



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



***Microwave Paddle Dryer* como alternativa para a
secagem de cascalhos da perfuração em ambientes
*offshore***

VINÍCIUS PIMENTA BARBOSA

Uberlândia–MG

2022



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



***Microwave Paddle Dryer* como alternativa para a
secagem de cascalhos da perfuração em ambientes
*offshore***

Autor: Vinícius Pimenta Barbosa

Orientadora: Marina Seixas Pereira

Coorientador: Cláudio Roberto Duarte

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química

Uberlândia – MG

2022

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

B238 Barbosa, Vinícius Pimenta, 1987-
2022 Microwave Paddle Dryer como alternativa para a secagem
de cascalhos da perfuração em ambientes offshore
[recurso eletrônico] / Vinícius Pimenta Barbosa. - 2022.

Orientadora: Marina Seixas Pereira.

Coorientador: Cláudio 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.2022.560>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia química. I. Pereira, Marina Seixas, 1985-
, (Orient.). II. Duarte, Cláudio Roberto, 1975-
, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Pós-graduação em Engenharia Química. IV. 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



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 16/2022, PPGEQ				
Data:	30 de setembro de 2022	Hora de início:	13:00	Hora de encerramento:	15:50
Matrícula do Discente:	11813EQU012				
Nome do Discente:	Vinícius Pimenta Barbosa				
Título do Trabalho:	<i>Microwave Paddle Dryer</i> como alternativa para a secagem de cascalhos da perfuração em ambientes <i>offshore</i>				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Otimização da separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo e gás e modelagem e simulação numérica de escoamentos de fluidos em seções anulares				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Rubens Gedraite - PPGEQ/UFU; Ricardo Correa de Santana - FEQUI/UFU; Fabio de Assis Ressel Pereira - DTI/UFES; Rodrigo Béttega - DEQ/UFSCar e Cláudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, coorientador 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 senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

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 30/09/2022, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº](#)



Documento assinado eletronicamente por **Fabio de Assis Ressel Pereira, Usuário Externo**, em 30/09/2022, às 16:37, 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 Correa de Santana, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/09/2022, às 16:47, 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 **Rodrigo Béttega, Usuário Externo**, em 30/09/2022, às 18:53, 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 **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/10/2022, às 04:17, 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 **3942745** e o código CRC **9B66D57D**.

*Aos meus pais, Altair e Mônica, meus irmãos, Diego e Fernanda, meu amor Andressa
e ao professor Carlos Henrique Ataíde (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por garantir a força necessária para alcançar minhas conquistas.

Agradeço aos meus pais Altair e Mônica, por todo o amor, exemplo de caráter, persistência e resiliência que são para mim.

Agradeço aos meus irmãos Fernanda e Diego, por todo o amor, apoio, conselhos e incentivo para a realização das minhas escolhas.

Agradeço ao meu grande amor Andressa, por todos esses anos ao meu lado, sempre me apoiando, incentivando e ajudando a conquistar meus sonhos, inclusive com sua participação direta na realização de experimentos nas etapas mais difíceis do doutorado, te amo muito!

Agradeço aos meus sogros Antônio e Maria Madalena e a minha cunhada Anne, por todo o acolhimento, auxílio e carinho.

Agradeço aos meus eternos amigos Alex, Antônio (*in memoriam*), Daniel (*in memoriam*), Ívis, João, Matheus, Raphael, Victor, vocês são uma parte importante de mim.

Sou imensamente grato pela oportunidade de ter trabalhado por anos com meu orientador professor Doutor Carlos Henrique Ataíde (*in memoriam*), você nunca será esquecido.

Agradeço a minha orientadora professora Doutora Marina Seixas Pereira pelo exemplo de força e perseverança para sempre seguir em frente.

Agradeço especialmente a meu coorientador professor Doutor Cláudio Roberto Duarte, por todo o suporte, conselhos, palavras amigas e incentivo nos momentos difíceis para a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Doutor Rubens Gedraite, por todos os conselhos e incentivos para trabalhar como pesquisador.

Agradeço aos meus amigos Leonardo Lima de Carvalho e professor Rodolfo Junqueira Brandão pelo incentivo e contribuição para o enriquecimento deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos de laboratório que me acompanharam e ajudaram na realização deste trabalho: Ana, Anderson, Felipe, Gabriela, Giovani, Heitor, José, Moroni e Thaís, é sempre um prazer trabalhar com vocês.

Agradeço a todos os outros colegas da Unidade de Pesquisa de Engenharia Química (UPEQ) e aos funcionários da Faculdade de Engenharia Química e seu programa de pós-graduação pelo excelente trabalho que realizam.

Agradeço a Petrobrás e a CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo geral	2
1.2. Objetivos específicos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Fluido de perfuração	4
2.1.1. Características desejáveis em fluidos de perfuração	5
2.1.2. Propriedades dos fluidos de perfuração.....	5
2.1.3. Tipos de fluido de perfuração.....	7
2.1.4. Cascalhos gerados na perfuração do poço	8
2.2. Manejo dos cascalhos contaminados com fluido de perfuração.....	8
2.3. Unidade de controle de sólidos.....	11
2.3.1. Peneira vibratória.....	12
2.3.2. Hidrociclones.....	12
2.3.3. <i>Mud-cleaner</i>	12
2.3.4. Centrífuga decantadora.....	13
2.3.5. Secador de cascalhos	13
2.3.6. Limitações da unidade de controle de sólidos – aumento das restrições ambientais.....	13
2.4. <i>Paddle Dryers</i>	14
2.5. Agitação do leito.....	17
2.6. Processo de aquecimento via micro-ondas	20

2.7. Utilização das micro-ondas em processos industriais e tratamento de resíduos	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1. Material e métodos dos ensaios de secagem em modo batelada	33
3.1.1. Material e caracterização	33
3.1.2. Unidade experimental <i>Microwave Paddle Dryer</i>	35
3.1.3. Metodologia dos ensaios de secagem no modo batelada	44
3.2. Material e métodos dos ensaios da dinâmica das partículas no leito	47
3.2.1. Material utilizado nos ensaios de dinâmica de leito com areia	48
3.2.2. Configuração da unidade experimental e do sistema de aquisição de dados para os ensaios da dinâmica das partículas no leito	48
3.2.3. Aquisição de imagens do leito	50
3.2.4. Análises de imagem	50
3.2.5. Metodologia experimental para os ensaios da dinâmica das partículas no leito em modo batelada	51
3.2.6. Metodologia experimental para os ensaios de dinâmica do leito utilizando areia em modo contínuo	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1. Resultados e discussão dos ensaios de secagem em modo batelada	60
4.1.1. Experimento 1: incêndio na cavidade	61
4.1.2. Experimento 2: ensaio exploratório do sistema de segurança e análise da saída dos compostos orgânicos	66
4.1.3. Experimentos 3, 4 e 5: influência da rotação do eixo de agitação na secagem	68
4.2. Resultados e discussão dos ensaios da dinâmica das partículas no leito	82
4.2.1. Resultados dos ensaios da dinâmica de leito em modo batelada com areia	82
4.2.2. Resultados dos ensaios da dinâmica do leito em modo contínuo com areia	90
5. CONCLUSÃO	97

5.1. Conclusão dos ensaios de secagem.....	97
5.2. Conclusão dos ensaios de dinâmica do leito com areia.....	98
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICE A	111
APÊNDICE B.....	129
APÊNDICE C.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química do cascalho de rocha carbonática medida por difração de raios-X.....	34
Tabela 3.2: Propriedades dielétricas do cascalho seco, cascalho contaminado e do fluido de perfuração.....	35
Tabela 3.3: Experimentos de descontaminação de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica.....	45
Tabela 3.4: Experimentos para o estudo da dinâmica das partículas no leito em modo batelada.....	53
Tabela 3.5: Experimentos realizados em modo contínuo para o estudo da dinâmica das partículas no leito do <i>Microwave Paddle Dryer</i>	55
Tabela 4.1: Resultados dos experimentos de descontaminação via micro-ondas de cascalhos.....	61
Tabela 4.2: Proporção entre a fase orgânica e aquosa do condensado dos vapores em função da energia específica.....	68
Tabela 4.3: Teores residuais de orgânicos e água ao longo do leito do <i>Microwave Paddle Dryer</i>	69
Tabela 4.4: Massa de cascalho livre no leito e incrustado nos eixos e pás de agitação após os experimentos de descontaminação dos cascalhos no <i>Microwave Paddle Dryer</i>	69
Tabela 4.5: Resultados dos ensaios de dinâmica do leito em modo batelada com areia.....	83
Tabela 4.6: Resultados dos experimentos de dinâmica do leito em modo contínuo.....	90
Tabela 4.7: Relação entre a velocidade axial das partículas e o tempo de residência.....	94
Tabela A.1: Parâmetros DEM.....	112
Tabela A.2: Níveis das variáveis independentes.....	113
Tabela A.3: Resultados da simulação para o planejamento composto central.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Circulação do fluido de perfuração durante o processo de perfuração de poços de petróleo (fonte: SABOORI <i>et al.</i> , 2019[modificada]).	4
Figura 2.2: Típica unidade de controle de sólidos empregada no Brasil (fonte: https://medium.com/@ekomeri/drilling-mud-solids-control-circulation-system-50fe77b211bd , [modificada]).	11
Figura 2.3: Fotos de equipamentos do tipo <i>paddle dryer</i> , fontes: a) https://www.gemdryers.com/products/paddle-dryer/ e b) https://www.pulpandpaper-technology.com/products/komline-sanderson/k-s-paddle-dryer , acessadas em 07/09/2022....	14
Figura 2.4: Fluxograma de funcionamento de um secador tipo <i>paddle dryer</i> com jaqueta de aquecimento e corrente de circulação de ar. (fonte [modificado]: https://www.nara-e.de/en/products/drying/paddle-dryer/).	15
Figura 2.5: Fenômeno <i>stickiness</i> em sua a) forma pontual, <i>stick-point</i> , e na sua b) forma gradual, <i>stick-region</i> (Fonte [modificado]: Tadeusz, 2003).	18
Figura 2.6: Secagem de lodo residual de esgoto com processo de agitação e sua relação entre o a) torque e teor de umidade e a b) taxa de secagem e teor de umidade (Fonte [modificado]: Tadeusz, 2003).	18
Figura 2.7: Torque fornecido pelo motor e resistência mecânica à agitação do leito.	19
Figura 2.8: Principais mecanismos de aquecimento via micro-ondas (Fonte [modificado]: Metaxas, 1993)	21
Figura 2.9: Diagrama vetorial para a tangente de perda	22
Figura 3.1: Processo de secagem do cascalho contaminado no <i>Microwave Paddle Dryer</i> .	32
Figura 3.2: Ilustração do <i>Microwave Paddle Dryer</i> operando em modo batelada para os ensaios de dinâmica de escoamento das partículas no leito.	33
Figura 3.3: Ilustração do <i>Microwave Paddle Dryer</i> operando em modo contínuo para os ensaios de dinâmica de escoamento das partículas no leito.	33
Figura 3.4: Unidade experimental <i>Microwave Paddle Dryer</i> e seus principais componentes.	36
Figura 3.5: Sistema de agitação do <i>Microwave Paddle Dryer</i> .	37
Figura 3.6: Medidas em milímetros dos eixos e pás de agitação nas vistas a) radial e b) superior.	38
Figura 3.7: Tampo superior do <i>Microwave Paddle Dryer</i> em processo de montagem.	38

Figura 3.8: Placas de quartzo instaladas entre as guias de onda e a cavidade do <i>Microwave Paddle Dryer</i> para a proteção das antenas dos magnetrons.	39
Figura 3.9: Condensação no a) interior da cavidade do <i>Microwave Paddle Dryer</i> após um ensaio de secagem e a b) ilustração do fenômeno de condensação.	40
Figura 3.10: Sistema de coleta dos condensados no casco composto por a) calhas internas e b) recipientes de coleta de condensado.	40
Figura 3.11: Interface do sistema de controle e aquisição de dados do <i>Microwave Paddle Dryer</i>	43
Figura 3.12: Pontos de coleta do cascalho ao longo do leito do <i>Microwave Paddle Dryer</i>	47
Figura 3.13: Consistência do cascalho remediado após o teste de secagem para o material a) livre no leito, b) agregado as pás do equipamento e c) nas extremidades do equipamento.	47
Figura 3.14: Fotos da a) areia comum e da b) areia pintada de preto utilizadas nos ensaios de dinâmica das partículas no leito.	48
Figura 3.15: Ilustração da unidade experimental no modo contínuo para os ensaios de dinâmica do leito no <i>Microwave Paddle Dryer</i>	49
Figura 3.16: Interface do sistema de monitoramento e aquisição de dados dos ensaios de dinâmica do leito utilizando areia no <i>Microwave Paddle Dryer</i>	50
Figura 3.17: indicações do procedimento de medida do deslocamento radial das partículas em função do tempo na a) foto da vista superior e no b) corte axial do leito.	51
Figura 3.18: Esquema de montagem do vertedouro no <i>Microwave Paddle Dryer</i> e suas alturas em centímetros para os níveis a) mínimo, b) médio e c) máximo para os ensaios de dinâmica de leito com areia em modo contínuo.	54
Figura 3.19: Vertedouro em seu nível máximo instalado no <i>Microwave Paddle Dryer</i> para os ensaios de dinâmica do leito em modo contínuo com areia.	55
Figura 3.20: Formação da zona de estagnação do leito com a a) ilustração do fenômeno e b) foto superior do leito.	56
Figura 3.21: Medida da velocidade axial das partículas com a) frames do vídeo do deslocamento do traçador no leito, b) variação do perfil dos pixels com o tempo e c) determinação do tempo médio de passagem do traçador.	57
Figura 4.1: Perfil da taxa de condensado coletada para o experimento 1 de secagem de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica.	62
Figura 4.2: Tampo superior do <i>Microwave Paddle Dryer</i> após incêndio na cavidade ocorrido no experimento 1 de descontaminação de cascalhos.	64

Figura 4.3: Pontos de injeção de nitrogênio no casco do <i>Microwave Paddle Dryer</i>	66
Figura 4.4: Perfis de temperatura para o leito e fase vapor e taxa de geração de condensado para o experimento 2 de descontaminação de cascalhos.	67
Figura 4.5: Alterações nas propriedades de transferência de calor do leito durante a secagem.	68
Figura 4.6: Perfil do teor residual de orgânicos do cascalho ao longo do leito após os experimentos a) 3 (20rpm), b) 4 (5rpm) e c) 5 (35rpm) de secagem.	70
Figura 4.7: Consistência do cascalho ao longo do leito para o experimento 3 (20rpm).	72
Figura 4.8: Leito do <i>Microwave Paddle Dryer</i> após o experimento 5 (35rpm) e a indicação do deslocamento do cascalho para as extremidades do equipamento.	73
Figura 4.9: Experimento 3 (20rpm) de descontaminação de cascalhos e seus a) perfis de temperatura e taxa de condensado, b) consumo de potência e torque.	74
Figura 4.10: Experimento 4 (5rpm) de descontaminação de cascalhos e seus a) perfis de temperatura e taxa de condensados, b) consumo de potência e torque.	75
Figura 4.11: Experimento 5 (35rpm) de descontaminação de cascalhos e seus a) perfis de temperatura e taxa de condensados, b) consumo de potência e torque.	76
Figura 4.12: Saída do sistema de sucção para os vapores não condensados em funcionamento a) normal e com b) combustão na cavidade.	77
Figura 4.13: Guia de onda coberta pelo cascalho que estava em suspensão na cavidade do <i>Microwave Paddle Dryer</i>	78
Figura 4.14: Acúmulo do cascalho em diferentes pontos do casco do <i>Microwave Paddle Dryer</i>	79
Figura 4.15: Fluxograma do sistema de controle e segurança desenvolvido para o <i>Microwave Paddle Dryer</i>	80
Figura 4.16: Relação entre a potência e o torque consumidos pelo motor em modo batelada em função da rotação do eixo de agitação e do nível de preenchimento do leito.	82
Figura 4.17: Velocidade radial das partículas na superfície do leito.	84
Figura 4.18: Superfície de resposta para a velocidade radial média das partículas no leito em função do nível de preenchimento e da rotação do eixo de agitação.	85
Figura 4.19: Fotos do leito nas diferentes condições experimentais nos ensaios de dinâmica das partículas em modo batelada	85

Figura 4.20: Deslocamento radial das partículas em função do tempo para os experimentos em modo batelada para os níveis de preenchimento do leito de a) 20%, b) 40%, c) 60%, d) 80%, e e) 100%.....	86
Figura 4.21: Perfil do nível de preenchimento do leito para a) 20%, b) 40%, c) 60%, d) 80%, e f) 100%.	86
Figura 4.22: Fotos do leito em condições de estado estacionário nos experimentos de dinâmica das partículas em modo contínuo	91
Figura 4.23: Influência da rotação do eixo de agitação no comprimento da zona de estagnação e na retenção do leito.	92
Figura 4.24: Aplicação do traçador em diferentes pontos ao longo do leito e seu deslocamento em relação ao tempo para o equipamento operando em 8rpm e inclinação de 0°.....	92
Figura 4.25: Velocidade radial média ao longo da direção axial em condições de formação da zona de estagnação.	93
Figura 4.26: Deslocamento axial do traçador no leito em função do tempo.	94
Figura 6.1: Alteração da geometria do sistema de agitação do leito da forma a) atual para a com b) menor área disponível à incrustação.	101
Figura A.1: Dimensões do leito do <i>Microwave Paddle Dryer</i> nas simulações e sua a) vista frontal, (b) superior e (c) geometria stl.....	111
Figura A.2: Variação na massa do leito em função das variáveis independentes rotação do eixo de agitação e massa inicial de partículas no leito.	115
Figura A.3: Variação na massa do leito em função das variáveis independentes rotação do eixo de agitação e inclinação do leito.....	116
Figura A.4: Superfície de resposta para a velocidade resultante das partículas em função de suas variáveis independentes significativas rotação do eixo de agitação e massa inicial de partículas no leito.	117
Figura A.5: Superfície de resposta para a velocidade média na direção do eixo-x em função de suas variáveis independentes significativas velocidade de rotação do eixo de agitação e massa inicial de partículas no leito.....	118
Figura A.6: Perfil da velocidade instantânea na direção do eixo-x para os experimentos (a) 9 e 10, para a rotação do eixo de agitação e (b) 11 e 12, para na massa inicial de partícula no leito.	119

Figura A.7: Superfície de resposta para a velocidade média na direção y em função de suas variáveis independentes significativas rotação do eixo de agitação e massa inicial de partículas no leito.	121
Figura A.8: Superfície de resposta para a velocidade média na direção y em função de suas variáveis independentes significativas rotação do eixo de agitação e inclinação do leito.	121
Figura A.9: Perfil da velocidade instantânea na direção do eixo-y para os experimentos a) 9 e 10 para a rotação do eixo de agitação, b) 11 e 12 para a massa inicial de partículas no leito e c) 13 e 14 para a inclinação.	122
Figura A.10: Superfície de resposta para a velocidade média na direção z em função de suas variáveis independentes significativas rotação do eixo de agitação e inclinação do leito.	125
Figura A.11: Superfície de resposta para a velocidade média na direção z em função de suas variáveis independentes significativas massa inicial de partículas no leito e inclinação do leito.	125
Figura A.12: Perfil da velocidade instantânea na direção do eixo-z para os experimentos a) 9 e 10 para a velocidade de rotação do eixo de agitação, b) 11 e 12 para a massa inicial de partículas no leito e c) 13 e 14 para a inclinação.	126
Figura C.1: VI do painel de controle do <i>Microwave Paddle Dryer</i> nos experimentos de secagem.	130
Figura C.2: VI do painel de controle do <i>Microwave Paddle Dryer</i> nos experimentos de dinâmica de leito com areia.....	131

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	Calor específico	$J/(kgK)$
d	Distância da fonte de irradiação de micro-ondas	m
d_p	Diâmetro característico das partículas	μm
$d_{63,2}$	Parâmetro de ajuste modelo RRB	μm
e_{pp}	Coefficiente de restituição partícula-partícula	[-]
e_{pw}	Coefficiente de restituição partícula-parede	[-]
D_p	Profundidade de penetração das micro-ondas	m
D_{50}	Parâmetro de ajuste modelo Sigmóide	m
E_0	Campo elétrico incidente	V/m
$E.E.$	Energia específica	kWh/kg
E_d	Campo elétrico	V/m
E_{kits}	Energia consumida pelos kits de micro-ondas	kWh
E_{max}	Valor máximo do campo eletromagnético	V/m
f	Frequência da onda eletromagnética	Hz
G	Módulo de cisalhamento	Pa
H_V	Altura do vertedouro	cm
I	Corrente consumida pelo motor elétrico	A
I_T	Corrente de torque do motor	A
I_{T-nom}	Corrente de torque nominal do motor	A
I_r	Redução total do redutor	[-]
I_s	Corrente da saída do inversor de frequência	A
j	Número imaginário	[-]
k	Condutividade térmica do meio	$w/(mK)$
L_{est}	Comprimento da zona de estagnação	cm
$m_{cascalho}$	Massa de cascalho no leito	kg
m_{retida}	Massa de areia retida no leito em modo contínuo	kg
ΔM	Variação da massa no leito	kg
n	Parâmetro de ajuste modelo RRB	[-]
n_{rpm}	Número de rotações na saída do motorredutor	rpm
N_{rpm}	Número de rotações do motor	rpm

p	Parâmetro de ajuste modelo Sigmóide	[-]
P	Potência total consumida pelo motor nos experimentos	W
P_{Total}	Potência total consumida pelo motor	W
P_{eixo}	Potência de acionamento do motorreductor	W
Q	Vazão mássica de sólidos	kg/h
\dot{Q}	Taxa de geração de calor	J/m^3s
R^2	Coefficiente de correlação múltipla	[-]
S_{axi}	Posição axial da partícula	cm
S_{rad}	Posição radial da partícula	cm
t	Tempo	s
T	Temperatura (eq. 2.12 e eq. 2.13)	K
T	Torque consumido pelo motor	%
T_{aju}	Tempo de residência medido experimentalmente	s
T_{eixo}	Torque no eixo de saída do Redutor	Nm
T_u	Torque útil o motor	Nm
T_{geo}	Tempo de residência geométrico	s
t	Tempo	s
U	Tensão entre as fases da rede elétrica	$volts$
U_s	Tensão de saída do inversor de frequência	$volts$
U_{org-i}	Teor inicial de orgânicos	%
$U_{água-i}$	Teor inicial de orgânicos	%
$\bar{U}_{org-res}$	Teor residual médio de orgânicos no cascalho do leito	%
$\bar{U}_{água-res}$	Teor residual médio de água no cascalho do leito	%
$U_{org-res}$	Teor residual de orgânicos no cascalho	%
$U_{água-res}$	Teor residual de água no cascalho	%
v_{axi}	Velocidade axial de deslocamento dos sólidos	cm/s
v_{rad}	Velocidade radial do sólido no leito	cm/s
\bar{v}_x	Velocidade média na direção x nas simulações	cm/s
\bar{v}_y	Velocidade média na direção y nas simulações	cm/s
\bar{v}_z	Velocidade média na direção z nas simulações	cm/s
\bar{v}_{res}	Velocidade média resultante nas simulações	cm/s

V_{N2}	Vazão de inerte	(l/s)
$V_{\%}$	Nível de preenchimento do leito em modo batelada	%
X	Distribuição cumulativa das partículas	[-]
X_1	Variável codificada da rotação do eixo de agitação (DEM)	[-]
X_2	Variável codificada da variação da massa no leito (DEM)	[-]
X_3	Variável codificada da inclinação do leito (DEM)	[-]
Y	Parâmetro adimensional do inversor frequência	[-]

Símbolos Gregos

δ	Ângulo de perda dielétrica	[-]
$\cos\theta$	Fator de potência do motor elétrico	[-]
$\cos\theta_s$	Fator de potência na saída do inversor de frequência	[-]
θ	Inclinação do leito	[°]
ε'	Constante dielétrica	[-]
ε''	Fator de perda dielétrica	[-]
ε_r	Permissividade elétrica relativa	[-]
ε_0	Permissividade elétrica no vácuo	F/m
λ_0	Comprimento da onda eletromagnética irradiada	m
η	Rendimento do motor elétrico	[-]
η_r	Rendimento da transmissão das engrenagens do redutor	[-]
σ_p	Razão de Poisson	[-]
ρ	Densidade	kg/m ³
ρ_p	Densidade das partículas	g/cm ³
ω	Frequência angular	rad/s
$\tan\delta$	Tangente de perda dielétrica	[-]
μ_{spp}	Coefficiente de atrito estático partícula-partícula	[-]
μ_{spw}	Coefficiente de atrito estático partícula-parede	[-]
μ_{rpp}	Coefficiente de atrito de rolamento partícula-partícula	[-]
μ_{rpw}	Coefficiente de atrito de rolamento partícula-parede	[-]

RESUMO

No processo de perfuração de poços de petróleo, os fragmentos de rocha gerados pela ação da broca são denominados cascalhos e transportados até a superfície pela ação do fluido de perfuração. O fluido de perfuração possui diversas funções para realizar a operação de perfuração do poço com segurança e estabilidade, apresentando características reológicas necessárias ao processo e que são resultantes dos diversos aditivos que fazem parte de sua composição. Porém, fluidos de base orgânica tem olefinas em sua formulação, componente tóxico ao meio ambiente. Por esta razão, o limite atual no Brasil de teor de orgânicos provenientes do fluido de perfuração no cascalho é de 5,9% em massa para o descarte *offshore*. Em virtude do aumento das restrições ambientais, deve-se chegar a um valor significativamente menor num futuro próximo. A mistura entre o cascalho e o fluido de perfuração é separada por vários equipamentos em série que formam a unidade de controle de sólidos, entretanto a eficiência de separação destes equipamentos já está próxima do máximo permitido pela legislação, o que demanda a concepção de um novo equipamento para garantir a adequação ambiental para a disposição dos cascalhos contaminados. O equipamento proposto por este trabalho é o *Microwave Paddle Dryer*, que utiliza micro-ondas para o processo de secagem dos cascalhos contaminados combinado com a agitação do leito. Foi avaliado o potencial do equipamento na descontaminação de cascalhos com componentes orgânicos em modo batelada para 3 velocidades de rotação do eixo de agitação nos valores de 5, 20 e 35 rpm, além do estudo de aspectos operacionais de controle e segurança operacional. Para a velocidade intermediária de 20 rpm do eixo de agitação, o equipamento foi capaz de descontaminar o cascalho de rocha carbonática contaminado com fluido de perfuração de base orgânica de um teor inicial de 8,4% de orgânicos e 11% de água para o teor residual médio de orgânicos no leito de 4,16%, consumindo 0,35 kwh de energia elétrica por kg de cascalho contaminado em uma batelada de 71 kg. As regiões centrais do leito alcançaram teores residuais de orgânicos abaixo de 2% e outras regiões apresentaram teores residuais acima 10,7%, sendo esta desigualdade na separação proveniente de fenômenos como a condensação dos vapores no casco interno e a não homogeneidade da distribuição do campo eletromagnético gerado pelas micro-ondas. Também foram realizados ensaios de dinâmica das partículas no leito em modo contínuo utilizando areia seca e sem aplicação de micro-ondas, sendo o objetivo o estudo de parâmetros operacionais relacionados ao escoamento do material no leito para uma futura adaptação para a secagem em modo contínuo. Nos ensaios de dinâmica do leito com areia foram avaliadas a influência das variáveis rotação do eixo de agitação, altura de vertedouro e inclinação, ao passo que as respostas analisadas foram a massa retida no leito e a velocidade das partículas de areia. As três variáveis independentes se mostraram significativas para a retenção de material no leito, com o aumento da altura do vertedouro contribuindo para o aumento da retenção do leito, enquanto o aumento da rotação do eixo de agitação e da inclinação contribuíram para a redução da massa retida no leito. Os experimentos de dinâmica do leito com areia também apresentaram fenômenos como a formação de uma região acima das pás de agitação que afetou o deslocamento superficial das partículas no leito e que foi relacionada a valores críticos de rotação do eixo de agitação e inclinação do leito.

Palavras-chave: Descontaminação de cascalhos, secagem, micro-ondas, *paddle dryer*, dinâmica de partículas, segurança do processo.

ABSTRACT

In the process of drilling oil wells, the rock fragments generated by the drill are called "drill cuttings" and are transported to the surface by the action of drilling fluid. This drilling fluid has various functions to perform the drilling operation safely and stably. It has specific characteristics that are needed for the process, which result from various additives included in its composition. However, organic-based fluids contain olefins in their formulation, which are toxic to the environment. For this reason, the current limit in Brazil for the content of organics from drilling fluid in the drill cuttings is 5.9% by weight for offshore disposal. Due to increasing environmental restrictions, this value is expected to be significantly lower in the near future. The mixture of drill cuttings and drilling fluid is separated by a series of equipment in sequence, forming the solid control unit. However, the efficiency of these separating machines is already close to the maximum allowed by law. This demands the conception of a new machine to ensure environmental adequacy for the disposal of contaminated drill cuttings. The equipment proposed in this work is the Microwave Paddle Dryer, which uses microwaves for drying contaminated drill cuttings combined with bed agitation. The potential of the equipment was evaluated for the decontamination of drill cuttings with organic components in batch mode at three rotation speeds of the agitation axis at values of 5, 20, and 35 rpm. Operational control and safety aspects were also studied. For the intermediate speed of 20 rpm of the agitation axis, the equipment was able to decontaminate carbonate rock drill cuttings contaminated with organic-based drilling fluid from an initial content of 8.4% organics and 11% water to a residual average organic content in the bed of 4.16%. It consumed 0.35 kWh of electric energy per kg of contaminated drill cuttings in a batch of 71 kg. The central regions of the bed reached residual organic contents below 2%, and other regions showed residual contents above 10.7%. This inequality in separation comes from phenomena like vapor condensation on the internal hull and the non-uniform distribution of the electromagnetic field generated by the microwaves. Tests were also conducted for particle dynamics in the bed in continuous mode using dry sand and without the application of microwaves. The goal was to study operational parameters related to material flow in the bed for future adaptation for continuous drying. In the bed dynamics tests with sand, the influence of variables such as rotation speed of the agitation axis, overflow height, and inclination were evaluated. The responses analyzed were the bed holdup and the speed of the sand particles. All three independent variables were significant for material retention in the bed. Increasing the overflow height contributed to an increase in bed holdup, while increasing the rotation speed of the agitation axis and inclination contributed to a reduction in the bed holdup. The sand bed dynamics tests also showed phenomena like the formation of a region above the agitation blades that affected the superficial displacement of particles in the bed and was related to critical values of the agitation axis rotation speed and bed inclination.

Keywords: Decontamination of drill cuttings, Microwave, Drying, Paddle Dryer, Particle dynamics, Process safety.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte da energia e matéria prima necessárias para a fabricação de diversos produtos vem do processamento de petróleo (THOMAS, 2001). A necessidade de suprir esta demanda faz da exploração de poços de petróleo uma atividade essencial para garantir a oferta desta *commodity* (ASME, 2005).

Devido aos danos ambientais e riscos que a perfuração e exploração de poços de petróleo trazem ao meio ambiente, a legislação ambiental relacionada a esta atividade se torna cada vez mais restritiva, sendo isto uma tendência global, principalmente devido ao aumento do número de poços sendo explorados (CHARLES e SAYLE, 2010). A proximidade entre poços e biomas sensíveis, tais como os recifes de corais, passou a ser uma grande preocupação também no campo sociopolítico.

A perfuração de um poço de petróleo é realizada por uma sonda de perfuração, na qual uma broca perfura a rocha até que seja alcançado o reservatório de petróleo. Neste processo é utilizado o fluido de perfuração, que possui diversos componentes em sua composição para atender requisitos operacionais e de segurança durante a perfuração do poço, evitando vazamentos de óleo e gás e minimizando riscos de acidentes e desastres ambientais (AADE, 1999).

Os fluidos de perfuração possuem componentes tóxicos em sua composição e devem ser manuseados de forma a se evitar a contaminação do meio ambiente (THOMAS, 2001). A separação do fluido de perfuração dos fragmentos de rocha, denominados cascalhos, ocorre na unidade de controle de sólidos, que tem como objetivo recondicionar e retornar o fluido ao processo de perfuração, além de reduzir o teor de fluido aderido ao cascalho até os níveis residuais necessários para a disposição deste.

Devido ao aumento das restrições ambientais, a capacidade de separação dos equipamentos da unidade de controle de sólidos está próxima do limite legal para o descarte do cascalho. Diversos países já adotam o nível de 1% de orgânicos em massa como limite máximo para o descarte de cascalhos, com a perspectiva de que esse limite chegue a zero num futuro próximo, medidas estas que são uma tendência global.

Em virtude das limitações atuais da unidade de controle de sólidos e as crescentes preocupações ambientais, este trabalho propõe o desenvolvimento do *Microwave Paddle Dryer*, equipamento de secagem via radiação de micro-ondas com leito agitado mecanicamente,

para a separação da mistura de fluido de perfuração com os cascalhos provenientes da perfuração de poços de petróleo

O grupo de pesquisa responsável pela idealização do projeto do *Microwave Paddle Dryer* possui ampla experiência no estudo do processo de descontaminação de cascalhos via micro-ondas (PEREIRA *et al.*, 2014, PETRI *et al.*, 2017, ROSSI *et al.*, 2017, SANTOS *et al.*, 2018, MOTA *et al.*, 2020). Esta tecnologia também já se mostrou viável no tratamento deste tipo de resíduo por outros grupos de pesquisa (ROBINSON *et al.*, 2009, FALCIGLIA *et al.*, 2016).

O trabalho de Petri *et al.* (2015) mostrou que a secagem por micro-ondas em conjunto com a agitação do leito aumenta significativamente a eficiência energética de separação do cascalho contaminado com orgânicos. Estes experimentos foram realizados num forno de bancada operando em batelada, sendo a inclusão da agitação do leito em um protótipo da dimensão do *Microwave Paddle Dryer* o desafio relacionado a esta pesquisa.

Este trabalho apresenta as primeiras etapas do desenvolvimento do *Microwave Paddle Dryer*, relacionadas ao controle do processo, a segurança operacional e a capacidade de separação do equipamento, tendo como objetivo principal a redução da quantidade de compostos orgânicos aderidos ao cascalho a níveis residuais que atendam demandas atuais e futuras.

1.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi a construção do *Microwave Paddle Dryer* e a avaliação das variáveis significativas ao processo de secagem em modo batelada para a remediação dos cascalhos gerados a partir de perfuração de poços de petróleo em ambiente *offshore* contaminados com fluido de perfuração de base orgânica.

1.2. Objetivos específicos

Este trabalho visou a construção do *Microwave Paddle Dryer* e o estudo das características operacionais deste equipamento na descontaminação dos cascalhos via secagem por micro-ondas, em modo batelada e com agitação do leito. Em virtude de o diferencial deste equipamento ser a agitação mecânica, este trabalho também avaliou a dinâmica das partículas no leito sob diferentes condições de agitação nos modos contínuo e batelada, sem a aplicação de micro-ondas e utilizando areia, material atóxico e de fácil manuseio. O intuito dos ensaios

de dinâmica de leito com partículas de areia foi avaliar aspectos operacionais relevantes para futuras modificações do *Microwave Paddle Dryer* para a operação em modo contínuo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são abordados os trabalhos e teorias que permitiram à idealização e construção do *Microwave Paddle Dryer*. São apresentados aspectos relacionados à perfuração de poços de petróleo, as características operacionais e construtivas de *paddle dryers* convencionais e a natureza das micro-ondas e a sua utilização em processos industriais.

2.1. Fluido de perfuração

Em processos de perfuração de poços de petróleo, o fluido de perfuração é injetado pelo interior da coluna de perfuração, sai pela ponta da broca e retorna à superfície pelo espaço anular entre a coluna e a parede do poço, carregando os cascalhos gerados no processo de perfuração da rocha, como ilustrado pela Figura 2.1. Além disso, o fluido de perfuração também exerce funções de estabilização do poço e segurança do processo.

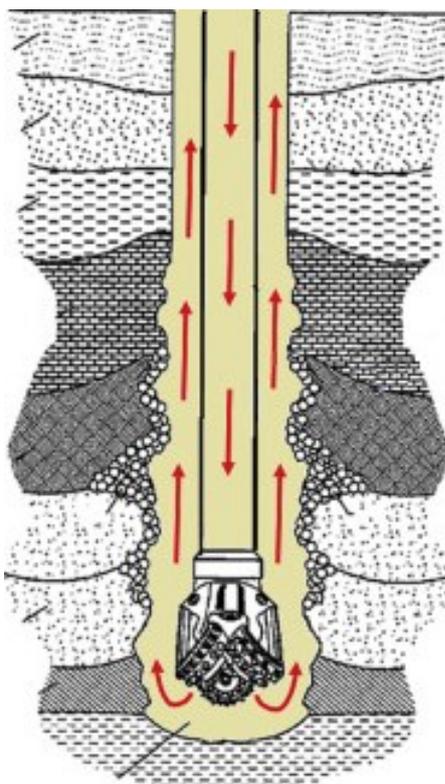


Figura 2.1: Circulação do fluido de perfuração durante o processo de perfuração de poços de petróleo (fonte: SABOORI *et al.*, 2019[modificada]).

A seguir são descritas as características que um fluido de perfuração deve apresentar e os principais parâmetros relacionados a sua formulação e utilização em campo.

2.1.1. Características desejáveis em fluidos de perfuração

O fluido de perfuração deve apresentar diversas características desejáveis, que incluem (AADE, 1999, THOMAS, 2001, SABBORI *et al.*, 2019, BRIDGES e ROBINSON, 2020):

- Estabilidade química: suas características devem permanecer constantes durante o processo de perfuração, o fluido não deve reagir com as formações rochosas e nem se deteriorar, mesmo caso o processo de perfuração seja interrompido e a circulação do fluido cesse.
- Facilidade de recuperação: o fluido deve ser capaz de sofrer tratamento e retornar à condição próxima a inicial sucessivas vezes durante o processo de perfuração, possuindo características físicas que facilitem a sua separação dos cascalhos.
- Segurança operacional: o fluido deve garantir a segurança durante a perfuração do poço de petróleo, ser capaz de minimizar os riscos relacionados ao desmoronamento das paredes do poço, selar as trincas nas formações rochosas e evitar vazamentos de gases e petróleo, assim como preservar os equipamentos envolvidos no processo de perfuração, lubrificar a coluna de perfuração e arrefecer a broca.
- Apresentar boa escoabilidade e ser bombeável: o fluido de perfuração deve ser injetado pelo interior da coluna de perfuração e retornar à superfície carregando os cascalhos no espaço anular entre a coluna e a parede do poço.
- Preservar as características geológicas do cascalho: o fluido de perfuração deve ser facilmente separado dos cascalhos sem gerar alterações químicas na formação rochosa carregada à superfície, permitindo a interpretação geológica do material do poço.

2.1.2. Propriedades dos fluidos de perfuração.

Para preservar as características do fluido de perfuração, diversos parâmetros devem ser monitorados e mantidos em valores adequados (THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.2.1. Densidade.

A densidade do fluido de perfuração deve permanecer no intervalo em que a pressão exercida pela coluna de fluido no poço não exceda o valor máximo suportado pela formação rochosa e ao mesmo tempo seja alta o suficiente para evitar vazamentos de petróleo e gases da formação rochosa. Durante o processo de perfuração a densidade do fluido é controlada com o

uso de componentes adensantes, sendo os mais comuns a barita e a baritina (ASME, 2005, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.2.2. Parâmetros reológicos.

Os parâmetros reológicos do fluido de perfuração influenciam na perda de carga, capacidade de carregamento dos cascalhos, perfil de velocidade de escoamento e outras características desejáveis para a perfuração do poço (THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.2.3. Força géis.

O fluido de perfuração possui natureza tixotrópica, sendo desejável que apresente características como maior estado de rigidez quando se encontrar em repouso, principalmente devido ao risco de uma parada súbita no processo de perfuração. Essa rigidez deve ser suficiente o bastante para manter o cascalho em suspensão e evitar sua decantação em direção à broca, o que poderia gerar danos aos equipamentos e inviabilizar a perfuração do poço. Partindo de um estado de rigidez por interrupção da circulação, o fluido de perfuração deve retornar ao estado de fluidez necessária para a retomada da circulação por bombeamento no circuito de perfuração do poço de petróleo (THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.2.4. Parâmetros de filtração.

O fluido de perfuração possui sólidos em sua composição que funcionam como selantes da formação rochosa, evitando o vazamento de petróleo e gases para a coluna e formando uma camada denominada reboco. Essa capacidade de selar as formações rochosas porosas evita a entrada de fluido de perfuração na rocha reservatório. As partículas responsáveis por selar os poros e as fraturas nas rochas devem ter seu tamanho ligeiramente menor que o espaço que irão ocupar, porém serem grandes o suficiente para não escoar para dentro da fratura (THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.2.5. Teor de sólidos.

O cascalho gerado durante a perfuração do poço causa alterações nas propriedades do fluido, sendo que a mistura entre o fluido de perfuração e o cascalho deve ser separada por processos de separação mecânicos e outros tipos de tratamento. A separação mecânica da

mistura é realizada por diferentes equipamentos em série, tais como: peneiras vibratórias, hidrociclones e centrífugas. Já a correção das propriedades do fluido de perfuração é realizada com tratamentos químicos, adição de componentes e diluição por acréscimo de fluido de perfuração novo (ASME, 2005, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.2.6. Concentração Hidrogeniônica – pH.

O fluido de perfuração deve ter seu pH mantido num intervalo de baixa alcalinidade, geralmente entre 7 e 10. A manutenção do nível de pH evita a corrosão de equipamentos e a dispersão de formações rochosas argilosas (THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.2.7. Teor de bentonita ou de sólidos ativos

O teor de sólidos ou bentonitas deve ser constantemente monitorado durante o processo de perfuração do poço, pois podem afetar a eficiência e o desempenho do fluido de perfuração. O teor de sólidos ativos ou bentoníticos pode ser medido através do teste de azul de metileno ou MBT, uma análise volumétrica por adsorção. Esse tipo de teste é capaz de medir a capacidade de troca de cátions das argilas e sólidos ativos presentes no fluido, permitindo averiguar a necessidade de utilização de aditivos para o controle da floculação devido a aglomeração de argilas com sólidos ativos (AADE, 1999, THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.3. Tipos de fluido de perfuração.

Os fluidos de perfuração são classificados de acordo com a sua composição. Os principais são os de base aquosa e base orgânica (THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

2.1.3.1. Fluidos de base água.

Em fluidos de base aquosa, o principal meio de dispersão dos materiais coloidais é a água. Em sua composição encontra-se argila e polímeros, que controlam as propriedades relacionadas à viscosidade, força géis e filtrado (THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

As principais vantagens do fluido de base aquosa são seu menor custo inicial, menor toxicidade ao meio ambiente e maior facilidade na detecção de problemas durante a perfuração

do poço, como vazamentos de gás e petróleo, além de permitir uma maior velocidade de penetração da broca. Entre as desvantagens, pode-se citar uma menor estabilidade em altas temperaturas e a impossibilidade de uso em formações rochosas que contenham argilas (THOMAS, 2001).

2.1.3.2. Fluidos de base orgânica.

Os componentes orgânicos são os principais diluentes da fase contínua nos fluidos de base orgânica, podendo ser hidrocarbonetos de base sintética e não sintética (THOMAS, 2001, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

As vantagens de se utilizar um fluido de base orgânica são sua estabilidade em altas temperaturas, baixa corrosão, baixa solubilidade de sais, melhor lubrificação da coluna de perfuração e baixa reatividade com formações rochosas. Como principais desvantagens estão sua maior toxicidade ao meio ambiente e maior custo de produção (THOMAS, 2001).

2.1.4. Cascalhos gerados na perfuração do poço

Durante a perfuração do poço de petróleo são gerados fragmentos da formação rochosa, denominados cascalhos. O carreamento do cascalho até a superfície é promovido pela circulação do fluido de perfuração. As características do cascalho dependem da formação rochosa na qual a broca se encontra no momento da perfuração, podendo haver variações de sua granulometria e composição química (AASE, 2013, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

O cascalho gerado na perfuração do poço deve ser separado do fluido de perfuração para não comprometer as propriedades deste, permitindo sua reutilização no processo. Além disso, os fluidos de perfuração possuem contaminantes tóxicos ao meio ambiente e devem ser separados do cascalho para a correta disposição deste.

Na próxima seção são abordadas questões relacionadas a disposição do cascalho e aos riscos ambientais envolvidos no manejo deste resíduo quando contaminado por fluidos de perfuração.

2.2. Manejo dos cascalhos contaminados com fluido de perfuração

Durante o processo de perfuração de poços de petróleo, é necessário separar o fluido de perfuração dos cascalhos provenientes da formação rochosa. Os motivos envolvem a segurança operacional, razões econômicas devido a reutilização do fluido e questões ambientais

associadas ao descarte dos cascalhos contaminados com fluido de perfuração, já que este é tóxico ao meio ambiente, principalmente os de base orgânica (CHARLES e SAYLE, 2010, BRIDGES e ROBINSON, 2020).

Atualmente, as 3 formas mais comumente utilizadas para a disposição de cascalhos contaminados provenientes da perfuração de poços no continente e no mar são (CHARLES e SAYLE, 2010, COBB, 2019):

1. Disposição em terra: o cascalho é transportado para o continente por embarcações que o recolhem na sonda de perfuração. Há diferentes riscos envolvidos neste tipo de operação que aumentam a chance de acidentes durante o manuseio e transporte do cascalho gerado a partir da atividade da sonda. Estes riscos são relacionados a transferência da sonda para o navio, transporte ao porto, tratamento em terra para adequação ao descarte e transporte ao aterro.
2. Disposição em mar: o cascalho é descartado no mar, em locais previamente estabelecidos e em condições estabelecidas pela legislação ambiental, que determina o limite máximo de compostos tóxicos presentes na composição tanto de fluidos de base aquosa, quanto de base orgânica. Para o descarte de cascalhos provenientes de rocha de reservatório, a regulamentação é mais rigorosa e geralmente prevê a isenção de petróleo.
3. Reinjeção no poço: o cascalho é transformado em uma lama fina e reinjetado na formação rochosa do poço. Esta técnica envolve critérios técnicos sobre a formação rochosa, que deve apresentar características geológicas que permitam a absorção desta lama sem que haja vazamento ou contaminação do poço.

Geralmente, os cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica ou hidrocarbonetos de petróleo devem passar por etapas adicionais de tratamento, além daquelas já utilizadas na unidade de controle de sólidos, tais como secadores de cascalhos, tratamento térmico e tratamento biológico. Isto se deve ao aumento das restrições impostas por muitos países para o limite máximo de contaminantes orgânicos provenientes do fluido de perfuração, que não deve exceder 1% em massa do cascalho contaminado, sendo zero para hidrocarbonetos de petróleo (REMPEC, 2019).

As preocupações em relação ao manejo dos resíduos contendo fluido de perfuração e metais pesados, sendo estes provenientes das formações rochosas perfuradas que contaminam o fluido, envolvem questões que vão desde a exposição dos operadores durante o processo de

perfuração do poço até o armazenamento e descarte dos resíduos nos locais de disposição (OKORO *et al.*, 2020, KAREN *et al.*, 2014).

Devido a toxicidade ao meio ambiente e ao potencial de danos à saúde humana, a localização geográfica para o descarte de cascalhos contaminados é regulamentada de acordo com o país e os locais afetados, sendo necessária a análise de fatores como a presença de biomas sensíveis e as distâncias de corpos da água e de seus pontos de captação para consumo (LII, 2021).

