-08B)
35 – Curva bola (plano *xz* 45°)
36 – Curva bola (plano *xy* 90°)
37 – Microcomputador
38 – Curva bola (plano *xy* 90°)
39 – Painel elétrico do filtro de mangas
39.1 Fonte de alimentação (Delta®, Cliq 24 VCC, 5 A)
39.2 Controlador de limpeza (SanTec®, Eco V.7.2PRZ)
39.3 Inversor de frequência (Weg®, CFW 700)
40 – Painel elétrico do sistema de transporte
40.1 Fonte de alimentação (Weidmüller®, 24 VCC, 5 A)
40.2 Controlador lógico programável (Weg®, TPW04-332BR-A)
40.3 Relé acoplador (Weidmüller®, TRS 24VCC, 1CO)
41 – Painel elétrico do sistema de aquisição
41.1 Fonte de alimentação (Delta®, EDA-120-24, 24 VCC, 5 A)
41.2 Fonte de alimentação (5 VCC, 2,5 A)
41.3 Dispositivo multifuncional I/O
(National Instruments®, USB-6212)
41.4 Conversor isolado (Novus®, USB-i485)
41.5 Conversor isolado (M&C®, USB/RS485)
42 – Curva bola (plano *xy* 90°)
43 – Curva bola (plano *xy* 90°)
44 – Sensor/transmissor de pressão (Hilitand®, BX052218M0100)
acoplado a injetor de linha
45 – Tubulação de transporte (2½”)
46 – Curva bola (plano *xz* 45°)
47 – Válvula com atuador pneumático (Varb®, 4V310-08B)
48 – Válvula borboleta
49 – Filtro de manga
50 – Tubulação de limpeza do ar

Fonte: Autoria própria (2023).

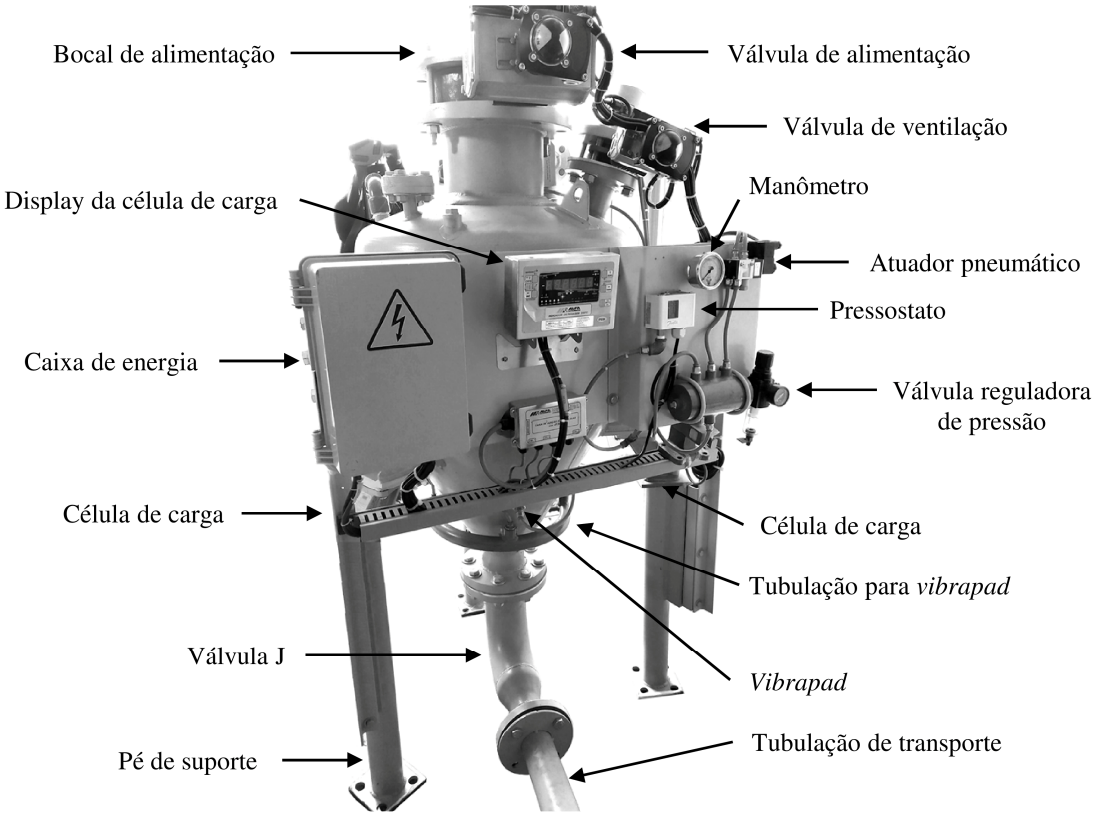
Quanto à capacidade de armazenamento e descarga. Como visto no Capítulo 3, a densidade *bulk* dos cascalhos secos pode variar entre 1181 $kg.m^{-3}$ e 1537 $kg.m^{-3}$, portanto, o silo podia armazenar entre 1099 e 1430 kg de material. Vale destacar ainda que a descarga do silo podia ser controlada por uma válvula borboleta (34) na parte inferir deste. O carregamento do Silo 1 era realizado por uma estrutura de tambor inçada por uma talha (Vonder®, 6143010030), e descarregado no Silo 1 por uma porta de acesso na parte superior do silo.

Quanto ao vaso de pressão (31), o projeto detalhado deste é mostrado na Figura C.1 do Apêndice C, enquanto que a Figura 5.2 apresenta o vaso construído em aço-carbono. O vaso projetado, em certos aspectos, é semelhante àquele mostrado na Figura 2.17 ou àquele reportado em patente no item 205 da Figura 2.26. Ou seja, o controle de vazão de descarga de material era realizado pela proporção entre a vazão de ar direcionada a linha de transporte (27) e a vazão de ar direcionada para o vaso pelas tubulações auxiliares (17) e (21). O vaso também possuía uma válvula de ventilação (23), para permitir o escape de ar durante o carregamento. Além disso, quatro pontos (26) de injeção de ar com auxiliadores de fluxo do tipo *vibrapad* foram colocados na parte tronco-cônica do vaso para fluidizar o material e facilitar sua descarga. A vazão e a pressão do ar injetado nesses dispositivos podiam ser controladas por um conjunto de válvulas (18) na tubulação auxiliar (17). Uma imagem ilustrativa do *vibrapad* é mostrada na Figura 5.3, com destaque ao ar que entra pelo centro deste e sai pelas laterais do dispositivo, gerando um efeito de vibração da parte cônica flexível e consequentemente vibrando, aerando e fluidizando o material.

Também de forma semelhante aos vasos das figuras supracitadas, o vaso (31) não possui válvula de descarga, visto que, como destacado por Klizing *et al*. (2010), os materiais do grupo B da classificação de Geldart tendem a "inundar" o bocal de descarga quando descarregados rapidamente sob pressão. Assim, o vaso foi dimensionado com um bocal de descarga (28) com injeção de ar (27) na curva, para aerar o material, facilitar a descarga, e mover o material pela linha de transporte (45) (Figura C.1). Sendo essa configuração, em certos aspectos, semelhante à de uma válvula J ou L não mecânica. A vazão e a pressão do ar de saída deste bocal de injeção (27) eram controladas por um conjunto de válvulas (24). Nessa configuração de vaso, o próprio material faz a função de bloquear o bocal de saída (28), selando o vaso (31) e permitindo sua pressurização, a qual ocorria pela entrada de ar em um bocal (21) na parte superior do vaso. Sendo que a vazão e pressão de ar da tubulação de pressurização (21) eram controladas por um conjunto de válvulas (19). O ar pressurizado era simultaneamente injetado no bocal de injeção (27), no dispositivo de vibração e fluidização do material (26) e no bocal superior (21) do vaso

para forçar a descarga de material pelo bocal de descarga (28). O ciclo completo e detalhado de funcionamento do vaso será visto na próxima seção.

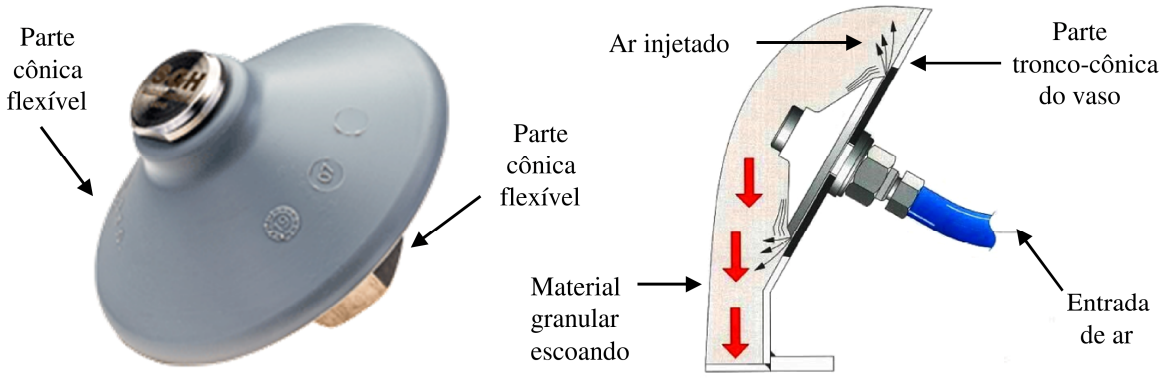
Figura 5.2 – Vaso de pressão (Hydronics®, DPG-3B-AC).



Fonte: Autoria própria (2023).

Quanto à capacidade do vaso, este possuía um volume total de 0,165 m^3, porém, o fabricante (Hydronics®) informa que o volume de operação é de 0,084 m^3 (31.3). Quanto à capacidade de descarga, o fabricante descreve que é possível descarregar, no período de uma hora, 1200 kg (31.1) divididos em 15 ciclos (31.4) de 80 kg de material com densidade *bulk* média de 1550 $kg.m^{-3}$. A operação do vaso podia ocorrer em pressões entre 1,0 a 5,0 bar (31.2), a uma temperatura de 40°C, podendo chagar ao máximo de 10,0 bar.

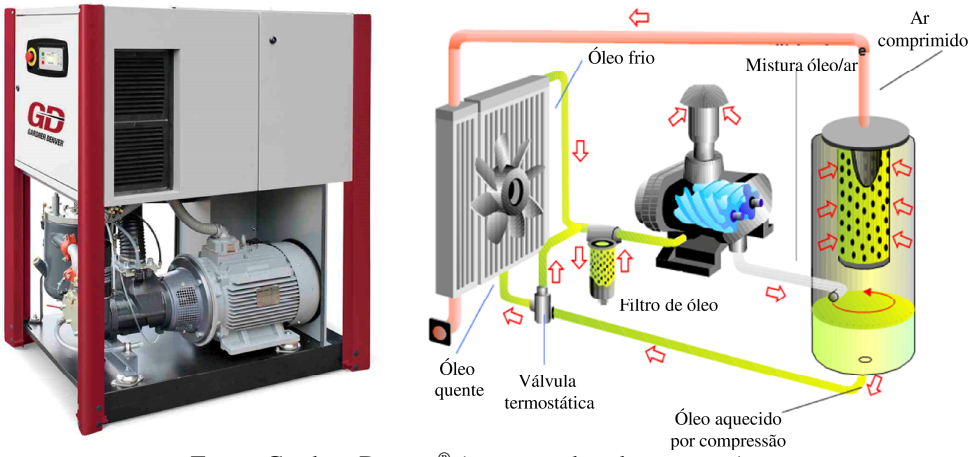
Figura 5.3 – Auxiliador de descarga (*vibrapad*).



Fonte: SGH Schüttguthandling® (2023) (www.schuettguthandling.com)

Considerando as características do sistema de transporte, o fabricante estima um consumo de ar total de 250,0 $m^3.h^{-1}$. Para atender as altas demandas de pressão e vazão de ar, optou-se por utilizar um compressor do tipo parafuso rotativo (8), o qual é mostrado na Figura 5.4. Tal compressor consegue fornecer uma vazão de ar de 300 $m^3.h^{-1}$ (8.1) a uma pressão de 7,5 bar (8.2), o que, considerando o diâmetro da tubulação de transporte de 2½ pol, permite que a velocidade do ar na tubulação seja de até 26,3 $m.s^{-1}$ (GARDNER DENVER, 2022).

Figura 5.4 – Sistema de compressão do tipo parafuso (Gardner Denver®, ESM26).



Fonte: Gardner Denver® (www.gardnerdenver.com)

Um reservatório de ar comprimido tem a função de suprir o consumo do sistema e estabilizar a pressão em toda a rede, evitando as oscilações que impeçam o funcionamento das máquinas e equipamentos. Uma recomendação para o dimensionamento do volume do reservatório, quando se utiliza compressores rotativos, é que o volume do reservatório em m^3 deve ser 10% da vazão total do sistema em $m^3.min^{-1}$. Assim, considerando a vazão de 4,89 m^3/min descrita pelo fabricante (8.1), o volume do reservatório foi estimado como, 489 L,

sendo, portanto, utilizado um reservatório de 500 L (10), mostrado na Figura 5.5 (PARKER HANNIFIN, 2006). A pressão e vazão de saída do reservatório podiam ser controladas por um sistema de válvulas na saída do reservatório (11).

Figura 5.5 – Reservatório de ar comprimido.



Fonte: Schulz® (www.schulz.com.br)

Quanto à tubulação de transporte (45), utilizou-se tubos flangeados de aço-carbono de 2½", o que foi mais do que suficiente para atender a regra prática de que o diâmetro da tubulação ter de ser, pelo menos, 3 vezes maior que o tamanho da partícula. Nesse caso, é 21 vezes maior que o tamanho de partícula máximo de projeto (3,0 mm). A espessura das paredes foi projetada considerando uma alta abrasividade dos cascalhos de perfuração. Mills (2004) recomenda que as tubulações para esse tipo de material sejam de aço-carbono com *schedul*e de 80 ou mais, o que, utilizando a norma ASME/ANSI B36.10/19, resulta em um a tubulação de 7,01 mm de espessura (ASME; ANSI, 2019). Na tubulação real foi utilizada uma espessura de aproximadamente 7,80 mm.

O layout da tubulação foi pensado para atender as demandas de espaço para construção disponível, e fornecer um trecho horizontal longo para o desenvolvimento do regime de transporte, como pode ser visto na Figura 5.1 e no projeto do sistema na Figura C.2 do Apêndice C. No total, o trecho horizontal possuía 20,2 m e o vertical 5,3 m. O maior trecho horizontal possuía 9,51 m. Para a construção deste layout foram necessárias 6 curvas, 4 de 90° (36, 38, 42 e 43) e 2 de 45° (35 e 46). Devido à abrasividade do material, optou-se por utilizar curvas do tipo "bola" com a mesma espessura das tubulações, como mostrado em detalhes na Figura C.2 e ilustrado na Figura 5.6. Esta é uma curva com depressões em um formato de "bola". Isso

permite que o primeiro volume de material transportado se acumule nas depressões da curva, e o material subsequente tenha impacto apenas consigo mesmo, reduzindo a fricção contra a tubulação. No final do transporte, o material preso nas depressões pode ser purgado, limpando a tubulação (MILLS, 2004).

Figura 5.6 – Curva do tipo bola.

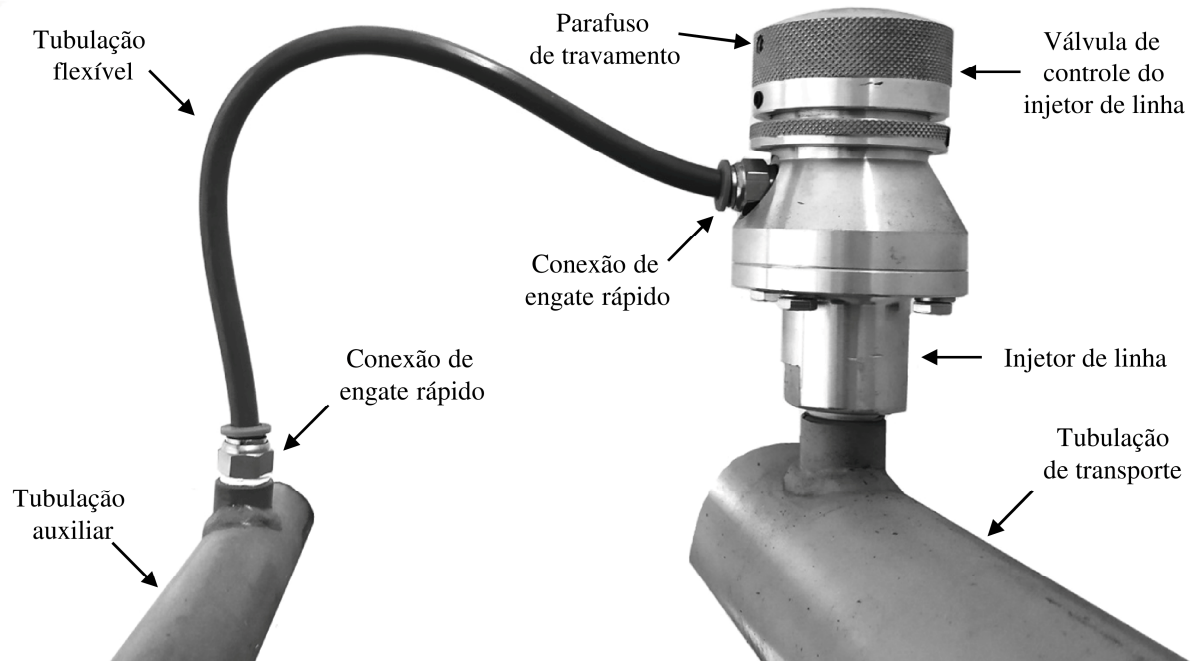


Vista frontal Vista de corte lateral

Fonte: Autoria própria (2023).

Para auxiliar no transporte do material em plugues e reduzir a probabilidade de entupimentos, injetores de linha externos (21) foram posicionados a cada 1,0 m de distância da tubulação de transporte. O projeto detalhado do sistema de injeção de linha é mostrado na Figura C.2 do Apêndice C. Já a Figura 5.7 mostra um exemplo de conjunto de injeção. Para fornecer ar comprimido para os injetores, uma tubulação auxiliar (15) foi posicionada lateralmente a tubulação de transporte (45). A vazão de ar injetada podia ser controlada individualmente por meio de uma válvula localizada na parte superior do injetor (Figura 5.7). Caso fosse desejado desativar o injetor, bastava fechar totalmente essa válvula. A pressão e vazão total da linha auxiliar podiam ser controladas por um sistema de válvulas (14 e 29) no começo da linha auxiliar.

Figura 5.7 – Injetor de linha (*booster*).



Fonte: Autoria própria (2023).

O material transportado era conduzido para um silo de recebimento (Silo 2) com as mesmas dimensões do silo de armazenamento (Silo 1). O projeto deste silo pode ser visualizado na Figura C.2 do Apêndice C. De certa forma, o bocal de recebimento do Silo 2 era semelhante a um bocal de alimentação de um ciclone (Figura C.2), de modo que o material entrava suavemente no silo sendo parcialmente separado do ar. Uma válvula borboleta (47) controlava a passagem de material por gravidade do Silo 2 para o Silo 1, o qual contava com uma manga própria para filtragem (49) do ar durante a transferência.

A mistura de ar e partículas era então conduzida através de uma tubulação (50) até o filtro de mangas (4), o qual realizava a separação da mistura. Durante o carregamento do vaso, o material que saía pelo bocal de ventilação (23) também era direcionado ao filtro por uma tubulação (9). O projeto desse filtro é mostrado em detalhes na Figura C.3 do apêndice C, o qual foi projetado para processar até 2000 $m^3.h^{-1}$ (4.1) de gás "sujo" filtrado através de 16 mangas (4), as quais juntas forneciam uma área de filtragem de 16 m^2 (4.4). Um ventilador centrífugo (3) era responsável pela exaustão do gás em vazões de até 2.000 $m^3.h^{-1}$ (3.2) com uma pressão estática de aspiração de -200 mmCA (3.4) a uma temperatura média de 50°C (3.3). Vale destacar ainda que as mangas eram periodicamente limpas por um sistema de injeção de ar comprimido do tipo *pulse jet* (1), o qual, por meio de bicos injetores (2), inseria ar pressurizado no interior de cada manga, removendo a torta de material filtrado. O controle do

sistema de limpeza era gerenciado independentemente por um controlador de limpeza (39.2), o qual foi configurado para identificar, por meio de sensor de pressão, quando o ciclo de transporte havia acabado. Nesse momento, cada um dos 4 bicos injetores era acionado individualmente por solenoide (2), com intervalos de 5 s entre acionamentos, permanecendo 2 s acionado. A pressão de injeção dos bicos era ajustada pelo conjunto de válvulas (11). A vazão da mistura ar e partículas que ia para o filtro podia ser controlada por meio de uma válvula borboleta (48). O ar limpo que saía do ventilador centrífugo era direcionado para o ambiente atmosférico. Já o material filtrado era descarregado por uma válvula (6) na parte inferior do filtro, sendo direcionado a um tambor de recebimento.

5.2 Estruturas elétrica e eletrônica do sistema de transporte pneumático

5.2.1 Sistemas de controle de alimentação elétrica

Devido a restrições de infraestrutura energética disponível e necessidade de controle de equipamentos, alguns dispositivos de controle de alimentação elétrica tiveram que ser utilizados no sistema de transporte pneumático. Tais dispositivos são mostrados na Figura 5.1. Iniciando-se pelo compressor de parafuso (8), esse dispositivo possuía 35 CV de potência utilizando uma tensão trifásica de 220 volts, demandando uma corrente nominal de 99 A. Durante a partida do compressor, do tipo estrela-triângulo, esse dispositivo alcançava uma corrente de pico de 400 A, sobrecarregando a infraestrutura elétrica. De modo a contornar esse problema, o método de partida estrela-triângulo foi substituído por uma *soft-starter* (7). Basicamente, o funcionamento desse dispositivo se dá através de pontes tiristorizadas, que fazem o chaveamento da tensão de modo que ela possa ser disponibilizada para o motor de forma crescente, garantindo uma partida suave e sem a presença da corrente de pico (MATTEDE, 2022b). Assim, manteve-se o controle de partida e parada do compressor sendo realizado pelo sistema de controle interno do compressor (SCIP). Contudo, nesse caso, construiu-se uma lógica de controle no sentido de que, os comandos elétricos de acionamento, *stand-by* e parada enviados pelo SCIP eram interpretados por um circuito elétrico e repassados para a *soft-starter*, a qual atuava conforme esses comandos diretamente na tensão fornecida ao motor do compressor. As principais configurações da *soft-starter* foram: tensão de linha de 220 volts, modo de partida do tipo suave, tempo de rampa de partida de 8 s, torque inicial de 40% LRT (Locked Rotor Torque), nível de arranque de 30% LRT e parada suave com rampa de 5 s.

Outro dispositivo de controle de alimentação foi utilizado no motor do ventilador centrífugo (3) do filtro de mangas (4), de modo a poder controlar a vazão de processamento do filtro, o que foi realizado por meio de um inversor de frequência (39.3). O inversor de frequência é um dispositivo eletrônico que visa transformar a corrente elétrica alternada fixa em corrente elétrica alternada variável, controlando assim a potência consumida pela carga através da variação da frequência entregue pela rede (MATTEDE, 2022a). Nesse caso, o controle de partida, parada e a velocidade de funcionamento do motor eram realizados por meio de um Controlador Lógico Programável (PLC) (40.2) e/ou microcomputador (37), o qual enviava os dados para o inversor de frequência (39.3), através da rede Modbus RTU 2, a qual utilizava um meio físico RS-485, como será visto em maiores detalhes na seção 5.2.2. Assim, o inversor de frequência atuava apenas como um dispositivo de controle e medição dos dados do motor.

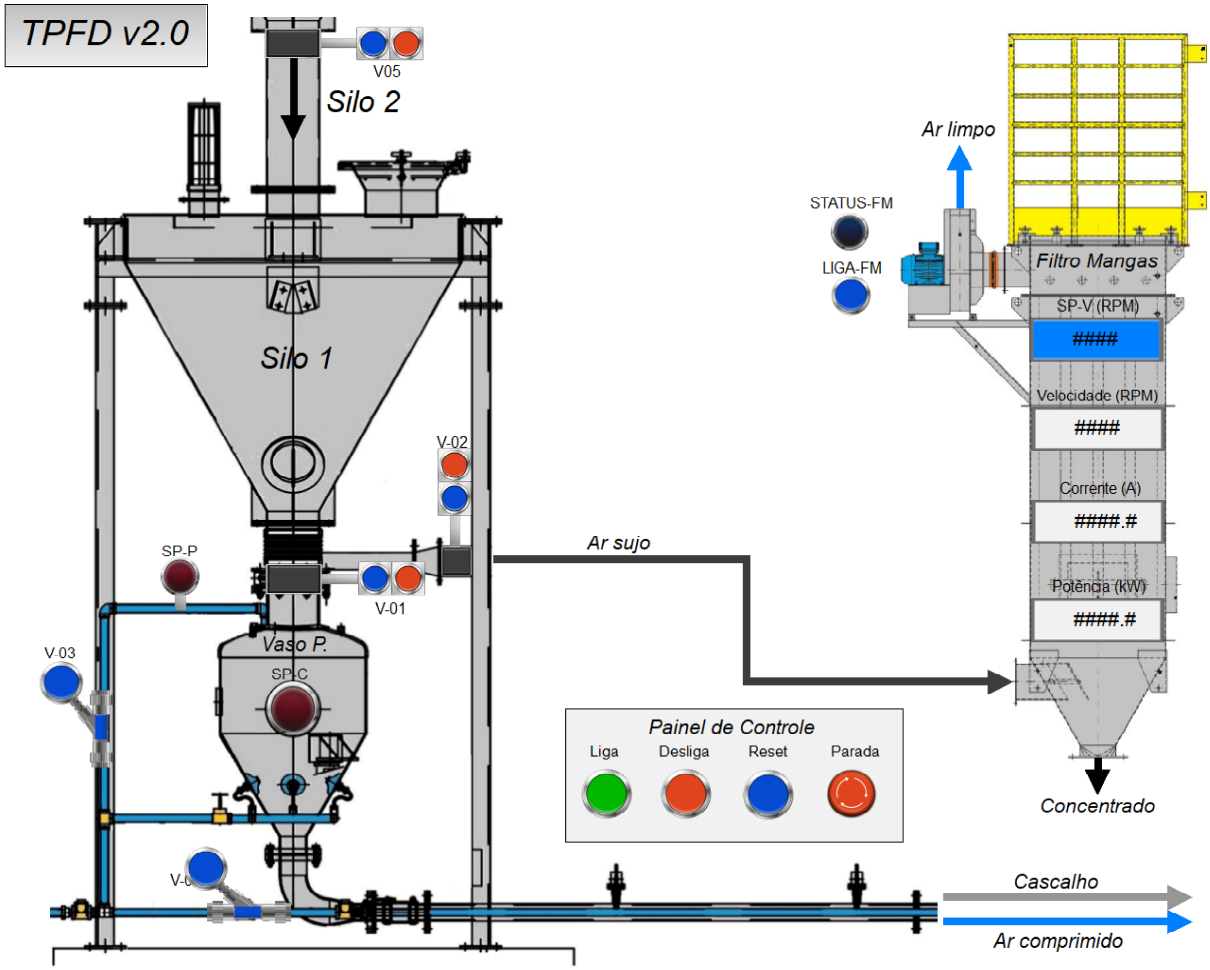
5.2.2 Sistema de supervisão e controle (SCADA) da operação de transporte pneumático

O transporte pneumático de materiais granulares é uma operação relativamente complexa, demandando um controle sincronizado de dispositivos e equipamentos, como ilustrado na Figura 5.1. Assim, o controle automático da operação de transporte foi realizado por meio de um PLC (40.2). A lógica de programação das portas de entrada, controle e portas de saída do PLC é mostrada nas respectivas Figuras C.5, C.6 e C.7 do Apêndice C em linguagem Ladder. Vale destacar que os comandos de entrada e saída do PLC passavam antes por relés acopladores, de modo a proteger as portas do PLC e permitir que esse pudesse lidar com sinais de maior corrente. O projeto do painel elétrico do PLC (40) é mostrado na Figura C.8 do Apêndice C. Por outro lado, a supervisão e controle manual da operação eram realizados através de uma Interface Homem Máquina (IHM) em um microcomputador (37), por meio de um *software* SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) (EasyBuilder Pro®, V6.03.02.294). A Figura 5.8 mostra a tela do supervisório desenvolvido.

A comunicação entre o microcomputador (37) e o PLC (40) era realizada através de uma rede Modbus RTU utilizando um meio físico RS-485. Nesse ponto, vale elucidar que Modbus é um protocolo de mensagens da camada de aplicação (camada 7) do modelo OSI (Open System Interconnection), com a função principal de fornecer uma comunicação cliente/servidor padronizada entre dispositivos conectados em diferentes tipos de barramentos ou redes. Já o termo RTU se refere à aplicação do protocolo de comunicação entre microcomputadores e Unidades Terminais Remotas (RTU) (MODBUS ORGANIZATION, 2022). Para que ocorra a transferência de dados entre o microcomputador e as unidades terminais remotas é necessário

um meio físico, que no sistema projetado foi realizado pelo padrão RS-485. Esse, por sua vez, é um padrão que define as características elétricas de drivers e receptores para uso em sistemas de comunicação serial.

Figura 5.8 – Tela do supervisório de operação do sistema de transporte pneumático.

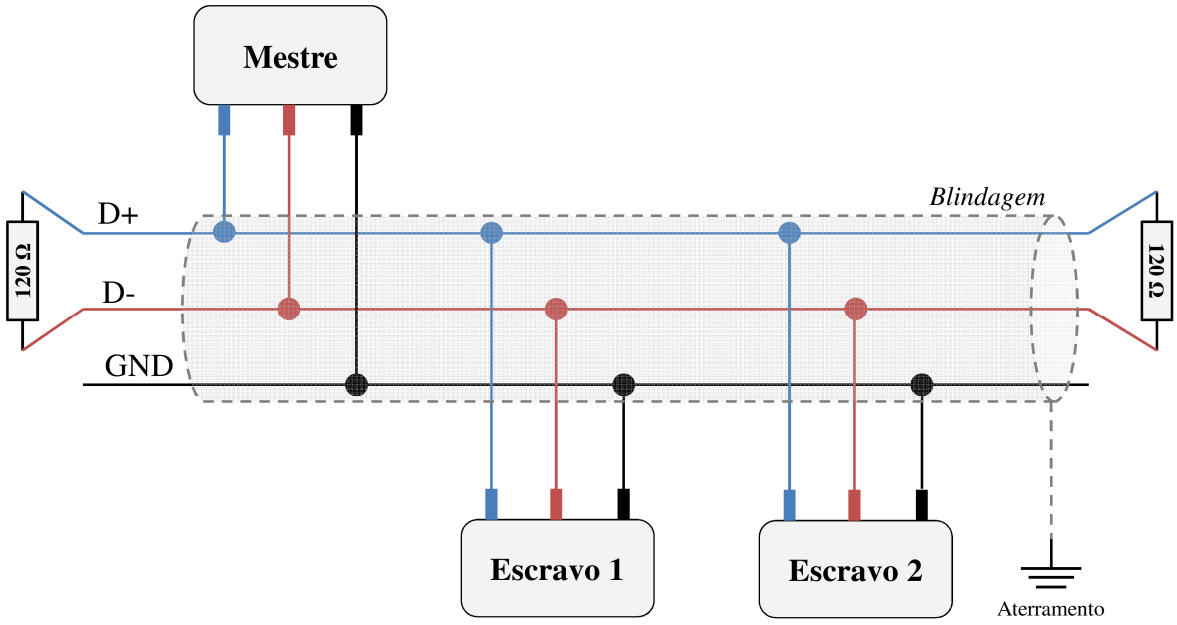


Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 5.9 ilustra a estrutura de uma rede Modbus RTU típica. Esse tipo de protocolo de comunicação funciona pelo princípio mestre-escravo, no qual um dispositivo (o mestre) controla até 31 dispositivos (os escravos) espaçados em uma distância máxima de até 1200 m. O mestre pode enviar mensagens, padronizadas de acordo com o mapa de registros do escravo, para o endereço do escravo, o qual irá responder à mensagem conforme as informações solicitadas, também seguindo o mapa de registros. Quanto ao meio físico, como mostrado na figura supracitada, é importante que ele seja blindado de ponta a ponta e aterrado, de modo prevenir a interferência de ruídos provindos de outros dispositivos. Outro ponto importante é a

necessidade de terminadores de linha para reduzir a reflexibilidade do sinal e não atrapalhar o sinal original de comunicação (MODBUS ORGANIZATION, 2022).

Figura 5.9 – Diagrama ilustrativo de uma rede Modbus RTU.



Fonte: Autoria própria (2023).

No sistema desenvolvido, duas redes Modbus RTU foram criadas, tendo o microcomputador com mestre único das duas, como mostrado na Figura 5.1. A rede Modbus RTU 1 interligava o microcomputador (37) com o PLC (40.2) e o inversor de frequência (39.3). Já a Modbus RTU 2 interliga o microcomputador (37) com o sistema de pesagem do vaso (25) e o SCIP do compressor (8). O sistema mostrado na Figura 5.8 utilizava apenas a rede Modbus RTU 1 para o controle da operação, enquanto que a rede Modbus RTU 2, de certa forma, era prioritariamente utilizada para o monitoramento e aquisição de dados, como será mostrado na próxima seção. Assim, através da rede Modbus RTU 1 conectada ao PLC era possível obter o status de funcionamento de todas as válvulas de atuação pneumática do sistema (16), (23), (29), (34), (47), bem como ativá-las e desativá-las individualmente (controle manual). Além disso, era possível obter informações se o *setpoint* de pressão do vaso havia sido alcançado pelo pressostato (16) ou não. Já pela rede com o inversor de frequência (39.3) era possível obter o status de funcionamento do filtro de mangas (4), bem como ativar, desativar e alterar a velocidade do ventilador centrífugo (3). O inversor também fornecia dados de potência e corrente consumida pelo ventilador centrífugo. Os dados obtidos eram exibidos na tela do supervisório, mostrado na Figura 5.8.

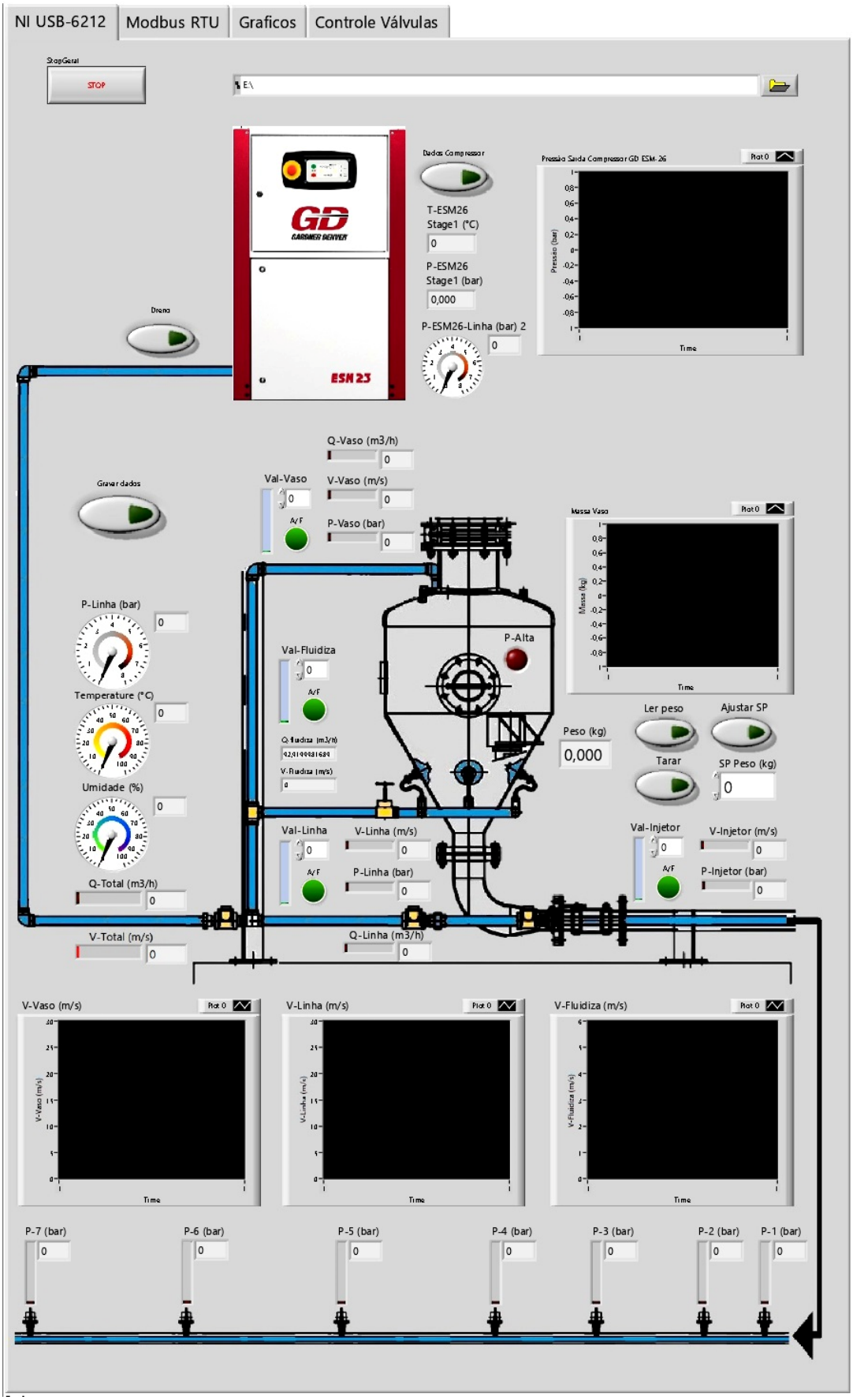
Destaca-se ainda que as duas redes foram construídas utilizando cabos manga de 4 vias isolados e aterrados eletricamente. Terminadores de linha de 120 Ω foram utilizados nas duas pontas da rede principal. A conversão do padrão RS-485 para USB foi realizada por dois conversores isolados (41.4) e (41.5), individuais para cada rede. As configurações da porta USB adotadas foram: 9600 $bits.s^{-1}$, 8 bits de dados, sem paridade, 2 bits de parada e sem controle de fluxo.

5.2.3 Sistema de supervisão e aquisição de dados

De modo a monitorar e fazer a aquisição de dados das variáveis envolvidas no processo de transporte pneumático de cascalhos, um sistema supervisório de aquisição de dados foi desenvolvido no *software* National Instruments®, LabView®, NI-DAQmx 17.0. A tela de monitoramento e a estrutura de programação em blocos do programa desenvolvido são mostradas na Figura 5.10. O sistema recebia os dados de duas fontes principais: rede Modbus RTU 2 e um dispositivo multifuncional I/O (41.3). Através da rede Modbus RTU 2 eram obtidos dados do compressor (8), como pressão do ar antes e depois da unidade de compressão, e pressão e temperatura do ar na linha de saída. Também era possível realizar a partida e parada do compressor, contudo, por motivos de segurança, optou-se por não habilitar essa função. Além disso, também eram obtidos dados do sistema de pesagem (25) do vaso de pressão. Nesse caso, era possível obter dados da massa do vaso, ajustar o *setpoint* de massa a ser carregado, tarar o sistema de pesagem, obter o valor da tara e ajustar alarmes de sobrecarga.

