

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Contribuições ao Estudo da Fluidodinâmica e da Secagem
de Pastas em Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado**

Lucas Meili

São Carlos

2009

**Contribuições aos Estudos da Fluidodinâmica e da
Secagem de Pastas em Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Contribuições ao Estudo da Fluidodinâmica e da Secagem
de Pastas em Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado**

Lucas Meili

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

SÃO CARLOS

2009

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

M513ce

Meili, Lucas.

Contribuições ao estudo da fluidodinâmica e da secagem de pastas em leitos fluidizado e vibrofluidizado / Lucas Meili. -- São Carlos : UFSCar, 2009.
218 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Secagem. 2. Leito vibrofluidizado. 3. Fluidodinâmica. 4. Secagem de pastas. I. Título.

CDD: 660.28426 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE LUCAS MEILI, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 30 DE OUTUBRO DE 2009.

BANCA EXAMINADORA:



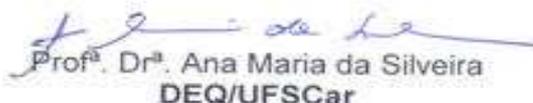
Prof. Dr. José Teixeira Freire
orientador, PPG-EQ/UFSCar



Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
FEQ/UFU



Dr. Roger Valeri Daleffe
FORD MOTOR COMPANY



Profª. Drª. Ana Maria da Silveira
DEQ/UFSCar



Profª. Drª. Maria do Carmo Ferreira
PPG-EQ/UFSCar

Dedico este trabalho à minha família.

“Pedras no caminho? Eu guardo todas. Um dia vou construir um castelo.”

Fernando Pessoa

Agradecimentos

À Deus.

À minha família por sempre ter acreditado em mim, por estar sempre ao meu lado e por todo o apoio que me deu para a realização deste trabalho.

Ao meu pai, que de onde estiver, tenho a certeza, que estará sempre ao meu lado, me dando amor e alegria para enfrentar os problemas da vida.

À Patrícia Nagliate, minha namorada, companheira, esposa, amiga que durante estes anos me dedicou muito carinho, paciência, estímulos e fundamentalmente amor.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Teixeira Freire pela paciência, respeito, amizade, dedicação, conselhos e por todo o carinho paternal que tem ao orientar tanto profissionalmente quanto para a vida.

Aos Profs. Dra Ana Maria da Silveira, Dr. Dermeval José Mazzini Sartori, Dra. Maria do Carmo Ferreira e Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa, pelos conselhos, colaborações e amizade.

Ao Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno (FEQ/UFU) e Prof. Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto (DQ/FURG) pelos ensinamentos valiosos que com certeza tiveram grande contribuição para que eu trilhasse este caminho.

Ao amigo Dr. Roger Valeri Daleffe por toda a colaboração e ensinamentos nos passos iniciais para a realização deste doutorado.

Aos técnicos Oscar da Silva e Edilson Milaré pela colaboração durante a construção e montagem do equipamento e análises realizadas.

Aos amigos e colegas do Centro de Secagem André Ricardo Felkl de Almeida, Bruna de Souza Nascimento, Renata de Aquino Brito Lima, Rodrigo Béttega e Robson Costa de Souza, pelos momentos de descontração e companheirismo.

Aos amigos do DEQ/UFSCar, Alexandre Boscaro França, André Leopoldo, Ballu, Eduardo Baston, Eduardo Hiromitsu Tanabe, Camila Ramos da Silva, Fabrício Barsi (Ramirez), Letícia Marciniuk e Wellington Cassineli.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

Resumo

O objetivo do presente trabalho foi realizar uma análise fluidodinâmica detalhada dos leitos fluidizado e vibrofluidizado operando com partículas de diâmetro inferior a 1 mm e também analisar a secagem e fluidodinâmica do leito úmido com água e três diferentes pastas (lodo de esgoto, leite desnatado e carbonato de cálcio em três concentrações de sólidos) durante o período transiente. O intuito destas análises foi obter informações relevantes acerca da influência da aplicação da vibração em um leito de secagem bem como compreender melhor algumas questões referentes ao adimensional de vibração (Γ), o qual vem sendo utilizado e entendido de maneira controversa pela comunidade científica.

Os experimentos fluidodinâmicos e de secagem foram conduzidos em leito fluidizado/vibrofluidizado com 0,114 m de diâmetro e 0,50 m de altura. As análises fluidodinâmicas foram realizadas com partículas de vidro de 463 e 780 μm e sob diferentes condições vibracionais, com Γ variando do 0,0 a 3,0, sendo que cada um deles foi obtido através de 4 diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração. A secagem e fluidodinâmica do leito úmido foram investigadas com partículas de vidro de 2,19 mm. As pastas utilizadas neste estudo foram constituídas por água destilada, lodo de esgoto doméstico, leite desnatado e carbonato de cálcio em três diferentes concentrações de sólidos. A operação de secagem foi conduzida em diferentes vazões de alimentação de pasta e sob duas condições de velocidade do ar de secagem (1,33 e 1,55 m/s), duas temperaturas (80 e 100° C) e duas condições vibracionais, para um mesmo adimensional de vibração ($\Gamma = 4,00$), $A = 0,003$ m com $f = 18,20$ Hz e $A = 0,015$ m com $f = 8,14$ Hz.

Nos ensaios fluidodinâmicos com partículas de diâmetro inferior a 1 mm foram analisadas as curvas características obtidas por meio da metodologia clássica avaliando a influência do tamanho da partícula e das diferentes condições vibracionais impostas. Para os ensaios fluidodinâmicos em leitos úmidos foram analisados os adimensionais de queda de pressão e

velocidade do ar de secagem, enquanto que para a secagem foram avaliadas a umidade relativa, umidade absoluta, taxa de produção, conteúdo de umidade e eficiência energética.

Com os resultados obtidos neste trabalho pôde-se observar que a utilização da vibração aliada à ação pneumática do leito fluidizado pode ocasionar melhorias significativas na dinâmica do leito, proporcionando condições mais favoráveis para a secagem. Além disso, para um mesmo adimensional de vibração, obtido por meio de diferentes combinações entre amplitude e frequência vibracional, observaram-se resultados distintos para a fluidodinâmica, umidade relativa, umidade absoluta, taxa de produção de pó seco e eficiência de secagem. Com isso, pode-se dizer que o parâmetro Γ não tem características universais, portanto, deve ser sempre informado conjuntamente com a amplitude de vibração ou frequência de vibração.

Abstract

The aim of this study was to analyze the fluid dynamic of the fluidized and vibrofluidized beds with particles with diameter under 1.00 mm, and also to analyze the fluid dynamic behavior of wet beds and the drying of different liquids and suspensions during the transient drying period. The purpose of these tests is to obtain relevant information about the influence of vibration and also to investigate some issues related to the dimensionless vibration number (Γ), which has been used and understood in a controversial way by the scientific community.

The fluid dynamic and drying experiments were conducted in a fluidized/vibrofluidized column with diameter equal 0.014 m and high 0.50 m. The analysis of fluid dynamic was performed with particles of 463 and 780 μm , under different vibrational conditions. Drying and wet fluid dynamic experiments were carried out with particles of 2.19 mm, with the following liquids and pastes: distilled water, sewage sludge, skim milk and calcium carbonate solutions with solid concentration of 3%, 6% and 9%. Drying essays were conducted at different paste feed rates and under air velocity equal to 1.33 and 1.55 m / s, and temperatures of 80 and 100 ° C. Two vibration conditions yielding a constant vibration number ($\Gamma = 4.0$) were tested: one with $A = 0.003$ m and $f = 18.20$ Hz and other with $A = 0.015$ m and $f = 8.14$ Hz.

In fluid dynamic tests with particles of $d_p < 1.00$ mm, the characteristic curves were obtained from the classical methodology were analyzed aiming at identifying the influence of the particle size and vibrational on the pressure drop and minimum fluidization velocities. For the wet beds was evaluated the dynamic behavior of dimensionless pressure drop and dimensionless air inlet velocity, while in drying experiments the behavior of air

relative humidity, absolute humidity, powder production rate, powder moisture content and energy efficiency was assessed.

The results obtained show that the use of vibration together with fluidized air may result in significant improvement of the bed dynamics, thus enhancing the drying conditions. They evidenced also that the use of different combinations of frequency and amplitude values to yield a same vibration number may result in very different dynamic behavior in vibrofluidized beds. As a consequence, variables associated to drying such as air relative and absolute humidity, powder production rate and energy efficiency were affected by vibration conditions. To fully characterize the vibration conditions, the value of Γ should be informed together with either the amplitude or frequency of vibration.

Sumário

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
SUMÁRIO	IX
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE QUADROS E TABELAS	XXXIV
NOMENCLATURA	XXXV
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 O Leito Fluidizado	5
2.1.1 Regimes de Fluidização	7
2.1.2 Classificação de Geldart das Partículas	9
2.1.3 Velocidade de Mínima Fluidização	10
2.2 O Leito Vibrofluidizado	12
2.2.1 Energia Vibracional	13
2.2.2 Regimes de Operação	16
2.2.3 Propriedades Fluidodinâmicas dos Leitos Vibrofluidizados	17
2.3 Transferência de Calor	23
2.3.1 Transferência de calor gás-partículas	24
2.3.2 Transferência de calor corpo submerso-partículas	27
2.4 Secagem	30
2.4.1 Cinética de Secagem	33

	x
2.4.2 Secagem de Pastas e Materiais Porosos	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Equipamento	44
3.2 Pasta e material particulado	49
3.3 Procedimento Experimental	51
3.3.1 Obtenção da curva fluidodinâmica	52
3.3.2 Secagem de pasta	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 Análise fluidodinâmica das partículas de vidro com diâmetros inferiores a 1,0 mm	54
4.1.1 Leito fluidizado	54
4.1.2 Leito vibrofluidizado	57
4.1.3 Conclusões	63
4.2 Análise fluidodinâmica durante o período transiente da secagem com partículas de vidro com diâmetro de 2,19 mm	64
4.2.1 Leito Fluidizado	64
4.2.2 Leito vibrofluidizado	81
4.2.3 Conclusões	101
4.3 Secagem de pastas em leitos fluidizado e vibrofluidizado	103
4.3.1 Umidades relativa e absoluta	103
4.3.2 Taxa de produção de pó	124
4.3.3 Conteúdo de umidade do pó	135
4.3.4 Eficiência energética de secagem	142
4.3.5 Conclusões	151
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	156
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	157

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158
APÊNDICE A - RESULTADOS FLUIDODINÂMICOS DURANTE O PERÍODO TRANSIENTE DE EVAPORAÇÃO/SECAGEM DE PASTAS	164
APÊNDICE B - RESULTADOS DA EVAPORAÇÃO/SECAGEM DE PASTAS DURANTE O REGIME TRANSIENTE	177