No Brasil, o Ibama é a autarquia federal que define as diretrizes para o descarte de cascalhos contaminados com fluido de perfuração. Para fluidos de base aquosa, os critérios de descarte são menos restritivos, desde que não haja presença de petróleo proveniente do poço e os limites de aditivos do fluido estejam em conformidade com o nível de toxicidade máximo para o descarte. Já para o fluido de perfuração de base orgânica, atualmente o limite máximo de orgânicos é de 5,9% em massa total, com geolocalização pré-determinada, sendo que a tendência é a de redução destes níveis. Estas avaliações consideram estudos sobre biodegradabilidade, toxicidade aos organismos e tipos de compostos presentes no fluido (IBAMA, 2018).

Os níveis de toxicidade dos compostos presentes nos fluidos de perfuração são avaliados em estudos com organismos vivos, sendo medidas as doses letais de exposição a uma determinada substância. Assim, o nível máximo permitido de determinada substância para o descarte dos cascalhos contaminados varia de acordo com o bioma onde será feita a disposição (ASLAN *et al.*, 2019).

Em razão da grande quantidade de poços de petróleo sendo perfurados em todo o mundo, a descoberta de novas reservas e o desenvolvimento de tecnologias capazes de realizar a exploração em locais antes inacessíveis, a quantidade de resíduos gerados nesta atividade aumentou consideravelmente nos últimos anos (MARIANO e LA ROVERE, 2017).

Diversos estudos têm sido conduzidos com o intuito de viabilizar a utilização do cascalho na construção civil, com sua adição em misturas para concreto, tijolos, asfalto, entre outras. A viabilidade técnica de aproveitamento do cascalho nestes tipos de cenário depende do nível de separação promovido entre o cascalho e os componentes potencialmente tóxicos provenientes do fluido de perfuração e da formação rochosa do poço de petróleo (FOROUTAN *et al.*, 2018, ARAKA *et al.*, 2019, KHODADADI *et al.*, 2020).

Diante dos desafios técnicos e legais envolvendo o descarte de cascalhos contaminados e a necessidade do reaproveitamento do fluido no processo de perfuração, a separação desta

mistura deve ser realizada por diferentes tipos de equipamentos (THOMAS, 2001, MARIANO e LA ROVERE, 2017). Para isso, é utilizada a unidade de controle de sólidos, que promove a separação dos cascalhos e do fluido de perfuração, recondiciona o fluido e reduz os níveis de contaminantes aderidos ao cascalho até valores definidos pela legislação para a sua disposição.

2.3. Unidade de controle de sólidos

Na Figura 2.2 é apresentada a configuração típica de uma unidade de controle de sólidos utilizada no Brasil.

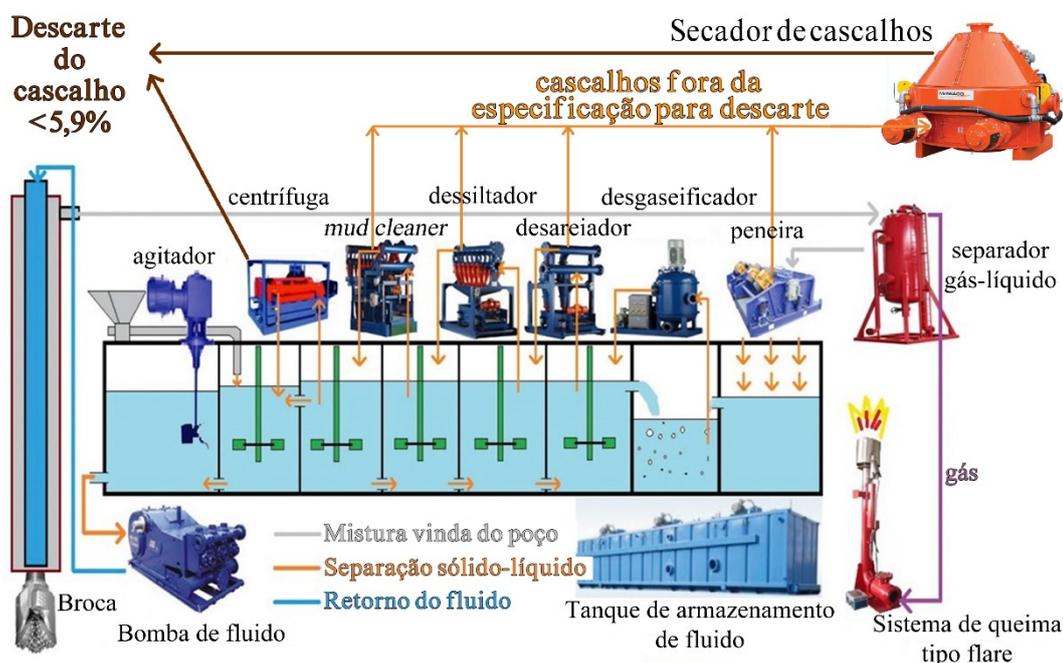


Figura 2.2: Típica unidade de controle de sólidos empregada no Brasil (fonte: <https://medium.com/@ekomeri/drilling-mud-solids-control-circulation-system-50fe77b211bd>, [modificada]).

A unidade de controle de sólidos está no circuito do processo de perfuração do poço de petróleo e consiste em uma série de equipamentos em série que tem como objetivo promover a separação da mistura composta pelo cascalho e o fluido de perfuração, além de recondicionar este para o seu retorno ao processo (ASME, 2005).

Os equipamentos da unidade de controle de sólidos operam em série e cada um proporciona a separação de uma determinada faixa granulométrica de cascalho. Os equipamentos geralmente utilizados são: peneiras vibratórias, hidrociclones (desareador e dessiltador), centrífuga decantadora e secador de cascalhos (ASME, 2005).

2.3.1. Peneira vibratória

A peneira vibratória é o primeiro equipamento de separação da mistura composta pelo fluido de perfuração e o cascalho. Este equipamento tem como princípio de separação a vibração mecânica do cesto onde a mistura é alimentada sobre as telas de separação. O movimento proporcionado pela peneira vibratória se deve à ação de moto-vibradores ligados a eixos com pesos excêntricos, sendo a intensidade de vibração relacionada a frequência de rotação do motor, características estruturais do equipamento e quantidade de material sendo processado (ASME, 2005).

2.3.2. Hidrociclones

Após a passagem pelas peneiras vibratórias, o cascalho é direcionado aos hidrociclones, equipamentos sem partes móveis que promovem a separação por meio do campo centrífugo gerado pela injeção tangencial da mistura por uma bomba centrífuga na seção de entrada destes equipamentos. Hidrociclones devem operar em condições específicas de vazão de alimentação, concentração de sólidos e pressão para realizar a separação de maneira eficiente (ASME, 2005).

Numa unidade de controle de sólidos, diferentes tipos de hidrociclones são utilizados, sendo classificados de acordo com a faixa granulométrica de separação em: desareidores, para partículas maiores, e dessiltadores, para partículas menores (ASME, 2005).

2.3.3. *Mud-cleaner*

O *Mud-cleaner* é um equipamento composto por vários hidrociclones instalados sobre uma peneira vibratória com tela de separação com a abertura menor que as utilizadas nas peneiras vibratórias presentes no início da linha de controle de sólidos. Este equipamento realiza a separação entre o cascalho e os sólidos que fazem parte da composição do fluido de perfuração (ASME, 2005).

Em um *Mud-cleaner*, os hidrociclones geralmente são do tipo dessiltadores, sendo que os sólidos que saem pelo *underflow* são direcionados para a separação via peneiramento vibratório, que retém as partículas de cascalho maiores que a abertura da tela e permite a passagem das partículas dos adensantes presentes no fluido de perfuração, tais como a baritina (ASME, 2005).

2.3.4. Centrífuga decantadora

Após a passagem pelos hidrociclones, a mistura é alimentada na centrífuga decantadora, equipamento que promove a separação por aplicação de força centrífuga gerada pela rotação de um eixo com rosca helicoidal acoplado a um motor. Este processo acelera a sedimentação e divide a mistura de fluido de perfuração e cascalhos em duas correntes: uma mais densa, com maior concentração de sólidos, e outra menos densa, com maior fração de fluido (ASME, 2005).

2.3.5. Secador de cascalhos

Apesar do nome “secador de cascalhos”, a separação neste equipamento é promovida de forma mecânica. O secador de cascalhos é uma centrífuga filtrante, com telas em suas paredes internas que retém o cascalho e permitem a passagem do fluido sob ação de um campo centrífugo. A velocidade de rotação deste equipamento é de 800 a 900 rpm. A torta de cascalho formada sobre a tela é raspada por aletas e direcionada para a seção de saída do equipamento (PETROBRÁS, 2008).

Na prática, o secador de cascalhos não faz parte da unidade de controle de sólidos, por não estar relacionado ao condicionamento do fluido de perfuração, sendo um equipamento utilizado para a adequação dos níveis de contaminantes aderidos ao cascalho de acordo com a legislação ambiental (PETROBRÁS, 2008).

2.3.6. Limitações da unidade de controle de sólidos – aumento das restrições ambientais

Em razão do aumento das restrições ambientais para o descarte de cascalhos contaminados e do fato dos processos empregados na unidade de controle de sólidos estarem próximos de seu limite operacional de separação, existe a demanda no desenvolvimento de novos equipamentos, tais como o *Thermal Cuttings Cleaner Hammermill* da fabricante MI SWACO, que emprega o processo de dessorção térmica por atrito para a descontaminação de cascalhos (MI-SWACO, 2011). Além disso, outros processos de separação vêm sendo estudados, como o arraste por vapor de água superaquecido descrito por Chen *et al.* (2018) e a pirólise de cascalhos contaminados descrito por Hou *et al.* (2018).

Atualmente, os equipamentos tipicamente utilizados na unidade de controle de sólidos no Brasil usam processos mecânicos de separação, que são: vibração nas peneiras vibratórias, campos centrífugos nos hidrociclones e centrífuga decantadora e a combinação de campo centrífugo e filtração no secador de cascalhos. Entretanto, estes princípios de separação já se

mostram insuficientes devido ao avanço das restrições ambientais adotadas ao redor do mundo para o descarte de cascalhos contaminados, restrições que o Brasil tende a aderir.

Para atingir menores níveis de contaminação de compostos orgânicos no cascalho, um método considerado é o processo de secagem. Como mencionado, este trabalho propõe o emprego de um novo tipo de equipamento denominado *Microwave Paddle Dryer* como alternativa para cobrir esta lacuna tecnológica. O *Microwave Paddle Dryer* utiliza micro-ondas como agente de aquecimento no processo de descontaminação dos cascalhos via secagem em conjunto com a agitação do leito.

Na próxima seção são apresentados os secadores do tipo *paddle dryer* e suas características construtivas e operacionais em versões convencionais deste equipamento.

2.4. *Paddle Dryers*

Paddle Dryers são secadores com sistema de agitação do leito. Em sua versão convencional, utiliza a transmissão de calor via condução e convecção térmica para promover a secagem, sendo os meios de transporte de energia o fluido térmico que circula na jaqueta de aquecimento e a corrente de ar superaquecido, respectivamente. Na Figura 2.3 são apresentadas fotos de *paddle dryers*.

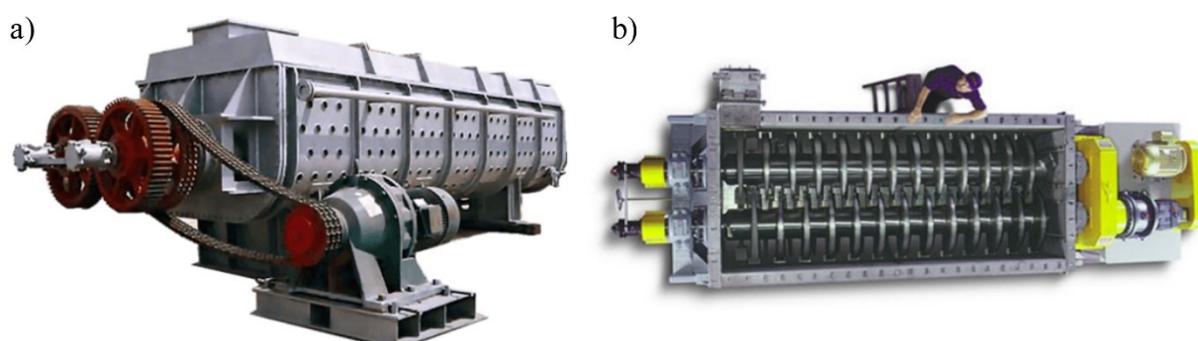


Figura 2.3: Fotos de equipamentos do tipo *paddle dryer*, fontes: a) <https://www.gemdryers.com/products/paddle-dryer/> e b) <https://www.pulpandpaper-technology.com/products/komline-sanderson/k-s-paddle-dryer>, acessadas em 07/09/2022.

Uma das principais aplicações de *paddle dryers* é no processo de tratamento de lodos de esgoto, material coesivo e com elevado teor de umidade, sendo o objetivo da secagem reduzir o volume do resíduo, o risco biológico e o odor (ARLABOSSE *et al.*, 2005). A secagem do material no leito do *paddle dryer* ocorre em virtude do contato deste com as superfícies térmicas no casco, eixos e pás de mistura do equipamento, por onde a energia é transmitida por condução

térmica, sendo que a mistura do material no leito ocorre ao longo de todo o equipamento promovida por eixos de agitação (FERRASSE *et al.*, 2002).

No processo de tratamento de lodo residual de esgoto por secagem utilizando o *paddle dryer*, uma corrente de ar seco geralmente é utilizada com a finalidade de carrear os vapores gerados, sendo uma das preocupações relacionadas ao processo a existência de substâncias tóxicas a saúde humana (DENG *et al.*, 2009[a]). Na Figura 2.4 é ilustrado o fluxograma de funcionamento de um *paddle dryer* convencional.

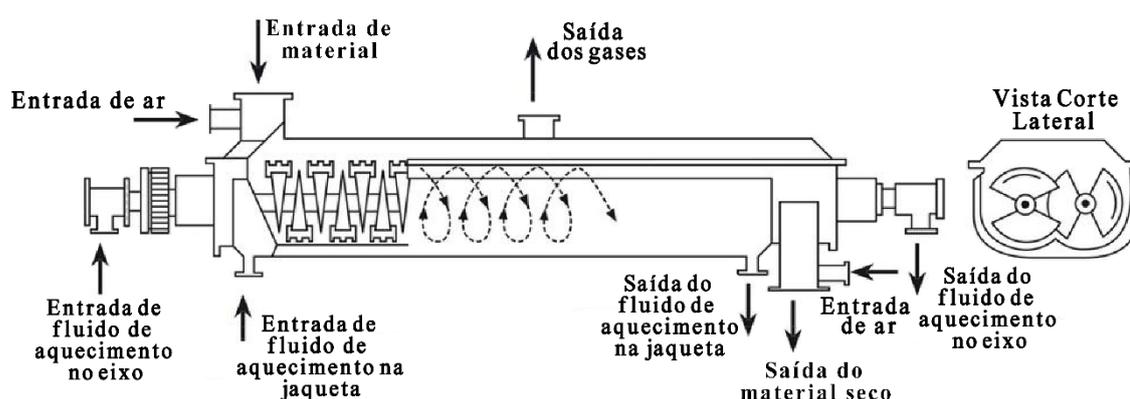


Figura 2.4: Fluxograma de funcionamento de um secador tipo *paddle dryer* com jaqueta de aquecimento e corrente de circulação de ar. (fonte [modificado]: <https://www.nara-e.de/en/products/drying/paddle-dryer/>).

Em termos de transferência de calor e massa, os secadores do tipo *paddle dryer* podem ser classificados como diretos, indiretos ou combinados. Nos processos de secagem indireta, como nos que utilizam jaquetas de aquecimento, há a vantagem de produzir uma quantidade mínima de vapores sem a contaminação do meio de transmissão de calor, já que não há contato do material sendo processado com o meio responsável por carrear a energia (DENG *et al.*, 2009[b]). Já nos processos com secagem direta, como os que envolvem a passagem de ar superaquecido, a vantagem é a adição da convecção de calor e massa, porém é gerado um grande volume de gases contaminados, que muitas vezes deve ser tratado (DENG *et al.*, 2009[b]).

A transferência de energia térmica condutiva para o leito em *paddle dryers* convencionais geralmente é feita através de jaqueta de aquecimento com fluidos térmicos circulando no casco, pás e eixo do equipamento. Outros meios de aquecimento também podem envolver a utilização de resistências elétricas (MILHÉ *et al.*, 2014[a]).

Modificações para a operação deste equipamento com a aplicação de vácuo também são realizadas como forma de acelerar o processo de secagem e alcançar menores teores de umidade residual (YAN *et al.*, 2009).

Nos processos em que a energia é transferida para o leito por condução térmica através da passagem de fluido de aquecimento pela jaqueta, eixos e pás do *paddle dryer*, diferentes tipos de fluidos podem ser utilizados, entre os mais comuns estão: vapor saturado de água, óleos térmicos e gases superaquecidos (DENG *et al.*, 2013).

Em *paddle dryers*, a agitação do leito é um fator importante no processo, sendo o torque necessário para isso dependente das características do leito, que se alteram à medida que a secagem e a mistura do material ocorrem (FERRASE *et al.*, 2002, DENG e SU, 2010).

Características do material a ser seco, como a forma das partículas e o nível de coesão, assim como questões estruturais do equipamento, como o formato das pás, também afetam o grau de mistura e a escoabilidade do material (MALHOTRAF e MUJUMDAR, 1990).

Ebrahimi *et al.* (2018) realizaram um estudo de simulação numérica pelo método dos elementos discretos de um equipamento de mistura do tipo *paddle* em batelada com um eixo de agitação, sendo constatado que o ângulo de ataque e o formato das pás influenciam significativamente o grau de mistura

Chen *et al.* (2016) realizaram um estudo em um *paddle dryer* no modo contínuo para o tratamento de lodo de esgoto. Foi observado que a vazão mássica de alimentação afeta diretamente a distribuição do leito, ocorrendo um maior acúmulo de sólidos próximo à seção de entrada do material para as maiores vazões de alimentação. Já para a faixa estudada da influência da velocidade do eixo de agitação no teor de umidade final do material, não foram observadas mudanças significativas. Neste mesmo estudo, também foi observado que a condensação no casco é um fator que pode alterar a eficiência de secagem do *paddle dryer*, devido ao retorno do líquido ao leito.

Milhé *et al.* (2015) realizaram ensaios num *paddle dryer* de eixo único operando em modo contínuo para o tratamento de lodo residual de esgoto. O aquecimento foi promovido por resistências elétricas no casco e no eixo de agitação, foram analisadas as variáveis independentes: altura do vertedouro, inclinação do leito, velocidade de rotação do eixo de agitação e vazão mássica de alimentação. As variáveis significativas foram a inclinação e a altura do vertedouro, sendo que menores inclinações e maiores alturas de vertedouro favoreceram a retenção de sólidos no leito do equipamento.

Como mencionado, *paddle dryes* convencionais empregam a transmissão de calor via convecção e condução térmicas, mecanismos de transporte de energia térmica que possuem limitações por ocorrerem através da fronteira do sistema. Em contraste, a radiação de micro-ondas possui a vantagem de promover o aquecimento volumétrico e direto, reduzindo os problemas relacionados a distribuição de calor no leito (FALCIGLIA *et al.*, 2018, JONES *et al.*, 2002, DENG *et al.*, 2009[b])

A proposta do *Microwave Paddle Dryer* considera a capacidade deste equipamento em processar materiais que apresentem características distintas relacionadas ao nível de coesão, densidade e escoabilidade, já que durante o processo de perfuração de poços de petróleo, as características do cascalho se alteram de acordo com a profundidade e a localização do poço (ASME, 2005). Além disso, as variações nas formações rochosas e no tipo de broca utilizada para a perfuração alteram a granulometria do cascalho, o que se reflete nos níveis residuais de olefina e água na mistura das correntes saindo dos diferentes equipamentos da unidade de controle de sólidos (AASE *et al.*, 2013).

Diante da importância da agitação no processo de secagem no equipamento proposto, são apresentadas na próxima seção algumas características relacionadas à agitação de leitos que devem ser consideradas para a operação do *Microwave Paddle Dryer*.

2.5. Agitação do leito

Em processos de secagem com agitação mecânica, a coesão entre as partículas oferece resistência à mistura, além de ser um fator relacionado a incrustações em equipamentos que processam materiais com alta coesividade (TADEUSZ, 2003, VASILENKO *et al.*, 2013). Isso pode criar zonas mortas e interferir no deslocamento do material no leito, alterando coeficientes de troca de calor e massa e comprometendo a eficiência do processo (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1995; CAPARINO *et al.*, 2016).

A tendência de alguns materiais particulados em se aglomerar e aderir às superfícies de contato é denominada *stickiness*, fenômeno que tem grande influência na eficiência de secagem (TADEUSZ, 2003).

O *stickiness* está relacionado com a temperatura e com a umidade do material particulado. Sua existência no processo de secagem pode causar alterações no consumo energético necessário para a agitação, sendo que uma alteração brusca caracteriza o *stick-point*,

já uma gradual caracteriza o *stick-region*, conforme mostrado na ilustração da Figura 2.5 (TADEUSZ, 2003).

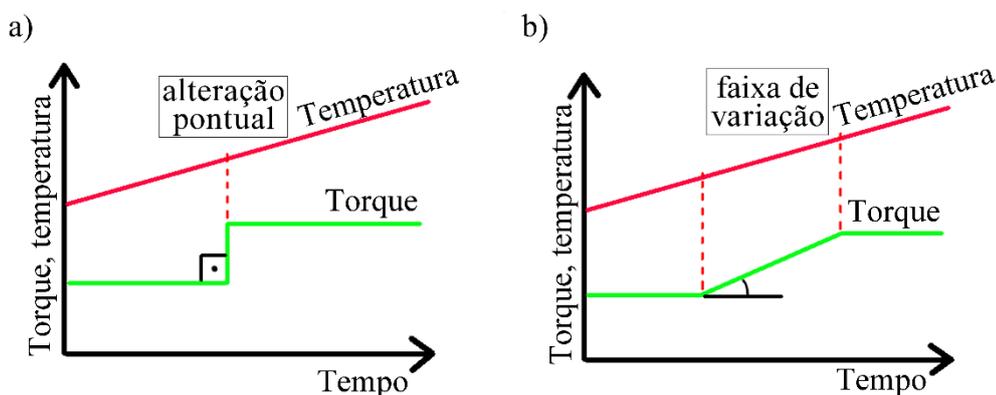


Figura 2.5: Fenômeno *stickiness* em sua a) forma pontual, *stick-point*, e na sua b) forma gradual, *stick-region* (Fonte [modificado]: Tadeusz, 2003).

Na Figura 2.6 é apresentada a relação entre o torque necessário para a agitação mecânica e o teor de umidade do leito no processamento de lodo proveniente do tratamento de esgoto em uma unidade experimental de bancada do trabalho realizado por Tadeusz (2003), sendo a velocidade de rotação do eixo e a temperatura mantidas constantes durante o teste. Foi observado uma variação significativa do torque necessário para manter a agitação à medida que a secagem ocorria e o teor de umidade do leito variava.

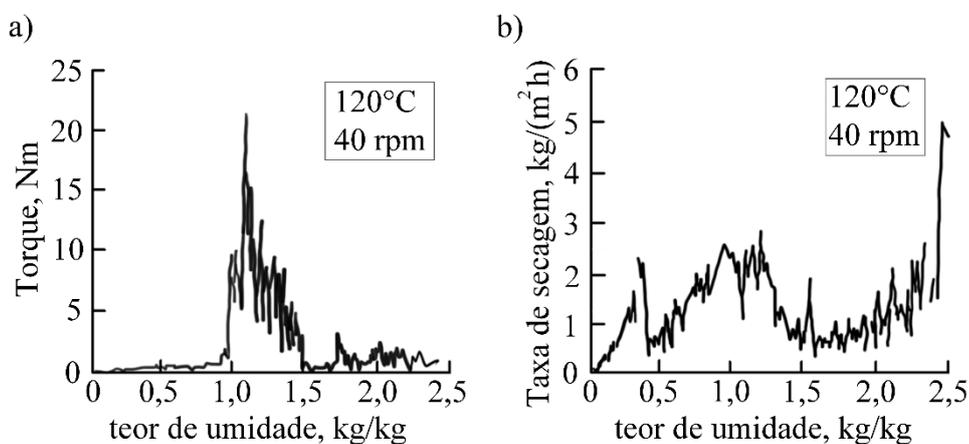


Figura 2.6: Secagem de lodo residual de esgoto com processo de agitação e sua relação entre o a) torque e teor de umidade e a b) taxa de secagem e teor de umidade (Fonte [modificado]: Tadeusz, 2003).

Secadores do tipo *paddle dryer* são compactos, apresentam grande quantidade de material no leito e podem regular seu tempo de residência alterando variáveis de processo e características estruturais do equipamento, como a altura vertedouro (CHARLOU *et al.*, 2015). Desta forma, deve ser fornecido um nível adequado de potência e torque pelo motorreductor,

que dependerá das dimensões e geometria do equipamento, além das propriedades e quantidade de material no leito sob secagem. Na Figura 2.7 é ilustrada a resistência oferecida pelo leito no processo de agitação mecânica promovido por um eixo de mistura.

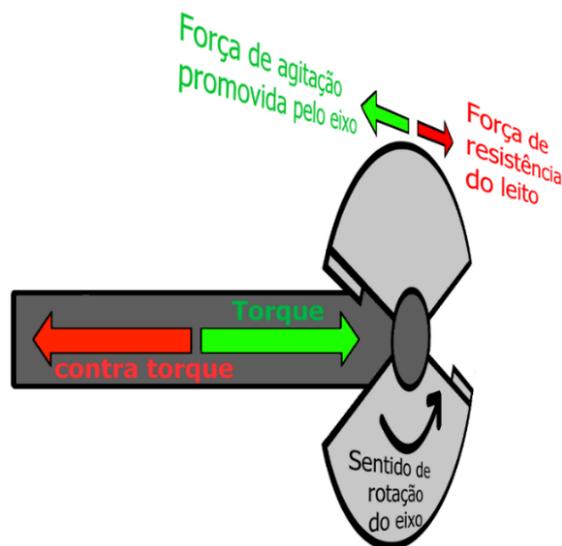


Figura 2.7: Torque fornecido pelo motor e resistência mecânica à agitação do leito.

Para o conjunto motor e redutor (motorreductor), a Equação 2.1 mostra a relação entre o torque disponível no eixo de saída, T_{eixo} em Nm , a potência de acionamento, P_{eixo} em $Watts$, e o número de rotações na saída do motorreductor, n_{rpm} em rotações por minuto (rpm)(WEG-CESTARI, 2019).

$$T_{eixo} = 9550 \frac{P_{eixo}}{n_{rpm}} 10^3 \quad (2.1)$$

A variável n_{rpm} é a razão entre a rotação fornecida pelo motor, N_{rpm} em rpm , e a redução total do redutor, I_r , como mostrado na Equação 2.2 (WEG-CESTARI, 2019).

$$n_{rpm} = \frac{N_{rpm}}{I_r} \quad (2.2)$$

Desta forma, o redutor atua como um multiplicador de torque, reduzindo o número de rotações do motor e aumentando o torque devido ao seu sistema de engrenagens, sendo o torque disponível no eixo de saída do redutor calculado pela Equação 2.3, em que T_u é o torque útil do motor, I_R a redução do redutor e η_R o rendimento de transmissão das engrenagens do redutor.

$$T_{eixo} = T_u I_r \eta_r \quad (2.3)$$

O consumo energético do motor está relacionado as características do leito submetido ao processo de secagem, como a temperatura, nível de incrustação e coesão do material contaminado (TADEUSZ, 2003). O cálculo da potência elétrica consumida pelo motor numa rede trifásica é feito com a Equação 2.4, sendo P_{Total} a potência consumida pelo motor em *Watts*, U a tensão em *Volts (V)* entre as fases da rede elétrica trifásica que alimenta o motor, I a corrente consumida em *amperes (A)* e $\cos\theta$ o fator de potência do motor elétrico (WEG[a], 2021).

$$P_{Total} = U I (\cos\theta) \sqrt{3} \quad (2.4)$$

A potência útil na saída do eixo do motor é calculada pela Equação 2.5, sendo η o rendimento do motor elétrico.

$$P_{eixo} = \eta P_{Total} \quad (2.5)$$

Para um *paddle dryer* operando no modo contínuo, a resistência oferecida pelo leito em função do tempo é um dado útil para avaliar o distanciamento entre o ponto de operação em que o equipamento se encontra e o estado estacionário (CHARLOU *et al.*, 2015). Para o *Microwave Paddle Dryer* operando no modo batelada, ocorrem variações na temperatura e na composição do leito, o que altera a necessidade energética demandada para a agitação no decorrer da operação. Desta forma, os dados de potência e torque consumidos pelo motor podem ser correlacionados com as condições do leito no decorrer da secagem (TADEUSZ, 2003).

Na próxima seção é apresentada uma breve descrição sobre as características da tecnologia de aplicação das micro-ondas.

2.6. Processo de aquecimento via micro-ondas

As micro-ondas são a banda do espectro de radiação eletromagnética compreendida nas frequências entre 300MHz e 300GHz, correspondentes à comprimentos de onda na faixa de 1 a 100 cm (FALCIGLIA *et al.*, 2018)

Quando expostos a um campo elétrico, os materiais dielétricos apresentam a capacidade de polarização, que causa a alteração na orientação espacial das moléculas de acordo com a direção do campo elétrico. Dessa forma, materiais dielétricos com boa capacidade de absorção de micro-ondas possuem duas importantes características: a primeira é possuir poucos portadores de carga livre, assim, ao serem expostos a um campo elétrico externo há poucas mudanças na distribuição das cargas ao longo do material; a segunda característica é que as moléculas ou átomos que compreendem o dielétrico possuam um momento de dipolo (OESPCHUCK 1984).

Também pode ocorrer a distorção da nuvem de elétrons ao redor das moléculas não polares ou átomos através da aplicação de um campo elétrico externo que pode induzir um momento de dipolo temporário, sendo que este movimento gera fricção dentro do dielétrico e a energia é dissipada na forma de calor (JONES *et al.*, 2002).

A interação dos materiais dielétricos com a radiação na faixa de micro-ondas é resultante da absorção da energia magnética decorrente da propagação da onda eletromagnética, sendo a capacidade do material em absorver esta energia relacionada com suas propriedades dielétricas (JONES *et al.*, 2002).

Na Figura 2.8 é ilustrado o fenômeno de polarização das moléculas expostas a um campo elétrico no mecanismo de aquecimento via micro-ondas para os dois principais casos de conversão desta energia da forma eletromagnética para a térmica: a condução iônica e a rotação dipolar (MUJUMDAR, 2007).

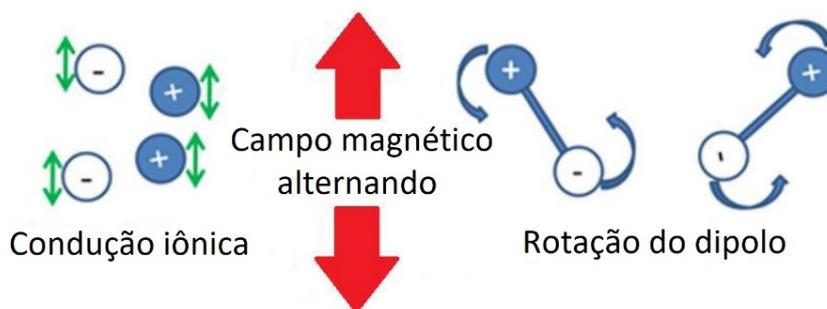


Figura 2.8: Principais mecanismos de aquecimento via micro-ondas (Fonte [modificado]: Metaxas, 1993)

A capacidade de transformação da energia eletromagnética em energia térmica nos materiais dielétricos pode ser medida através das propriedades dielétricas do material. Estas propriedades estão relacionadas à eficiência de conversão e a uniformidade do aquecimento do material (MUJUNDAR 2007). A Equação 2.6 define as principais grandezas e sua relação com a absorção e transformação das micro-ondas em calor (MEREDITH, 1998).

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.6)$$

Sendo ε_r a permissividade elétrica relativa, ε' a constante dielétrica, ε'' o fator de perda dielétrica e j o número imaginário.

A relação entre a constante dielétrica e o fator de perda dielétrica permite o cálculo da tangente de perda, $\tan\delta$, como mostrado na Equação 2.7 (MEREDITH, 1998).

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.7)$$

A tangente de perda é um parâmetro de classificação do material em relação à sua capacidade de absorção das micro-ondas e subsequente transformação em calor. Segundo Kostas *et al.* (2017), os materiais podem ser classificados de acordo com sua capacidade de interação com as micro-ondas em:

1. Transparentes: permitem a passagem das micro-ondas quase sem interação, possuindo $\tan\delta < 0,1$.
2. Absorventes: absorvem as micro-ondas e as transformam em calor de acordo com a intensidade do campo eletromagnético irradiado e o fator de perda dielétrico do material, sendo absorventes médios quando $0,1 < \tan\delta < 0,5$ e absorventes altos quando $0,5 < \tan\delta$.
3. Opacos: provocam a reflexão das micro-ondas, sem absorção.

Na Figura 2.9 é apresentado o diagrama vetorial para a tangente de perda. Valores altos de diferença de ângulo de fase estão relacionados a maior capacidade de conversão da energia eletromagnética em energia térmica (ROSSI, 2017).

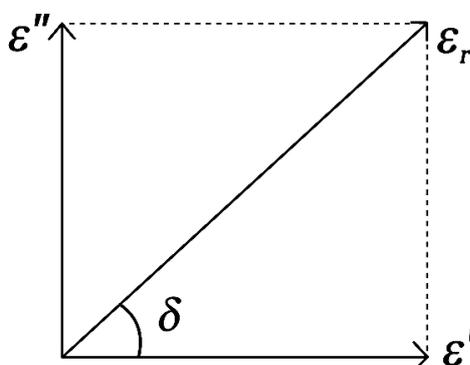


Figura 2.9: Diagrama vetorial para a tangente de perda

A constante dielétrica (ϵ') pode ser entendida como a capacidade do material em absorver a energia fornecida pelo campo elétrico gerado pelas micro-ondas, já o fator de perda (ϵ'') representa a efetividade da transformação da energia eletromagnética em calor (FALCIGLIA *et al.*, 2018, ROSSI, 2017).

Devido a capacidade de penetração das micro-ondas, o aquecimento se dá de forma volumétrica, ao contrário de outras formas de transferência de calor, nas quais a entrada de energia ocorre pelas fronteiras do material através de convecção, radiação ou condução térmica por contato, sendo que nestes casos a energia térmica é distribuída ao longo de um corpo por condução (MOTASEMI e AFZAL, 2013).

A variação espacial do campo elétrico, E_d em V/m , gerado pela propagação da onda eletromagnética, depende do campo elétrico incidente, E_0 em V/m , da profundidade de penetração, D_p em m , e da distância da fonte de irradiação de micro-ondas, d em m , conforme descrito pela Equação 2.8 (BARBA *et al.*, 2011).

$$E_d = E_0 e^{-\left(\frac{d}{D_p}\right)} \quad (2.8)$$

A profundidade de penetração, D_p , é definida como a distância a partir da qual 36,8% ($1/e$) da energia das micro-ondas foi absorvida pelo material irradiado, podendo ser calculada de uma forma simplificada com a Equação 2.9, em que λ_0 é comprimento da onda eletromagnética irradiada em m . (ACIERNO *et al.*, 2004).

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\epsilon''} \quad (2.9)$$

A quantidade de energia dissipada na forma de calor por unidade de volume do material irradiado é função da frequência da aplicação do campo eletromagnético e das propriedades dielétricas do meio. Esta energia dissipada pode ser quantificada de acordo com a Equação 2.10, que é derivada das relações de Maxwell (METAXAS, 1991).

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E_{max}^2| = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E^2| \quad (2.10)$$

Sendo \dot{Q} a taxa de geração de calor por unidade de volume em $J/(m^3s)$, ϵ_0 a permissividade elétrica no vácuo com valor de $8,85 \cdot 10^{-12} Fm^{-1}$, E_{max} o valor máximo do campo eletromagnético em seu pico em V/m e ω a frequência angular em rad/s , definida pela Equação 2.11, em que f é a frequência da onda eletromagnética em Hz .

$$\omega = 2\pi f \quad (2.11)$$

Já a taxa de geração de calor pelo dielétrico é dada pela Equação 2.12 (CLARK *et al.*, 2000).

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\dot{Q}}{c_p \rho} \quad (2.12)$$

Onde T é a temperatura em K , t o tempo em s , c_p é o calor específico do meio irradiado em $J/(kgK)$ e ρ a densidade em kg/m^3 .

Durante o processo de aquecimento via micro-ondas, a condução térmica, descrita na Equação 2.13, ocorre concomitantemente com a geração de calor resultante da incidência do campo eletromagnético (FALCIGLIA *et al.*, 2018).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (2.13)$$

Sendo k a condutividade térmica em $w/(mK)$.

A condução térmica ocorre em função de diferenças na temperatura do corpo sendo aquecido, já que há variações na intensidade das micro-ondas à medida que penetram o material, além do surgimento dos *hot spots* e *cold spots*. Os *hot spots* e *cold spots* ocorrem em virtude da natureza oscilatória da propagação das ondas eletromagnéticas e são intensificados pela sobreposição de ondas, causando a superposição ou o cancelamento do campo eletromagnético (FALCIGLIA *et al.*, 2018, MEREDITH, 1998).

As características da propagação, absorção e geração de calor pelas micro-ondas são fatores importantes no projeto de fornos que utilizam este tipo de tecnologia. Na próxima seção é apresentado uma revisão sobre a aplicação das micro-ondas em processos industriais e na descontaminação de diferentes tipos de resíduos.

2.7. Utilização das micro-ondas em processos industriais e tratamento de resíduos

Os processos que utilizam aquecimento são amplamente empregados em diversos ramos da indústria, para a promoção de secagem, reações químicas ou mudanças de estado físico. Um dos desafios no aquecimento é o controle da distribuição do calor que ocorre nas formas de radiação, convecção e condução térmica. Estes mecanismos dependem das propriedades físicas da substância, tais como o calor específico, a condutividade térmica e a densidade, além de características relacionadas a quantidade, forma e distribuição do material, como a capacidade térmica e número de fases presentes (MEREDITH, 1998).

Após a 2ª Guerra Mundial, houve um grande avanço na utilização das micro-ondas para aplicações de aquecimento em virtude das vantagens relacionadas a capacidade desta faixa de onda eletromagnética em promover aquecimento rápido, energeticamente eficiente e capaz de ser empregada em diferentes materiais. Algumas das aplicações mais comuns atualmente são na área de processamento de alimentos, secagem de madeiras, plásticos e borracha, assim como na cura e pré-aquecimento de cerâmicas (JONES *et al.*, 2002).

As vantagens das micro-ondas em relação a outras formas de aquecimento incluem a capacidade de aquecer meios heterogêneos ou com limitações para a transferência de calor por outros métodos. Devido à característica de aquecimento volumétrico a altas taxas, é possível atingir uma melhor distribuição de temperaturas do material. Desta forma, a utilização de micro-ondas contorna as limitações de transferência de energia impostas pelas fronteiras físicas do sistema (BUTTRESS *et al.*, 2019).

As micro-ondas apresentam diversas vantagens para sua aplicação em processos de aquecimento, tais como: altas taxas de aquecimento, não há contato direto entre a fonte de aquecimento e o material sendo aquecido, aquecimento seletivo, apresenta bom controle de temperatura do processo, rápido início e parada da operação, fácil nível de automação, além de poder ser aplicada em equipamentos de pequenas dimensões (STRACK *et al.*, 1995).

Desta forma, a utilização das micro-ondas possibilita a intensificação de processos e permite a utilização de equipamentos compactos, com menor retenção de material no leito (DIMIAN *et al.*, 2014).

Um exemplo de intensificação do processo utilizando esta tecnologia é a pesquisa realizada por Buttress *et al.* (2019), que fizeram um estudo sobre a aplicação de micro-ondas no processo de síntese polimérica, cujo objetivo foi diminuir o tempo necessário para o ciclo

de aquecimento e o tempo de reação. Os resultados mostraram um aumento de 265% na taxa de síntese polimérica em relação ao processo convencional, sem que ocorresse perda da qualidade do produto, já que foram atingidos polímeros com alto peso molecular. A diminuição do tempo necessário para a realização dos processos mostra como o potencial de utilização desta tecnologia pode ser benéfico para reduzir o tamanho de equipamentos e os riscos operacionais, além de melhorar o controle do processo.

Diversos cientistas demonstraram as vantagens da utilização das micro-ondas para aplicações ambientais, sendo ressaltado a viabilidade de sua aplicação em processos de descontaminação de resíduos como pneus e plásticos usados. As vantagens foram relacionadas a melhores índices de recuperação de produtos com alto valor agregado e menor poluição atmosférica quando comparada a técnicas que envolvem incineração e pirólise convencional (FALCIGLIA *et al.*, 2018).

Appleton *et al.* (2005) realizaram uma revisão sobre a utilização de micro-ondas no tratamento de diversos resíduos industriais, tais como: pneus usados, plásticos, remediação de solos e água contaminada. O estudo avaliou a viabilidade técnica e econômica da aplicação das micro-ondas para o tratamento destes resíduos, chegando à conclusão de que há um potencial significativo para o emprego desta tecnologia.

Outra revisão que corrobora com a utilização das micro-ondas foi realizada por Jones *et al.* (2002), que enfatizaram a aplicação no campo ambiental, como na descontaminação de solos, tratamento de resíduos de esgoto, processamento mineral e regeneração de carbono ativado. Os autores também identificaram algumas áreas que possuem maior potencial econômico para a aplicação desta tecnologia, além daquelas em que o resultado não foi relevante em termos energéticos, financeiros ou pela falta de viabilidade técnica para sua utilização.

Além dos benefícios energéticos para o tratamento de diversos tipos de resíduos, outras vantagens das micro-ondas incluem o maior rendimento e a compatibilidade ambiental no descarte dos produtos obtidos (HAQUE, 1999, FALCIGLIA *et al.*, 2018, PEREIRA *et al.*, 2014).

Um resíduo de difícil manejo em que foi encontrada a viabilidade técnica de aplicação das micro-ondas foi no tratamento de pneus usados através de pirólise, em que esta tecnologia se mostrou uma ótima alternativa em termos ambientais se comparada ao processo geralmente utilizado: a incineração. A pirólise de pneus via micro-ondas permitiu a recuperação de

compostos com alto valor econômico agregado como olefinas e o carbono ativado (APPLETON *et al.*, 2005).

É importante salientar que nem toda substância é absorvedora de micro-ondas, o que torna necessário, nestes casos, a adição de componentes absorvedores para a conversão da energia eletromagnética em calor (JONES *et al.*, 2002).

No tratamento de resíduos plásticos, que geralmente são transparentes às micro-ondas, pode ser adicionado carbono particulado, que é um bom absorvedor, o que possibilita a transferência de energia entre os dois materiais através de condução térmica. A pirólise de resíduos plásticos via micro-ondas possibilita um melhor controle de temperatura do leito e uma melhor recuperação dos compostos gasosos gerados, além de ser viável economicamente (LULOW e CHASE, 2001).

A utilização de micro-ondas também se mostrou eficiente para o tratamento de solos contaminados com compostos orgânicos, sendo capaz de ser empregada na remediação de solos contaminados em acidentes ambientais ou por processos como a perfuração de poços de petróleo (FALCIGLIA *et al.*, 2016, JONES *et al.*, 2012, PEREIRA *et al.*, 2014).

Em relação ao tratamento de solos contaminados em acidentes ambientais, Falciglia *et al.* (2016) realizaram testes em uma unidade experimental de bancada utilizando micro-ondas na remediação de aquíferos contaminados com diesel. A remoção do diesel atingiu níveis superiores a 80%, com a vantagem de só se utilizar radiação micro-ondas. A remoção máxima do contaminante foi de 89% para a fase líquida e de 88% para a fase sólida. Os autores ressaltaram que a presença de água no sistema e nos interstícios do material sólido granular do aquífero ajudou no arraste do diesel, sendo este um composto orgânico que é transparente as micro-ondas. Além disso, a água e o solo do aquífero são bons absorvedores de micro-ondas, o que auxiliou na geração de calor.

No tratamento de lodo residual de esgoto, o emprego de micro-ondas para o processo de pirólise permitiu a redução volumétrica em mais de 80%, além da eliminação do risco biológico deste resíduo (MENENDEZ *et al.*, 2001).

Robinson *et al.* 2008 realizaram testes de remediação de cascalhos contaminados por petróleo utilizando micro-ondas. O cascalho contaminado foi colocado numa célula e o arraste dos vapores foi feito por gás nitrogênio, a fim de se evitar a combustão de componentes do petróleo presentes na amostra. Foi observado a descontaminação por meio de dessorção térmica e pirólise. Em menores potências, não foi observada a pirólise do material contido na célula, porém, à medida que a potência aplicada à amostra foi aumentada, o processo de pirólise passou

a ser observado, assim como o tempo para o início da pirólise também diminuiu. Outra característica demonstrada neste trabalho foi que o tamanho da amostra influenciou significativamente na absorção das micro-ondas, sendo observado uma maior taxa de aquecimento das amostras com maior quantidade de material, fator relacionado a melhor distribuição do campo elétrico no meio. Quanto melhor a distribuição do campo elétrico, maior a quantidade de energia absorvida e transformada em calor. Dessa forma, a distribuição e as propriedades do material devem ser estudadas para o projeto da cavidade ressonante a fim de se maximizar a eficiência do processo.

O controle de temperatura também é importante no processo de utilização de micro-ondas. No trabalho de Petri *et al.* (2017), foi demonstrado que a tecnologia de micro-ondas possui potencial para ser aplicada na descontaminação de cascalhos contaminados com hidrocarbonetos provenientes da perfuração de poços de petróleo. Neste caso, foi avaliada a importância do sistema de controle de temperatura para manter esta variável em níveis adequados para a descontaminação. O tipo de controle utilizado foi o *on/off*, com o acionamento e desligamento dos magnetrons emissores de micro-ondas. Em Petri *et al.* (2015), a influência da temperatura também foi verificada na remediação de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica. Para dois fluidos com bases orgânicas distintas, um com n-parafina e outro com olefina interna, a energia gasta por quantidade de massa de cascalho contaminado foi similar, porém a temperatura de operação foi diferente.

A influência de outros processos ocorrendo concomitantemente com a aplicação de micro-ondas, tais como a agitação mecânica ou o arraste por vapor de água, também podem ajudar no processo de descontaminação, facilitando a saída dos vapores orgânicos do leito e melhorando a eficiência (ROSSI *et al.*, 2017).

Robinson *et al.* (2008[b]) realizaram testes de descontaminação de cascalhos proveniente da perfuração de poços de petróleo com uma unidade de micro-ondas do tipo *single-mode*. O processo de descontaminação foi em batelada com leito fixo, assistido pelo uso de uma corrente de vapor de água superaquecido misturado com nitrogênio para a realização de *stripping* dos componentes orgânicos. Foi observada uma redução de 95% nos níveis de contaminantes orgânicos quando utilizado o *stripping* juntamente com a radiação de micro-ondas, além da diminuição do tempo necessário para o processo. Uma observação importante dos autores foi que a profundidade de penetração das micro-ondas é um fator desafiador no *scale-up* de equipamentos do tipo, já que a quantidade de material processado deve ter uma

profundidade máxima de forma a garantir a absorção das micro-ondas e a geração de calor necessária para o processo de descontaminação.

No trabalho de Rossi *et al.* (2016), foram realizados ensaios com um forno micro-ondas em batelada no tratamento de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica. Foi observado que a presença da água líquida é um fator relevante para o arraste da fase orgânica. Também foi feito o ajuste de modelos de secagem e simulações para a descrição das características do processo, tais como a distribuição do campo eletromagnético na cavidade, temperatura e densidade de potência, sendo estes fatores de grande relevância no projeto deste tipo de equipamento.