Já o dispositivo multifuncional I/O recebia e processava dados de diversos sensores. Os sinais (0-5 VCC) dos sensores de pressão (semelhantes ao (32)) nas tubulações de alimentação de ar do vaso de pressão e da linha de transporte (44) eram convertidos em dados de pressão por curvas de calibração desses sensores. Já os sinais (0-10 VCC) dos transmissores de velocidade do ar (20 e 13) localizados na tubulação de ar (27) que alimenta o bocal de injeção e na tubulação que alimenta os *vibrapads* (17), eram convertidos em dados de velocidade por equações de calibração fornecida pelo fabricante. Os dados (*string*) de velocidade, umidade e temperatura do ar, fornecidos pelo anemômetro de fio quente (22), localizado na tubulação de pressurização do vaso (21), eram extraídos por uma sub-rotina criada no *software* supervisório. Os dados obtidos eram exibidos na tela do supervisório, mostrado na Figura 5.10, e podiam ser gravados em um arquivo de texto por meio de uma sub-rotina.

Figura 5.10 – Sistema supervisório de monitoramento e aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria (2023).

5.3 Descrição da operação de transporte pneumático

Uma vez apresentada as estruturas físicas e elétricas/eletrônicas, o ciclo completo de operação do sistema de transporte pneumático pode ser descrito, tomando a Figura 5.1 como referência, como se segue. Inicialmente, a vazão e a pressão de ar comprimido injetado nas tubulações (15), (17), (21), (27) do sistema de injeção de linha (30) e vaso de pressão (31), eram selecionadas alterando-se as respectivas válvulas (14), (18), (19) e (24). Nesse momento, a velocidade de rotação do ventilador centrifugo (3) era selecionada através do supervisório (37), apresentado na Figura 5.8, o qual transmitia a informação através da rede Modbus RTU 1 para o inversor de frequência (39.3), que atuava na tensão trifásica de alimentação do motor do ventilador (3). Através do supervisório citado, também era selecionado a frequência de abertura e fechamento da válvula (29) e, consequentemente, a frequência de injeção de ar pressurizado na linha de transporte através dos injetores de linha. Selecionava-se nesse momento quais injetores de linha estariam ativos durante a operação de transporte. O *setpoint* de pressão de operação do vaso (31) era então selecionado pelo pressostato (33). Em seguida, por meio do supervisório da Figura 5.10, o *setpoint* de massa a ser carregada no vaso era selecionado. Por fim, as pressões de carga e alívio do compressor eram selecionadas pela IHM do compressor.

Após a seleção de todas as condições de operação, o material era carregado no Silo 1 com auxílio de uma estrutura de tambor conectado a uma talha, previamente mencionada. O Silo 1 era então fechado e realizava-se a partida do compressor através de sua IHM (seção 5.1). Após o compressor encher o reservatório de ar (10) com a pressão desejada, o que podia ser monitorado pelo supervisório da Figura 5.10, iniciava-se a operação de transporte apertando-se o botão iniciar no supervisório da Figura 5.8. Nesse momento, o PLC (40.2) verificava, por chaves de fim de curso, se todas as válvulas de controle (16), (29), (23), (34) e (47) estavam fechadas. O PLC (40.2) ainda verificava se o motor do ventilador (3) estava desligado e se a pressão (33) e massa (25) de material no vaso de pressão (31) estavam abaixo de seus respectivos *setpoints*. Caso qualquer uma dessas verificações apresentasse falha, a operação não era iniciada e o programa precisaria ser reiniciado pelo botão de *reset* do supervisório da Figura 5.8, realizando novamente toda a verificação. Caso tudo estivesse correto, o PLC (40.2) enviava um comando para o inversor de frequência (39.3) ligar o ventilador centrífugo (3). Em seguida, o PLC (40.2) enviava um comando de abertura das válvulas de ventilação (23) e alimentação (34) do vaso (31). O material era então carregado no vaso até que o *setpoint* fosse alcançado, o qual era detectado pelo sistema de medida de massa do vaso (25), que enviava um sinal para o PLC (40.2). O PLC (40.2) imediatamente fechava a válvula de alimentação (34) e

logo posteriormente a válvula de ventilação (23). Em seguida, o PLC (40.2) enviava um comando de abertura da válvula (16), permitindo que o ar pressurizado percorresse as tubulações (21), (17) e (27). As condições do ar nessas linhas eram monitoras pelo supervisório da Figura 5.10 através dos respectivos sensores de velocidade do ar (22), (20) e (13), além de sensores de pressão semelhantes àquele mostrado em (32). Devido o pequeno volume do vaso, este alcançava a pressão de *setpoint* quase que instantaneamente. Ao mesmo tempo o ar pressurizado era injetado nos *vibrapads* (27), agitando e fluidizando o material no vaso. Também, simultaneamente, ar pressurizado era injetado no bocal (27) de descarga, aerando e deslocando o material presente no bocal de descarga pela tubulação de transporte. O PLC (40.2) mantinha esse estado por 10 s, para ter certeza que uma parte considerável do material tivesse sido descarregada na tubulação. Em seguida, o PLC (40.2) enviava o primeiro comando de abertura da válvula de controle da linha de injeção de ar (29), ativando quase que instantaneamente todos os injetores ativos, quando após certo período essa válvula era fechada. Sendo que esse ciclo de abertura e fechamento continuava até o final da operação de transporte. Assim, o material era pneumaticamente transportado por toda a linha de transporte. No trecho reto horizontal mais longo da linha (45), sensores posicionados em conjunto com os injetores de linha permitiam o monitoramento da queda de pressão no trecho, o que era realizado pelo supervisório da Figura 5.10. A mistura de ar e material particulado que chegava ao Silo 2 era separada em parte pelo bocal de recebimento do silo, de modo que o material era armazenado no silo e o "ar sujo" era sugado através de uma tubulação (50) até o filtro de mangas (4), onde era purificado.

Quando todo o material chegava ao silo de recebimento (Silo 2), naturalmente a pressão na linha de transporte (45) e vaso de pressão (34) era reduzida para valores abaixo do *setpoint* estabelecido no pressostato (33). O valor abaixo do *setpoint* era identificado pelo PLC (40.2), o qual interpretava que o ciclo de transporte havia terminado e então enviava sinais para fechar as válvulas (16) e (29) e desligar o ventilador centrífugo (3). Nesse ponto, o sistema de limpeza do filtro de mangas identificava o final da operação de transporte e acionava as válvulas solenoide (2) para realizar a limpeza das mangas (5). Em seguida, o consumo de ar cessava e o compressor entrava em *stand-by*. O material do Silo 1 era transferido para o Silo 2 por acionamento da válvula (47) através do supervisório da Figura 5.8. O material recuperado pelo filtro de mangas (4) era descarregado em um tambor e retornado ao Silo 1 por meio da estrutura da talha. O silo 1 então era esvaziado descarregando o material por uma válvula presente na parte tronco cônica do silo, o qual era direcionado para um tambor por meio de um magote, encerrando por completo um ciclo dos experimentos de transporte pneumático

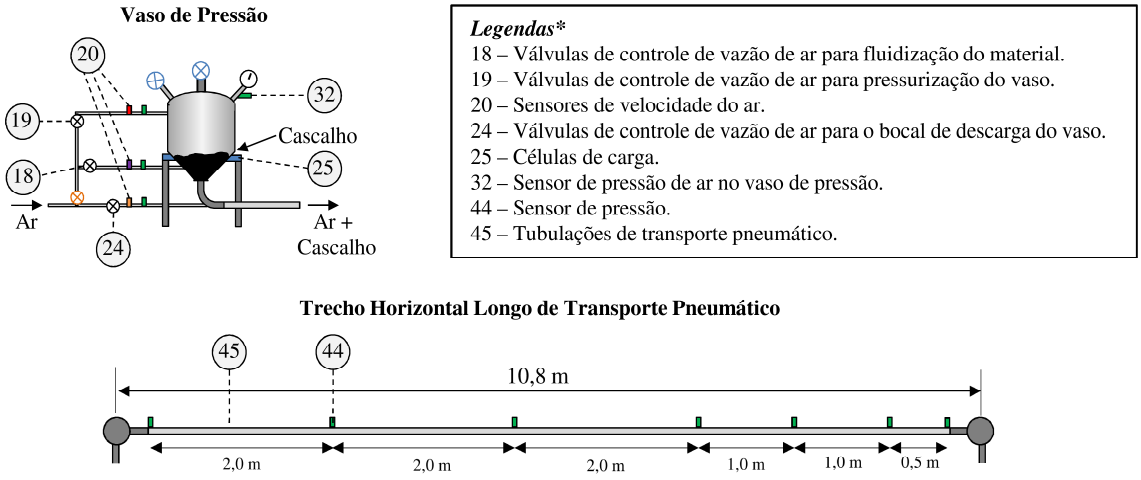
5.4 Análise do comportamento de descarga do vaso de pressão e transporte pneumático dos cascalhos de perfuração

Nessa seção buscou-se apresentar o planejamento dos experimentos realizados no sistema de transporte pneumático apresentado, visando o estudo da influência das variáveis operacionais no comportamento de descarga do vaso e transporte pneumático dos cascalhos. Vale ressaltar que todos os experimentos foram realizados utilizando-se o cascalho seco, devido às razões anteriormente apresentadas.

5.4.1 Planejamento experimental

Como revisado na seção 2.7, a proporção entre a vazão de ar direcionada para o vaso e para a linha de transporte, bem como a quantidade de material a ser transportado, são variáveis que podem influenciar no comportamento de descarga do vaso e transporte pneumático do material. Assim, através da técnica de regressão múltipla vinculada a experimentos planejados buscou-se verificar a influência do grau de abertura das válvulas (19) (x_1), (18) (x_2) e (24) (x_3) da Figura 5.11 (ou Figura 5.1), e da massa de sólidos (x_4), na vazão de descarga do vaso (W), pressão de operação do vaso (P) e queda de pressão ($\Delta P/L$) ao longo do trecho horizontal de maior extensão da tubulação de transporte (Figura 5.11 (45)). Vale destacar ainda que o grau de abertura da válvula foi fixado, ao invés da vazão ou pressão de ar injetado, porque essas últimas duas variáveis são de difícil controle e altamente dependentes dos fenômenos envolvidos durante a descarga de material, os quais possuem um grau de complexidade elevado. Quanto às variáveis resposta, estas foram escolhidas pois são de extrema importância para o monitoramento e dimensionamento de sistemas de transporte pneumático. A vazão de descarga do vaso está intimamente relacionada com a capacidade de remoção de cascalhos da plataforma *offshore* por meio do sistema de transporte. Desta forma, altas vazões são desejadas, visando evitar que a capacidade de descarga do vaso seja um limitante da operação, resultando em um acumulo de material na plataforma. Contudo, se a descarga eficiente de um vaso de pressão não estiver associada a uma queda de pressão adequada na linha, entupimentos, bem como o desgaste excessivo da tubulação podem ocorrer. Nesse sentido, é desejável que o sistema possua uma elevada capacidade de transporte com uma baixa queda de pressão na linha. Visto que essas duas variáveis estão associadas à distância que o material pode ser transportado, bem como o custo associado ao processo.

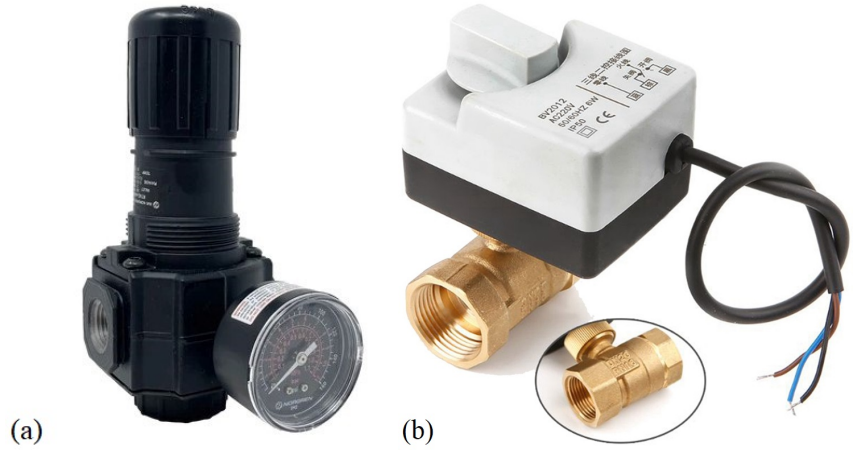
Figura 5.11 – Detalhes dos componentes do vaso de pressão de tubulação de transporte.



*A numeração das legendas corresponde a numeração das legendas da Figura 5.1 Fonte: Autoria própria (2023).

Para determinar as faixas de operação do equipamento, inicialmente, foram mapeadas as vazões de ar que podem ser atingidas nas tubulações de pressurização (21), fluidização do material (17) e injeção de ar na curva de descarga (27), alterando-se o grau de abertura das respectivas válvulas (19), (18) e (24), mostradas na Figura 5.1. Cabe aqui detalhar que cada um dos conjuntos das válvulas (18), (19) e (24) é composto de uma válvula de regulação da pressão (1") seguida de uma válvula de regulação da vazão (1"), como mostrado na Figura 5.12. Assim, essa primeira regula a pressão máxima que pode ser atingida na tubulação após a válvula, enquanto que a segunda altera o grau de obstrução imposto na tubulação, modificando a vazão do fluido. Destaca-se que o grau de abertura dessa última válvula era controlado eletronicamente, o que permitia uma maior precisão no grau de abertura desejado.

Figura 5.12 – Válvula de regulação da pressão (a) e válvula de regulação da vazão (b).

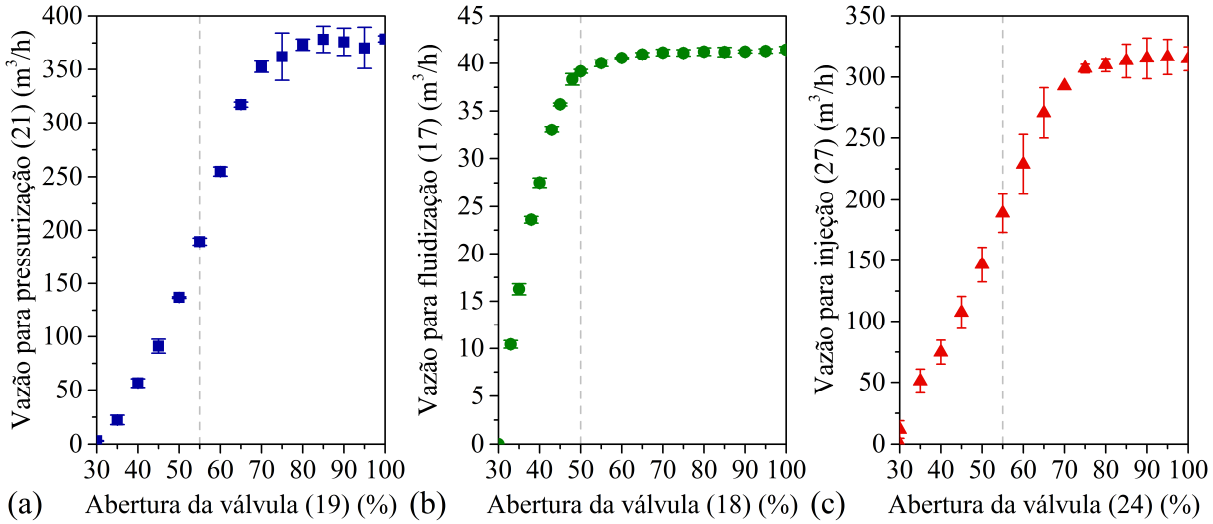


Fonte: Adapatado de OneHydraulics® (www.onehydraulics.com) e AliExpress® (www.aliexpress.com).

Considerando que durante a operação do equipamento o fabricante recomenda que pressões não maiores que 4,0 bar sejam utilizadas, todas as válvulas de pressurização foram ajustadas para que a pressão não ultrapassasse esse valor. Em seguida, variou-se separadamente o grau de abertura das válvulas de regulação da vazão de 0-100% e mediu-se a vazão de ar correspondente em cada uma das tubulações. Os resultados são exibidos na Figura 5.13 e mostram que a vazão nas tubulações só começa a aumentar quando o grau de abertura das válvulas atinge 30%. Em seguida, observa-se um aumento quase linear da vazão com o grau de abertura das válvulas, atingindo um platô em diferentes graus de abertura e vazões volumétricas. Para as válvulas (19) e (24) observa-se que o platô é atingindo com, aproximadamente, 70% de abertura das válvulas, sendo este em 375 m^3/h para a válvula (19) e 315 m^3/h para a válvula (24). Tal diferença se deve as distintas perdas de carga impostas pelas tubulações para a passagem da corrente de ar, o que acaba resultando em diferentes pontos de operação. A tubulação de injeção de ar (27), por exemplo, sofre uma curva de 90° curta a mais do que a tubulação de pressurização (21) no trajeto do tanque pulmão até o ponto de medição. Para a válvula (18), um platô próximo a 40 m^3/h é atingindo com cerca de 50% de abertura da válvula. Note que o valor alcançado nesse platô é muito menor do que àqueles atingidos para as válvulas (19) e (24), o que é esperado, visto que o ar da tubulação (17) é integralmente direcionado aos *vibrapads*, os quais oferecem uma grande perda de carga.

Para a realização do planejamento experimental, o grau de abertura máximo das válvulas foi fixado em 55%, 50% e 55% (+α), para as respectivas válvulas (19), (18) e (24). Optou-se por utilizar apenas cerca de metade da vazão disponível nas tubulações (21) e (27) pois, como pode ser observada na Figura D.1 do Apêndice D, com graus de abertura maiores que 65% a vazão na tubulação deixa de ser constante e começa a diminuir ao longo do tempo, mesmo com todo o suprimento de ar sendo direcionado para a tubulação em análise. Assim, como no planejamento experimental a vazão de ar será direcionada para as três tubulações ao mesmo tempo, optou-se por trabalhar com uma menor vazão máxima nas tubulações (21) e (27), afim de garantir que a vazão de ar seja constante em todas as tubulações ao longo do tempo de operação. Vale ressaltar também que essa medida visa promover uma maior reprodutibilidade dos experimentos e possiblidade de transferência dos resultados. Já no caso da tubulação (17), a vazão fornecida é constante em função do tempo para todos os graus de abertura da válvula (18), portanto utilizou-se toda a faixa operacional disponível até o platô.

Figura 5.13 – Influência do grau de abertura das válvulas (19), (18) e (24) na vazão volumétrica nas tubulações (21), (17) e (27).



Fonte: Autoria própria (2023).

Quanto a massa de material, considerando que o volume de operação do vaso é de 0,084 m^3 e a densidade *bulk* compactada do cascalho seco é de 1537 $kg.m^{-3}$ (Figura B.2), a massa de material máxima recomendada seria de 129,1 kg, sendo escolhido o valor de 130 kg como limite máximo operacional ($+\alpha$) para a realização do planejamento experimental. Quanto ao limite inferior, escolheu-se a massa de material mínima necessária para cobrir por completo o *vibrapad*, sendo esta de aproximadamente 30 kg ($-\alpha$).

Uma vez determinado os limites operacionais do equipamento, o planejamento experimental foi estabelecido como um planejamento composto central ortogonal (PCC) com três repetições no ponto central, conforme mostrado na Tabela 5.1. Destaca-se que, para verificar a possibilidade de acumulo de material na linha e possíveis entupimentos, os injetores de linha foram mantidos desligados durante todos os experimentos. O grau de abertura das válvulas (19) (g_{19}), (24) (g_{24}) e (18) (g_{18}) e a massa de sólidos (m), foram variados nas respectivas faixas de 27-55%, 27-55%, 30-50% e 30-130 kg. Vale ressaltar que o limite inferior de 27% foi escolhido para as válvulas (19) e (24) ao invés de 30% para garantir que as válvulas estivessem totalmente fechadas nessa condição. Além disso, tal redução implica em valores do nível (-1) menores, visando analisar o transporte do material em baixas velocidades. As Equações (5.1)-(5.4) foram utilizadas para transformar as variáveis dimensionais g_{19}, g_{18} e g_{24} e m nas variáveis adimensionais x_1, x_2, x_3 e x_4, respectivamente.

$$x_1 = \frac{g_{19} - 41{,}00(\%)}{9{,}05(\%)} \tag{5.1}$$

$$x_2 = \frac{g_{24} - 41{,}00(\%)}{9{,}05(\%)} \tag{5.2}$$

$$x_3 = \frac{g_{18} - 40{,}00(\%)}{6{,}47(\%)} \tag{5.3}$$

$$x_4 = \frac{m - 80{,}00(kg)}{32{,}33(kg)} \tag{5.4}$$

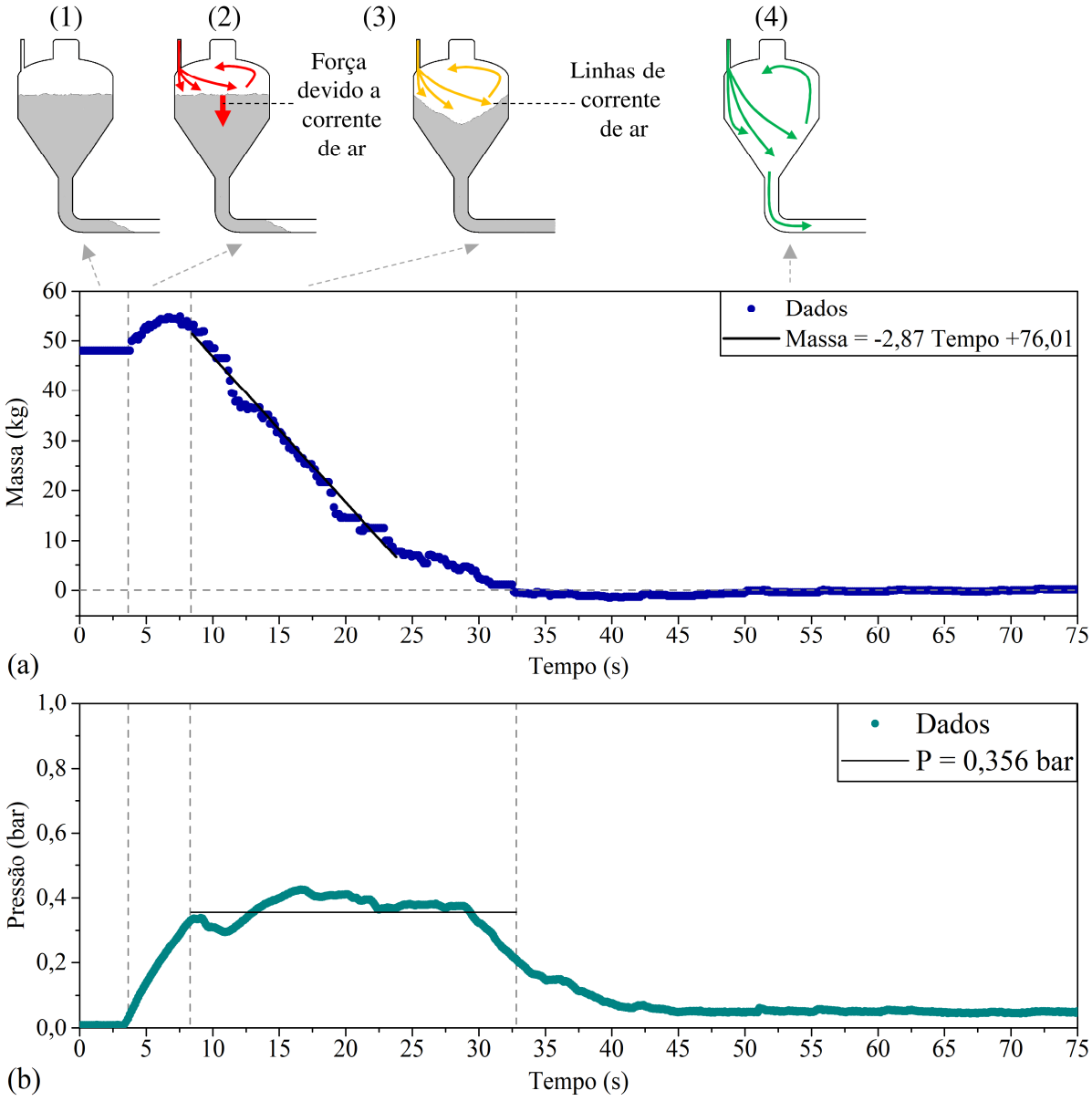
Os experimentos foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na seção 5.3. Contudo, para garantir que a massa de material desejada estivesse sendo carregada no vaso, em cada experimento a massa do material foi pesada externamente em uma balança (Urano®, UDC CO 30/5) e carregada no silo 1. O material era carregado no vaso de pressão e transportado pelas tubulações, esvaziando o silo 1 e carregando o silo 2. Quando o silo 2 alcançava cerca de 200 kg, ele era então descarregado em um tambor.

Quanto as variáveis resposta, estas foram calculadas de diferentes formas. A vazão mássica de descarga do vaso (*W*) foi calculada pela inclinação na parte linear das curvas de massa de material descarregado em função do tempo (exemplificada na Figura 5.14 (a) (3)), mostradas na Figura D.2 do Apêndice D. Tal metodologia é comumente utilizada na literatura (LU *et al.*, 2012). Já a pressão durante a descarga (*P*) foi calculada como a média da pressão após o início da descarga, das curvas de pressão medida no vaso em função do tempo (ilustrada na Figura 5.14 (b) (3)), as quais também são mostradas na Figura D.2 do Apêndice D. Vale destacar que em todos os experimentos, tais curvas apresentam quatro estados característicos, ilustrados na figura 5.14, utilizando os dados do experimento 1, como exemplo.

No estado (1) o material se encontra carregado no vaso, a medida da massa de material é constante e a pressurização ainda não teve início. No estado (2) a válvula de pressurização foi aberta, e a pressão no vaso começa a se elevar, porém o próprio material faz a função de bloquear a saída do vaso, de modo que a descarga ainda não teve início. A medida da massa de material aumenta durante a pressurização. Como ilustrado na Figura 5.14 (2), a corrente de ar

utilizada para pressurizar o vaso é desacelerada diretamente na superfície do sólido, exercendo uma força para baixo, a qual é observada como um aumento da medida da massa.

Figura 5.14 – Curvas massa (a) e pressão (b) em função do tempo durante a descarga do vaso.



Fonte: Autoria própria (2023).

No estado (3), a pressão exercida na superfície do material, em conjunto com as correntes de ar utilizadas para fluidizar o material e diluir a carga de material na linha, exercem uma força grande o suficiente para superar as forças interparticulares responsáveis por manter o leito estático, iniciando a descarga do vaso. A massa de material no vaso se reduz quase que linearmente ao longo do tempo e a pressão no vaso aumenta de forma mais moderada, quase tendendo a um platô. O comportamento observado para a pressão provavelmente se deve ao

aumento gradual do volume vazio presente no vaso à medida que o material é descarregado. Assim, mesmo com a contínua entrada de ar para pressurização, o volume a ser preenchido também aumenta, levando a uma pressão quase constante durante a descarga. Contudo, como ilustrado na Figura D.2 do Apêndice D, em alguns casos, a pressão continuava aumentando à medida que o material descarregava, indicando que o material encontrava resistências adicionais ao transporte ao longo da linha, como curvas e trechos verticais. Nesses locais o material tende a desacelerar, acarretando um aumento na pressão necessária para manter o movimento do material. A medida que a massa de material se aproxima de zero a pressão no vaso começa a se reduzir iniciando o estado (4). Nesse estado, o material foi completamente descarregado e se encontra apenas nas tubulações. Observe que nessa configuração o material é descarregado como um plugue único que preenche toda a tubulação, o qual vai sendo quebrado em plugues menores ou dunas ao longo desta, mantendo uma pressão alta na parte de trás da carga de material transportado (WYPYCH *et al.*, 2006). Assim, mesmo após a descarga completa do vaso, a pressão no vaso ainda permanece acima de zero por um certo período até que todo o material seja transportado.

Os dados de pressão ao longo do trecho horizontal da tubulação de transporte são mostrados na Figura D.3 do Apêndice D. Em todos os experimentos é possível observar picos de pressão ao longo do tempo, os quais aparecem em todos os pontos de medição da pressão, sendo este um comportamento característico de materiais sendo transportados em fase densa por plugues ou dunas (DHODAPKAR; KLINZING, 1993; RAU *et al.*, 2018). A pressão média foi calculada para cada ponto de tomada de pressão, permitindo gerar os gráficos de pressão média em função do comprimento da tubulação, mostrados na Figura D.4 do Apêndice D. Assim, a queda de pressão na linha foi determinada pelo ajuste da Equação (5.5) de Tripathi, Levy e Kalman (2018) aos dados experimentais de pressão no trecho horizontal da tubulação em função da distância entre os pontos de tomada de pressão. Nessa equação, o termo exponencial representa a zona de aceleração, enquanto que o segundo termo representa a pressão no comprimento inicial igual a zero, e o ultimo termo representa a região de escoamento totalmente desenvolvido. Assim, a queda de pressão por comprimento foi determinada pelo próprio valor do coeficiente angular da reta (a_4) que melhor se ajustou aos dados de pressão estática referentes à região de escoamento totalmente desenvolvido. Ressalta-se que, embora essa equação não tenha sido desenvolvida para regimes de transporte em fase densa, como mostrado na Figura D.4 e Tabela D.1 do Apêndice D, tal equação se ajustou muito bem aos dados de pressão em função de comprimento da tubulação, com valores de R^2 superiores a 0,99 na maioria dos casos.

$$P = a_1 \exp\left(-\frac{x}{a_2}\right) + a_3 + a_4 x \tag{5.5}$$

em que: P é a pressão (Pa), a_1, a_2, a_3 e a_4 são constantes de ajuste e x é o comprimento da tubulação (m). Assim, os dados de W, P e $\Delta P/L$ coletados foram analisados no *software* STATISTICA 7.1™ por meio de regressões múltiplas não lineares, com seus parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005; KHURI, 1996). A equação empírica ajustada à cada variável resposta é dada em notação matricial por:

$$\hat{y} = b_0 + x'b + x'Bx \tag{5.6}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} & \frac{b_{12}}{2} & \frac{b_{13}}{2} & \frac{b_{14}}{2} \\ \frac{b_{12}}{2} & b_{22} & \frac{b_{23}}{2} & \frac{b_{24}}{2} \\ \frac{b_{13}}{2} & \frac{b_{23}}{2} & b_{33} & \frac{b_{34}}{2} \\ \frac{b_{14}}{2} & \frac{b_{24}}{2} & \frac{b_{34}}{2} & b_{44} \end{bmatrix}$$

em que: $\hat{y}$ é a variável de resposta prevista, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24} e b_{34} são os coeficientes da regressão e x_1, x_2, x_3 e x_4 representam as variáveis codificadas.

5.4.2 Análise estatística dos resultados do planejamento experimental

A Tabela 5.1 apresenta os resultados do PCC realizado para o cascalho de perfuração seco, bem como informações sobre a carga de sólidos (C_s), velocidade do ar (V_{ar}) na linha (Ø = 67 mm) (Figura 5.1 (45)) e fração da vazão de ar direcionada ao vaso (F_{vaso}). Vale ressaltar que, apesar de C_s, V_{ar} e F_{vaso} não serem variáveis resposta do planejamento experimental, estas foram colocadas na Tabela 5.1 por fornecerem informações vitais sobre as condições de transporte do material, além de permitirem comparações com a literatura. Inicialmente, observa-se que uma ampla faixa de velocidades do ar foi atingida nos experimentos, variando desde 2,3 m/s até 21,7m/s. Apesar das altas velocidades alcançadas, acredita-se que o regime de fase diluída não foi atingido, visto que as cargas de sólidos foram bem superiores a 15 em todos os experimentos, variando de 27,1 até 383,1. Este resultado também está de acordo com diversas patentes, as quais descrevem que o regime de fase diluída só é alcançado para os cascalhos secos com velocidades superiores a 30,0 m/s (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007,

2011; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT *et al.*, 2004; MEYER, 1971). Contudo, esta hipótese será verificada na seção 5.4.4.

Outro ponto de destaque da Tabela 5.1 é que, mesmo para valores semelhantes de V_{ar} e F_{vaso}, observa-se valores diferentes de W (experimentos 10 e 12 ou 14 e 16, por exemplo), o que vai de encontro as curvas típicas de vazão de descarga em função da vazão do ar, descritas na Figura 2.19. Em tais curvas, a massa a ser descarregada bem como a fração de ar direcionada para a fluidização são mantidos fixos. Assim, as curvas típicas de vazão de descarga do vaso não refletem o efeito dessas variáveis na vazão de descarga. Wypych *et al.* (2006), por exemplo, destacam que o desempenho e o controle da vazão de descarga de vasos de pressão sem válvula de controle de pressurização é completamente dependente do grau de aeração/fluidização do material durante a descarga, como será visto em maiores detalhes na seção 5.4.4. Observa-se também que a condição 6 forneceu o menor valor de vazão de descarga, enquanto a condição 19 forneceu o maior. Já quanto a pressão média de descarga e a queda de pressão na linha, a condição 1 forneceu os menores valores, enquanto que a condição 19 forneceu os maiores.

Os resultados apresentados na Tabela 5.1 foram analisados estatisticamente. Os efeitos das variáveis com nível de significância inferior a 0,05 são apresentados na Tabela D.2 do Apêndice D. Observa-se que em todos os casos x_1, x_2, x_3 e x_4 influenciaram significativamente, e de diferentes formas, na vazão e pressão de descarga, bem como na queda de pressão ao longo da linha, com efeitos lineares e quadráticos na maioria dos casos. A presença de efeitos de interação também foi observada. Quanto a vazão de descarga (W), as variáveis x_1, x_2 e x_3 apresentaram fatores com influência relativamente semelhante, enquanto que x_4 se apresentou menos influente. Para a pressão média de descarga (P), x_1, x_2, x_3 e x_4 apresentaram fatores com influencias semelhantes, sendo x_1, como esperado, o mais influente, visto que esta variável está diretamente relacionada a vazão de ar direcionada para a pressurização. Já para a queda de pressão no trecho horizontal ($\Delta P/L$), a massa de material a ser transportado (x_4) foi o fator mais influente. Nesse tipo de descarga o material é descarregado como um plugue único, assim, para uma mesma vazão de descarga, uma maior massa de material descarregado irá resultar em uma maior parte da tubulação sendo preenchida totalmente ou parcialmente com o material. Como resultado, o atrito friccional entre o material e a tubulação aumentará, consequentemente influenciando a queda de pressão na linha (MILLS, 2004; WOODCOCK; MASON, 1987). Vale ressaltar que x_3 também se apresentou como um fator de grande influência na queda de pressão, o que é esperado, visto que essa variável está diretamente ligada ao grau de aeração do material que está sendo descarregado, portanto influenciando a facilidade de transporte do material ao longo da linha.

Tabela 5.1 – Resultados do planejamento composto central.