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - REGIMES DO LEITO FLUIDIZADO (ADAPTADO DE KUNII E LEVENSPIEL, 1991).	8
FIGURA 2.2 - DIAGRAMA DE GELDART PARA A CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS PARA O AR EM CONDIÇÕES AMBIENTES (GELDART, 1973).	10
FIGURA 2.3 - CURVA FLUIDODINÂMICA CARACTERÍSTICA PARA O LEITO FLUIDIZADO.	11
FIGURA 2.4 - QUEDA DE PRESSÃO (ΔP) NO LEITO E SEU DESVIO PADRÃO (ΔP) EM FUNÇÃO DE U_s ; $D_p = 2,19 \times 10^{-3}$ M; $\Gamma = 4,00$; $\phi = 0,0000$ (DALEFFE, 2005).	16
FIGURA 2.5 - CURVAS FLUIDODINÂMICAS: A) LEITO FLUIDIZADO; B, C E D) LEITO VIBROFLUIDIZADO (STRUMILLO E PAKOWSKI, 1980).	19
FIGURA 2.6 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO AR, PARAMETRIZADO EM Γ ; $\phi = 0,0000$; $A = 3,0 \times 10^{-3}$ M; $T = 40$ °C; $D_p = 1,10 \times 10^{-3}$ M (DALEFFE; 2002).	22
FIGURA 2.7 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO AR PARAMETRIZADO EM D_p ; $\phi = 0,0000$; $\omega = 11,1$ HZ; $\Gamma = 1,50$; $T = 40$ °C. (DALEFFE; 2005).	22
FIGURA 2.8 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0000$. (DALEFFE; 2005).	23
FIGURA 2.9 – TIPOS DE PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE PARTÍCULAS AO REDOR DE UM CORPO SUBMERSO (KUROSAKI <i>ET AL.</i> , 1995).	28
FIGURA 2.10 – CONTEÚDO DE UMIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (ADAPTADO DE STRUMILLO E KUDRA, 1986).	35
FIGURA 2.11 – TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DA UMIDADE LIVRE (ADAPTADO DE STRUMILLO E KUDRA 1986).	36

FIGURA 3.1 - ESQUEMA DO SECADOR DE LEITO VIBROFLUIDIZADO E FLUIDIZADO.	46
FIGURA 3.2 - UNIDADE EXPERIMENTAL.	47
FIGURA 3.3 - PLACA SUPORTE PARA CONTROLADOR DE TEMPERATURA E TRANSDUTORES DE PRESSÃO.	47
FIGURA 3.4 - AQUECEDOR ELÉTRICO.	47
FIGURA 4.1 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DE U_s , DESVIO PADRÃO E RÉPLICA DOS DADOS; LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) E $D_p = 463 \mu\text{M}$.	55
FIGURA 4.2 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DE U_s , DESVIO PADRÃO E RÉPLICA DOS DADOS; LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) E $D_p = 780 \mu\text{M}$.	56
FIGURA 4.3 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE U_s ; $\Gamma = 0,50$; $D_p = 463 \mu\text{M}$.	58
FIGURA 4.4 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE U_s ; $\Gamma = 3,00$, $D_p = 463 \mu\text{M}$.	59
FIGURA 4.5 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE U_s ; $\Gamma = 0,50$; $D_p = 780 \mu\text{M}$.	60
FIGURA 4.6 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE U_s ; $\Gamma = 3,00$; $D_p = 780 \mu\text{M}$.	61
FIGURA 4.7 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE U_s ; $A = 0,014 \text{ M}$; $D_p = 780 \mu\text{M}$.	62
FIGURA 4.8 - QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DE U_s ; $A = 0,032 \text{ M}$; $D_p = 780 \mu\text{M}$.	63
FIGURA 4.9 - QUEDA DE PRESSÃO E DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DA U_s PARA O LEITO FLUIDIZADO.	65
FIGURA 4.10 - ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 80^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,33 \text{ M/S}$.	67
FIGURA 4.11 - ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO	

- ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 80^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,55$ M/S. 67
- FIGURA 4.12 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 100^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,33$ M/S. 68
- FIGURA 4.13 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 100^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,55$ M/S. 68
- FIGURA 4.14 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) PARA DUAS VAZÕES DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 100^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,33$ M/S. 70
- FIGURA 4.15 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 100^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,55$ M/S. 71
- FIGURA 4.16 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LEITE DESNATADO $T = 100^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,55$ M/S. 72
- FIGURA 4.17 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (3 %) $T = 100^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,55$ M/S. 73
- FIGURA 4.18 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (6%) $T = 100^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,55$ M/S. 73
- FIGURA 4.19 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (9 %) $T = 100^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,55$ M/S. 74
- FIGURA 4.20 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 80^\circ \text{ C}$ E $U_s = 1,33$ M/S. 75

FIGURA 4.21 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_s = 1,55 \text{ M/S}$. 75

FIGURA 4.22 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 100^\circ \text{C}$ E $U_s = 1,33 \text{ M/S}$. 76

FIGURA 4.23 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NO NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T=100^\circ \text{C}$ E $U_s=1,55 \text{ M/S}$. 76

FIGURA 4.24 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NO NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T=100^\circ \text{C}$ E $U_s=1,55 \text{ M/S}$. 78

FIGURA 4.25 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NO NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LEITE DESNATADO PARA $T=100^\circ \text{C}$ E $U_s=1,55 \text{ M/S}$. 79

FIGURA 4.26 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NO NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) PARA $T=100^\circ \text{C}$ E $U_s=1,55 \text{ M/S}$. 80

FIGURA 4.27 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NO NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) PARA $T=100^\circ \text{C}$ E $U_s=1,55 \text{ M/S}$. 80

FIGURA 4.28 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NO NA ENTRADA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) PARA $T=100^\circ \text{C}$ E $U_s=1,55 \text{ M/S}$. 81

FIGURA 4.29 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma =$

4,00) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 82

FIGURA 4.30 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 82

FIGURA 4.31 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 85

FIGURA 4.32 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 86

FIGURA 4.33 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE LEITE DESNATADO PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 87

FIGURA 4.34 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE LEITE DESNATADO PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 88

FIGURA 4.35 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 89

FIGURA 4.36 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 90

FIGURA 4.37 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 90

FIGURA 4.38 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma =$

4,00) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 91

FIGURA 4.39 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 91

FIGURA 4.40 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 92

FIGURA 4.41 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 93

FIGURA 4.42 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 94

FIGURA 4.43 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 95

FIGURA 4.44 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 95

FIGURA 4.45 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE LEITE DESNATADO PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 96

FIGURA 4.46 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE LEITE DESNATADO PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_S=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 97

FIGURA 4.47 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE

CÁLCIO (3%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 98

FIGURA 4.48 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 98

FIGURA 4.49 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 99

FIGURA 4.50 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 99

FIGURA 4.51 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 100

FIGURA 4.52 – ADIMENSIONAL DA VELOCIDADE DO AR NA ENTRADA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO ($\Gamma = 4,00$) COM ALIMENTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) PARA $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s=1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 100

FIGURA 4.53 - UMIDADE RELATIVA ($UR-UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 80^\circ\text{C}$; $U_s = 1,33 \text{ M/S}$. 105

FIGURA 4.54 - UMIDADE RELATIVA ($UR-UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 80^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55 \text{ M/S}$. 106

FIGURA 4.55 - UMIDADE RELATIVA ($UR-UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,33 \text{ M/S}$. 106

- FIGURA 4.56 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 107
- FIGURA 4.57 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 100^\circ\text{C}$ E $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 108
- FIGURA 4.58 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_S = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 109
- FIGURA 4.59 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_S = 1,55 \text{ M/S}$; $A = 0,015 \text{ M}$; $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 111
- FIGURA 4.60 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_S = 1,55 \text{ M/S}$; $A = 0,003 \text{ M}$; $F = 18,24 \text{ HZ}$. 112
- FIGURA 4.61 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; SECAGEM DE LODO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 113
- FIGURA 4.62 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; SECAGEM DE LODO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_S = 1,55 \text{ M/S}$; $A = 0,015 \text{ M}$; $F = 8,14 \text{ HZ}$. 114
- FIGURA 4.63 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; SECAGEM DE LODO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_S = 1,55 \text{ M/S}$; $A = 0,003 \text{ M}$; $F = 18,24 \text{ HZ}$. 115
- FIGURA 4.64 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO E FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; SECAGEM DE LODO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 116
- FIGURA 4.65 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A SECAGEM DE LODO DE ESGOTO; $T = 100^\circ\text{C}$ E $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 117
- FIGURA 4.67 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A SECAGEM DE LEITE DESNATADO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 118

- FIGURA 4.68 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A SECAGEM DE LEITE DESNATADO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 119
- FIGURA 4.69 – UMIDADES RELATIVAS ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A SECAGEM DE LEITE DESNATADO NA VAZÃO DE 22 ML/MIN; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $\Gamma = 4,00$. 120
- FIGURA 4.70 – UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (6 %); $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 121
- FIGURA 4.71 – UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO NAS TRÊS CONCENTRAÇÕES; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 122
- FIGURA 4.72 – UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$, $\Gamma = 4,00$. 123
- FIGURA 4.73 – UMIDADES RELATIVAS ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$, $\Gamma = 4,00$. 123
- FIGURA 4.74 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 124
- FIGURA 4.75 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LEITE DESNATADO EM LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 125
- FIGURA 4.76 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 127
- FIGURA 4.77 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M}$; $F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 128
- FIGURA 4.78 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LEITE DESNATADO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 129

- FIGURA 4.79 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LEITE DESNATADO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M}$; $F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 130
- FIGURA 4.80 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CaCO_3 (3%) EM LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$ E $U_s = 1,55\text{M/S}$. 131
- FIGURA 4.81 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ CaCO_3 (3%) EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 132
- FIGURA 4.82 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CaCO_3 (3%) EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M}$; $F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 132
- FIGURA 4.83 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CaCO_3 (9%) EM LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$ E $U_s = 1,55\text{M/S}$. 133
- FIGURA 4.84 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ CaCO_3 (9%) EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 134
- FIGURA 4.85 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CaCO_3 (9%) EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M}$; $F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 134
- FIGURA 4.86 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 136
- FIGURA 4.87 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 136
- FIGURA 4.88 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M}$; $F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 137
- FIGURA 4.89 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE LEITE DESNATADO SECO EM LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 138
- FIGURA 4.90 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE LEITE DESNATADO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 138

- FIGURA 4.91 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE LEITE DESNATADO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M}$; $F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 139
- FIGURA 4.92 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CaCO_3 (9%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$ E $U_s = 1,55\text{M/S}$. 140
- FIGURA 4.93 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CaCO_3 (9%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M}$; $F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 141
- FIGURA 4.94 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CaCO_3 (9%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M}$; $F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 141
- FIGURA 4.95 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM PARA O LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 143
- FIGURA 4.96 – DIFERENÇA ENTRE TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA O LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 143
- FIGURA 4.97 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA MÁXIMA MÉDIOS (APÓS 1200 S DE OPERAÇÃO) PARA O LEITO FLUIDIZADO DURANTE A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 145
- FIGURA 4.98 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM MÉDIA (APÓS 1200 S DE OPERAÇÃO) PARA O LEITO FLUIDIZADO DURANTE A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA A $U_s = 1,55\text{M/S}$. 145
- FIGURA 4.99 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM MÉDIA (APÓS 1200 S DE OPERAÇÃO) PARA O LEITO FLUIDIZADO DURANTE A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA A $T = 100^{\circ}\text{C}$. 146
- FIGURA 4.100 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM MÉDIA (APÓS 1200 S DE OPERAÇÃO) ENTRE OS LEITOS FLUIDIZADO E VIBROFLUIDIZADO DURANTE A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA A $T = 100^{\circ}\text{C}$ E $U_s = 1,55\text{ M/S}$. 147
- FIGURA 4.101 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM MÉDIA (APÓS 1200 S DE OPERAÇÃO) PARA O LEITO FLUIDIZADO ENTRE A ÁGUA, LODO DE ESGOTO E LEITE DESNATADO A $T = 100^{\circ}\text{C}$ E $U_s = 1,55\text{ M/S}$. 148