Utilizando uma unidade de bancada em batelada, Petri *et al.* (2015) mostrou que a eficiência de remoção dos compostos de base orgânica aumentou em 17% com a utilização de micro-ondas em conjunto com a agitação do leito no tratamento de cascalhos contaminados com fluido de perfuração. Também foi observada a variação dos teores residuais de orgânicos em função da posição para o processo de secagem em leito fixo, sendo estas diferenças resultantes da não homogeneidade do campo eletromagnético gerado pelas micro-ondas na cavidade do forno. Assim, o uso das micro-ondas em conjunto com a agitação apresentou a vantagem de homogeneizar a temperatura do leito durante a secagem, diminuindo a influência dos *hotspots*, o que aumentou a eficiência energética.

A aplicação de secagem via micro-ondas em modo contínuo também apresentou benefícios em relação a eficiência energética, como estudado por Robinson *et al.* (2009) para a remediação de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica. O equipamento era composto por uma esteira que transportava o cascalho contaminado através de uma cavidade multimodo onde as micro-ondas incidiam sobre o leito. Para um nível de contaminação inicial de 7%, foram atingidos níveis residuais de orgânicos menores que 1% com um gasto energético de 100kWh por tonelada de material contaminado. Neste trabalho também foi analisada a composição da fase gasosa resultante da secagem por cromatografia gasosa, sendo verificado poucas mudanças na composição inicial dos compostos orgânicos vaporizados provenientes do fluido de perfuração.

No trabalho de Petri *et al.* 2019, foi utilizada uma unidade de tratamento micro-ondas em modo contínuo com capacidade de processar até 750 kg/h de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica. Os testes mostraram uma alta eficiência de secagem, tanto do ponto de vista energético quanto de descontaminação. Os níveis residuais de orgânicos foram inferiores a 0,1% para o ensaio com menor vazão, de 250 kg/h, e menor nível inicial de

contaminação, de 7,5% de orgânicos, para uma energia específica de 0,279 kWh/kg. Em temperaturas superiores a 197°C, foi verificada a modificação química dos compostos orgânicos provenientes do fluido de perfuração recuperados na corrente de condensado dos vapores.

Apesar das aplicações das micro-ondas em equipamentos industriais se mostrarem promissoras, há desafios técnicos para o projeto destes equipamentos. É necessário o conhecimento detalhado da propagação da radiação micro-ondas na cavidade do equipamento antes que qualquer processo possa ser desenvolvido para a escala piloto ou industrial (JONES *et al.*, 2002).

Segundo Falciglia *et al.* (2018), mesmo com características de ser uma tecnologia ambientalmente promissora e capaz de atingir altos níveis de descontaminação de resíduos, o crescimento da utilização das micro-ondas em aplicações industriais ainda é limitado pela falta de informações necessárias para o projeto de equipamentos do tipo. A literatura ainda se baseia em experimentos em escala de laboratório e a extensão para aplicação em larga escala ainda esbarra em diversos problemas técnicos. Sendo assim, a caracterização de materiais, *scale-up*, unidades piloto, modelagem, projeto e estudos demonstrativos ainda são desejados para cobrir a lacuna existente entre a literatura e as aplicações industriais. A multidisciplinaridade envolvida no desenvolvimento tecnológico também é um fator chave para superar a complexidade dos projetos para utilização industrial das micro-ondas.

Além da influência das características construtivas dos equipamentos, a secagem via micro-ondas também é dependente das propriedades físicas dos materiais envolvidos no processo de aquecimento, que muitas vezes são misturas de diferentes compostos químicos. Isso dificulta a obtenção de dados adequados para projetos e simulações relacionados ao desenvolvimento de fornos micro-ondas (ROSSI *et al.*, 2017).

Características estruturais de fornos micro-ondas são importantes na dinâmica de secagem, pois influenciam diretamente a distribuição do campo eletromagnético na cavidade e, consequentemente, a distribuição de temperaturas do material sendo processado (SANTOS *et al.*, 2018).

Santos *et al.* (2018) realizaram um estudo sobre a distribuição do campo eletromagnético num forno micro-ondas por meio de simulação computacional. A unidade experimental para a qual as simulações foram realizadas consistia num forno em batelada com 6 kits de emissão de micro-ondas e um total de 6kW de potência, 1kw por kit. Foi observada a mudança do perfil de distribuição do campo eletromagnético na simulação a partir das

diferentes variações adotadas para a combinação de acionamento dos kits. Esta análise corroborou com as observações experimentais da distribuição de temperatura no leito, resultando em níveis residuais de orgânicos do cascalho que variaram em função de sua posição no leito e de acordo com a configuração utilizada para o acionamento dos kits de emissão de micro-ondas.

Robinson *et al.* (2010) realizaram um estudo sobre o projeto e *scale-up* de um secador de micro-ondas para ser utilizado na descontaminação de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica. Os dados experimentais obtidos foram confrontados com os das simulações eletromagnéticas para a avaliação da modelagem realizada. Os resultados demonstraram uma grande influência da geometria da cavidade na distribuição das micro-ondas, assim como a influência das propriedades dielétricas do material, fatores cruciais para a otimização do equipamento, localização dos *hotspots* e segurança do processo em razão da fuga de micro-ondas para o meio externo.

Como já mencionado por Petri *et al.* (2015), a agitação do leito pode ser utilizada com a finalidade de se contornar limitações relacionadas a distribuição de calor causada pela não uniformidade do campo eletromagnético na aplicação das micro-ondas. Esta estratégia também facilita a saída dos vapores do leito e aumenta a eficiência da secagem.

O *Microwave Paddle Dryer* promove uma mistura intensa do material no leito e a capacidade de lidar com as diversas características que o cascalho contaminado pode apresentar de acordo com o tipo de solo perfurado, broca utilizada e profundidade do poço. Além disso, é um equipamento que apresenta as vantagens de ser compacto e utilizar somente as micro-ondas para promover a secagem, dispensando a necessidade do emprego de etapas adicionais.

O desenvolvimento do *Microwave Paddle Dryer* e a avaliação de seus parâmetros operacionais é um projeto multidisciplinar, sendo que este trabalho abordou a secagem via micro-ondas em modo batelada, além de aspectos de controle e segurança do processo. Também foi avaliada a dinâmica de partículas de areia no leito em modo contínuo e sem a aplicação de secagem, já que o conhecimento do escoamento neste equipamento é de suma importância para possíveis modificações para o modo contínuo de secagem.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A seção de Material e Métodos está dividida em duas partes.

A primeira parte é a seção “3.1. Material e métodos dos ensaios de secagem em modo batelada”. Nesta seção são descritos os materiais e os métodos relacionados aos ensaios de remediação dos cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica utilizando radiação de micro-ondas com o *Microwave Paddle Dryer* em modo batelada. A ilustração do processo de secagem via micro-ondas com o equipamento operando em modo batelada é apresentada na Figura 3.1. O equipamento possui 8 kits emissores de micro-ondas, cada um com 1000 watts de potência.

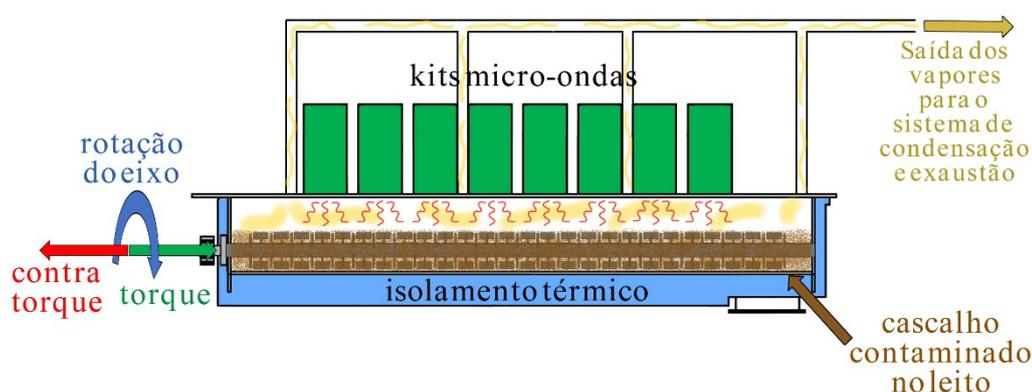


Figura 3.1: Processo de secagem do cascalho contaminado no *Microwave Paddle Dryer*.

A segunda parte é a seção “3.2. Material e métodos dos ensaios da dinâmica das partículas no leito”. Nesta seção são apresentados os materiais e métodos utilizados para o estudo da dinâmica de escoamento das partículas no leito do *Microwave Paddle Dryer*. Estes ensaios foram realizados nos modos contínuo e batelada, sem aplicação das micro-ondas, utilizando areia como material particulado e com equipamento sem a tampa superior, de forma que o leito pudesse ser filmado para a realização de análises de imagem. Na Figura 3.2 está ilustrado o equipamento operando no modo batelada e na Figura 3.3 em modo contínuo.

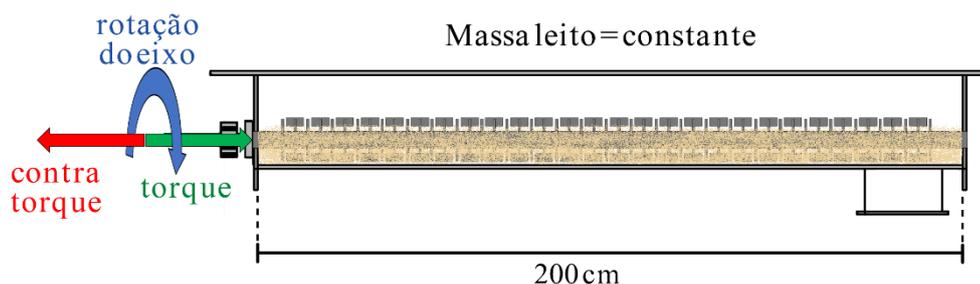


Figura 3.2: Ilustração do *Microwave Paddle Dryer* operando em modo batelada para os ensaios de dinâmica de escoamento das partículas no leito.

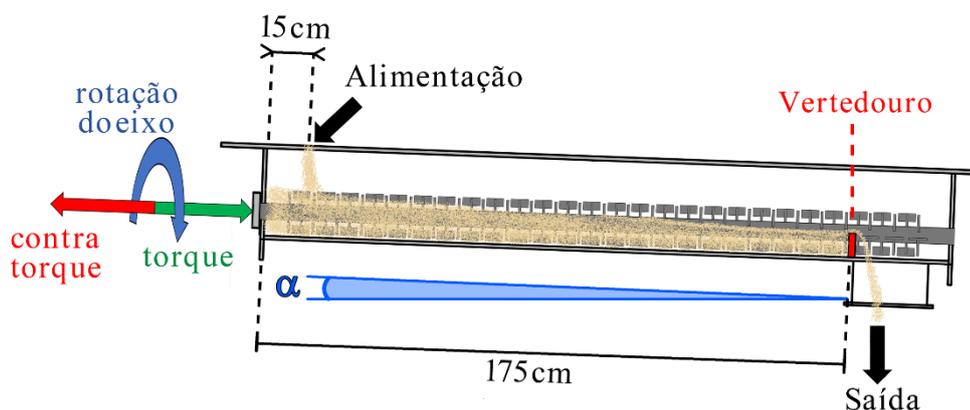


Figura 3.3: Ilustração do *Microwave Paddle Dryer* operando em modo contínuo para os ensaios de dinâmica de escoamento das partículas no leito.

3.1. Material e métodos dos ensaios de secagem em modo batelada

A seguir são descritos os materiais e métodos utilizados nos ensaios de descontaminação de cascalhos por secagem via micro-ondas e as características construtivas do *Microwave Paddle Dryer*.

3.1.1. Material e caracterização

Os materiais utilizados para os ensaios de secagem em modo batelada foram fornecidos pela Petrobrás, empresa que financiou este projeto de pesquisa.

3.1.1.1. Cascalho

Para os testes de remediação do cascalho via secagem micro-ondas, foi utilizado cascalho de reservatório proveniente de formação rochosa carbonática. A perfuração foi realizada com fluido de perfuração base água polimérico composto por goma xantana e amido modificado.

A granulometria do cascalho foi medida através de difração de raios laser utilizando o equipamento *Malvern Master Sizer 2000*. A distribuição granulométrica acumulativa foi ajustada por meio de regressão não-linear ao modelo de distribuição *Rosin-Rammler-Bennet* (RRB) mostrado na Equação 3.1, sendo os parâmetros $d_{63,2} = 36,41\mu m$ e $n = 0,9112$, o coeficiente de determinação foi de $R^2=0,998$.

$$X = 1 - \exp\left[-\left(d_p/d_{63,2}\right)^n\right] \quad (3.1)$$

Sendo X a distribuição cumulativa, variando entre zero e 1, e d_p o diâmetro característico em μm .

A composição química do cascalho foi medida por fluorescência de raios-X e é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição química do cascalho de rocha carbonática medida por difração de raios-X.

Elemento	CaO	SiO ₂	MgO	BaO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SrO	K ₂ O	Outros
%	65,41	12,65	6,65	6,15	1,84	1,79	1,50	1,37	1,15	0,66	0,52	0,31

A densidade real do cascalho foi medida através de picnometria por gás hélio, com o equipamento *AccuPyc 1331* da *Micromeritics*, sendo de $2,709g/cm^3$.

3.1.1.2. Fluido de perfuração de base orgânica

O fluido de perfuração à base de olefina interna teve suas frações orgânica e de água determinada através do método da retorta realizada em duplicata. A composição do fluido era de $29,64\% \pm 0,53$ de fase orgânica, $39,58 \pm 0,47\%$ de água, sendo o restante de sólidos.

A composição da fase orgânica do fluido de perfuração foi determinada por meio cromatografia gasosa com espectrômetro de massa da *Shimadzu* modelo GC-MS QP2010 plus com a coluna *Rxi-1ms* de 30m. Para isso, uma amostra do fluido de perfuração foi mantida na estufa a $80^\circ C$ por 24 horas para acelerar a decantação das gotículas de água da fase dispersa, sendo coletada uma alíquota da fase contínua orgânica com o auxílio de uma pipeta. A composição da fase orgânica foi de 55,1% de hexadeceno (C_{16}) e 44,9% de octadeceno (C_{18}). O mesmo procedimento foi realizado para as análises da fase orgânica do condensado dos vapores obtidos na operação de secagem.

3.1.1.2. *Propriedades dielétricas*

As propriedades dielétricas do cascalho seco, do fluido de perfuração e do cascalho contaminado com 8,4% de orgânicos (olefina) e 11% de água em base mássica úmida, foram medidas utilizando o equipamento N1501A *High Performance* com o analisador *Fieldfox Keysight* N9913A e são apresentadas na Tabela 3.2. As medidas das propriedades dielétricas foram feitas para o valor de 2,45 GHz, mesma frequência da radiação micro-ondas utilizada no *Microwave Paddle Dryer*.

Tabela 3.2: Propriedades dielétricas do cascalho seco, cascalho contaminado e do fluido de perfuração

Propriedades dielétricas	Cascalho seco	Fluido de perfuração	Cascalho contaminado
ϵ'	3,74	10,16	19,30
ϵ''	0,269	2,014	8,685
$tag\delta$	0,072	0,198	0,45

3.1.2. Unidade experimental *Microwave Paddle Dryer*

O *Microwave Paddle Dryer* possuía dois eixos de agitação com pás de mistura e usava radiação de micro-ondas para o processo de secagem do material no leite. A unidade experimental é mostrada de forma esquemática na Figura 3.4 e a numeração corresponde a:

1. Oito kits emissores de micro-ondas.
2. Motorreductor do sistema de agitação do leite.
3. Sistema de injeção de inerte (N_2) com 3 pontos de injeção na cavidade.
4. Recipientes de coleta dos vapores condensados no casco: oito no total.
5. Condensador casco tubo dos vapores succionados da cavidade pelo exaustor.
6. Bomba de recirculação da água de resfriamento do condensador casco-tubo.
7. Tanque de coleta de condensado do condensador casco-tubo.
8. Tanque de água de resfriamento do condensador casco tubo.
9. Exaustor do sistema de sucção dos vapores gerados na secagem.
10. Ar-condicionado para a refrigeração da água de resfriamento do condensador casco-tubo. A evaporadora ficava dentro do tanque de água de resfriamento.
11. Termopares do tipo K para a medição das temperaturas do leite e do vapor.
12. Sensor para a medida da pressão na cavidade.

13. Saída dos vapores não condensados para fora do laboratório.

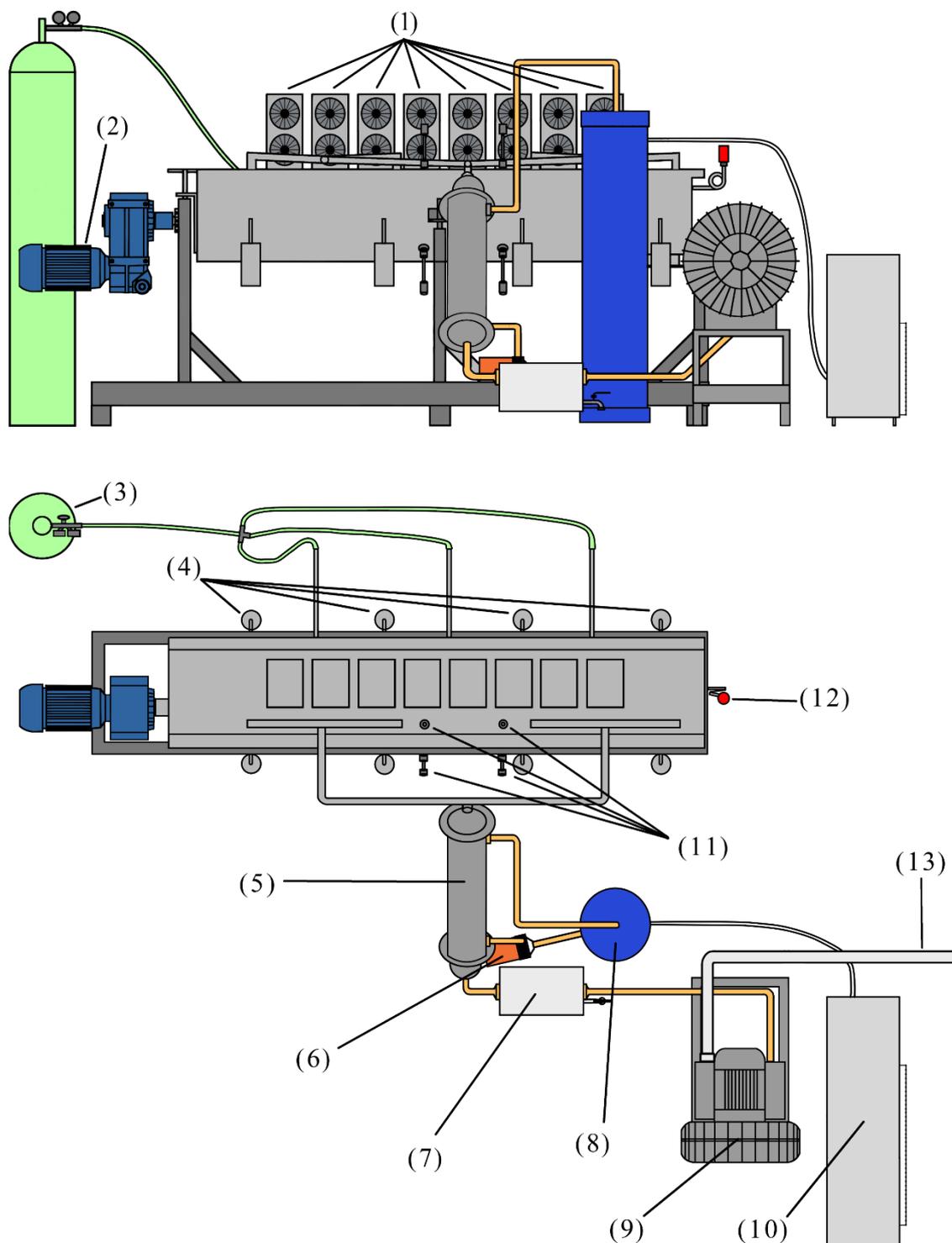


Figura 3.4: Unidade experimental *Microwave Paddle Dryer* e seus principais componentes.

3.1.2.1. Cavidade do *Microwave Paddle Dryer*

A cavidade do *Microwave Paddle Dryer* possuía 2 metros de comprimento por 25 cm de largura e 25 cm de profundidade. Tinha dois eixos de agitação operando em contra rotação, com 27 pares de pás num eixo e 26 pares no outro.

Uma foto do interior do leito do equipamento vazio é mostrada na Figura 3.5, já na Figura 3.6 são mostrados as dimensões das pás de mistura do eixo de agitação.



Figura 3.5: Sistema de agitação do *Microwave Paddle Dryer*.

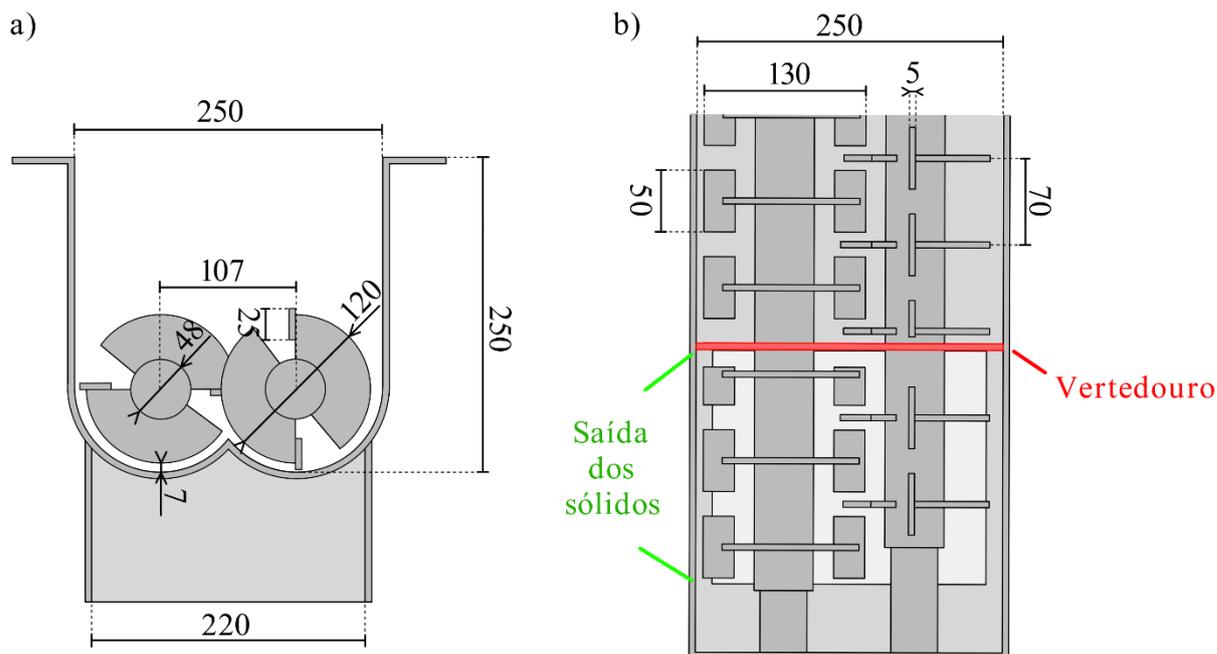


Figura 3.6: Medidas em milímetros dos eixos e pás de agitação nas vistas a) radial e b) superior.

As micro-ondas geradas por cada kit emissor eram direcionadas para o interior da cavidade por meio de suas respectivas guias de ondas

Entre as guias de onda e a cavidade havia placas de quartzo, material transparente as micro-ondas que permitia a passagem da radiação e protegia a antena do magnetron do contato com os vapores e particulados em suspensão gerados durante a operação. Na Figura 3.7 é mostrada a tampa do *Microwave Paddle Dryer* com a indicação das placas de quartzo, estas, por sua vez, mostradas na Figura 3.8.

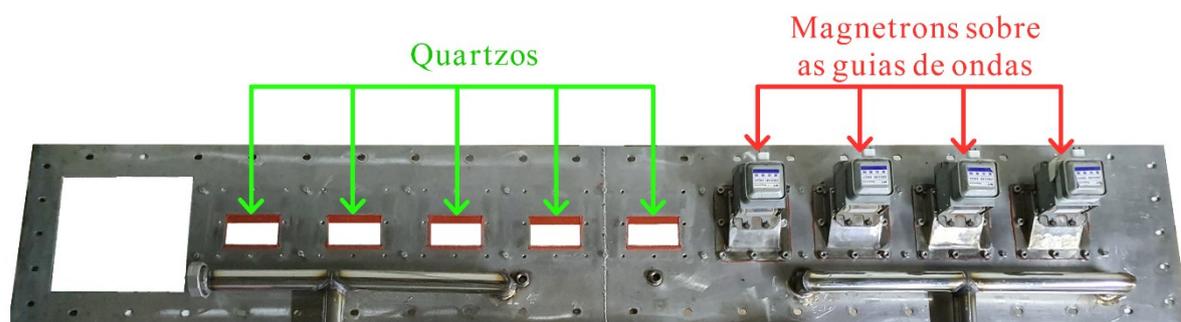


Figura 3.7: Tampa superior do *Microwave Paddle Dryer* em processo de montagem.

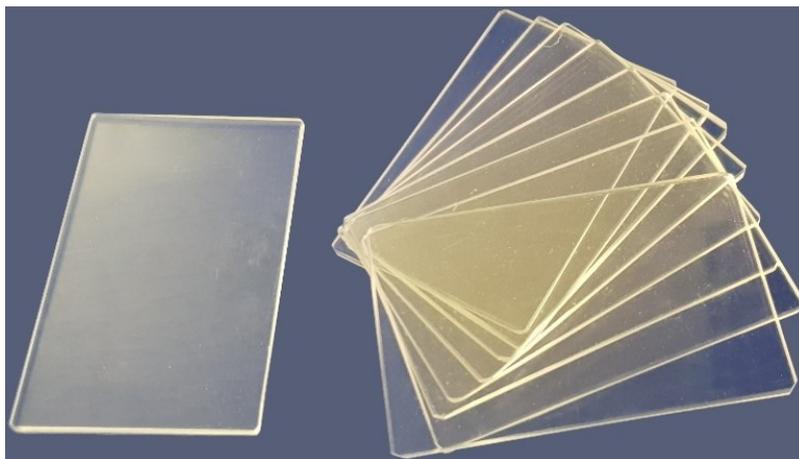


Figura 3.8: Placas de quartzo instaladas entre as guias de onda e a cavidade do *Microwave Paddle Dryer* para a proteção das antenas dos magnetrons.

Nos primeiros ensaios de secagem do *Microwave Paddle Dryer* para a descontaminação de cascalhos com fluido de perfuração de base orgânica, foi observado que parte dos vapores gerados condensava no casco do equipamento. Na Figura 3.9 é mostrada uma foto do interior do equipamento após um ensaio de secagem e a ilustração do fenômeno.

Durante o processo de secagem, as micro-ondas aqueciam diretamente o material no leito, que era absorvedor, até que fosse atingida a temperatura de ebulição dos compostos do fluido de perfuração, ao passo que o casco apresentava uma temperatura mais baixa, por ser de metal e refletor de micro-ondas. Desta forma, os vapores orgânicos saturados entravam em contato com o casco e perdiam energia térmica na forma de calor latente de condensação. Isto causava o retorno ao leito destes compostos na fase líquida, reduzindo a eficiência de secagem, sendo este fenômeno mais intenso nas extremidades do equipamento, regiões com menor incidência das micro-ondas.

Para contornar este problema, foi instalada uma calha interna no casco do *Microwave Paddle Dryer*, em todo o perímetro do leito, com o objetivo de direcionar o condensado para os dutos de saída conectados à 8 recipientes de coleta. A foto da calha interna e de um dos recipientes de coleta de condensado são mostrados na Figura 3.10.

A presença da calha interna alterava a distribuição do campo eletromagnético gerado pelas micro-ondas na cavidade, e não foi prevista no projeto original do equipamento, sendo o objetivo de sua instalação minimizar o retorno do condensado ao leito. Este fenômeno também foi observado em outras pesquisas de remediação de cascalhos via micro-ondas (SANTOS *et al.*, 2018, PETRI *et al.*, 2019).

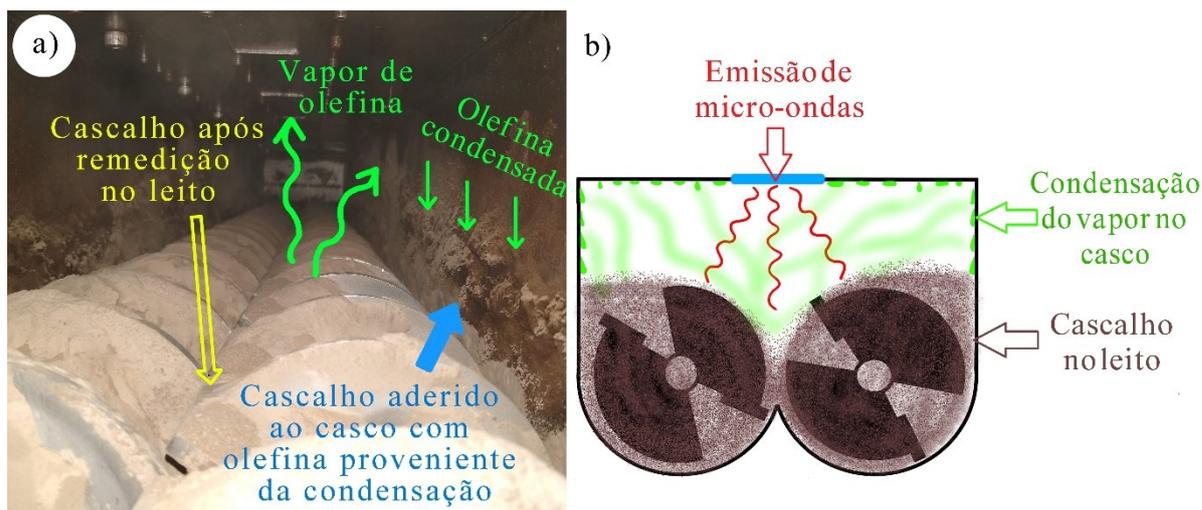


Figura 3.9: Condensação no a) interior da cavidade do *Microwave Paddle Dryer* após um ensaio de secagem e b) ilustração do fenômeno de condensação.

O sistema de sucção de vapores do projeto inicial também foi modificado, já que se mostrou insuficiente para a sucção de vapores quando era atingido o ponto de ebulição dos compostos do fluido de perfuração. A modificação consistiu na instalação de mais um ponto de sucção e na alteração dos dutos de sucção, que foram instalados em declive na direção do deslocamento dos vapores, evitando o retorno do condensado ao leito. Também foram realizadas melhorias no isolamento térmico do casco do equipamento, principalmente nas extremidades, locais em que a condensação dos vapores no casco era mais significativa.

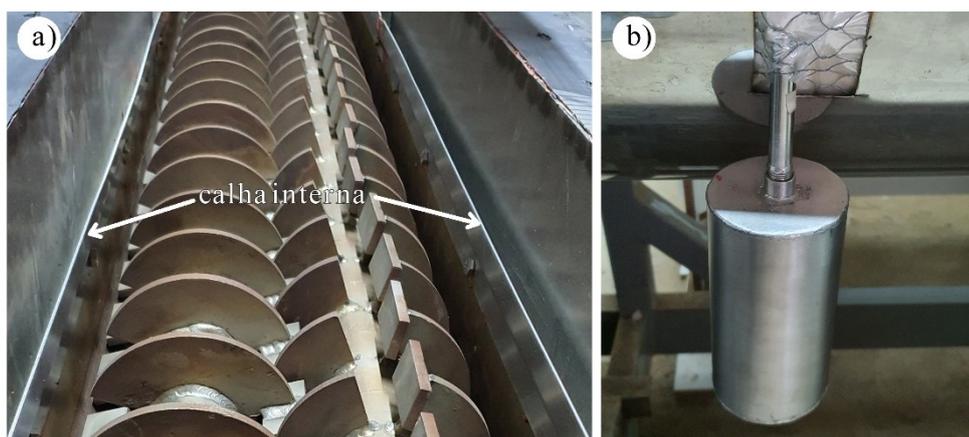


Figura 3.10: Sistema de coleta dos condensados no casco composto por a) calhas internas e b) recipientes de coleta de condensado.

3.1.2.2. Sistemas de geração das micro-ondas, agitação do leito, sucção dos vapores e injeção de nitrogênio.

A potência total de emissão de micro-ondas da unidade experimental era de 8000 W na frequência de 2,45 GHz. Eram 8 kits de emissão de micro-ondas, cada um com 1000W de potência e composto por magnetron, trafo, fonte e diodo. O consumo de energia dos kits micro-ondas foi medido pelo contador de energia da fabricante *HIKING* modelo DTS 238.

A agitação do leito era promovida por um motorreductor modelo WEG-Cestari Vertimax WCG20 acoplado ao eixo de agitação. As características nominais do motor elétrico trifásico eram de 4 cv(3kW) de potência e rotação de 1750 rpm. O redutor era do tipo de engrenagens helicoidais com redução de 45,02 vezes. Para a velocidade nominal do motor de 1750 rpm, a rotação de saída do motorreductor era de 38,87 rpm e o torque de 737 Nm. Para o controle de rotação do eixo de agitação, foi utilizado um inversor de frequência modelo WEG CFW700 para alimentar o motor elétrico.

A sucção dos vapores na cavidade foi realizada por um soprador da fabricante WEG, com motor de 7,5cv (5,5kW) alimentado por um inversor de frequência modelo WEG CFW500, para o controle da velocidade de rotação. A condensação dos vapores era realizada pelo trocador de calor do tipo casco-tubo e o condensado era armazenado no tanque de condensado. Os vapores não condensados e o ar que entrava na cavidade do equipamento eram direcionados para fora do laboratório.

O trocador de calor do condensador casco tubo utilizava água como fluido de refrigeração, mantida a 17°C por um ar-condicionado com potência de 22 mil btus. A água de refrigeração passava pelo casco do trocador de calor e retornava ao tanque de armazenamento onde estava a evaporadora do ar-condicionado, sendo sua circulação realizada por uma bomba de ½ cv.

O uso de inerte foi implementado após incidentes de combustão dos vapores orgânicos na cavidade da unidade experimental. A velocidade de injeção do inerte era lida em um anemômetro de fio quente da fabricante TSI modelo *VelociCalc Plus*, permitindo o cálculo da vazão que era regulada manualmente em uma válvula reguladora de pressão.

3.1.2.3. Sistema de controle e aquisição de dados

O sistema de controle de temperatura e aquisição de dados foi implementado no *software Labview 2017*, instalado no computador *desktop* da unidade experimental. Todos os

sensores foram ligados à placa de aquisição de dados modelo USB 6216 da fabricante *National Instruments*, que enviava o sinal diretamente para o software *LabView 2017* via comunicação serial.

A temperatura foi medida em dois pontos no leito e dois pontos no espaço da fase vapor utilizando termopares do tipo K ligados amplificadores da fabricante Novus modelo TxIsoRail, com sinal de saída de 0 a 10V. A temperatura controlada era a do leito, medida pelo termopar que estava instalado no ponto intermediário do casco do *Microwave Paddle Dryer*. O tipo de controle utilizado foi o *on-off*, atuando na alimentação de energia dos kits de emissão de micro-ondas por meio de relés de acionamento. O acionamento e desligamento dos kits para o controle de temperatura era realizado de forma sequencial, a cada 2 segundos, para evitar picos de consumo de corrente na rede elétrica.

A pressão da cavidade foi medida por um sensor de pressão analógico da fabricante *Huba Control* modelo 5436 com sinal de saída de 4 a 20mA com um resistor de 250Ω em série para a leitura do sinal na escala de 1 a 5V.

A aquisição da corrente consumida pelos kits micro-ondas foi feita por um sensor de corrente modelo SCT-013 com sinal de saída de 0 a 50mA com um resistor de 100Ω em série para a leitura do sinal de 0 a 5V.

Também foram coletados dados do inversor de frequência CFW700 que alimentava o motor do sistema de agitação via comunicação serial com o *LabView 2017*. A conversão do sinal de transmissão de RS485 para USB foi realizada por um conversor USB/RS485. Os dados lidos foram: tensão de alimentação do motor, corrente alimentada ao motor, fator de potência, número de rotações por minuto e torque consumido pelo motor. A potência total consumida pelo motor foi calculada com a Equação 3.2.

$$P_{Total} = U_s I_s (\cos\theta_s) \sqrt{3} \quad (3.2)$$

Em que P_{Total} , U_s , I_s e $\cos\theta_s$ são a potência consumida em *Watts*, a tensão em *volts*, a corrente elétrica em *amperes* e o fator de potência, respectivamente, na saída de alimentação do inversor para o motor.

O valor do torque era fornecido pelo inversor de frequência em porcentagem de torque total consumido pelo motor e era calculado em função da componente de corrente de alimentação fornecida pelo inversor de frequência que produz o torque, de acordo com a Equação 3.3 (WEG, 2020).

$$T(\%) = 100 \frac{I_T}{I_{T-nom}} Y \quad (3.3)$$

Sendo $T(\%)$ o torque consumido pelo motor em porcentagem em relação ao torque nominal, I_T a corrente de torque do motor em *amperes*, I_{T-nom} a corrente de torque nominal em *amperes* e Y um parâmetro adimensional que é função da velocidade real e da velocidade síncrona do motor.

Os valores para a potência e o torque úteis no eixo de agitação não foram obtidos pois dependem do rendimento do motor que varia com a velocidade de rotação e a resistência imposta ao movimento do eixo de agitação (WEG[b], 2021).

A interface do sistema de controle e aquisição de dados é mostrada na Figura 3.11. Pela interface do sistema era possível variar a taxa de aquisição de dados, acionar os kits emissores de micro-ondas individualmente, selecionar o *set-point* de controle de temperatura e sua faixa de tolerância, alterar a velocidade de rotação do motor e fazer a leitura dos dados para: a temperatura do leito e da fase vapor, a pressão na cavidade, a corrente consumida pelos kits micro-ondas e os valores de potência e torque consumidos pelo motor.

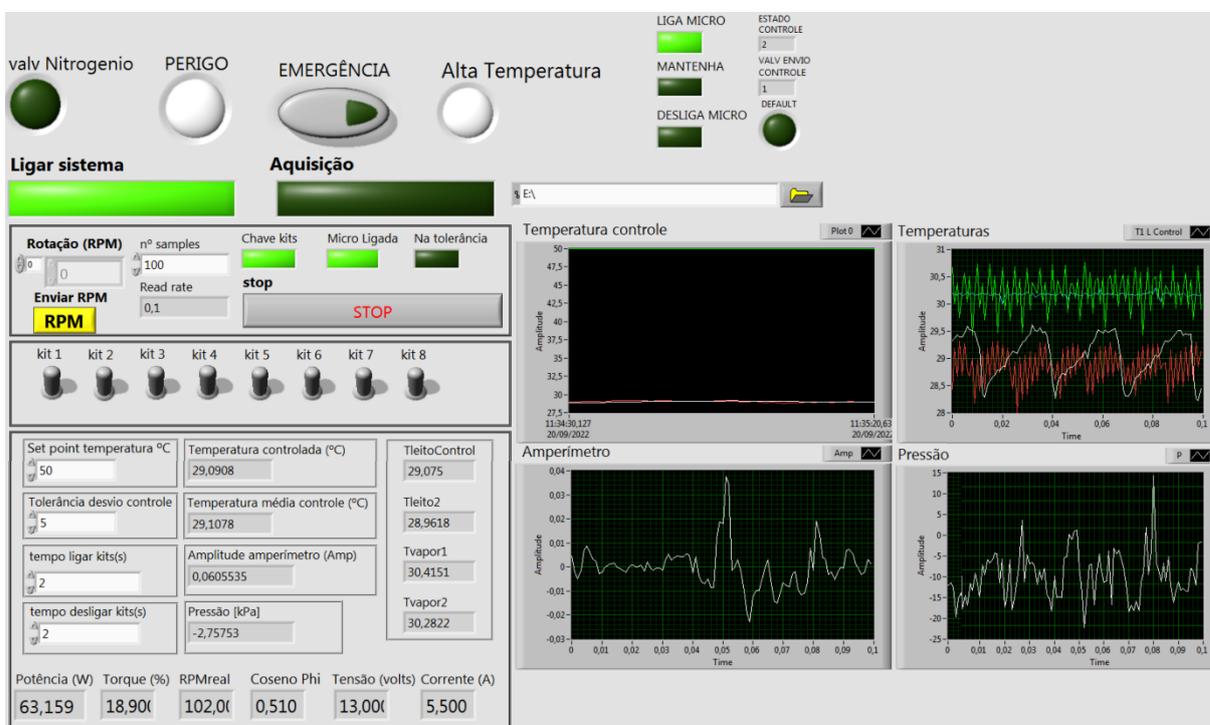


Figura 3.11: Interface do sistema de controle e aquisição de dados do *Microwave Paddle Dryer*.

3.1.3. Metodologia dos ensaios de secagem no modo batelada.

Nesta seção são descritos os experimentos e a metodologia para a execução dos ensaios de secagem via micro-ondas em batelada para a descontaminação dos cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica.

3.1.3.1. Energia específica

A energia elétrica consumida pelos kits micro-ondas foi medida pelo contador de energia *HIKING* DTS-238. Esta medida foi utilizada para o cálculo da energia específica, definida como a quantidade de energia utilizada para o tratamento de determinada massa de cascalho contaminado, calculada através da Equação 3.4.

$$E.E. = \frac{E_{kits}}{m_{cascalho}} \quad (3.4)$$

Em que *E.E.* é a energia específica em *kWh/kg*, E_{kits} é a energia consumida pelos kits de micro-ondas em *kWh* e $m_{cascalho}$ é a massa de cascalho contaminado no leito no início do ensaio em *kg*.

3.1.3.1. Teores de orgânicos e água

Os teores iniciais e residuais dos compostos orgânicos e da água no cascalho contaminado foram calculados com a Equação 3.5 e a Equação 3.6, respectivamente. Os valores da massa de orgânicos e de água foram obtidos por meio do método da retorta utilizando um kit modelo *Oil & Water Retort 50ml Fann kit*.

$$U_{org}(\%) = \frac{m_{orgânicos}}{m_{amostra}} \quad (3.5)$$

$$U_{água}(\%) = 100 \frac{m_{água}}{m_{amostra}} \quad (3.6)$$

Sendo $m_{água}$ a massa de água, $m_{orgânicos}$ a massa dos compostos orgânicos e $m_{amostra}$ a massa da amostra de cascalho contaminado.

3.1.3.1. Ensaio de descontaminação de cascalhos

Foram executados 5 experimentos de secagem de cascalhos contaminados com fluido de perfuração, sendo avaliada a variável independente velocidade de rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), além de aspectos relacionados ao controle, à segurança operacional, a análise de risco e a dinâmica do processo de secagem.

A massa de cascalho contaminado foi de 71 kg em todos os experimentos, preparada individualmente para cada ensaio com o auxílio de uma betoneira de 400l de capacidade, sendo o teor inicial de fluido de perfuração no cascalho calculado para 8,4% de orgânicos e 11% de água, ambos em base mássica úmida, para todos os ensaios.

Os experimentos realizados e as condições operacionais são apresentados na Tabela 3.3 e foram realizados na sequência cronológica em relação ao número do experimento, sendo n_{rpm} a rotação do eixo de agitação em rpm, $E.E.$ a energia específica aplicada, U_{org-i} o teor inicial de orgânicos, $U_{água-i}$ o teor inicial de água e V_{N_2} (l/s) a vazão de inerte injetado na cavidade. A injeção de inerte foi adotada após um incêndio na cavidade.

Tabela 3.3: Experimentos de descontaminação de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica

Exp.	n_{rpm} (rpm)	$E.E.$ (kwh/kg)	U_{org-i} (%)	V_{N_2} (l/s)
			$U_{água-i}$ (%)	
1	20	0,296	8,41±0,05	Não
			10,4±0,68	
2	20	0,361	8,47±0,06	33,8
			11,20±0,09	
3	20	0,352	8,39±0,15	57,4
			10,78±0,03	
4	5	0,352	8,30±0,08	57,0
			10,50±0,05	
5	35	0,352	8,31±0,07	57,5
			10,75±0,17	

Os experimentos 1 e 2 abordaram a análise de risco operacional do equipamento.

Os experimentos 3, 4 e 5 avaliaram a influência da variável independente velocidade de rotação do eixo de agitação nos valores de 20, 5 e 35 rotações por minuto, respectivamente. As

variáveis resposta avaliadas foram: o teor residual médio de orgânicos no cascalho ($\bar{U}_{org-res}$) e o teor residual médio de água no cascalho ($\bar{U}_{água-res}$). O valor da rotação do exaustor de vapores foi o mesmo para todos os experimentos.

3.1.3.2. Metodologia experimental dos ensaios de secagem

Os ensaios foram realizados de acordo com a seguinte sequência:

1. Alimentação do *Microwave Paddle Dryer*: a mistura era alimentada no equipamento sem o tampo superior, que era apoiado sobre cavaletes ao lado do equipamento. O motor do sistema de agitação era acionado e o cascalho contaminado adicionado ao longo do leito e mantido sob agitação para homogeneizar sua distribuição. Após isso, o tampo superior era colocado e preso por parafusos.
2. Inicialização do sistema de controle e aquisição: o sistema de controle e aquisição de dados era inicializado, os disjuntores dos kits micro-ondas eram ligados e um arquivo para o armazenamento dos dados gerado.
3. Ensaio experimental: a rotação do motor era selecionada no valor desejado no inversor de frequência e o sistema de controle e aquisição de dados ligado. A coleta do líquido proveniente da condensação dos vapores era feita a cada 30 minutos no tanque de condensado até que o valor da energia específica fosse alcançado e as micro-ondas desligadas. Após isso as coletas de condensado ocorriam a cada 1h e o sistema de agitação do leito era mantido ligado até a temperatura do leito atingir cerca de 100 °C. A proporção volumétrica entre água e orgânicos das amostras eram anotadas.
4. Finalização do ensaio: ao atingir a temperatura de 100 °C no leito, o sistema de agitação era desligado e a aquisição dos dados interrompida, o equipamento permanecia em resfriamento até a coleta das amostras que era realizada no dia seguinte.
5. Coleta das amostras ao longo do leito: o tampo superior do equipamento era retirado. Em seguida, o leito era fotografado e as amostras de cascalho coletadas em cinco diferentes pontos ao longo do leito, nas posições de 20, 60, 100, 140 e 180 cm, conforme mostrado na foto da Figura 3.12.
6. Amostragem para teores médio do leito e limpeza do equipamento: o equipamento era inclinado com o auxílio de um macaco do tipo joelho, eram colocadas escoras de madeira em sua base e a tampa de saída de material na parte inferior do casco era aberta. O sistema de agitação do leito era ligado e o cascalho que se encontrava livre

no leito escoava para a seção de saída do equipamento. O cascalho que permanecia aderido ao casco e ao eixo do *Microwave Paddle Dryer* era removido manualmente com o auxílio de um martelo e um cinzel. A Figura 3.13 mostra as diferentes consistências do cascalho após um dos ensaios preliminares de secagem. O material coletado no leito era homogeneizado na betoneira e quarteado para a obtenção de uma amostra com os valores médios residuais de orgânicos e de água no leito.