#	Condições operacionais				Variáveis resposta			Informações		
	x_1 (g_{19} %)	x_2 (g_{24} %)	x_3 (g_{18} %)	x_4 (m kg)	W ($kg.s^{-1}$)	P (bar)	ΔP/L (bar)	C_s ((kg/s)/(kg/s))	V_{ar}^* (m/s)	F_{vaso} (%)
1	-1 (31,9)	-1 (31,9)	-1 (33,5)	-1 (47,7)	2,87	0,36	107,4	286,6	2,4	64,2
2	-1 (31,9)	-1 (31,9)	-1 (33,5)	1 (112,3)	1,83	0,58	796,5	188,4	2,3	58,4
3	-1 (31,9)	-1 (31,9)	1 (46,5)	-1 (47,7)	4,61	0,66	518,2	269,9	4,0	80,2
4	-1 (31,9)	-1 (31,9)	1 (46,5)	1 (112,3)	4,57	0,99	702,3	280,0	3,8	78,9
5	-1 (31,9)	1 (50,1)	-1 (33,5)	-1 (47,7)	2,18	0,34	194,9	35,3	14,6	9,4
6	-1 (31,9)	1 (50,1)	-1 (33,5)	1 (112,3)	1,71	0,56	494,7	27,1	14,2	8,9
7	-1 (31,9)	1 (50,1)	1 (46,5)	-1 (47,7)	3,28	0,65	1031,4	46,2	16,7	19,1
8	-1 (31,9)	1 (50,1)	1 (46,5)	1 (112,3)	3,24	0,88	1280,7	47,7	16,0	18,4
9	1 (50,1)	-1 (31,9)	-1 (33,5)	-1 (47,7)	4,47	0,76	801,1	128,5	8,2	92,0
10	1 (50,1)	-1 (31,9)	-1 (33,5)	1 (112,3)	3,87	0,97	1265,8	99,2	9,2	91,7
11	1 (50,1)	-1 (31,9)	1 (46,5)	-1 (47,7)	5,12	0,93	888,6	115,8	10,4	93,8
12	1 (50,1)	-1 (31,9)	1 (46,5)	1 (112,3)	5,02	1,10	1286,9	123,2	9,6	93,8
13	1 (50,1)	1 (50,1)	-1 (33,5)	-1 (47,7)	3,80	0,68	376,9	42,7	21,0	45,8
14	1 (50,1)	1 (50,1)	-1 (33,5)	1 (112,3)	3,41	0,94	635,0	38,6	20,8	44,4
15	1 (50,1)	1 (50,1)	1 (46,5)	-1 (47,7)	3,79	0,90	568,4	42,0	21,2	44,8
16	1 (50,1)	1 (50,1)	1 (46,5)	1 (112,3)	4,02	1,02	941,0	45,9	20,0	45,8
17	-1,547 (27,0)	0 (41,0)	0 (40,0)	0 (80,0)	2,45	0,60	817,8	65,4	8,8	21,9
18	1,547 (55,0)	0 (41,0)	0 (40,0)	0 (80,0)	3,85	1,03	1082,4	51,7	18,6	69,7
19	0 (41,0)	-1,547 (27,0)	0 (40,0)	0 (80,0)	7,47	1,42	1483,0	383,1	4,6	99,9
20	0 (41,0)	1,547 (55,0)	0 (40,0)	0 (80,0)	4,63	0,87	1245,9	50,4	21,7	25,6
21	0 (41,0)	0 (41,0)	-1,547 (30,0)	0 (80,0)	2,15	0,48	661,0	52,2	9,7	40,9
22	0 (41,0)	0 (41,0)	1,547 (50,0)	0 (80,0)	3,80	0,95	1345,4	75,0	11,9	51,5
23	0 (41,0)	0 (41,0)	0 (40,0)	-1,547 (30,0)	2,87	0,37	208,2	59,4	11,4	46,8
24	0 (41,0)	0 (41,0)	0 (40,0)	1,547 (130)	2,31	0,72	752,9	47,0	11,6	45,6
25	0 (41,0)	0 (41,0)	0 (40,0)	0 (80,0)	3,63	0,79	1259,2	75,9	11,3	47,7
26	0 (41,0)	0 (41,0)	0 (40,0)	0 (80,0)	3,62	0,78	1258,0	77,3	11,1	46,6
27	0 (41,0)	0 (41,0)	0 (40,0)	0 (80,0)	3,62	0,81	1244,9	76,5	11,1	46,1

*Parâmetro calculado com base na soma de todas as vazões de ar direcionadas a tubulações de transporte. Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dos resultados experimentais e das análises estatísticas, três equações, semelhantes à Equação (5.6), foram ajustadas aos dados para representar a vazão de descarga (*W*), pressão média de descarga (*P*) e queda de pressão na linha (*ΔP/L*) em função de x_1, x_2, x_3 e x_4 conforme as Equações (5.7)-(5.9). Nessas equações, os parâmetros apresentados foram aqueles significativos em um teste de hipótese com distribuição *t* de *Student* (erro máximo de 5,0%). Os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram 0,970, 0,931 e 0,953 respectivamente para as Equações (5.7)-(5.9). A análise dos resíduos de regressão indicou que os resíduos estavam distribuídos aleatoriamente e independentemente em torno de zero. Tais resultados indicam que as equações ajustadas são representativas dos dados experimentais.

$$W\,(kg\,/\,s) = 3,679 + x'b + x'Bx \tag{5.7}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,547 \\ -0,545 \\ 0,580 \\ -0,160 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,237 & 0 & -0,294 & 0 \\ 0 & 0,974 & -0,191 & 0 \\ -0,294 & -0,191 & -0,312 & 0,160 \\ 0 & 0 & 0,16 & -0,474 \end{bmatrix}$$

$$P(bar) = 0,808 + x'b + x'Bx \tag{5.8}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,142 \\ -0,060 \\ 0,128 \\ 0,112 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0,046 & 0 \\ 0 & 0,132 & 0 & 0 \\ -0,046 & 0 & -0,048 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,117 \end{bmatrix}$$

$$\Delta P\,/\,L(Pa\,/\,m) = 1289,85 + x'b + x'Bx \tag{5.9}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 98,48 \\ -58,24 \\ 173,38 \\ 180,83 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -127,65 & -162,40 & -83,32 & 0 \\ -162,40 & 0 & 105,93 & 0 \\ -83,32 & 105,93 & -105,45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -323,93 \end{bmatrix}$$

5.4.3 Otimização das condições operacionais

Para analisar as superfícies de resposta e determinar as condições que promovem a máxima vazão de descarga, uma análise canônica da Equação (5.7) foi realizado. A equação na forma canônica foi expressa em termos das novas variáveis w_1, w_2, w_3 e w_4, de acordo com a Equação (5.10). Ao analisar as raízes características (λ_i) dessa equação, observa-se que a resposta decresce ao movimento na direção w_1, w_2 e w_3, mas cresce na direção do eixo w_4. Assim, buscou-se analisar as condições operacionais cuja a vazão de descarga seja alta e a queda

de pressão na linha não seja excessiva. O que segundo Mills (2001), são valores inferiores a 2000 Pa/m, para que distancias razoáveis de transporte em fase densa possam ser alcançadas. Para isso, a correlação entre as variáveis w_i e x_i deve ser estabelecida, o que pode ser realizado através da Equação (5.11). Nessa equação, os valores de m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}; m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{31}, m_{32}, m_{33}, m_{34}, m_{41}, m_{42}, m_{43} e m_{34} podem ser determinados pelas equações (5.12-5.15) considerando que m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}; m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{31}, m_{32}, m_{33}, m_{34}, m_{41}, m_{42}, m_{43} e m_{34} sejam normalizados. Um programa foi desenvolvido no *software* Maple® 2015.1 para a realização dos cálculos necessários. A Equação (5.16) mostra a correlação entre as variáveis w_i e x_i obtida. Tal equação foi utilizada para encontrar as condições em x_1, x_2, x_3 e x_4 que dão valor zero para w_1, w_2 e w_3, enquanto w_4 foi variado (-5 até 5). Com as condições de x_1, x_2, x_3 e x_4 encontradas determinou-se os valores de W correspondentes pela Equação (5.7), além dos valores de P e $\Delta P/L$ pelas Equações (5.8) e (5.9), os resultados são mostrados na Figura 5.15.

$$W(kg/s) = 3{,}956 - 0{,}523w_1^2 - 0{,}388w_2^2 - 0{,}119w_3^2 + 0{,}981w_4^2 \tag{5.10}$$

$$\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} & m_{41} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} & m_{42} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} & m_{43} \\ m_{14} & m_{24} & m_{34} & m_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 + x_{\sim 01} \\ x_2 + x_{\sim 02} \\ x_3 + x_{\sim 03} \\ x_4 + x_{\sim 04} \end{pmatrix} \tag{5.11}$$

$$\begin{pmatrix} b_{11} - \lambda_1 & b_{21} & b_{31} & b_{41} \\ b_{12} & b_{22} - \lambda_1 & b_{32} & b_{42} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} - \lambda_1 & b_{43} \\ b_{14} & b_{24} & b_{34} & b_{44} - \lambda_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \end{pmatrix} = 0 \tag{5.12}$$

$$\begin{pmatrix} b_{11} - \lambda_2 & b_{21} & b_{31} & b_{41} \\ b_{12} & b_{22} - \lambda_2 & b_{32} & b_{42} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} - \lambda_2 & b_{43} \\ b_{14} & b_{24} & b_{34} & b_{44} - \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \end{pmatrix} = 0 \tag{5.13}$$

$$\begin{pmatrix} b_{11} - \lambda_3 & b_{21} & b_{31} & b_{41} \\ b_{12} & b_{22} - \lambda_3 & b_{32} & b_{42} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} - \lambda_3 & b_{43} \\ b_{14} & b_{24} & b_{34} & b_{44} - \lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \\ m_{34} \end{pmatrix} = 0 \tag{5.14}$$

$$\begin{pmatrix} b_{11}-\lambda_4 & b_{21} & b_{31} & b_{41} \\ b_{12} & b_{22}-\lambda_4 & b_{32} & b_{42} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33}-\lambda_4 & b_{43} \\ b_{14} & b_{24} & b_{34} & b_{44}-\lambda_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{41} \\ m_{42} \\ m_{43} \\ m_{44} \end{pmatrix} = 0 \tag{5.15}$$

$$\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,261 & 0,582 & -0,770 & -0,009 \\ -0,032 & 0,042 & 0,054 & -0,997 \\ -0,507 & 0,595 & 0,620 & 0,075 \\ 0,821 & 0,552 & 0,140 & 0,004 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1+0,924 \\ x_2+0,316 \\ x_3+0,371 \\ x_4-0,106 \end{pmatrix} \tag{5.16}$$

em que: λ_1, λ_2, λ_3 e λ_4 são raízes da Equação (5.10), m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}; m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{31}, m_{32}, m_{33}, m_{34}, m_{41}, m_{42}, m_{43} e m_{34} sãos coeficientes da equação de correlação entre w_i e x_i (Equação 5.12) e $x_{\sim 01}$, $x_{\sim 02}$, $x_{\sim 03}$ e $x_{\sim 04}$ são as condições do ponto estacionário.

A Figura 5.14 mostra que ao se variar w_4, observa-se que x_1, x_3 e x_4 permanecem quase constantes em valores médios descodificados de 49,3%, 42,6% e 76,6 kg, enquanto x_2 varia de 55% até 27%. Como resposta, a vazão de descarga apresenta um comportamento parabólico, ou seja, os pontos de máxima vazão ocorrem com x_2 igual a 55% ou 27%, isto é, quando a válvula (24) (Figura 5.1) está quase totalmente aberta, e quando a válvula está totalmente fechada e o ar é direcionado integralmente para o vaso. A pressão média de descarga também apresenta um comportamento parabólico muito semelhante ao da vazão. Por outro lado, a queda de pressão na linha cresce linearmente com w_4, ou seja, inversamente proporcional ao grau de abertura da válvula referente a x_2. Tais comportamentos serão discutidos na seção 5.4.4.

Para confirmar a presença dos pontos de máxima vazão preditos pelo modelo, foram realizados experimentos nas condições mostradas na Tabela 5.2. As condições referentes a x_2 igual 27% e 55% foram, respectivamente, chamadas de C1 e C2. Os resultados são mostrados na Figura D.6 do Apêndice D e na Tabela 5.2. Nessa tabela, observa-se que em ambas condições houve uma boa concordância entre os dados preditos e observados de vazão de descarga (W_{mod} e W_{exp}), pressão média de descarga (P_{mod} e P_{exp}) e queda de pressão na linha ($\Delta P/L_{mod}$ e $\Delta P/L_{exp}$), com erros (Erro (W), Erro (P) e Erro ($\Delta P/L$)) inferiores a 5% em todos os casos. Tais resultados, confirmam a presença dos pontos ótimos previstos.

Em termos práticos de operação também é importante considerar os tempos de enchimento, descarga e transporte do material para avaliar a real aplicabilidade das condições ótimas obtidas. A Figura D.7 do Apêndice D mostra um ciclo típico de operação do vaso de pressão na condição C2. Para a condição C1, apenas os tempos de pressurização, descarga e transporte são diferentes, os quais podem ser observados na Figura D.6 do Apêndice D. Assim,

os tempos de duração dos ciclos nas condições C1 e C2 foram calculados como sendo ambos próximos à 40 s. Veja que, apesar da condição C1 apresentar uma maior vazão de descarga do que C2, o tempo de pressurização da condição C1 faz com que o tempo total de ciclo nessa condição seja igual ao de C2.

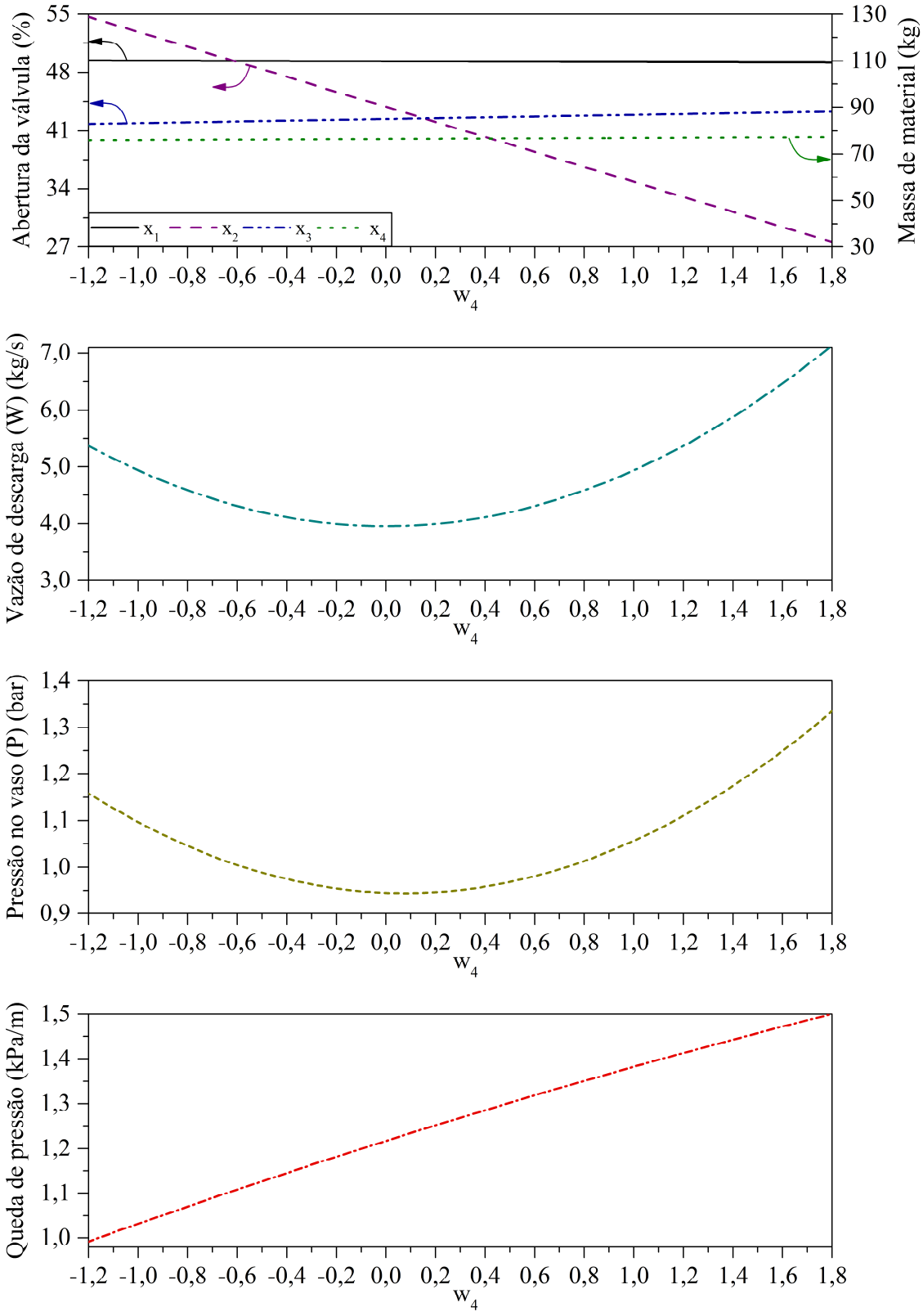
Assim, utilizando essas condições, no período de 1 h, por exemplo, seria possível transportar 6,9 toneladas de material. Nesse caso, a condição C2 oferece a vantagem de se obter uma menor queda de pressão ao longo da linha de transporte, contudo a vazão de ar necessária é quase o dobro daquela utilizada na condição C1. Tais variáveis refletem diretamente na potência do compressor que seria necessária para realizar o transporte do material. Para uma avaliação rápida e aproximada, de modo a permitir a comparação de diferentes variáveis no projeto, Mills (2004) informa que pode-se utilizar um modelo simples baseado em compressão isotérmica para estimar a potência requerida pelo compressor, conforme descrito pela equação:

$$Potência = 165 Q_{MT} \ln\left(\frac{p_4}{p_3}\right) \tag{5.17}$$

em que: Q_{MT} a é a vazão mássica de ar (kg/s), p_3 pressão de entrada do compressor (kN/m^2 abs) e p_4 pressão de saída do compressor (kN/m^2 abs).

Na Equação (5.17) a diferença de pressão no compressor, $p_4 - p_3$, equivale à queda de pressão na linha de transporte (MILLS, 2004). Assim, para realizar o transporte do material em um trecho horizontal, por exemplo, de 50 m, seria necessário um compressor de 5 cv e 9 cv para as respectivas condições C1 e C2. Ou seja, apesar da condição 1 fornecer uma maior queda de pressão na linha, a vazão de ar necessária para o transporte é menor, resultando em uma menor potência requerida. Outro ponto de destaque da condição C1 é justamente a menor velocidade de transporte de 6,9 ± 0,1 m/s, quando comparada aos 22,2 ± 0,2 m/s da condição C2, o que consequentemente reduz o desgaste das tubulações. Por outro lado, o sinal de pressão ao longo do tempo da Figura D.6 do Apêndice D sugere que o material é transportado como um plugue inteiriço na condição C1, enquanto que na condição C2, o plugue é dividido em diversos outros menores. Assim, a condição C1 está sujeita uma maior possibilidade de entupimento, visto que o ar tem maior dificuldade de permear um plugue inteiriço do que diversos plugues menores (MILLS, 2004). Portanto, uma sugestão para trabalhos futuros seria analisar o transporte do material na condição C1, porém utilizando os injetores de linha para realizar o corte do plugue inteiriço em plugues menores. Tal prática possibilitaria não só maior segurança na operação nessa condição, mas também uma possível redução na queda de pressão ao longo da linha.

Figura 5.15 – Influência das variáveis operacionais na resposta ótima da vazão de descarga (W), bem como pressão de descarga (P) e queda de pressão (ΔP/L) na linha esperados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 5.2 – Resultados de confirmação dos pontos ótimos preditos.

Descrição	Variável	Condição C1	Condição C2
Condições operacionais*	w_4	1,87	-1,23
	x_1 (%)	49,2	49,5
	x_2 (%)	27,0	55,0
	x_3 (%)	43,3	41,8
	x_4 (kg)	76,8	76,4
	Q_T (m^3/h)	154,9	285,9
Dados preditos	W_{mod} (kg/s)	7,39	5,44
	P_{mod} (bar)	1,37	1,17
	$\Delta P/L_{mod}$ (Pa/m)	1510,10	986,26
Dados observados	W_{exp} (kg/s)	7,43 ± 0,14	5,66 ± 0,20
	P_{exp} (bar)	1,43 ± 0,59	1,12 ± 0,02
	$\Delta P/L_{exp}$ (Pa/m)	1456,70 ± 191,28	945,74 ± 21,37
Erro entre dados preditos e observados	Erro (W) (%)	0,59	3,82
	Erro (P) (%)	4,34	4,57
	Erro (ΔP/L) (%)	3,67	4,28

*Q_T é a vazão na tubulação de transporte do material.

Fonte: Autoria própria (2023).

5.4.4 Influência das variáveis operacionais no comportamento de descarga do vaso e transporte pneumático de cascalhos de perfuração

As equações de descrição das variáveis analisadas estão em função do grau de abertura das válvulas, o que de certa forma, restringe a reprodutibilidade dos resultados obtidos, bem como dificulta a transferência dos resultados. Assim, a vazão média mensurada nas tubulações (21), (17) e (27) da Figura 5.1, durante o ciclo de operação do vaso em cada um dos experimentos da Tabela 5.1, foi correlacionada com o grau de abertura das respectivas válvulas (19), (18) e (24). Os dados são mostrados na Figura D.5 do Apêndice D, com os quais ajustou-se uma equação polinomial do tipo:

$$g = aq^2 + bq + c \tag{5.18}$$

em que: q é a vazão volumétrica de ar (m^3/h), g o grau de abertura da válvula e a, b e c são as constantes de ajuste. As Equações (5.19)-(5.21) foram obtidas com R^2 acima de 0,99 para as respectivas válvulas (19), (24) e (18), as quais alteram a vazão nas tubulações (21), (17) e (27) da Figura 5.1.

$$g_{19} = -5,4x10^{-4} q_1^2 + 0,24q_1 + 30,39 \tag{5.19}$$

$$g_{24} = -9,5x10^{-5} q_2^2 + 0,14q_2 + 30,23 \quad (5.20)$$

$$g_{18} = 1,0x10^{-2} q_3^2 + 0,30q_3 + 29,90 \quad (5.21)$$

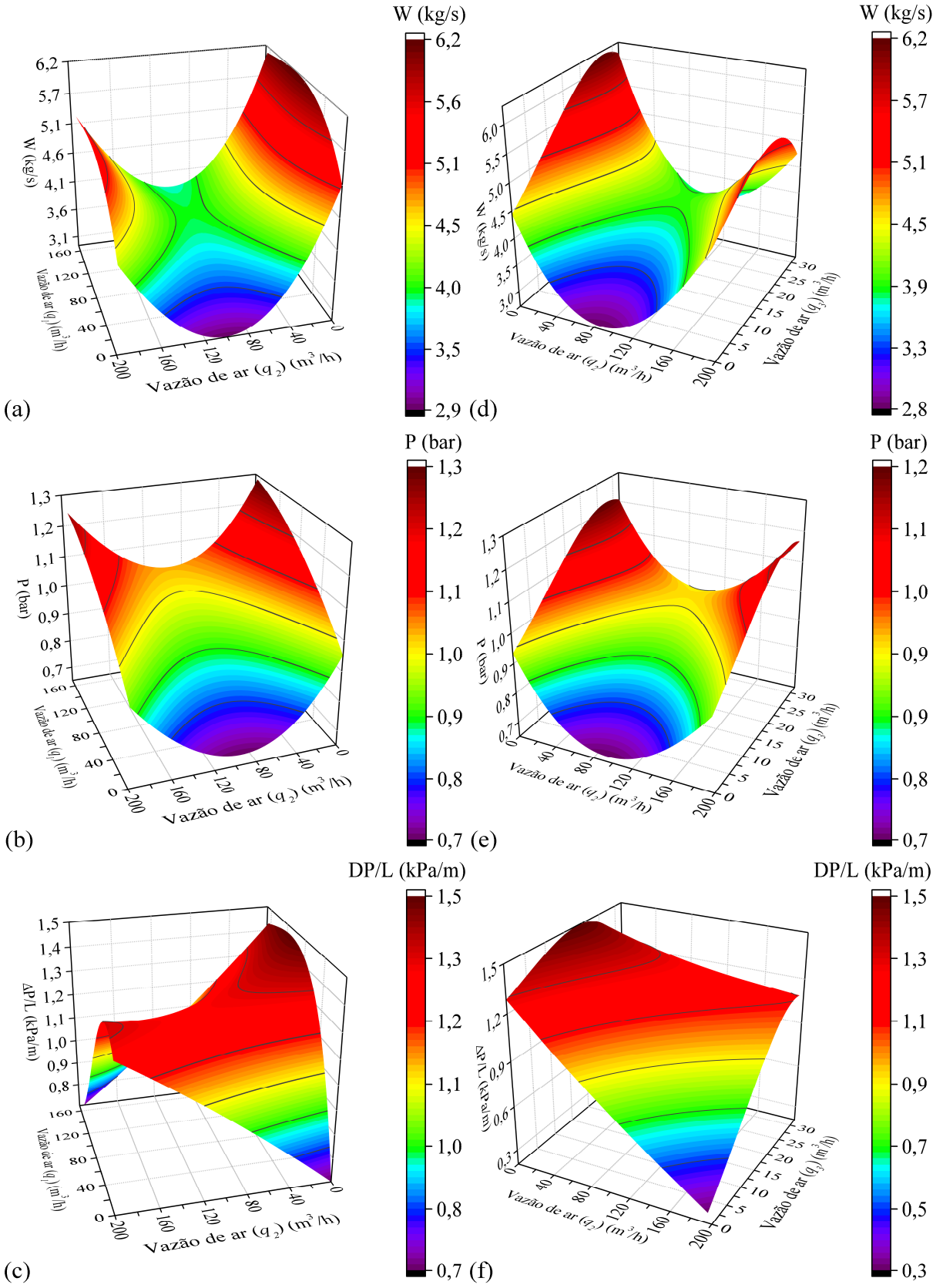
As Equações (5.19)-(5.21) foram introduzidas em cada uma das Equações (5.7)-(5.9) na forma dimensional, obtendo as Equações (D.1)-(D.3), as quais, devido ao tamanho, são apresentadas no Apêndice D. Tais equações apresentam a vantagem de representar as variáveis resposta em função das vazões volumétricas de entrada nas tubulações e da massa de material carregado no vaso, facilitando a comparação do comportamento do sistema com outros existentes, assim como a reprodução dos resultados obtidos. As Equações (D.1)-(D.3) foram então utilizadas para gerar as superfícies de resposta com as quais realizou-se as análises do efeito das variáveis operacionais nas variáveis resposta. Ressalta-se ainda que os comportamentos das superfícies de respostas obtidas pelas Equações (5.7)-(5.9) foram muito semelhantes àqueles obtidos com as Equações (D.1)-(D.3).

Iniciando-se pela variável q_2 (x_2), vazão de ar injetado no bocal de descarga (27) (Figura 5.1), a Figura 5.16 mostra as superfícies de resposta correlacionando q_2 com q_1 e q_3. As variáveis não mostradas foram mantidas nos valores ótimos da Tabela 5.2. Observa-se que, em todos os casos, um comportamento parabólico foi observado para W e P em função da vazão q_2, assim como observado na Figura 5.15. Para melhor ilustrar os fenômenos envolvidos durante a descarga do vaso a Figura 5.17 foi criada. Na situação (1) dessa figura, a vazão em q_2 era baixa ou nula, assim o material localizado na curva de descarga do vaso, ilustrado na região (B), proporciona uma vedação do vaso e uma resistência adicional para se iniciar a descarga do material. Desta forma, uma alta pressão precisou ser atingida para superar as forças interparticulares que mantêm o leito fixo e dar início a descarga do vaso. Veja, por exemplo, no experimento 19 da Figura D.2 ou na condição C1 da Figura D.6 do Apêndice D, que quando q_2 era igual a zero, pressões próximas a 3 bar eram alcançadas antes de se iniciar a descarga do vaso. Wypych *et al.* (2006) descrevem que a pressão de operação do vaso é diretamente correlacionada a vazão de descarga. Assim, como mostrado na Figura 5.16, em baixas vazões de q_2 (< 40 m^3/h), teve-se altas pressões e vazões de descarga. Nessa situação o material era descarregado como um plugue único com pouca aeração, visto que q_2 era baixo, de modo que existia um elevado atrito entre as próprias partículas e as partículas e a parede do tubo (WOODCOCK; MASON, 1987). Além disso, devido as elevadas vazões de descarga, altas cargas de sólido foram alcançadas (Tabela 5.1). Como resultado, uma alta queda de pressão foi observada na Figura 5.16 para baixas vazões de q_2.

Em valores intermediários de q_2 (cerca de 40-160 m^3/h), constatou-se menores vazões e pressões de descarga na Figura 5.16. Como ilustrado no estado (2) da Figura 5.17, nessa situação, o material contido na região (B) foi removido quando as válvulas foram abertas. Além disso, o material era continuamente diluído pela corrente de ar referente a q_2. Como consequência, uma menor pressão no vaso foi atingida para iniciar a descarga do material, resultando em menores vazões de descarga. Veja, por exemplo, nos experimentos 25, 26 e 27 da Figura D.2 e Tabela 5.1, que pressões não superiores a 1 bar foram necessárias para iniciar a descarga do material e vazões bem menores do que a do experimento 19 foram encontradas. Devido a menor vazão de descarga e maior velocidade do ar, menores cargas de sólido foram encontradas nesse estado. Além disso, a corrente de ar injetada na curva de descarga (q_2) aerava o material de forma a reduzir o atrito das partículas e facilitar a permeação do ar. Assim, na Figura 5.16 constatou-se menores quedas de pressão para vazões intermediárias de q_2.

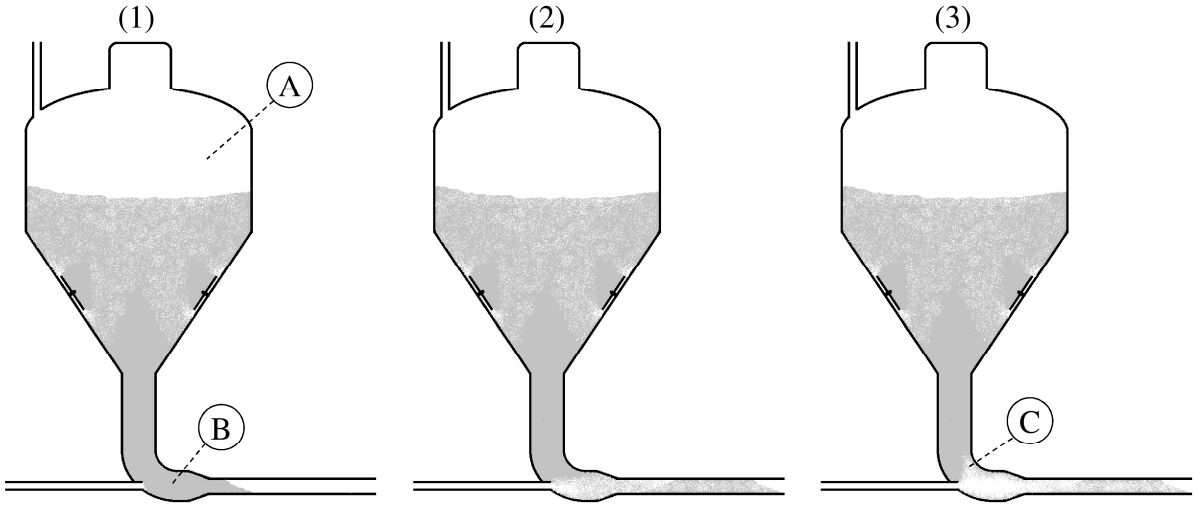
À medida que a vazão de ar q_2 aumentava além de cerca de 160 m^3/h, a vazão e a pressão de descarga começavam a aumentar novamente, como pode ser observado na Figura 5.16, porém mantendo valores menores do que àqueles notados para baixas vazões de q_2 (< 40 m^3/h). Nesse estado, mostrado na Figura 5.17 (3), acredita-se que a vazão de ar era grande o suficiente para que uma pequena porção da corrente de ar fosse direcionada para o vaso, como ilustrado em (C). Woodcock e Manson (1987) descrevem que para as válvulas L ou J, as quais tem uma geometria semelhante à da curva de descarga do vaso, quando a vazão de ar injetado na lateral da curva da válvula (vazão de aeração) é muito elevada, parte do ar acaba por voltar pela tubulação em direção ao silo, dificultando o escoamento do material. No caso do vaso de pressão, existe uma pressão na parte superior ao material, que força a descarga deste através do bocal. Assim, estabelece-se a hipótese de que a porção da corrente de ar direcionada para o vaso acabava apenas por aumentar a pressão de descarga do vaso. Tal fenômeno pode ser observado ao se comparar os experimentos 25, 26 e 27 com o experimento 20 da Figura D.2 do Apêndice D e Tabela 5.1, onde nota-se que uma maior pressão foi necessária tanto para iniciar a descarga do vaso quanto para mantê-la no experimento 20. Desta forma, entende-se que as maiores pressões no vaso resultaram em maiores vazões de descarga, também observadas comparando os experimentos citados. Em relação a queda de pressão na linha, a maior vazão de descarga proporcionada pelos altos valores de q_2 poderia resultar em um aumento na queda de pressão. Por outro lado, o aumento da vazão q_2 acabou por também proporcionar uma maior aeração do material descarregado e uma redução da carga de sólidos. Tais efeitos resultaram em uma redução na queda de pressão para aumentos de q_2 além de 160 m^3/h, como observado na Figura 5.16 (f), ou um pequeno aumento, como notado em algumas regiões da Figura 5.16 (c).

Figura 5.16 – Influência das variáveis q_2 e q_1 (a-c) e q_2 e q_3 (d-f) na vazão de descarga (W), pressão média de descarga (P) e queda de pressão na linha de transporte ($\Delta P/L$).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 5.17 – Ilustração da influência de x_2 no comportamento de descarga do vaso momentos após o início da pressurização: $q_2 < 40$ m^3/h (1), $40 < q_2 < 160$ m^3/h (2) e $q_2 > 160$ m^3/h (3).



Fonte: Autoria própria (2023).

Passando para a análise da variável q_1 (x_1), a Figura 5.18 mostra a influência dessa variável em conjunto com m para duas situações distintas, quando $q_2 = 0{,}0$ m^3/h (a-c) e $q_2 = 195{,}0$ m^3/h (d-f), ou seja, condições de máxima vazão de descarga proporcionada pela variável x_2. Em ambas situações se constatou que W e P aumentavam com o aumento da vazão q_1, o que é esperado, visto que o aumento de q_1 implica em uma maior vazão de ar sendo direcionada para a pressurização do vaso, o qual acabava por alcançar pressões mais altas. Com as maiores pressões, tem-se forças maiores direcionando o material para o bocal de descarga do vaso, aumentando a vazão de descarga. Isto também pode ser verificado por comparação entre os experimentos 17 e 18 da Figura D.2 do Apêndice D e Tabela 5.1.

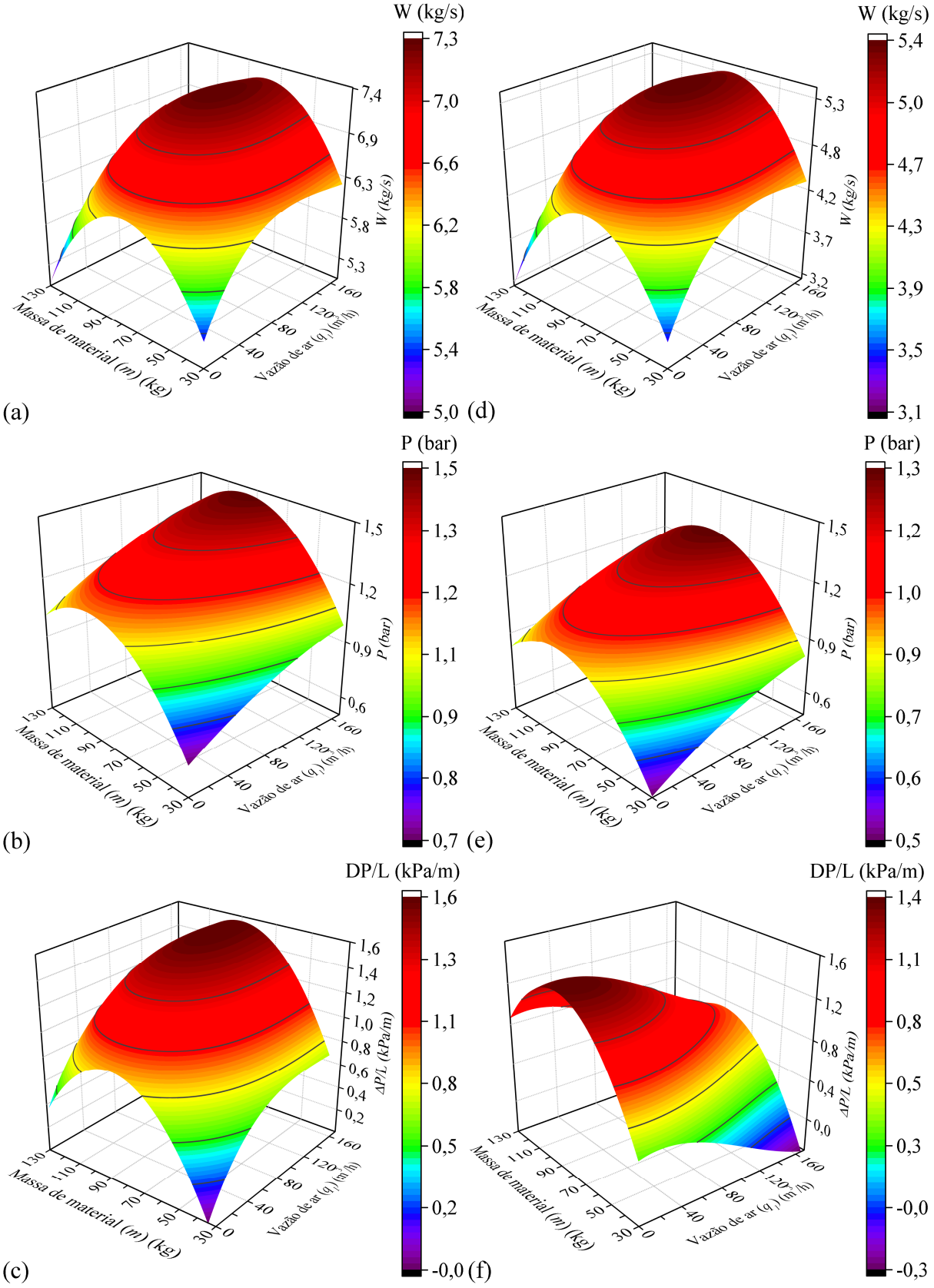
Quanto a queda de pressão na linha, para $q_2 = 0{,}0$ m^3/h, a Figura 5.18 (c) mostra que esta variável aumentava com a vazão em q_1, provavelmente devido ao aumento da vazão de descarga. Contudo, para $q_2 = 195{,}0$ m^3/h, a Figura 5.18 (f) mostra que a queda de pressão na linha se reduzia com o aumento de q_1. Uma hipótese para esse fenômeno seria que o material se encontrava mais aerado na tubulação devido à alta vazão de q_2. Assim, apesar de q_1 proporcionar um aumento na vazão de descarga, essa mesma corrente de ar passava mais facilmente através do material ao longo da tubulação, permitindo que esse ficasse ainda mais aerado (menor carga de sólidos), reduzindo o atrito interparticular e, consequentemente a queda de pressão na linha (WOODCOCK; MASON, 1987). Compare, por exemplo, os experimentos (7) e (8) com os experimentos (15) e (16) da Tabela 5.1, os quais foram realizados em condições próximas àquelas mostradas na Figura 5.18 (f). A vazão de descarga aumentou com o aumento

de q_1, contudo, em proporção, a carga de sólidos acabou se reduzindo, assim como a queda de pressão na linha.

A influência da variável independente m (x_4) nas variáveis resposta analisadas pode ser observada nas Figuras 5.18 e 5.20 (a-c). Nota-se que, até cerca de 77 kg, a pressão média de descarga aumentou com a massa de material carregado no vaso, acarretando um aumento da vazão de descarga. Vale ressaltar novamente que, nesse tipo de vaso de pressão, o próprio material fazia o papel de vedação do bocal de descarga, permitindo sua pressurização (KLINZING *et al.*, 2010). Assim, era esperado que ocorresse um aumento da pressão e vazão de descarga com o aumento da massa de material. Contudo, uma questão surge, tal aumento seria devido a maior pressão para iniciar a descarga do vaso, ou devido a maior resistência para se descarregar e transportar uma carga maior de material?

Ao se analisar os pares de experimentos da Figura D.2 do apêndice D, constatou-se que, quando apenas a massa de material foi variada, a pressão necessária para iniciar a descarga foi praticamente a mesma. Os experimentos 23 e 24 ilustram bem esse fenômeno. Mesmo utilizando massas muito diferentes de material, o vaso começava a descarregar quando alcança cerca de 0,47 bar para 30 kg e 0,49 bar para 130 kg. O mesmo ocorreu em diversos outros pares de experimentos, como 9 e 10, 11 e 12, e 13 e 14, porém com pressões para iniciar a descarga diferentes. Ou seja, a pressão necessária para iniciar a descarga do vaso parece estar muito mais ligada as vazões fornecidas em q_1, q_2 e q_3, as quais auxiliam a superar as forças que mantêm o leito estático, do que a própria massa de material. Isso também implica na constatação de que, uma carga maior do que 30 kg não necessariamente garante uma maior vedação do vaso. Visto que a pressão necessária para iniciar a descarga foi praticamente a mesma para 30 e 130 kg. Provavelmente, apenas o preenchimento da curva de descarga com material já seja suficiente para proporcionar a vedação do vaso de pressão. Observe também que justamente a massa de material localizada nessa curva que foi removida pela corrente de ar referente a q_2, como ilustrado na Figura 5.17 (B). Tal hipótese é corroborada pelos resultados do experimento 19, em que se observou a necessidade de se alcançar elevadas pressões (Figura D.2 do Apêndice D) para iniciar a descarga do vaso, quando o material contido na curva não era inicialmente removido.

Figura 5.18 – Influência das variáveis m e q_1 para q_2 = 0,0 m^3/h (a-c) e q_2 = 195 m^3/h (d-f) na vazão de descarga (W), pressão média de descarga (P) e queda de pressão ($\Delta P/L$).



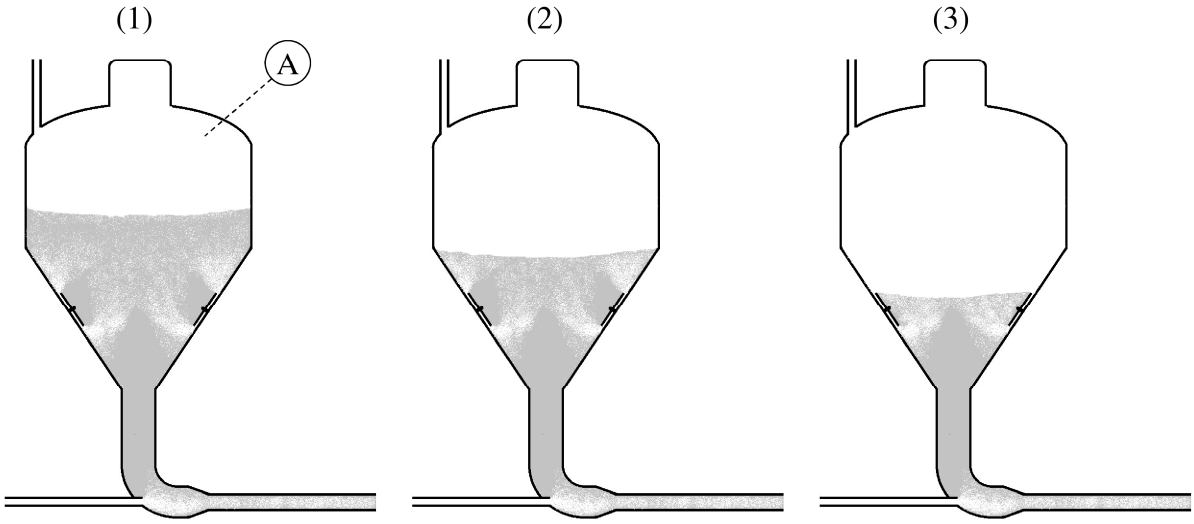
Fonte: Autoria própria (2023).