FIGURA 4.102 – COMPARAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS ENERGÉTICAS DE SECAGEM MÉDIAS (APÓS 1200 S DE OPERAÇÃO) PARA O LEITO FLUIDIZADO ENTRE A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA E SECAGEM DE CaCO_3 NAS TRÊS CONCENTRAÇÕES A $T = 100^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 149

FIGURA 4.103 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM MÉDIA (APÓS 1200 S DE OPERAÇÃO) ENTRE OS LEITOS FLUIDIZADO E VIBROFLUIDIZADOS PARA A SECAGEM DO LODO DE ESGOTO A $T = 100^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 150

FIGURA 4.104 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM MÉDIA (APÓS 1200 S DE OPERAÇÃO) ENTRE OS LEITOS FLUIDIZADO E VIBROFLUIDIZADOS PARA A SECAGEM DE LEITE DESNATADO A $T = 100^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 150

FIGURA A 1 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 165

FIGURA A 2 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (3%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 165

FIGURA A 3 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (6%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 166

FIGURA A 4 – ADIMENSIONAL DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (9%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 166

FIGURA A 5 – ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 167

FIGURA A 6 – ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (3%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 167

FIGURA A 7 – ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO

($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (6%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_s = 1,33$ M/S. 168

FIGURA A 8 – ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO FLUIDIZADO ($\Gamma = 0,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (9%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_s = 1,33$ M/S. 168

FIGURA A 9 – ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33$ M/S, $A = 0,015$ M E $F = 8,14$ HZ. 169

FIGURA A 10 – ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33$ M/S, $A = 0,003$ M E $F = 18,20$ HZ. 169

FIGURA A 11 – ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (3%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33$ M/S, $A = 0,015$ M E $F = 8,14$ HZ. 170

FIGURA A 12 – ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (3%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33$ M/S, $A = 0,003$ M E $F = 18,20$ HZ. 170

FIGURA A 13 – ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (6%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33$ M/S, $A = 0,015$ M E $F = 8,14$ HZ. 171

FIGURA A 14 – ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (6%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33$ M/S, $A = 0,003$ M E $F = 18,20$ HZ. 171

FIGURA A 15 – ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (9%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33$ M/S, $A = 0,015$ M E $F = 8,14$ HZ. 172

FIGURA A 16 – ADIMENSIONAL DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (9%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33$ M/S, $A = 0,003$ M E $F = 18,20$ HZ. 172

FIGURA A 17 – ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 173

FIGURA A 18– ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE LODO DE ESGOTO PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 173

FIGURA A 19 - ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (3%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 174

FIGURA A 20 - ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (3%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 174

FIGURA A 21 - ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (6%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 175

FIGURA A 22 - ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (6%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 175

FIGURA A 23 - ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (9%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$. 176

FIGURA A 24 - ADIMENSIONAL DE VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO PARA O LEITO VIBROFLUIDIZADO ($\Gamma = 4,0$) COM ALIMENTAÇÃO DE CaCO_3 (9%) PARA $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$. 176

FIGURA B1 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_s = 1,33 \text{ M/S}$. 178

FIGURA B2 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 80^\circ \text{C}$ E $U_s = 1,55 \text{ M/S}$. 178

- FIGURA B3 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 100^\circ\text{C}$ E $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 179
- FIGURA B4 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 179
- FIGURA B5 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_S = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 180
- FIGURA B6 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 180
- FIGURA B7 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 181
- FIGURA B8 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 181
- FIGURA B9 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LODO DE ESGOTO; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 182
- FIGURA B10 - UMIDADE ABSOLUTA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LODO DE ESGOTO; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 182
- FIGURA B11 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LODO DE ESGOTO; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 183
- FIGURA B12 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LODO DE ESGOTO; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 183
- FIGURA B13 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LODO DE ESGOTO; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 184
- FIGURA B14 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LODO DE ESGOTO; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 184

FIGURA B15 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LEITE DESNATADO; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 185

FIGURA B16 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LEITE DESNATADO; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_S = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 185

FIGURA B17 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE LEITE DESNATADO; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_S = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M}$ E $F = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 186

FIGURA B18 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 186

FIGURA B19 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$. 187

FIGURA B20 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 187

FIGURA B21 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_S = 1,55 \text{ M/S}$. 188

FIGURA B22 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 188

FIGURA B23 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_S = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 189

FIGURA B24 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_S = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M}$ E $F = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 189

FIGURA B25 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE

CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 190

FIGURA B26 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F} = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 190

FIGURA B27 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F} = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 191

FIGURA B28 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F} = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 191

FIGURA B29 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F} = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 192

FIGURA B30 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$. 192

FIGURA B31 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$. 193

FIGURA B32 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$. 193

FIGURA B33 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 194

FIGURA B34 - UMIDADE ABSOLUTA ($UA - UA_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 194

FIGURA B35 - UMIDADE RELATIVA ($UR - UR_0$) NA SAÍDA DO LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE

CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F}$
 $= 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 195

FIGURA B36 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F}$
 $= 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 195

FIGURA B37 - UMIDADE RELATIVA ($U_R - U_{R_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F}$
 $= 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 196

FIGURA B38 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F}$
 $= 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 196

FIGURA B39 - UMIDADE RELATIVA ($U_R - U_{R_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F}$
 $= 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 197

FIGURA B40 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (6%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F}$
 $= 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 197

FIGURA B41 - UMIDADE RELATIVA ($U_R - U_{R_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$. 198

FIGURA B42 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$. 198

FIGURA B43 - UMIDADE RELATIVA ($U_R - U_{R_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$. 199

FIGURA B44 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE
 CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$. 199

FIGURA B45 - UMIDADE RELATIVA ($U_R - U_{R_0}$) NA SAÍDA DO LEITO
 FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE

CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 200

FIGURA B46 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 200

FIGURA B47 - UMIDADE RELATIVA ($U_R - U_{R_0}$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 201

FIGURA B48 - UMIDADE ABSOLUTA ($U_A - U_{A_0}$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 201

FIGURA B49 - UMIDADE RELATIVA ($U_R - U_{R_0}$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 80^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F} = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 202

FIGURA B51 - UMIDADE RELATIVA ($U_R - U_{R_0}$) NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO DURANTE A SECAGEM DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%); $T = 100^{\circ}\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ M/S}$, $A = 0,003 \text{ M E F} = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 203

FIGURA B53 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$. 204

FIGURA B54 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ SECO DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$. 204

FIGURA B55 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$.; $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$). 205

FIGURA B56 – CONTEÚDO DE UMIDADE DE PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$; $A = 0,015 \text{ M E F} = 8,14 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$). 205

FIGURA B57 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$.; $A = 0,003 \text{ M E F} = 18,20 \text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$). 206

- FIGURA B58 – CONTEÚDO DE UMIDADE DE PÓ DE LODO DE ESGOTO SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M E } F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$). 206
- FIGURA B59 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$. 207
- FIGURA B60 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$. 207
- FIGURA B61 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M E } F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$). 208
- FIGURA B62 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M E } F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$). 208
- FIGURA B63 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M E } F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$). 209
- FIGURA B64 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (3%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M E } F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$). 209
- FIGURA B65 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$. 210
- FIGURA B66 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$. 210
- FIGURA B67 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 211
- FIGURA B68 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{M/S}$. 211
- FIGURA B69 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$; $A = 0,015\text{ M E } F = 8,14\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,00$). 212

- FIGURA B70 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 80°C; $U_s = 1,33\text{M/S}$; A = 0,015 M E F = 8,14 HZ ($\Gamma = 4,00$). 212
- FIGURA B71 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 100°C; $U_s = 1,55\text{M/S}$; A = 0,015 M E F = 8,14 HZ ($\Gamma = 4,00$). 213
- FIGURA B72 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 100°C; $U_s = 1,55\text{M/S}$; A = 0,015 M E F = 8,14 HZ ($\Gamma = 4,00$). 213
- FIGURA B73 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 80°C; $U_s = 1,33\text{M/S}$; A = 0,003 M E F = 18,20 HZ ($\Gamma = 4,00$). 214
- FIGURA B74 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 80°C; $U_s = 1,33\text{M/S}$; A = 0,003 M E F = 18,20 HZ ($\Gamma = 4,00$). 214
- FIGURA B75 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 100°C; $U_s = 1,55\text{M/S}$; A = 0,003 M E F = 18,20 HZ ($\Gamma = 4,00$). 215
- FIGURA B76 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (6%) SECO EM LEITO VIBROFLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 100°C; $U_s = 1,55\text{M/S}$; A = 0,003 M E F = 18,20 HZ ($\Gamma = 4,00$). 215
- FIGURA B77 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 80°C; $U_s = 1,33\text{M/S}$. 216
- FIGURA B78 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 80°C; $U_s = 1,33\text{M/S}$. 216
- FIGURA B79 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 80°C; $U_s = 1,33\text{M/S}$; A = 0,015 M E F = 8,14 HZ ($\Gamma = 4,0$). 217
- FIGURA B80 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 80°C; $U_s = 1,33\text{M/S}$; A = 0,015 M E F = 8,14 HZ ($\Gamma = 4,0$). 217
- FIGURA B81 – TAXA DE PRODUÇÃO DE PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; T = 80°C; $U_s = 1,33\text{M/S}$; A = 0,003 M E F = 18,20 HZ ($\Gamma = 4,0$). 218

FIGURA B82 – CONTEÚDO DE UMIDADE DO PÓ DE CARBONATO DE CÁLCIO (9%) SECO EM LEITO FLUIDIZADO VERSUS TEMPO; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{M/S}$; $A = 0,003\text{ M}$ E $F = 18,20\text{ HZ}$ ($\Gamma = 4,0$).