7. Análises das amostras: os teores residuais de orgânicos e água das amostras eram determinados via método da retorta.

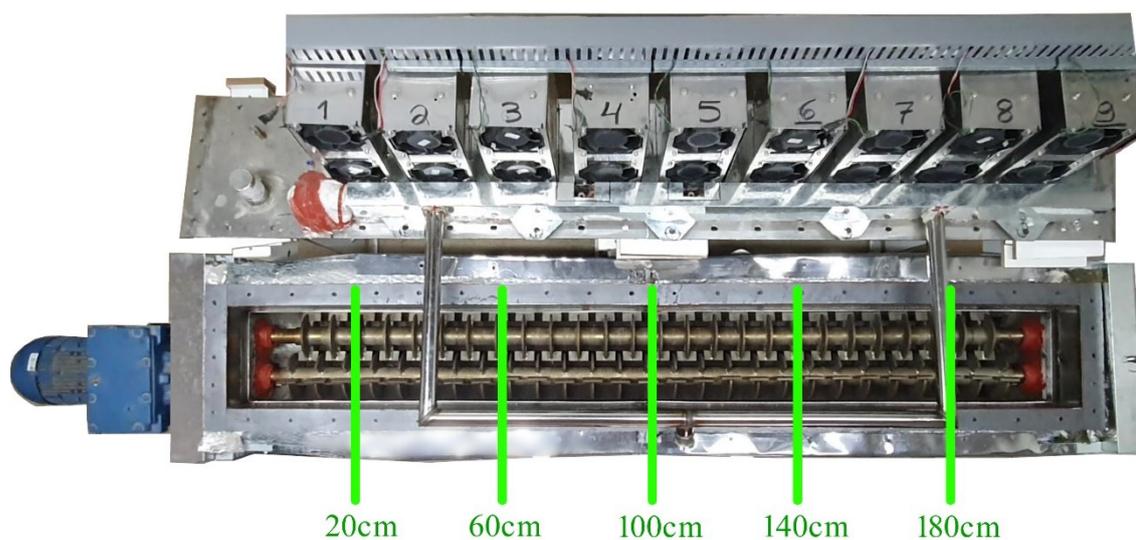


Figura 3.12: Pontos de coleta do cascalho ao longo do leito do *Microwave Paddle Dryer*.

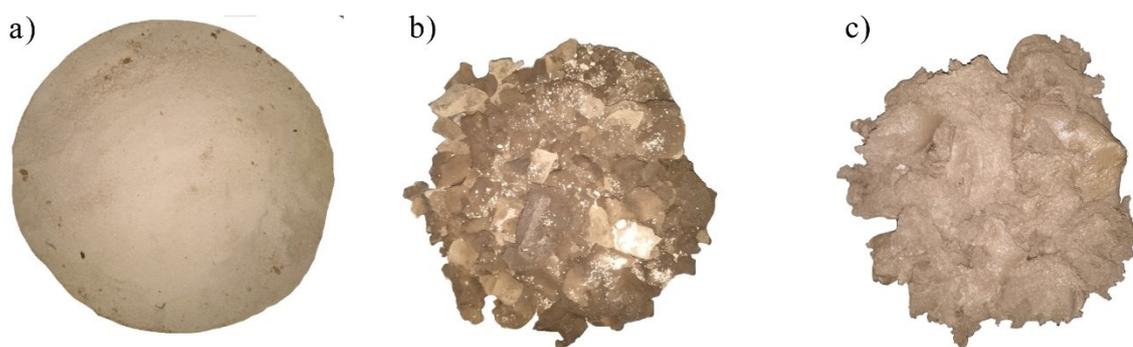


Figura 3.13: Consistência do cascalho remediado após o teste de secagem para o material a) livre no leito, b) agregado às pás do equipamento e c) nas extremidades do equipamento.

3.2. Material e métodos dos ensaios da dinâmica das partículas no leito

Os ensaios para a avaliação da dinâmica do leito foram realizados sem a aplicação de micro-ondas e com o *Microwave Paddle Dryer* aberto e sendo filmado.

O material particulado utilizado foi areia e foram realizados ensaios tanto em modo contínuo quanto em batelada. A escolha da areia foi por ser um material de fácil manuseio, atóxico e que gera uma quantidade menor de particulados suspensos se comparado ao cascalho.

3.2.1. Material utilizado nos ensaios de dinâmica de leito com areia

A análise granulométrica da areia foi realizada por peneiramento vibratório utilizando as peneiras da série *Mesh Tyler* e um vibrador de peneiras modelo *AS 330 Control* da *Retsch*. A granulometria da areia seguiu um modelo Sigmóide conforme Equação 3.7, sendo seus parâmetros $D_{50} = 0,313mm$ e $p = 3,25$.

$$X = \frac{1}{1 + \left(D_{50}/d_p\right)^p} \quad (3.7)$$

Nos ensaios foi utilizado areia comum e areia pintada de preto como agente traçador, sendo a pintura feita com tinta spray na cor preto fosco. A foto da areia comum e do traçador é mostrada na Figura 3.14.



Figura 3.14: Fotos da a) areia comum e da b) areia pintada de preto utilizadas nos ensaios de dinâmica das partículas no leito.

3.2.2. Configuração da unidade experimental e do sistema de aquisição de dados para os ensaios da dinâmica das partículas no leito

Nos ensaios de dinâmica do leito em modo contínuo, a vazão mássica de alimentação era constante e realizada manualmente, já a vazão de saída foi calculada pelo sistema de aquisição de dados por meio da medida da massa de areia em função do tempo realizada por uma balança instalada na saída de material do equipamento. Nos ensaios em modo batelada, a

saída de material do leito era fechada, não havia alimentação e a massa de areia no decorrer do experimento era constante.

A balança utilizada para as medidas de massa de areia foi do modelo UDC CO 30/5, da fabricante Urano, com capacidade máxima de carga de 30kg e 5 g de precisão. A velocidade de rotação do eixo de agitação era selecionada no inversor de frequência.

Na Figura 3.15 é mostrada a configuração da unidade experimental para os ensaios de dinâmica do leito utilizando areia no modo contínuo. As indicações correspondem a:

1. Sistema de iluminação do leito.
2. Suporte para a câmera enquadrar o leito inteiro.
3. Suporte para a câmera realizar filmagens próximas ao leito.
4. Motorreductor do sistema de agitação do leito.
5. Recipiente plástico para a coleta de areia na saída do *Microwave Paddle Dryer*.
6. Balança para a medida da massa de areia no recipiente de coleta.

Na Figura 3.16 é apresentada a interface do sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios de dinâmica do leito. Na interface era possível: fazer a leitura da massa de areia medida pela balança, da vazão mássica de saída calculada pelo sistema, da potência e do torque consumidos pelo motor, além de alterar o valor de rotação do eixo de agitação.

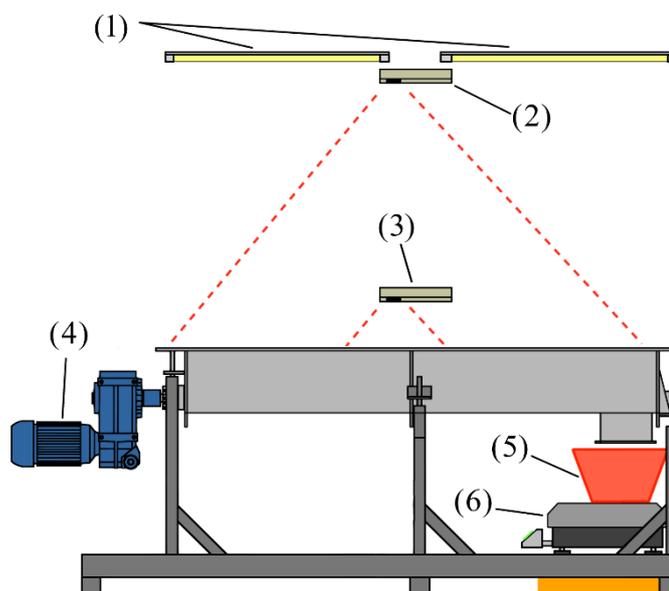


Figura 3.15: Ilustração da unidade experimental no modo contínuo para os ensaios de dinâmica do leito no *Microwave Paddle Dryer*.



Figura 3.16: Interface do sistema de monitoramento e aquisição de dados dos ensaios de dinâmica do leito utilizando areia no *Microwave Paddle Dryer*.

3.2.3. Aquisição de imagens do leito

Para a filmagem do leito, foi utilizado um celular da marca Samsung modelo *Galaxy Note 10 plus*. As filmagens podiam ser realizadas em dois pontos no leito por meio de fixação do celular em suportes, um a 1,7m de altura e outro a 25cm do equipamento. O sistema de iluminação do leito era composto por duas lâmpadas LED com 1,2 m de comprimento cada. As condições de iluminação e de filmagem foram mantidas constantes durante as gravações para garantir a qualidade dos dados obtidos. (KARALI *et al.* 2017).

As características da câmera do celular utilizada nas gravações eram: 12 megapixels, abertura focal variável de 1,5 a 2,4 e ângulo de abertura de 77°. As gravações foram realizadas em *full HD*, em 30 ou 240 quadros por segundo, dependendo da análise.

3.2.4. Análises de imagem

Os procedimentos de análise de imagem foram realizados para o estudo da dinâmica das partículas no leito, tanto na direção radial, correspondente a mistura do leito, quanto na direção axial, correspondente ao deslocamento das partículas entre as seções de alimentação e saída. Além disso, foi avaliado a distribuição do material no leito em diferentes condições de operação. Todas análises foram realizadas em condições de estado estacionário.

3.2.5. Metodologia experimental para os ensaios da dinâmica das partículas no leito em modo batelada

Nos ensaios de dinâmica do leito em modo batelada com areia, foram realizados 35 experimentos para o estudo das variáveis independentes: rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), nos valores 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 rpm, e nível de preenchimento do leito ($V_{\%}$), nos valores de 20, 40, 60, 80 e 100%. As variáveis resposta avaliadas foram: a potência (P) e o torque (T) exigidos pelo motor para a agitação do leito, a velocidade radial média (v_{rad}) e os mecanismos de transporte das partículas na direção radial. O nível de preenchimento do leito de 100% foi correspondente ao nível máximo para as pás de agitação alcançarem as partículas na superfície do leito, como indicado na ilustração do corte axial do leito em “a” na Figura 3.17. Os experimentos realizados são mostrados na Tabela 3.4.

As gravações dos vídeos do leito foram realizadas em 240 quadros por segundo no suporte a 25 cm do equipamento. O procedimento de medida do deslocamento radial (S_{rad}) das partículas no leito foi realizado com o software *Tracker Video Analysis* e é ilustrado por meio da foto da vista superior do leito em “b” na Figura 3.17. A medida foi realizada para o lado de um dos eixos de agitação em virtude da simetria do leito. O deslocamento radial das partículas (S_{rad}) em função do tempo foi utilizado para o cálculo da velocidade radial média (v_{rad}) conforme Equação 3.8, em que ΔS_{rad} é a variação da posição radial e Δt a variação de tempo correspondente.

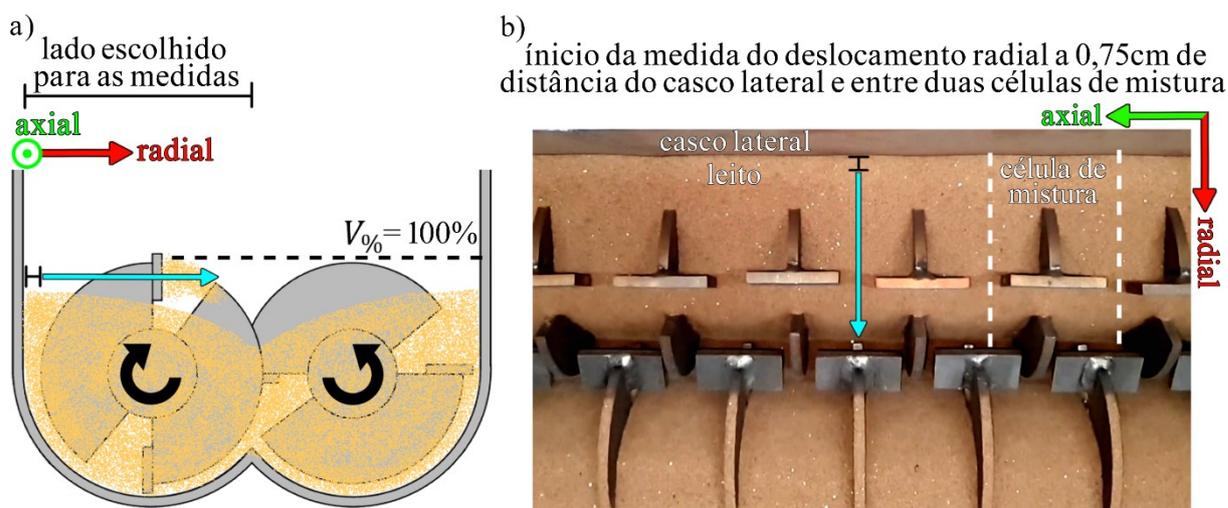


Figura 3.17: indicações do procedimento de medida do deslocamento radial das partículas em função do tempo na a) foto da vista superior e no b) corte axial do leito

Os ensaios em modo batelada utilizando areia a possibilitaram o controle do volume de areia no leito, sendo que não havia alimentação e nem saída de partículas do leito no decorrer do ensaio.

$$v_{rad} = \frac{\Delta S_{rad}}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Foi realizada a análise estatística da variável resposta velocidade radial média (v_{rad}) por meio de regressão múltipla não-linear, com parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados. O nível de significância adotado foi de 5% e a análise dos resultados foi realizada pela metodologia de superfície de resposta por meio do ajuste de um modelo de segunda ordem, conforme mostrado na Equação 3.9 (BOX *et al.*, 2005; MYERS *et al.*, 2016).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \xi_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \xi_i^2 + \sum_{i < j}^k \sum_{i < j}^k \beta_{ij} \xi_i \xi_j \quad (3.9)$$

Sendo que Y representa a variável resposta, k o número de variáveis independentes e ξ_i e ξ_j as variáveis independentes. Os coeficientes de regressão ajustados são β_0 para a interceptação e β_i , β_{ii} e β_{ij} para coeficientes lineares, quadráticos e de interação, respectivamente.

Em relação aos mecanismos de transporte, estes foram classificados de acordo com a movimentação das partículas no leito observadas nos vídeos. O movimento das partículas no leito está intrinsecamente relacionado as suas propriedades, a agitação mecânica, a geometria do equipamento e a ação de campos de força, tais como a gravidade, magnetismo e outras. No caso dos experimentos de dinâmica de leito com areia no *Microwave Paddle Dryer*, foi considerado que a convecção (Co) era o movimento resultante da ação mecânica das pás do eixo de agitação, que empurrava as partículas e o cisalhamento (Ci) a transferência de energia entre planos de partículas em diferentes velocidades (BRIDGWATER, 1976; LACEY, 2007; LEGOIX *et al.*, 2017). Já o mecanismo de avalanche (Av) foi identificado pelo deslocamento superficial de uma camada ativa de partículas deslizando sobre uma camada passiva de partículas no leito e o rolamento (Ro) como um movimento contínuo da superfície do leito em uma configuração de ângulo dinâmico de repouso (NOROUZI *et al.*, 2015, LEGOIX *et al.*, 2017; NIJSSEN *et al.*, 2022). Também foi considerada a queda livre (Qu), relacionada ao

deslocamento das partículas somente por influência da gravidade, sem o contato com a estrutura do equipamento.

Tabela 3.4: Experimentos para o estudo da dinâmica das partículas no leito em modo batelada.

Exp	$V_{\%}(\%)$	$n_{rpm}(rpm)$	Exp	$V_{\%}(\%)$	$n_{rpm}(rpm)$
B.1	20	5	B.19	60	25
B.2	20	10	B.20	60	30
B.3	20	15	B.21	60	35
B.4	20	20	B.22	80	5
B.5	20	25	B.23	80	10
B.6	20	30	B.24	80	15
B.7	20	35	B.25	80	20
B.8	40	5	B.26	80	25
B.9	40	10	B.27	80	30
B.10	40	15	B.28	80	35
B.11	40	20	B.29	100	5
B.12	40	25	B.30	100	10
B.13	40	30	B.31	100	15
B.14	40	35	B.32	100	20
B.15	60	5	B.33	100	25
B.16	60	10	B.34	100	30
B.17	60	15	B.35	100	35
B.18	60	20			

A seguinte sequência foi realizada para os ensaios com areia em modo batelada:

1. Pesagem da areia: a quantidade de areia para o ensaio era pesada e adicionada no leito do equipamento.
2. Acionamento do sistema de agitação: o sistema de agitação era ligado e o nível de areia no leito homogeneizado.
3. Gravação do leito: era iniciada a gravação do leito com a identificação do vídeo.
4. Realização dos ensaios: o sistema de aquisição de dados era acionado e eram realizados os ensaios para sete valores de rotação do eixo de agitação, 5, 10, 15, 20, 25,

30 e 35 rpm, para uma mesma massa de areia no leito. Os dados da operação em estado estacionário eram armazenados em um arquivo no computador.

5. Finalização do ensaio: os dados coletados durante o ensaio eram salvos e a unidade experimental preparada para o próximo experimento.

3.2.6. Metodologia experimental para os ensaios de dinâmica do leito utilizando areia em modo contínuo

Os ensaios de dinâmica de leito em modo contínuo com areia avaliaram a influência das principais variáveis relacionadas ao escoamento e a distribuição do material ao longo do leito do *Microwave Paddle Dryer*. As variáveis independentes estudadas foram: velocidade do eixo de agitação do leito (n_{rpm}), altura do vertedouro (H_V) e inclinação (θ). As variáveis resposta foram: massa de areia retida no leito (m_{retida}), comprimento da zona de estagnação acima das pás de agitação (L_{est}) e velocidade axial de deslocamento das partículas ao longo do leito (v_{axi}). A gravação dos vídeos foi realizada em 30 quadros por segundo com a câmera posicionada no suporte a 1,7 m de distância do equipamento. Os 12 experimentos realizados em modo contínuo são mostrados na Tabela 3.5.

Na Figura 3.18 são ilustradas as 3 configurações de altura do vertedouro (H_V) em 1,7cm, 6,7cm e 11,7cm. A vedação entre o vertedouro e as laterais e eixos do equipamento foi feita com silicone, evitando a saída de areia por outros locais senão por cima do vertedouro. Na Figura 3.19 é mostrada uma foto do vertedouro instalado no equipamento em sua altura máxima de 11,7 cm.

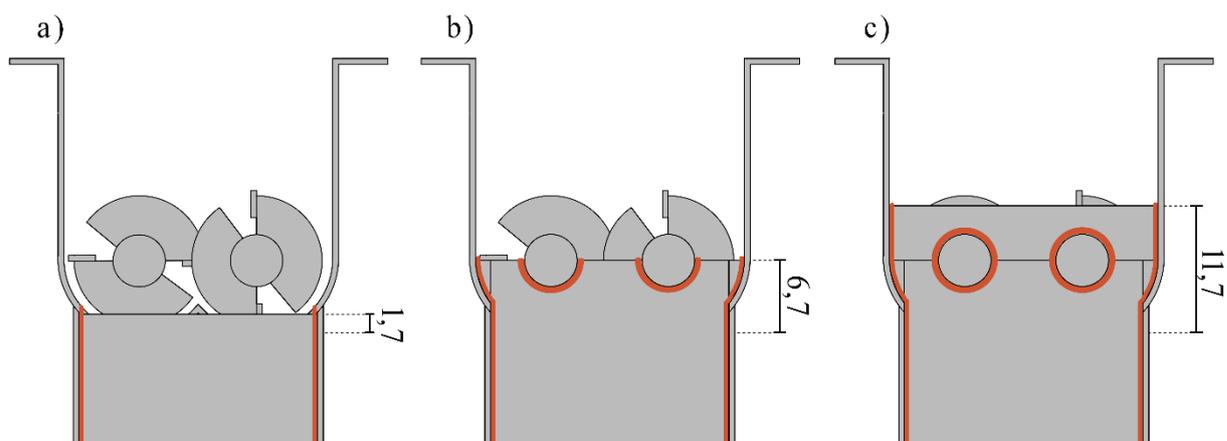


Figura 3.18: Esquema de montagem do vertedouro no *Microwave Paddle Dryer* e suas alturas em centímetros para os níveis a) mínimo, b) médio e c) máximo para os ensaios de dinâmica de leito com areia em modo contínuo.



Figura 3.19: Vertedouro em seu nível máximo instalado no *Microwave Paddle Dryer* para os ensaios de dinâmica do leito em modo contínuo com areia.

Tabela 3.5: Experimentos realizados em modo contínuo para o estudo da dinâmica das partículas no leito do *Microwave Paddle Dryer*.

Exp.	n_{rpm} (rpm)	H_V (cm)	θ (°)
C.1	4	6,7	0
C.2	8	6,7	0
C.3	14	6,7	0
C.4	20	6,7	0
C.5	26	6,7	0
C.6	30	6,7	0
C.7	20	6,7	1
C.8	20	6,7	2
C.9	20	6,7	3
C.10	25	11,7	2
C.11	25	6,7	2
C.12	25	1,7	2

Em algumas condições operacionais, foi observado à má distribuição de partículas ao longo do leito, com regiões em que o nível da superfície do leito ficou acima da altura máxima de atuação das pás de agitação, comprometendo o deslocamento radial das partículas. Este fenômeno foi denominado zona de estagnação da superfície e é ilustrado em “a” na Fig. 3.20.

A velocidade radial média (v_{rad}) das partículas ao longo do leito foi medida nos experimentos C.1, C.2 e C.3, os três ensaios que apresentaram maior não uniformidade das

partículas ao longo do leito devido à formação da zona de estagnação. A medida foi realizada em duplicata utilizando areia pintada de preto como traçador e a Eq. 3.8 foi utilizada para calcular a velocidade radial média (v_{rad}) em diferentes posições axiais (S_{axi}), conforme indicado na foto da vista superior do leito em “b” na Fig. 3.20.

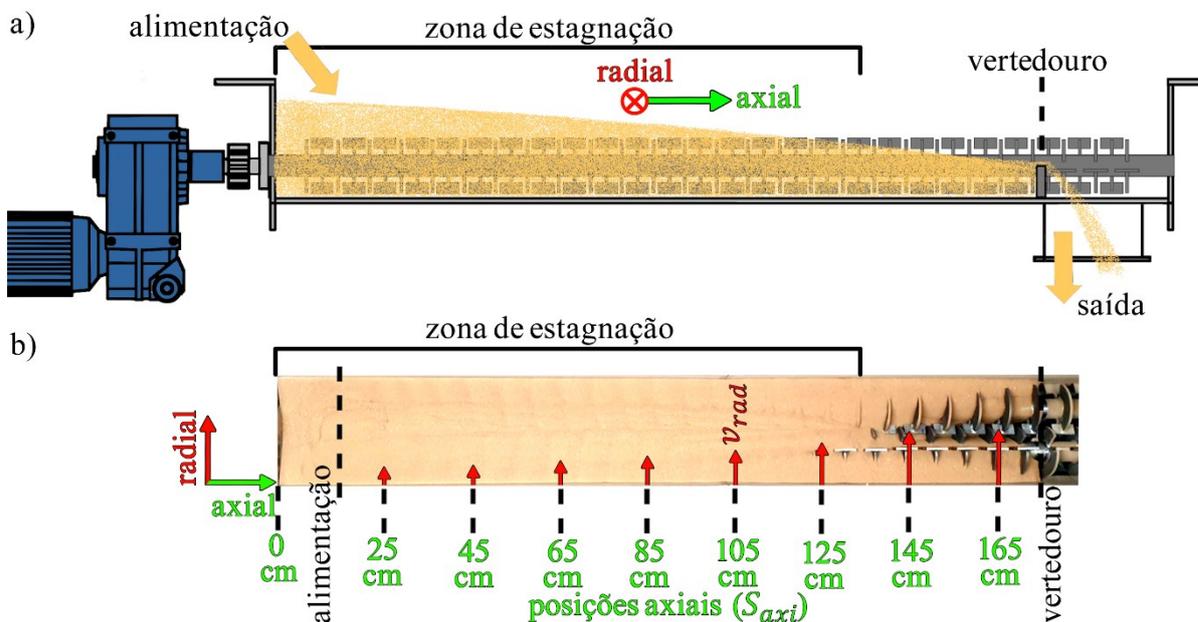


Figura 3.20: Formação da zona de estagnação do leito com a a) ilustração do fenômeno e b) foto superior do leito.

Quanto ao deslocamento ao longo do leito do *Microwave Paddle Dryer*, foi avaliada a variação da posição axial (S_{axi}) das partículas em função do tempo (t) para os experimentos C.10, C.11 e C.12, com variação somente da altura do vertedouro (H_V). Nestes experimentos, a inclinação e a velocidade de rotação do eixo de agitação foram mantidas constantes em 2° e 25 rpm, respectivamente, valores em que a distribuição das partículas ao longo do leito foi uniforme, sendo o objetivo avaliar a influência do vertedouro na retenção e deslocamento das partículas no leito.

O procedimento experimental para a análise do deslocamento axial das partículas é ilustrado na Figura 3.21. A areia comum foi alimentada até o equipamento atingir o estado estacionário, após isso foi iniciada a alimentação da areia pintada de preto nas mesmas condições, retornando à areia comum após a adição de todo o traçador. Para cada experimento foram utilizados 8 kg de areia pintada de preto como traçador. O *software ImageJ* foi utilizado para medir a variação da intensidade média dos pixels em diferentes posições axiais fixas ao longo do leito. A primeira etapa do tratamento dos quadros retirados do vídeo foi a correção da intensidade do brilho e do contraste, com a posterior transformação para 8 bits em tons de cinza.

A variação da intensidade dos tons de cinza nas posições axiais de análise foi avaliada em intervalos de 1 min entre os quadros do vídeo. O perfil resultante da variação da intensidade dos pixels ao longo do tempo foi subtraído do valor em branco para a correção de diferenças de luminosidade no leito (ASACHI *et al.*, 2018). Para encontrar o tempo médio de passagem das partículas do traçador por meio do perfil de intensidade dos pixels em função do tempo, foi realizado um procedimento de integração numérica por regra dos trapézios utilizando o *software Microsoft Excel*. Este procedimento foi aplicado para a estimativa dos instantes médios de passagem do traçador no leito nas posições axiais (S_{axi}) de 15, 61, 98, 140 e 173cm.

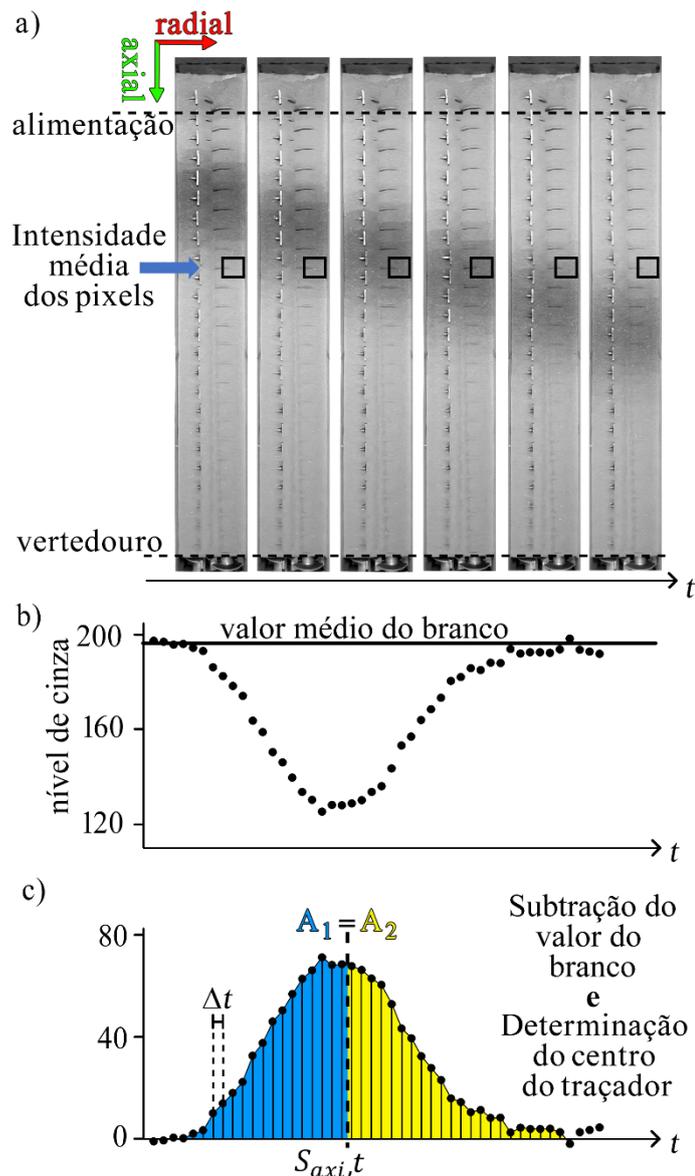


Figura 3.21: Medida da velocidade axial das partículas com a) frames do vídeo do deslocamento do traçador no leito, b) variação do perfil dos pixels com o tempo e c) determinação do tempo médio de passagem do traçador.

A velocidade axial (v_{axi}) das partículas foi determinada por meio da derivada de primeira ordem do ajuste da curva da posição axial do traçador no leito (S_{axi}) em função do tempo (t), como mostrado na Equação 3.10.

$$v_{axi} = dS_{axi}/dt \quad (3.10)$$

O ajuste permitiu a estimativa do tempo de residência das partículas, que foi comparado com o tempo de residência geométrico, calculado com a Equação 3.11, sendo T_{geo} o tempo de residência geométrico e Q a vazão mássica de alimentação (CHARLOU *et al.*, 2015).

$$T_{geo} = m_{retida}/Q \quad (3.11)$$

A primeira etapa para a realização dos ensaios de dinâmica do leito com areia em modo contínuo foi a pesagem da massa total de areia utilizada nos ensaios. Isto foi necessário para realizar o balanço de massa para o cálculo da resposta massa de areia retida no leito (m_{retida}), que era feito quando era atingido o estado estacionário da operação.

A alimentação do *Microwave Paddle Dryer* foi de 40kg/h de areia, feita manualmente com potes plásticos contendo 667g de areia cada e adicionados a cada 1 minuto no ponto de alimentação. Os potes eram reabastecidos com areia à medida que o experimento era executado utilizando uma balança de precisão modelo *Shimadzu Marte UH6200H*.

A areia que saía do equipamento era direcionada para o recipiente plástico acima da balança URANO UDC CO 30/5 e o valor da massa medida enviado via comunicação serial para o sistema de aquisição de dados no computador.

Quando a vazão mássica de saída medida atingia o valor de 667 gramas por minuto (40kg/h), mesma vazão mássica de alimentação, era verificado se o sistema entrou em estado estacionário. No estado estacionário a vazão mássica de saída de areia oscilava em torno de 667g/min e não eram mais verificadas mudanças na configuração do leito. As filmagens do leito do equipamento para as análises de imagem eram realizadas no estado estacionário.

A sequência adotada para execução dos ensaios foi:

1. Aquisição de dados: o sistema de aquisição de dados era iniciado e o arquivo para salvá-los selecionado.

2. Agitação do leito e alimentação: o inversor de frequência do motor de agitação do leito era ligado no valor de rotação desejado e era iniciada a alimentação do *Microwave Paddle Dryer* em 667g/min de areia.
3. Estado transiente: a vazão mássica de saída de areia do equipamento era monitorada através do sistema de aquisição e a operação era considerada em estado transiente enquanto a vazão mássica de saída não atingisse o valor de 667g/min.
4. Estado Estacionário: a massa de saída de areia atingia o valor de 667g/min e se estabilizava, a operação era mantida no estado estacionário por cerca de mais 20 min antes do início da coleta dos dados.
5. Filmagens: era realizada a gravação do leito no estado estacionário com o celular posicionado no suporte a 1,7m acima do *Microwave Paddle Dryer*.
6. Fim do ensaio: o sistema de agitação era desligado, a alimentação interrompida, o vídeo da gravação do leito e o arquivo com os dados adquiridos eram salvos. Toda a massa de areia fora do equipamento era pesada para o cálculo da massa retida no leito via balanço de massa.
7. Preparação para o próximo ensaio: o equipamento era preparado para as condições experimentais do próximo ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seção de Resultados e Discussão está dividida em duas partes.

A primeira parte é a seção “4.1. Resultados e discussão dos ensaios de secagem em modo batelada”, em que são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos de secagem via micro-ondas em modo batelada no *Microwave Paddle Dryer* para a remediação dos cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica.

A segunda parte é a seção “4.2. Resultados e discussão dos ensaios da dinâmica das partículas no leito”, em que são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos para o estudo da dinâmica de escoamento de partículas nos modos contínuo e batelada no *Microwave Paddle Dryer*, utilizando areia e sem a aplicação de micro-ondas.

4.1. Resultados e discussão dos ensaios de secagem em modo batelada

Os experimentos de secagem no *Microwave Paddle Dryer* foram realizados em batelada. No total, foram executados 5 ensaios de descontaminação de cascalhos com fluido de perfuração de base orgânica. Na Tabela 4.1 estão os valores adotados nos experimentos para a rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), a energia específica ($E.E.$), os teores iniciais de orgânicos (U_{org-i}) e água ($U_{água-i}$) e a vazão de inerte (V_{N_2}) juntamente com os resultados obtidos para os teores residuais médios de orgânicos ($\bar{U}_{org-res}$) e água ($\bar{U}_{água-res}$), a pressão na cavidade e o tipo de incidente ocorrido durante o ensaio.

O *set-point* do sistema de controle de temperatura no leito foi de 230°C para todos os experimentos realizados, com uma tolerância de desvio de 2°C. A rotação do motor do exaustor do sistema de sucção de vapores foi a mesma em todos os experimentos, sendo a variação dos valores da pressão na cavidade entre os experimentos decorrente de diferenças na vedação da unidade. A vedação tinha como finalidade evitar a entrada de ar e reduzir o risco de combustão, sendo que quanto melhor a vedação obtida, menor foi a pressão registrada no interior da cavidade.

Com exceção do experimento 1, que precisou ser interrompido, em todos os ensaios realizados o teor residual médio de orgânicos ($\bar{U}_{org-res}$) no leito ficou abaixo de 5,9%, sendo este o atual valor máximo exigido na legislação brasileira para o descarte de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica.

A discussão dos resultados de descontaminação dos cascalhos foi feita separadamente para os experimentos executados e será abordada na sequência cronológica de realização destes. Os motivos foram estes serem os primeiros ensaios realizados em um *paddle dryer* com secagem via micro-ondas, aos efeitos observados no *Microwave Paddle Dryer* que pesquisas anteriores na área não abordaram e aos acontecimentos ocorridos durante os experimentos que demandaram alterações no procedimento experimental e na estrutura do equipamento.

Tabela 4.1: Resultados dos experimentos de descontaminação via micro-ondas de cascalhos.

Exp.	n_{rpm} (rpm)	$E.E.$ (kwh/kg)	U_{org-i} (%) $U_{\acute{a}gua-i}$ (%)	$\bar{U}_{org-res}$ (%) $\bar{U}_{\acute{a}gua-res}$ (%)	V_{N_2} (l/min)	pressão (kPa)	Incidente
1	20	0,296	8,41±0,05 10,4±0,68	6,31 ± 0,09 1,6 ± 0,07	Não	Dados Perdidos	Fogo
2	20	0,361	8,47±0,06 11,20±0,09	4,12 ± 0,02 1,11 ± 0,09	33,8	-2,53	Explosão
3	20	0,352	8,39±0,15 10,78±0,03	4,16 ± 0,03 1,14 ± 2·10 ⁻⁵	57,4	-5,80	Nenhum
4	5	0,352	8,30±0,08 10,50±0,05	5,16 ± 0,04 1,09 ± 0,02	57,0	-5,79	Explosão
5	35	0,352	8,31±0,07 10,75±0,17	4,92 ± 0,10 0,99 ± 9·10 ⁻⁵	57,5	-6,66	Nenhum

4.1.1. Experimento 1: incêndio na cavidade

Durante os ensaios exploratórios na unidade experimental, não houve incidentes relacionados a combustão na cavidade, desta forma foi decidido a realização dos ensaios sem o uso de injeção de inerte. Porém, no experimento 1 houve um incêndio na cavidade que foi sustentado pela fase orgânica do fluido de perfuração presente no cascalho contaminado. Nos tópicos seguintes desta seção são apresentados a cronologia dos eventos que levaram ao acidente, a análise de risco do processo e as mudanças estruturais, de controle e na metodologia experimental.

4.1.1.1. Combustão na cavidade

Na Figura 4.1 é mostrado o perfil da taxa de condensado coletado com o tempo para o experimento 1, com valor de energia específica aplicada de 0,296 kwh/kg, velocidade de

rotação do eixo de agitação de 20 rpm e sem a injeção de nitrogênio. Os valores de temperatura no gráfico foram lidos na interface de controle e aquisição e anotados em papel durante a realização do experimento, já que o arquivo com os dados dos sensores foi perdido devido ao desligamento da energia elétrica do laboratório por motivos de segurança. O fogo iniciado na cavidade do *Microwave Paddle Dryer* se alastrou para o meio externo da unidade experimental, sendo controlado com o uso de um extintor de incêndio de dióxido de carbono.

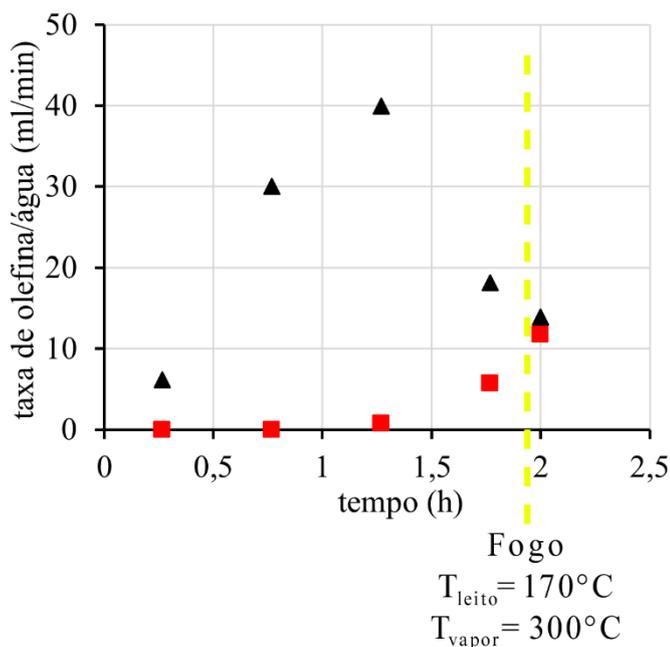


Figura 4.1: Perfil da taxa de condensado coletada para o experimento 1 de secagem de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica.

A principal hipótese para não ter ocorrido combustão nos experimentos preliminares e ter ocorrido no experimento 1 foram que as melhorias no isolamento térmico e no sistema de sucção contribuíram para o aumento das taxas de aquecimento e conseqüentemente de geração de vapores orgânicos. O processo de combustão foi desencadeado quando os vapores orgânicos atingiram seu limite de inflamabilidade na fase gasosa devido a entrada de ar pelas juntas e mancais de acoplamento do eixo de agitação.

Com base no gráfico apresentado na Figura 4.1 e a consideração de que a quantidade de condensado coletado era proporcional a concentração dos vapores na cavidade, foi realizada a análise do incidente:

1. Evaporação da água: entre 0 e 1,25h houve o aumento da concentração de vapor de água na cavidade, o que reduziu a fração de ar e o risco de combustão.

2. Saída da água no leite: a partir de 1,25h de operação a fração de vapor de água na atmosfera da cavidade começou diminuir, devido ao esgotamento da água líquida no leite, e a fração de ar começou a aumentar.
3. Início da evaporação dos compostos orgânicos: em 1,25h os compostos orgânicos começaram a evaporar do leite, primeiro por arraste pelo vapor de água e posteriormente pelo início do processo de evaporação (ROSSI *et al.*, 2017).
4. Limite de inflamabilidade: em 1,75h a taxa de geração de vapores dos compostos orgânicos e a temperatura aumentaram suficientemente para desencadear a combustão. A possível presença de um *hot-spot* também pode ter fornecido a energia de ativação necessária para o início da reação de combustão, sendo difícil a previsão e a localização deste tipo de fenômeno na cavidade (ROBINSON *et al.*, 2010).
5. Aumento da temperatura na fase vapor: a temperatura da fase vapor subiu até 300°C, já a do leite permaneceu próxima de 170°C, não variando de forma significativa. A combustão se tornou autossustentada.
6. Fogo no tampo superior do equipamento: os vapores de combustão vazaram para fora da cavidade após a destruição das juntas de vedação do tampo superior e as chamas se alastraram para o exterior do equipamento.

Na Figura 4.2 é mostrado o tampo superior do *Microwave Paddle Dryer* após o incêndio na cavidade com as marcas de entrada de ar na fuligem aderida ao tampo, além do cascalho e seus valores dos teores residuais de orgânicos ($U_{org-res}$) e água ($U_{\acute{a}gua-res}$) ao longo do leite. A região entre 100 e 140cm foi o local onde a combustão se concentrou, devido as marcas de fuligem no tampo, a destruição das juntas de vedação dos kits micro-ondas nesta parte do equipamento e os menores níveis residuais de orgânicos e água no leite.

A combustão na cavidade durou cerca de 5 minutos, e alguns fatores levaram ao atraso na percepção do desenrolar do incidente:

1. Equipamento fechado: não há visualização da cavidade, o que dificultou a inspeção do que ocorre durante o processo de secagem.
2. Faixa de medida dos sensores de temperatura: os amplificadores dos termopares estavam configurados para a leitura até 300°C, máxima temperatura registrada pelos sensores da fase vapor. Entretanto, a temperatura atingida foi maior, visto que houve a degradação das juntas de vedação, capazes de suportar temperaturas superiores as registradas. O fato de a medida fornecida pelo sistema de aquisição se estabilizar em

300°C e a temperatura do leito estar próxima de 170°C, causou a falsa impressão de que o evento estava sob controle.

3. Sistema de controle: o equipamento não possuía um sistema de segurança automatizado e as interpretações do que ocorria na cavidade eram feitas pelo operador através dos dados lidos na interface de controle e aquisição.

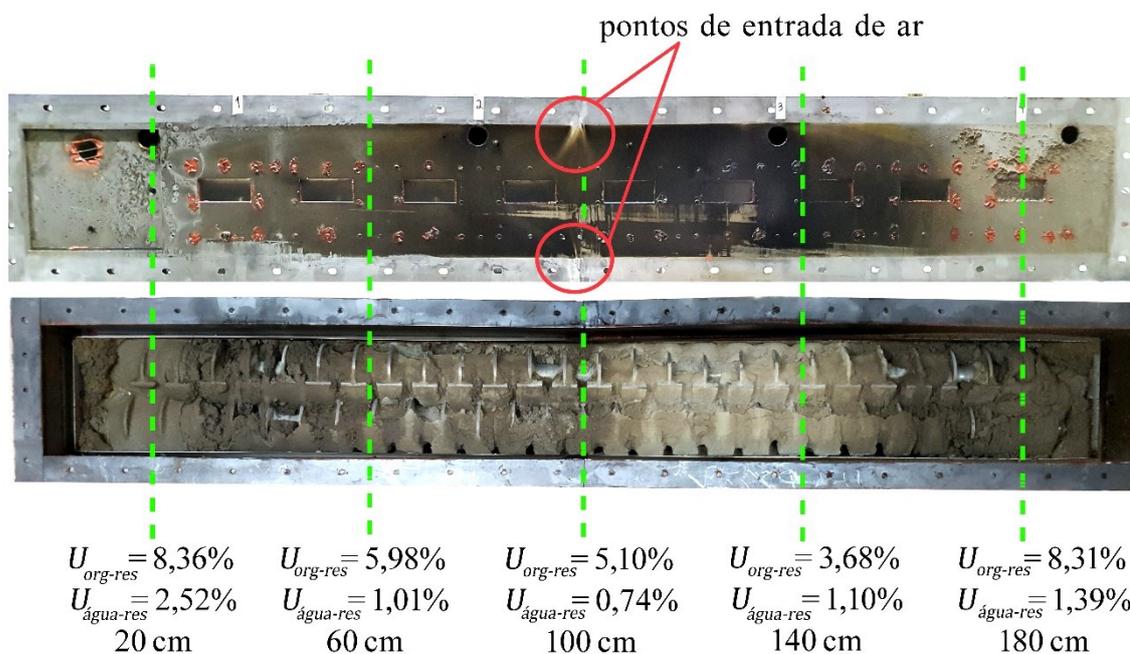


Figura 4.2: Tampo superior do *Microwave Paddle Dryer* após incêndio na cavidade ocorrido no experimento 1 de descontaminação de cascalhos.

4.1.1.2. Melhorias na unidade experimental e otimização do sistema de controle e segurança operacional

A operação de secagem via micro-ondas em batelada de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica oferece um grande risco de incêndio e explosões devido a formação de vapores orgânicos inflamáveis. O risco de combustão pode ser reduzido com a diluição dos reagentes da reação ou a manutenção das concentrações fora dos limites de inflamabilidade da mistura, o que pode ser feito utilizando um dos componentes em excesso ou através da injeção de um diluente (ROWLEY *et al.*, 2011, QI *et al.* 2017).

Com base na análise dos eventos, foram implementadas mudanças para otimizar a segurança operacional do *Microwave Paddle Dryer*:

1. Vedação do casco: foram realizadas melhorias na vedação para evitar a entrada de ar na cavidade utilizando silicone para altas temperaturas no tampo superior, na tampa de saída de material e nos parafusos de fixação.

2. Uso de nitrogênio: foram instalados 3 pontos de injeção de inerte no casco do equipamento, como mostrado na Figura 4.3. Uma válvula solenoide que era acionada pelo sistema de controle regulava a injeção de nitrogênio na cavidade. A injeção de nitrogênio permanecia fechada para temperaturas no leito abaixo de 80°C, na faixa de 80°C a 120°C era iniciada de forma pulsada em intervalos de 2s de fluxo por 2s de interrupção e acima de 120°C a válvula era completamente aberta. Esta estratégia foi adotada para economizar nitrogênio nas faixas de operação de menor risco de combustão, devido a duração do ensaio e o tamanho do equipamento.

3. Temperaturas operacionais de segurança: os amplificadores de sinal dos termopares foram reconfigurados para a medida de temperatura até 400°C. Foi implementado no sistema de controle e aquisição de dados um algoritmo para o desligamento automático dos kits micro-ondas e a abertura da válvula de injeção de nitrogênio caso a temperatura da fase vapor ultrapasse em 100°C a do leito, com a retomada do aquecimento após a diminuição da temperatura da fase vapor. Caso a temperatura do leito ou da fase vapor, medida por qualquer um dos sensores, excedesse 270°C, o sistema desligava as micro-ondas e abria a válvula de inerte, cessando a evaporação promovida pela secagem e diluindo a fração de vapores orgânicos na atmosfera da cavidade, respectivamente. Todas as ações descritas para o sistema de segurança ocorreriam para qualquer valor definido de *set-point* de temperatura.

A utilização do nitrogênio não tornou a atmosfera inerte no interior da cavidade do *Microwave Paddle Dryer*, pois não foi possível bloquear a entrada de ar pelas partes móveis do equipamento, onde estavam os mancais dos eixos de agitação. Além disso, o tampo superior e a tampa de saída de material eram fixadas por 54 parafusos e precisavam ser removidas e reinstaladas entre os experimentos para a alimentação, coleta de amostras e limpeza do leito, o que comprometia a junta de vedação, que necessitava de reparo entre os ensaios. Desta forma, o nitrogênio agiu como um diluente da fase vapor, aumentando a margem de segurança operacional do equipamento em relação aos limites de inflamabilidade dos vapores orgânicos e reduzindo a possibilidade de combustão na cavidade (QI *et al.* 2017).