Assim, o aumento da pressão de descarga com a massa de material até cerca de 77 kg mostrado nas Figuras 5.18 (b) e (e), provavelmente está vinculado ao maior atrito, entre o próprio material e o material e as paredes do sistema, durante a descarga e transporte de uma maior carga de material. Mills (2004) e Woodcock e Manson (1987) ressaltam que as características convencionais do vaso de pressão e da linha de transporte não se aplicam ao tipo de sistema de plugue único, pois a vazão de descarga é fortemente dependente da velocidade do plugue e, principalmente, das obstruções na linha de transporte. Como revisado na seção 2.7.6.2, a pressão necessária para movimentar um plugue de material varia exponencialmente com o comprimento do plugue (MILLS, 2004; MILLS; JONES; AGARWAL, 2001). Assim, uma hipótese para o fenômeno observado seria que, após a remoção do material contido na curva de descarga, o vaso começava a ser descarregado e, devido ao atrito entre o próprio material e o material e as paredes, este continuava a oferecer resistência a descarga e ao escoamento, não mais de forma estática, mas sim de forma dinâmica. Nesse estado, uma maior massa de material implicava em um maior plugue ou conjunto de plugues de material sendo transportado, preenchendo ao mesmo tempo um maior número de curvas e trechos da tubulação que desaceleravam o material. Assim, o material que estava sendo descarregado encontra maior dificuldade para adentrar na tubulação, e uma maior pressão ia sendo progressivamente requerida para descarregar e continuar transportando o material. Tal aumento na pressão era imediatamente suprido ao vaso, de modo que um estado de vazão de descarga quase constante era atingido, em contraponto a um aumento progressivo na pressão do vaso. Tal fenômeno foi observado comparando o experimento 23 com os experimentos 25, 26 e 27 na Figura D.2 do Apêndice D.

Contudo, a partir de cerca de 77 kg, a Figura 5.18 mostra que a vazão de descarga ((a) e (d)) e a queda de pressão na linha ((c) e (f)) começavam a reduzir com o aumento da massa de material, também havendo uma redução menos expressiva (~10%) na pressão média de descarga ((b) e (e)). Esse resultado mostra que apesar de inicialmente um aumento da massa de material permitir que pressões e vazões de descarga mais altas fossem alcançadas, massas muito elevadas de material dificultavam a descarga do vaso. Provavelmente devido ao elevado atrito interparticular. Além disso, considerando a densidade *bulk* aerado do material de 1181 $kg.m^{-3}$, e que uma pequena parte do material adentra a tubulação, a massa de 77 kg proporciona aproximadamente o volume mínimo necessário para preencher toda parte tronco-cônica do vaso, na qual o *vibrapad* auxilia de forma mais efetiva na descarga de material. A geometria tronco-cônica proporciona um aumento progressivo do diâmetro do vaso com a altura deste. Assim, na Figura D.8 do Apêndice D é possível observar que a velocidade superficial do ar

utilizado para a fluidização do material era gradualmente reduzida com o aumento da altura do vaso, até alcançar a parte cilíndrica (acima de 79 cm de altura). Desta forma, acredita-se que a fluidização era mais vigorosa nas regiões próximas ao *vibrapad*, onde a área da seção transversal do vaso era menor, como ilustrado na Figura 5.19 (2). Assim, com massas elevadas de material a atuação do *vibrapad* nas regiões próximas a superfície do material era menor (ilustrado na Figura 5.19 (1)), reduzindo a vazão de descarga e, por conseguinte, a queda de pressão na linha.

Figura 5.19 – Ilustração da influência da variável *m* no comportamento de descarga do vaso: *m* = 130 kg (1), *m* = 77 kg (2) e q_2 *m* = 30 kg (3).



Fonte: Autoria própria (2023).

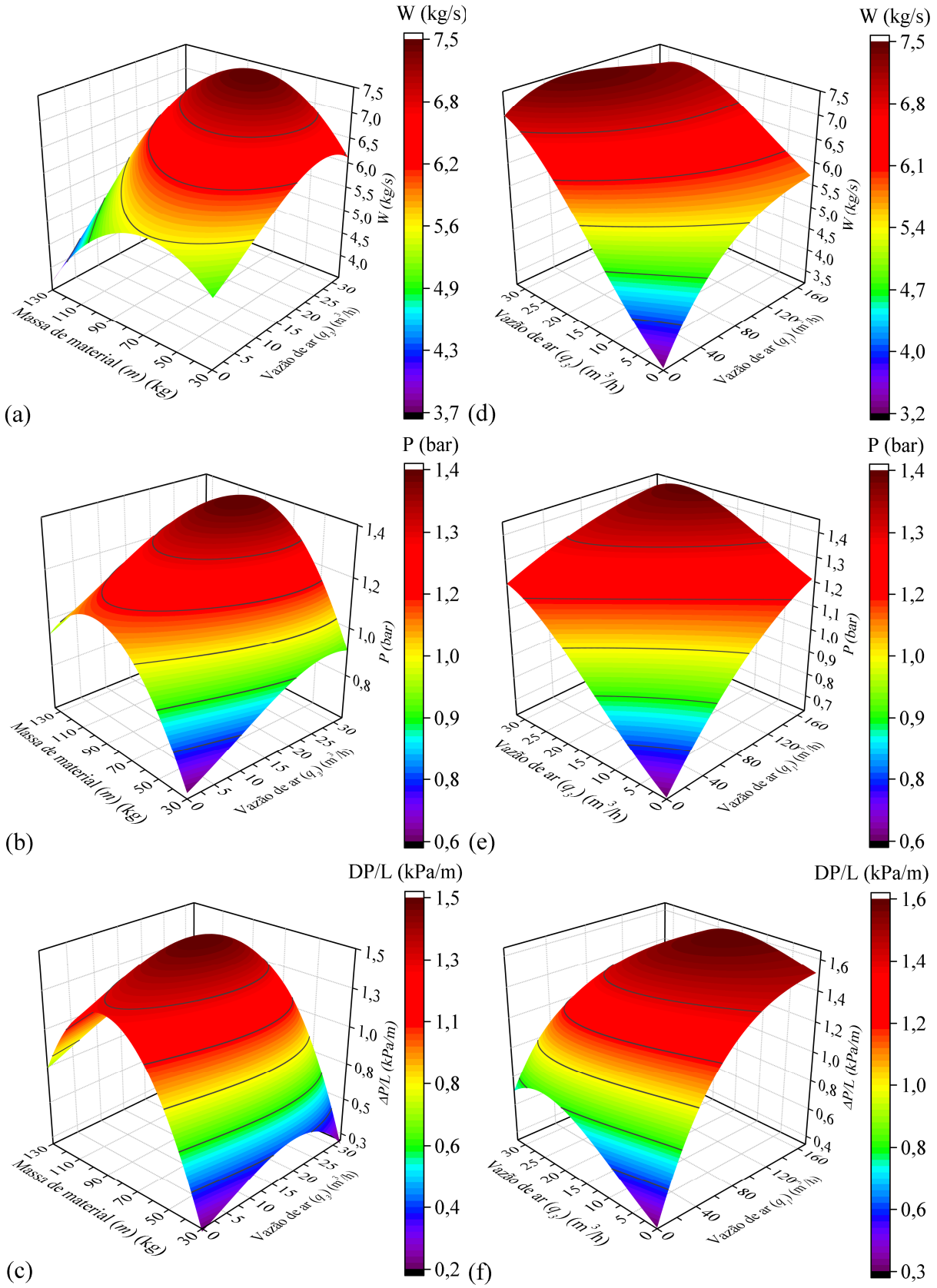
Passando para a análise da última variável, q_3 (x_3), a Figura 5.20 mostra o efeito desta nas variáveis resposta. Nota-se que a vazão de descarga e a pressão no vaso aumentavam com o aumento da vazão q_3 até um ponto de máximo próximo a 25 m^3/h, a partir do qual essas variáveis permaneceram em valores altos. Um comportamento semelhante foi observado por diversos autores para diferentes tipos de materiais, utilizando vasos de pressão nos quais a saída do material ocorria pelo topo (LU *et al.*, 2012; ZHU *et al.*, 2021). Conforme esses autores, o aumento da vazão de ar para a fluidização auxilia na quebra de aglomerados de partículas, bem como a superar as forças interparticulares que mantêm o leito estático. Além disso, no caso do *vibrapad*, uma maior vazão de ar implica em um aumento da vibração do dispositivo na parede tronco-cônica, auxiliando na remoção do material nessa região (CYCLONAIRE, 2017). Como ilustrado na Figura 5.19, o ar utilizado para fluidização era direcionado para o espaço (A) acima

do leito, o qual era utilizado para pressurização do vaso. Assim, era esperado que com uma maior vazão q_3, ocorresse um aumento na pressão do vaso. Observe, por exemplo, que no experimento 17, mesmo com q_1 sendo igual a zero, o vaso ainda conseguia se pressurizar devido a vazão de ar q_3, embora essa pressurização fosse bem mais lenta e alcançasse pressões menores do que no experimento 18 (par de comparação).

Quanto ao ponto ótimo, na Figura D.8 do Apêndice D é possível observar que só quando q_3 era maior do que aproximadamente 25 m^3/h, que a velocidade mínima de fluidização de 0,034 ± 0,008 m/s podia ser alcançada ao longo de todo o leito. Ou seja, em vazões menores que essa a fluidização do material provavelmente ocorria só nas regiões próximas aos *vibrapads*, não sendo suficiente para uma fluidização completa do leito. Contudo, após alcançar a velocidade mínima de fluidização em todo o leito, o efeito dessa variável foi reduzido, tendendo a uma região ótima de operação. Quanto a queda de pressão na linha, observou-se que, como esperado, essa aumentava com o acréscimo da vazão de descarga induzido por maiores valores de q_3. Entretanto, com vazões de q_3 maiores do que 25 m^3/h, a queda de pressão começava a ser reduzida. Esse resultado indica que, quando a velocidade mínima de fluidização era alcançada em todo leito, a vazão de descarga parava de aumentar, contudo o material continuava se aerando de tal forma que a queda de pressão na linha se reduzia. Observe, novamente, que x_3 apresentou alguns dos efeitos mais potentes na queda de pressão na linha mostrados na Tabela D.1 do Apêndice D.

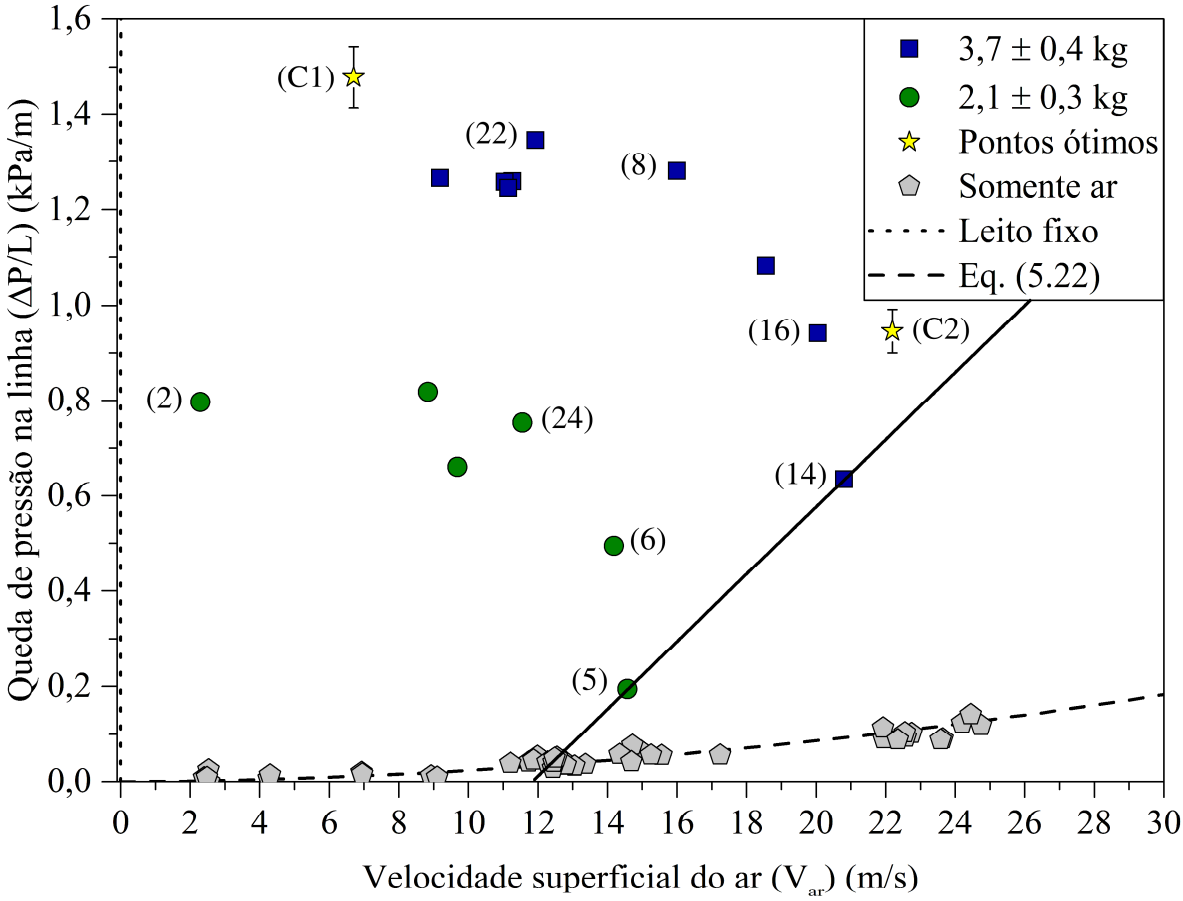
De acordo com Wypych *et al.* (2006) e Klinzing *et al*. (2010), no vaso de pressão do tipo analisado, a vazão de descarga de material na tubulação é contínua, de modo que um plugue inteiriço é descarregado, o qual vai se quebrando ao longo da tubulação, formando dunas ou plugues menores. De modo a verificar se o material estava sendo transportado em fase densa ou diluída nas faixas operacionais analisadas, buscou-se construir o diagrama de estado para o cascalho de perfuração utilizando os dados do planejamento experimental. Deu-se preferência a utilização dos dados nos quais uma massa de material superior a 80 kg estava sendo descarregada. Tal prática é recomendada por Mills (2001), para que mesmo nas vazões de descarga mais altas, um período razoável de transporte em estado estacionário seja alcançado. Como as vazões de descarga do vaso eram diferentes, agrupou-se os dados em duas faixas de vazão 1,7-2,5 kg/s e 3,2-4,0 kg/s, a partir das quais obteve-se as respectivas vazões médias de 2,1 ± 0,3 kg/s e 3,7 ± 0,4 kg/s. O diagrama de estado obtido é mostrado na Figura 5.21.

Figura 5.20 – Influência das variáveis q_3 e m (a-c) e q_3 e q_1 (d-f) na vazão de descarga (W), pressão média de descarga (P) e queda de pressão na linha de transporte ($\Delta P/L$).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 5.21 – Diagrama de estado do transporte pneumático de cascalhos de perfuração secos.



Fonte: Autoria própria (2023).

Além disso, nesse diagrama, as linhas de queda de pressão em função da velocidade do ar, para a tubulação somente com ar e para o leito fixo, foram adicionadas, como recomendado por Klinzing *et al.* (2010) para delimitar os limites operacionais possíveis. Para representar a queda de pressão na tubulação de transporte sem o material em função da velocidade do ar, a Equação (5.22), descrita por Klinzing *et al.* (2010) foi ajustada aos dados experimentais em branco do planejamento experimental com R^2 igual a 0,88. Já para descrever a queda de pressão em função da velocidade do ar de um leito fixo de cascalhos secos, a Equação (2.8) foi utilizada para a permeabilidade do cascalho seco (Figura 4.15).

$$\frac{\Delta P}{L} = 1{,}6 \cdot 10^{3} \frac{Q^{1{,}85}}{D^{5} P_1} \tag{5.22}$$

em que: $\Delta P/L$ é a queda de pressão na linha (Pa/m), Q a vazão volumétrica do ar (m^3/s), D o diâmetro da tubulação (m) e P_1 a pressão inicial na linha (Pa).

O diagrama mostra que, para as duas faixas de vazão de sólidos analisadas, a queda de pressão na linha aumentou com a redução da velocidade do ar, sendo este um comportamento típico de materiais sendo transportados em fase densa (KLINZING *et al.*, 2010; MARCUS *et al.*, 1990). Isto mostra que, apesar dos resultados da Figura 4.19 indicarem que o cascalho seco seria preferencialmente transportado em fase diluída, o uso de sistemas inovadores permitiu seu transporte em fase densa. Observe também que, inicialmente, a queda de pressão aumenta acentuadamente e depois de forma mais moderada com a redução da velocidade do ar. O aumento acentuado da queda de pressão com pouca redução da velocidade do ar indica uma proximidade em relação a velocidade *saltation*. Visto que uma ligeira diminuição da velocidade do ar além da velocidade *saltation* provoca uma deposição substancial de sólidos no fundo da tubulação, acarretando um aumento na resistência por fricção e, consequentemente, na queda de pressão, como revisado na Figura 2.15 (MARCUS *et al.*, 1990). Contudo, como na Figura 5.21 não é possível observar o ponto a partir do qual a queda de pressão começa a aumentar com a velocidade do ar para uma dada vazão de sólidos, não é possível se afirmar qual a velocidade *saltation* apenas com os dados obtidos. Assim, os pontos de mínima queda de pressão foram unidos por uma linha apenas para indicar a tendência de aumento da queda de pressão nessa região com o aumento da vazão de sólidos, como também é característico deste diagrama devido ao maior atrito interparticular (KLINZING *et al.*, 2010). Após a região de aumento acentuado, a queda de pressão cresce de forma mais moderada com a redução da velocidade do ar. Nesse período, Marcus *et al.* (1990) relataram que, em geral, as partículas são transportadas suavemente na forma de *slugs*, plugues ou dunas. Reduzindo mais a velocidade do ar as linhas de tendência vão de encontro a linha de leito fixo devido ao empacotamento completo do sólido.

Apesar do diagrama de estado indicar claramente que o material era transportado em fase densa, analisando apenas este não é possível conhecer o regime de transporte do material. Sem uma indicação visual do regime de transporte, visto que a tubulação utilizada era de aço, Dhodapkar e Klinzing (1993) e Cong *et al.* (2011) recomendam a análise do sinal de pressão em função do tempo ou no domínio da frequência. Assim, alguns pontos são indicados como exemplos no diagrama de estado, enquanto que os sinais de pressão em função do tempo desses pontos podem ser observados na Figura D.3 do Apêndice D. Para a vazão de sólidos de 2,1 ± 0,3 kg/s é possível observar no sinal de pressão em função do tempo do experimento (5), picos agudos com intensidades e tamanhos irregulares. Segundo Dhodapkar e Klinzing (1993), este comportamento é característico do regime de dunas em erosão, as quais se movem ao longo do fundo do tubo pela ação da erosão na frente e deposição no outro lado, produzindo flutuações

na pressão. Reduzindo-se a velocidade do ar, ainda se observa a presença de picos agudos nos experimentos (6), (24) e (2), contudo, estes se apresentam de forma mais regular, tanto na intensidade quanto no espaçamento, o que, conforme os autores citados, caracteriza o regime de transporte de dunas móveis. Já para a vazão de sólidos de 3,7 ± 0,4 kg/s, observa-se picos de maior amplitude nos experimentos (14), (16) (8) e (22), muitas vezes durando diversos segundos, o que é característico do regime de transporte em plugues (DHODAPKAR; KLINZING, 1993; RAU *et al.*, 2018). Observe que a amplitude e a intensidade dos picos nos experimentos (16) e (8) são bem mais irregulares do que no experimento (22), sendo este um indício típico da existência de uma zona instável de transporte pneumático. Nessa região, as oscilações de pressão são grandes, assim como o risco de entupimento da tubulação. Observe que o perfil de pressão em função do tempo desses experimentos (16 e 8) sugere que o material não estava sendo transportado em plugues discretos de tamanhos regulares nessa região, mas sim como um plugue único não completamente dividido em algumas seções.

Os pontos ótimos obtidos através do planejamento experimental também foram colocados no diagrama de estado. Nota-se que o ponto ótimo C1 está localizado em uma região de baixa velocidade e alta queda de pressão, acima dos pontos referentes a vazão de 3,7 ± 0,4 kg/s. Nessa condição, uma alta carga de sólidos foi alcançada, então é natural que o ponto C1 esteja acima dos pontos citados. Outro ponto de destaque é que a curva de pressão em função do tempo desse experimento (Figura D.6 (f) do Apêndice D) indica que um plugue único inteiriço era transportado nessa condição, assim, o ponto se aproxima da linha de leito fixo na Figura 5.21. Quanto ao ponto C2, este se encontra próximo à linha que une os pontos de mínima queda de pressão obtidos, sugerindo que este possa fazer parte de uma região de mínima queda de pressão de uma curva de vazão constante igual a 5,66 ± 0,20 kg/s (Tabela 5.2).

Comparando os resultados obtidos com àqueles descritos em patentes constata-se algumas inovações (BURNETT; CRABB; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT; WOOD; *et al.*, 2007, 2011; BURNETT *et al.*, 2004; MEYER, 1971). Tais patentes descreveram que os cascalhos secos são naturalmente transportados suspensos na corrente de ar a aproximadamente 30 m/s em pressões de 1,5-2,0 bar, não havendo relatos sobre o transporte em fase densa dos cascalhos secos. Entretanto, os resultados obtidos mostraram que altas cargas de cascalhos secos (6,9 toneladas/hora) podem ser transportadas em fase densa em velocidades baixas, até menores que 7 m/s (condição C1), com quedas de pressão na linha inferiores 2000 Pa/m (pressões na linha próximas à 1,5 bar). Tal resultado representa um avanço tecnológico, visto que altas cargas de sólido podem ser transportadas em velocidades baixas, implicando em menor desgaste das tubulações e consumo de ar. Além disso, em todos os testes realizados não se

observou o entupimento das tubulações, havendo, quando muito, o acumulo de material em algumas curvas quando velocidades de ar muito baixas (< 3 m/s) eram utilizadas. O que indica que as condições ótimas encontradas permitem um transporte seguro do material.

Em termos econômicos, o transporte dos cascalhos secos em fase densa nas condições ótimas obtidas também se apresenta mais vantajoso em relação aos sistemas atuais, onde o material é transportado seco em fase diluída, ou úmido em fase densa. Em geral, o custo da operação de transferência dos cascalhos da sonda *offshore* para a embarcação de transporte é baseado no volume de material a ser transportado e no consumo energético. Assim, com o material seco, grande parte do volume de material a ser transportado é constituído pelo cascalho, minimizando gastos desnecessários com o transporte de líquido associado ao material. Além disso, a baixa velocidade de transporte do material em fase densa implica em uma redução do volume de ar necessário para a operação, consequentemente, reduzindo os custos desta. A longo prazo, a baixa velocidade de transporte também proporciona uma redução do número de paradas para a troca de tubulações e curvas devido ao desgaste destes componentes, o que aumenta a confiabilidade do sistema e reduz os custos de manutenção.

No entanto, é importante destacar que em plataformas *offshore*, nem sempre o material pode ser transportado com baixos conteúdos de umidade. Em particular, como foi observado no Capítulo 4, o aumento da umidade dos cascalhos para a faixa de 7,7-27,6% proporcionou uma considerável redução na escoabilidade, capacidade de retenção de ar e facilidade de fluidização do material. Assim, espera-se que nessa faixa os cascalhos apresentem maiores dificuldades de transporte e entupimentos recorrentes possam ser observados. Desta forma, uma sugestão para trabalhos futuros seria realizar estudos semelhantes ao desenvolvido nesse capítulo para cascalhos com diferentes faixas de umidade, visando, principalmente, mapear as condições que levam ao entupimento das tubulações, bem como àquelas de operação ótima. Tais estudos, em conjunto com este, proporcionariam uma base de conhecimento para o dimensionamento e tomada de decisões em operações de transporte pneumático de cascalhos de perfuração em plataformas *offshore*.

5.5 Conclusão

O presente capítulo apresentou de forma detalhada os principais desafios envolvidos na construção, instrumentação e operação de um sistema de transporte pneumático em fase densa de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás. Os efeitos das vazões de ar utilizadas para a pressurização do vaso, fluidização do material empacotado e aeração do material

descarregado, bem como da massa de material carregada no vaso, foram analisados frente as variáveis resposta: vazão de descarga, pressão média de descarga e queda de pressão na linha através de um planejamento composto central. As seguintes conclusões podem ser feitas a partir deste estudo:

1. Os cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás com baixas umidades podem ser transportados em fase densa e baixas velocidades pela utilização de vasos de pressão sem válvulas de controle de pressurização.

2. Dois pontos ótimos de operação puderam ser identificados, sendo um onde o material é transportado como um plugue inteiriço em baixa velocidade, tendo uma queda de pressão mais elevada, e outro onde o material é transportado como diversos plugues menores em uma maior velocidade e menor queda de pressão.

3. O material contido na curva de descarga do vaso de pressão proporciona a vedação do equipamento, de modo que quando o material não é removido por injeção de ar na curva, altas pressões são atingidas no vaso antes de iniciar a descarga do material.

4. Baixas vazões (< 40 m^3/h) de ar injetado na curva de descarga do vaso proporcionam altas pressões no interior do vaso e vazões de descarga do material, resultando em elevadas quedas de pressão na linha. Vazões intermediárias (40-160 m^3/h) levam a pressões e vazões de descarga menores, ocasionando menores quedas de pressão na linha. Entretanto, vazões muito altas (>160 m^3/h) acabam por proporcionar um leve aumento nas vazões e pressões de descarga, enquanto a queda de pressão na linha se reduz devido a menor carga de sólidos.

5. O aumento da vazão de ar para pressurização proporciona maiores pressões e vazões de descarga. Quando baixas vazões de ar injetado na curva de descarga do vaso são utilizadas, observa-se elevadas quedas de pressão na linha com o aumento da vazão de ar para pressurização. Por outro lado, com altas vazões de ar injetado na curva de descarga, a queda de pressão na linha se reduz com o aumento da vazão de ar para pressurização, devido à redução da carga de sólidos.

6. Até o completo enchimento da parte tronco-cônica do vaso (cerca de 77 kg), o aumento da massa de material proporciona maiores pressões e vazões de descarga, além de elevadas quedas de pressão na linha de transporte. Entretanto, quando o vaso é preenchido além da parte tronco-cônica, nota-se uma redução da vazão de descarga do vaso bem como da queda de pressão na linha de transporte.

7. O aumento da vazão de ar para fluidização do material acarretou um acréscimo da pressão e vazão de descarga até um ponto ótimo (25 m^3/h), onde a velocidade mínima de fluidização era alcançada para todo o leito, permanecendo em valores altos para maiores vazões

de ar. A queda de pressão aumentou de forma correspondente ao aumento da vazão de descarga induzida pelas maiores vazões para fluidização até o ponto ótimo, a partir do qual começou a reduzir devido a maior aeração do material.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

As análises e discussões realizadas até o momento permitiram obter as seguintes conclusões principais:

1. A densidade *bulk* pode ser estimada com alta precisão (0,002 $g.cm^{-3}$) e exatidão (0,001 $g.cm^{-3}$) por medidas indiretas do volume de material empacotado usando um sensor de distância a laser.

2. A densidade *bulk* foi mais influenciada pela frequência e amplitude das batidas de tal forma que valores baixos dessas variáveis não foram suficientes para proporcionar a compactação adequada do leito, enquanto valores muito altos induziram a descompactação.

3. Em geral, as regiões ótimas de densidade *bulk* só foram alcançadas com número, frequência e amplitude de batidas superiores a 1585, 175 batidas.min^{-1} e 5,50 mm, respectivamente. Em alguns casos, valores de 234 batidas.min^{-1} e 12,90 mm foram suficientes para proporcionar a descompactação do leito.

4. Foram identificados quatro estados característicos, considerando os parâmetros de manejo e comportamento das partículas de cascalho, denominados: seco (1,3-7,7%), agregado (7,7-15,2%), desagregado (15,2-27,6%) e de lama (27,6-44,0%).

5. Estruturas interparticulares mais aeradas foram formadas pelo aumento da umidade no estado seco. Aumentos adicionais, no sub-estado agregado, promoveram a formação de estruturas mais aeradas com espaços vazios preenchidos por ar. No sub-estado desagregado, os vazios preenchidos por ar foram reduzidos, em detrimento do aumento dos espaços vazios preenchidos por líquido, tornando as estruturas mais densas. No estado de lama, os espaços cheios de líquido eram grandes o suficiente para saturar o material.

6. A escoabilidade dos cascalhos foi reduzida com o aumento da umidade de “passível” no estado seco, para “muito pobre” no final do sub-estado agregado. Ao aumentar novamente a umidade, observou-se uma melhoria gradual da escoabilidade nos estados desagregado e de lama até “excelente”.

7. Foram identificados três comportamentos distintos de fluidização. No estado seco, observou-se um comportamento do grupo B de Geldart. A velocidade mínima de fluidização e a permeabilidade do leito aumentaram pouco com a umidade, enquanto a capacidade de expansão do leito foi reduzida. No estado agregado/desagregado, o comportamento de fluidização das partículas mudou para o grupo C de Geldart. Um incremento mais acentuado

da velocidade mínima de fluidização e da permeabilidade foi notado com o aumento da umidade, até um valor máximo de 15,7%, após o qual passou a diminuir. Um comportamento do grupo B de Geldart das partículas foi observado novamente no estado de lama, com altas sobrepressões antes da fluidização plena. O aumento da umidade promoveu a formação de leitos menos permeáveis e mais expansíveis, fluidizando em velocidades mais baixas.

8. A capacidade de retenção de ar do material foi gradualmente reduzida com o aumento da umidade nos estados seco e agregado/desagregado até um mínimo, em uma condição não fluidizável. Notou-se que o ar escapava principalmente na forma de bolhas neste primeiro estado e por canais no segundo. No estado de lama, o material passou a ser capaz de reter mais ar com o aumento da umidade, apresentando dois mecanismos distintos de desaeração, um primeiro de escape rápido de ar por grandes bolhas, seguido por um segundo de escape mais lento por pequenas bolhas.

9. Os diagramas de previsão do regime de transporte analisados puderam prever bem os regimes de transporte pneumático de cascalhos de perfuração nos estados seco (1) e agregado/desagregado (2). Foi previsto que os cascalhos no estado seco seriam transportados apenas em fase diluída, enquanto o transporte em fase densa por plugues foi previsto para o material no estado agregado/desagregado. Tais previsões foram confirmadas por comparação com a literatura, porém se mostraram diferentes dos resultados obtidos experimentalmente, onde se mostrou que os cascalhos secos também podem ser transportados e fase densa em baixas velocidades.

10.Em geral, cascalhos de perfuração no estado seco apresentaram propriedades de manejo boas e mais estáveis em comparação com o material nos estados agregado/desagregado e de lama, sendo desejável para operações de manejo de cascalhos.

11. Dois pontos ótimos de operação puderam ser identificados para o transporte pneumático do material, sendo um onde o material é transportado como um plugue inteiriço em baixa velocidade, tendo uma queda de pressão mais elevada, e outro onde o material é transportado como diversos plugues menores em uma maior velocidade e menor queda de pressão.

12. O material contido na curva de descarga do vaso de pressão proporciona a vedação do equipamento, de modo que quando o material não é removido por injeção de ar na curva, altas pressões são atingidas no vaso antes de iniciar a descarga do material.

13. Baixas vazões (< 40 m^3/h) de ar injetado na curva de descarga do vaso proporcionam altas pressões no interior do vaso e vazões de descarga do material, resultando em elevadas quedas de pressão na linha. Vazões intermediárias (40-160 m^3/h) levam a pressões e vazões de

descarga menores, ocasionando menores quedas de pressão na linha. Contudo, vazões muito altas (>160 m^3/h) acabam por proporcionar um leve aumento nas vazões e pressões de descarga, enquanto a queda de pressão na linha se reduz devido a menor carga de sólidos.

14. O aumento da vazão de ar para pressurização proporciona maiores pressões e vazões de descarga. Quando baixas vazões de ar injetado na curva de descarga do vaso são utilizadas, observa-se elevadas quedas de pressão na linha com o aumento da vazão de ar para pressurização. Por outro lado, com altas vazões de ar injetado na curva de descarga, a queda de pressão na linha se reduz com o aumento da vazão de ar para pressurização, devido à redução da carga de sólidos.

15. Até o completo enchimento da parte tronco-cônica do vaso (cerca de 77 kg), o aumento da massa de material proporciona maiores pressões e vazões de descarga, além de elevadas quedas de pressão na linha de transporte. Entretanto, quando o vaso é preenchido além da parte tronco-cônica, nota-se uma redução da vazão de descarga do vaso bem como da queda de pressão na linha de transporte.

16. O aumento da vazão de ar para fluidização do material acarretou um acréscimo da pressão e vazão de descarga até um ponto ótimo (25 m^3/h), onde a velocidade mínima de fluidização era alcançada para todo o leito, permanecendo em valores altos para maiores vazões de ar. A queda de pressão aumentou de forma correspondente ao aumento da vazão de descarga induzida pelas maiores vazões para fluidização até o ponto ótimo, a partir do qual começou a reduzir devido a maior aeração do material.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

1. Modificar o dispositivo de aquisição de dados de densidade *bulk* de materiais granulares para permitir a introdução de provetas de maior diâmetro, as quais permitiriam a análise de materiais com maiores tamanhos de partícula.

2. Existem diferentes tipos de cascalhos de perfuração, provenientes de diferentes rochas e profundidades de perfuração, portanto, seria interessante analisar como as características de diferentes cascalhos com diversos conteúdos de umidade influenciam nas propriedades de escoabilidade, aeração, fluidização e transporte pneumático do material. Tal análise permitiria estabelecer uma base de conhecimento para a projeção de sistemas de transporte pneumático, assim como tomada de decisões em operações já existentes em plataformas de perfuração.

3. Estudar as condições operacionais e mecanismos que levam ao entupimento das tubulações de transporte para cascalhos com diferentes umidades, principalmente na faixa de

10-21%, de modo a mapear as condições de operação segura do sistema de transporte pneumático. Além disso, seria interessante analisar as condições de operação dos injetores de linha que podem ser utilizadas para sair da condição de entupimento e voltar a transportar o material na tubulação.

4. Analisar o transporte do material na condição C1, porém utilizando os injetores de linha para realizar o corte do plugue inteiriço em plugues menores. Tal prática possibilitaria não só maior segurança na operação nessa condição, mas também uma possível redução na queda de pressão ao longo da linha. Uma abordagem, seria ativar apenas o primeiro injetor próximo ao vaso de forma intermitente durante a descarga do plugue, de modo que este fosse cortado em plugues menores. Poderia ser avaliado o efeito da pressão e frequência das injeções de ar principalmente na redução da queda de pressão nessa condição. Outra abordagem seria utilizar todos os injetores de linha, porém avaliando a pressão, frequência de injeção e distância entre injetores na queda de pressão ao longo da linha.

5. Realizar simulações utilizando fluidodinâmica computacional (CFD) de modo a avaliar o efeito do ângulo da parte troco-cônica do vaso de pressão, bem como geometria da curva de descarga do vaso na vazão e pressão de descarga do material.

6. Modificar o equipamento por meio de válvulas solenoides, de modo a permitir a injeção do ar no vaso em etapas separadas. Por exemplo, seria possível injetar ar somente para pressurização até uma pressão de *setpoint*, quando esta fosse atingida seria injetado ar para a fluidização e na curva de descarga do vaso, iniciando a descarga do material. A grande vantagem de se realizar a operação desta forma seria controlar a pressão de descarga desejada, visto que no sistema atual a pressão para se iniciar a descarga não pode ser controlada. Veja, por exemplo, que na réplica da condição C1 da Figura D.6 (e), mesmo utilizando as mesmas condições operacionais, a pressão para se iniciar a descarga do material não é exatamente igual.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, E. C.; GELDART, D. The use of bulk density measurements as flowability indicators. **Powder Technology**, v. 102, n. 2, p. 151–165, 1999. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(98)00208-3

ABNT. **Rochas e solos: NBR 6502**. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995.

ABRAHAMSEN, A. R.; GELDART, D. Behaviour of gas-fluidized beds of fine powders part II. Voidage of the dense phase in bubbling beds. **Powder Technology**, v. 26, n. 1, p. 47–55, 1980. https://doi.org/10.1016/0032-5910(80)85006-6

ALTHAUS, Tim O.; WINDHAB, Erich J. Characterization of wet powder flowability by shear cell measurements and compaction curves. **Powder Technology**, v. 215–216, p. 59–65, 2012. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.09.007

ALTINO, Heitor Otacílio Nogueira; LOURENÇO, Giovani Aud; ATAÍDE, Carlos Henrique. System development for bulk density data acquisition of granular materials: Effect of operational conditions and optimization. **Powder Technology**, v. 391, p. 184–197, 2021. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.013

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Recommended Practice for Field Testing Oil-Based Drilling Fluids: API Recommended Practice 13B-2**. Washington, 2012.

ASME; ANSI. **Carbon, Alloy and Stainless Steel Pipes - Dimensions (B36.10/19)** ASME/ANSI, 2019.

ASTM. **Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders**. C 1444-00, 2000.

ASTM C136-06. ***Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate*s**. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

ASTM D7481-09. Standard test methods for determining loose and tapped bulk densities of powders using a graduated cylinder. **Annual Book of ASTM Standards**, October. American Society for Testing and Materials, West C, 2009.

BALA, B. K. **Drying and Storage of Cereal Grains**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, LTD, 2016. https://doi.org/10.1002/9781119124207

BARESCHINO, Piero *et al.* Fluidization and de-aeration of pyroclastic mixtures: The influence

of fines content, polydispersity and shear flow. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 164, n. 4, p. 284–292, 2007. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.05.013

BOX, G.E.P.; HUNTER, J.S.; HUNTER, W.G. **Statistics for Experiments**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

BRUNI, Giovanna *et al.* The influence of fines size distribution on the behaviour of gas fluidized beds at high temperature. **Powder Technology**, v. 163, n. 1–2, p. 88–97, 2006. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.01.007

BURNETT; CRABB, C.; *et al.* **Drill cuttings conveyance systems and methods**. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20070215386A1/en?oq=US20070215386A1>, 2007

BURNETT; WOOD, D.; *et al.* **Systems and methods for storing and handling drill cuttings**. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US7195084?oq=%22gas+injection%22+drilling+cuttings+conveying>, 2007

BURNETT, G. A. *et al.* **Apparatus and method for moving drill cuttings**. United States. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/WO2005124096A1/en?oq=WO2005%2F124096Al>, 2004

BURNETT, G. A. *et al.* **Drill cuttings conveyance systems and methods**. United States. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20060102390A1/en?oq=US+2006%2F0102390A1>, 2006

BURNETT, G. A.; CRABB, C.; *et al.* **Method for conveying drill cuttings**. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/EP2165951A1>, 2011

BURNETT, G. A.; WOOD, D.; *et al.* **System for conveying drill cuttings**. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/EP1766181B1/de?oq=EP1766181B1>, 2011

CAPES, C. E. **Particle size enlargement**. Amsterdam: Elsevier, 1980.