Lista de Quadros e Tabelas

QUADRO 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES	32
TABELA 3.1 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DO LODO BRUTO E DIGERIDO.	50
TABELA 3.2 – COMPOSIÇÃO DO LEITE DESNATADO.	50
TABELA 3.3 – PARÂMETROS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS FLUIDODINÂMICOS COM PARTÍCULAS DE 463 E 780 MM.	51

Nomenclatura

A	Amplitude de vibração [m]
a	Área [m ²]
C	Concentração de sólidos [%]
c _s	Calor específico do sólido [kJ/kg K]
c _w	Calor específico da água [kJ/kg K]
d _p	Diâmetro médio da partícula [m]
f	Frequência vibracional [s ⁻¹]
G	Vazão mássica do ar [kg/s]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
H	Altura do leito estático [m]
h	Coefficiente de transferência de calor [w/m ² K]
I _e	Intensidade de vibração [m/s ²]
I _p	Potência específica de vibração [m ² /s ³]
m _p	Massa de partículas [kg]
Q _T	Calor Total [kW]
Re	Número de Reynolds [-]
ST	Sólidos Totais [%]
T	Temperatura [K]
T _e	Temperatura de entrada do leito [K]
T _s	Temperatura de saída do leito [K]
U _{mf}	Velocidade mínima de fluidização [m/s]
U _{mvf}	Velocidade de mínima vibrofluidização [m/s]
U	Velocidade superficial no leito [m/s]

V	Volume do leito [m ³]
x	Conteúdo de umidade [-]

Letras Gregas

Γ	Adimensional de vibração [-]
η_T	Eficiência energética total [-]
μ	Viscosidade do gás [Kg/ms]
ρ	Massa específica da partícula [kg/m ³]
Φ	Grau de saturação de glicerol (V_G/V_F) [-]
ω	Frequência angular [rad/s ⁻¹]
ΔH	Variação de entalpia da água [m ² /s ²]

Subscritos

cr	crítico
e	Entrada
eq	Equilíbrio
g	Gás
L	Leito
LVF	Leito vibrofluidizado
M	Médio
mf	Mínima fluidização
mvf	Mínima vibrofluidização
p	Partícula

S	Saída
s	Superficial
T	Total
t	Troca térmica
w	Água

1. INTRODUÇÃO

Os leitos fluidizados são utilizados em diversos tipos de processamento, como por exemplo, de produtos químicos, alimentícios e farmacêuticos, além de ser utilizado no tratamento de efluentes, em reatores biológicos e em reatores petroquímicos. As operações com leitos fluidizados trazem importantes vantagens, como a boa mistura entre os sólidos e altas taxas de transferência de calor e massa (MUJUMDAR, 2006). Entretanto, nos casos em que a fluidização em leito convencional é difícil, como quando são processados materiais polidispersos, adesivos ou coesivos, a utilização de uma vibração adicional pode melhorar a aplicabilidade deste tipo de equipamento. Desta forma, introduz-se o conceito de leito vibrofluidizado, o qual é um leito fluidizado convencional em que uma vibração mecânica vertical ou horizontal é aplicada simultaneamente ao escoamento do ar.

A partir de 1964 expandiram-se as pesquisas sobre os fenômenos envolvidos em leitos vibrofluidizados, como pode ser constatado em Bratu e Jinescu (1971), Gupta e Mujumdar (1980), Erdész *et al.* (1986), Garim (1998), Daleffe e Freire (2004) e Meili *et al.* (2010). O leito vibrofluidizado apresenta vantagens quando comparado com os de jorro e fluidizado como o fato de produzir maiores valores dos coeficientes de transferência de calor e massa e ainda possibilitar reduções da velocidade mínima de fluidização e da queda de pressão no leito. Além disto, pode atenuar o volume de regiões mortas, de canais preferenciais e de formação de bolhas, e ainda tornar possível a fluidização de materiais coesivos, adesivos e pastosos (GUPTA e MUJUMDAR, 1980; ERDÉSZ *et al.*, 1986; DELLA TONIA Jr, 1990; CARDOSO e KIECKBUSH, 1999).

A quantificação da energia vibracional é de grande importância na operação do leito vibrofluidizado auxiliando na compreensão e no controle do processo. A forma mais comumente utilizada para quantificar o efeito da vibração sobre o comportamento dinâmico

do leito é subentende o adimensional de vibração (Γ), sugerido por Chlenov e Mikhailov (1972) definido segundo a seguinte equação 1:

$$\Gamma = \frac{A \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2}{g} \quad (1)$$

na qual A é a amplitude, f é a frequência de vibração e g é a aceleração da gravidade.

a partir dessa equação observa-se que um mesmo valor de Γ pode ser obtido usando diferentes combinações entre a amplitude (A) e frequência de vibração (f). A maioria dos trabalhos encontrados na literatura considera o Γ como um parâmetro universal, entretanto Chen *et al.* (1991), Gallas *et al.* (1992) e Barker e Mehta (1993) sugeriam a possibilidade da não universalidade do Γ (comportamentos distintos para um mesmo valor). Esta afirmação foi confirmada por Daleffe e Freire (2004) e Daleffe (2005), os quais verificaram que a utilização de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração, mantendo fixo um mesmo valor de Γ , pode produzir comportamentos fluidodinâmicos distintos. Neste sentido, estes pesquisadores forneceram uma contribuição significativa para a melhor compreensão da fluidodinâmica em leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com partículas de diâmetros superiores a 1 mm. Mesmo assim, existe uma lacuna a ser explorada no que diz respeito às partículas com diâmetros inferiores a 1 mm, as quais são mais fáceis de fluidizar. Além disso, estes pesquisadores realizaram apenas estudos fluidodinâmicos e de segregação granulométrica. Meili *et al.* (2010) iniciaram um estudo da não universalidade do Γ na evaporação de água e na secagem de lodo de esgoto e verificaram que o adimensional de vibração deve ser utilizado com cautela para este tipo de análise em leito vibrofluidizado.

Estes trabalhos mostram a necessidade de maiores estudos da não universalidade do adimensional de vibração tal como na fluidização de partículas de

diâmetros inferiores a 1 mm, em fenômenos de transferência de calor e massa, na secagem e na fluidodinâmica do leito durante este tipo de operação.

Os leitos fluidizados e vibrofluidizados podem ser aplicados satisfatoriamente na secagem de materiais particulados e de granulados úmidos, lodos, suspensões e pastas, os quais podem ser fluidizados utilizando-se um leito de sólidos inertes (MUJUMDAR, 2006). A secagem é uma operação unitária de grande importância nas indústrias químicas, farmacêuticas e alimentícias e tem como objetivo aumentar a resistência do produto ao ataque de bactérias e fungos que se proliferam na presença de umidade, além de facilitar o transporte, a armazenagem e a padronização do produto. A escolha do equipamento para a secagem depende tanto das propriedades e quantidade do material a ser seco quanto das propriedades que se deseja para o produto seco (SPITZNER NETO, 2001).

A secagem de pastas em leitos com partículas inertes, segundo Freire (1992), é uma operação bastante complexa devido às interações partícula-partícula, à diversidade das pastas, às diferentes condições de operação utilizadas e à reologia da pasta que se altera no decorrer da secagem. Mesmo assim, várias pesquisas vêm demonstrando a viabilidade técnica na secagem de pastas, tanto orgânicas quanto inorgânicas. A secagem de pastas em leitos com partículas inertes pode ser utilizada satisfatoriamente para se conhecer melhor o comportamento do equipamento no fenômeno conhecido como secagem convectiva, em que somente a umidade superficial da partícula é removida.

Desta forma, são de grande importância a consolidação do conhecimento e descrição dos fenômenos envolvidos na operação dos leitos fluidizados e vibrofluidizados em processos como a secagem. Os objetivos desta pesquisa foram definidos com o intuito de procurar respostas e preencher algumas lacunas existentes nos estudos envolvendo estes tipos de equipamentos. Assim, de acordo com o que foi exposto, os objetivos deste trabalho são:

- estudar a fluidodinâmica dos leitos fluidizado e vibrofluidizado operando com

partículas inertes com diâmetros médios inferiores a 1 mm ($d_p = 463$ e $780 \mu\text{m}$) avaliando o comportamento dos parâmetros envolvidos na vibração;

- avaliar o comportamento fluidodinâmico dos leitos fluidizado e vibrofluidizado durante o período transiente de evaporação de água e secagem de diferentes tipos de pastas (lodo de esgoto doméstico, carbonato de cálcio em três concentrações e leite desnatado), analisando a influência do adimensional de vibração (Γ) na queda de pressão no leito e na velocidade do ar de secagem;
- estudar a evaporação da água e secagem de diferentes tipos de pastas; lodo de esgoto, carbonato de cálcio em três concentrações e leite desnatado, analisando a influência dos parâmetros operacionais (temperatura e velocidade do ar de secagem, adimensional de vibração (Γ), amplitude e frequência de vibração) em fatores como umidade relativa e absoluta na saída do leito, umidade do pó seco obtido, taxa de produção, eficiência de produção e eficiência de secagem

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as principais características dos leitos fluidizados e vibrofluidizados referentes à estrutura mecânica, propriedades fluidodinâmicas e de transporte. Além disso, serão apresentadas algumas características da secagem de pastas e partículas porosas e qual seu comportamento nestes equipamentos.

2.1 O Leito Fluidizado

A técnica de fluidização foi difundida em 1940, com a construção do primeiro leito fluidizado para o craqueamento do carvão (FCC), sendo que somente mais tarde esta técnica seria empregada para o recobrimento de partículas (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Por volta de 1960, o leito fluidizado foi utilizado em uma planta de produção de acrílico, já nos anos 70 foi patenteado o processo para a produção de sementes recobertas (PORTER e KAERWER, 1974).

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), a fluidização é a operação pela qual sólidos finos são transformados em um estado “quase líquido” por meio do contato com um gás ou com um líquido. Já Herron e Tunno (1983) afirmaram que a fluidização pode ser definida como a suspensão e a agitação de um leito de partículas sólidas por uma corrente ascendente de gás ou líquido ao redor das partículas. De acordo com Mujumdar (2006), um leito fluidizado convencional é formado pela passagem de uma corrente de gás através de um vaso preenchido com um leito de sólidos particulados.

Segundo Strumillo e Kudra (1986) o leito fluidizado pode ser usado principalmente para a secagem de materiais granulares, embora possa também ser aplicado para a secagem de soluções, pastas e líquidos injetados em um leito de partículas inertes. Este equipamento pode tanto ser operado em batelada como da forma contínua, sendo que a

primeira é mais indicada para produção em pequena escala, já a segunda é utilizada para grandes produções. As principais vantagens do leito fluidizado são (STRUMILLO e KUDRA; 1986):

- propicia fluidização contínua do leito e fácil manutenção, mesmo em plantas de grande escala;
- não apresenta partes móveis;
- produz ótimas condições para transferência de calor e massa;
- cria a possibilidade de aplicação de diferentes fontes de energia (placas submersas, radiadores, etc.);
- fornece boa mistura, ou seja, uniformidade do material no leito.

Algumas desvantagens da aplicação deste leito são:

- partículas muito finas tendem a se aglomerar devido às forças coesivas relacionadas à áreas específicas muito grandes, fator que ocasiona a dificuldade de fluidização de partículas como esta;
- ocorre limitação no grau de uniformidade do conteúdo de umidade do produto;
- a rápida mistura dos sólidos no leito de partículas ocasiona um tempo de residência não uniforme dos sólidos no equipamento;
- favorece a formação de aglomerados na fluidização de partículas muito finas e úmidas;
- apresenta dificuldades de fluidizar materiais coesivos, adesivos e pastosos;
- produz erosão de tubos e vasos pela abrasão das partículas pode ser um problema sério;
- está sujeita a defluidização se as variáveis operacionais não forem bem controladas.