Figura 4.3: Pontos de injeção de nitrogênio no casco do *Microwave Paddle Dryer*.

A calha interna para a coleta de condensados no casco mostrada na foto da Figura 3.10 não funcionou adequadamente, pois o cascalho foi suspenso pela movimentação do eixo de agitação e se acumulou em algumas partes da calha, inviabilizando sua função. Por isso, os experimentos seguintes foram realizados sem a calha interna.

4.1.2. Experimento 2: ensaio exploratório do sistema de segurança e análise da saída dos compostos orgânicos

No experimento 2 a velocidade de rotação do eixo de agitação foi de 20 rpm e a vazão de nitrogênio de 33,8 l/min. Ocorreu uma explosão na cavidade quando a energia específica atingiu o valor de 0,361kwh/kg. Os perfis de temperatura e a taxa de geração de condensado são mostrados na Figura 4.4.

A temperatura do leito não alcançou os 230°C definido no *set-point*, mas o leito atingiu um teor residual médio de 4,12% para a energia específica aplicada, o que foi considerado satisfatório já que a secagem não foi homogênea ao longo do leito.

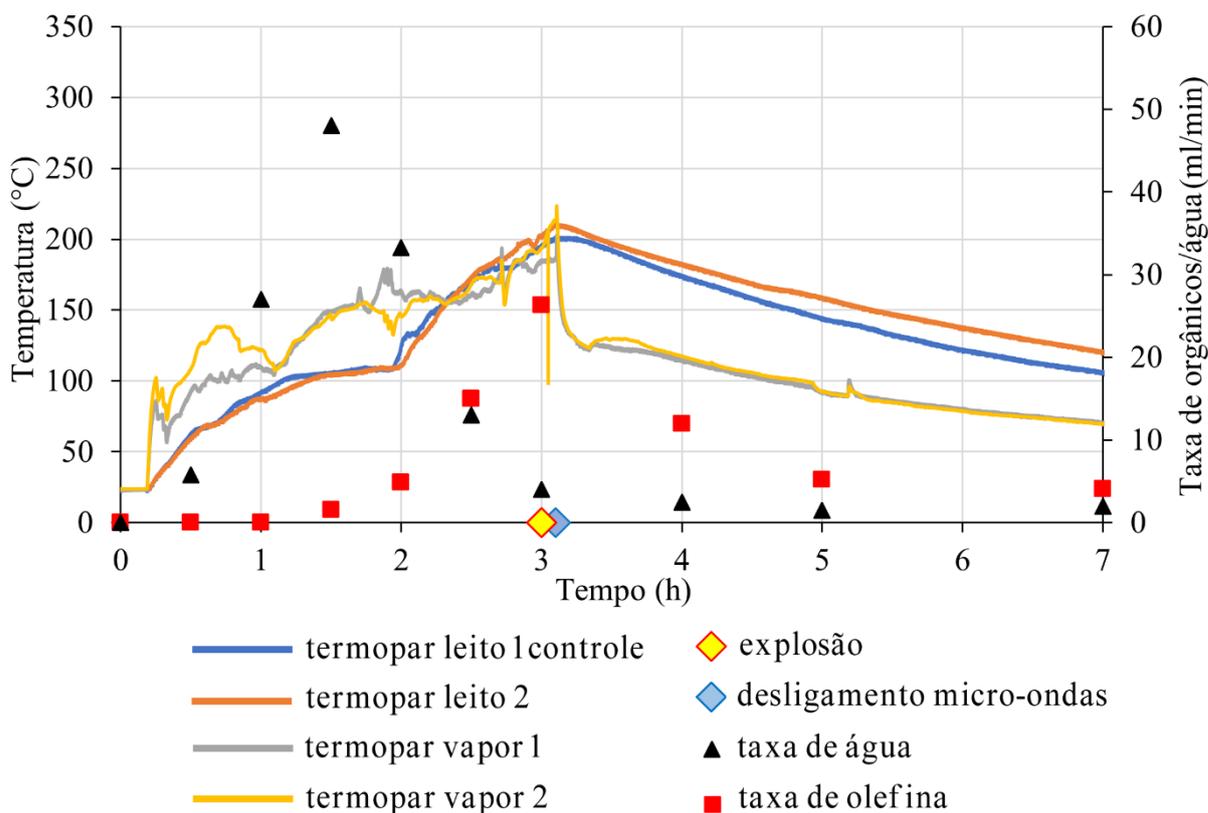


Figura 4.4: Perfis de temperatura para o leito e fase vapor e taxa de geração de condensado para o experimento 2 de descontaminação de cascalhos.

A partir dos resultados deste ensaio, foi definido que a energia específica máxima para os experimentos posteriores seria de 0,352 kWh/kg e a vazão de nitrogênio aumentada para 57,0 l/min. Embora o nitrogênio tenha permitido a operação de secagem em maiores valores de temperatura e energia específica, o risco de explosão não foi eliminado e a vazão de inerte como diluente foi efetiva até determinada fase do processo, em que a taxa de geração de vapores dos compostos orgânicos atingiu o limite de inflamabilidade na fase gasosa.

A análise da composição da fase orgânica do condensado dos vapores feita via cromatografia gasosa é mostrada na Tabela 4.2 em função da energia específica aplicada. Foi possível observar a alteração na proporção dos compostos orgânicos com o aumento da energia específica no decorrer da secagem. Isto ocorreu em virtude do Hexadeceno (C_{16}) possuir uma menor temperatura de ebulição, de 285°C, quando comparado ao Octadeceno (C_{18}), na faixa de 285 a 315°C (QATAR CHEMICAL COMPANY LTD, 2021, SANTA CRUZ BIOTECHNOLOGY, 2010).

Tabela 4.2: Proporção entre a fase orgânica e aquosa do condensado dos vapores em função da energia específica ($E. E.$).

	$E. E.=0,20\text{kWh/kg}$ (1,5h)	$E. E.=0,25\text{kWh/kg}$ (2h)	$E. E.=0,36\text{kWh/kg}$ (3h)	$E. E.=0,36\text{kWh/kg}$ (4h)
C_{16} (%)	96,1	93,8	83,7	74,1
C_{18} (%)	3,9	6,2	16,3	25,9

Observando os valores apresentados na Figura 4.4 e na Tabela 4.2, é evidente que a saída dos compostos orgânicos ocorreu numa faixa de temperatura inferior as de ebulição destes componentes. Uma hipótese é que devido a incidência e a absorção das micro-ondas ser maior na superfície do leito, esta região provavelmente apresenta uma maior temperatura que a medida pelos termopares em seus locais de aferição. Outra possibilidade é o erro de medida causado pela redução do teor de umidade do leito durante a secagem. À medida que a umidade do leito reduz, o espaço entre as partículas que antes era preenchido por líquidos é ocupado pelos gases: vapores da secagem, ar e inerte (N_2). Isto altera as propriedades térmicas do leito, já que líquidos geralmente possuem maior capacidade de transferência de calor por condução e convecção do que os gases (BIRD *et al.*, 2002). Assim, há o comprometimento da transferência do calor gerado pelas micro-ondas no cascalho para a haste do termopar, gerando erros de medida, como ilustrado na Figura 4.5.

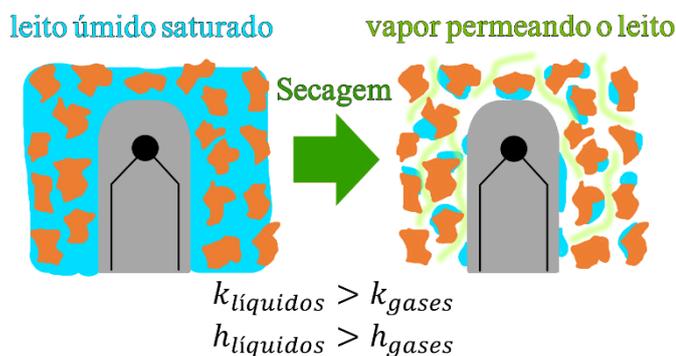


Figura 4.5: Alterações nas propriedades de transferência de calor do leito durante a secagem.

4.1.3. Experimentos 3, 4 e 5: influência da rotação do eixo de agitação na secagem

4.1.3.1. Teor residual de orgânicos ao longo do leito

O teor residual de orgânicos ($U_{org-res}$) e água ($U_{água-res}$) em diferentes pontos do leito nos experimentos 3, 4 e 5 é mostrado na Tabela 4.3 sendo os resultados plotados nos gráficos da Figura 4.6. Já as massas do cascalho livre e incrustado no leito ao final da secagem para cada

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

experimento é mostrada na Tabela 4.4. As análises dos teores residuais foram realizadas via método da retorta em duplicata.

Tabela 4.3: Teores residuais de orgânicos e água ao longo do leito do *Microwave Paddle Dryer*.

Comprimento	Consistência	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
		(20rpm)	(5rpm)	(35rpm)
		$U_{org-res}(\%)$	$U_{org-res}(\%)$	$U_{org-res}(\%)$
		$U_{água-res}(\%)$	$U_{água-res}(\%)$	$U_{água-res}(\%)$
20	Livre no	6,53±0,06	9,21±0,11	8,46±0,10
	leito	1,20±0,01	0,94±0,20	0,57±0,05
60	Livre no	3,54±0,31	3,20±0,23	4,18±0,05
	leito	0,94±0,02	1,13±0,01	0,78±0,01
100	Livre no	1,91±0,34	2,67±0,02	1,55±0,08
	leito	1,06±0,03	1,13±0,20	1,07±0,16
140	Livre no	2,01±0,28	2,58±0,08	1,68±0,09
	leito	1,22±3·10 ⁻³	1,03±0,14	0,97±0,05
180	Livre no	4,33±0,14	5,95±0,13	3,30±0,08
	leito	1,17±0,08	1,09±0,24	0,96±0,09
20	Incrustado nas	7,33±0,01	8,85±3·10 ⁻³	7,89±0,04
	pás e eixo	1,28±0,05	1,15±0,02	0,68±0,03
60	Incrustado nas	3,69±0,28	4,84±0,48	3,39±0,12
	pás e eixo	1,15±0,19	0,90±0,02	0,96±0,03
100	Incrustado nas	4,05±0,20	4,41±0,11	3,35±0,19
	pás e eixo	0,94±0,02	0,93±0,15	1,09±0,04
60 a 140	Incrustado no	9,59±0,35	10,31±0,26	10,78±0,38
	casco	1,24±0,02	1,05±0,04	1,20±0,11

Tabela 4.4: Massa de cascalho livre no leito e incrustado nos eixos e pás de agitação após os experimentos de descontaminação dos cascalhos no *Microwave Paddle Dryer*.

	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
Livre no leito (kg)	31,69	35,37	23,59
Incrustado (kg)	26,40	22,67	34,90

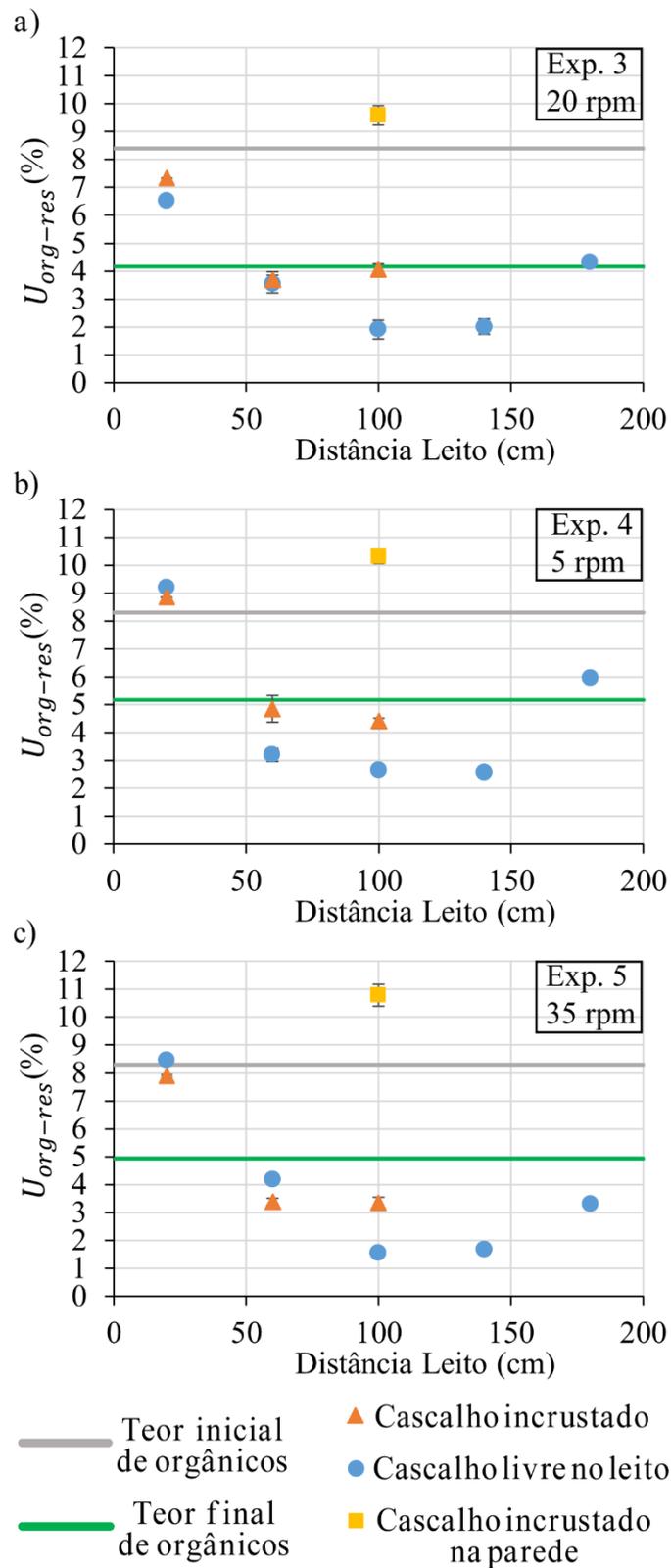


Figura 4.6: Perfil do teor residual de orgânicos ($U_{org-res}$) do cascalho ao longo do leito após os experimentos a) 3 (20rpm), b) 4 (5rpm) e c) 5 (35rpm) de secagem.

O experimento 3, realizado na rotação do eixo de agitação de 20 rpm, apresentou o menor teor residual médio de orgânicos ($\bar{U}_{org-res}$) no leito de $4,16\% \pm 0,04$ em comparação com os experimentos 4(5rpm) e 5(35rpm), com $5,16 \pm 0,04$ e $4,92 \pm 0,10$, respectivamente, para os mesmos valores de energia específica ($E.E.$) de 0,352 kWh/kg e vazão de nitrogênio (V_{N_2}) de 57 l/min.

A região central do leito apresentou os menores teores residuais de orgânicos ($U_{org-res}$) para todos os experimentos, alcançando valores inferiores a 2% em virtude da maior incidência eletromagnética das micro-ondas nesta região. Já o cascalho aderido as paredes laterais do casco apresentou teores residuais de orgânicos ($U_{org-res}$) maiores que os de alimentação, devido a condensação dos vapores dos compostos orgânicos no casco do equipamento.

A consistência do cascalho remediado variou ao longo do leito devido as diferenças nos teores residuais de orgânicos e água, como mostrado na Figura 4.7 para o experimento 3 (20 rpm) após o processo de secagem.

Os teores residuais de orgânicos do cascalho incrustado nas pás e eixo foram diferentes do material livre no leito por estarem fixados a partes do equipamento ao invés de expostos ao processo de agitação. Para os experimentos 3 e 4 os teores residuais de orgânicos do incrustado nas pás e eixo foram próximos ou maiores que o do material livre no leito para o mesmo ponto de coleta, como pode ser visto na Figura 4.6. A razão disso é que o cascalho incrustado não sofreu influência da agitação por estar fixado ao eixo de agitação e as pás de mistura, o que prejudicou a saída dos vapores, além de estar abaixo do nível do cascalho livre no leito, o que prejudicou a absorção das micro-ondas. (PETRI *et al.*, 2015, FALCIGLIA *et al.*, 2018).

Já para o experimento 5, o valor dos teores residuais de orgânicos para o cascalho incrustado nos pontos em 20 e 60 cm foram menores do que para o cascalho livre no leito, como pode ser visto na Figura 4.6. Para a região do leito localizada em 20cm, o provável motivo está na condensação dos vapores no casco que retornavam ao leito e se misturavam com o cascalho livre, causando o aumento dos teores residuais orgânicos. Já para a região de 60cm, o maior teor residual do cascalho incrustado pode estar relacionado a movimentação do cascalho livre no leito para as extremidades do equipamento. Isto causou a redução no nível do cascalho livre no leito para um valor abaixo da altura do eixo de agitação e pás de mistura na posição em 60cm, comprometendo exposição do cascalho livre às micro-ondas ao passo que o cascalho incrustado ao eixo e pás ficou mais exposto. Na Figura 4.8 é indicado o sentido de deslocamento do cascalho no leito após o experimento 5, sendo possível observar a variação de seu nível.

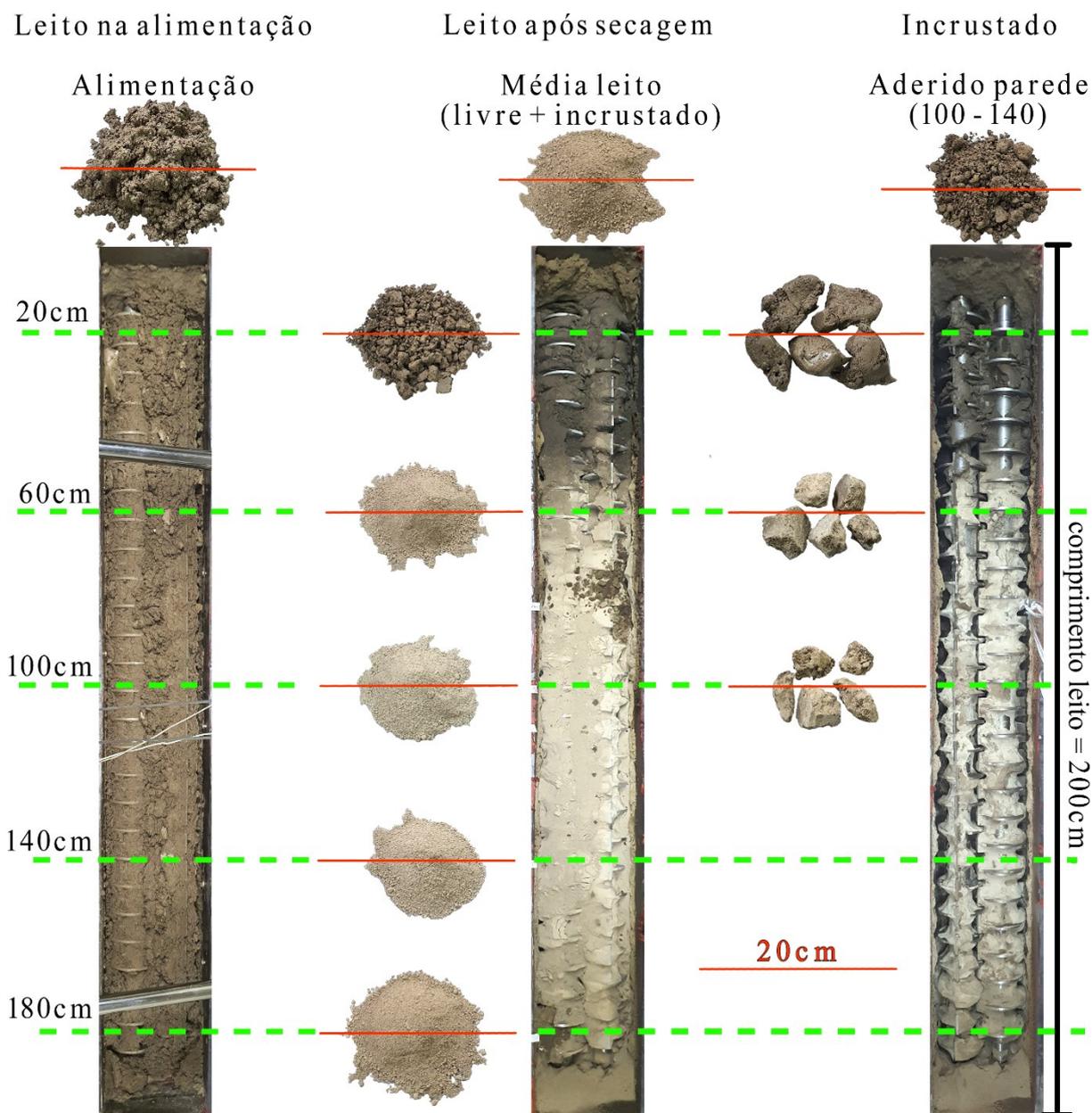


Figura 4.7: Consistência do cascalho ao longo do leito para o experimento 3 (20rpm).

A movimentação do cascalho no leito está relacionada a menores temperaturas nas extremidades do equipamento em razão da menor incidência de micro-ondas e das perdas de calor para meio externo por condução térmica pelo casco. A presença dos mancais do eixo de agitação e do motorreductor não permitiu a instalação adequada do isolamento térmico nestas áreas. Isso favoreceu a condensação dos vapores, causando o retorno do condensado dos compostos orgânicos ao leito e contribuindo para que o cascalho livre se deslocasse. O fenômeno está relacionado ao aumento do nível de coesão entre as partículas em determinadas faixas de teores de umidade (VASILENKO *et al.*, 2013). Além disso, a troca de material entre

as células de mistura em sistemas com agitação por pás é intensificada com o aumento da rotação do eixo de agitação (JADIDI *et al.* 2022). Desta forma, a maior rotação do eixo de agitação no experimento 5 (35rpm) resultou na troca mais intensa de cascalho livre entre as células de mistura do *Microwave Paddle Dryer* em comparação aos outros experimentos.

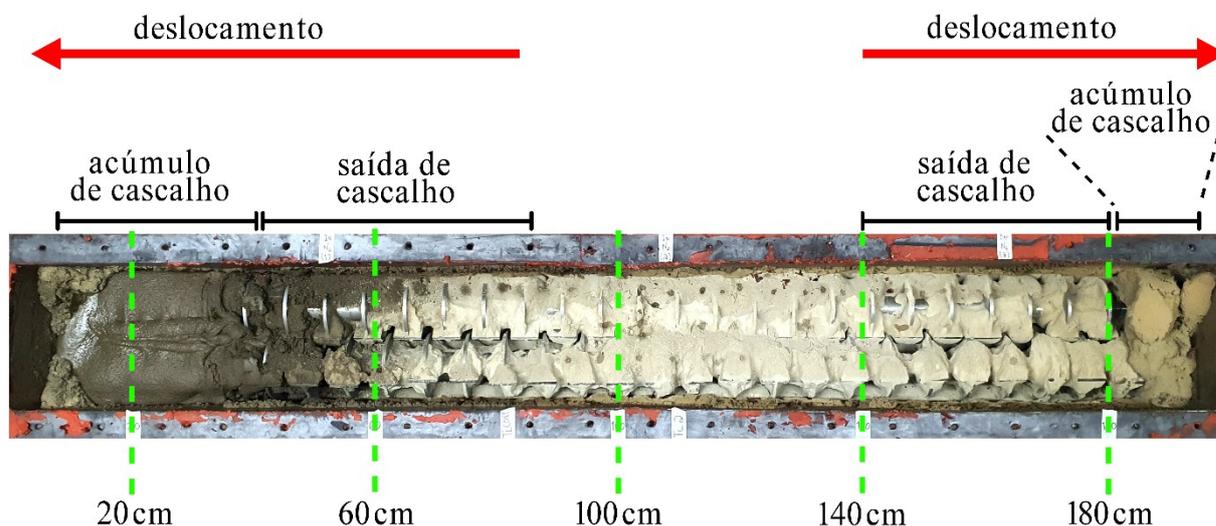


Figura 4.8: Leito do *Microwave Paddle Dryer* após o experimento 5 (35rpm) e a indicação do deslocamento do cascalho para as extremidades do equipamento.

A migração do cascalho para as extremidades do equipamento não permitiu uma análise adequada da influência da velocidade de rotação do eixo de agitação na eficiência de secagem, visto que o cascalho se deslocou para as regiões de menor temperatura, mascarando o efeito real que esta variável possa apresentar. Isto também ficou evidente pela maior quantidade de massa de cascalho incrustado no leito no experimento 5(35rpm) em relação aos experimentos 3(20rpm) e 4(5rpm), como mostrado na Tabela 4.4.

4.1.3.2. Dinâmica do processo de descontaminação dos cascalhos

A dinâmica do processo de descontaminação dos cascalhos via secagem micro-ondas para os experimentos 3 (20rpm), 4 (5rpm) e 5 (35rpm) são mostradas na Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, respectivamente, para seus perfis de temperatura, taxas de condensado e potência e torque consumidos pelo motor. A dinâmica do processo foi similar para os três experimentos, com o platô de mudança de fase para a água a 100 °C entre 1 e 2 horas de ensaio, seguido pelo decaimento da taxa de condensado de água e o início do aumento na taxa de condensado de orgânicos. Os ensaios tiveram um tempo similar com os kits micro-ondas ligados, próximo de 2 h e 45 min, até que o valor de energia específica fosse alcançado.

Após o desligamento dos kits micro-ondas a temperatura da fase vapor diminua rapidamente, pois a injeção de inerte permanecia acionada, carreando os vapores aquecidos para fora da cavidade e diminuindo sua temperatura. É possível observar que a taxa de condensado de orgânicos diminuiu após do desligamento dos kits micro-ondas, mas continuou significativa, provavelmente em razão da alta capacidade térmica do leito e do casco do equipamento.

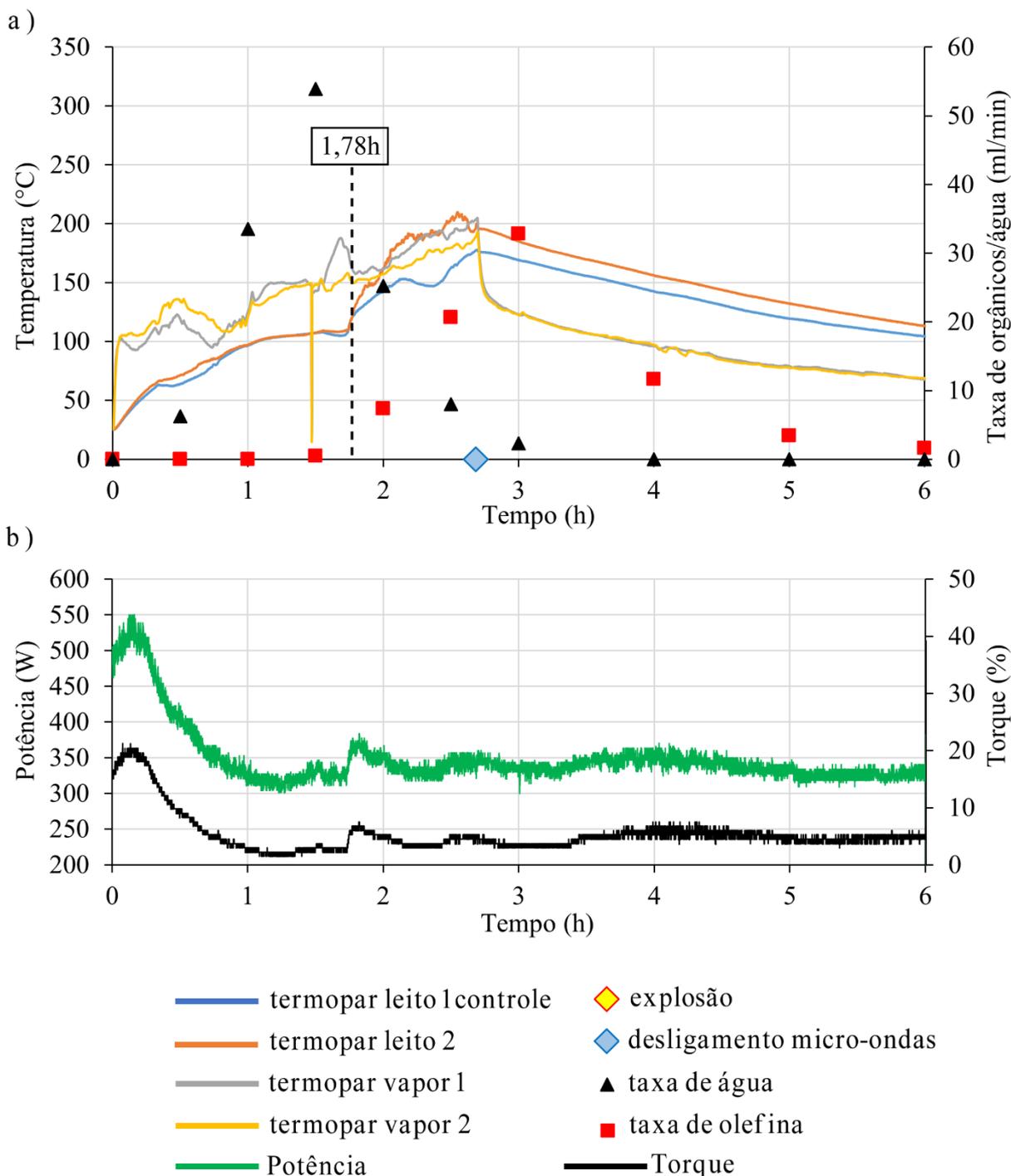


Figura 4.9: Experimento 3 (20rpm) de descontaminação de cascalhos e seus a) perfis de temperatura e taxa de condensado, b) consumo de potência e torque.

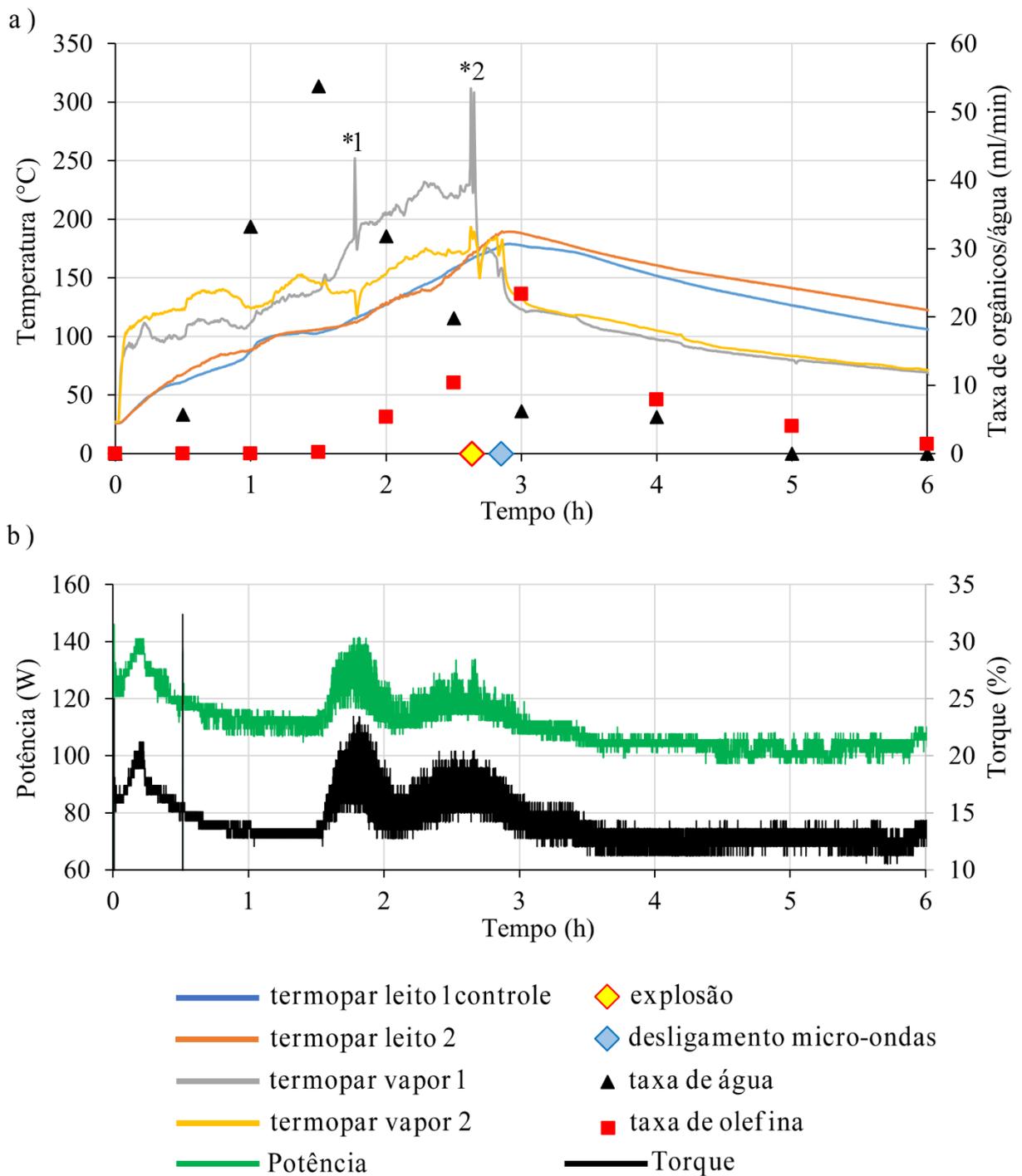


Figura 4.10: Experimento 4 (5rpm) de descontaminação de cascalhos e seus a) perfis de temperatura e taxa de condensados, b) consumo de potência e torque.

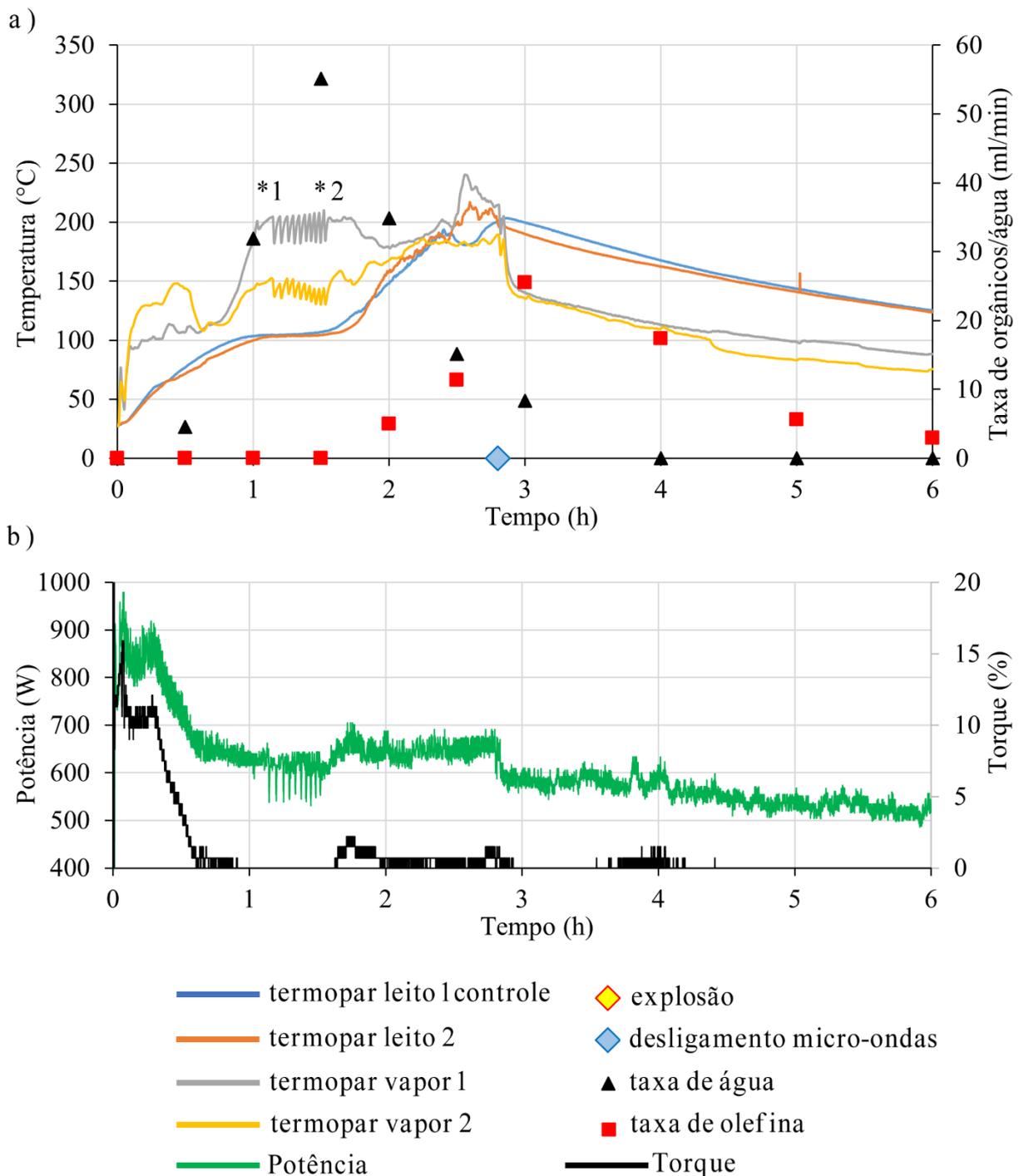


Figura 4.11: Experimento 5 (35rpm) de descontaminação de cascalhos e seus a) perfis de temperatura e taxa de condensados, b) consumo de potência e torque.

Nenhum dos experimentos atingiu o *set point* de temperatura de 230°C, pois a energia específica definida para o experimento era alcançada antes disso.

O sistema automático de segurança atuou em dois dos experimentos de análise da influência da rotação do eixo de agitação na secagem. Para o experimento 4, foram dois

incidentes observados, no primeiro deles pareceu haver um princípio de fogo na cavidade no início da fase de evaporação dos compostos orgânicos no tempo de 1,63h, registrado pelo aumento da temperatura do termopar 1 da fase vapor e indicado pelo ponto *1 do gráfico “a” da Figura 4.10. O segundo incidente foi uma explosão dos vapores orgânicos seguido do aumento da temperatura na atmosfera da cavidade em 2,62h, indicado pelo ponto *2 no gráfico “a” da Figura 4.10. Nos dois casos o sistema de controle atuou no desligamento dos kits micro-ondas e manteve a válvula de nitrogênio aberta, resultando na diluição dos vapores orgânicos e na diminuição da temperatura da fase vapor.

Para o experimento 5 é indicado no gráfico “a” da Figura 4.11 a atuação do sistema automatizado de segurança entre os pontos *1 e *2, com o desligamento automático dos kits micro-ondas quando a temperatura da fase vapor superou em 100°C a temperatura do leito, porém não foi observado combustão.

A combustão dos vapores orgânicos vinha associada de uma grande geração de fumaça de cor branca na saída do sistema de sucção, que era checada todas as vezes que o sistema de segurança atuava. Na Figura 4.12 é mostrado a saída do sistema de sucção para os gases não condensados nas condições de funcionamento normal e quando havia combustão na cavidade da unidade experimental.

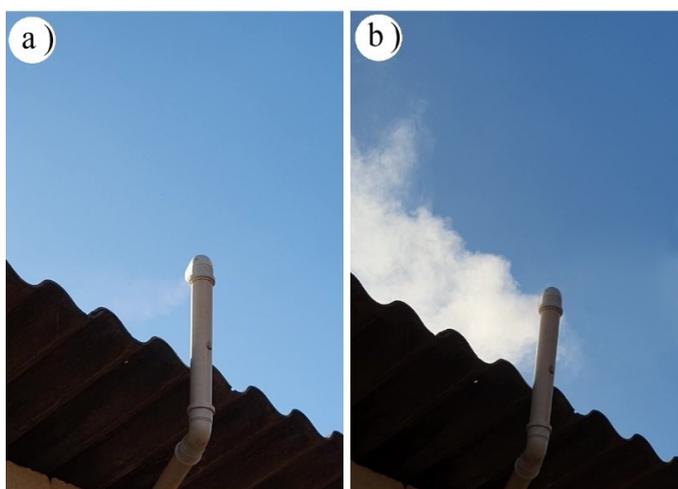


Figura 4.12: Saída do sistema de sucção para os vapores não condensados em funcionamento a) normal e b) combustão na cavidade.

Outra característica observada durante o processo de secagem ocorreu no experimento 3 mostrado no gráfico “a” da Figura 4.9, em que a partir de 1,78 h a temperatura medida pelo termopar 2 do leito passou a aumentar de forma mais significativa do que a temperatura do

termopar 1 do leito, sendo este utilizado para o controle de temperatura do leito. A diferença da temperatura medida chegou a 40°C. Isto provavelmente ocorreu devido ao cascalho em suspensão ter se aderido no quartzo da guia de onda localizada acima do termopar 1 do leito, o que bloqueou parcialmente a passagem das micro-ondas e resultou na diminuição da temperatura do leito naquele ponto. Após o desligamento dos kits micro-ondas, as temperaturas medidas pelos dois termopares do leito voltaram a ficar próximas devido a troca de cascalho entre as células de mistura do eixo de agitação, o que ajudou na homogeneização da temperatura do leito.

A suspensão de material particulado foi causada pela agitação do leito do *Microwave Paddle Dryer* e se intensificava à medida que o cascalho se tornava mais seco devido a secagem. A Figura 4.13 mostra a guia de onda coberta pelo cascalho que se aderiu ao condensado de vapor orgânico e causou o bloqueio da guia de onda. O acúmulo de cascalho também ocorria nos dutos de sucção, pontos de tomada de pressão e injeção de nitrogênio, como mostrado na Figura 4.14 para o experimento 3. Era necessária a limpeza destas partes do equipamento entre os experimentos realizados.



Figura 4.13: Guia de onda coberta pelo cascalho que estava em suspensão na cavidade do *Microwave Paddle Dryer*.

O acúmulo de material no quartzo da guia de onda observado no experimento 3, que gerou a diferença de temperatura medida entre os dois termopares presentes no leito, motivou mais uma alteração para otimizar a segurança operacional do sistema de controle do processo. Foi implementada uma estrutura condicional no sistema de controle para que o termopar que apresentasse a maior temperatura medida no leito fosse o sensor utilizado para a comparação

com o valor definido para o *set point*. Isto aumentou a segurança operacional já que evita problemas causados pelo acúmulo de material no quartzo da guia de onda, falha de kits ou um *hot spot* no leito. O fluxograma de controle e segurança para o processo é mostrado na Figura 4.15, sendo T_{L1} e T_{L2} , as temperaturas medidas no leito pelos termopares nas posições 1 e 2, respectivamente, T_{V1} e T_{V2} , as temperaturas medidas na fase vapor pelos termopares nas posições 1 e 2, respectivamente, e $T_{Control}$, $T_{Set\ point}$ e ΔT_{Tol} a temperatura controlada, o *set point* de temperatura do controlador e a tolerância de variação da temperatura para a atuação do sistema de controle *on-off*.

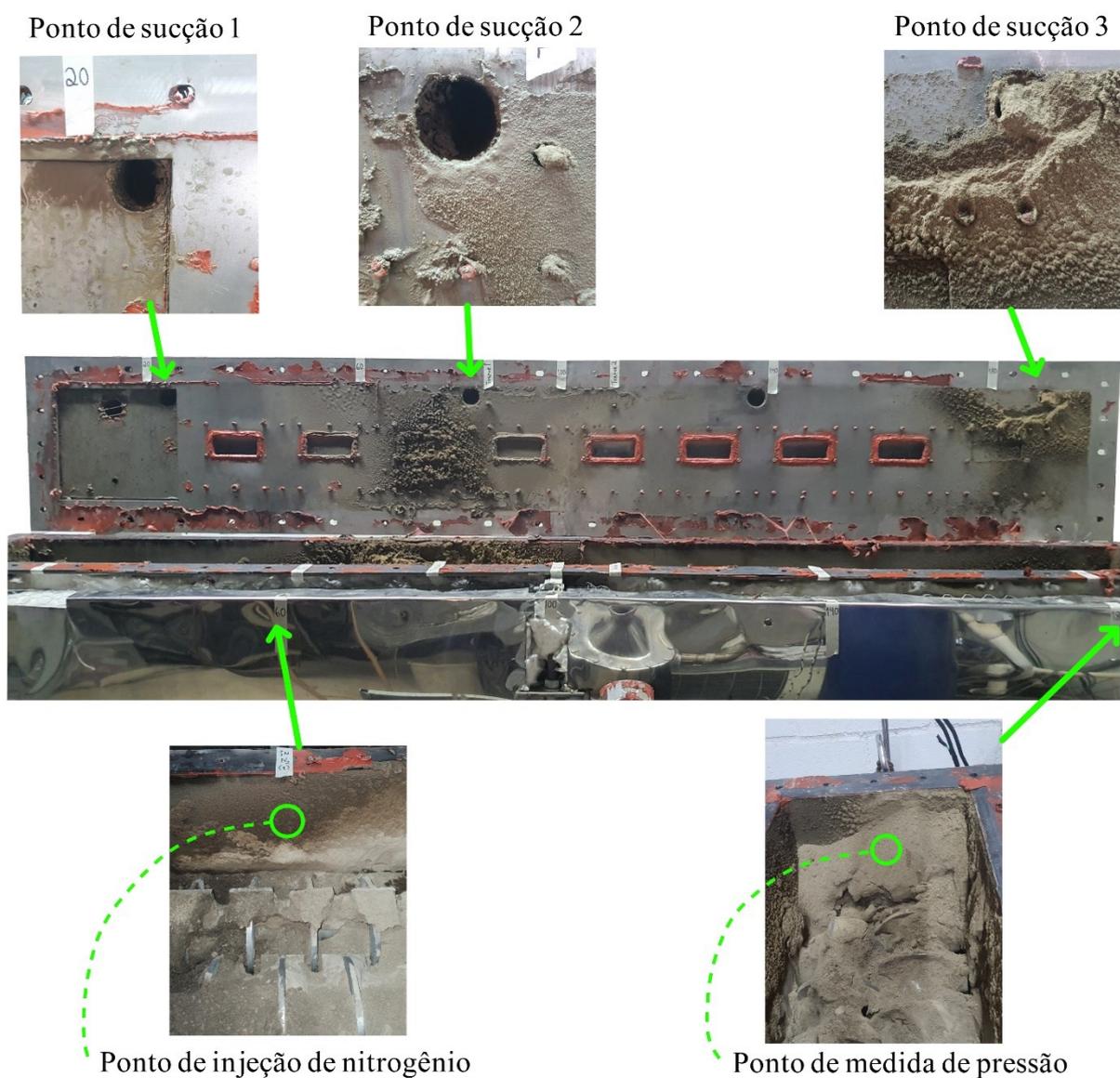


Figura 4.14: Acúmulo do cascalho em diferentes pontos do casco do *Microwave Paddle Dryer*.