CHAMBERS, A. J.; KEYS, S.; PAN, R. The influence of material properties on conveying characteristics. **6th international conference on bulk materials storage, handling and transportation**. p. 309–319. 1998.

COELHO, M. C.; HARNBY, N. The effect of humidity on the form of water retention in a

powder. **Powder Technology**, v. 20, n. 2, p. 197–200, 1978. https://doi.org/10.1016/0032-5910(78)80048-5

CONG, Xingliang *et al.* Experimental research of flow patterns and pressure signals in horizontal dense phase pneumatic conveying of pulverized coal. **Powder Technology**, v. 208, n. 3, p. 600–609, 2011. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2010.12.027.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Chemical Engineering: Particle Technology and Separation Processes**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

CROUTER, Allison; BRIENS, Lauren. The effect of moisture on the flowability of pharmaceutical excipients. **AAPS PharmSciTech**, v. 15, n. 1, p. 65–74, 2014. https://doi.org/10.1208/s12249-013-0036-0

CYCLONAIRE. **Vibra Pad Aerators**. Disponível em: <http://jbindustrial.com/wp-content/uploads/2017/04/Cyclonaire-VIbra-Pad-Aerators.pdf>.

DHODAPKAR, Shrikant V.; KLINZING, George E. Pressure fluctuations in pneumatic conveying systems. **Powder Technology**, v. 74, n. 2, p. 179–195, 1993. https://doi.org/10.1016/0032-5910(93)87010-L

DIXON, G. The impact of powder properties on dense phase flow. **Proceedings of the international conference on pneumatic conveying**. 1979.

EMAMI, S.; TABIL, L. G. Friction and compression characteristics of chickpea flour and components. **Powder Technology**, v. 175, n. 1, p. 14–21, 2007. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.12.021

EMERY, Erica *et al.* Flowability of moist pharmaceutical powders. **Powder Technology**, v. 189, n. 3, p. 409–415, 2009. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.06.017

ENSCOROWAN. **Offshore Market Recovery** , 2019. Disponível em: <http://www.ensco.ws>.

FARGETTE, C.; JONES, M. G.; NUSSBAUM, G. Bench scale tests for the assessment of pneumatic conveying behaviour of powders. **Powder Handling and Processing**, v. 9, n. 2, p. 103–110, 1997.

FAYED, Muhammad E; OTTEN, Lambert. **Handbook of Powder Science and Technology**. 2. ed. New York: Chapman & Hall, 1997. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6373-0

FENG, C. L.; YU, A. B. Effect of liquid addition on the packing of mono-sized coarse spheres.

Powder Technology, v. 99, n. 1, p. 22–28, 1998. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(98)00086-2

FIGURA, Ludger O.; TEIXEIRA, Arthur A. **Food physics: Physical properties: measurement and applications**. Leipzig: Springer, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34194-9

FISCINA, J. E. *et al.* Compaction dynamics of wet ranular assemblies. **Physical Review Letters**, v. 105, n. 4, 2010. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.048001

FLEMMER, C. L. On the regime boundaries of moisture in granular materials. **Powder Technology**, v. 66, n. 2, p. 191–194, 1991. https://doi.org/10.1016/0032-5910(91)80100-W

GAISFORD, Simon; SAUNDERS, Mark. **Essentials of Pharmaceutical Preformulation**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, LTD, 2012. http://doi.wiley.com/10.1002/9781118423226.

GARDNER DENVER. **Working Principle of a Screw Compressor**. Disponível em: <https://www.gardnerdenver.com/en-za/knowledge-hub/articles/screw-compressors>. Acesso em: 21 mar. 2022.

GELDART, D. *et al.* Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. **China Particuology**, v. 4, n. 3–4, p. 104–107, 2006. https://doi.org/10.1016/s1672-2515(07)60247-4

GELDART, D.; WONG, A. C.Y. Fluidization of powders showing degrees of cohesiveness-II. Experiments on rates of de-aeration. **Chemical Engineering Science**, v. 40, n. 4, p. 653–661, 1985. https://doi.org/10.1016/0009-2509(85)80011-7

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, v. 7, n. 5, p. 285–292, 1973. https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3

GERICKE. **Como funciona o sistema de transporte pneumático?** Disponível em: <https://br.gerickegroup.com/blog/como-funciona-o-sistema-de-transporte-pneumatico/>. Acesso em: 12 fev. 2022.

GERMAN, R. M. **Particle Paking Characteristics**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989.

GERRARD, S *et al.* **Drill cuttings piles in the north sea: management options during platform decommissioning**, Norwich, 1999.

GRACE, L. R.; AVIDAN, A. A.; KNOWLTON, T. M. **Circulating fluidized beds**. London: Lackie Academic &. Professional, 1997. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0095-0

GRANUTOOLS. **GranuPack: High resolution tapped density analyzer**. Disponível em: <https://granutools.com/products/granupack/>.

HAGOORT, Jacques. **Fundamentals of Gas Reservoir Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 1988.

HEYA, Norimi; EITOKU, Hisato; SANADA, Koji. **Device for measuring apparent specific gravity of powder**, Japan. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/08/41/1d/7b5112ef486faa/JP4368738B2.pdf>. 2004

HYUN, Cho; SHAH, Subhash; OSISANYA, Samuel. A Three-Layer Modeling for Cuttings Transport with Coiled Tubing Horizontal Drilling. **Society of Petroleum Engineers**, p. 905–918. 2000, https://doi.org/10.2523/63269-MS

IOGP. **Drilling waste management technology review**. The International Association of Oil & Gas Producer, 2016. Disponível em: <http://www.iogp.org/pubs/557.pdf>.

ISHIZAKI, K.; KOMARNENI, S.; NANKO, M. **Porous Materials**. Boston, MA: Springer US. v. 4. 1998. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5811-8

JAIN, Kunal; SHI, Deliang; MCCARTHY, J. J. Discrete characterization of cohesion in gas-solid flows. **Powder Technology**, v. 146, n. 1–2, p. 160–167, 2004. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.08.001

JONES, M.G. *The influence of bulk particulate properties on pneumatic conveying performance*. 1988. University of Greenwich, 1988.

JONES, Mark G.; WILLIAMS, Kenneth C. Predicting the mode of flow in pneumatic conveying systems—A review. **Particuology**, v. 6, n. 5, p. 289–300, 2008. https://doi.org/10.1016/j.partic.2008.05.003

KALMAN, Haim. Effect of moisture content on flowability: Angle of repose, tilting angle, and Hausner ratio. **Powder Technology**, v. 393, p. 582–596, 2021. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.010.

KALMAN, Haim; PORTNIKOV, Dmitry. Analyzing bulk density and void fraction: B. Effect of moisture content and compression pressure. **Powder Technology**, v. 381, p. 285–297, 2021.

https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.019

KAY, J. M.; NEDDERMAN, R. M. **An Introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer: With Applications in Chemical and Mechanical Process Engineering**. Cambridge: Cambridge University Press, 1975.

KENNEDY, Oliver C. **Pneumatic conveying performance characteristics of bulk solids**. 321 f. University of Wollongong, 1998.

KHURI, I.A. **Response Surfaces Design and Analyses**. 2. ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1996.

KILPELA, Ari. **Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications**. 98 f. University of Oulu, 2004. Disponível em: <http://herkules.oulu.fi/isbn9514272625/?lang=en>.

KLINZING, G.E. *et al.* **Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach**. 3. ed. New York: Springer, 2010. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3609-4

KNIGHT, James B *et al.* Density relaxation in a vibration. *Physical Review E*, v. 51, n. 5, 1995. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.3957

KRISTENSEN, H. G. Particle agglomeration. **Advances in Pharmaceutical Sciences**, v. 7, n. C, p. 221–272, 1995. https://doi.org/10.1016/S0065-3136(06)80006-3

KRISTENSEN, H. Gjelstrup; SCHAEFER, T. Granulation: A Review on Pharmaceutical Wet-Granulation. **Drug Development and Industrial Pharmacy**, v. 13, n. 4–5, p. 803–872, 1987. https://doi.org/10.3109/03639048709105217

KRISTENSEN, Henning G. Particle agglomeration in high shear mixers. **Powder Technology**, v. 88, n. 3, p. 197–202, 1996. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(96)03123-3

LETURIA, M. *et al.* Characterization of flow properties of cohesive powders: A comparative study of traditional and new testing methods. **Powder Technology**, v. 253, p. 406–423, 2014. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.045

LEVENSPIEL, Octave. Flow in Fluidized Beds. **Engineering Flow and Heat Exchange**. Boston, MA: Springer US, v. 6. p. 153–166. 2014. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7454-9_7

LI, Par Ming. **Study of the FT4 powder rheometer: comparison of the test methods and optimization of the protocols**. 2017. 138 f. Université de Technologie de Compiègne, 2017.

LI, Xiaolu *et al.* Influence of waveform characteristics on LiDAR ranging accuracy and precision. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 4, p. 1–16, 2018. https://doi.org/10.3390/s18041156

LITSTER, Jim. Dispersion, Disintegration, and Dissolution. **Design and Processing of Particulate Products**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. p. 294–322. https://doi.org/10.1017/CBO9781139017558.011

LIU, Hongbin; CHENG, Qiyun. An Analysis of Design and Equipment of Field Waste-Free System in Drilling. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, v. 5, n. 6, p. 281–285, 2016. https://doi.org/10.21275/v5i6.NOV164174

LOURENÇO, Giovani Aud *et al.* Experimental study of efficiency in pneumatic conveying system's feeding rate. **Powder Technology**, v. 343, p. 262–269, 2019. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.002

LU, Haifeng *et al.* Effect of gas type on the fluidization and discharge characteristics of the pulverized coal. **Powder Technology**, v. 217, p. 347–355, 2012. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.047

LU, Haifeng *et al.* Effect of moisture on flowability of pulverized coal. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 133, p. 326–334, 2018. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.03.023

LUMAY, G. *et al.* Measuring the flowing properties of powders and grains. **Powder Technology**, v. 224, p. 19–27, 2012. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.02.015

LUMAY, G.; DORBOLO, S.; VANDEWALLE, N. Compaction dynamics of a magnetized powder. **Physical Review E**, v. 80, n. 4, p. 1–6, 2009. https://doi.org/10.1103/physreve.80.041302

LUMAY, G.; VANDEWALLE, N. Compaction of anisotropic granular materials: Experiments and simulations. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 70, n. 5, 2004. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.051314

LUMAY, G.; VANDEWALLE, N. Packing fraction and compaction dynamics of magnetic powders. **AIP Conference Proceedings**, v. 1145, p. 131–134, 2009. https://doi.org/10.1063/1.3179846

LUMAY, Geoffroy *et al.* Influence of cohesive forces on the macroscopic properties of granular assemblies. **AIP Conference Proceedings**, v. 1542, p. 995–998, 2013. https://doi.org/10.1063/1.4812101

MACÍAS-GARCÍA, A; CUERDA-CORREA, Eduardo M; DÍAZ-DÍEZ, M.A. Application of the Rosin–Rammler and Gates–Gaudin–Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork. **Materials Characterization**, v. 52, n. 2, p. 159–164, 2004. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.04.007

MACRÌ, Domenico *et al.* An investigation of the flow properties of rutile particles: Fluidization behaviour linked with shearing studies. **Powder Technology**, v. 374, p. 544–559, 2020. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.082

MAINWARING, N. J.; REED, A. R. Permeability and Air Retention Characteristics of Bulk Solid Materials in Relation To Modes of Dense Phase Pneumatic Conveying. **Bulk Solids Handling**, v. 7, n. 3, p. 415–425, 1987.

MARCUS, R. D. *et al.* **Pneumatic Conveying of Solids**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0405-7

MATTEDE, Henrique. **Como funciona o inversor de frequência**. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funciona-o-inversor-de-frequencia/>. Acesso em: 22 mar. 2022a.

MATTEDE, Henrique. **O que é um soft starter?** Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-um-soft-starter/>. Acesso em: 22 mar. 2022b.

MENDEZ, Rafael; ROMANSKI, Francis S.; TOMASSONE, M. Silvina. Density behavior of cohesive granular materials. **Powder Technology**, v. 211, n. 2–3, p. 189–198, 2011. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.11.024

MEYER, Frank L. **Gas injection arrangement for preventing pipeline slumping**. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US3575469?oq=%22gas+injection%22+drilling+cuttings+conveying>, 1971

MILLS, David. **Pneumatic Conveying Design Guide**. Oxford: Elsevier, 2004.

MILLS, David. The use of high pressure blow tanks for the pneumatic conveying of pelletised materials. **Handbook of Powder Technology**. Elsevier, v. 10, p. 387–393, 2001 http://dx.doi.org/10.1016/S0167-3785(01)80040-3

MILLS, David; JONES, Mark G.; AGARWAL, Vijay K. **Handbook of Pneumati Conveying Engineering**. New York: Marcel Dekker, 2001.

MODBUS ORGANIZATION. **Modbus Technical Resources**. Disponível em: <https://modbus.org/tech.php>. Acesso em: 22 mar. 2022.

MOLERUS, O. Interpretation of Geldart's type A, B, C and D powders by taking into account interparticle cohesion forces. **Powder Technology**, v. 33, n. 1, p. 81–87, 1982. https://doi.org/10.1016/0032-5910(82)85041-9

MORAES, Marlene Silva. **Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída : Curvas de pressão e distribuição de partículas**. 2012. 128 f. Universidade Estadual de Campinas, 2012.

MOREIRA, Chaya Bergman. **Um estudo sobre os aspectos ambientais relacionados à utilização de fluidos de perfuração em áreas offshore**. 2011. 95 f. Universidade Federal Fluminense, 2011.

NOWAK, E. R. *et al.* Density-noise power fluctuations in vibrated granular media. **Physical Review E**, v. 63, n. 2, p. 4, 2001. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.63.020301

FASINA, O. O. Flow and Physical Properties of Switchgrass, Peanut Hull, and Poultry Litter. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 3, p. 721–728, 2006. https://doi.org/10.13031/2013.20470

OSMAN, Khan Towhid. **Soils**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2

PAN, R. Material properties and flow modes in pneumatic conveying. **Powder Technology**, v. 104, n. 2, p. 157–163, 1999. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00044-3

PARKER HANNIFIN. **Dimensionamento de Redes de Ar Comprimido**. São Paulo: Parker Hannifin, 2006.

PETRI, I. *et al.* Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer, ***Offshore Technology Conference***, p. 2381–2389, 2015. https://doi.org/10.4043/26335-MS

PETRI, Irineu *et al.* Microwave remediation of oil well drill cuttings. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 134, p. 23–29, 2015. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.07.022

PETRI JÚNIOR, Irineu. **Descontaminação de cascalhos de perfuração utilizando um secador microondas semi-industrial em regime contínuo**. 2017. 176 f. Universidade Federal de Uberlandia, 2017.

PETRI JÚNIOR, Irineu. **Secagem por Micro-ondas na Descontaminação de Cascalhos de Perfuração**. 131 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

PHILIPPE, P.; BIDEAU, D. Compaction dynamics of a granular medium under vertical tapping. **Europhysics Letters**, v. 60, n. 5, p. 677–683, 2002. https://doi.org/10.1209/epl/i2002-00362-7

PIERRAT, Patrice; CARAM, Hugo S. Tensile strength of wet granular materials. **Powder Technology**, v. 91, n. 2, p. 83–93, 1997. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(96)03179-8

PODCZECK, Fridrun; JONES, Brian E. **Pharmaceutical Capsules**. London: Pharmaceutical Press, 2007.

PODCZECK, Fridrun; SHARMA, Monica. The influence of particle size and shape of components of binary powder mixtures on the maximum volume reduction due to packing. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 137, n. 1, p. 41–47, 1996. https://doi.org/10.1016/0378-5173(95)04420-5

POHORECKI, Ryzhard *et al.* **Chemical Engineering and Chemical Process Technology - Volume II: Unit Operations – Fluids and Solids**. United Kingdom: EOLSS, 2010.

PULLMAN, Doug. **Apparatus and method for recycling drilling slurry**. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20020104806A1/en?oq=US20020104806A1>, 2002

RABINOVICH, Evgeny; KALMAN, Haim. Flow regime diagram for vertical pneumatic conveying and fluidized bed systems. **Powder Technology**, v. 207, n. 1–3, p. 119–133, 2011. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2010.10.017

RAU, S. *et al.* Multi-phase simulation of pneumatic conveying applying a hydrodynamic hybrid model for the granular phase. **Powder Technology**, v. 330, n. 2017, p. 339–348, 2018. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.041

REEDER, R. J. **Carbonates: Mineralogy and Chemistry**. New York: Stony Book, 1983.

RETSCH. **Sieve Analysis: taking a close look at quality**. Haan: RETSCH GmbH, 2015. Disponível em: <https://www.retsch.com/dltmp/www/53e4b562-5294-4711-9111-636500000000-b8e580d34c65/expert_guide_sieving_en.pdf>.

RIBIÈRE, Ph *et al.* On the existence of stationary states during granular compaction. **European Physical Journal E**, v. 22, n. 3, p. 249–253, 2007. https://doi.org/10.1140/epje/e2007-00017-x

RICHARD, Patrick *et al.* Slow relaxation and compaction of granular systems. **Nature Materials**, v. 4, n. 2, p. 121–128, 2005. https://doi.org/10.1038/nmat1300

ROSATO, Anthony D.; ZHANG, Ninghua. Experiments and simulations on vibration induced densification of bulk solids. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 24, p. 93–103, 2006. https://doi.org/10.14356/kona.2006012

SAKER, A. *et al.* Powders flowability assessment in granular compaction: What about the consistency of Hausner ratio? **Powder Technology**, v. 354, p. 52–63, 2019. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.032

SANCHEZ, Luis *et al.* Characterization of bulk solids to assess dense phase pneumatic conveying. **Powder Technology**, v. 138, n. 2–3, p. 93–117, 2003. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2003.08.061

SANTANA, Ricardo C. *et al.* Influence of particle size and reagent dosage on the performance of apatite flotation. **Separation and Purification Technology**, v. 64, n. 1, p. 8–15, 2008. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.09.004

SANTOMASO, A.; LAZZARO, P.; CANU, P. Powder flowability and density ratios: The impact of granules packing. **Chemical Engineering Science**, v. 58, n. 13, p. 2857–2874, 2003. https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00137-4

SASABE, Shuji *et al.* **Tapping device for powder measuring apparatus**, Japan. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/78/d0/a1/33a217ec063d8e/JP2012237722A.pdf>, 2011

SCHULZE, Dietmar. **Powders and Bulk Solids**. New York: Springer, 2008.

SEATON, Simon; MORRIS, Ronald George. Unique Drilling-Waste Handling and Transport System Offers Advantages to Drilling Operations and Assists Operators in Achieving Safety and Environmental Compliance. **SPE**, p. 157–164. 2005. https://doi.org/10.2118/94194-MS

SEVILLE, J. P.K.; CLIFT, R. The effect of thin liquid layers on fluidisation characteristics. **Powder Technology**, v. 37, n. 1, p. 117–129, 1984. https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)80011-X

SINGER, Anthony *et al.* Nanoscale Drug-Delivery Systems. **Nanocarriers for Drug Delivery**,

p. 395–419, 2019. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814033-8.00013-8

SVAROVSKLY, L. **Powder Testing Guide: Methods of Measuring the Physical Properties of Bulk Powders**. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1987.

TRAINA, K. *et al.* Flow abilities of powders and granular materials evidenced from dynamical tap density measurement. **Powder Technology**, v. 235, p. 842–852, 2013. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.039

TRIPATHI, Naveen Mani; LEVY, Avi; KALMAN, Haim. Acceleration pressure drop analysis in horizontal dilute phase pneumatic conveying system. **Powder Technology**, v. 327, p. 43–56, 2018. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.045

UNITED STATES PHARMACOPEIA. **The United States Pharmacopeia: the National Formulary**. USP 41, NF ed. Rockville: The United States Pharmacopeia Convenction, 2018.

VESILIND, P.Aarne. The Rosin-Rammler particle size distribution. **Resource Recovery and Conservation**, v. 5, n. 3, p. 275–277, 1980. https://doi.org/10.1016/0304-3967(80)90007-4

WANG, Haotong *et al.* Experimental study of bubble dynamics and flow transition recognition in a fluidized bed with wet particles. **Chemical Engineering Science**, v. 211, p. 115257, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115257

WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. **Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology**. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1987. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2635-6

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Bulk density and tapped density of powders**, 2012.

WRIGHT, P.C.; RAPER, J.A. Role of Liquid Bridge Forces in Cohesive Fluidization. **Chemical Engineering Research and Desig*n***, v. 76, n. 6, p. 753–760, 1998. https://doi.org/10.1205/026387698525333

WRIGHT, Phillip C.; RAPER, Judy A. Examination of dispersed liquid-phase three-phase fluidized beds Part 1. Non-porous, uniform particle systems. **Powder Technology**, v. 97, n. 3, p. 208–226, 1998. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(98)00014-X

WYPYCH, P. W. *et al.* An Experimental Investigation into the Feed Rate Capacity of Rotary Valve and Blow Tank Feeders. **Particulate Science and Technology**, v. 24, n. 2, p. 165–179, 2006. https://doi.org/10.1080/02726350500544216

XU, Guiling *et al.* Investigation on characterization of powder flowability using different

testing methods. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 92, p. 390–401, 2018. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.11.008

YEHUDA, Tal; KALMAN, Haim. Geldart classification for wet particles. **Powder Technology**, v. 362, p. 288–300, 2020. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.073

ZHOU, Yefeng *et al.* Effects of Interparticle Forces on Fluidization Characteristics in Liquid-Containing and High-Temperature Fluidized Beds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 47, 2013. https://doi.org/10.1021/ie401907r

ZHU, Haipeng *et al.* Experimental study on conveying characteristics of a novel top-discharge blow tank for fine cohesive powders. **Powder Technology**, v. 379, p. 335–344, 2021. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.033

APÊNDICE A

A.1 Estimativa de volume de material empacotado pelas medições do sensor de distância

O sensor a laser (Figura 3.2 (1)) utilizado no sistema realizou medições da distância do sensor até a superfície do material empacotado na proveta graduada. Para obter o volume e, consequentemente, a densidade dos materiais a partir dessas medições, algumas hipóteses foram assumidas, as quais permitiram obter as equações de conversão dos dados. Assumiu-se que: (a) a superfície do material empacotado era nivelada, (b) o diâmetro interno da proveta (D = 2,689 cm) permaneceu constante em todo o seu comprimento, (c) os efeitos da parede poderiam ser considerados desprezíveis ($D/D_{Sauter} > 10$), (d) a densidade *bulk* do material era considerada homogênea em toda a sua extensão (anisotropia desprezível) e (e) o volume do material era dado por um cilindro perfeito.

Tomando como referência as medidas mostradas na Figura 3.2, a distância do sensor ao fundo do cilindro (*H*) é dada por:

$$H = h_1 + h_2 \tag{A.1}$$

Considerando que a soma entre a distância do sensor à superfície do material (h_3) e a altura do material empacotado no cilindro (h_4) é igual a *H*, a Equação (A.1) pode ser escrita em função de h_4:

$$h_4 = h_1 + h_2 - h_3 \tag{A.2}$$

Assim, o volume de material no cilindro (*V*) pode ser dado por:

$$V = \frac{\pi D^2}{4}(h_1 + h_2 - h_3) \tag{A.3}$$

A distância h_3 foi obtida através do sensor de distância a laser. Para isso, a distância (*w*) medida pelo sensor foi corrigida por uma curva de calibração, descrita genericamente pela Equação (A.4). Para cada material uma curva foi obtida utilizando diferentes espessuras (*e* = 0,000, 0,170, 0,650, 1,130 e 1,300 cm) dos anéis de ajuste de amplitude das batidas (Figura 2.3

(5)). O material foi empacotado e nivelado no cilindro graduado de 60 a 100 mL, em etapas de 5 mL. Em cada um dos volumes, a distância entre a superfície do material empacotado e o sensor de distância (h_3) foi medida 5 vezes por paquímetro digital (MTX®, 316119) e mais de 500 vezes pelo sensor. Um exemplo de curva de calibração é mostrado na Figura A.3 para GLB.

$$h_3(w) = Aw + B \tag{A.4}$$

em que h_3 é a distância corrigida, A é o coeficiente de inclinação, B o coeficiente de interceptação e w a distância medida pelo sensor.

Substituindo a Equação (A.4) na Equação (A.3), obtemos a equação geral (Equação A.5) para converter as medidas de distância do sensor (mm) em volume (cm^{-3}) de material. Sabendo que h_2 = 23,885 cm e que h_1 pode assumir diferentes valores de acordo com a espessura dos anéis de ajuste ($h_1(e)$ = 3,255, 3,085, 2,605, 2,125, 1,955 cm), as Equações (A.6-A.10) podem ser obtidas para as respectivas amplitudes de batida, utilizado GLB como exemplo: 1,600, 1,430, 0,950, 0,470, 0,300 cm.

$$V(e,w) = \frac{\pi D^2}{4}(h_1(e) + h_2 - Aw - B) \tag{A.5}$$

$$V(0{,}000, w) = -0{,}4960w + 148{,}1735 \tag{A.6}$$

$$V(0{,}170, w) = -0{,}4960w + 147{,}2081 \tag{A.7}$$

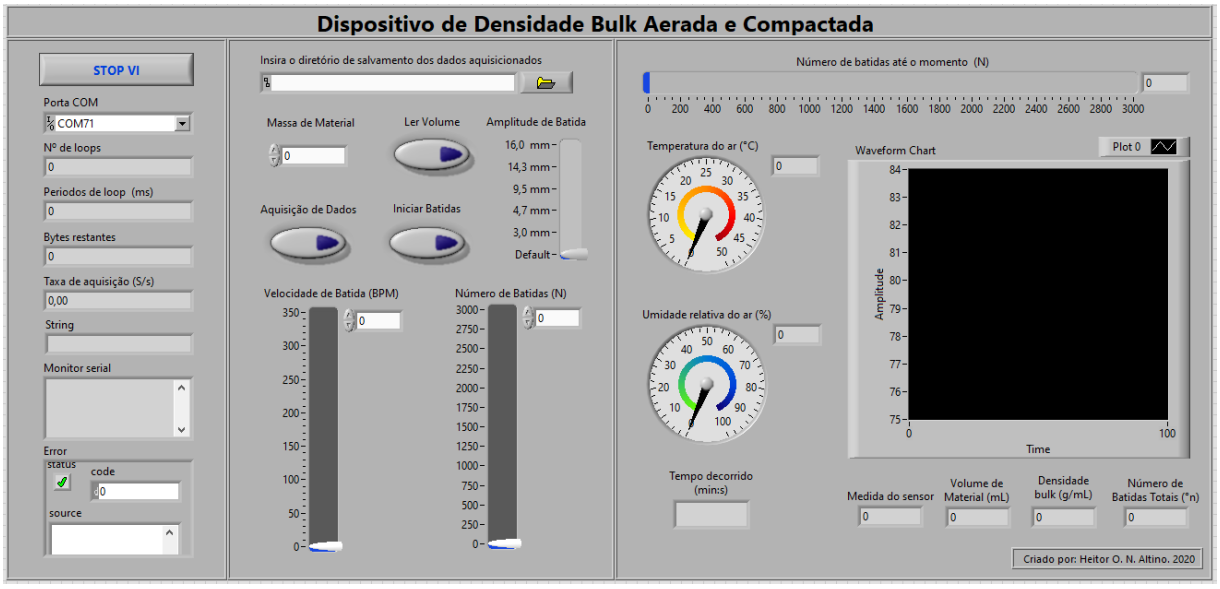
$$V(0{,}650, w) = -0{,}4960w + 144{,}4822 \tag{A.8}$$

$$V(1{,}130, w) = -0{,}4960w + 141{,}7563 \tag{A.9}$$

$$V(1{,}300, w) = -0{,}4960w + 140{,}7908 \tag{A.10}$$

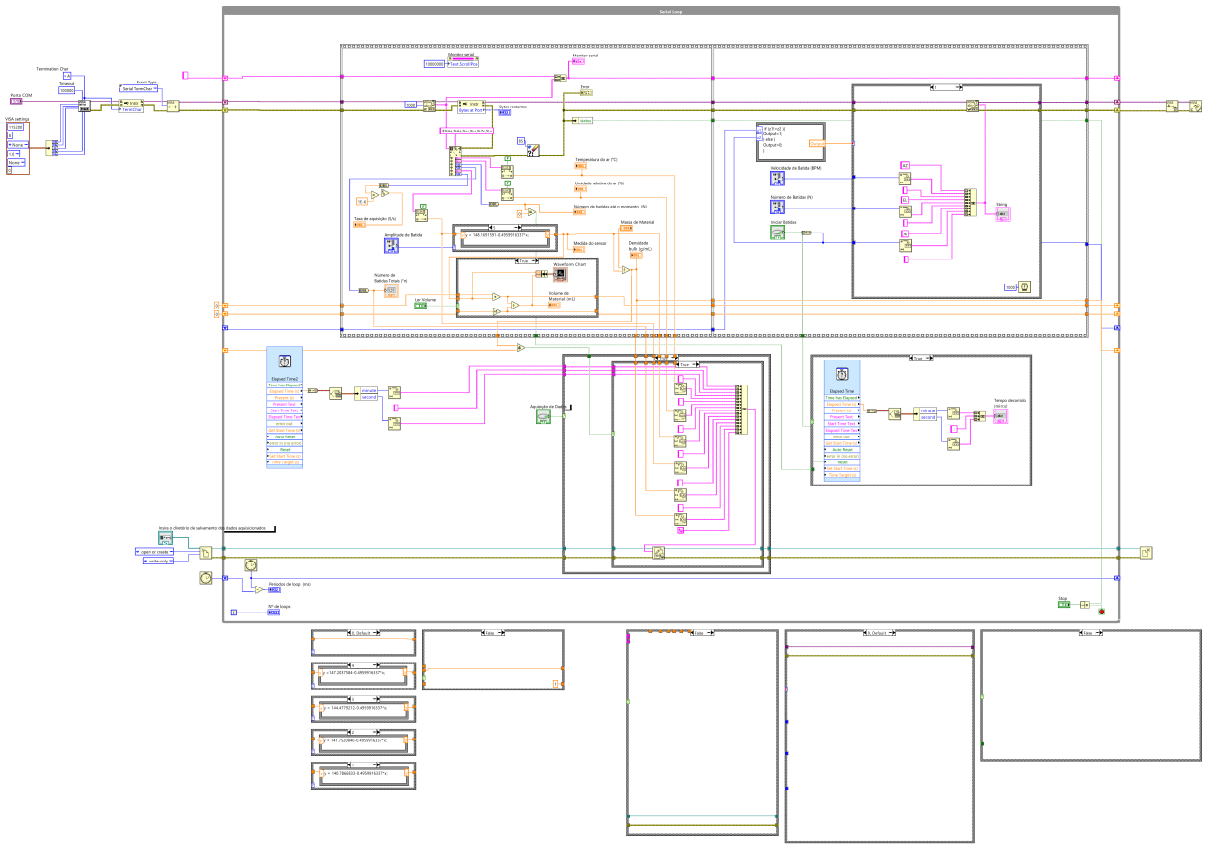
A.2 Informações adicionais

Figura A.1 – Painel frontal do supervisório do sistema de aquisição dados de densidade *bulk*.



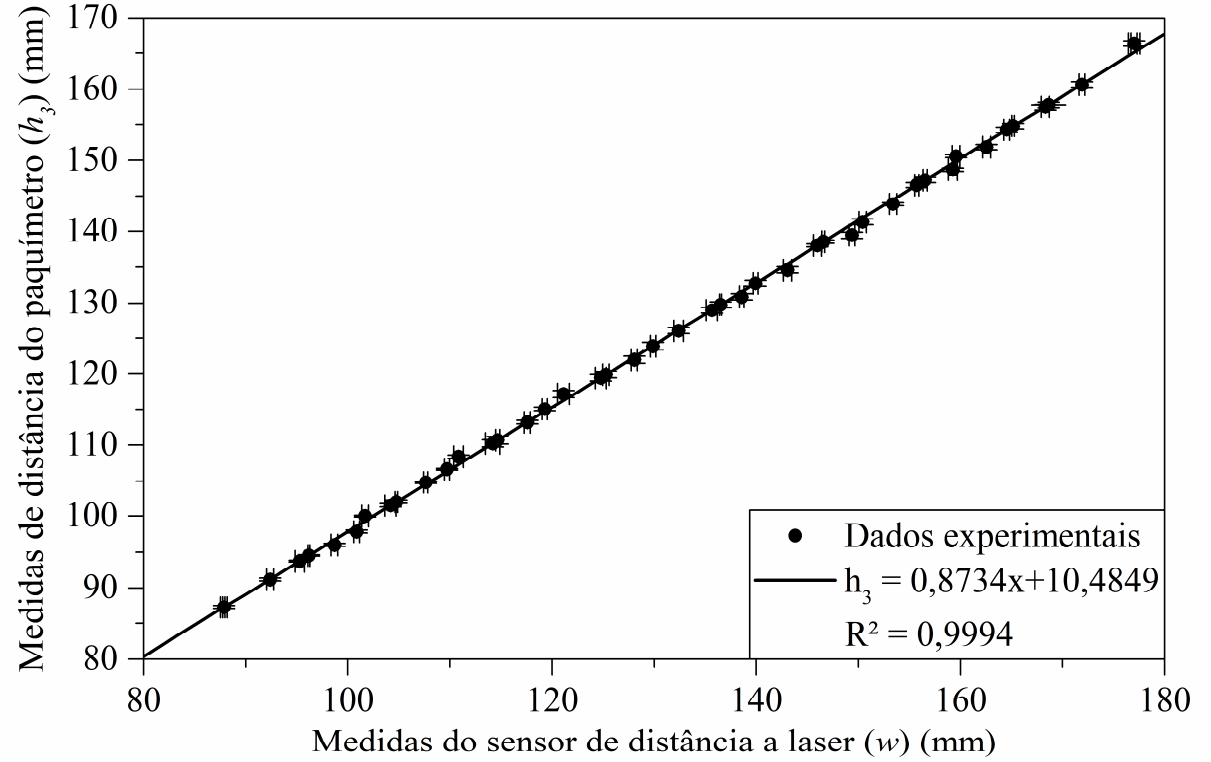
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura A.2 – Diagrama de blocos do supervisório do sistema de aquisição dados de densidade *bulk*.



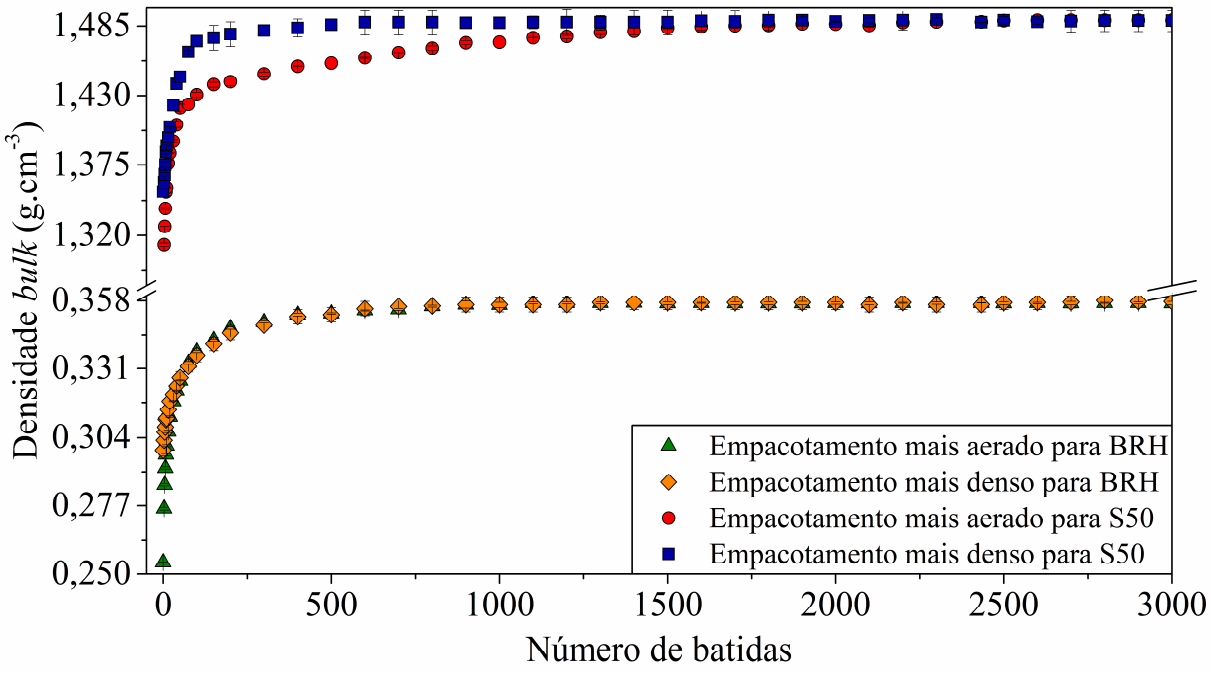
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura A.3 – Exemplo de curva de calibração do sensor de distância a laser.