2.1.1 Regimes de Fluidização

A descrição dos estados de fluidização é importante para a compreensão e definição do comportamento do leito fluidizado em diferentes condições operacionais. Segundo Kunii e Levenspiel (1991), quando um fluido passa ascendentemente através de um leito de partículas finas, a uma baixa vazão, o fluido apenas percola os espaços entre as partículas estacionadas, ocorrendo uma pequena expansão do leito e leve agitação das partículas, estado chamado de leito fixo (Figura 2.1 a). Com o aumento da vazão de fluido atinge-se uma condição em que todas as partículas são suspensas, pois ocorre um equilíbrio das forças de fricção entre as partículas e o fluido com o peso das partículas. A partir deste momento considera-se que o leito é fluidizado. Este ponto separa dois comportamentos distintos, o de leito fixo e o de leito fluidizado, sendo que o mesmo é de grande importância na descrição e compreensão do comportamento dos leitos fluidizados e é conhecido como estado de mínima fluidização (Figura 2.1 (b)), e a velocidade correspondente é chamada de velocidade de mínima fluidização (U_{mf}).

A partir do ponto de mínima fluidização podem ser considerados dois comportamentos distintos entre o sistema líquido-sólido e gás-sólido. Em geral os sistemas líquido-sólido são operações mais estáveis, sem formação de bolhas e com distribuição espacial uniforme de concentração das partículas sólidas. A expansão do leito é regular com o aumento da velocidade, aumentando assim a distância entre as partículas, estado conhecido como fluidização particulada (Figura 2.1 c). No caso do sistema gás-sólido comportamento semelhante somente é observado para a fluidização de partículas do tipo A da classificação de sólidos de Geldart (1973), que ocorre em uma estreita faixa de velocidades entre a U_{mf} e o início da formação de bolhas (mínimo borbulhamento).

Em geral, nos sistemas gás-sólidos com o aumento da velocidade acima da velocidade de mínima fluidização observa-se grande instabilidade do sistema, com formação

de bolhas e canais preferenciais, chamada de fluidização borbulhante (Figura 2.1 d). Ainda podem ser encontrados sistemas em que as bolhas de gás coalescem e aumentam conforme sobem, em um leito consideravelmente profundo e de diâmetro pequeno, tornando-se, eventualmente, grandes o suficiente para se expandirem pela célula. Em casos no qual o leito é formado por partículas finas, estas caem suavemente e deslizam pelas paredes em volta das elevações das bolhas, este comportamento é conhecido como *slugging* com *slugs* axiais (Figura 2.1 e). No caso em que as partículas são maiores, a porção do leito é empurrada para cima como um pistão, as partículas caem na forma de uma “chuva” para o *slug* abaixo e conforme vão subindo estas porções de sólidos desaparecem, repetindo este movimento continuamente. Este estado é chamado de *slugging* com *slug* flutuante (Figura 2.1 f).

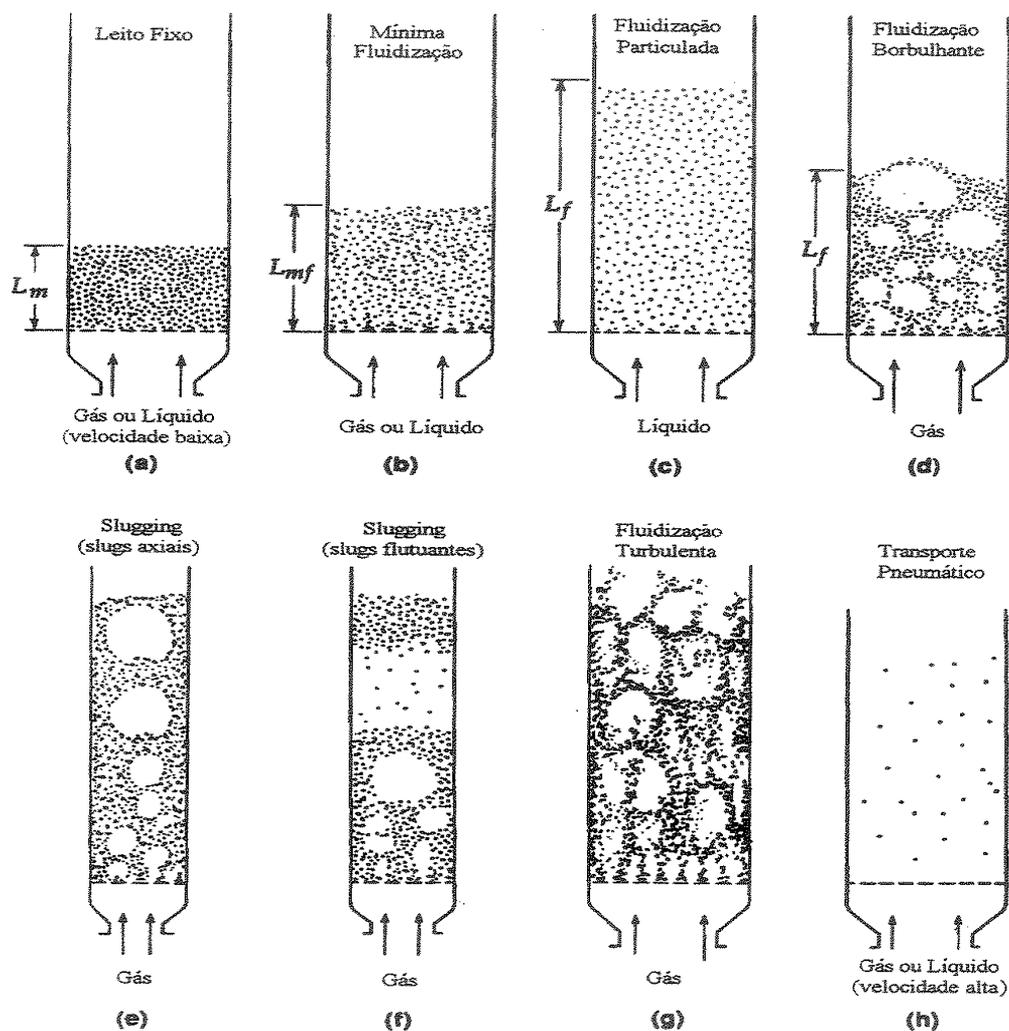


Figura 2.1 - Regimes do leito fluidizado (adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991).

Em velocidades suficientemente altas, a velocidade terminal dos sólidos é excedida e a superfície superior do leito desaparece, suspensões de partículas tornam-se mais firmes e a formação de bolhas passa a se apresentar instável, observando-se um movimento turbulento. Este comportamento é conhecido como fluidização turbulenta (Figura 2.1 g). Com uma adição na velocidade do fluido os sólidos são arrastados formando-se o leito fluidizado disperso ou diluído, com transporte pneumático de sólidos (Figura 2.1 h).

2.1.2 Classificação de Geldart das Partículas

Geldart (1973) realizando observações cuidadosas da fluidização de sólidos com diferentes densidades e diferentes tamanhos médios identificou quatro tipos de comportamentos de partículas. A classificação é clara e fácil de ser utilizada, sendo necessário conhecer somente a densidade e o diâmetro do sólido e utilizar a Figura 2.2 para a determinação a que grupo este pertence. A Figura 2.2 apresenta um diagrama em escala logarítmica em que são delimitadas quatro regiões. A caracterização das partículas em cada grupo, na ordem crescente de tamanho das partículas é: grupos C, A, B e D.

O **grupo C** é formado por partículas coesivas muito finas. Em geral, a fluidização das partículas deste grupo é extremamente difícil porque as forças interpartículas são maiores que a resultante da ação do gás, produzindo pobres fenômenos de transferência. A fluidização e, conseqüentemente os fenômenos de transferência, podem melhorar com a utilização de vibração mecânica.

As partículas de diâmetro médio (tipicamente por volta de 80 μm) ou baixa densidade (abaixo de 1400 kg/m^3) pertencem ao **grupo A**. Neste caso, os sólidos fluidizam facilmente e a baixas velocidades do fluido a fluidização é particulada e a altas velocidades há presença de pequenas bolhas.

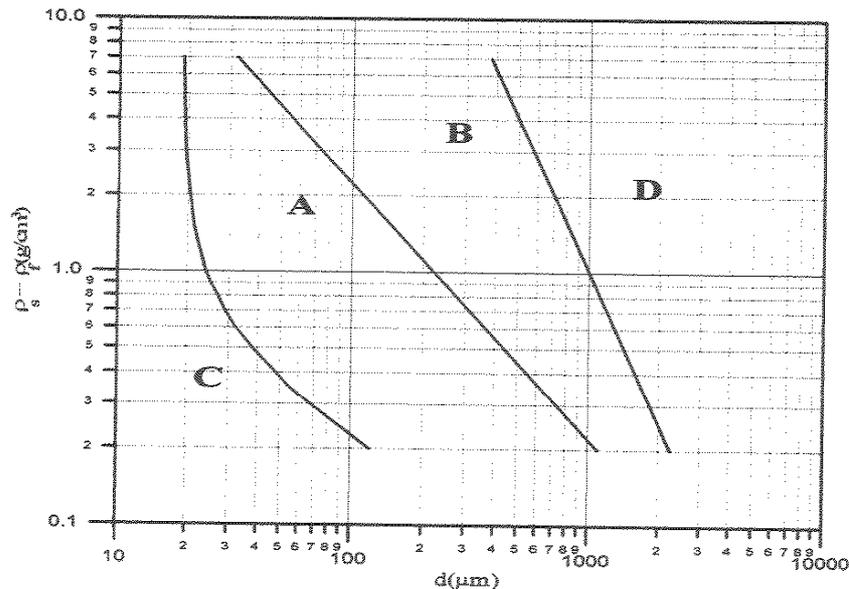


Figura 2.2 - Diagrama de Geldart para a classificação das partículas para o ar em condições ambientes (GELDART, 1973).

Ao **grupo B** pertencem as partículas de tamanho grandes e geralmente possuem características físicas semelhantes às da areia, ou seja, tamanhos entre $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$ e densidade $1,4 \text{ g/cm}^3 < \rho_p < 4 \text{ g/cm}^3$. A fluidização destas partículas geralmente é boa e com ocorrência de borbulhamento vigoroso em que as bolhas crescem significativamente.

Ao **grupo D** pertencem partículas relativamente grandes e/ou muito densas. A fluidização destes sólidos é difícil devido à forma irregular e ao tamanho das partículas. O comportamento é imprevisível, apresentando grandes explosões de bolhas e canais preferenciais ou comportamento de jorro se a distribuição do gás é desigual. Estas partículas são indicadas para a operação em leitos de jorro, devido à necessidade de altas velocidades do ar.

2.1.3 Velocidade de Mínima Fluidização

A velocidade de mínima fluidização corresponde à velocidade em que a queda de pressão se iguala ao peso aparente dos sólidos. Além disso, a velocidade de mínima fluidização marca o ponto de início da fluidização e a sua determinação é importante em cálculos de projeto de leitos fluidizados.