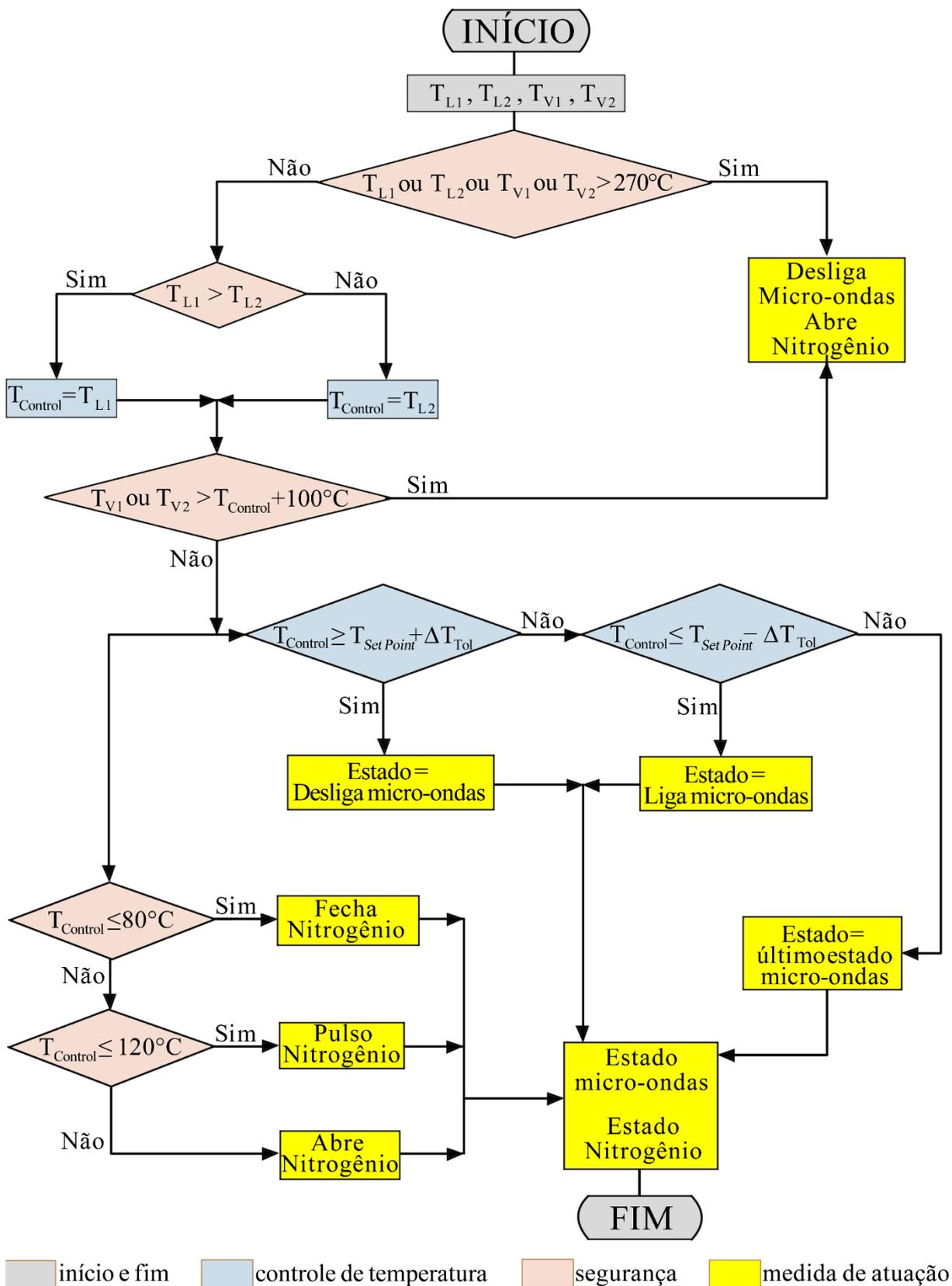


Figura 4.15: Fluxograma do sistema de controle e segurança desenvolvido para o *Microwave Paddle Dryer*.

Em relação ao sistema de agitação, para os experimentos 3, 4 e 5, a potência e o torque consumidos pelo motor diminuíram com o aumento da temperatura do leito até os 100°C, como mostrado em “b” nas Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, respectivamente. Após isso houve um ligeiro aumento na potência consumida quando a taxa de evaporação de água começou a diminuir e a de orgânicos aumentar. Quando a energia específica estipulada foi atingida, ocorreu o desligamento das micro-ondas e a potência e o torque consumidos começaram a diminuir à medida que a temperatura do leito diminuía. Estas alterações ocorreram devido as variações na composição, temperatura e quantidade de material incrustado no leito, que alteram as necessidades de consumo energético do motor (TADEUSZ, 2003). Já a diferença nos valores da potência e do torque consumidos entre os experimentos 3, 4 e 5, considerando uma mesma etapa do processo de secagem, são relacionadas aos diferentes valores de rotação do eixo de agitação, como descrito pela Equação 2.1 (WEG[a], 2021).

O *Microwave Paddle Dryer* apresentou um potencial satisfatório para a descontaminação dos cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica, permitindo a análise de diversas características operacionais. Estas observações devem ser consideradas para a futura modificação do equipamento para o modo contínuo.

Uma consideração importante em relação ao processo de secagem em modo batelada está relacionada ao gasto energético necessário para o aquecimento do casco e das partes móveis do sistema agitação, visto que a geometria do *Microwave Paddle Dryer* é voltada para a operação em modo contínuo. Sendo assim, a razão entre a massa do equipamento e a massa de cascalho no leito é alta, o que impactou de maneira negativa a eficiência de secagem.

Em virtude das melhorias significativas que a operação em modo contínuo traria, a próxima seção é voltada para o estudo da dinâmica das partículas no leito do equipamento, utilizando areia e sem aplicação das micro-ondas.

4.2. Resultados e discussão dos ensaios da dinâmica das partículas no leito

4.2.1. Resultados dos ensaios da dinâmica de leito em modo batelada com areia

Os resultados dos experimentos para a análise de dinâmica do leito em modo batelada são apresentados na Tabela 4.5, para a velocidade radial das partículas (v_{rad}) e o consumo de potência (P) e torque (T) pelo motor em função do nível de preenchimento do leito (V_0) e da velocidade de rotação do eixo de agitação (n_{rpm}).

No gráfico da Figura 4.16 estão plotados os dados para a potência (P) e o torque (T) consumidos pelo motor, sendo possível observar que para valores constantes de rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), tanto a potência (P) quanto o torque (T) aumentaram linearmente com o aumento do nível de preenchimento do leito (V_0). Já para valores constantes de nível de preenchimento do leito (V_0), a potência (P) aumentou não-linearmente e o torque (T) diminuiu não-linearmente com o aumento da rotação do eixo de agitação (n_{rpm}). As variações entre torque e a potência do motor variam de acordo com o processo e são um parâmetro importante para o dimensionamento de sistemas mecânicos em equipamentos industriais (WEG, 2016).

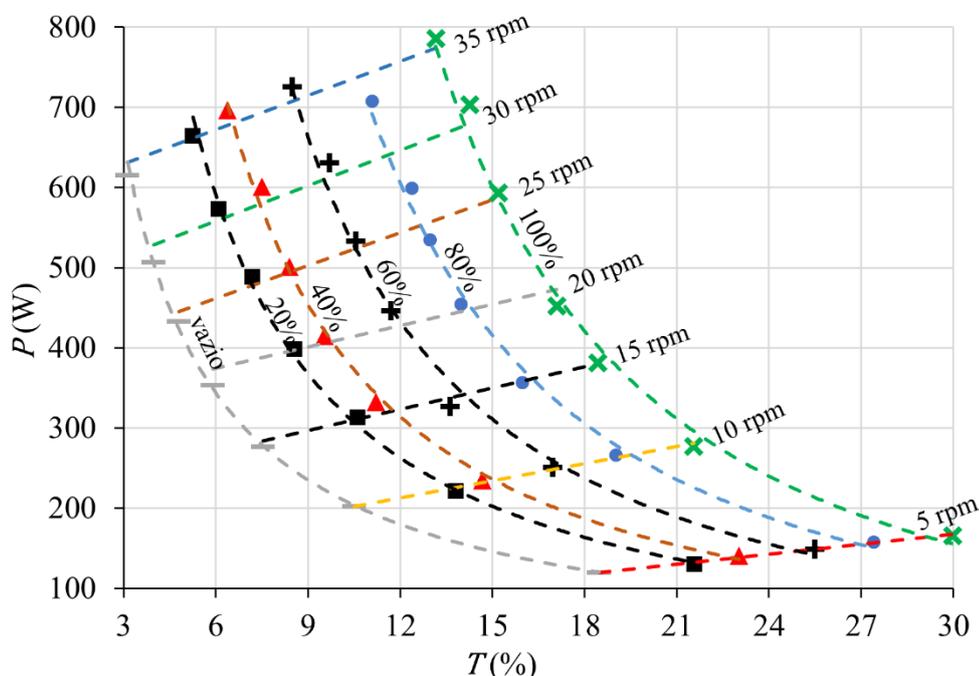


Figura 4.16: Relação entre a potência e o torque consumidos pelo motor em modo batelada em função da rotação do eixo de agitação e do nível de preenchimento do leito.

Tabela 4.5: Resultados dos ensaios de dinâmica do leito em modo batelada com areia.

Exp	$V_{\%}(\%)$	$n_{rpm}(rpm)$	$P(W)$	$T(\%)$	v_{rad}
B.1	20%	5	129,7±2,2	21,6±0,3	4,897±0,104
B.2	20%	10	220,7±2,5	13,8±0,2	5,839±0,520
B.3	20%	15	312,8±4,8	10,6±0,2	7,094±0,447
B.4	20%	20	398,3±6,0	8,6±0,1	8,011±0,249
B.5	20%	25	487,9±6,2	7,2±0,2	7,977±0,353
B.6	20%	30	572,6±8,0	6,1±0,1	8,217±0,056
B.7	20%	35	664,2±5,7	5,3±0,1	9,975±0,296
B.8	40%	5	140,8±1,4	23,0±0,5	4,827±0,034
B.9	40%	10	234,9±10,1	14,7±0,5	5,510±0,099
B.10	40%	15	332,5±4,1	11,2±0,3	5,066±0,125
B.11	40%	20	414,9±11,7	9,5±0,3	5,093±0,151
B.12	40%	25	500,9±9,3	8,4±0,3	5,405±0,460
B.13	40%	30	600,9±7,9	7,5±0,2	6,505±0,070
B.14	40%	35	696,1±8,3	6,4±0,2	6,280±0,027
B.15	60%	5	149,4±7,8	25,5±0,9	1,637±0,015
B.16	60%	10	251,0±9,7	17,0±0,6	3,088±0,206
B.17	60%	15	326,0±15,4	13,6±0,5	3,918±0,607
B.18	60%	20	446,1±10,2	11,7±0,4	4,422±0,071
B.19	60%	25	533,5±7,3	10,6±0,3	6,134±0,072
B.20	60%	30	630,8±10,8	9,7±0,3	6,719±0,299
B.21	60%	35	725,8±9,9	8,5±0,3	7,357±0,046
B.22	80%	5	157,8±3,0	27,4±0,8	1,327±0,040
B.23	80%	10	266,8±3,7	19,0±0,7	2,751±0,106
B.24	80%	15	357,4±11,5	16,0±0,6	3,873±0,007
B.25	80%	20	454,9±21,1	14,0±0,6	5,186±0,134
B.26	80%	25	535,3±20,7	13,0±0,5	6,384±0,296
B.27	80%	30	599,3±9,4	12,4±0,3	7,160±0,098
B.28	80%	35	708,2±11,4	11,1±0,4	8,129±0,427
B.29	100%	5	165,6±2,3	30,0±0,8	0,877±0,007
B.30	100%	10	277,3±3,2	21,6±0,7	1,814±0,022
B.31	100%	15	381,5±7,3	18,4±0,5	2,746±0,120
B.32	100%	20	452,1±9,3	17,1±0,5	3,615±0,140
B.33	100%	25	593,5±8,6	15,2±0,4	4,743±0,003
B.34	100%	30	703,3±8,1	14,3±0,4	5,654±0,169
B.35	100%	35	786,0±25,9	13,2±0,5	6,767±0,029

Os resultados para a velocidade radial média (v_{rad}), calculada através da Eq. 3.8, são mostrados graficamente na Fig. 4.17. A velocidade radial média (v_{rad}) variou em uma ordem de grandeza entre 10^0 e 10^1 .

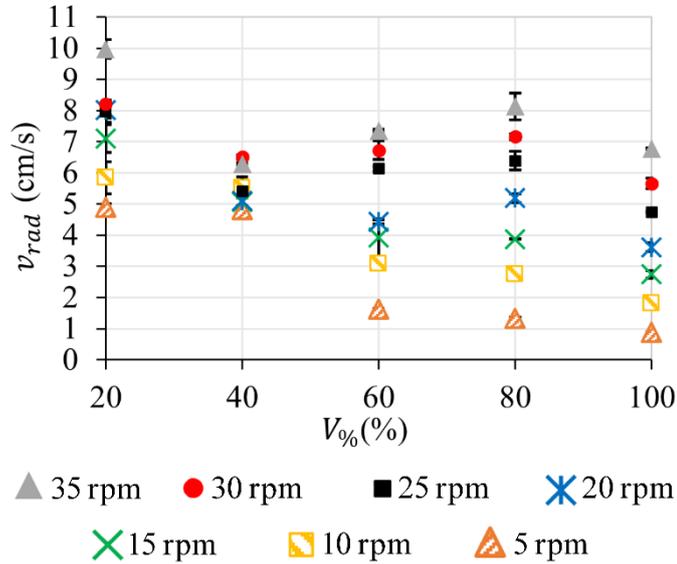


Figura 4.17: Velocidade radial das partículas na superfície do leito.

O nível de preenchimento do leito ($V_{\%}$) e a rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) influenciaram significativamente a velocidade média radial (v_{rad}). O aumento da rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) contribuiu para o aumento da velocidade média radial (v_{rad}), enquanto o aumento do nível de preenchimento do leito ($V_{\%}$) influenciou na redução da velocidade média radial (v_{rad}). Estas tendências são mostradas no modelo ajustado da Equação 4.1, com coeficiente de determinação de $R^2=0,90$, e em sua superfície de resposta correspondente na Figura 4.18.

$$v_{rad}(cm/s) = 7,22265 - 0,116993V_{\%} - 0,080408n_{rpm} + 0,000419V_{\%}^2 + 0,001357V_{\%}n_{rpm} \quad (4.1)$$

As modificações nos mecanismos de transporte radial ocorreram somente para variações no nível de preenchimento do leito e foram classificados como: avalanche (Av), queda (Qu), convecção (Co), cisalhamento (Ci) ou rolamento (Ro). Na Figura 4.19 são mostradas as fotos do leito com as indicações dos mecanismos de transporte na direção radial. O deslocamento radial (S_{rad}) das partículas em função do tempo (t) é mostrado nos gráficos da Figura 4.20. Por meio dos perfis de deslocamento radial (S_{rad}) em função do tempo (t) e das fotos da superfície

do leito, foi possível inferir sobre a distribuição radial das partículas, conforme representado na Figura 4.21.

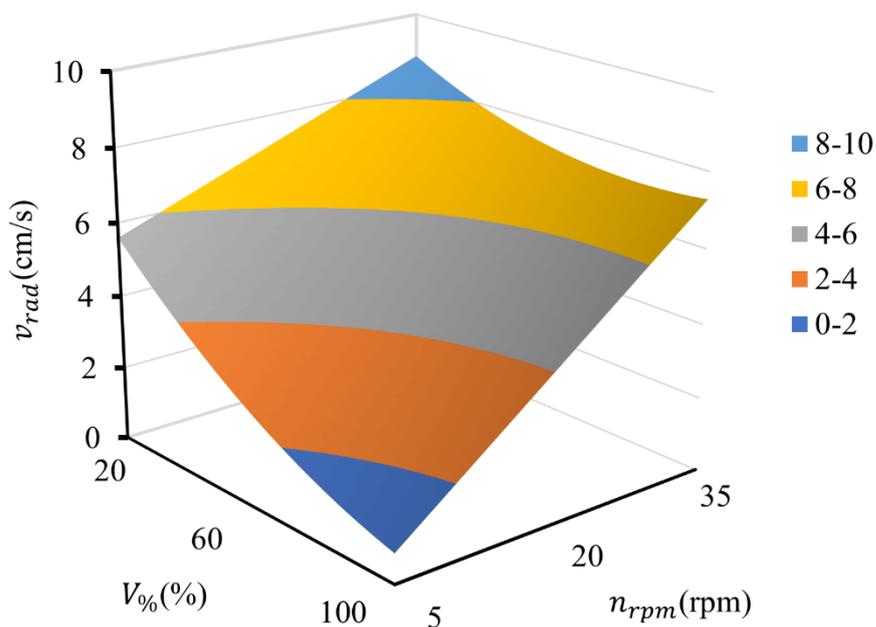


Figura 4.18: Superfície de resposta para a velocidade radial média (v_{rad}) das partículas no leito em função do nível de preenchimento ($V_{\%}$) e da rotação do eixo de agitação (n_{rpm}).

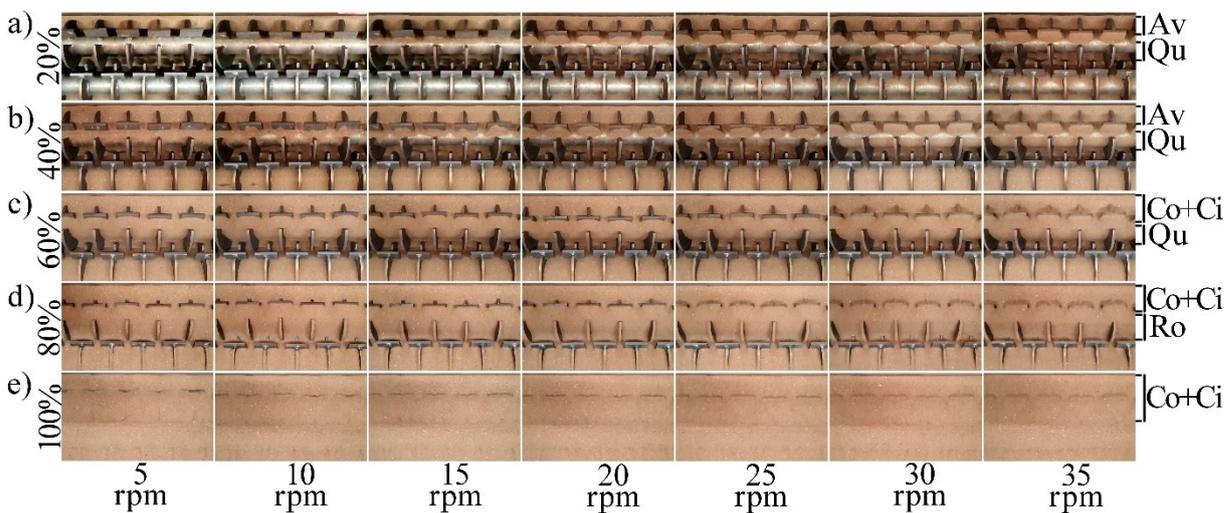


Figura 4.19: Fotos do leito nas diferentes condições experimentais nos ensaios de dinâmica das partículas em modo batelada

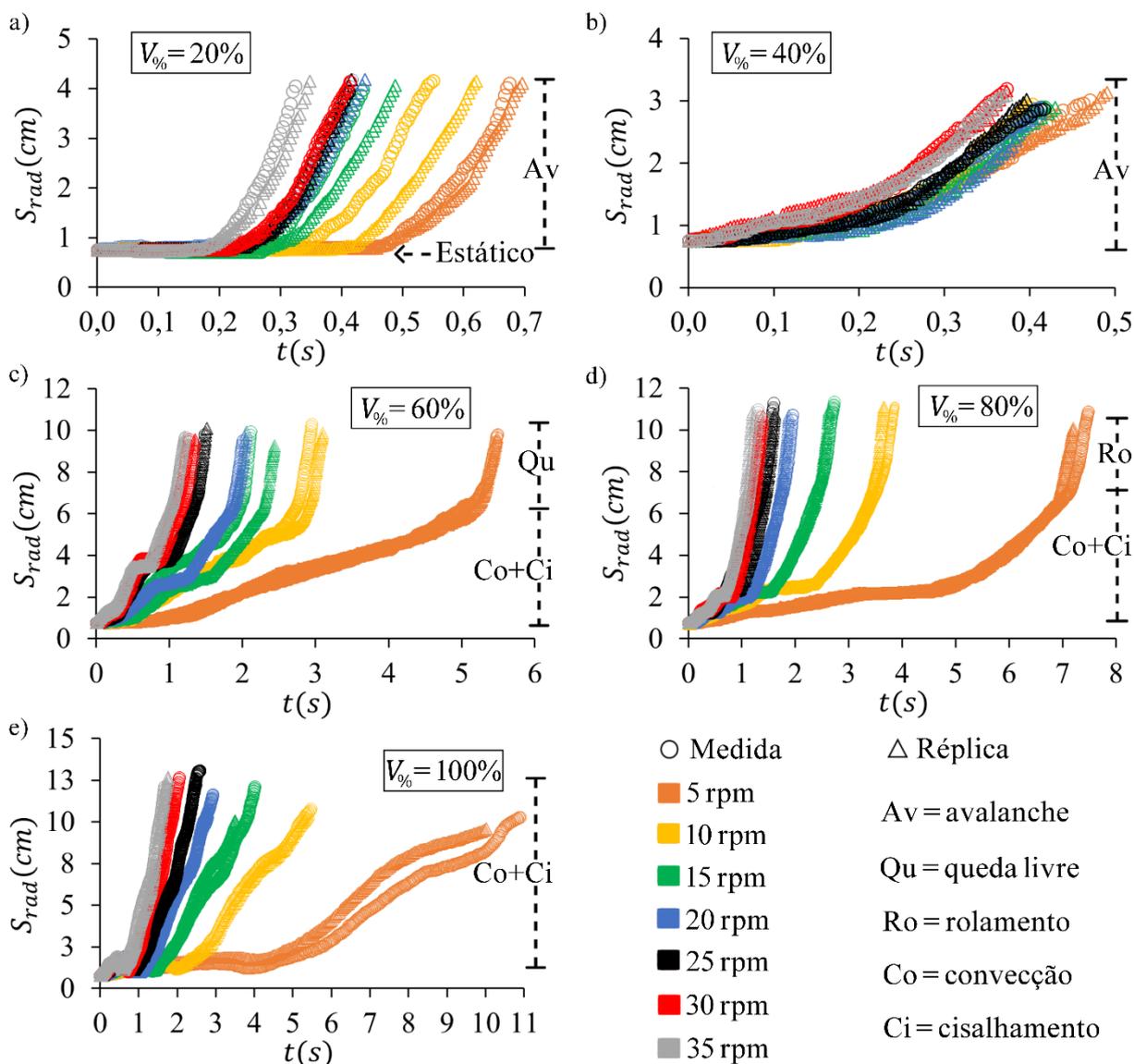


Figura 4.20: Deslocamento radial das partículas (S_{rad}) em função do tempo (t) para os experimentos em modo batelada para os níveis de preenchimento do leito ($V_{\%}$) de a) 20%, b) 40%, c) 60%, d) 80%, e e) 100%.

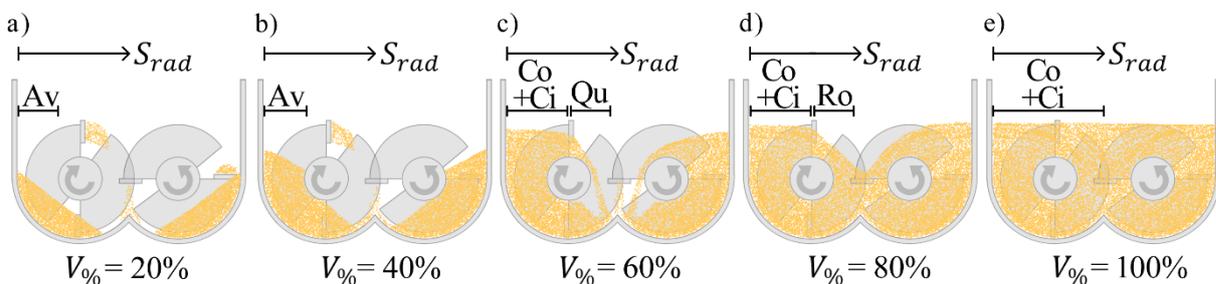


Figura 4.21: Perfil do nível de preenchimento do leito ($V_{\%}$) para a) 20%, b) 40%, c) 60%, d) 80%, e f) 100%.

Nível de preenchimento do leito de 20%

A partir da observação das fotos do leito em “a” na Figura 4.19 e como ilustrado em “a” na Figura 4.21, a maioria das partículas de areia não se moveu em direção ao centro radial do equipamento para o nível de preenchimento do leito ($V_{\%}$) em 20%, permanecendo entre o casco lateral e o eixo de agitação. Foi observado o mecanismo de transporte por avalanche (Av), que é caracterizado por uma condição inicial estática do leito, com o início da avalanche (Av) causado pelo contato das pás com o leito. Isto é indicado no gráfico “a” da Figura 4.20 para o deslocamento radial (S_{rad}) das partículas em função do tempo (t). Durante a fase de avalanche, a taxa de deslocamento radial em função do tempo (dS_{rad}/dt) foi constante para os diferentes valores de rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), como indicado no gráfico “a” da Figura 4.20. O movimento das partículas em direção ao centro radial do leito só ocorreu para as partículas que eram suspensas e lançadas pelas pás de mistura devido ao movimento de rotação do eixo de agitação. A quantidade de partículas lançadas em direção ao centro do equipamento aumentou com o aumento da rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) em virtude da maior energia cinética transmitida às partículas, como pode ser visto nas fotos em “a” na Figura 4.19.

Nível de preenchimento do leito de 40%

No nível de preenchimento do leito de 40% ($V_{\%}$), a maior parte das partículas de areia não se moveu em direção ao centro radial do leito e permaneceu na região entre o eixo de agitação e o casco lateral do equipamento, sendo observado o movimento das partículas no leito somente pelo mecanismo de avalanche (Av). Para o nível de preenchimento do leito de 40%, foi observado os valores mais próximos para a velocidade média radial (v_{rad}), como pode ser observado na Figura 4.17. Isto ocorreu porque o nível de altura do leito ficou próximo do centro do eixo de agitação, que atuou como uma barreira ao deslocamento das partículas, como pode ser visto nas fotos do leito em “b” da Figura 4.19 e na ilustração correspondente para a distribuição das partículas na direção radial em “b” na Figura 4.21. Devido a isto e como observado em “b” na Figura 4.20, o deslocamento radial (S_{rad}) das partículas em função do tempo (t) apresentou perfis semelhantes para diferentes rotações do eixo de agitação (n_{rpm}). Novamente, as partículas que eram direcionadas ao centro radial do leito foram as suspensas e lançadas pelas pás de mistura devido a rotação do eixo de agitação, sendo que este efeito aumentou à medida que a rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) também aumentou, como pode ser visto nas fotos em “b” da Figura 4.19.

Nível de preenchimento do leito de 60%

A partir do nível de preenchimento do leito de 60% (V_0), foi observado o aumento da quantidade de partículas deslocadas em direção ao centro radial do equipamento. O centro radial do leito é o ponto em que os dois eixos de agitação se encontram, sendo uma área com intensa troca de partículas entre as células de mistura (LYU *et al.*, 2021). No nível de preenchimento de 60% não foi mais observado o lançamento das partículas, pois o nível do leito foi alto o suficiente para garantir o contato das pás de mistura na superfície do leito. O aumento no nível de preenchimento do leito melhorou o mecanismo de convecção (Co) devido ao melhor contato entre as pás de mistura e as partículas. Isto, por sua vez, também promoveu o maior deslocamento das partículas pelo mecanismo de cisalhamento (Ci), já que este mecanismo nunca ocorre sozinho (LACEY, 2007). Devido ao sentido de rotação do eixo, a maior parte do material permaneceu entre o eixo de agitação e o casco lateral sobre mecanismos de transporte de convecção (Co) e cisalhamento (Ci), conforme pode ser visto nas fotos em “c” na Figura 4.19. Este acúmulo de partículas nas laterais do leito criou um vazio de material particulado no centro radial do leito, o que resultou no mecanismo de queda (Qu) das partículas quando estas passavam sobre o eixo de agitação em direção ao centro radial, conforme ilustrado em “c” na Figura 4.21. Como pode ser visto no gráfico “c” da Figura 4.20, houve um aumento abrupto na taxa de deslocamento radial (dS_{rad}/dt) para a posição em torno de $S_{rad} = 7,15\text{cm}$, em razão da transição dos mecanismos de convecção (Co) e cisalhamento (Ci) para a queda (Qu) das partículas após estas cruzarem o eixo de agitação. É possível observar que para a convecção (Co) e o cisalhamento (Ci), aumentos na rotação do eixo (n_{rpm}) influenciaram fortemente a taxa de deslocamento radial (dS_{rad}/dt), como indicado no gráfico “c” da Figura 4.20. Em contraste, para o mecanismo de transporte por queda (Qu), as taxas no deslocamento radial (dS_{rad}/dt) foram semelhantes para todos os valores de rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), como pode ser visto nas indicações do gráfico “c” da Figura 4.20 para $S_{rad} > 7,15\text{cm}$, sendo que isto ocorreu porque as partículas são influenciadas fortemente pela força gravitacional neste mecanismo, resultando em uma aceleração contante.

Nível de preenchimento do leito de 80%

No nível de preenchimento do leito de 80% (V_0), notou-se um aumento na quantidade de partículas que se deslocava para o centro radial do equipamento em virtude do melhor contato do leito com as pás de mistura. Os mecanismos de transporte por convecção (Co) e

cisalhamento (Ci) foram observados na região entre o casco lateral e o eixo de agitação, já o mecanismo de transporte de partículas por rolamento (Ro) foi observado para as partículas que passavam pelo eixo de agitação em direção ao centro radial, conforme indicado nas fotos do leito em “d” na Figura 4.19 e ilustrado em “d” na Figura 4.21. Os mecanismos de convecção (Co) e cisalhamento (Ci) foram significativamente influenciados pela rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), apresentando grandes variações nas taxas de deslocamento radial (dS_{rad}/dt), como indicado no gráfico “d” na Figura 4.20 para $S_{rad} < 7,15\text{cm}$. Para o mecanismo de rolamento (Ro), a taxa de deslocamento das partículas (dS_{rad}/dt) foi pouco influenciada pela rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), como pode ser visto no gráfico “d” na Figura 4.20 para $S_{rad} > 7,15\text{cm}$. Isto ocorreu porque o mecanismo de transporte por rolamento (Ro) é fortemente influenciado pela gravidade.

Nível de preenchimento do leito de 100%

No nível de 100% de preenchimento do leito ($V_{\%}$), a superfície do leito estava no limite do contato com as pás de mistura, como pode ser visto nas fotos em “e” na Figura 4.19. Os mecanismos de transporte observados foram somente a convecção (Co) e o cisalhamento (Ci), já que o leito atingiu um nível uniforme em toda a sua extensão radial. Desta forma, o deslocamento radial (S_{rad}) ao longo do tempo (t) apresentou um perfil sem alterações abruptas quando comparado aos outros níveis de preenchimento do leito ($V_{\%}$), como pode ser observado no gráfico “e” da Figura 4.20. Isto refletiu nos menores valores de velocidade radial média (v_{rad}), como pode ser visto na Figura 4.17.

Os resultados demonstraram que o nível de preenchimento do leito ($V_{\%}$) impactou significativamente os mecanismos de transporte e a trajetória das partículas na direção radial. Além disso, o deslocamento radial das partículas (S_{rad}) ao longo do tempo (t) foi influenciado tanto pela rotação do eixo (n_{rpm}) quanto pelo nível de preenchimento do leito ($V_{\%}$), o que se refletiu na velocidade radial média (v_{rad}). Embora não tenha sido abordado neste trabalho, o nível de preenchimento do leito e a rotação do eixo de agitação apresentam influência na eficiência da mistura (EBRAHIMI *et al.*, 2018, JADIDI *et al.*, 2022, LEGOIX *et al.*, 2017, YARAGHI *et al.*, 2018).

Para a operação em modo contínuo, o movimento das partículas também está relacionado à variação do nível do leito, que neste modo de operação pode variar ao longo do leito influenciando o deslocamento tanto na direção radial quanto na axial. As análises da

operação em modo contínuo e os efeitos das variáveis relacionadas ao escoamento axial das partículas são apresentadas a seguir.

4.2.2. Resultados dos ensaios da dinâmica do leito em modo contínuo com areia

Os resultados dos experimentos de operação em modo contínuo para a dinâmica das partículas no leito são apresentados na Tabela 4.6, sendo as imagens da vista superior do leito sob condições de estado estacionário mostradas na Figura 4.22. Foi observada a formação da zona de estagnação nos experimentos C.1 a C.5, já os experimentos C.6 a C.12 apresentaram distribuições de leito mais uniformes. As características da distribuição do leito em condições de estado estacionário estão relacionadas ao transporte de partículas entre as células de mistura, que foi significativamente influenciado pela rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) e pela inclinação do leito (θ).

Tabela 4.6: Resultados dos experimentos de dinâmica do leito em modo contínuo.

Exp.	n_{rpm} (rpm)	H_V (cm)	θ (°)	m_{retida} (kg)	L_{est} (cm)
C.1	4	6,7	0	78,26	154,62
C.2	8	6,7	0	59,42	135,98
C.3	14	6,7	0	49,07	104,04
C.4	20	6,7	0	42,48	69,67
C.5	26	6,7	0	38,19	43,45
C.6	30	6,7	0	36,46	0
C.7	20	6,7	1	32,60	0
C.8	20	6,7	2	23,65	0
C.9	20	6,7	3	18,36	0
C.10	25	11,7	2	51,13	0
C.11	25	6,7	2	19,49	0
C.12	25	1,7	2	13,61	0

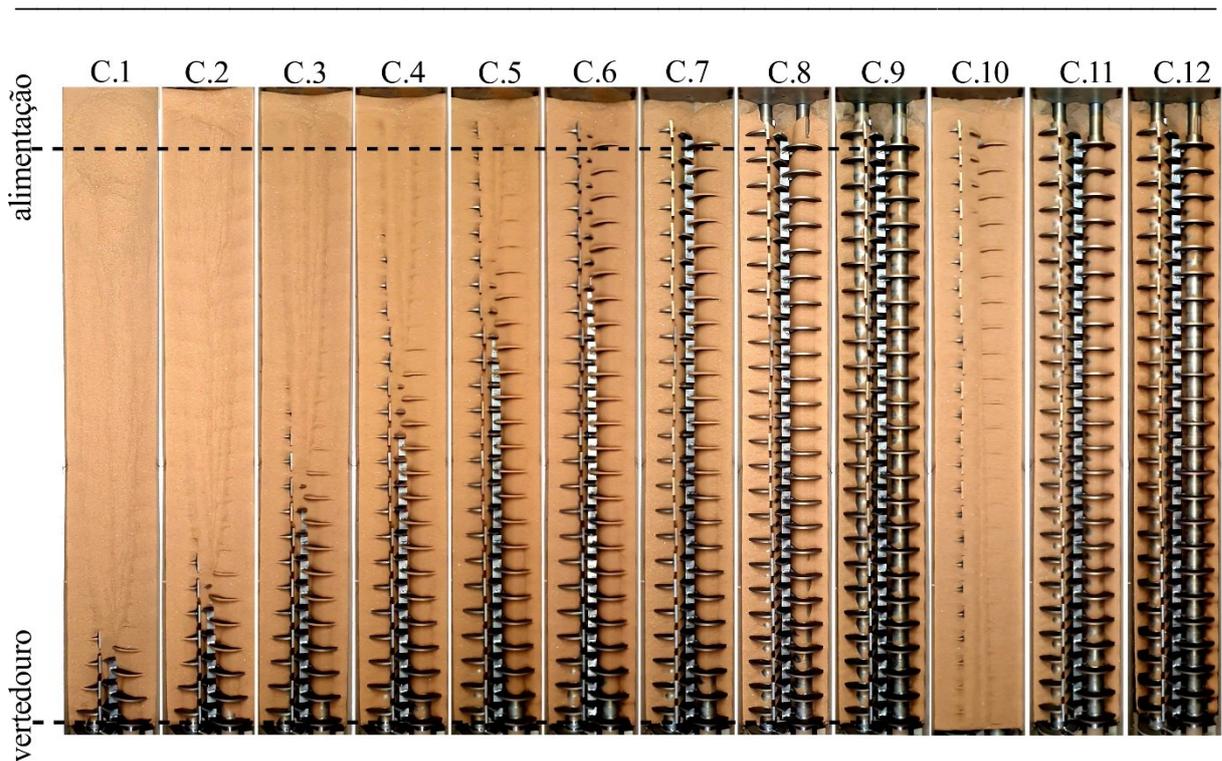


Figura 4.22: Fotos do leito em condições de estado estacionário nos experimentos de dinâmica das partículas em modo contínuo

O gráfico da Figura 4.23 mostra que a relação entre a rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) e o comprimento da zona de estagnação (L_{est}) foi linear para o valor de inclinação do leito de $\theta=0^\circ$, ou seja, na horizontal, ao passo que a relação entre a rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) e a massa de areia retida no leito (m_{retida}) foi não-linear. O aumento na rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) aumentou a transferência de material entre células de mistura adjacentes, acelerando o transporte das partículas alimentadas ao longo do leito. Isto resultou em um nível de leito mais uniforme até o desaparecimento da zona de estagnação (L_{est}). Em relação à redução da massa de areia retida no leito (m_{retida}), a rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) se tornou menos significativa à medida que o leito atingia maior uniformidade de distribuição das partículas, com a redução da massa de areia retida (m_{retida}) sendo limitada até o nível do vertedouro, como pode ser visto nas fotos do leito da Figura 4.22.

A não uniformidade do leito nas condições de formação da zona de estagnação causou variações no nível de preenchimento do leito ao longo da direção axial (S_{axi}), o que alterou os mecanismos de transporte e, conseqüentemente, a velocidade radial média (v_{rad}) das partículas ao longo do leito, como mostrado na foto do deslocamento do traçador no leito para o experimento C.2 na Figura 4.24.

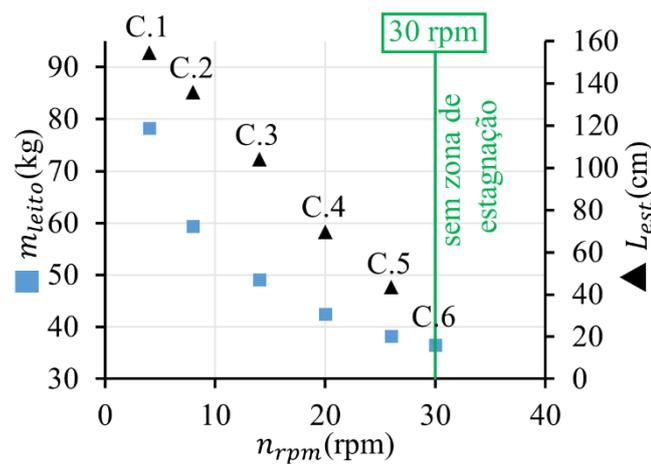


Figura 4.23: Influência da rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) no comprimento da zona de estagnação (L_{est}) e na retenção do leito (m_{retida}).

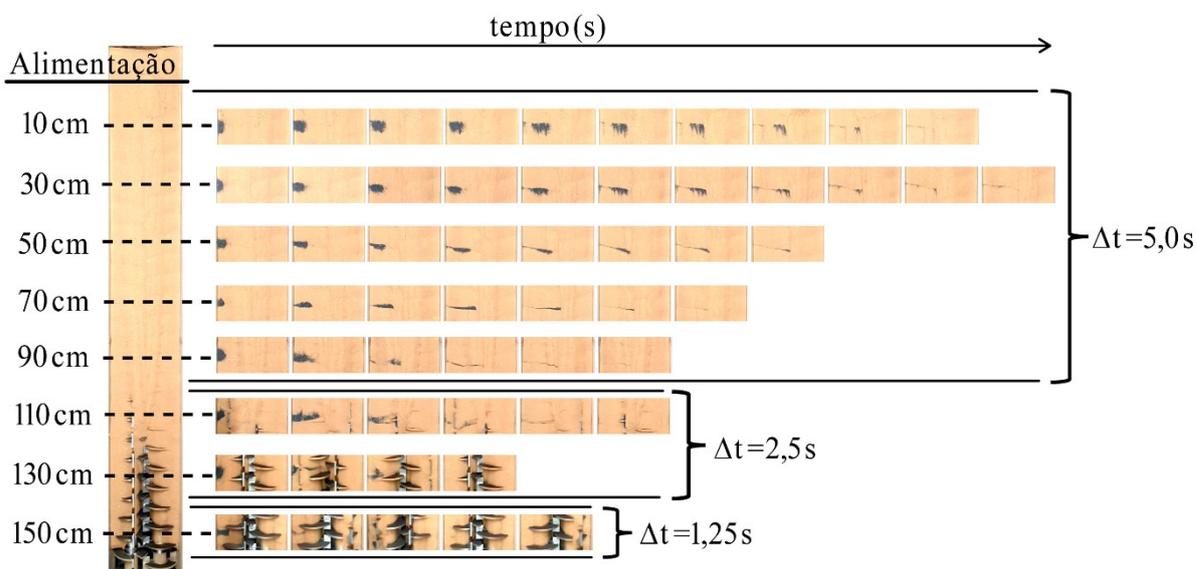


Figura 4.24: Aplicação do traçador em diferentes pontos ao longo do leito e seu deslocamento em relação ao tempo para o equipamento operando em 8rpm e inclinação de 0°.

O gráfico da Figura 4.25 mostra a velocidade radial média (v_{rad}) ao longo da superfície do leito em diferentes posições axiais (S_{axi}) para os experimentos C.1 (4 rpm), C.2 (8 rpm) e C.3 (14 rpm), que apresentaram as maiores não uniformidade de distribuição das partículas. Foi observado que a velocidade radial média (v_{rad}) aumentou à medida que o nível de preenchimento do leito diminuiu ao longo da direção axial (S_{axi}) entre a seção de alimentação e saída das partículas do leito. Como esperado, também foi observado o aumento da velocidade radial média (v_{rad}) com o aumento da rotação do eixo de agitação (n_{rpm}). A redução da velocidade radial média (v_{rad}) indicada pelos pontos “a” e “b” na Figura 4.25 para as posições

axiais (S_{axi}) de 125cm e 145cm, respectivamente, ocorreu porque o nível do leito estava próximo da altura do eixo de agitação, o que restringiu o deslocamento radial (S_{rad}) devido a esta barreira física imposta as partículas.

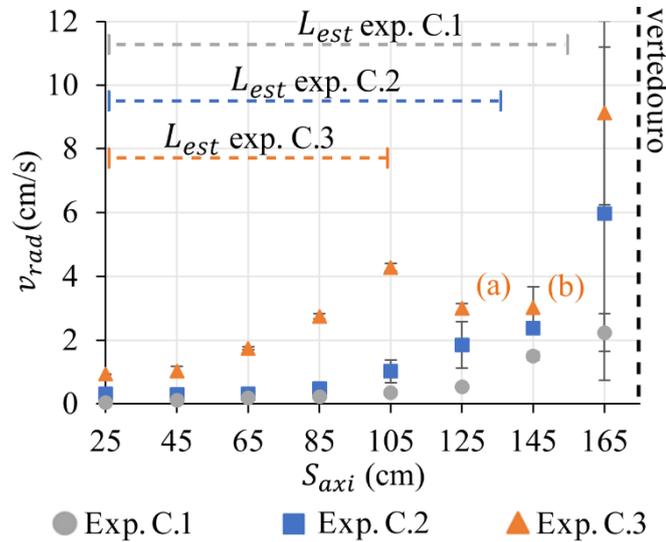


Figura 4.25: Velocidade radial média (v_{rad}) ao longo da direção axial (S_{axi}) em condições de formação da zona de estagnação.

Quanto à variação da inclinação do leito nos experimentos C.7 a C.9, notou-se que valores acima de 1° e 20 rpm foram suficientes para garantir a uniformidade do leito e evitar a formação de zona de estagnação, como mostrado nos resultados apresentados na Tabela 4.6 e nas fotos do leito na Figura 4.22.

Para analisar a influência da altura do vertedouro (H_V) no deslocamento axial (S_{axi}) das partículas, os experimentos C.10, C.11 e C.12 foram realizados com $\theta=2^\circ$ e $n_{rpm}=25$ rpm, condições operacionais que garantiram a distribuição uniforme do leito. A relação entre a posição axial das partículas (S_{axi}) do traçador e o tempo (t) foi linear, como mostrado no gráfico da Figura 4.26 e nos ajustes das curvas para o experimento C.10 na Equação 4.2, com coeficiente de determinação de $R^2=0,998$, experimento C.11 na Equação 4.3, com $R^2=0,999$, e experimento C.12 na Equação 4.4, com $R^2=0,954$. Em virtude da relação linear entre a posição axial (S_{axi}) e o tempo (t), a velocidade axial (v_{axi}) foi constante e correspondente à inclinação da curva ajustada de cada experimento. A ordem de grandeza da velocidade axial (v_{axi}) foi de 10^{-1} , sendo importante ressaltar que a velocidade axial constante ocorreu devido à uniformidade do nível do leito, como mostrado nas fotos do leito na Figura 4.22, sendo que isto resultou em tempos de residência similares nas células de mistura ao longo do leito.

$$S_{axi} = 0,0382t + 17,79 \quad (4.2)$$

$$S_{axi} = 0,0918t + 13,20 \quad (4.3)$$

$$S_{axi} = 0,1356t + 5,24 \quad (4.4)$$

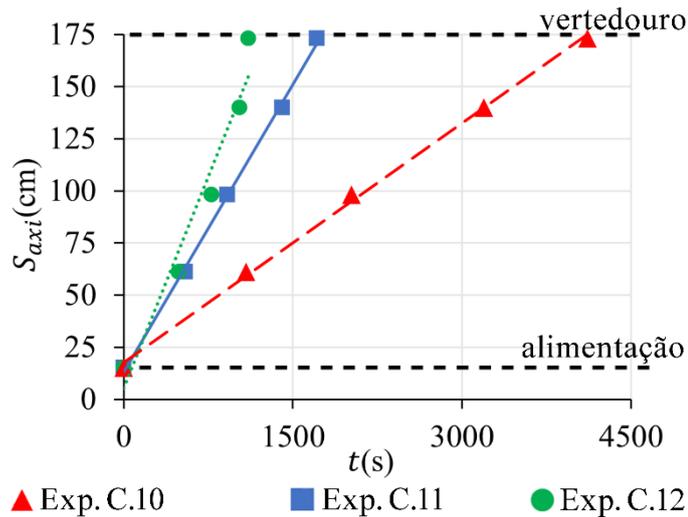


Figura 4.26: Deslocamento axial (S_{axi}) do traçador no leito em função do tempo (t).

A velocidade axial (v_{axi}) foi utilizada para estimar o tempo de residência, T_{aju} , a partir da Equação 4.5, em que $L_{leito}=175\text{cm}$ é o comprimento do leito. O resultado foi comparado com o tempo de residência geométrico, T_{geo} , conforme apresentado pela Equação 3.11 (CHARLOU *et al.*, 2015). Os resultados estão apresentados na Tabela 4.7, com valores similares de tempo de residência estimado (T_{aju}) e tempo de residência geométrico (T_{geo}).

$$T_{aju} = L_{leito}/v_{axi} \quad (4.5)$$

Tabela 4.7: Relação entre a velocidade axial das partículas (v_{axi}) e o tempo de residência.