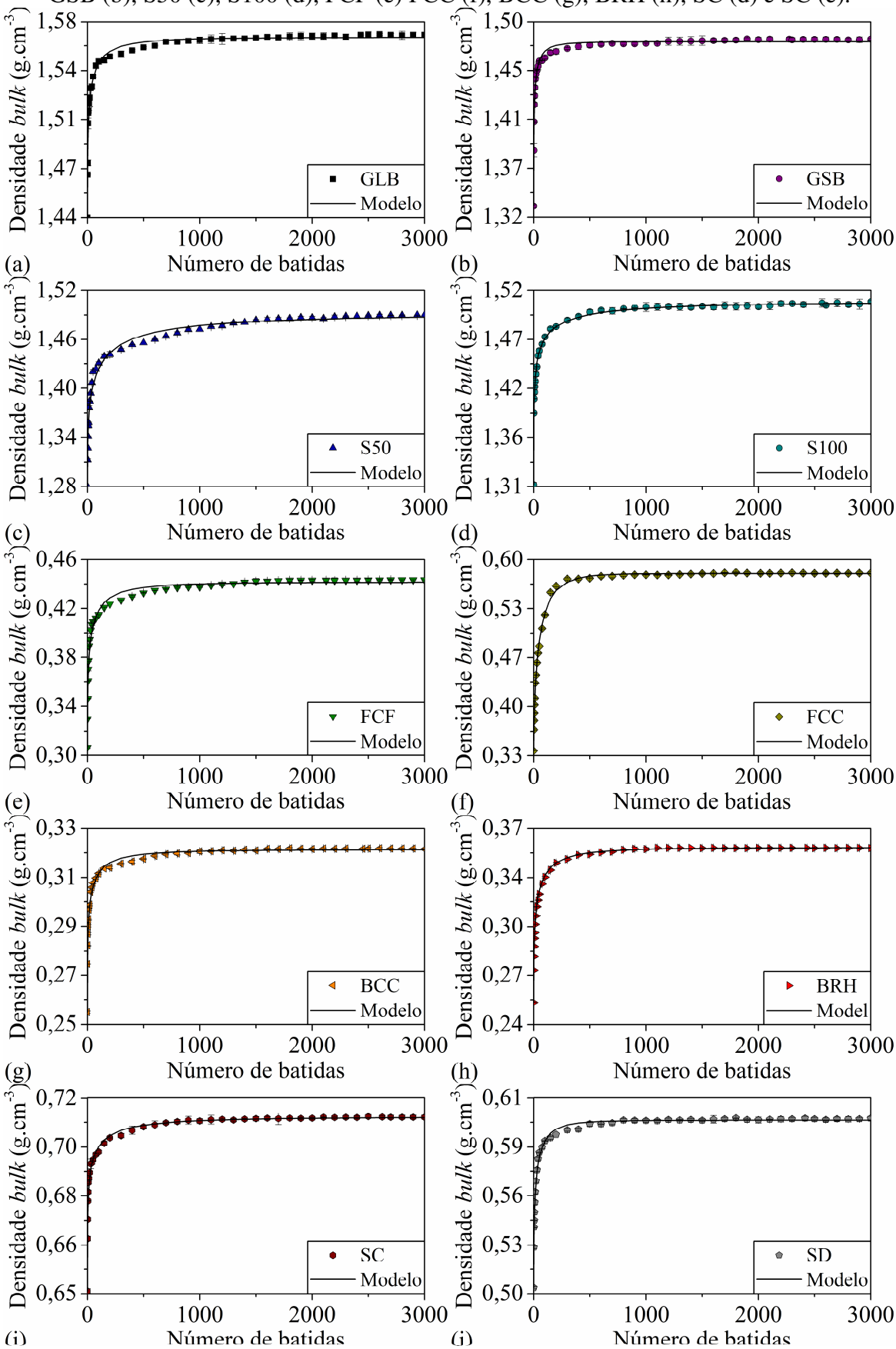
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura A.4 – Influência do empacotamento inicial na densidade *bulk* de S50 (a) (n = 3000, f = 245 batidas.min^{-1} e a = 14,3 mm) e BRH (b) (n = 3000, f = 270 batidas.min^{-1} e a = 16,0 mm)



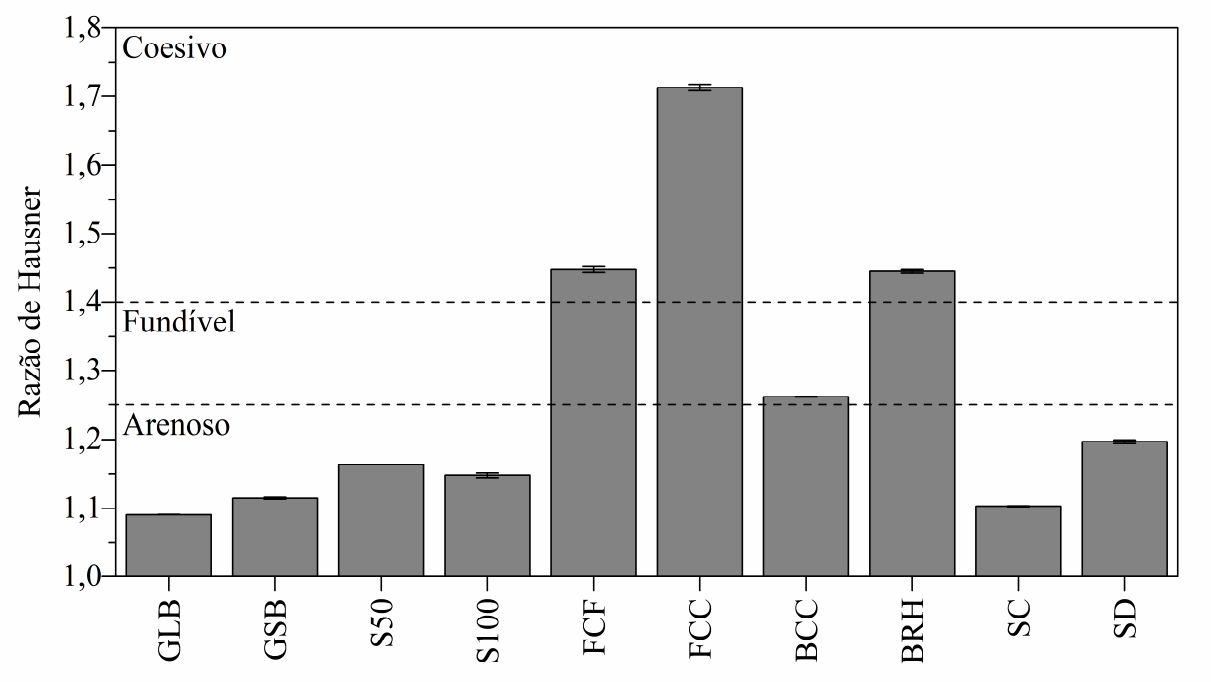
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura A.5 – Curvas de compactação para as condições ótimas de densidade *bulk*: GLB (a), GSB (b), S50 (c), S100 (d), FCF (e) FCC (f), BCC (g), BRH (h), SC (d) e SC (e).



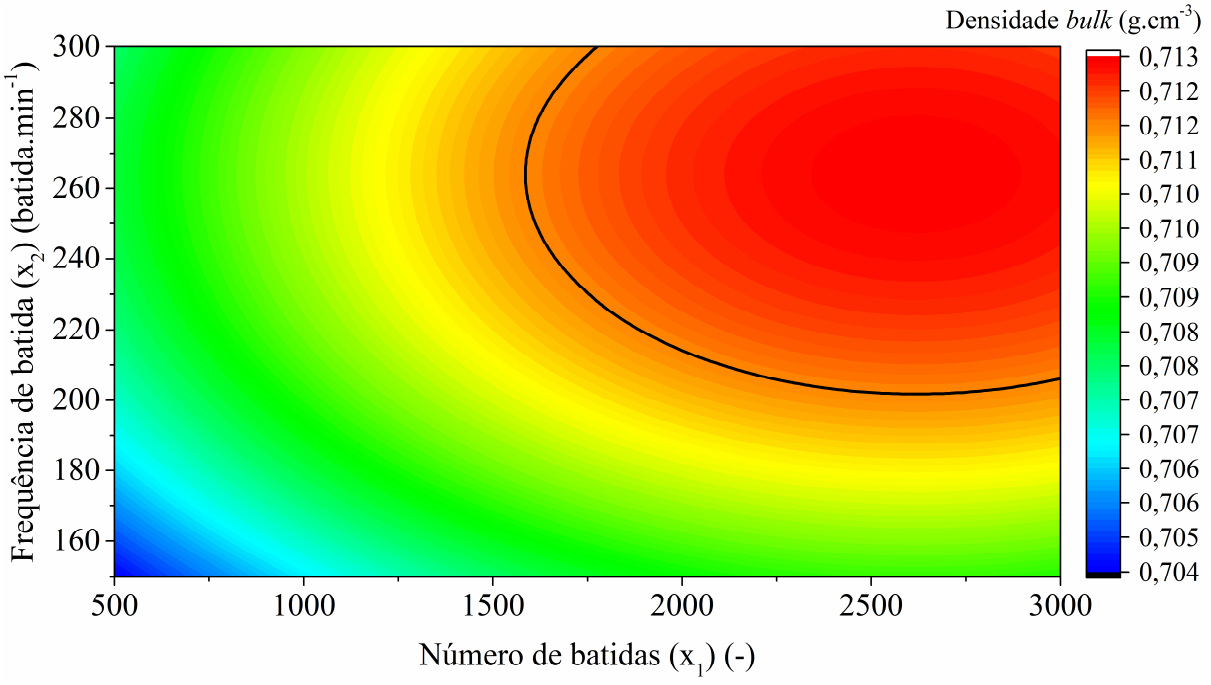
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura A.6 – Coesividade dos materiais estudados de acordo com a razão de Hausner.



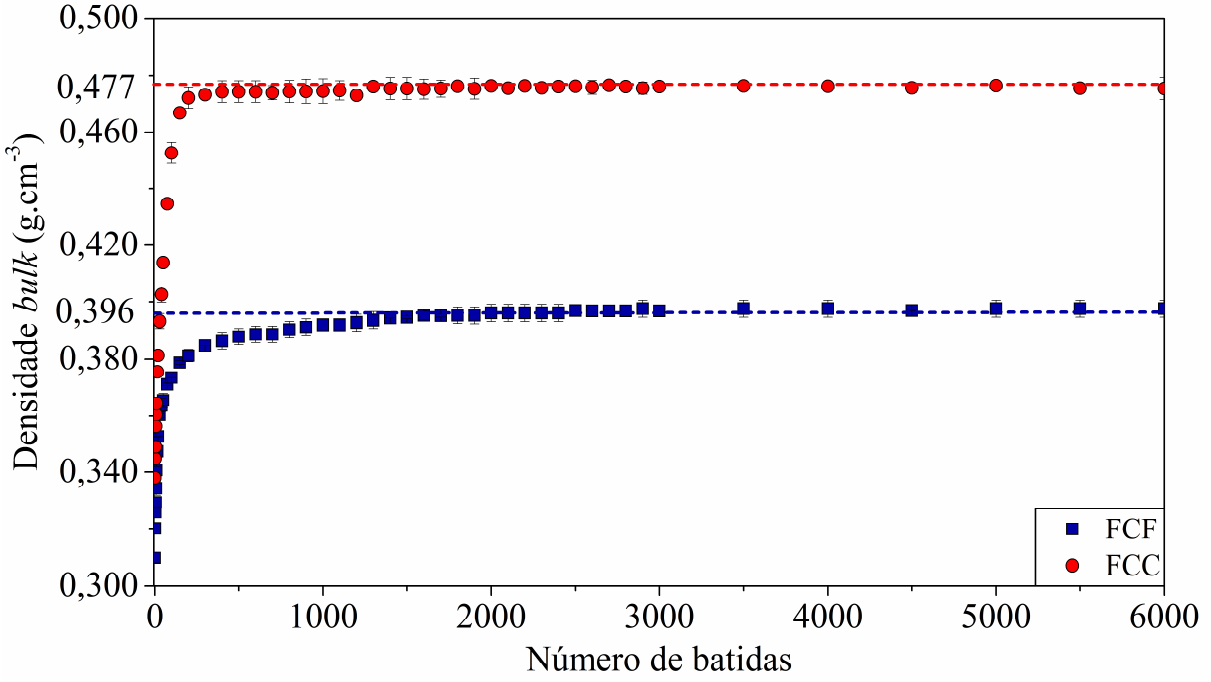
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura A.7 – Influência do número (x_1) e frequência (x_2) de batidas e na densidade *bulk* de SC.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura A.8 – Curvas de compactação (pontos) os valores máximos de densidade *bulk* compactada (linhas) previstos pelos modelos estatísticos de FCF (Equação (3.19)) e FCC (Equação (3.20)) para condições de: n = 3000, f = 250 batidas.min^{-1} e a = 3,0 mm.



Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela A.1 – Resultados estatísticos do planejamento composto central dos materiais estudados.

Classe	Material	Fatores	Efeitos	Erro de coeficiente	Nível de significância
Esferas de vidro	GLB	$Mean$	1,563	0,002	0,0000
		x_1	0,013	0,001	0,0000
		x_1^2	-0,009	0,001	0,0052
		x_2	0,014	0,001	0,0000
		x_2^2	-0,007	0,001	0,0142
		x_3	0,012	0,001	0,0001
		x_3^2	-0,010	0,001	0,0025
	GSB	$Mean$	1,478	0,002	0,0000
		x_1	0,009	0,001	0,0006
		x_1^2	-0,008	0,001	0,0069
		x_2	0,016	0,001	0,0000
		x_2^2	-0,007	0,001	0,0137
		x_3	0,012	0,001	0,0001
		x_3^2	-0,012	0,001	0,0005
		x_2x_3	-0,005	0,001	0,0342
Areias	S50	$Mean$	1,475	0,002	0,0000
		x_1	0,033	0,001	0,0000
		x_1^2	-0,012	0,002	0,0070
		x_2	0,015	0,001	0,0002
		x_2^2	-0,008	0,002	0,0394
		x_3	0,017	0,001	0,0001
		x_3^2	-0,009	0,002	0,0265
		x_1x_2	-0,007	0,002	0,0471
	S100	$Mean$	1,492	0,002	0,0000
		x_1	0,024	0,001	0,0000
		x_1^2	-0,013	0,001	0,0004
		x_2	0,013	0,001	0,0001
		x_2^2	-0,006	0,001	0,0344
		x_3	0,022	0,001	0,0000
		x_3^2	-0,017	0,001	0,0001
		x_2x_3	-0,006	0,001	0,0232

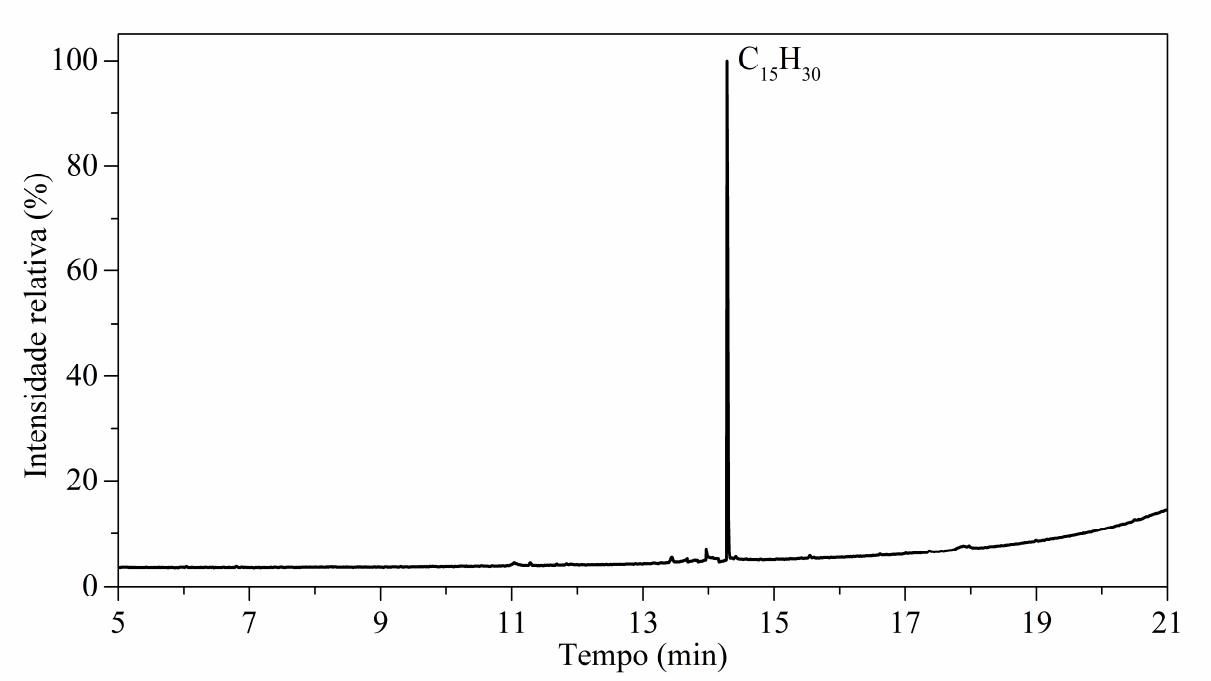
Pós-alimentícios	FCF	$Mean$	0,432	0,002	0,0000
		x_1	0,005	0,001	0,0341
		x_1^2	-0,006	0,001	0,0448
		x_2	0,007	0,001	0,0063
		x_2^2	-0,006	0,001	0,0442
		x_3	0,035	0,001	0,0000
		x_3^2	-0,015	0,001	0,0002
	FCC	$Mean$	0,549	0,003	0,0000
		x_1	0,012	0,002	0,0118
		x_1^2	-0,021	0,003	0,0025
		x_2	-0,009	0,002	0,0359
		x_2^2	-0,012	0,003	0,0367
		x_3	0,076	0,002	0,0000
		x_3^2	-0,025	0,003	0,0006
Biomassas	BCC	$Mean$	0,317	0,000	0,0000
		x_1	0,003	0,000	0,0001
		x_1^2	-0,001	0,000	0,0480
		x_2	0,005	0,000	0,0000
		x_2^2	-0,002	0,000	0,0045
		x_3	0,005	0,000	0,0000
		x_3^2	-0,001	0,000	0,0291
	BRH	$Mean$	0,345	0,001	0,0000
		x_1	0,006	0,000	0,0001
		x_1^2	-0,004	0,001	0,0070
		x_2	0,009	0,000	0,0000
		x_2^2	-0,005	0,001	0,0036
		x_3	0,017	0,000	0,0000
		x_3^2	-0,005	0,001	0,0040

Sementes	SC	$Mean$	0,711	0,000	0,0000
		x_1	0,003	0,000	0,0000
		x_1^2	-0,002	0,000	0,0033
		x_2	0,002	0,000	0,0000
		x_2^2	-0,002	0,000	0,0034
		x_3	0,002	0,000	0,0002
		x_3^2	-0,001	0,000	0,0168
	SD	$Mean$	0,602	0,002	0,0000
		x_1	0,011	0,001	0,0010
		x_1^2	-0,008	0,002	0,0357
		x_2	0,017	0,001	0,0000
		x_2^2	-0,010	0,002	0,0142
		x_3^2	-0,023	0,002	0,0000
		x_2x_3	-0,010	0,001	0,0071

Fonte: Autoria própria (2023)

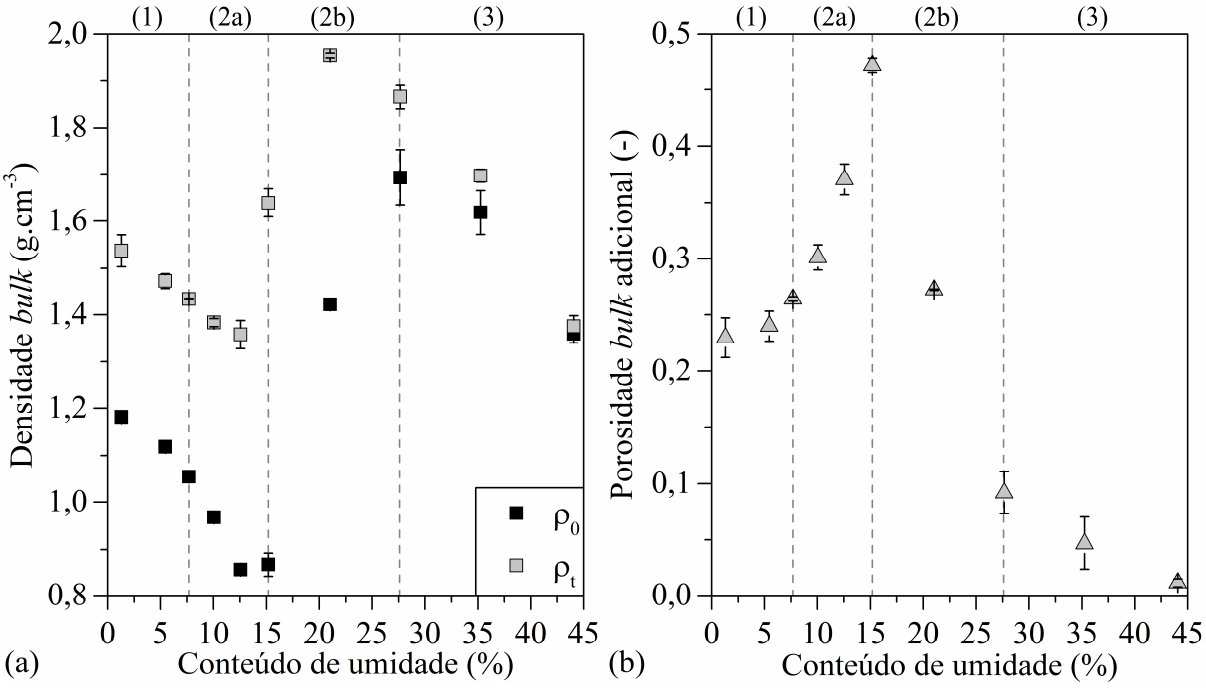
APÊNDICE B

Figura B.1 – Cromatograma do conteúdo do óleo presente nos cascalhos de perfuração.



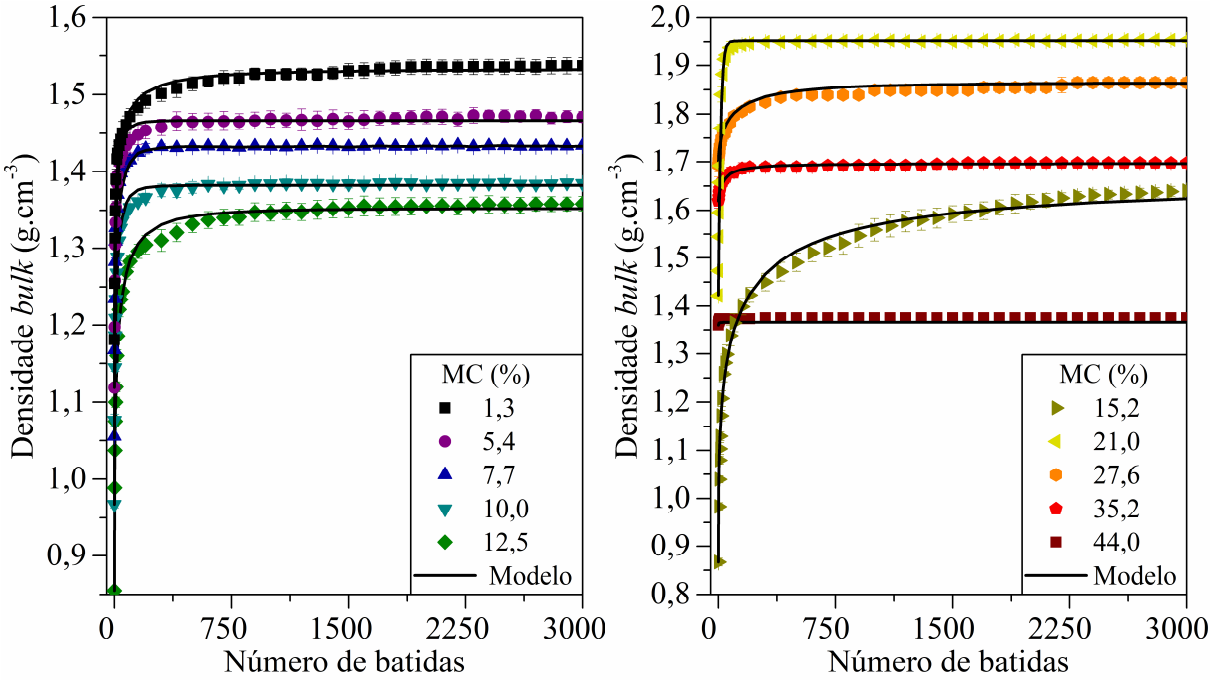
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura B.2 – Efeito do conteúdo de umidade nas densidades *bulk* aerada (ρ_0) e compactada (ρ_t) (a), e porosidade *bulk* adicional (ε_{add}) dos cascalhos de perfuração.



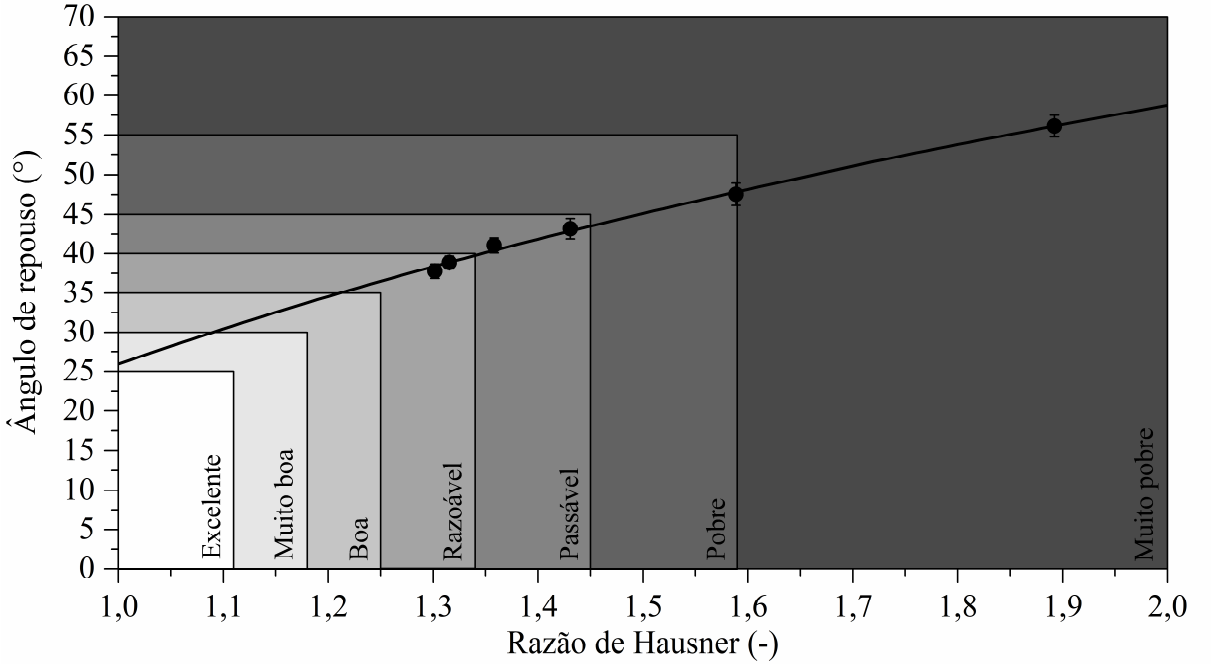
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura B.3 – Curvas de compactação de cascalhos com diferentes umidades e resultados das previsões do modelo KWW.



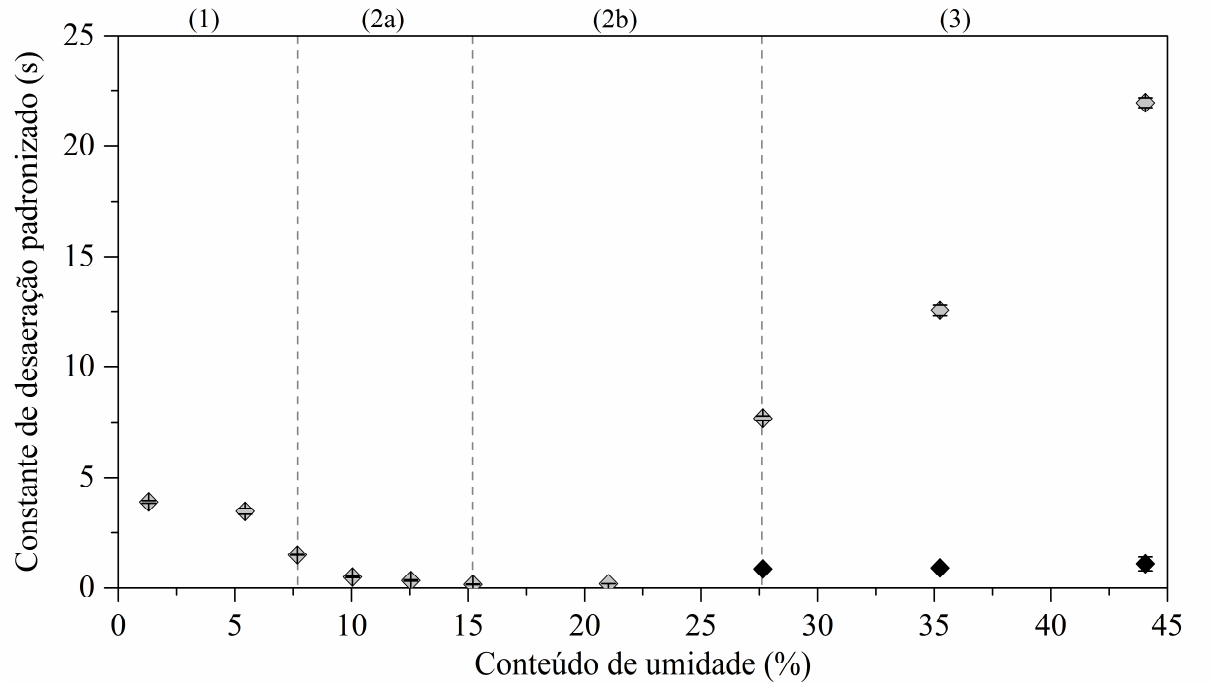
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura B.4 – Correlação entre razão de Hausner e ângulo de repouso para diferentes umidades de cascalhos de perfuração.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura B.5 – Efeito do conteúdo de umidade no tempo de desaeração padronizado (SDT) de cascalhos de perfuração.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela B.1 – Comparação entre o tempo de desaeração (t_{da}) de cascalhos de perfuração com outros materiais do grupo B da classificação de Geldart com características semelhantes.

Material	ρ_r (kg.m^{-3})	D_p (μm)	ρ_0 (kg.m^{-3})	t_{da} (s)	Referência
Areia (NY)	2800	250,0	950,7	2,10	Sanchez *et al.* (2003)
Esferas de vidro	2500	203,0	1012,7	6,02	Sanchez *et al.* (2003)
Pó de ardósia	2860	500,0	1280,0	9,95	Mainwaring *et al.*(1987) by Sanchez *et al.* (2003)
Sólidos granulares piroclásticos	2500	108,7	-	3,82	Bareschino *et al.* (2007)
Cascalhos de perfuração secos	2699	161,7	1181,0	3,76	Este trabalho

Fonte: Autoria própria (2023).

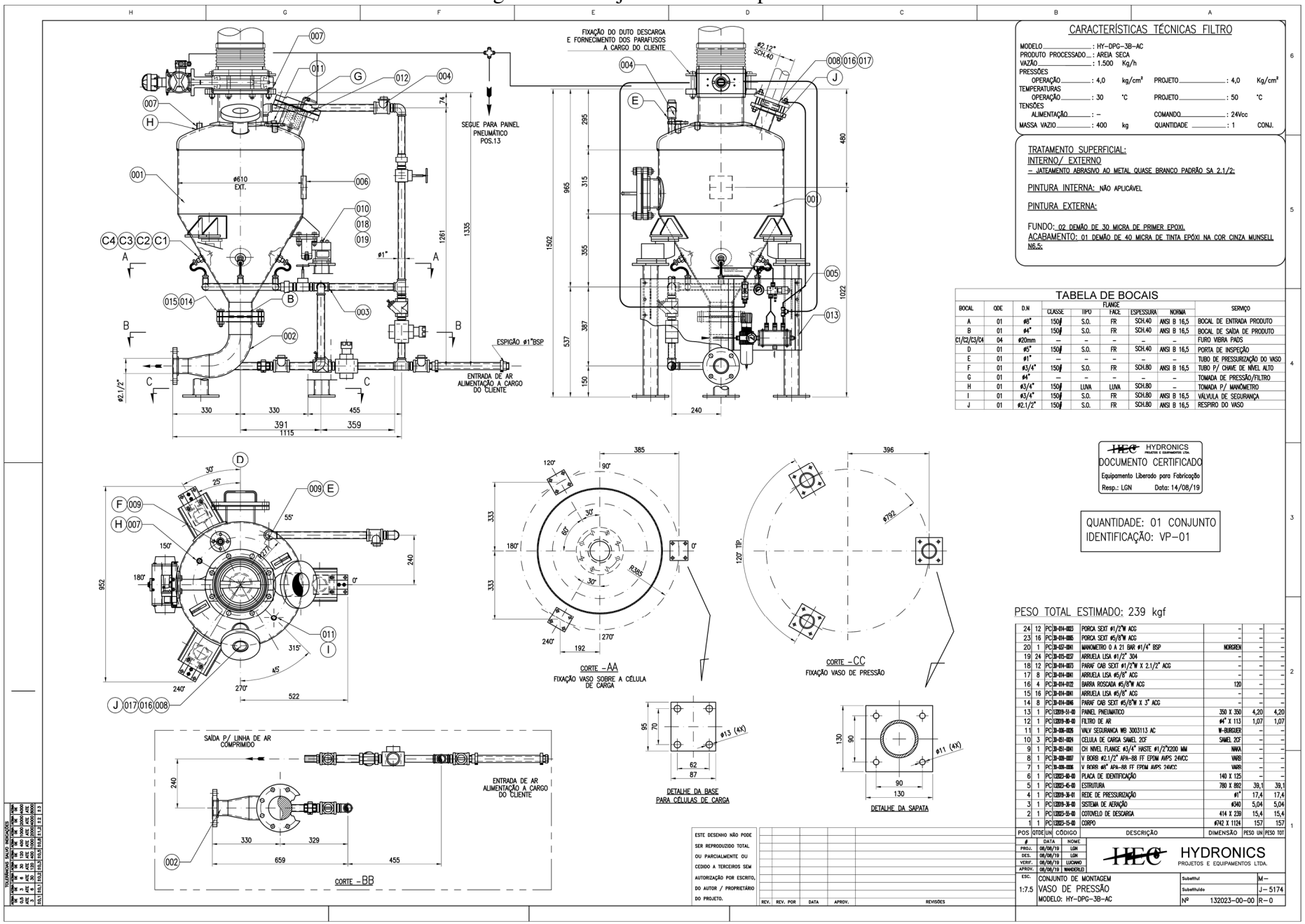
Tabela B.2 – Parâmetros ajustados do modelo KWW para diferentes conteúdos de umidade de cascalhos de perfuração.

MC (%)	ρ_∞ (g.cm^{-3})	ρ_t (g.cm^{-3})	ρ_0 (g.cm^{-3})	β	τ	R^2	*p-value*
1,3	1,533	1,537 ± 0,034	1,181 ± 0,005	0,393	20,004	0,982	0,631
5,4	1,467	1,472 ± 0,016	1,119 ± 0,008	0,583	10,383	0,984	0,406
7,7	1,433	1,434 ± 0,001	1,055 ± 0,006	0,608	7,632	0,994	0,502
10,0	1,382	1,383 ± 0,008	0,967 ± 0,011	0,552	10,837	0,994	0,498
12,5	1,352	1,358 ± 0,030	0,855 ± 0,006	0,426	19,759	0,994	0,645
15,2	1,651	1,639 ± 0,030	0,866 ± 0,026	0,372	111,905	0,992	0,174
21,0	1,949	1,953 ± 0,005	1,422 ± 0,002	1,040	13,970	0,997	0,195
27,6	1,865	1,865 ± 0,026	1,694 ± 0,059	0,521	100,222	0,945	0,972
35,2	1,696	1,698 ± 0,014	1,619 ± 0,047	0,680	55,326	0,978	0,343
44,0	1,375	1,375 ± 0,023	1,360 ± 0,020	0,843	5,024	0,919	0,919

Fonte: Autoria própria (2023).

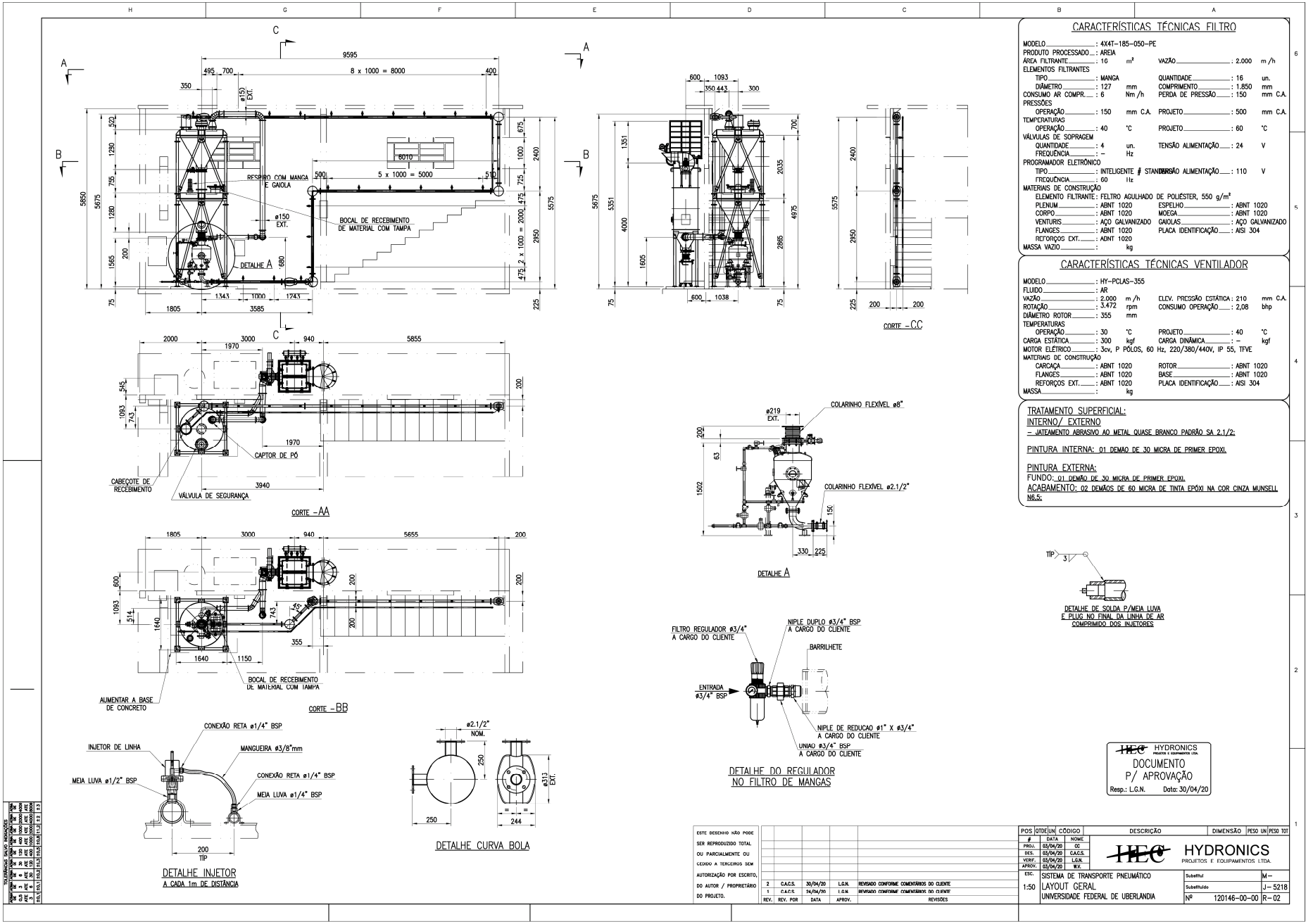
APÊNDICE C

Figura C.1 – Projeto de vaso de pressão.