Uma das formas de se obter a velocidade de mínima fluidização é por meio da curva fluidodinâmica, a qual relaciona a velocidade superficial do gás com a queda de pressão no leito. Na Figura 2.3 a região AB corresponde ao leito fixo, condição em que as partículas ficam paradas no vaso e a queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade do ar. A fluidização inicia-se a partir do ponto B, no qual as partículas começam um lento movimento. Acrescendo um pouco mais a velocidade do fluido ocorre a estabilização da queda de pressão. Entretanto, quando ocorre uma diminuição da velocidade superficial do fluido, a partir do ponto C, observa-se a formação de uma curva diferente (curva CDE), resultado da variação da porosidade do leito fixo. Nesta curva CDE é definida a velocidade de mínima fluidização como o ponto de transição entre o leito fluidizado e o fixo na taxa decrescente de velocidade do fluido, ponto D.

A utilização de correlações empíricas é uma maneira comum para se ter uma estimativa da velocidade de mínima fluidização. Na literatura são encontradas diversas correlações empíricas e semi-empíricas para a obtenção da U_{mf} , algumas delas estão apresentadas no Quadro 2.1.

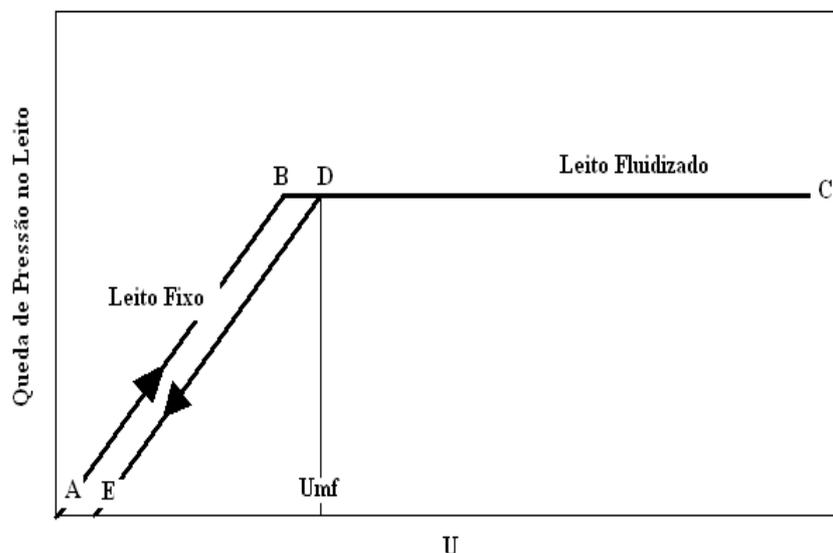


Figura 2.3 - Curva fluidodinâmica característica para o leito fluidizado.

2.2 O Leito Vibrofluidizado

A aplicação da vibração em processos de Engenharia Química já existe a muitos anos e é de grande interesse, pois intensifica as transferências de calor, massa e quantidade de movimento. O leito vibrofluidizado consiste de um leito fluidizado onde se impõe vibrações horizontais ou verticais. Este tipo de equipamento apresenta uma série de vantagens quando comparado aos leitos fluidizados convencionais:

- possibilita a economia térmica e mecânica;
- facilita o tratamento de materiais polidispersos;
- elimina as zonas mortas dentro do equipamento devido à ação da vibração; resultando em operações mais higiênicas e uniformes, principalmente, em se tratando de produtos alimentícios, pois ocasiona uma redução do risco de crescimento de microorganismos patogênicos;
- favorece a secagem mais eficiente e uniforme para materiais coesivos;
- possibilita a realização de diversos processos no mesmo equipamento, como secagem, granulação, resfriamento e recobrimento;
- possibilita a redução da velocidade de mínima fluidização e de queda de pressão no leito, ocasionando economia em energia, e
- minimiza a formação de canais preferenciais e bolhas.

A vibração do sistema pode ser obtida por meio de diversos tipos de dispositivos. Finzer e Kieckbusch (1992) classificaram alguns destes dispositivos:

- vibrador mecânico de inércia, no qual a força de excitação é promovida pela rotação de massas desequilibradas;
- vibrador excêntrico, que produz forças de excitação intensas e de baixa frequência; a vibração é devido ao uso de excêntricos em seus eixos;

- vibrador pneumático ou hidráulico → promove alta frequência de vibração; a vibração é ocasionada pelo movimento de um pistão acionado por um fluido;
- vibrador eletromagnético considerado um dos melhores dispositivos para promover a vibração, pois além de produzir altas frequências possui uma precisa regulação da mesma; em contrapartida, não possibilita a variação da amplitude de vibração, e
- vibrador sonoro, que produz ondas sonoras quando o ar escoar em um gerador de áudio.

2.2.1 Energia Vibracional

Para o estudo de leitos vibrofluidizados é importante o conhecimento da energia vibracional à qual o sistema está submetido. Com base na combinação dos parâmetros controladores da energia vibracional, amplitude (A) e frequência (f), esta pode ser quantificada por meio das seguintes equações:

- Velocidade média vibracional (U_{mv}) (ZABRODSHIY *et al.*, 1968);

$$U_{mv} = A(2\pi f) \equiv A\omega \quad (2)$$

- Adimensional de vibração (Γ) (CHLENOV e MIKHAILOV, 1965; 1972);

$$\Gamma = \frac{A\omega^2}{g} = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (3)$$

- Intensidade de vibração (I_e) (SHAH e GOYEL, 1980);

$$I_e = Af^2 \equiv A\omega^2 \quad (4)$$

- Potência específica de vibração (I_p) (DORNEY *et al.*, 1981);

$$I_p = A^2 f^3 \equiv A^2 \omega^3 \quad (5)$$

onde A é amplitude de vibração, f é frequência de vibração e ω é frequência angular.

O adimensional de vibração (Γ) é a forma mais utilizada na literatura para quantificar a energia vibracional e pode ser interpretado como sendo a relação entre a aceleração média vibracional sobre o sistema e a aceleração gravitacional.

Chen *et al.* (1991) estudaram algumas características da aglomeração de partículas cristalinas de perclorato de amônia úmidas em leito vibrofluidizado, trabalhando com dois leitos, um à alta amplitude de vibração (3,8 cm) e em outro à baixa amplitude de vibração (0,26 cm). Baseado em algumas observações experimentais advertiram que o adimensional de vibração pode não ser um parâmetro satisfatório para caracterização do efeito da intensidade de vibração sobre o grau de aglomeração das partículas. Apesar de utilizarem dois leitos vibrofluidizados com diferentes características para observar o efeito do adimensional de vibração sobre a aglomeração, verificam que a amplitude e a frequência de vibração são igualmente importantes na prevenção da aglomeração das partículas, e não exclusivamente o adimensional de vibração.

Gallas *et al.* (1992) estudaram a dinâmica de esferas de aço, em leitos vibrados (sem aeração), por meio do método da simulação da dinâmica molecular e observaram comportamentos nitidamente diferentes para mesmos valores de Γ , obtido através da combinação de diferentes valores entre A e f. Notaram que o adimensional de vibração não é um parâmetro que sozinho caracterize o início da movimentação das partículas e nem as propriedades dinâmicas do leito.

Barker e Mehta (1993) apresentaram uma revisão da literatura na qual discutiram aspectos referentes a possíveis mecanismos que causam a segregação de partículas de diferentes tamanhos em leitos vibrados (sem aeração). Apesar da grande quantidade de estudos sobre o assunto, os mecanismos que causam este tipo de segregação ainda não são bem compreendidos, gerando muita controvérsia. Mesmo assim, Barker e Mehta (1993) sugeriram que a interação entre a amplitude e a frequência de vibração deva ser investigada para que se encontre o melhor parâmetro de controle para os leitos vibrados, que ajude a esclarecer o efeito da intensidade de vibração sobre os mecanismos da segregação.

Nenhum destes trabalhos teve como objetivo principal investigar a validade do adimensional de vibração (Γ), como um parâmetro de referência para a intensidade de vibração, servindo de base para estudos mais abrangentes neste sentido.

Daleffe (2005) realizou um estudo fluidodinâmico do leito vibrofluidizado e fluidizado, constituído de partículas inertes (esferas de vidro) e utilizando o glicerol para simular a presença de um líquido. A finalidade da pesquisa foi uma melhor análise do efeito da amplitude, da frequência, do adimensional de vibração, do grau de saturação de líquido (ϕ), do tamanho e da densidade das partículas inertes sobre o comportamento fluidodinâmico do leito. Ele observou que o adimensional de vibração não representou de maneira única o comportamento fluidodinâmico do leito. Isto é, foram observados comportamentos fluidodinâmicos distintos para um mesmo adimensional de vibração, obtido de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração. Esta diferença de comportamentos foi mais intensa para adimensional de vibração igual a 4,00 (Figura 2.4), mesmo assim, a universalidade não foi verificada para baixos valores de adimensional de vibração ($\Gamma = 1,00$). Esta diferença de comportamentos para um mesmo adimensional de vibração foi verificada também por meio das curvas de desvio padrão da queda de pressão.

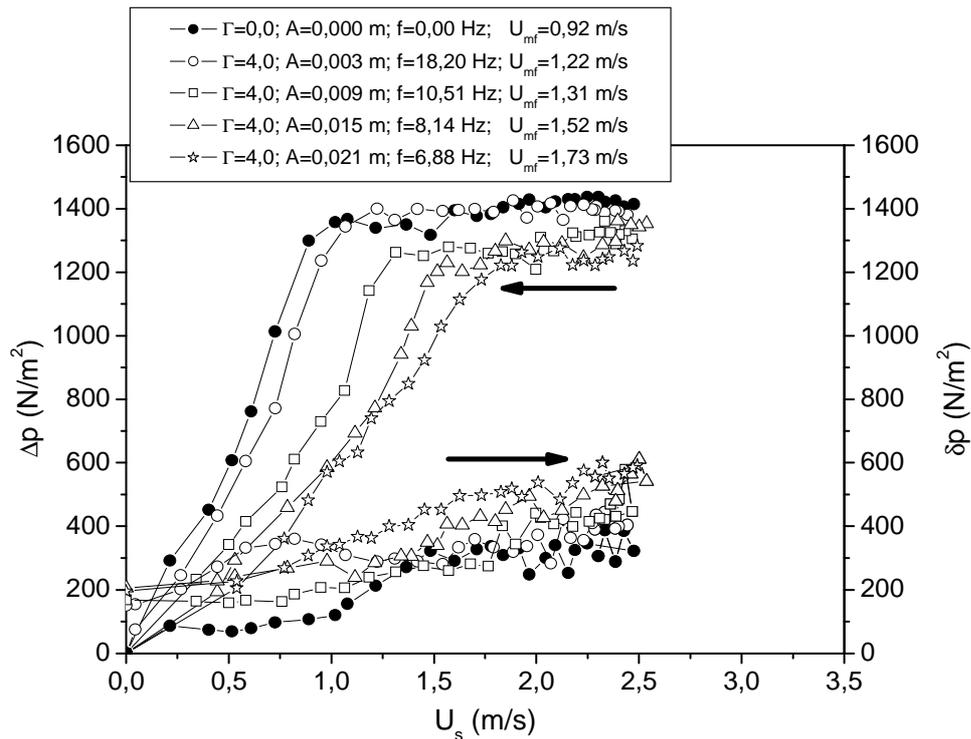


Figura 2.4 - Queda de pressão (ΔP) no leito e seu desvio padrão (δP) em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 4,00$; $\phi = 0,0000$ (DALEFFE, 2005).