Exp.	v_{axi} (cm/s)	T_{aju} (s)	T_{geo} (s)	Erro
C.10	0,0382	4581	4601	4,3%
C.11	0,0918	1906	1754	8,7%
C.12	0,136	1209	1225	1,3%

Com base nos resultados observados, a massa de areia retida no leito (m_{retida}) foi reduzida em um quarto quando a altura do vertedouro diminuiu do maior para o menor valor, mudança acompanhada por uma diminuição correspondente no tempo de residência (T_{aju}). As análises realizadas mostraram que a rotação do eixo de agitação (n_{rpm}), a altura do vertedouro (H_V) e a inclinação do leito (θ) influenciaram de maneira distinta a retenção de areia (m_{retida}) e a distribuição de partículas ao longo do leito. Isto ficou evidente quando comparado os resultados dos experimentos C.9 ($n_{rpm}=20$ rpm, $\theta=3^\circ$, $H_V = 6,7$ cm) e C.11 ($n_{rpm}=25$ rpm, $\theta=2^\circ$, $H_V=6,7$ cm), que apresentaram valores próximos de massa de areia retida no leito (m_{retida}) de 18,36 e 19,49 kg, respectivamente, porém diferentes condições operacionais de rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) e inclinação do leito (θ). Da mesma forma, o experimento C.3 ($n_{rpm}=14$ rpm, $\theta=0^\circ$, $H_V=6,7$ cm) com massa de areia retida no leito (m_{retida}) de 49,07kg e o experimento C.10 ($n_{rpm}=25$ rpm, $\theta=2^\circ$, $H_V=11,7$ cm) com massa de areia retida no leito (m_{retida}) de 51,13kg, apresentaram valores similares desta resposta, porém apenas no primeiro houve a formação da zona de estagnação. O entendimento da influência das variáveis relacionadas ao escoamento e distribuição do material ao longo do leito é crucial para garantir a homogeneidade do produto e a previsibilidade do processo. A má distribuição do leito pode comprometer o processo de mistura, gerar zonas mortas e causar exposição desigual do material sob secagem, afetando a qualidade do produto.

O estudo apresentado neste trabalho mostrou que as variáveis relacionadas ao escoamento podem ser utilizadas para garantir a distribuição adequada das partículas ao longo do leito, evitando a formação de áreas como a zona de estagnação e ajustando o tempo de residência de acordo com os requisitos do processo.

A rotação do eixo de agitação se mostrou uma variável influente para a taxa de transferência entre as células de mistura, o que pode ser utilizado para homogeneizar o leito e garantir um tempo de residência uniforme. Já a inclinação do leito pode ser ajustada para aumentar a componente gravitacional na direção axial de escoamento, permitindo o deslocamento mais rápido das partículas e, conseqüentemente, influenciando na homogeneidade do leito. Quanto à altura do vertedouro, seu nível pode ser regulado para garantir os valores adequados de nível de preenchimento do leito e tempo de residência, restringindo a redução da massa de material retida no leito que possa ser causada pelo aumento da rotação do eixo de agitação e da inclinação do leito.

O controle do tempo de residência deve ser utilizado para aumentar a eficiência do processo de secagem no *Microwave Paddle Dryer* numa futura modificação para o modo contínuo, já que menores potências de micro-ondas aplicadas para uma mesma energia específica garantem maiores eficiências de separação na secagem de cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica (MOTA *et al.*, 2019).

A relação da zona de estagnação com a rotação do eixo de agitação e a inclinação mostra a existência de valores críticos operacionais para garantir a distribuição adequada do material ao longo do leito. A boa homogeneização e a agitação superficial do leito aumentam a eficiência da secagem, pois evitam a formação de crostas superficiais que comprometem a saída dos vapores (SCHLÜNDER e MOLLEKOPF, 1984, ARLABOSSE e CHITU, 2007).

Embora os ensaios de dinâmica de leito tenham sido realizados com areia, as variáveis independentes estudadas podem ser combinadas de diferentes maneiras para assegurar a boa distribuição do material no leito, a depender das alterações decorrentes nos seus níveis de coesão, umidade e granulometria durante a secagem, já que segundo Tazaki *et al.* (2011) estas propriedades variam ao longo do leito, influenciando na sua configuração.

Para o *Microwave Paddle Dryer*, a exposição adequada do material na superfície do leito é crucial para a sua operação, já que é o local em que a maior parte das micro-ondas são absorvidas e o aquecimento é mais efetivo. Desta forma, para uma futura modificação do equipamento para a operação de secagem em modo contínuo, manter uma altura adequada e uniforme do material ao longo do leito pode beneficiar a eficiência do processo. A distribuição do material no leito e suas propriedades são características fundamentais na distribuição do campo eletromagnético gerado pelas micro-ondas na cavidade (ROBINSON *et al.*, 2010, SANTOS *et al.*, 2018, FALCIGLIA *et al.*, 2018).

5. CONCLUSÃO

Nesta seção são apresentadas as conclusões do trabalho realizado para os ensaios de secagem e de dinâmica do leito. É também apresentado como os resultados obtidos podem ser utilizados com a finalidade de converter o equipamento para a secagem em modo contínuo no processo de descontaminação de cascalhos.

5.1. Conclusão dos ensaios de secagem

Os experimentos de secagem mostraram que o *Microwave Paddle Dryer* possui a capacidade de descontaminação exigida para a disposição dos cascalhos contaminados com fluido de perfuração de base orgânica de acordo com legislação ambiental vigente no Brasil na data de publicação deste trabalho. Com exceção do experimento 1 de secagem, que precisou ser interrompido devido ao incêndio na cavidade, todos os outros experimentos atingiram teores residuais médios abaixo de 5,9% para os compostos orgânicos provenientes do fluido de perfuração. A temperatura medida pelos termopares não atingiu o valor definido de *set point* de 230°C, já que a energia específica definida para os experimentos era alcançada antes disso, porém foi verificada a saída dos principais constituintes do fluido de perfuração por meio de análise por cromatografia gasosa do condensado dos vapores da cavidade. Isto sugeriu a existência de regiões com temperaturas maiores que as de ebulição dos componentes hexadeceno (285°C) e octadeceno (285 – 315°C), provavelmente na superfície do leito.

A capacidade de descontaminação do equipamento variou ao longo do leito em razão da não homogeneidade do campo eletromagnético gerado pelas micro-ondas na cavidade. Devido a maior incidência das micro-ondas, a parte central do equipamento apresentou os menores teores residuais de orgânicos no cascalho, entorno de 2%. Já a baixa incidência das micro-ondas nas extremidades do leito fez com que estas regiões apresentassem menores temperaturas, o que favoreceu a condensação dos vapores no casco e resultou no retorno dos compostos orgânicos ao leito.

A ocorrência de combustão dos vapores orgânicos na cavidade do *Microwave Paddle Dryer* resultou na implementação de um algoritmo de segurança no sistema de controle que atuava no funcionamento dos kits emissores de micro-ondas e na injeção de inerte (N_2) de acordo com as temperaturas medidas pelos termopares do equipamento. Estas medidas amenizaram o risco operacional, mas não o eliminaram, sendo o aprofundamento da análise de

risco operacional de extrema importância para a operação do *Microwave Paddle Dryer* e sua adaptação para ambientes industriais.

Outra observação importante sobre a operação do equipamento foi a grande quantidade de cascalho que ficava incrustado no eixo e pás de agitação do equipamento após a secagem, valor que chegou a 59,67 % da massa final do cascalho remediado. Este efeito reduz o volume útil do leito e afeta a eficiência de secagem. Uma alternativa para amenizar a incrustação, seria a modificação da geometria das pás e do eixo de agitação, o que reduziria a área de contato disponível para o cascalho se aderir.

Pelos experimentos realizados, concluiu-se que o *Microwave Paddle Dryer* apresentou a capacidade necessária para o propósito do projeto, mesmo em modo batelada. Apesar dos riscos operacionais observados, os experimentos forneceram dados importantes em relação às características operacionais deste equipamento que podem ser utilizados para a sua modificação para o modo contínuo.

5.2. Conclusão dos ensaios de dinâmica do leito com areia

O estudo da dinâmica de leito com areia permitiu a observação das características do escoamento do material no leito do *Microwave Paddle Dryer*. As metodologias experimentais e de análise de imagem mostraram-se eficazes e apresentaram resultados quantitativos consistentes.

Foi observado que alterações no nível de preenchimento do leito alterou os mecanismos de transporte na direção radial e a velocidade radial média das partículas, ao passo que a rotação do eixo de agitação afetou somente a velocidade radial média.

Na operação em modo contínuo, foi observado que a diminuição da altura do vertedouro, o aumento da rotação do eixo de agitação e o aumento da inclinação tiveram o efeito de diminuir a retenção de material no leito, sendo que as três variáveis independentes apresentaram influências distintas na distribuição das partículas ao longo do leito.

A altura do vertedouro atuou na retenção de sólidos como uma barreira física, uma vez que o material presente no leito precisou atingir o nível desta altura para escoar para fora do equipamento. A rotação do eixo de agitação atuou na distribuição do material alimentado ao longo do leito, sendo que quanto maior o seu valor, maior foi a transferência de partículas entre as células de mistura do *Microwave Paddle Dryer*, o que se refletiu na maior uniformidade do

nível do leito. Quanto à inclinação, a influência ocorreu pela alteração do valor da componente gravitacional na direção axial, favorecendo o escoamento das partículas.

Para valores críticos de rotação do eixo de agitação e inclinação, foi observado a formação da zona de estagnação, que apresentou uma relação linear entre seu comprimento e a rotação do eixo de agitação. Também foi verificado que a velocidade radial média das partículas na zona de estagnação aumentou com o aumento da rotação do eixo de agitação e conforme o nível de preenchimento do leito decaiu ao se aproximar da seção de saída.

Para a velocidade axial das partículas de areia, os valores medidos foram constantes e ocorreram em razão da uniformidade do nível do leito em razão das condições experimentais adotadas nestes experimentos. Observou-se que com o aumento da altura do vertedouro, a velocidade axial diminuiu, resultando no aumento do tempo de residência.

Estas variáveis independentes podem ser combinadas de diferentes formas para uma possível modificação do *Microwave Paddle Dryer* para a secagem em modo contínuo, com a finalidade de garantir a escoabilidade do material de acordo com suas características, tais como a densidade, o nível de coesão entre as partículas, a granulometria e o teor de umidade. Além disso, a quantidade de material retido e sua distribuição ao longo do leito afetam a distribuição do campo eletromagnético e a absorção das micro-ondas, sendo estes fatores importantes para a eficiência de secagem (ROBINSON *et al.*, 2010).

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados das análises realizadas, para os trabalhos futuros são sugeridos as seguintes modificações e estudos:

1. Modificação do equipamento para o modo contínuo: alteração do *Microwave Paddle Dryer* para o modo contínuo, o que deve aumentar significativamente a eficiência do processo e a segurança operacional, já que as taxas de geração dos vapores orgânicos são menores e constantes nesse modo de operação, além de ocorrerem concomitantemente com a evaporação da água. Isto auxilia na diluição dos compostos inflamáveis presentes na fase vapor e reduz o risco de combustão (ROWLEY, *et al.* 2011).
2. Simulações: realização de simulações para o estudo da distribuição do campo eletromagnético na cavidade do *Microwave Paddle Dryer* com a finalidade de otimizar a posição das guias de onda.
3. Melhoria na instalação dos kits micro-ondas: durante a manutenção do *Microwave Paddle Dryer* para a troca de peças e na desmontagem do equipamento após o incêndio na cavidade, a configuração de instalação dos kits micro-ondas se mostrou pouco prática. O projeto de uma configuração mais apropriada para a manutenção seria importante para facilitar o reparo do equipamento.
4. Melhorias no sistema de controle e segurança: instalação de mais sensores de temperatura ao longo do leito e de alarmes sonoros e luminosos quando detectados eventos de risco.
5. Otimização da geometria do eixo e pás de agitação: redução da área de contato para a minimização da incrustação do cascalho, conforme sugerido na ilustração da Figura 6.1. Para isso devem ser feitos estudos mais detalhados sobre a resistência mecânica do eixo de agitação e pás de mistura.
6. Estudo de condições seguras para a operação: realização do estudo de como a concentração dos vapores orgânicos pode ser mantida abaixo do limite de inflamabilidade por meio da manipulação da potência de micro-ondas e do fluxo de ar de arraste dos vapores.

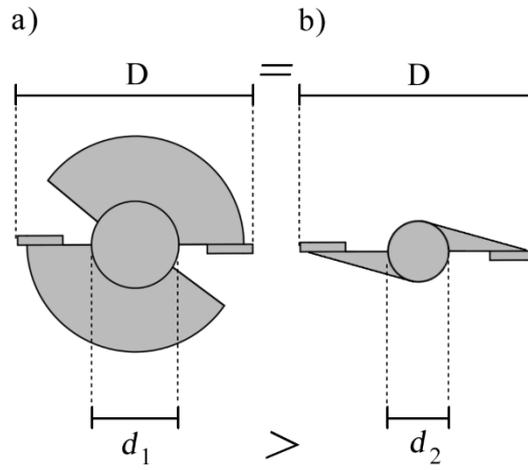


Figura 6.1: Alteração da geometria do sistema de agitação do leito da forma a) atual para a com b) menor área disponível à incrustação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASE, B., OMLAND, T.H., JENSEN, E.K., VESTBAKKE, A.T.L., KNUDSEN, B.S., HALDORSEN, F., NYSTED, A., STORSLETT, E.O., STEINNES, I., ELIASSEN, E.K., ENGER, J., LIE, Ø., PEIKLI, V., Criticality Testing of Drilling-Fluid Solids-Control Equipment, SPE Annual Technical and Exhibition, San Antonio, Estados Unidos, 2013.

ACIERNO, D., BARBA, A.A., D'AMORE, M., PINTO, I.M., FIUMARA, V., Microwaves in soil remediation from VOCs. 2. Buildup of a dedicated device. *AICHe J.*, 2004, Vol. 50, Pg. 722 – 732. <https://doi.org/10.1002/aic.10067>.

AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS - AADE. Shale shakers and drilling fluid systems. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS - ASME. Drilling Fluid Processing Handbook, Burlington, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2005.

APPLETON, T.J., COLDER, R.I., KINGMAN, S.W., LOWNDES, I.S., READ, A.G., Microwave technology for energy-efficient processing of waste, *Applied Energy*, Vol. 81, 2005, Pg. 85 – 113, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.07.002>.

ARAKA, P.P., OKPARANMA, R.N., AYOTAMUNO, J.M. Diagnostic screening of organic contaminant level in solidified/stabilized pre-treated oil-based drill cuttings, *Heliyon*, 2019, Vol. 5, trabalho e02644, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02644>.

ARLABOSSE, P. CHITU, T. Identification of the Limiting Mechanism in Contact Drying of Agitated Sewage Sludge, *Drying Technology: An International Journal*, 2007, Pg. 557-567, DOI: 10.1080/07373930701226955.

ARLABOSSE, P., CHAVEZ, S.; PREVOT, C., Drying of municipal sewage sludge: from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer, *Drying Science and Technology*, 2005, *Braz. J. Chem. Eng.*, Vol. 22, <https://doi.org/10.1590/S0104-66322005000200009>.

ASACHI, M., NOURAFKAN, E., HASSANPOUR, A., A review of current techniques for the evaluation of powder mixing. *Advanced Powder Technology*, 2018, 29(7), Pg. 1525–1549. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.03.031>.

ASLAN, J.F., WEBER, L.I., IANNAcone, J., LUGON JUNIOR, J., SARAIVA, V.B., OLIVEIRA, M.M., Toxicity of drilling fluids in aquatic organisms: a review. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 2019, Vol. 14, <https://doi.org/10.5132/eec.2019.01.04>.

BARBA, A.A., ACIERNO, D., D'AMORE, M., Use of microwaves for in-situ removal of pollutant compounds from solid matrices, *Journal of Hazardous Materials*, 2012, Vol. 207 – 208, Pg. 128 – 135, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.123>.

BARROZO, M. A. S. Notas de aula Planejamento de experimentos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

BIRD, R. B, STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N., Fenômenos de transporte, LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

BOX, G. E. P., HUNTER, J. S., HUNTER, W. G. Statistics for Experiments, (3^a ed.). John Wiley & Sons, New York, Estados Unidos, 2005).

BRIDGES, S., ROBINSON, L. A practical handbook for drilling fluid process, Gulf Professional Publishing, 2020, United States, ISBN: 978-0-12-821341-4, <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00458-X>.

BRIDGWATER, J., Fundamental powder mixing mechanisms. Powder Technology, 1976, 15(2), Pg. 215–236. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(76\)80051-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)80051-4).

BUTTRESS, A.J., HARGREAVES, G., ILCHEV, A., MONTI, T., SKLAVOUNOU, A., KATRIB, J., MARTIN-TANCHEREAU, P., UNTHANK, M.G., IRVINE, D.J, DODDS, C.D., Design and optimization of a microwave reactor for kilo-scale polymer synthesis, Chemical Engineering Science: X, 2019, ISSN 2590-1400, <https://doi.org/10.1016/j.cesx.2019.100022>.

CAPARINO, O.A., NINDO, C.I., TANG, J., SABLANI, S.S., Rheological measurements for characterizing sticky point temperature of selected fruit powders: An experimental investigation, Journal of Food Engineering, 2017, Vol. 195, Pg. 61 – 72, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.09.010>.

CARVALHO, L. L. (2021) Estudo da dinâmica de escoamento da unidade Microwave Paddle Dryer. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG, 81 p. (dissertação de mestrado).

CHAPTER 78 - OIL AND GAS WELLS, Legal Information Institute (LII), Cornell Law Istitute, 2021, Nova Iorque, Estados Unidos, <https://www.law.cornell.edu/regulations/pennsylvania/title-25/part-I/subpart-C/article-I/chapter-78>.

CHARLES, M., SAYLE, S., Offshore Drill Cuttings Treatment Technology Evaluation, SPE international conference on Health, Safety and Environmental in Oil and Gas exploration and Production, Rio de Janeiro, Brazil, Abril de 2010.

CHARLOU, C., MILHE, M., SAUCEAU, M., ARLABOSSE, P., A new methodology for measurement of sludge residence time distribution in a paddle dryer using X-ray fluorescence analysis, water research, 2015, Vol. 69, Pg. 1 – 8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.005>.

CHEN, S., WANG, F., MILHÉ, M., ARLABOSSE, P., LIANG, F., CHI, Y., NZIHOU, A., YAN, J. Experimental and theoretical research on agitated contact drying of sewage sludge in a continuous paddle dryer, Drying Technology, 2016, Pg. 1979 – 1990, DOI: 10.1080/07373937.2016.1147457.

CHEN, Z., ZHOU, J., CHEN, Z., CHEN, H., CHEN, Q., HE, C., LIU, X., YUANJIAN, X., A laboratory evaluation of superheated steam extraction process for decontamination of oil-based drill cuttings, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018, Vol. 6, Pg. 6691-6699, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.040>.

CLARK, D.E, FOLZ D.C, WEST J.K, Processing materials with microwave energy, *Materials Science and Engineering: A*, 2000, Vol. 287, Pg. 153 – 158, ISSN 0921-5093, [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00768-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00768-1).

COBB, M., IRVINE, M., FICHERA, M., Midia Gas Development - Drill Cuttings Disposal – Best Practicable Environmental Option, Documento Projeto 0497814 – exploração de petróleo no mar Negro, 2019.

DENG, W, SU, Y., YU, W., Theoretical Calculation of Heat Transfer Coefficient When Sludge Drying in a Nara-Type Paddle Dryer Using Different Heat Carriers, *Procedia Environmental Sciences*, 2013, Vol. 18, Pg. 709 – 715, ISSN 1878-0296, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.096>.

DENG, W., SU, Y., Scale-Up of Paddle Dryer Based on Experimental Drying Kinetics Data, 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010, Pg. 1 – 4, doi: 10.1109/ICEEE.2010.5660382.

DENG, W.Y, YAN, J.H., LI, X.D., WANG, F., ZHU, X.W., LU, S.Y., CEN, K.F, Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process, *Journal of Hazardous Materials*, 2009[a], Vol. 162, Pg. 186 – 192, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.022>.

DENG, W.Y., YAN, J.H., LI, X.D., WANG, F., LU, S.Y., CHI, Y., CEN, K.F., Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Nara-type paddle dryer, *Chemical Engineering Science*, 2009[b], Vol. 64, Pages 5117 – 5124, ISSN 0009-2509, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.08.015>.

DIMIAN, A. C., BILDEA, C. S., KISS, A. A., Chapter 10 - Process Intensification, *Computer Aided Chemical Engineering*, Elsevier, Vol. 35, 2014, Pg. 397 – 448, ISSN 1570-7946, ISBN 9780444627001, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62700-1.00010-3>.

EBRAHIMI, M, YARAGHI, A., JADIDI, B., EIN-MOZAFFARI, F., LOHI, A., Assessment of bi-disperse solid particles mixing in a horizontal paddle mixer through experiments and DEM. *Powder Technology*, 2021, Vol. 381, Pg. 129–140, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.041>.

EBRAHIMI, M., YARAGHI, A., EIN-MOZAFFARI, F., LOHI, A., The effect of impeller configurations on particle mixing in an agitated paddle mixer, *Powder Technology*, 2018, Volume 332, Pg. 158 – 170, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.061>.

FALCIGLIA, P. P., ROCCARO, P., BONANNO, L. DE GUIDI, G., VAGLIASINDI, F.G.A., ROMANO S., A review on the microwave heating as a sustainable technique for environmental remediation/detoxification applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 95, 2018, Pg. 147 – 170, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.031>.

FALCIGLIA, P.P., MADDALENA, R., MANCUSO, G., MESSINA, V., VAGLIASINDI, F.G.A., Lab-scale investigation on remediation of diesel-contaminated aquifer using microwave energy, *Journal of Environmental Management*, Vol. 167, 2016, Pg. 196 – 205, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.046>.

FERRASSE, J. H., ARLABOSSE, P., LECOMTE, D. Heat, Momentum, And Mass Transfer Measurements In Indirect Agitated Sludge Dryer, *Drying Technology*, 2002, Vol. 20, Pg. 749 – 769, DOI: 10.1081/DRT-120003755.

FOROUTAN, M., HASSAN, M.M., DESROSIERS, N., RUPNOW, T., Evaluation of the reuse and recycling of drill cuttings in concrete applications, *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 164, Pages 400-409, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.180>.

GALEA K.S., MCGONAGLE, C., SLEEUWENHOEK, A., TODD, D., JIMÉNEZ, A.S., Validation and Comparison of Two Sampling Methods to Assess Dermal Exposure to Drilling Fluids and Crude Oil, *The Annals of Occupational Hygiene*, 2014, Vol. 58, Pages 591–600, <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu014>.

HAQUE, K. E., Microwave energy for mineral treatment processes—a brief review, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 57, 1999, Pg. 1 – 24, ISSN 0301-7516, [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00009-5).

HOU, Y., QI, S., YOU, H., HUANG, Z., NIU, Q., The study on pyrolysis of oil-based drilling cuttings by microwave and electric heating, *Journal of Environmental Management*, 2018, Vol. 228, Pg 312 – 318, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.040>.

IBAMA, INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 1, 2 de janeiro de 2018, Brasília, 2018.

JADIDI, B., EBRAHIMI, M., EIN-MOZAFFARI, F., LOHI, A., Mixing performance analysis of non-cohesive particles in a double paddle blender using DEM and experiments, *Powder Technology*, 2022, Vol. 397, 117122, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117122>.

JONES, D.A., LELYVELD, T.P., MAVROFIDIS, S.D., KINGMAN, S.W., MILES, N.J., Microwave heating applications in environmental engineering—a review, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 34, 2002, Pg. 75 – 90, ISSN 0921-3449, [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00088-X).

KARALI, M. A., SPECHT, E., HERZ, F., MELLMANN, J., Different camera and light positions to facilitate image analysis processing in rotary drums studies, *Powder Technology*, 2017, Vol. 306, Pages 55-60, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.013>.

KHODADADI, M., MORADI, L., DABIR, B., NEJAD, F.M., KHODAI, A., Reuse of drill cuttings in hot mix asphalt mixture: A study on the environmental and structure performance, *Construction and Building Materials*, 2020, Vol. 256, 119453, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119453>.

KOSTAS, E.T., BENEROSO, D., ROBINSON, J.P., The application of microwave heating in bioenergy: A review on the microwave pre-treatment and upgrading technologies for biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 77, Pg. 12 – 27, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.135>.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LACEY, P. M. C., Developments in the theory of particle mixing. *Journal of Applied Chemistry*, 2007, 4(5), 257–268. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010040504>.

LEGOIX, L., GATUMEL, C., MILHÉ, M., BERTHIAUX, H., MIZONOV, V., Powder flow dynamics in a horizontal convective blender: Tracer experiments. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, Vol. 121, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.03.002>.

LIMA, R. M. (2017) Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica Lagrangeana. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG, 103 p. (dissertação de mestrado).

LUDLOW-PALAFIX, C., CHASE, H.A., Microwave-Induced Pyrolysis of Plastic Wastes, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2001 Vol. 40, Pg. 4749 – 4756, DOI: 10.1021/ie010202j.

LYU, L., CHEN, S., & WANG, F., Two-dimensional modeling of sewage sludge flow in a double-axis continuous paddle dryer, *Waste Management*, 2021. Vol. 124, Pg. 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.018>.

LYU, L., CHEN, S., WANG, F., Two-dimensional modeling of sewage sludge flow in a double-axis continuous paddle dryer. *Waste Management*, 2021, Vol. 124, Pg. 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.018>.

MALHOTRAF, K., MUJUMDAR, A.S., Model for contact heat transfer in mechanically stirred granular beds, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, Vol. 34, Pg. 415 – 425, ISSN 0017-9310, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(91\)90261-C](https://doi.org/10.1016/0017-9310(91)90261-C).

MARIANO, J., LA ROVERE, E., Environmental impacts of the oil industry. Sunnyvale, CA, USA: LAP Lambert Academic Publishing, 2017.

MENÉNDEZ, J.A., INGUANZO, M., PIS, J.J., Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge, *Water Research*, Vol. 36, 2002, Pg 3261 – 3264, ISSN 0043-1354, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00017-9).

MEREDITH, R., *Engineers' Handbook of industrial Microwave Heating*, London, Institute of Electrical Engineers, 1998.

METAXAS, A. C; MEREDITH, R. *Industrial microwave heating*. London: PeterPeregrinus, 1993.

METAXAS, A.C., *Microwave heating*, 1991, Volume 5, Pg. 237 – 247, DOI: 10.1049/pe:19910047, Print ISSN 0950-3366.

MILHÉ, M., SAUCEAU, M., ARLABOSSE, P., Determination of dry sludge hold-up in a continuous paddle dryer. *ECSM 2014 - 4th European Conference on Sludge Management*, 2014, Izmir, Turkey. 8p., hal-01725292.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MILHÉ, M., SAUCEAU, M., ARLABOSSE, P., Influence of Operating Parameters on Sewage Sludge Drying in a Paddle Dryer: Design of Experiments for the Determination of Hold-Up and Water Content Profiles, *Drying Technology*, 2015, Pg. 1276 – 1285, DOI: 10.1080/07373937.2015.1026976.

MI-SWACO, Offshore TCC Hammermill System, Houston, Texas, USA, 2011.

MOTA, A.C.S., SANTOS, J.M., PEREIRA, M.S., ATAÍDE, C.H., Microwave drying of olefins from drill cuttings and analysis of the organic phase recovered during drying operation, *Oil and Gas Science and Technology*, vol. 75, 2020, <https://doi.org/10.2516/ogst/2019066>.

MOTA, A.C.S., SANTOS, J.M., ROSSI, A.S., DUARTE, C.R., PEREIRA, M.S., ATAÍDE, C.H., 2019, Dielectric properties and microwave drying kinetics of drill cuttings contaminated with synthetic drilling fluid, *Drying Technology*, Pg. 940 – 951, DOI: 10.1080/07373937.2019.1625362.

MOTASEMI, F., AFZAL M.T., A review on the microwave-assisted pyrolysis technique, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, Vol. 28, Pg. 317 – 330, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.008>.

MUJUMDAR, A.S., *Handbook of Industrial Drying* (3^a ed.). CRC Press, 2006, <https://doi.org/10.1201/9781420017618>.

MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., ANDERSON-COOK, C., *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, Estados Unidos, 2016.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Unit Manufacturing Processes: Issues and Opportunities in Research*, 1995, Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/4827>.

Nijssen, T. M. J., Dijk, M. A. H., Kuipers, H. A. M., Stel, J., Adema, A. T., Buist, K. A., Experiments on floating bed rotating drums using magnetic particle tracking. *AIChE Journal*, 2022, 68(5). <https://doi.org/10.1002/aic.17627>.

NOROUZI, H. R., ZARGHAMI, R., MOSTOUFI, N., Insights into the granular flow in rotating drums. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, Vol. 102, Pg. 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.06.010>.

OKORO, E.E., OCHONMA, C., OMEJE, M., SANNI, S.E., EMETERE, M.E., ORODU, K.B., IGWILO, K.C. Radiological and toxicity risk exposures of oil-based mud: health implication on drilling crew in Niger Delta. *Environ Sci Pollut*, 2020, ISSN Pg. 5387 – 5397. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07222-3>.

OSEPCHUK, J. M., A History of Microwave Heating Applications, in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1984, Vol. 32, no. 9, Pg. 1200 – 1224, doi: 10.1109/TMTT.1984.1132831.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PEREIRA, M. S., PANISSET, C. M. A., MARTINS, A. L., MARQUES DE SÁ, C. H., BARROZO, M. A. S., ATAÍDE, C. H., Microwave treatment of drilled cuttings contaminated by synthetic drilling fluid, *Separation and Purification Technology*, Vol. 124, 2014, Pg. 68 – 73, ISSN 1383-5866, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.011>.

PETRI, I., MARTINS, A. L., ATAÍDE, C. H., DUARTE, C. R., Microwave drying remediation of petroleum-contaminated drill cuttings, *Journal of Environmental Management*, Vol. 196, 2017, Pg. 659 – 665, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.068>.

PETRI, I., MARTINS, A.L., DUARTE, C.R., ATAÍDE C.H., Development and performance of a continuous industrial microwave dryer for remediation of drill cuttings, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 176, 2019, Pg. 362 – 368, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.075>.

PETRI, I., PEREIRA, M.S., SANTOS J.M. DUARTE C.R., ATAÍDE C.H., PANISSET C.M.Á., Microwave remediation of oil well drill cuttings, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 134, 2015, Pg. 23 – 29, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.07.022>.

PETROBRAS, Apostila de controle de sólidos: separação de sólidos na perfuração de poços. Rio de Janeiro, 2008.

QATAR CHEMICAL COMPANY LTD, Safety Data Sheet 1-Hexadecene, Doha, Qatar, 2021

QI, S., DU, Y., ZHANG, P., LI, G., ZHOU, Y., WANG, B., Effects of concentration, temperature, humidity, and nitrogen inert dilution on the gasoline vapor explosion, *Journal of Hazardous Materials*, 2017, Vol. 323, Part B, Pg. 593-601, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.040>.

REGIONAL MARINE POLLUTION EMERGENCY RESPONSE CENTRE FOR THE MEDITERRANEAN SEA (REMPEC), Mediterranean offshore guidelines and standards: draft guidance on the disposal of oil and oily mixtures and on the use and disposal of drilling fluids and cuttings, Thirteenth Meeting of the Focal Points of the REMPEC, Malta, Junho de 2019.

ROBINSON, J.P., KINGMAN, S.W., ONOBRAKPEYA, O., Microwave-assisted stripping of oil contaminated drill cuttings, *Journal of Environmental Management*, Vol. 88, 2008[b], Pg. 211 – 218, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.02.009>.

ROBINSON, J.P., KINGMAN, S.W., SNAPE, C.E., BARRANCO, R., SHANG, H., BRADLEY, M.S.A., BRADSHAW, S.M., Remediation of oil-contaminated drill cuttings using continuous microwave heating, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 152, 2009, Pg. 458 – 463, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.008>.

ROBINSON, J.P., KINGMAN, S.W., SNAPE, C.E., BRADSHAW, S.M., BRADLEY, M.S.A., SHANG, H., BARRANCO, R., Scale-up and design of a continuous microwave treatment system for the processing of oil-contaminated drill cuttings, *Chemical Engineering Research and Design*, 2010, Vol. 88, Pg. 146 – 154, ISSN 0263-8762, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.07.011>.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ROBINSON, J.P., SNAPE, C.E., KINGMAN, S.W., SHANG, H., Thermal desorption and pyrolysis of oil contaminated drill cuttings by microwave heating, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 81, 2008[a], Pg. 27 – 32, ISSN 0165-2370, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.07.004>.

ROSSI, A.S., Cinética de aquecimento e secagem, propriedades dielétricas e simulação computacional aplicado ao tratamento de cascalho de perfuração por micro-ondas. Tese de Doutorado. UFU, Uberlândia. 2017.

ROSSI, A.S., FARIA, M.G., PEREIRA, M.S., ATAÍDE, C.H., Kinetics of microwave heating and drying of drilling fluids and drill cuttings, *Drying Technology*, 2017, Pg. 1130 – 1140, DOI: 10.1080/07373937.2016.1233425.

ROWLEY, J.R., ROWLEY R.L., WILDING W.V., Estimation of the lower flammability limit of organic compounds as a function of temperature, *Journal of Hazardous Materials*, 2011, Vol. 186, Pg 551-557, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.039>.

SABOORI, R., SABBAGHI, S., KALANTARIAS, A., Improvement of rheological, filtration and thermal conductivity of bentonite drilling fluid using copper oxide/polyacrylamide nanocomposite, *Powder Technology*, Vol. 353, Pg. 257 – 266, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.038>.

SANTA CRUZ BIOTECHNOLOGY, Material Safety Data 1-Octadecene, Delaware, Estados Unidos, 2010.

SANTOS, J.M., PETRI I., MOTA A.C.S., MORAIS, A.S., ATAÍDE, C.H., Optimization of the batch decontamination process of drill cuttings by microwave heating, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, Vol. 163, Pg. 349 – 358, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.003>.

SCHLÜNDER, E. U., MOLLEKOPF, N., Vacuum contact drying of free flowing mechanically agitated particulate material, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 1984, Vol. 18, Pg. 93 – 111, ISSN 0255-2701, [https://doi.org/10.1016/0255-2701\(84\)85012-6](https://doi.org/10.1016/0255-2701(84)85012-6).

STRACK, J T, BALBAA, I S, AND BARBER, B T. Microwave regeneration of activated carbon for gold processing applications, 1995, United States.

TADEUSZ, K., Sticky Region in Drying – Definition and Identification, *Drying Technology*, 2003, Vol. 8, Pg. 1457 – 1469, <https://doi.org/10.1081/DRT-120024678>.

TAZAKI, M., TSUNO, H., TAKAOKA, M. SHIMIZU, K., Modeling of Sludge Behavior in a Steam Dryer, *Drying Technology: An International Journal*, 2011, Pg. 1748-1757, DOI: 10.1080/07373937.2011.602811.

THOMAS, J.E., Fundamentos de engenharia do petróleo. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras, 2001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VASILENKO, A., KOYNOV, S., GLASSER, B. J., MUZZIO, F. J., Role of consolidation state in the measurement of bulk density and cohesion, *Powder Technology*, 2013, Vol. 239, Pg. 366 – 373, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.02.011>.

WEG, Manual de Programação Inversor de Frequência CFW700 V2.3.X, Documento 10000796176/06 Data de publicação 08/2020, www.weg.net.

WEG, Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM, Documento 5002935 Rev: 13, Data de publicação 01/2016, www.static.weg.net.

WEG[a], Guia de Especificação de Motores Elétricos, Documento: 50032749, Data de publicação 01/2021, www.weg.net.

WEG[b], W22 Motor Elétrico Trifásico, Catálogo Técnico Brasileiro, Download em 01/2021, www.weg.net.

WEG-CESTARI, WCG20 Motorreductores até 18000Nm, Documento WCG20, Data de publicação 09/2019, www.weg.net.

YAN, J.H., DENG, W.Y., LI, X.D., Wang, F., Chi, Y., Lu, S.Y., Cen, K.F., Experimental and Theoretical Study of Agitated Contact Drying of Sewage Sludge under Partial Vacuum Conditions, *Drying Technology*, 2009, Vol. 27, Pg. 787 – 796, DOI: 10.1080/07373930902900911.

YARAGHI, A., EBRAHIMI, M., EIN-MOZAFFARI, F., LOHI, A., Mixing assessment of non-cohesive particles in a paddle mixer through experiments and discrete element method (DEM), *Advanced Powder Technology*, 2018, 29(11), Pg. 2693–2706. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.07.019>.

APÊNDICE A

Análise da dinâmica do leito granular do *Microwave Paddle Dryer* utilizando o método dos elementos discretos

A.1. Geometria do equipamento

Para a redução do custo computacional, a geometria do equipamento considerada para a realização das simulações numéricas correspondeu aos primeiros 500 mm da região do leito do *Microwave Paddle Dryer* conforme apresentado na Figura A.1.

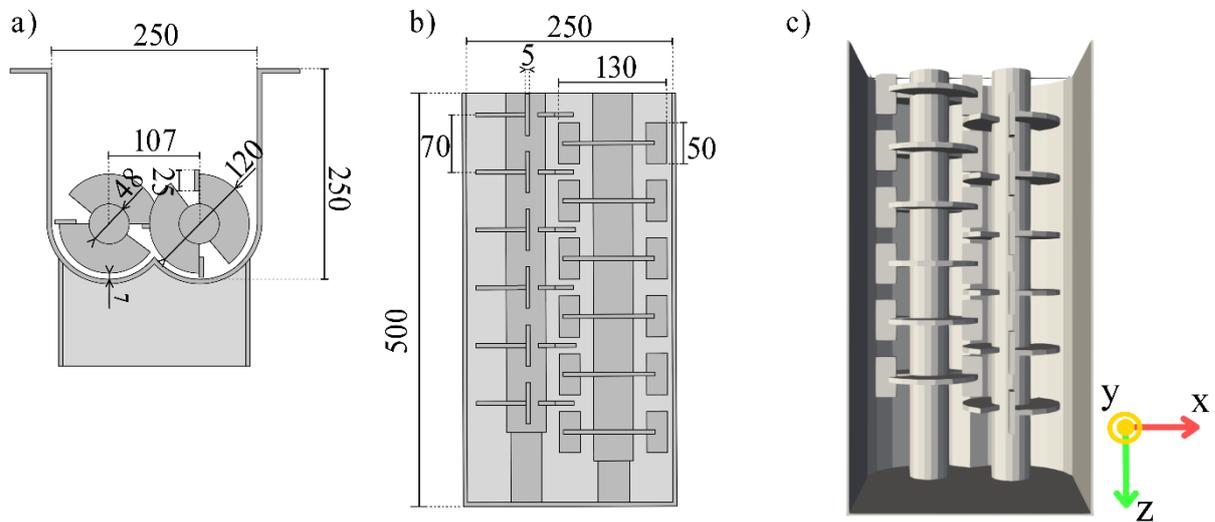


Figura A.1: Dimensões do leito do *Microwave Paddle Dryer* nas simulações e sua a) vista frontal, (b) superior e (c) geometria stl.

A.2. Estudo numérico

Os parâmetros utilizados na modelagem DEM foram coletados na literatura e são apresentados na Tabela A.1 com suas respectivas referências.

A geometria do equipamento foi criada no *software* livre *Gmesh 4.10* e as simulações realizadas com o *software* livre *LIGGGHTS 3.8.0*, sendo estas avaliadas posteriormente via programação *Python* e através do *software* de pós-processamento *Paraview* versão 5.10.1.

O modelo de contato utilizado foi o de Hertz-Mindlin. A duração do tempo de simulação foi de 50 s, sendo o *time-step* fixado em 1×10^{-5} s, equivalente a 12% do passo de tempo de Rayleigh, com o intuito de garantir a estabilidade numérica da simulação (CARVALHO, 2021).

Tabela A.1: Parâmetros DEM.

Parâmetro	Valor	Referência
σ_p [-]	0,22	Lima, 2017
G [Pa]	10^6	Lima, 2017
e_{pp} [-]	0,81	Lima, 2017
e_{pw} [-]	0,90	Lima, 2017
μ_{spp} [-]	0,659	Carvalho, 2021
μ_{spw} [-]	0,382	Carvalho, 2021
μ_{rpp} [-]	0,040	Carvalho, 2021
μ_{rpw} [-]	0,055	Carvalho, 2021
ρ_p [g.cm ⁻³]	1,175	Carvalho, 2021
d_p [mm]	6,49	Carvalho, 2021

A.3. Planejamento experimental

Foi realizado um planejamento composto central (PCC), sendo avaliadas as seguintes variáveis independentes:

1. Rotação do eixo de agitação (X_1): em rotações por minuto (rpm);
2. Massa inicial de partículas no leito (X_2): massa em kg das partículas no leito no instante inicial da simulação;
3. Inclinação do leito (X_3): inclinação descendente em graus na direção z, no sentido do favorecimento do deslocamento das partículas para fora do leito.

As respostas foram analisadas no intervalo de tempo de simulação entre 10 e 50 segundos. Essa escolha foi pelo fato de o sistema apresentar melhor estabilidade nas velocidades analisadas e na taxa de saída das partículas a partir de 10s. Esta consideração eliminou o efeito do leito partindo da condição de repouso em que se encontra no instante de 0 segundos da simulação (CARVALHO, 2021).

As respostas analisadas foram:

1. Variação da massa no leito (ΔM): variação da massa no leito em kg entre o início e o fim do intervalo de análise da simulação;
2. Velocidade média na direção x ($\overline{v_x}$): velocidade média em cm/s das partículas no leito na direção radial (eixo-x);

3. Velocidade média na direção y ($\overline{v_y}$): velocidade média em *cm/s* das partículas na direção vertical(eixo-y);
4. Velocidade média na direção z ($\overline{v_z}$): velocidade média em *cm/s* das partículas na direção axial (eixo-z);
5. Velocidade resultante ($\overline{v_{res}}$): magnitude média do vetor velocidade em *cm/s* das partículas no leito.

O PCC com 3 fatores foi composto por 8 pontos fatoriais, 6 pontos axiais e dois pontos centrais, resultando em 16 simulações, com um alfa de ortogonalidade de 1,287. Os níveis experimentais para as variáveis independentes são apresentados na Tabela A.2.

Tabela A.2: Níveis das variáveis independentes.

Nível	Rotação do eixo de agitação (rpm) [X ₁]	Massa inicial de partículas no leito (kg) [X ₂]	Inclinação do leito (°) [X ₃]
-1,287	3,6	2	0
-1	5	3	0,33
0	10	6,5	1,5
1	15	10	2,67
1,287	16,4	11	3

Para o cálculo das velocidades médias entre 10 e 50s de simulação nas direções x ($\overline{v_x}$), y ($\overline{v_y}$) e z ($\overline{v_z}$), foi utilizado a média aritmética dos módulos das suas respectivas velocidades instantâneas ao longo do tempo, em virtude do movimento oscilatório das partículas causado pela rotação do eixo de agitação.

As respostas foram analisadas através da metodologia da superfície de resposta utilizando o *software* STATISTICA 7. Foi considerado o nível de significância de 5% para o ajuste de modelos de segunda ordem, considerando a influência dos efeitos lineares, quadráticos e interações lineares entre duas variáveis independentes ((MYERS *et al.*, 2016)).

A.4. Resultados da simulação

Os resultados obtidos a partir do planejamento experimental estão apresentados na Tabela A.3.

Tabela A.3: Resultados da simulação para o planejamento composto central.

Exp.	X_1	X_2	X_3	$\Delta M(kg)$	$\bar{v}_x(cm/s)$	$\bar{v}_y(cm/s)$	$\bar{v}_z(cm/s)$	$\bar{v}_{res}(cm/s)$
1	-1	-1	-1	0,5457	0,2537	0,1093	0,1360	1,478
2	-1	-1	1	0,6747	0,2567	0,1114	0,2245	1,525
3	-1	1	-1	1,9404	0,1581	0,0945	0,2138	1,816
4	-1	1	1	2,1438	0,1938	0,1019	0,2734	1,893
5	1	-1	-1	0,8910	1,0917	0,2669	0,3947	4,099
6	1	-1	1	1,1100	1,2382	0,3495	0,6581	4,255
7	1	1	-1	3,0074	0,7573	0,1757	0,4933	4,896
8	1	1	1	3,3200	0,8200	0,2170	0,6491	4,825
9	$-\alpha$	0	0	1,2020	0,2020	0,0742	0,1737	1,442
10	α	0	0	2,2253	1,0422	0,2264	0,5794	4,825
11	0	$-\alpha$	0	0,5735	0,7722	0,2665	0,3526	2,746
12	0	α	0	2,9778	0,4245	0,1482	0,4212	3,451
13	0	0	$-\alpha$	1,6695	0,5260	0,1548	0,3162	3,209
14	0	0	α	1,9968	0,5382	0,2052	0,4633	3,117
15	0	0	0	1,8456	0,5264	0,1912	0,3852	3,149
16	0	0	0	1,8456	0,5264	0,1912	0,3852	3,149

A.4.1. Variação da massa

Para a variação da massa no leito, todas as variáveis independentes foram significativas: rotação do eixo de agitação (X_1), massa inicial de partículas no leito (X_2) e inclinação (X_3).

O modelo reduzido obtido é apresentado na Equação A.1, cujo quadrado do coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,999$, e suas superfícies de resposta correspondentes são apresentadas na Figura A.2 e Figura A.3.

$$\Delta M = 1,84 + 0,38X_1 - 0,085X_1^2 + 0,91X_2 - 0,047X_2^2 + 0,11X_3 + 0,18X_1X_2 \quad (A.1)$$

A partir do modelo reduzido da Equação A.1 e da superfície de resposta apresentada na Figura A.2, é possível observar que o aumento da rotação do eixo de agitação (X_1) aumentou a variação de massa do leito (ΔM). Isto ocorreu porque maiores velocidades de rotação do eixo proporcionam maiores taxas de troca de material entre as células de mistura do eixo (JADIDI *et al.*, 2022). Desta forma, as partículas se moveram com maior intensidade para as regiões com

espaço livre, isto é, na direção do eixo z, no sentido do deslocamento para fora do volume de controle, resultando em variações mais expressivas na variação da massa de partículas no leito.

Já para a massa inicial de partículas no leito (X_2), é possível observar que quanto maior a massa inicial (X_2) maior foi a variação de massa no leito (ΔM). Isto ocorreu porque maiores massas iniciais no leito (X_2) aumentam a força motriz de deslocamento das partículas em direção à saída do volume de controle, já que o escoamento do material ocorre em direção ao espaço que oferece menor resistência ao deslocamento das partículas.

Na Figura A.2 e no modelo ajustado apresentado na Equação A.1, é possível observar a interação entre as variáveis rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial no leito (X_2), sendo que no nível mais alto destas duas variáveis, houve maior intensidade na variação da massa de partículas no leito (ΔM).

Para a inclinação do equipamento (X_3), é possível observar na Figura A.3 que quanto maior o seu valor, maior foi a variação de massa no leito (ΔM). Isto ocorreu devido ao aumento da componente gravitacional no sentido de deslocamento das partículas para fora do volume de controle.

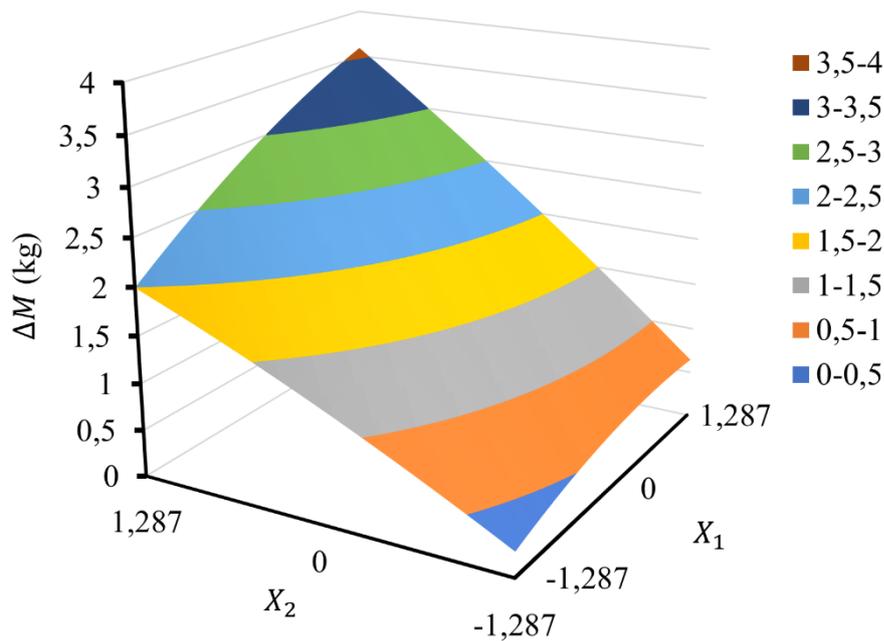


Figura A.2: Variação na massa do leito (ΔM) em função das variáveis independentes rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial de partículas no leito (X_2).