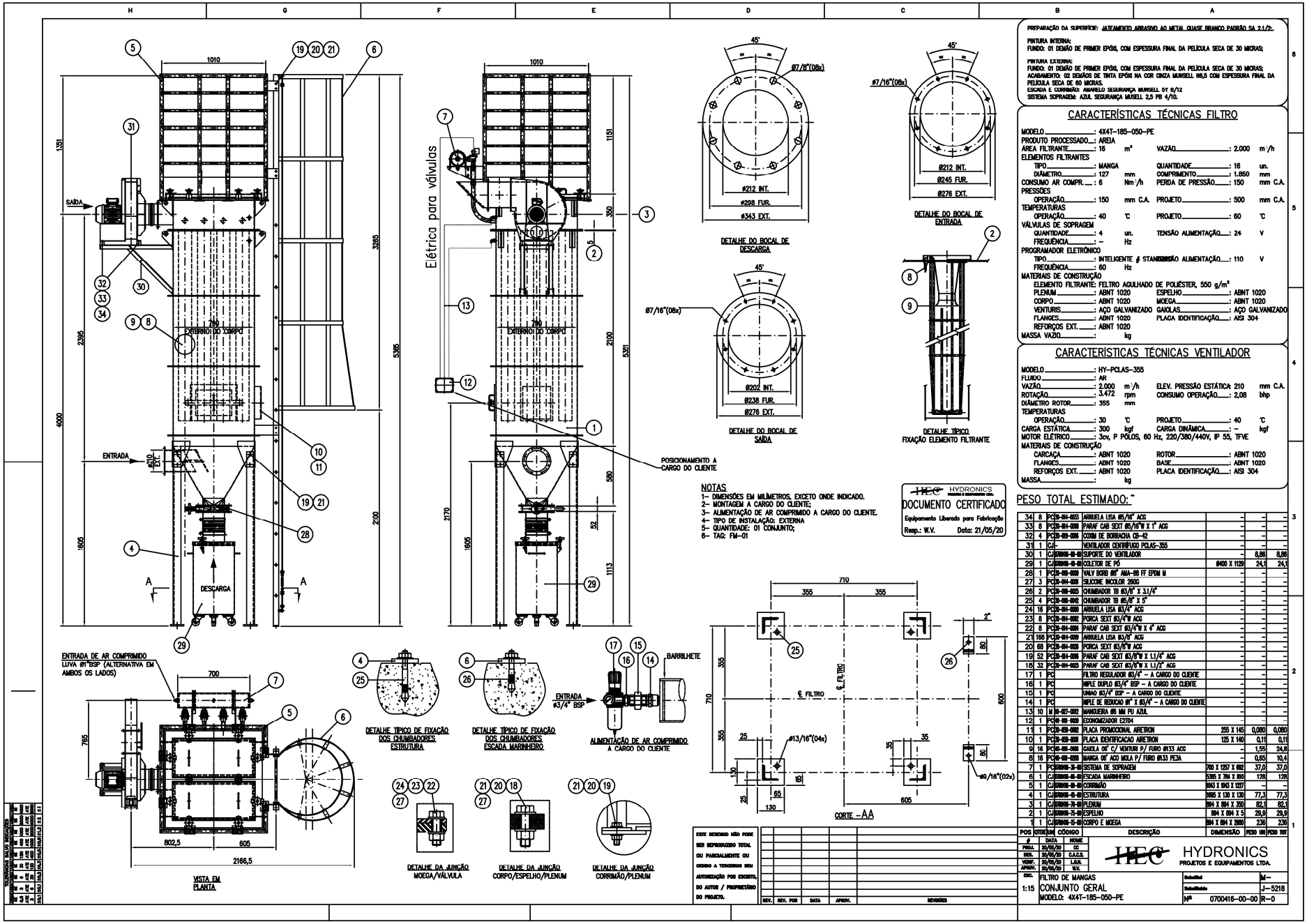
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura C.2 – Projeto do sistema de transporte pneumático.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura C.3 – Projeto do filtro de mangas.



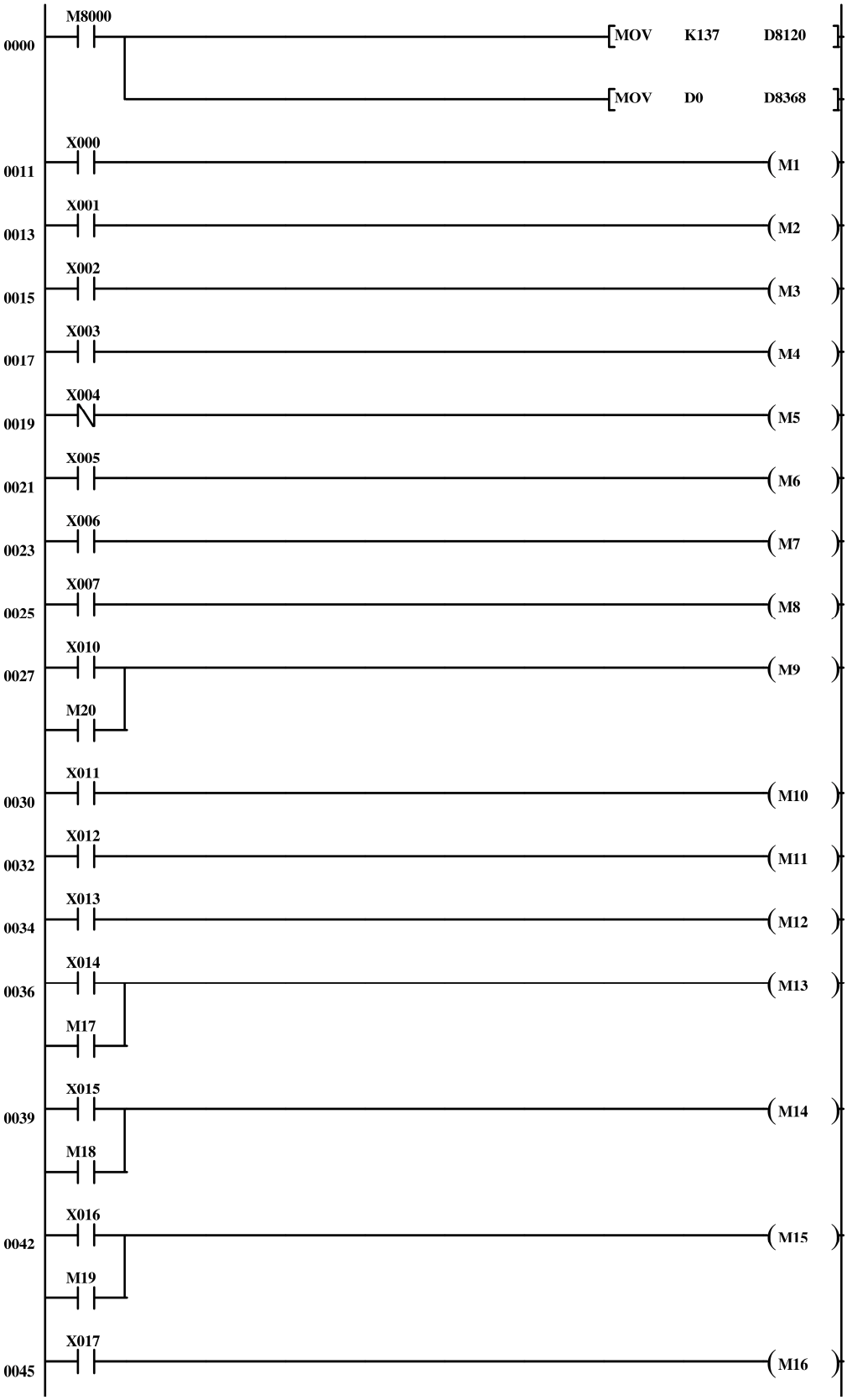
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura C.4 – Descrição das variáveis em linguagem Ladder.

X001	PSL-1	X002	FC1
X003	FC2	X004	FC3
X005	ABRE_SILO2	X006	FECHA_SILO2
X007	FC_SILO2	X010	BEM-1
X011	STATUS FILTRO	X012	SEM USO
X013	WSH-01	X014	BR-1
X015	BLP-1	X016	BDP-1
X017	SW-1	Y000	ABRE VALV. ALIME
Y001	ABRE VALV RESPIR	Y002	FECHA VALV RESPI
Y003	ABRE VALV INJET	Y004	ABRE VALV. TRANS
Y005	FECHA VALV TRANS	Y006	LIGA FILTRO
Y007	FECHA VALV ALIME	Y010	SILO2
Y011	RESRVA RC10	Y012	CARREGANDO RC1
Y013	TRANSPORTANDO RC	Y014	TRANSPORTE CONCL
Y015	FALHA RC14	Y016	RESERVA RC15
Y017	RESERVA RC16	M1	NIVEL ALTO
M2	PRESSAO BAIXA	M3	FC1 DA VS DE ALI
M4	FC2 VS. ALIMEN	M5	FC3 VS RESPIR
M6	ABRE_SILO2	M7	FECHA_SILO2
M8	FC_SILO2	M9	PARADA DE EMERGE
M10	FILTRO LIGADO	M11	SEM USO
M12	CELULA DE CARGA	M13	BR1 RESET
M14	BLP1 PARTID	M15	BDP1 PARADA
M16	SW1 MANUAL OU	M50	ABRE VALVULA ALI
M52	FECHA VALVUL	M54	ABRE VALVULA DE
M62	LIGA FILTRO	M100	SW1 EM MANUAL
M101	SW1 EM AUTO	M102	PARTE EM MANUAL
M103	STATUS DE LSL VA	M104	PRESSAO BAIXA
M105	VASO VAZIO	M106	STATUS NIVEL
M107	FECHA VS ALIMEN	M109	LIGA FILTRO
M110	FILTRO LIGADO	M111	ABRE VS RESPIR
M112	VS RESPIRO ABERT	M113	ABRE VS ALIMEN
M114	VS DE ALIMEN	M115	CARREGAMENTO CON
M117	FECHA VS ABAST.	M118	VS ABAST. FECHAD
M119	FECHA RESPIR	M120	RESPIRO FECHAD
M121	ABRE VS TRANSP	M122	ABRE VS INJETO
M123	DESLIGA CICLO	M124	TERMINO DE CICLO
M125	RESET DE LOGICA	M126	EMERGENCIA
M127	PARTIDA EM AUTOM	M128	PARADA
M200	FORCE_00	M201	FORCE_01
M202	FORCE_02	M203	FORCE_03
M204	FORCE_04	M205	FORCE_05
M206	FORCE_06	M207	FORCE_07
M208	FORCE_08	M209	FORCE_09
M210	FORCE_10	M211	FORCE_11
M212	FORCE_12	M213	FORCE_13
M214	FORCE_14	M215	FORCE_15
M216	FORCE_16	T0	FALHA NO FECHAM

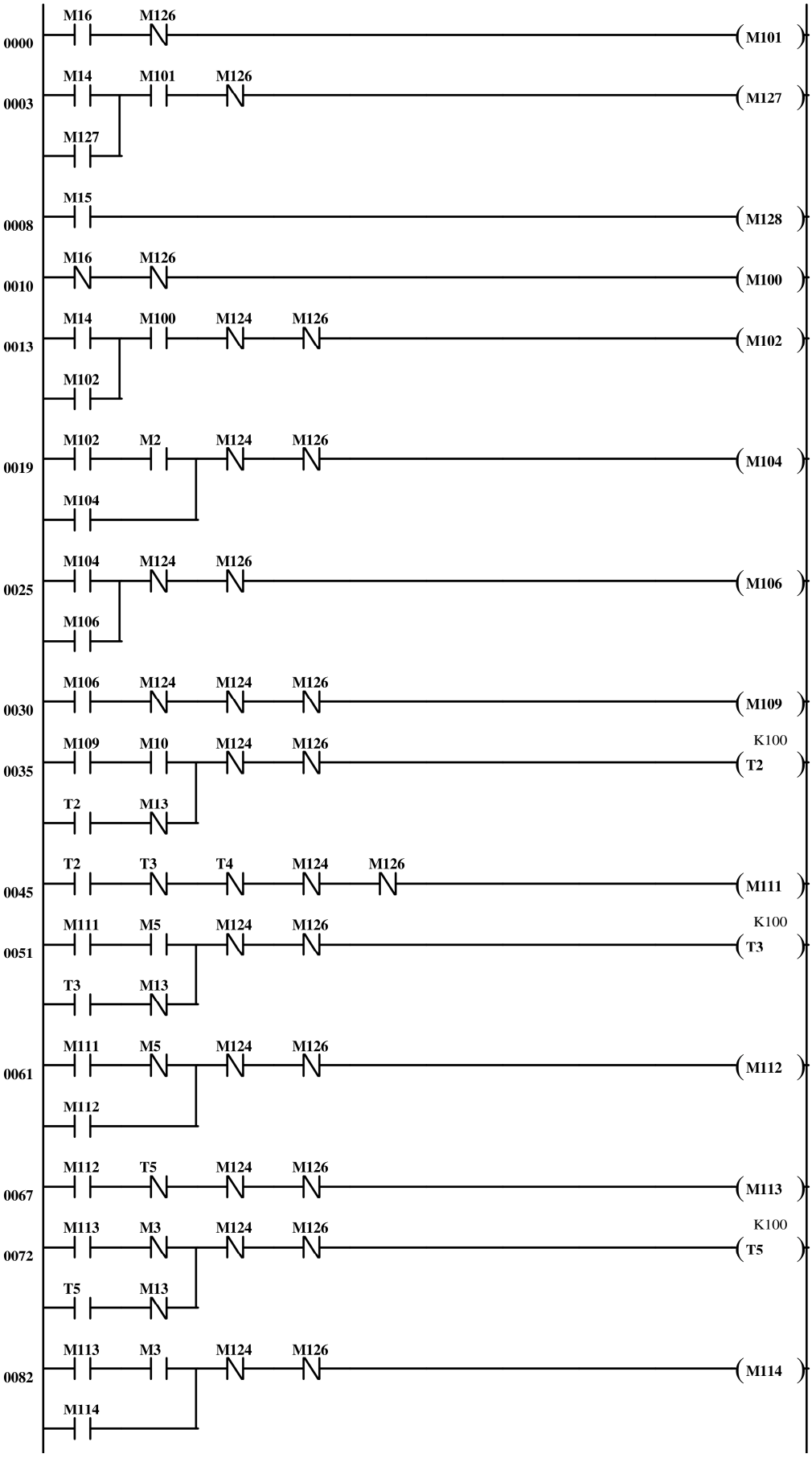
Fonte: Autoria própria (2023).

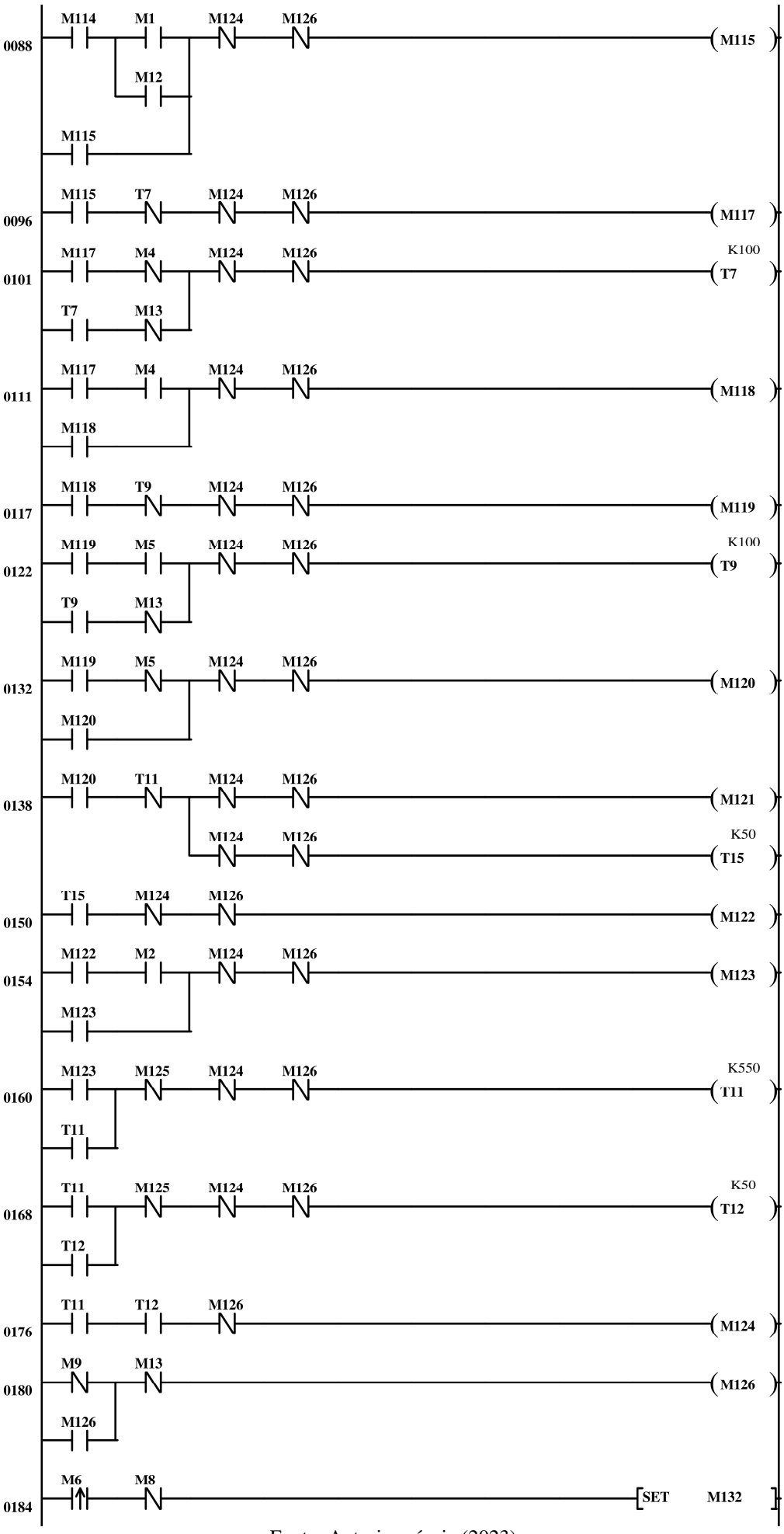
Figura C.5 – Programação em Ladder da lógica das portas de entrada do PLC.



Fonte: Autoria própria (2023)

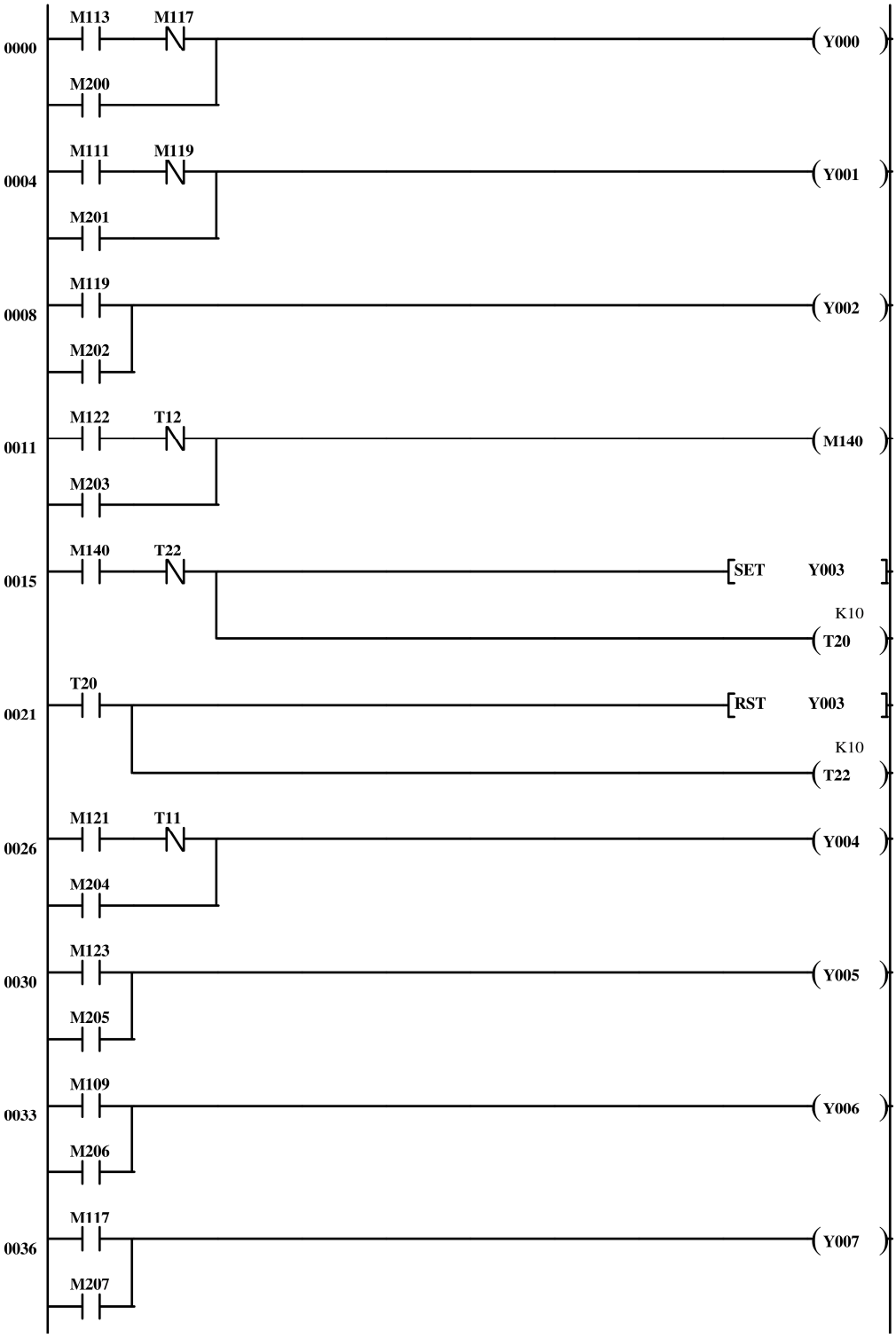
Figura C.6 – Programação em Ladder da lógica de controle do PLC.

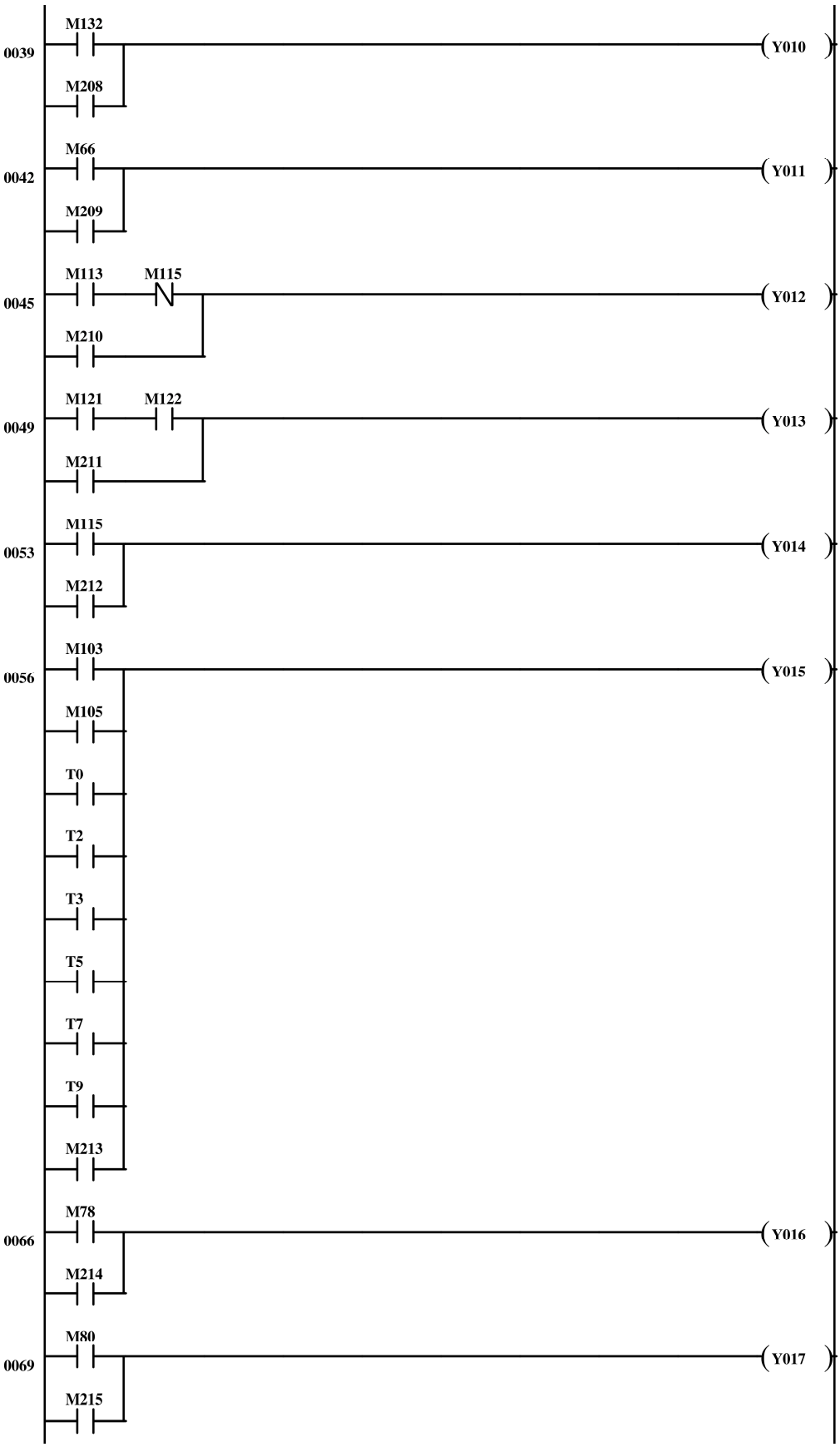




Fonte: Autoria própria (2023)

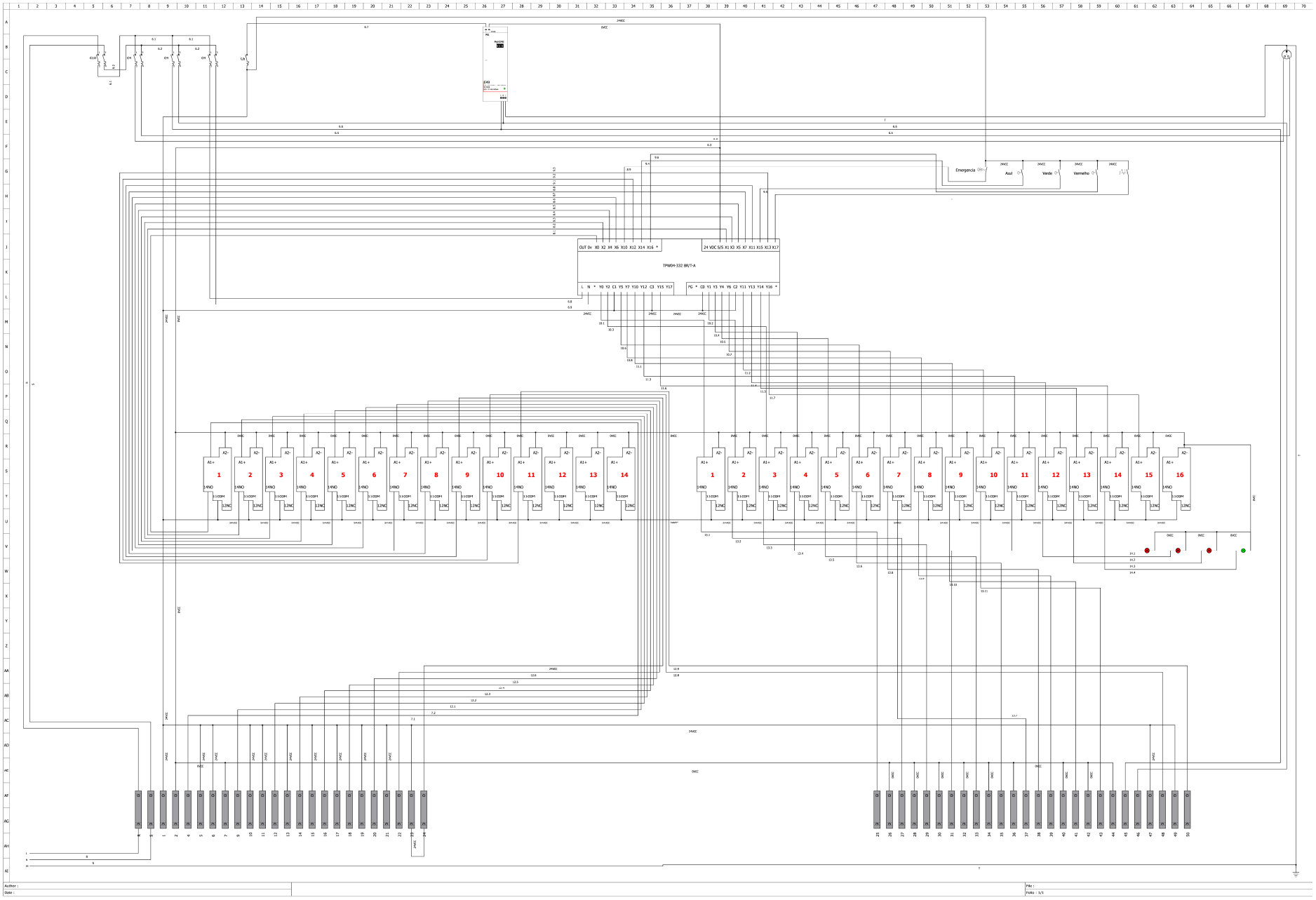
Figura C.7 – Programação em Ladder da lógica das portas de saída do PLC.





Fonte: Autoria própria (2023)

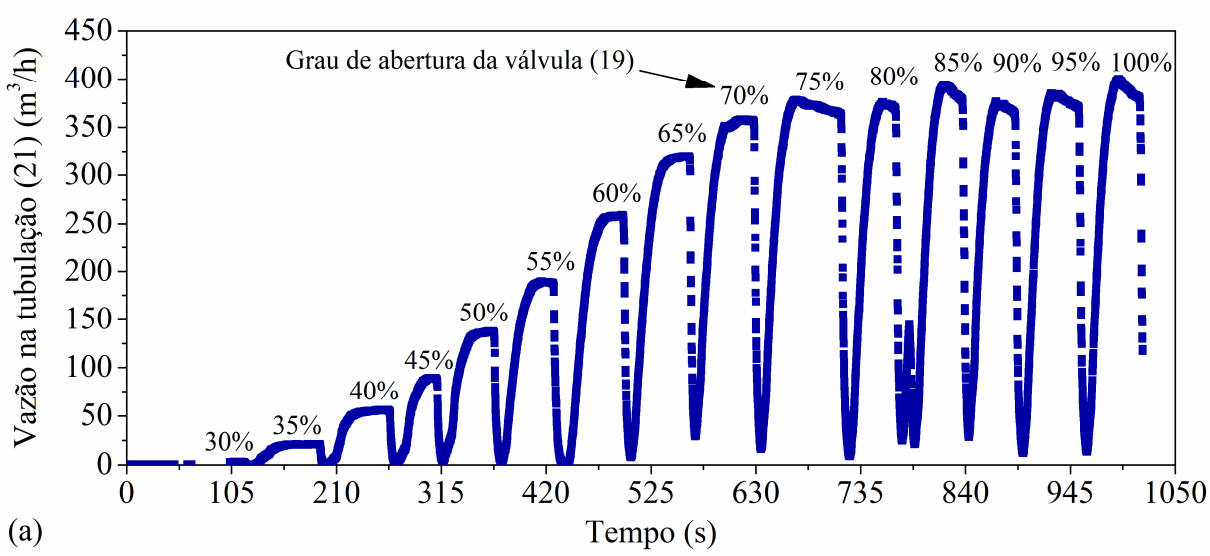
Figura C.8 – Projeto do painel elétrico do sistema de transporte pneumático.



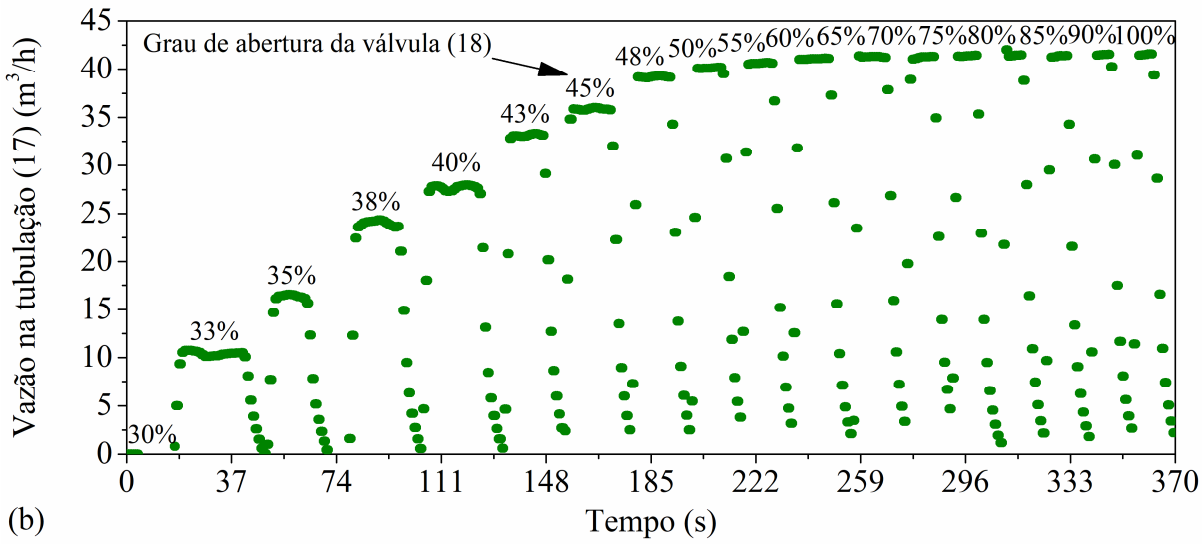
Fonte: Autoria própria (2023)

APÊNDICE D

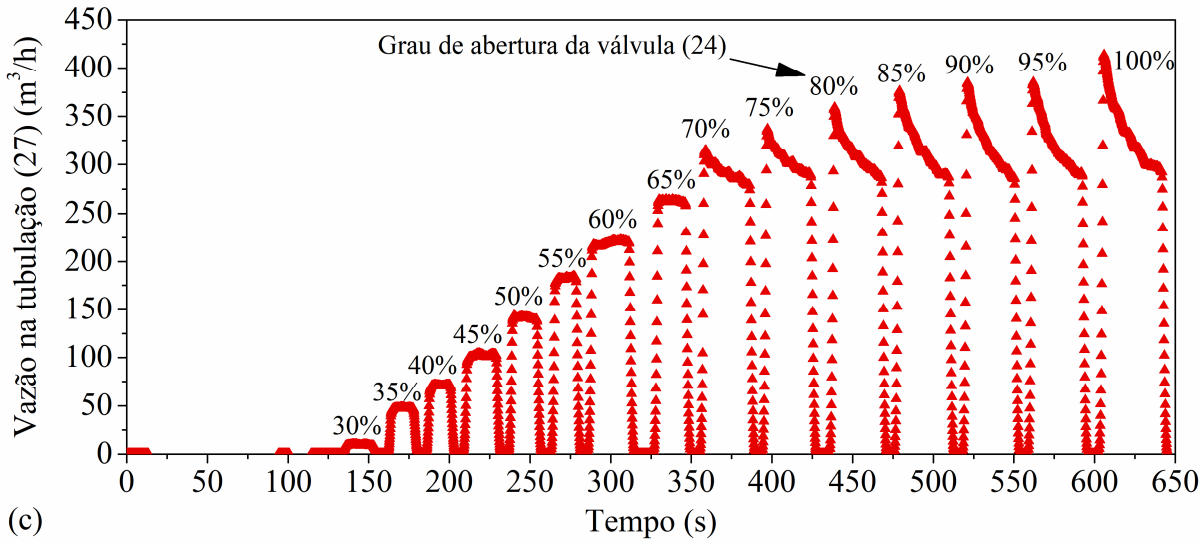
Figura D.1 – Influência do grau de abertura das válvulas (19), (18) e (24) na vazão nas tubulações (21) (a), (17) (b) e (27) (c) em função do tempo.