2.2.2 Regimes de Operação

Bratu e Jinescu (1971) baseados em observações visuais definiram três regimes de operação de sistemas vibrados dependentes somente da grandeza da componente vertical da aceleração vibracional:

- leito vibrado ($\Gamma < 1$), que é um leito fluidizado simples no qual a vibração somente ajuda na estabilidade e homogeneidade do leito;
- leito vibrofluidizado ($\Gamma \approx 1$) no qual o escoamento do ar e a vibração contribuem no comportamento dinâmico do leito e
- leito fluidizado vibrado ($\Gamma > 1$) em que o leito é influenciado pelas forças vibracionais.

O comportamento aproxima-se a um modelo cilíndrico pistonado e, neste caso, o ar é usado somente como um meio para transferência de calor e massa.

Strumillo e Pakowski (1980) definiram os regimes baseados na velocidade de

mínima fluidização para o leito submetido a qualquer vibração:

- leito vibrofluidizado → leito vibrado com aeração externa forçada, para velocidades do ar menores que a mínima fluidização e
- leito fluidizado vibrado → leito submetido à vibração com aeração externa forçada, para velocidades do ar maiores que a de mínima fluidização.

Pakowski *et al.* (1984) apresentam outra classificação para os regimes baseada na faixa de condições operacionais:

- leito vibrado → $\Gamma > 1$ e sem escoamento do ar;
- leito vibrofluidizado → para $\Gamma > 1$ e velocidade do ar menor que a de mínima fluidização e
- leito fluido vibrado → para qualquer Γ e velocidade do ar maior que a de mínima fluidização.

Daleffe (2005) adotou uma classificação ainda mais simplificada:

- leito vibrado → qualquer leito composto de material particulado que sofre a ação de uma aceleração vibracional exclusivamente vertical, para qualquer Γ e sem escoamento de ar forçado e
- leito vibrofluidizado → qualquer leito composto de material particulado que sofre a ação de uma aceleração vibracional exclusivamente vertical, para qualquer Γ e com escoamento de ar forçado.

2.2.3 Propriedades Fluidodinâmicas dos Leitos Vibrofluidizados

As propriedades fluidodinâmicas fazem parte do estudo que engloba o comportamento de partículas em meio fluidos (sistemas gás-sólido), envolvendo correlações das grandezas físicas da própria partícula e das características do meio em que esta se

encontra, principalmente no tocante ao escoamento do fluido e a perda de carga (BROD, 1999). A obtenção da curva fluidodinâmica do leito, que é o comportamento da queda de pressão frente a variações na velocidade ou vazão do ar, é um passo importante para melhor entendimento de sua dinâmica. Para os leitos vibrofluidizados, Strumillo e Pakowski (1980) apresentaram curvas fluidodinâmicas (Figura 2.5), cujas formas dependem da relação das forças vibracionais e, também, da percolação do fluido através do leito.

A curva **a** da Figura 2.5 é típica de leitos fluidizados convencionais. Quando sobre o sistema é imposta uma vibração ocorre o amortecimento da curva e nenhum ponto de máximo de pressão é notado, isto pode ser observado na curva **b**. Sob certas condições vibracionais a curva **c** pode ser obtida, sendo que no primeiro ponto de inflexão inicia-se o movimento das partículas, como função da amplitude e frequência de vibração. Já no segundo patamar desenvolve-se a fluidização, ou seja, o efeito da vibração é reduzido no sistema, pois o ar é suficiente para sustentar as partículas evitando o choque das mesmas com a placa distribuidora (BRATU e JINESCU, 1971). As curvas do tipo **d** são obtidas em situações que a vibração domina a dinâmica do leito. Verifica-se que a região de transição entre leito fixo e fluidizado estende-se por uma ampla faixa de velocidades do fluido.

A partir da curva fluidodinâmica do leito pode-se obter informações importantes, como, a queda de pressão máxima e a velocidade de mínima fluidização. Como pode ser observado na Figura 2.5 para o leito fluidizado, a transição do leito fixo para o leito fluidizado é facilmente perceptível e a intersecção de duas retas entre as curvas de queda de pressão no leito e de velocidade superficial do ar fornece uma boa estimativa para a velocidade de mínima fluidização. No entanto, para leitos vibrofluidizados dependendo da faixa dos parâmetros utilizados esta transição poderá ocorrer em uma considerável faixa de velocidade do ar.

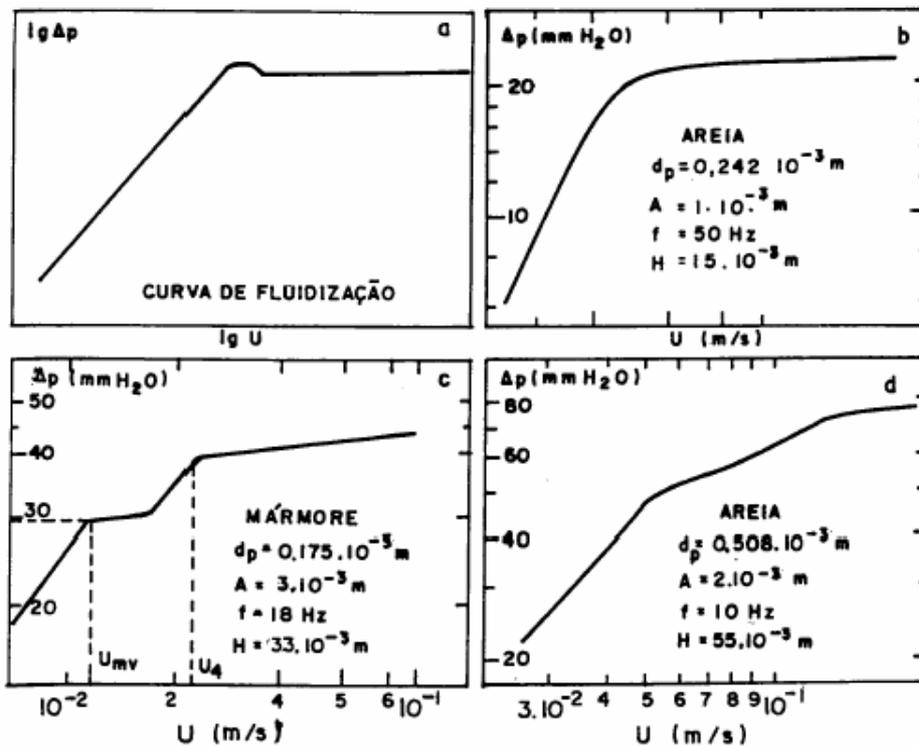


Figura 2.5 - Curvas fluidodinâmicas: a) leito fluidizado; b, c e d) leito vibrofluidizado (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

No trabalho de Gupta e Mujumdar (1980) para os leitos vibrofluidizados foi observado que a velocidade de mínima fluidização, obtida da mesma forma que para leitos fluidizados e utilizando uma amplitude constante, em determinadas situações, aumentava com o aumento do adimensional de vibração, mesmo resultado foi obtido por Garim e Freire (1994) e Daleffe (2002). Entretanto, este resultado é incoerente fisicamente, pois a velocidade de mínima fluidização deveria diminuir com o aumento do Γ (GUPTA e MUJUMDAR, 1980). Desta forma, baseados nestas observações experimentais, Gupta e Mujumdar (1980) concluíram que a mesma metodologia aplicada a leitos fluidizados convencionais não era adequada a leitos vibrofluidizados. Assim, introduziram o conceito de velocidade mínima de mistura (U_{mm}), determinada visualmente, definida como a velocidade a partir da qual as partículas iniciam o movimento umas com relação às outras no interior do leito. Observaram ainda que a velocidade mínima de mistura decresceu com

o aumento da aceleração vibracional. Daleffe (2002) determinou a U_{mm} de forma semelhante à definida inicialmente por Gupta e Mujumdar (1980) e observou que a U_{mm} foi pouco influenciada pela variação do adimensional de vibração, nas condições estudadas, sendo que a variação ficou muito próxima ao erro experimental, ainda que com uma tendência de redução. Mesmo assim, parece não haver ainda um consenso sobre a utilização desta definição, uma vez que é difícil determinar visualmente o momento de início de movimentação das partículas (DALEFFE; 2005).

Outro parâmetro importante na fluidodinâmica em leitos vibrofluidizados é a queda de pressão no leito. Segundo Gupta e Mujumdar (1980) a queda de pressão no leito vibrofluidizado é sempre inferior à do leito fluidizado. Em determinadas condições de operação estes pesquisadores obtiveram uma redução de até 35% na queda de pressão quando era aplicada a vibração. Jinescu *et al.* (2000) observaram uma redução na queda de pressão na mínima fluidização ao trabalharem com Γ maior que 1,5, entretanto a mesma foi maior para maiores alturas de leito estático. Observaram ainda uma redução de 20 a 30% na perda de carga em torno da velocidade de mínima fluidização dos leitos vibrofluidizados em relação aos leitos fluidizados convencionais.

Daleffe (2002) verificou que as temperaturas estudadas (40, 50 e 60°C) não tiveram influência no comportamento da queda de pressão no leito vibrofluidizado, independente do diâmetro de partícula utilizada. Com o aumento da frequência de vibração, para o menor diâmetro de partícula ($1,10 \times 10^{-3}$ m) (Figura 2.6), praticamente não se verificou influência no comportamento da queda de pressão, já para o maior diâmetro de partícula utilizado ($1,85 \times 10^{-3}$ m), o aumento da frequência de vibração provocou a expansão do leito na região de leito fluidizado, contribuindo para redução nos valores de queda de pressão, principalmente próximo a U_{mf} . Este pesquisador ainda afirmou que houve redução da queda de pressão na região de leito fido com o aumento do diâmetro das

partículas, entretanto a região fluidizada praticamente não sofreu nenhuma modificação (Figura 2.7). Nestas condições, a vibração somada ao escoamento de ar pode ter facilitado a suspensão das partículas na região fluidizada, atenuando o efeito do tamanho das mesmas.