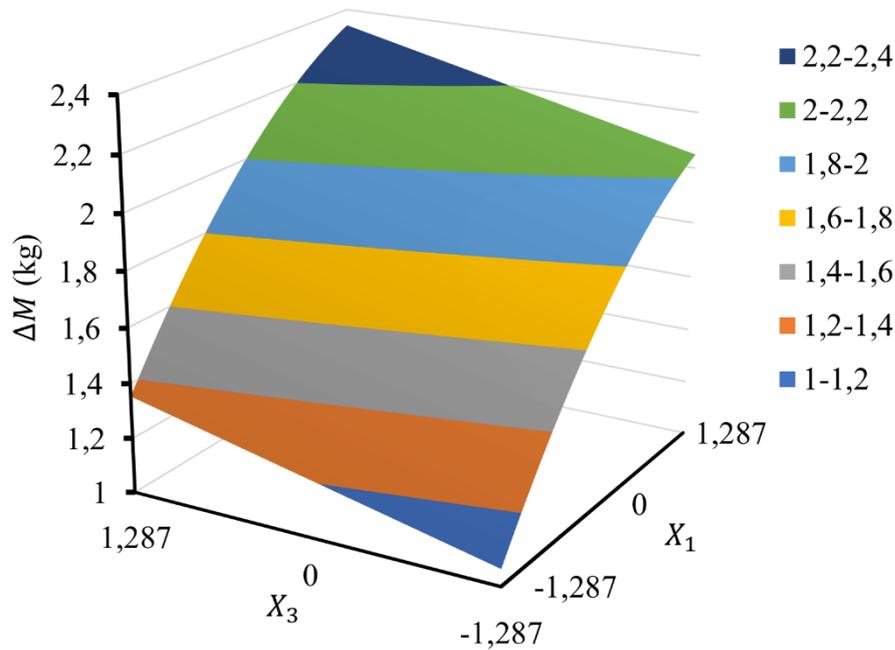


Figura A.3: Variação na massa do leito em função das variáveis independentes rotação do eixo de agitação (X_1) e inclinação do leito (X_3).

A variação da massa do leito está relacionada com a velocidade de transporte das partículas, sendo esta relação abordada nos tópicos seguintes.

A.4.2. Velocidade resultante

Para a velocidade resultante ($\overline{v_{res}}$), as variáveis significativas foram a rotação do eixo de agitação (X_1) e a massa inicial de partículas no leito (X_2). O modelo reduzido obtido é apresentado na Equação A.2, cujo coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,997$, sendo sua superfície de resposta correspondente mostrada na Figura A.4.

$$\overline{v_{res}} = 3,12 + 1,39X_1 + 0,26X_2 + 0,083X_1X_2 \quad (\text{A.2})$$

O modelo reduzido da Equação A.2 e a superfície de resposta apresentada na Figura A.4 mostram que quanto maior a rotação do eixo de agitação (X_1), maior foi a velocidade resultante das partículas ($\overline{v_{res}}$), já que maiores velocidades de rotação aumentam a movimentação do leito devido ao aumento da convecção gerada pelo contato com as pás de agitação.

Já maiores valores de massa inicial de partículas no leito (X_2) contribuíram para o aumento da velocidade resultante média ($\overline{v_{res}}$), uma vez que o maior número de partículas

aumentou o gradiente favorável ao deslocamento do leito em direção à saída do volume de controle, o que se refletiu no aumento da velocidade resultante ($\overline{v_{res}}$).

A inclinação (X_3) não foi significativa para a faixa analisada de velocidade resultante ($\overline{v_{res}}$), porém, essa variável independente se mostrou significativa para a resposta variação da massa de partículas no leito. Isto motivou um estudo mais detalhado das velocidades médias decompostas nas direções x, y e z, que será abordado nas próximas seções.

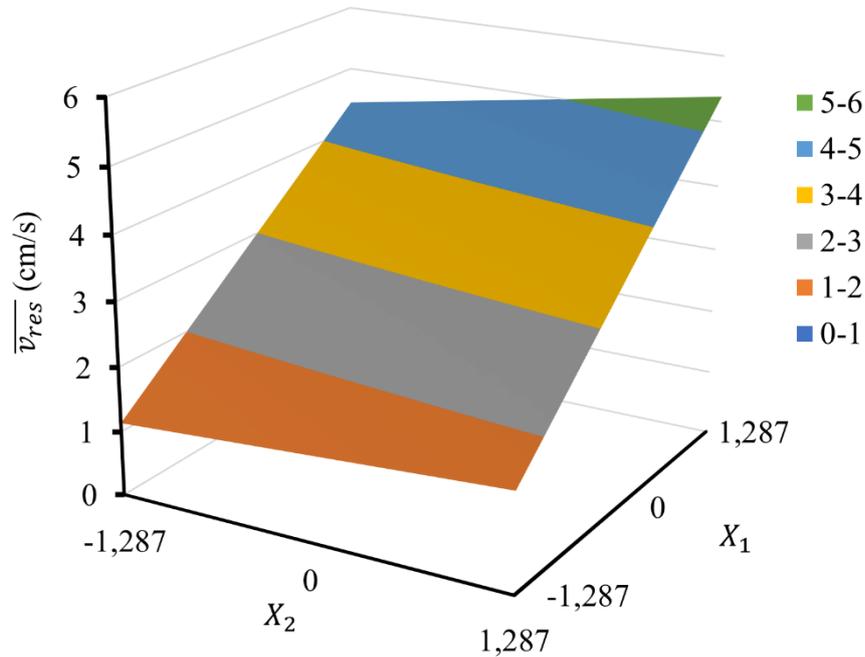


Figura A.4: Superfície de resposta para a velocidade resultante das partículas ($\overline{v_{res}}$) em função de suas variáveis independentes significativas rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial de partículas no leito (X_2).

A.4.3. Velocidade média em x

Para a velocidade média na direção x ($\overline{v_x}$), as variáveis significativas foram a rotação do eixo de agitação (X_1) e a massa inicial de partículas no leito (X_2).

O modelo reduzido obtido é apresentado na Equação A.3, cujo coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,978$, sendo sua superfície de resposta correspondente apresentada na Figura A.5.

$$\overline{v_x} = 0,58 + 0,36X_1 - 0,12X_2 - 0,074X_1X_2 \quad (\text{A.3})$$

O gráfico da Figura A.5 e o modelo reduzido da Equação A.3 mostram que quanto maior a rotação do eixo de agitação (X_1), maior foi a velocidade média das partículas na direção x

(\bar{v}_x), já que equipamentos do tipo *paddle dryer* possuem uma grande capacidade de mistura radial (EBRAHIMI *et al.*, 2021). No gráfico “a” da Figura A.6 é mostrado a velocidade instantânea em x ao longo do tempo referente aos experimentos 9 e 10 para os valores da variável independente rotação do eixo de agitação (X_1) em seus níveis experimentais mais baixo ($-\alpha$) e mais alto ($+\alpha$), respectivamente. É possível observar que o maior valor ($+\alpha$) da rotação do eixo de agitação (X_1) aumentou a frequência e a amplitude que a velocidade instantânea em x oscilou ao longo do tempo.

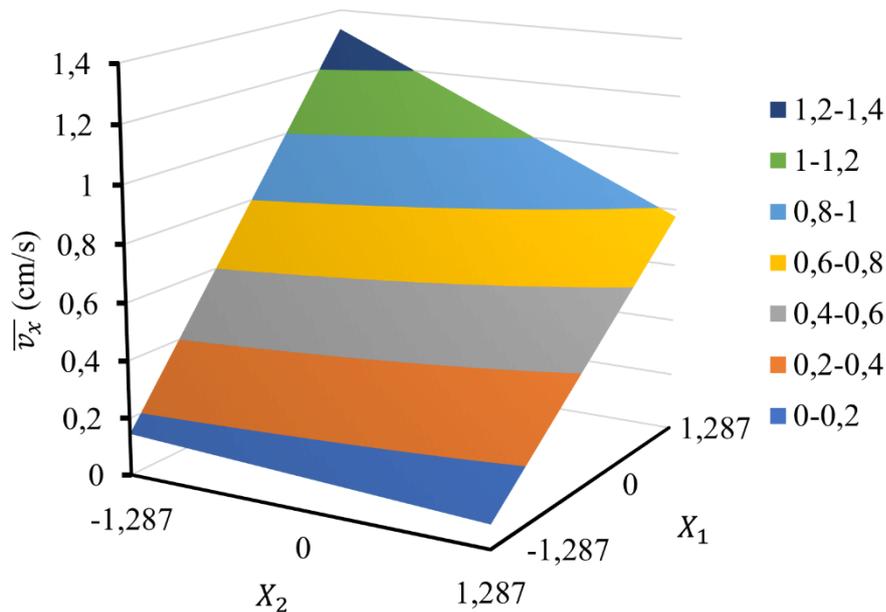


Figura A.5: Superfície de resposta para a velocidade média na direção do eixo-x em função de suas variáveis independentes significativas velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial de partículas no leito (X_2).

Já para a massa inicial de partículas no leito, foi possível observar pela superfície de resposta na Figura A.5, que quanto maior a massa inicial (X_2), menor foi a velocidade em x (\bar{v}_x), fato associado a maior dispersão da energia cinética fornecida pelas pás de agitação para um número maior partículas, o que causou o amortecimento no deslocamento do leito e a redução da velocidade média na direção x. No gráfico “b” da Figura A.6 é mostrado a velocidade instantânea em x ao longo do tempo nos experimentos 11 e 12 para os valores de massa inicial de partículas no leito (X_2) nos níveis experimentais $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente, sendo possível observar a menor amplitude da velocidade instantânea em x para o maior valor de massa de partículas no leito ($+\alpha$).

Em relação a interação entre as variáveis rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial de partículas no leito (X_2), como visto na Equação A.3, uma hipótese é o fato de que quanto menor o número de partículas no leito, menor a resistência para a movimentação destas. Isto resultou em um intenso aumento da velocidade média em x ($\overline{v_x}$) para maiores valores de rotação do eixo de agitação (X_1) combinado com menores valores de massa inicial de partículas no leito (X_2), como pode ser visto na superfície de resposta da Figura A.5.

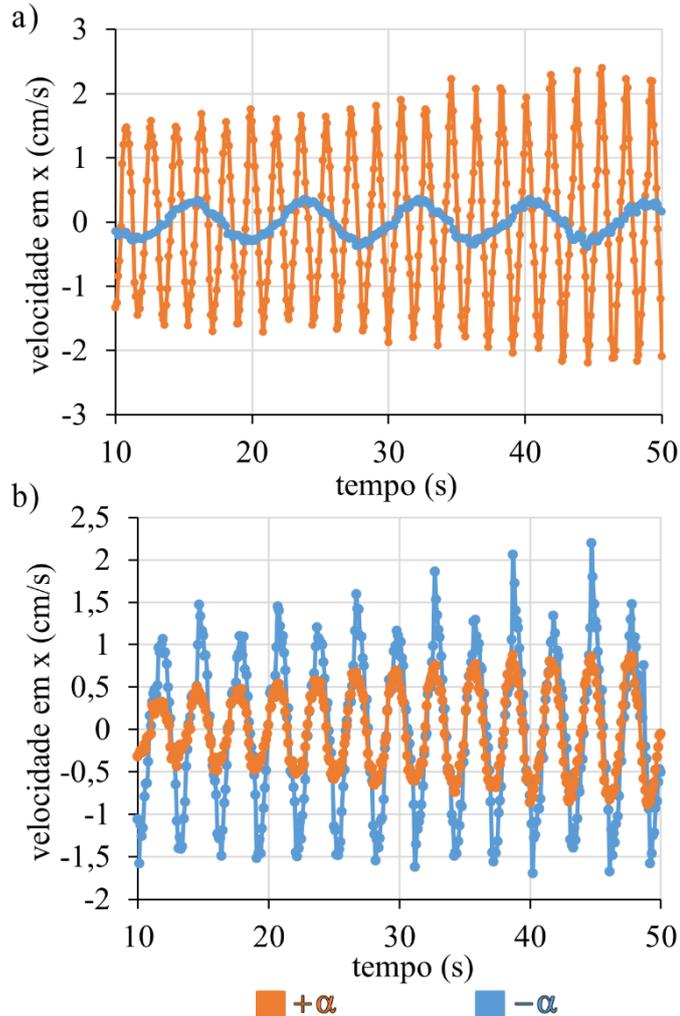


Figura A.6: Perfil da velocidade instantânea na direção do eixo-x para os experimentos (a) 9 e 10, para a rotação do eixo de agitação (X_1) e (b) 11 e 12, para na massa inicial de partícula no leito (X_2).

A inclinação (X_3) não influenciou a velocidade média na direção x ($\overline{v_x}$) devido ao fato de o campo gravitacional ser perpendicular à esta direção, como indicado pelo eixo de coordenadas na Figura A.1.

A.4.4. Velocidade média em y

As três variáveis independentes analisadas, rotação do eixo de agitação (X_1), massa inicial de partículas (X_2) e inclinação (X_3), foram significativas para a velocidade média na direção y (\bar{v}_y).

O modelo reduzido obtido é apresentado na Equação A.4, cujo coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,969$, sendo as suas superfícies de respostas correspondentes apresentadas na Figura A.7 e Figura A.8.

$$\begin{aligned} \bar{v}_y = & 0,20 + 0,070X_1 - 0,021X_1^2 - 0,035X_2 + 0,018X_3 \\ & - 0,025X_1X_2 + 0,014X_1X_3 \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

A partir da superfície de resposta apresentada na Figura A.7 e do modelo reduzido da Equação A.4, foi possível observar que quanto maior a rotação do eixo de agitação (X_1), maior foi a velocidade média na direção y (\bar{v}_y), ou seja, na vertical, em virtude da maior energia cinética transferida para as partículas. O gráfico “a” da Figura A.9 mostra a velocidade instantânea em y ao longo do tempo nos experimentos 9 e 10, para a variável rotação do eixo de agitação (X_1) nos seus dois níveis mais extremos no planejamento experimental, $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente. É possível observar que para o maior nível ($+\alpha$) da rotação do eixo de agitação (X_1), a amplitude de variação da velocidade instantânea em y foi maior, evidenciando a maior energia cinética recebida pelas partículas devido ao movimento das pás de mistura.

Já para a massa inicial de partículas no leito (X_2), é possível observar na superfície de resposta da Figura A.7 que quanto maior seu valor, menor foi a velocidade média na direção y (\bar{v}_y), pelo fato de que a energia cinética transferida para o leito pela movimentação das pás de agitação ser dispersa a uma maior quantidade de partículas. No gráfico “b” da Figura A.9 são apresentados os resultados dos experimentos 11 e 12, para a velocidade instantânea em y ao longo do tempo para a massa inicial de partículas no leito (X_2) nos níveis $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente. Pode-se observar que o maior valor ($+\alpha$) de massa inicial de partículas no leito (X_2) causou a redução da amplitude da variação da velocidade instantânea em y ao longo do tempo.

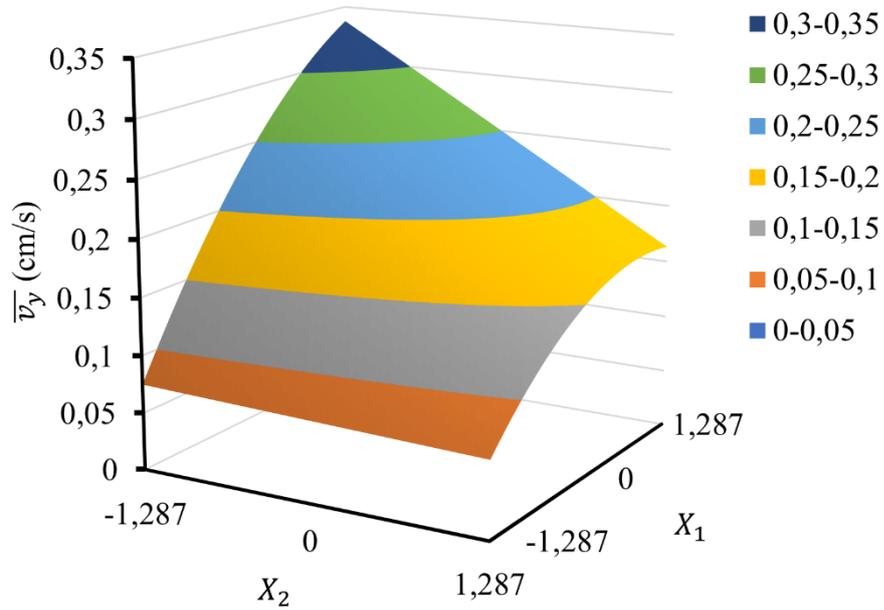


Figura A.7: Superfície de resposta para a velocidade média na direção y (\bar{v}_y) em função de suas variáveis independentes significativas rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial de partículas no leito (X_2).

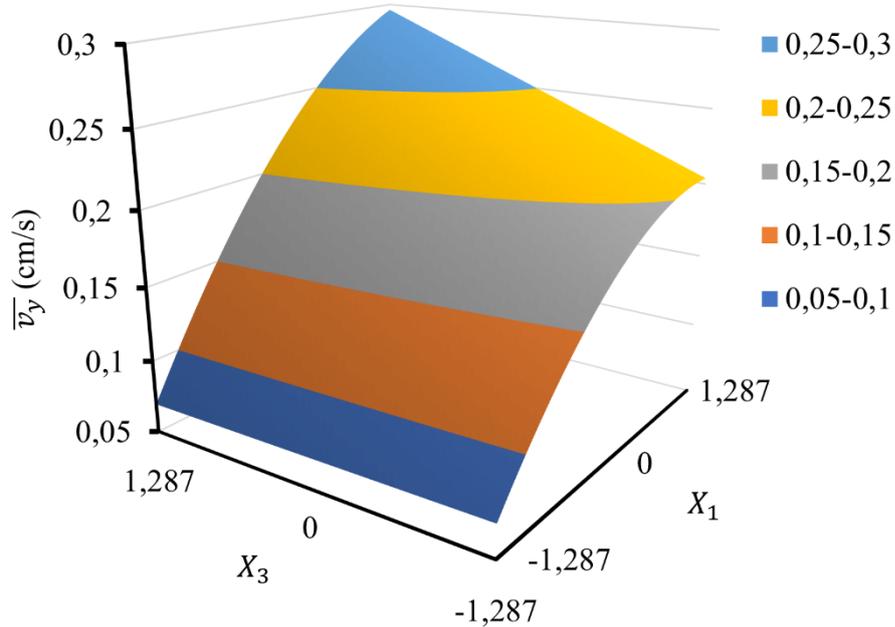


Figura A.8: Superfície de resposta para a velocidade média na direção y (\bar{v}_y) em função de suas variáveis independentes significativas rotação do eixo de agitação (X_1) e inclinação do leito (X_3).

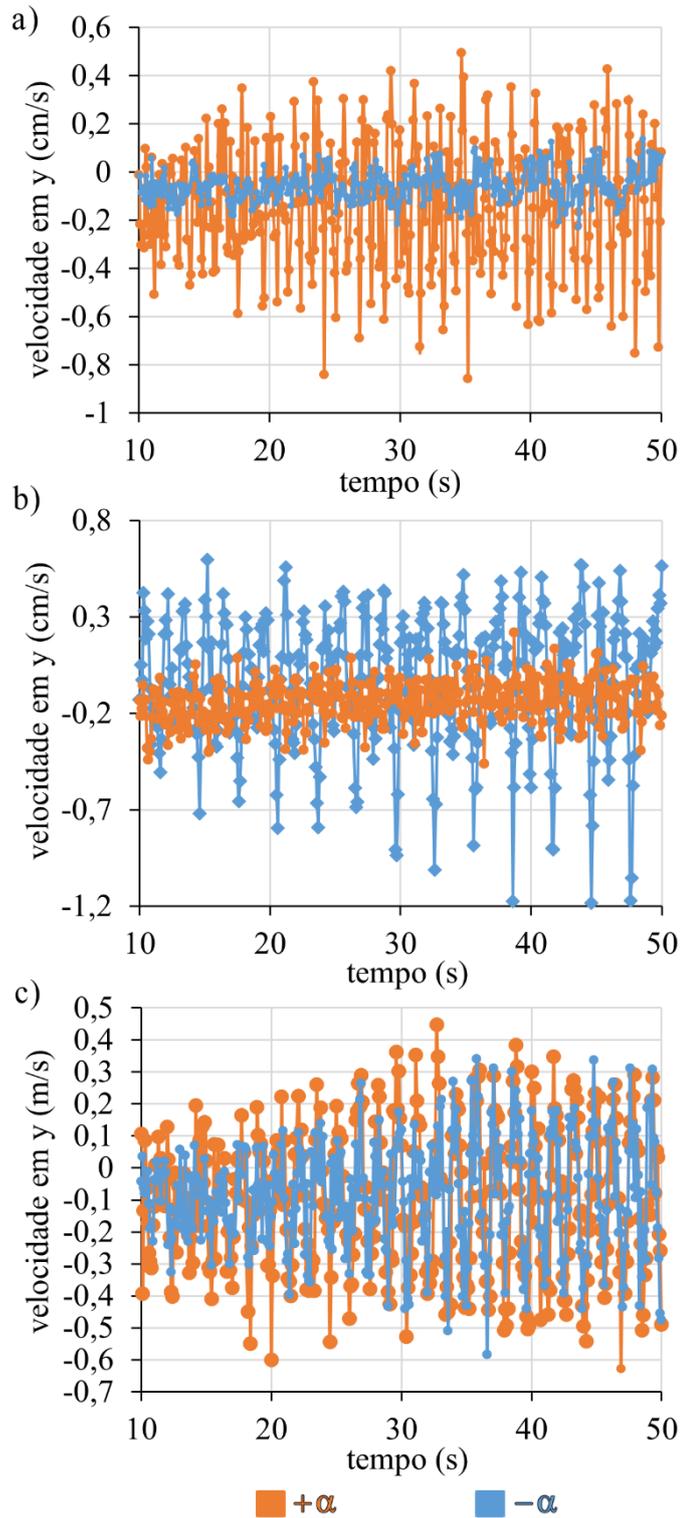


Figura A.9: Perfil da velocidade instantânea na direção do eixo-y para os experimentos a) 9 e 10 para a rotação do eixo de agitação (X_1), b) 11 e 12 para a massa inicial de partículas no leito (X_2) e c) 13 e 14 para a inclinação (X_3).

Em relação à inclinação (X_3), o aumento de seu valor contribuiu para aumentar a velocidade média na direção y (\bar{v}_y), porém com um efeito linear menor que as outras variáveis

significativas, como pode ser observado na Equação A.4 e na superfície de resposta da Figura A.8. Embora careça de maior investigação, a influência da Inclinação (X_3) na velocidade média em y pode estar relacionada ao deslocamento das partículas na direção z, entre as células de mistura. Uma hipótese, é que a velocidade média em y (\bar{v}_y) foi mais intensa pelo fato de a inclinação também favorecer o deslocamento das partículas para fora do volume de controle, como visto para a resposta variação da massa de partículas no leito (ΔM) na seção A.4.1. Isto fez com que as partículas fossem expostas ao efeito das pás de diferentes células de mistura à medida que se movimentavam no leito para fora do volume de controle, o que aumentou a velocidade média em y (\bar{v}_y). No gráfico “c” da Figura A.9, referente aos experimentos 13 e 14 para a inclinação (X_3) nos níveis $-\alpha$ e $+\alpha$, é possível observar uma ligeira diferença na amplitude da variação da velocidade instantânea em y ao longo do tempo entre os dois níveis analisados.

Em relação as interações entre variáveis independentes observadas na Equação A.4, a interação da rotação do eixo de agitação (X_1) e da massa inicial no leito (X_2) provavelmente ocorreu pelo fato de menores valores de massa inicial no leito (X_2) contribuir para a maior movimentação das partículas, tornando a influência da rotação do eixo de agitação (X_1) mais efetiva, amplificando o efeito na velocidade média na direção y (\bar{v}_y). A interação pode ser observada na superfície de resposta da Figura A.7, que mostra um aumento significativo da velocidade média na direção y (\bar{v}_y) com o aumento da rotação do eixo de agitação (X_1) e a diminuição da massa inicial de partículas no leito (X_2).

Também é observada na Equação A.4 a interação entre a rotação do eixo de agitação (X_1) e a inclinação (X_3), sendo que nos maiores níveis destas variáveis há um maior efeito no aumento da velocidade na direção do eixo-y (\bar{v}_y), como pode ser visto na superfície de resposta da Figura A.8.

A.4.5. Velocidade média em z

Para a velocidade média na direção z (\bar{v}_z), todas as variáveis independentes foram significativas: rotação do eixo de agitação (X_1), massa inicial de partículas no leito (X_2) e inclinação (X_3).

As superfícies de resposta da Figura A.10 e Figura A.11 mostram a relação entre a velocidade média na direção z (\bar{v}_z) e suas variáveis significativas e correspondem ao modelo ajustado apresentado pela Equação A.5, com $R^2=0,995$.

$$\begin{aligned} \bar{v}_z = 0,38 + 0,17X_1 + 0,027X_2 + 0,067X_3 + 0,034X_1X_3 \\ - 0,017X_2X_3 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

É possível observar pelo modelo reduzido apresentado na Equação A.5 e pela superfície de resposta da Figura A.10, que quanto maior a rotação do eixo de agitação (X_1) maior foi a velocidade média na direção z (\bar{v}_z). Isto ocorreu porque o deslocamento das partículas para fora do volume de controle foi favorecido, já que maiores velocidades de rotação aumentam a taxa transferência de massa entre as células de mistura (EBRAHIMI *et al.*, 2021). No gráfico “a” da Figura A.12 é apresentada a velocidade instantânea em z ao longo do tempo para os experimentos 9 e 10, para os valores de rotação do eixo de agitação (X_1) nos níveis mais baixo ($-\alpha$) e mais alto ($+\alpha$) do planejamento experimental, respectivamente. É possível observar a maior amplitude e valor da velocidade instantânea em z ao longo do tempo para o maior nível ($+\alpha$) da rotação do eixo de agitação (X_1).

Já para a massa inicial de partículas no leito (X_2), pode ser observado na superfície de resposta da Figura A.11, que quanto maior seu valor inicial maior foi a velocidade média em z (\bar{v}_z), sendo o motivo o aumento da força motriz causado pelo maior número de partículas no leito ter favorecido seu deslocamento para fora do volume de controle, de maneira similar ao observado com a variável resposta variação de massa no leito (ΔM) na seção A.4.1. No gráfico “b” da Figura A.12 é apresentado a velocidade instantânea em z ao longo do tempo para os experimentos 11 e 12 referentes aos níveis de massa inicial de partículas no leito (X_2) em $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente. É possível observar que para o maior valor ($+\alpha$) da massa inicial de partículas no leito (X_2) houve o aumento do valor médio em que a velocidade instantânea em z oscilou ao longo do tempo. Também foi possível constatar que para o maior valor ($+\alpha$) de massa inicial no leito (X_2) ocorreu a redução na amplitude da velocidade instantânea em z.

O maior valor da resposta velocidade média em z (\bar{v}_z) com o aumento da inclinação (X_3) pode ser observado na superfície de resposta da Figura A.11, sendo o motivo a componente gravitacional estar na mesma direção do eixo-z e no sentido favorável ao deslocamento das partículas para fora do volume de controle. Esta tendência também é vista no gráfico “c” da Figura A.12 para o maior valor da velocidade instantânea em z ao longo do tempo no maior nível ($+\alpha$) da variável independente inclinação (X_3).

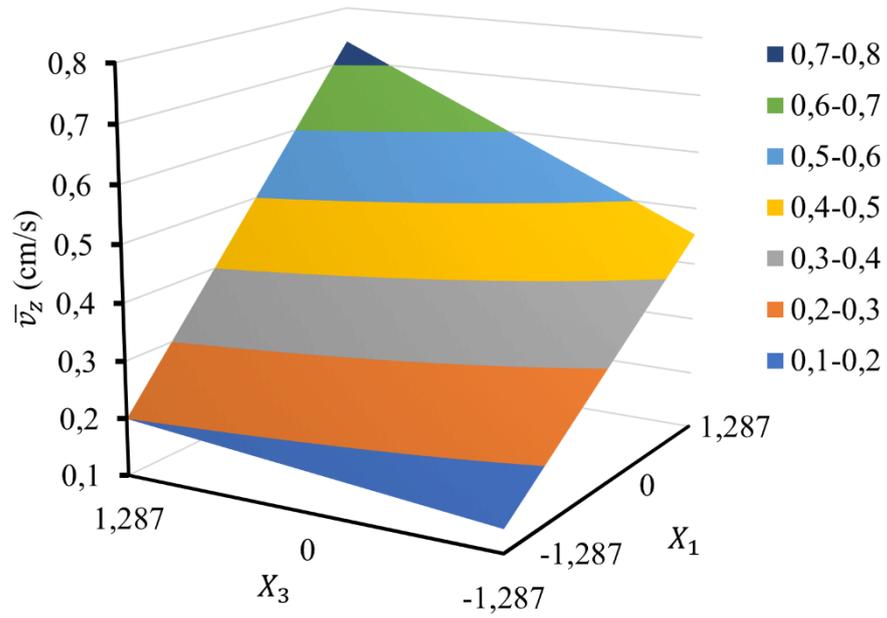


Figura A.10: Superfície de resposta para a velocidade média na direção z (\bar{v}_z) em função de suas variáveis independentes significativas rotação do eixo de agitação (X_1) e inclinação do leito (X_3).

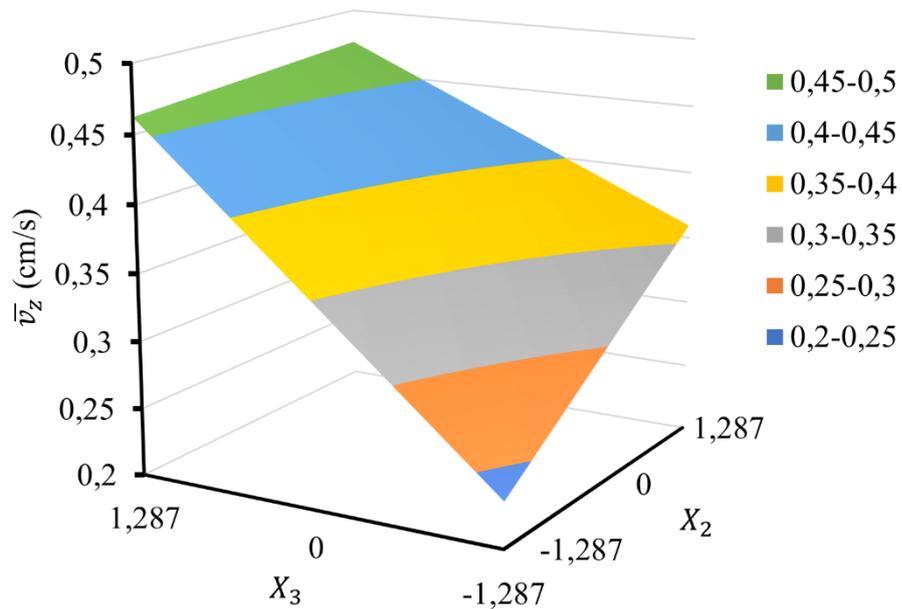


Figura A.11: Superfície de resposta para a velocidade média na direção z (\bar{v}_z) em função de suas variáveis independentes significativas massa inicial de partículas no leito (X_2) e inclinação do leito (X_3).

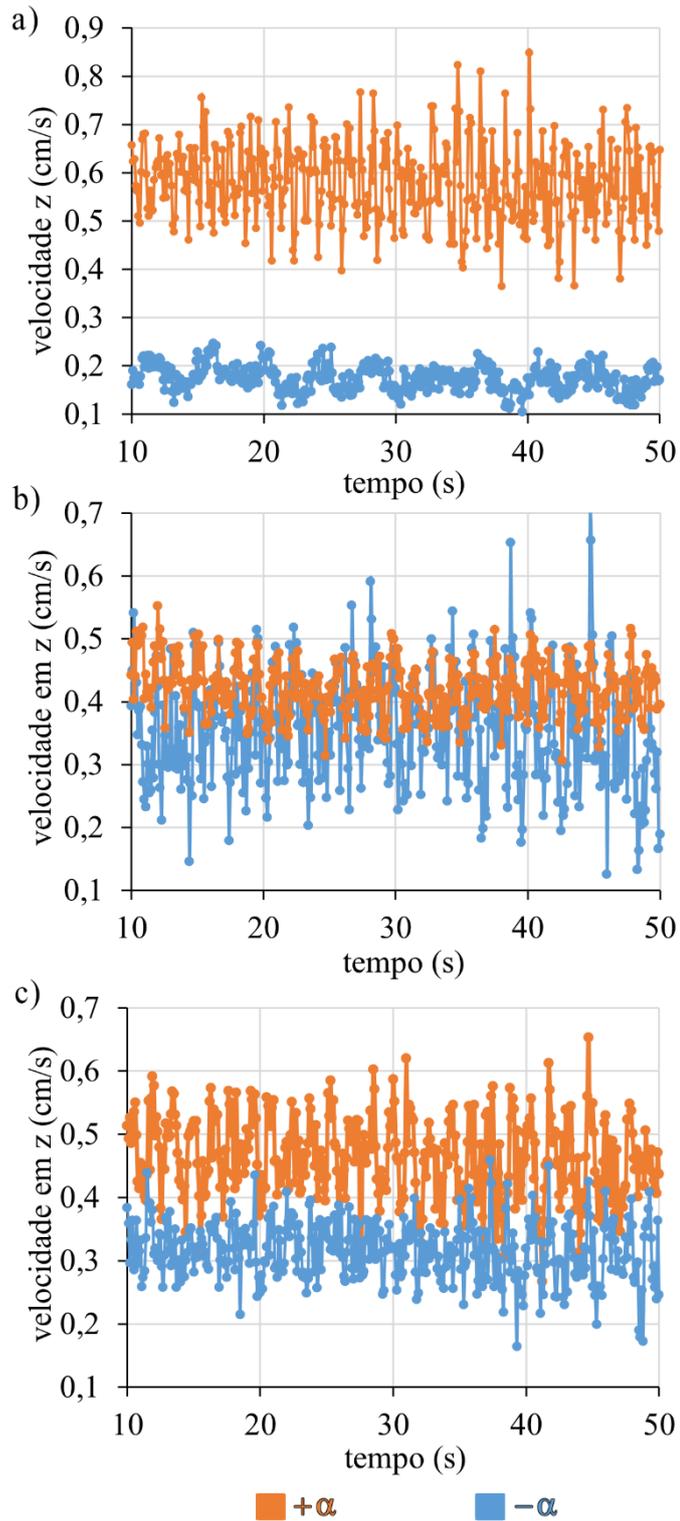


Figura A.12: Perfil da velocidade instantânea na direção do eixo-z para os experimentos a) 9 e 10 para a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1), b) 11 e 12 para a massa inicial de partículas no leito (X_2) e c) 13 e 14 para a inclinação (X_3).

Para a interação entre as variáveis independentes rotação do eixo de agitação (X_1) e Inclinação (X_3), foi observado que o aumento de ambas intensificou o aumento na velocidade

média na direção z (\bar{v}_z), como pode ser visto na Figura A.10, sendo este o mesmo efeito causado pelas duas variáveis individualmente.

Houve também a interação entre as variáveis massa inicial no leito (X_2) e inclinação (X_3), conforme mostrado na Equação A.5, sendo que quanto menor os valores de ambas, menor foi a velocidade média na direção z (\bar{v}_z), como pode ser visto na superfície de resposta da Figura A.11.

A.5. Conclusão dos resultados das simulações

As variáveis independentes rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial de partículas (X_2) no leito foram significativas para todas as respostas: variação de massa no leito (ΔM), velocidade média resultante (\bar{v}_{res}) e velocidades nas direções x (\bar{v}_x), y (\bar{v}_y) e z (\bar{v}_z). Já a inclinação (X_3) só não foi significativa para a velocidade resultante (\bar{v}_{res}) e para a velocidade média na direção x (\bar{v}_x).

Para a resposta variação da massa de partículas no leito (ΔM), foi observado o aumento de seu valor com o aumento das variáveis independentes rotação do eixo de agitação (X_1), massa inicial de partículas no leito (X_2) e inclinação (X_3). Isto ocorreu devido ao aumento na transferência de partículas entre as células de mistura no leito, ao aumento da componente gravitacional e das forças motrizes na direção mais energeticamente favorável para acomodação das partículas, ou seja, para fora do volume de controle. Este resultado mostra como os efeitos destas variáveis podem ser utilizados para regular a quantidade de material no leito do equipamento durante a operação do *Microwave Paddle Dryer*.

Para a magnitude da velocidade resultante (\bar{v}_{res}), foi observado o efeito da rotação do eixo de agitação (X_1) e da massa inicial de partículas no leito (X_2), sendo que a inclinação (X_3) não apresentou efeito significativo, fato que surpreendeu, já que intuitivamente era esperada esta influência. Desta forma, foi realizada a investigação mais detalhada do movimento nas direções das componentes x, y e z.

Para as velocidades nas direções dos eixos x (\bar{v}_x), y (\bar{v}_y) e z (\bar{v}_z), foi constatado que a variável independente massa inicial de partículas no leito (X_2) apresentou influência distinta de acordo com a direção analisada. Observou-se que maiores valores de massa inicial de partículas no leito (X_2) contribuíram para a redução das velocidades médias nas direções x (\bar{v}_x) e y (\bar{v}_y), devido ao amortecimento causado pelo maior número de partículas. Já para a velocidade média na direção z (\bar{v}_z) foi observado seu aumento para maiores valores de massa inicial do leito (X_2)

em virtude de o maior número de partículas proporcionar o aumento da força motriz no sentido de deslocamento para fora do volume de controle.

Através da comparação da velocidade nos três eixos de coordenadas, foi observado que os maiores valores foram para a velocidade média na direção x ($\overline{v_x}$), com exceção dos experimentos 3 e 4 que apresentaram maior velocidade média na direção z ($\overline{v_z}$). Nestes experimentos, que destoaram dos demais, foram adotados os valores de menor nível de rotação do eixo de agitação ($X_1 = -1$) e o maior nível de massa inicial no leito ($X_2=+1$), níveis que contribuíram fortemente para a diminuição da velocidade média na direção x ($\overline{v_x}$), ao passo que, embora o menor valor de rotação do eixo de agitação ($X_1 = -1$) também reduza a velocidade média em z ($\overline{v_z}$), o maior nível de massa inicial de partículas no leito ($X_2=+1$) contribuiu para seu o aumento, o que explica o resultado obtido. O motivo para a maior velocidade média na direção x ($\overline{v_x}$) em grande parte dos experimentos é a mistura radial proporcionada pelos eixos de agitação do *Microwave Paddle Dryer*, com suas pás de agitação atacando o leito perpendicularmente à direção do eixo x.

Conclui-se que maiores valores de velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) podem ser utilizados tanto para o aumento da velocidade de mistura ($\overline{v_x}$) quanto para a redução da massa no leito do equipamento (ΔM), em virtude do aumento da transferência de partículas entre as células de mistura e o conseqüente favorecimento no deslocamento do material no leito na direção axial ($\overline{v_z}$). Se as reduções na massa do leito (ΔM) forem muito significativas e um contraponto para a aplicação de maiores velocidades de rotação do eixo de agitação (X_1), pode ser empregado uma compensação através da redução da inclinação do leito (X_3), medida que permite certa flexibilidade de aumento da velocidade de mistura ($\overline{v_x}$) sem mudanças significativas na velocidade axial ($\overline{v_z}$).

O estudo via simulação computacional utilizando o método dos elementos discretos permitiu o melhor entendimento da dinâmica das partículas no leito do *Microwave Paddle Dryer*. Estas informações são úteis para a operação deste equipamento, pois estão relacionadas ao deslocamento do material no leito e a eficiência do processo.

APÊNDICE B

Os resultados dos planejamentos experimentais realizados neste trabalho foram ajustados a modelos de segunda ordem com interações entre duas variáveis. O modelo de uma equação de segunda ordem é mostrado pela Equação B.1 (MYERS *et al.*, 2016).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad + \varepsilon \quad (B.1)$$

É possível estimar os valores dos parâmetros β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} , para as variáveis de 1 a k, utilizando os resultados dos experimentos através do método dos mínimos quadrados. Após serem estimados, estes parâmetros são chamados de estimadores dos mínimos quadrados e denotados por: b_0 , b_i , b_{ii} e b_{ij} . A equação ajustada é mostrada pela Equação B.2 (BARROZO, 2017).

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=2}^k b_{ij} x_i x_j \quad (B.2)$$

APENDICE C

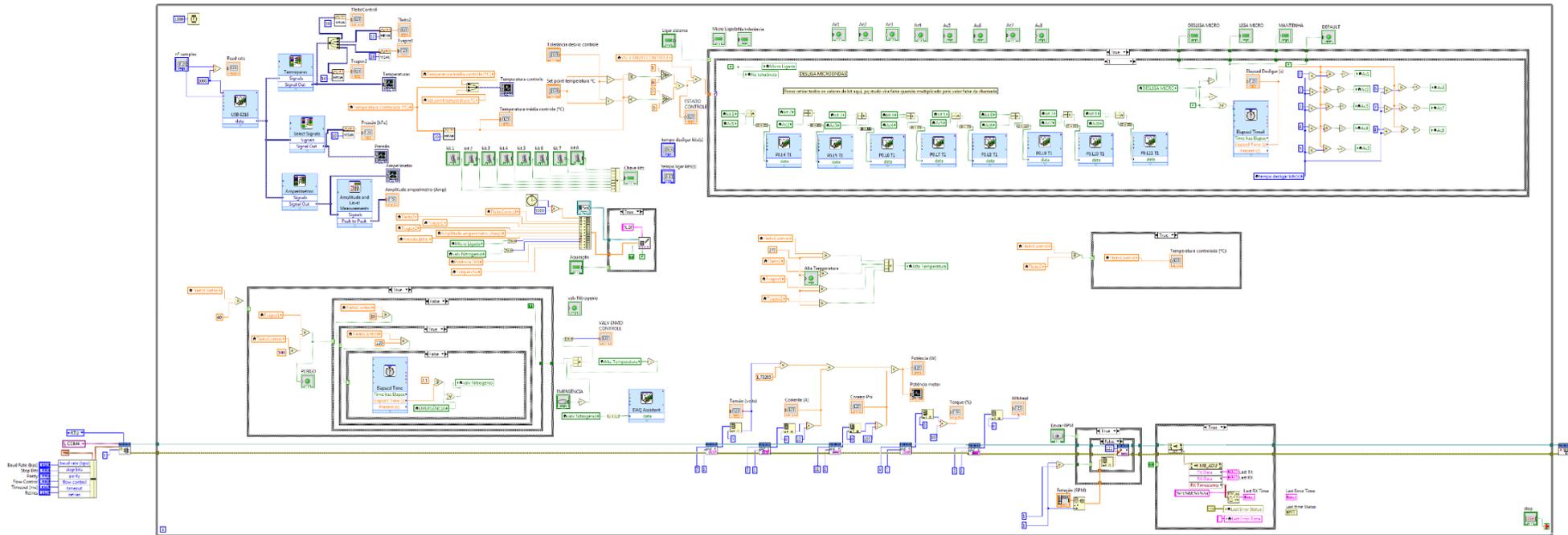


Figura C.1: VI do painel de controle do *Microwave Paddle Dryer* nos experimentos de secagem.

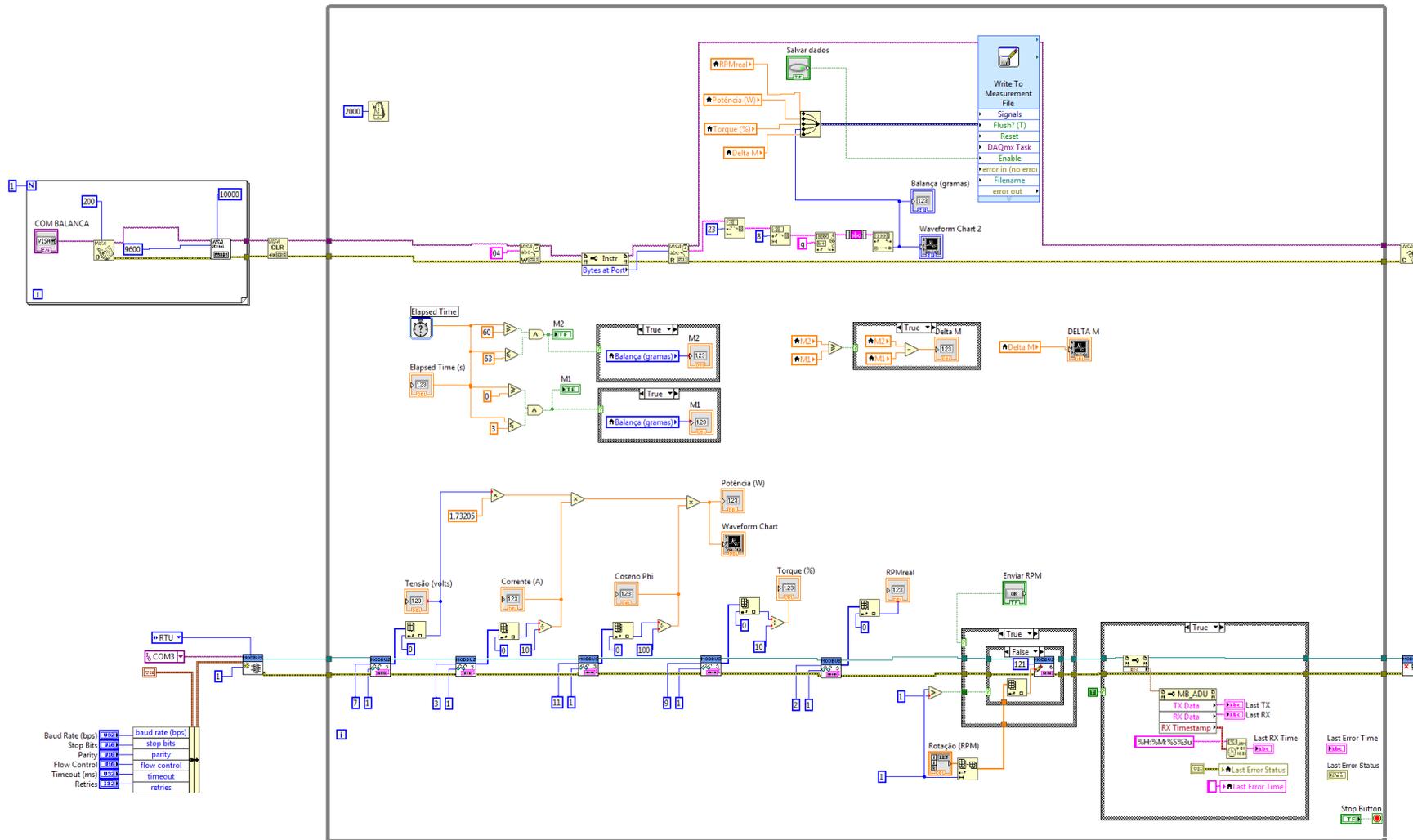


Figura C.2: VI do painel de controle do *Microwave Paddle Dryer* nos experimentos de dinâmica de leito com areia.