(a)

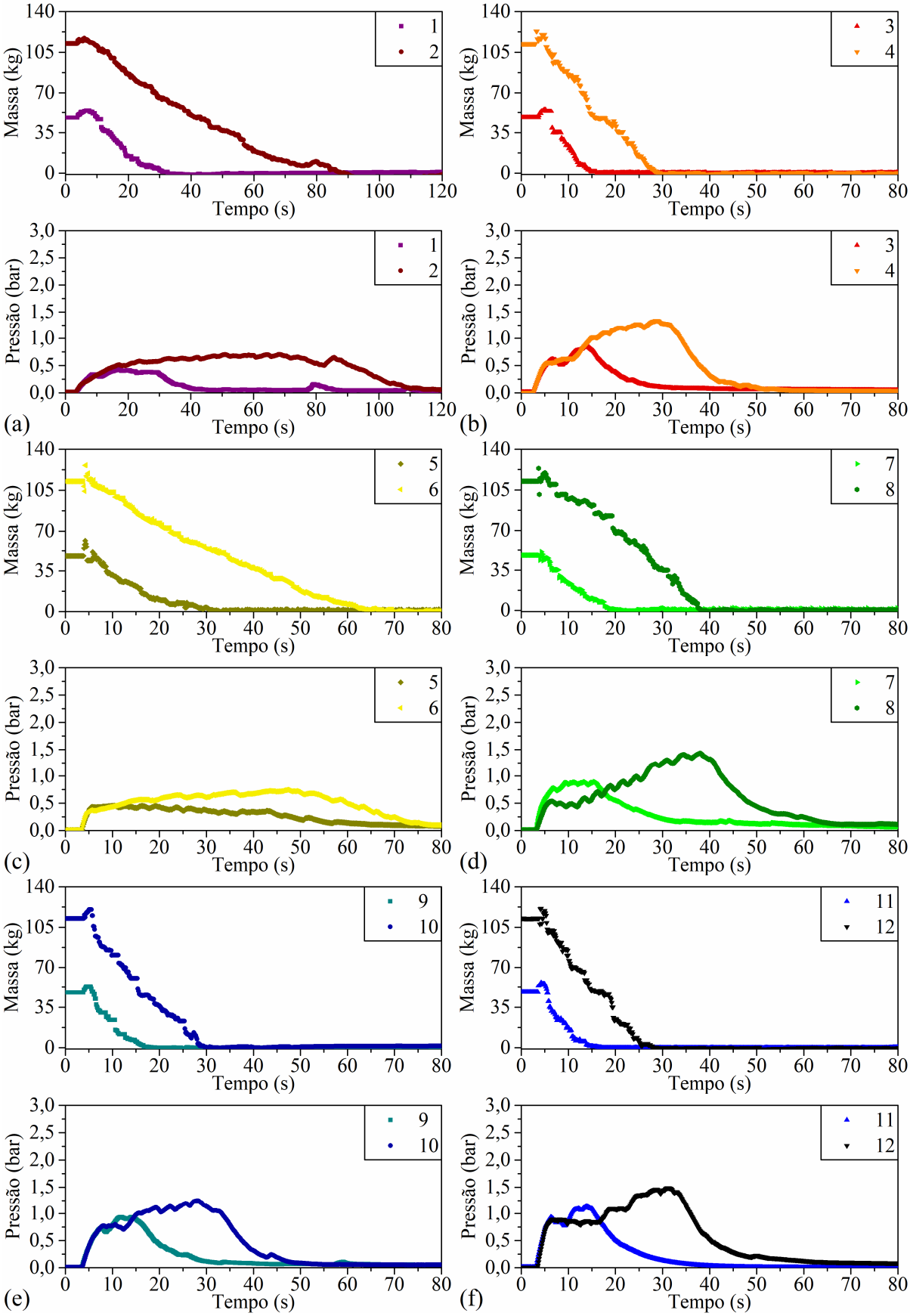


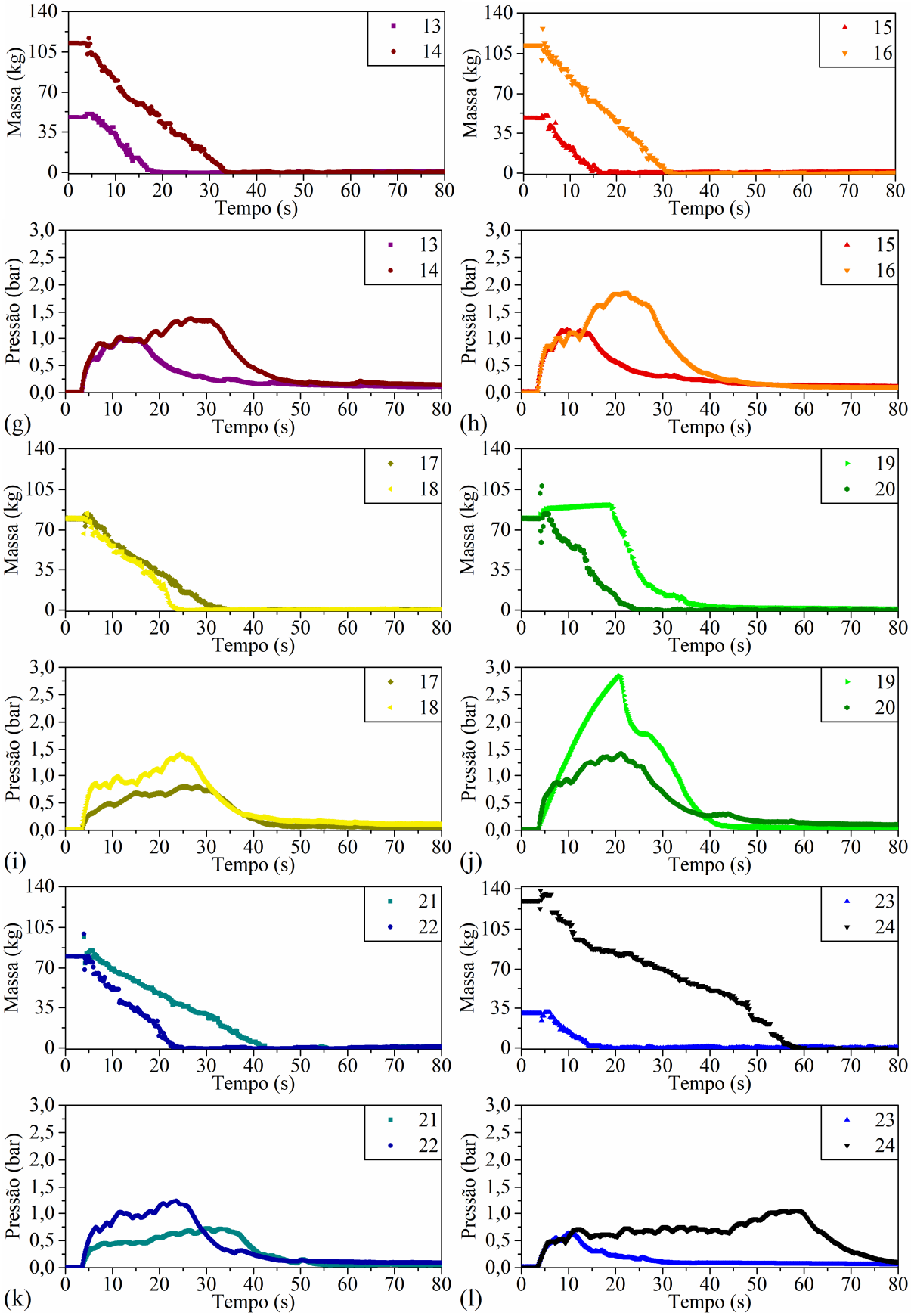
(b)

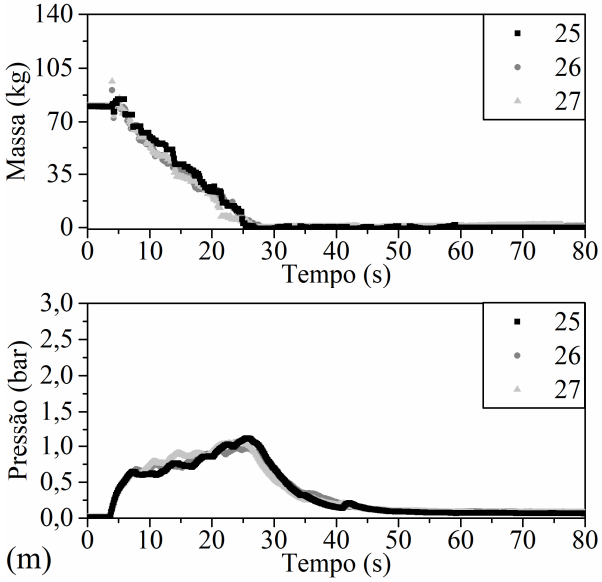


(c)

Figura D.2 – Massa de material e pressão no vaso durante a descarga do vaso de pressão para os experimentos: 1-2 (a), 3-4 (b), 5-6 (c), 7-8 (d), 9-10 (e), 11-12 (f), 13-14 (g), 15-16 (h), 17-18 (i), 19-20 (j), 21-22 (k), 23-24 (l) e 25-27 (m).

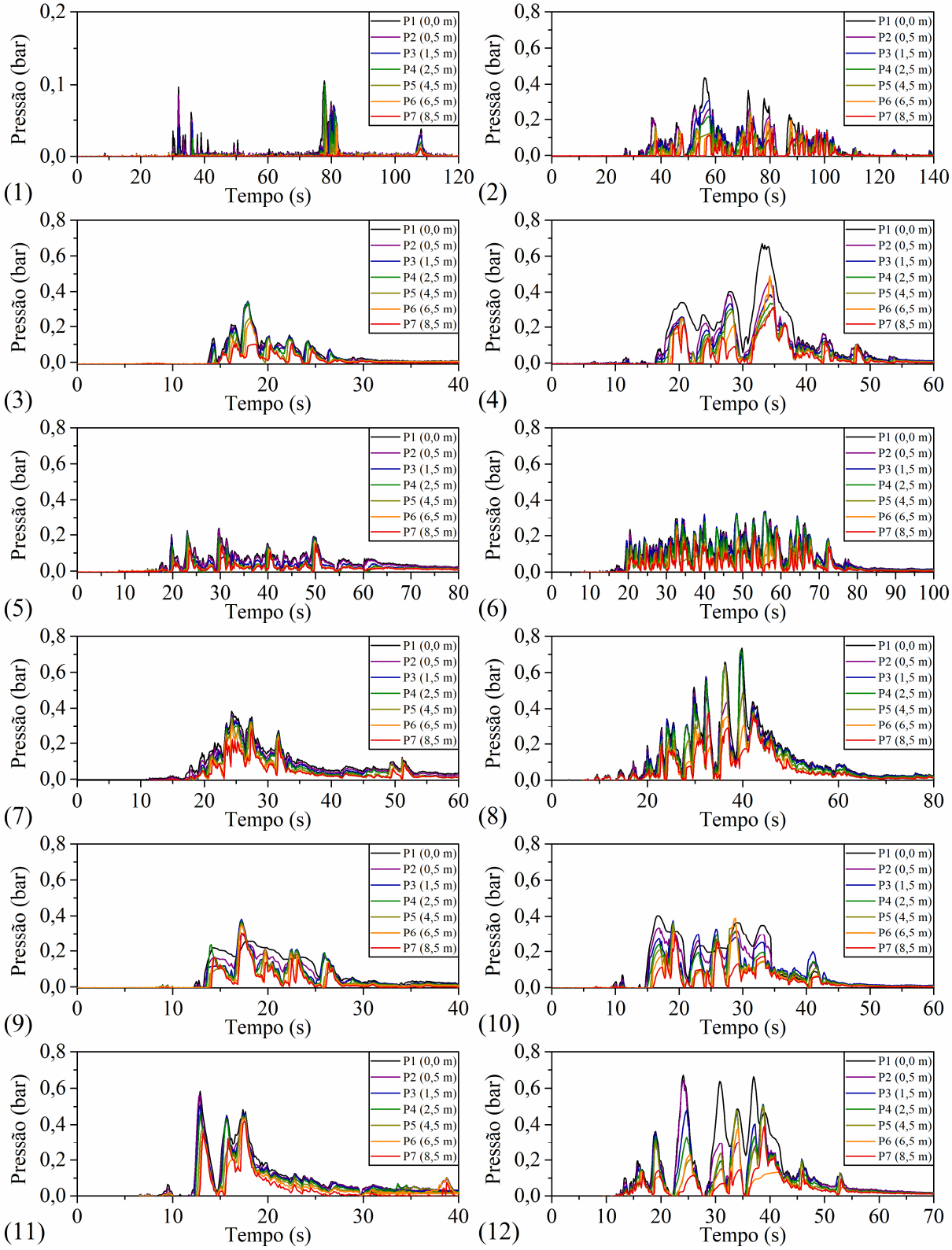


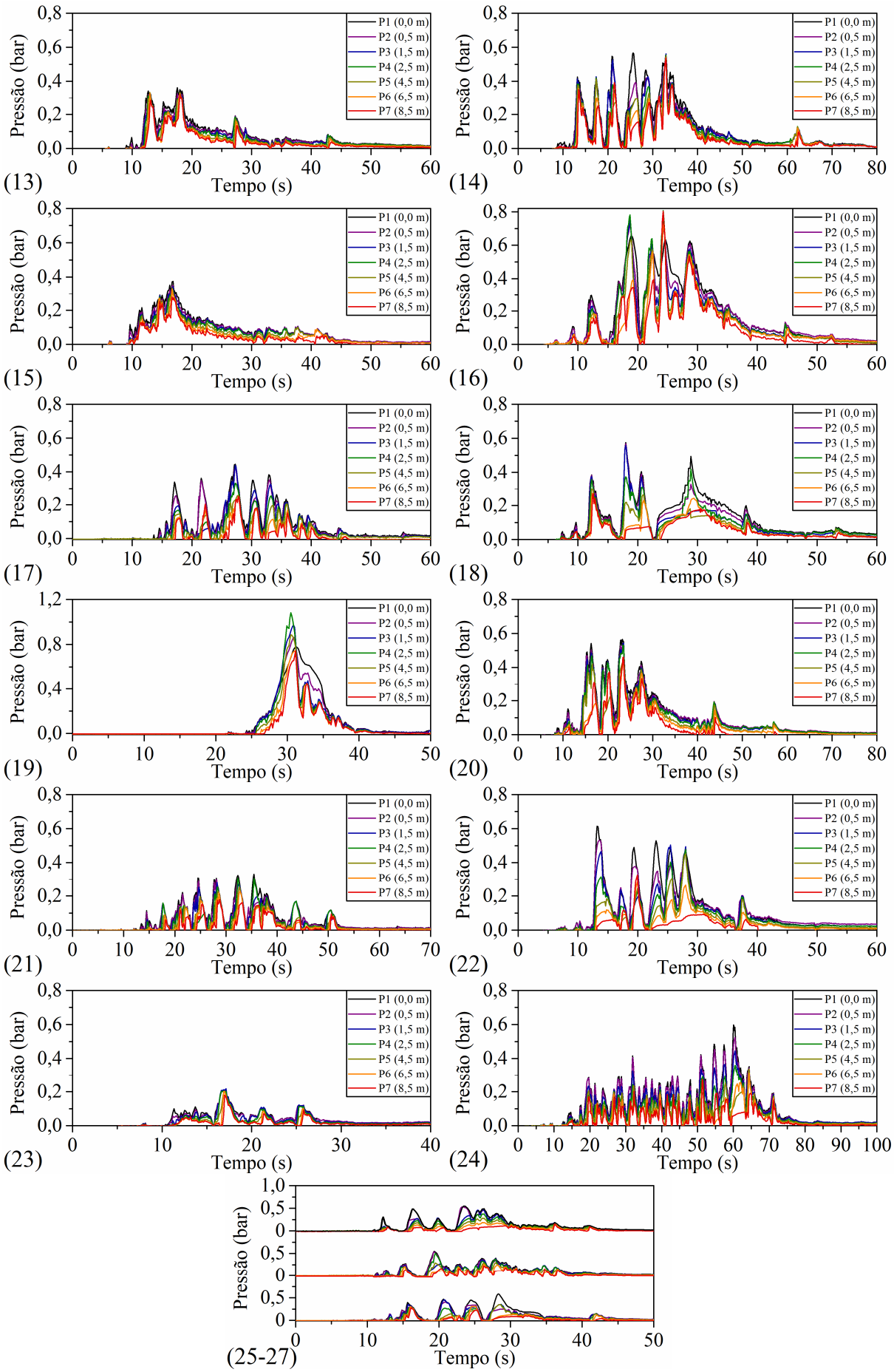

Massa (kg)
Tempo (s)
13
14
15
16
Pressão (bar)
(g)
(h)
17
18
19
20
(i)
(j)
21
22
23
24
(k)
(l)



Fonte: Autoria própria (2023).

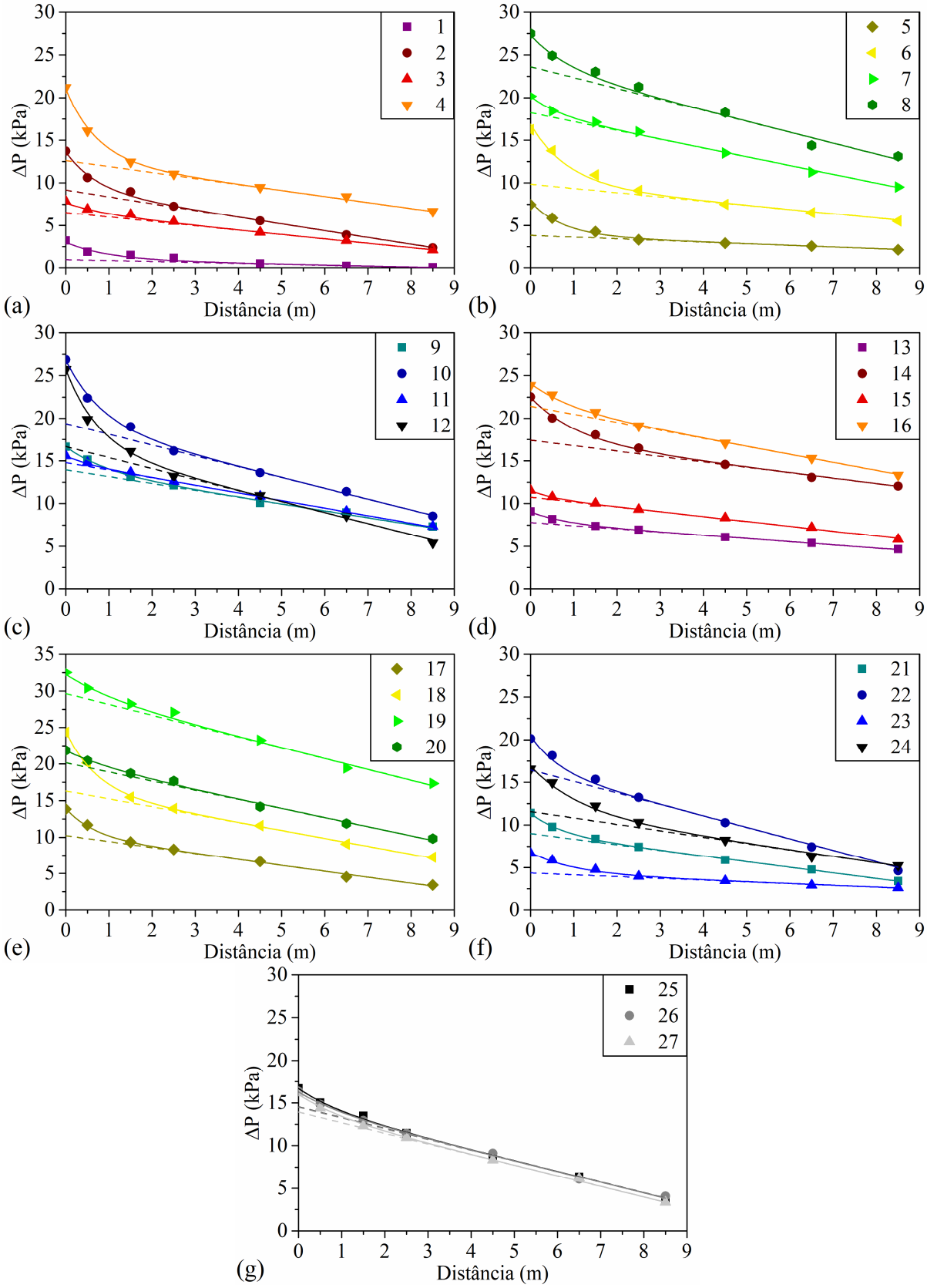
Figura D.3 – Pressão ao longo do trecho horizontal da tubulação de transporte em função do tempo para os experimentos: (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23), (24) e (25-27).





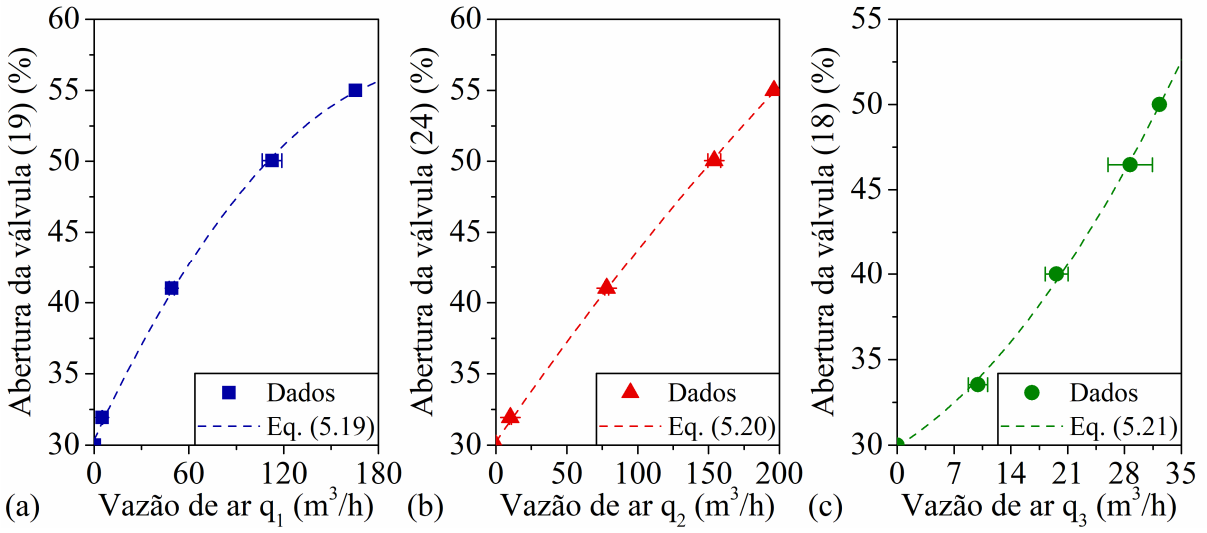
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura D.4 – Pressão em função do comprimento do trecho horizontal da tubulação de transporte para os experimentos: 1-4 (a), 5-7 (b), 9-12 (c), 13-16 (d), 17-20 (e), 21-24 (f) e 25-27 (g).



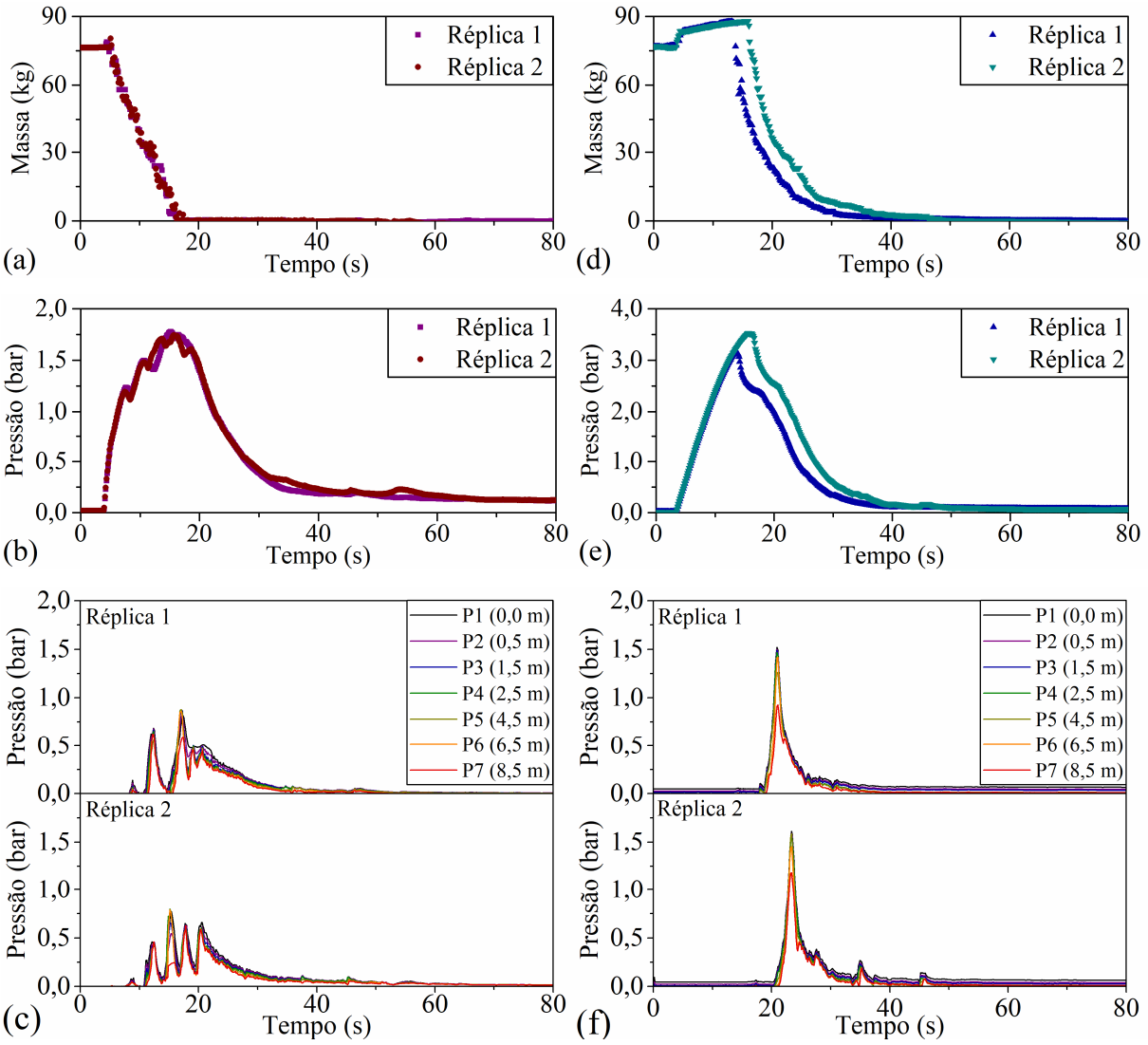
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura D.5 – Correlação entre grau de abertura da válvula e vazão de ar nas tubulações que fornecem ar comprimido para o vaso de pressão.



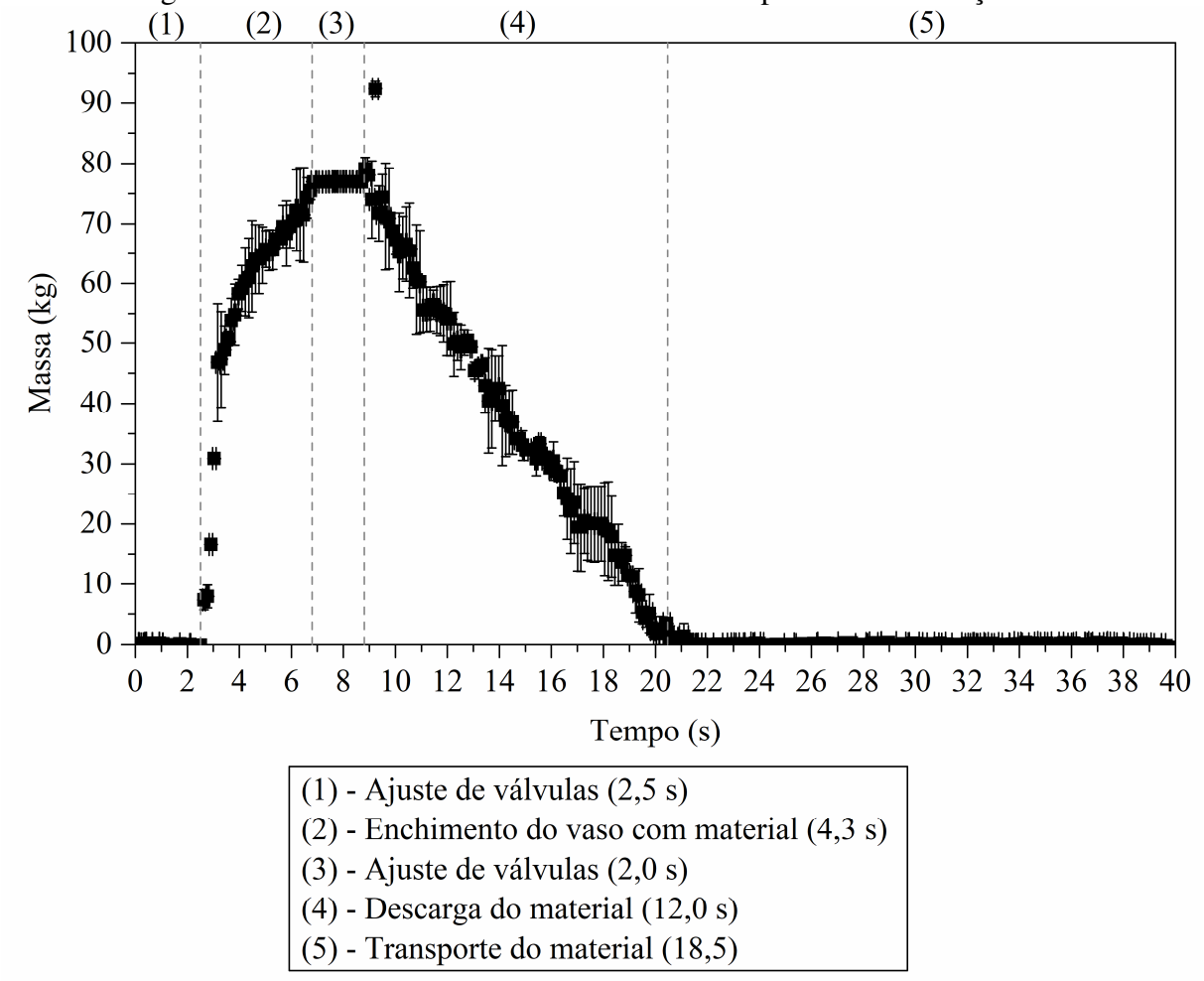
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura D.6 – Resultados dos experimentos de verificação dos pontos experimentais ótimos previstos: condição C2 (x_1 = 49,5%, x_2 = 55,0%, x_3 = 41,8% e x_4 = 76,4 kg) (a-c) e condição C1 (x_1 = 49,2%, x_2 = 27,0%, x_3 = 43,3% e x_4 = 76,4 kg (d-e)).



Fonte: Autoria própria (2023).

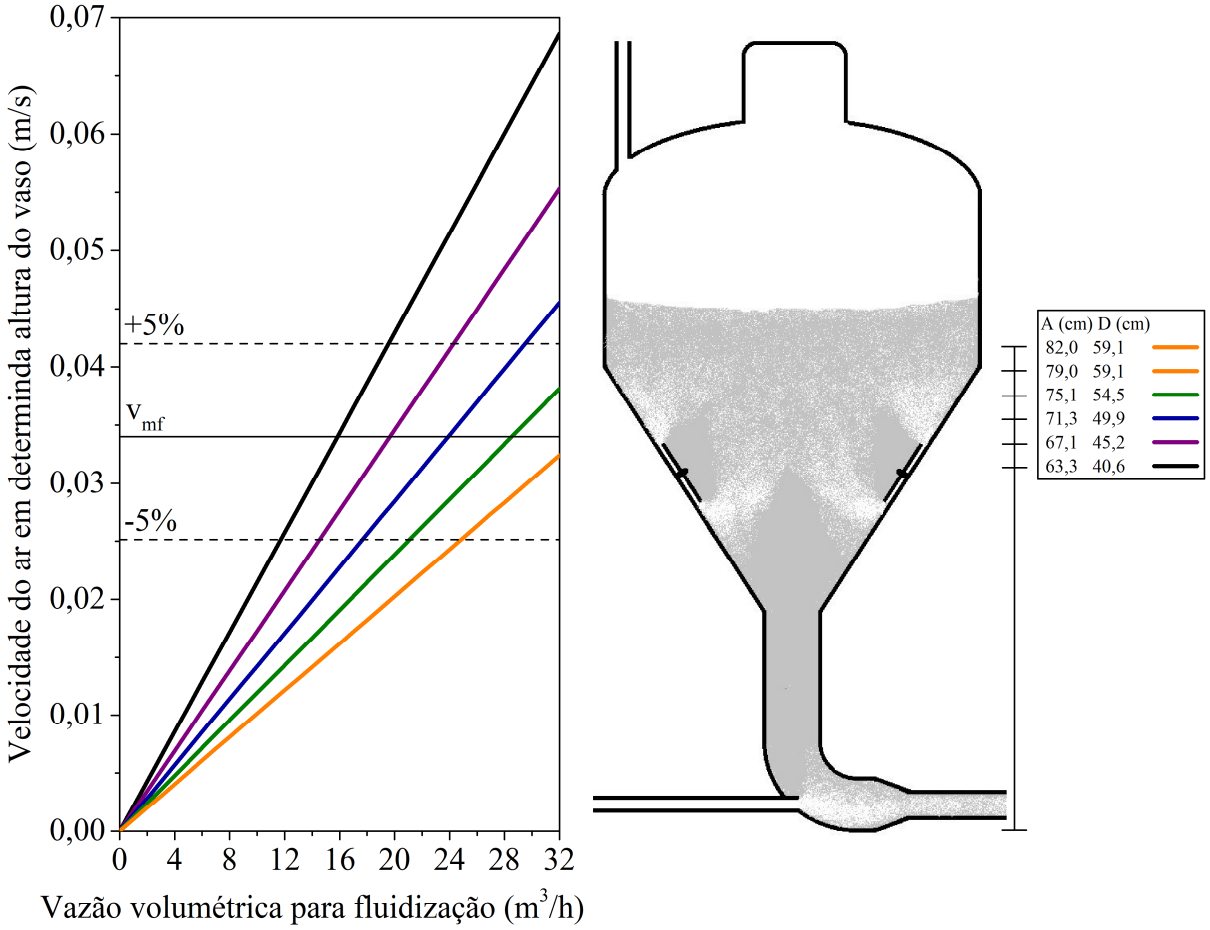
Figura D.7 – Ciclo de funcionamento do vaso de pressão na condição C2.



(1) - Ajuste de válvulas (2,5 s)
(2) - Enchimento do vaso com material (4,3 s)
(3) - Ajuste de válvulas (2,0 s)
(4) - Descarga do material (12,0 s)
(5) - Transporte do material (18,5)

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura D.8 – Vazão do ar para fluidização em função da altura e diâmetro do vaso.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela D.1 – Valores dos parâmetros obtidos pelo ajuste da Equação 5.5 aos dados experimentais de queda de pressão em função do comprimento da tubulação.

#	a_1 (Pa)	a_2 (m)	a_3 (Pa)	a_4 (Pa/m)	R^2
1	2039,5	1,00	950,7	-107,4	0,962
2	4437,1	0,71	9164,0	-796,5	0,996
3	1141,3	0,94	6521,7	-518,1	0,994
4	8382,2	0,73	12621,9	-702,3	0,998
5	3969,6	0,75	3818,8	-194,8	0,992
6	7014,2	0,86	9848,0	-494,7	0,990
7	1919,1	0,65	18224,4	-1031,4	0,997
8	3650,0	0,90	23627,0	-1280,7	0,989
9	2702,7	0,91	13954,8	-801,1	0,997
10	7406,2	0,83	19387,6	-1265,8	0,998
11	766,1	0,55	14809,1	-888,6	0,999
12	9047,8	0,75	16671,1	-1286,9	0,996
13	1254,8	0,79	7786,9	-376,9	0,999
14	5029,6	1,08	17419,8	-635,0	0,997
15	791,4	0,52	10748,4	-568,4	0,998
16	2662,8	0,93	21412,8	-941,0	0,998
17	3679,2	0,65	10225,2	-817,8	0,997
18	8136,6	0,71	16330,8	-1082,4	0,999
19	2610,3	1,13	29645,0	-1483,0	0,993
20	1660,0	1,11	20160,9	-1245,9	0,996
21	2368,4	0,71	8999,4	-661,0	0,999
22	3974,2	0,65	16450,3	-1345,4	0,996
23	2426,7	1,00	4350,6	-208,2	0,994
24	5294,2	1,14	11584,7	-752,9	0,995
25	2127,8	1,02	14541,1	-1259,2	0,999
26	1761,9	1,02	14510,3	-1258,0	0,998
27	2068,4	0,99	13933,3	-1244,9	0,998

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela D.2 – Resultados estatísticos do planejamento composto central.

Variável resposta	Fatores	Efeito	Coeficiente	Erro do coeficiente	p-valor
Vazão de descarga do vaso (W) (kg/s)	$Mean$	3,674	3,674	0,137	0,00000
	x_1	1,094	0,547	0,061	0,00000
	x_1^2	-0,474	-0,237	0,082	0,01106
	x_2	-1,090	-0,545	0,061	0,00000
	x_2^2	1,949	0,974	0,082	0,00000
	x_3	1,160	0,580	0,061	0,00000
	x_3^2	-0,623	-0,312	0,082	0,00173
	x_4	-0,320	-0,160	0,061	0,01877
	x_4^2	-0,947	-0,474	0,082	0,00004
	x_1x_3	-0,588	-0,294	0,069	0,00070
	x_2x_3	-0,382	-0,191	0,069	0,01466
	x_3x_4	0,321	0,160	0,069	0,03512
Pressão no vaso (P) (bar)	$Mean$	0,808	0,808	0,035	0,00000
	x_1	0,284	0,142	0,017	0,00000
	x_2	-0,121	-0,060	0,017	0,00274
	x_2^2	0,265	0,132	0,023	0,00002
	x_3	0,257	0,128	0,017	0,00000
	x_3^2	-0,095	-0,048	0,023	0,05670
	x_4	0,224	0,112	0,017	0,00001
	x_4^2	-0,234	-0,117	0,023	0,00009
	x_1x_3	-0,093	-0,046	0,020	0,03112
Queda de pressão no trecho horizontal (kPa/m)	$Mean$	1289,847	1289,847	46,892	0,00000
	x_1	196,959	98,480	23,452	0,00068
	x_1^2	-255,304	-127,652	31,602	0,00095
	x_2	-116,485	-58,242	23,452	0,02447
	x_3	346,768	173,384	23,452	0,00000
	x_3^2	-210,899	-105,450	31,602	0,00418
	x_4	361,668	180,834	23,452	0,00000
	x_4^2	-647,850	-323,925	31,602	0,00000
	x_1x_2	-324,800	-162,400	26,729	0,00002
	x_1x_3	-166,633	-83,316	26,729	0,00664
	x_2x_3	211,865	105,933	26,729	0,00112

Fonte: Autoria própria (2023).

Equações de descrição das variáveis resposta em função das vazões de entrada no vaso de pressão e massa de material carregado no vaso

$$\begin{aligned} W(kg/s) = {} & -0,4532e^{-3}m^2 + 0,1495e^{-5}q_1^{\,2}q_3^{\,2} + 0,4504e^{-4}q_1^{\,2}q_3 - 0,6543e^{-3}q_1q_3^{\,2} \\ & - 0,1972e^{-1}q_1q_3 + 0,5098e^{-5}q_2^{\,2}q_3 - 0,2577e^{-3}q_2q_3^{\,2} - 0,7766e^{-2}q_2q_3 \\ & + 0,4194e^{-3}q_3^{\,2}m + 0,1265e^{-1}q_3m + 0,4157e^{-2}q_1^{\,2} + 0,7742e^{-3}q_2^{\,2} - 15,03q_3^{\,2} \\ & - 0,2227e^{-2}q_3^{\,4} - 0,1343q_3^{\,3} - 1,892q_1 - 0,8019q_2 - 392,0q_3 + 1,299m \\ & - 3,254e^{-7}q_2^{\,3} - 8,558e^{-10}q_1^{\,4} + 7,496e^{-7}q_1^{\,3} + 1,068e^{-10}q_2^{\,4} \\ & + 1,691e^{-7}q_2^{\,2}q_3^{\,2} - 18990,0 \end{aligned} \tag{D.1}$$

$$\begin{aligned} P(bar) = {} & -0,1121e^{-3}m^2 + 2,353e^{-7}q_1^{\,2}q_3^{\,2} + 0,7092e^{-5}q_1^{\,2}q_3 - 0,1030e^{-3}q_1q_3^{\,2} \\ & - 0,3105e^{-2}q_1q_3 + 0,6821e^{-3}q_1^{\,2} + 0,3761e^{-4}q_2^{\,2} - 2,296q_3^{\,2} + 1,451e^{-11}q_2^{\,4} \\ & - 4,422e^{-8}q_2^{\,3} - 0,3411e^{-3}q_3^{\,4} - 0,2056e^{-1}q_3^{\,3} - 0,2987q_1 - 0,5988e^{-2}q_2 \\ & - 59,87q_3 + 0,2140e^{-1}m - 2894,0 \end{aligned} \tag{D.2}$$

$$\begin{aligned} \Delta P/L(Pa/m) = {} & -0,3099m^2 + 0,1556e^{-3}q_1^{\,2}q_2 + 0,4472e^{-4}q_1q_2^{\,2} - 0,6813e^{-1}q_1q_2 \\ & + 0,7698e^{-5}q_1^{\,2}q_3^{\,2} + 0,2320e^{-3}q_1^{\,2}q_3 - 0,3370e^{-2}q_1q_3^{\,2} - 0,1016q_1q_3 \\ & - 0,1705e^{-5}q_2^{\,2}q_3^{\,2} - 0,5138e^{-4}q_2^{\,2}q_3 + 0,2598e^{-2}q_2q_3^{\,2} + 0,7827e^{-1}q_2q_3 \\ & - 0,1316q_1^{\,2} + 0,348e^{-3}q_2^{\,2} + 0,5030q_3^{\,2} + 0,4035e^{-3}q_1^{\,3} - 0,2493e^{-3}q_3^{\,4} \\ & - 0,1502e^{-1}q_3^{\,3} + 18,96q_1 - 0,532q_2 + 21,98q_3 + 55,18m - 2074,0 \\ & - 4,607e^{-7}q_1^{\,4} - 1,021e^{-7}q_1^{\,2}q_2^{\,2} \end{aligned} \tag{D.3}$$

em que: q_1, q_2 e q_3 são as vazões volumétricas (m^3/h) nas respectivas tubulações (21), (17) e (27), m a massa de material (kg) carregado no vaso, W vazão de descarga do vaso (kg/s), P a pressão média de descarga (bar) e $\Delta P/L$ a queda de pressão no trecho horizontal da tubulação de transporte (Pa/m).