Daleffe (2005) investigou o efeito da amplitude, da frequência, do adimensional de vibração, do grau de saturação de líquido (ϕ), do tamanho e da densidade das partículas inertes sobre o comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado (e fluidizado) constituído de partículas inertes (esferas de vidro) e utilizando o glicerol para simular a presença de um líquido. Para o leito fluidizado na região de leito fixo houve uma redução da queda de pressão com o aumento do tamanho das partículas, entretanto na região de leito fluidizado esta praticamente não sofreu modificação, já a velocidade mínima de fluidização aumentou significativamente com o aumento do tamanho dos inertes (Figura 2.8). Sem a presença de vibração a velocidade mínima de fluidização está associada essencialmente à massa individual da partícula, já a queda de pressão na região de leito fixo está associada principalmente com a permeabilidade do leito. Com o aumento da densidade das partículas, observou-se que a queda de pressão na região de leito fluidizado aumentou como consequência do aumento da massa total de leito (em uma mesma altura de leito estático). Neste caso, a velocidade mínima de fluidização também aumentou com o aumento da densidade das partículas, em consequência do aumento da massa individual destas.

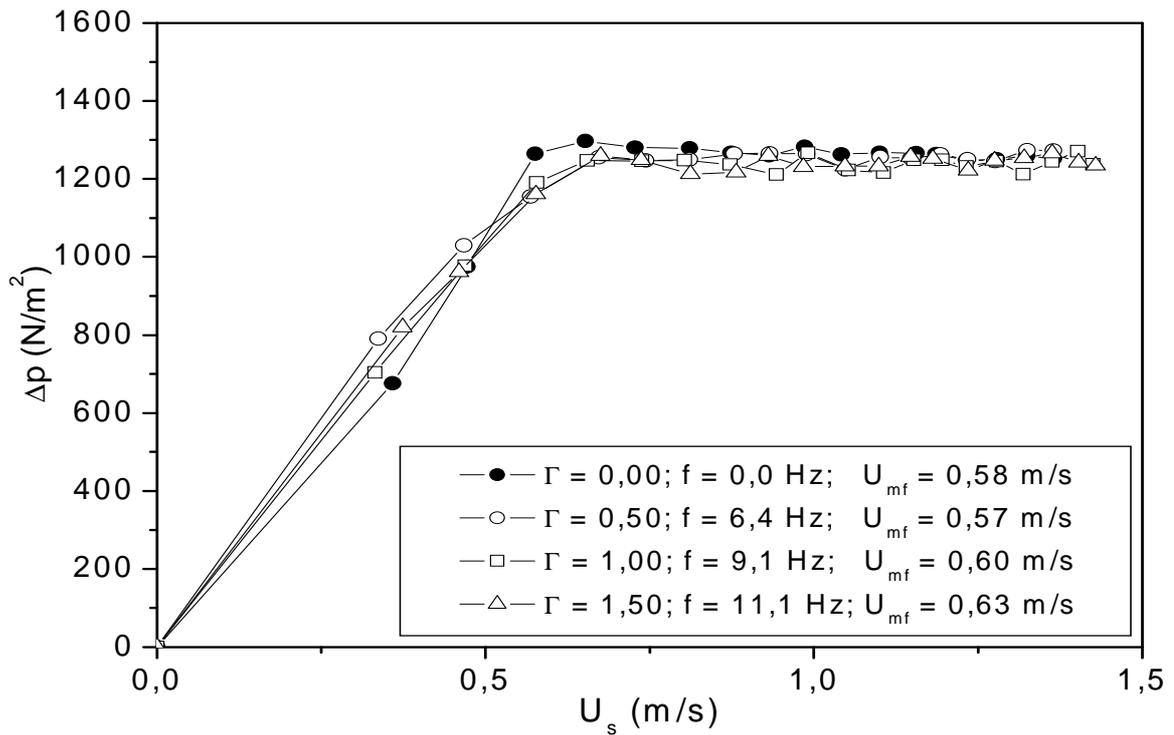


Figura 2.6 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; $\phi = 0,0000$; $A = 3,0 \times 10^{-3}$ m; $T = 40$ °C; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m (DALEFFE; 2002).

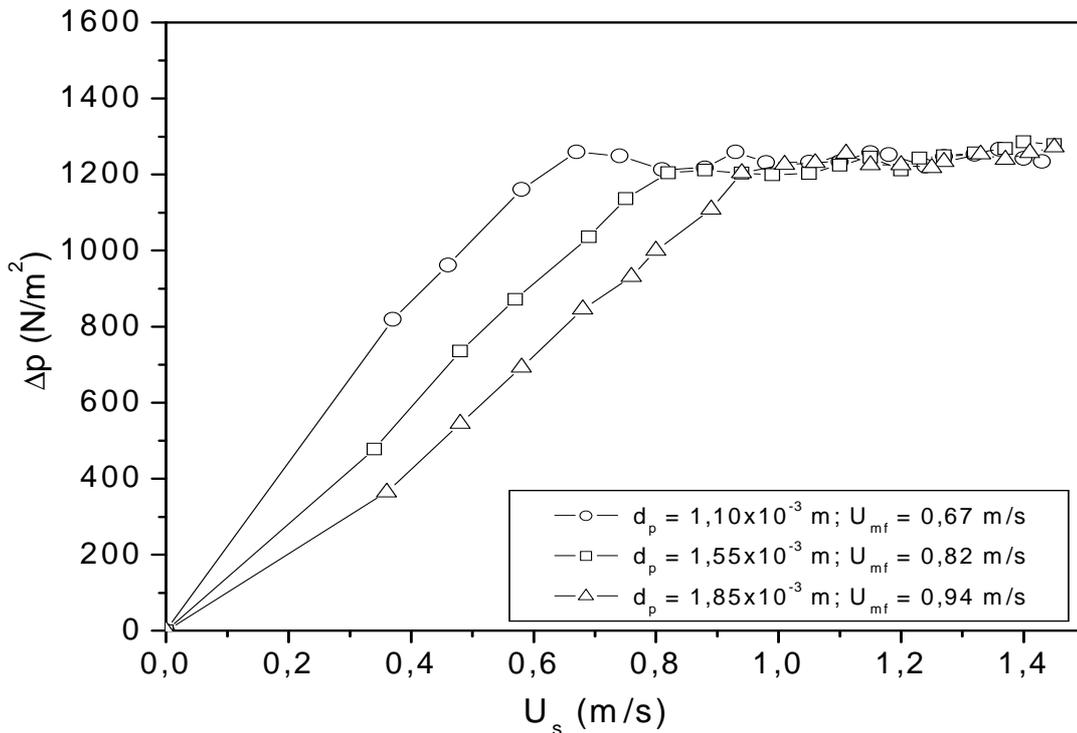


Figura 2.7 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em d_p ; $\phi = 0,0000$; $f = 11,1$ Hz; $\Gamma = 1,50$; $T = 40$ °C. (DALEFFE; 2005).

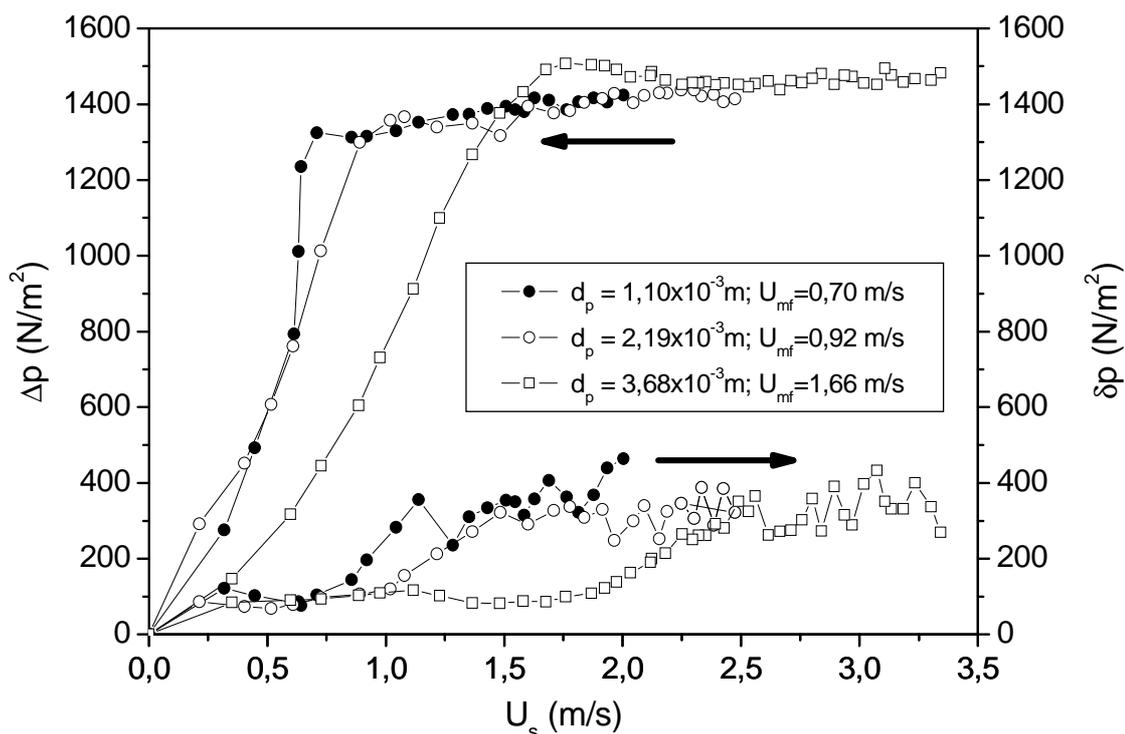


Figura 2.8 - Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0000$. (DALEFFE; 2005).

Daleffe (2005) ainda observou a formação de aglomerações das partículas em todos os casos onde estava presente o glicerol, fator que dificultava a fluidização. Desta forma, a vibração melhorou a movimentação das partículas, minimizando a aglomeração e atenuando a formação de canais preferenciais.

2.3 Transferência de Calor

Os estudos dos fenômenos de transferência de calor em leitos fluidizados e vibrofluidizados são importantes e indispensáveis, principalmente, pelo grande número de aplicações práticas e a necessidade de maiores informações. Kunii e Levenspiel (1991) afirmaram que existem essencialmente duas formas para a determinação do coeficiente de transferência de calor fluido-partícula em leito fluidizado: os experimentos em estado estacionário e não estacionário. Nos experimentos em estado estacionário, energia é

adicionada ou removida ao leito para mantê-lo a uma temperatura uniforme. Energia é adicionada ao gás para aquecer o leito ou removida para resfriá-lo. A grande maioria dos pesquisadores assume que o leito é um tanque de mistura perfeita e a medida da temperatura das partículas é feita na saída do leito, neste caso, a diferença entre a temperatura do gás e das partículas é negligenciável.

Em estado não estacionário a temperatura do gás de entrada é conhecida e a temperatura da saída é seguida ao longo do tempo, e através do balanço de energia obtém-se a temperatura dos sólidos em qualquer instante, a partir disto um valor do coeficiente de transferência de calor gás-partícula é conhecido.

Segundo Strumillo e Kudra (1986) usualmente na literatura são estudados dois casos:

- transferência de calor entre o gás e as partículas (por convecção) e
- transferência de calor entre o leito e uma superfície aquecida submersa (por condução e convecção).

2.3.1 Transferência de calor gás-partículas

Para os dois casos a Lei do Resfriamento de Newton pode ser utilizada para a descrição do fenômeno:

$$Q_T = ha_t \Delta T \quad (6)$$

onde Q_T é o calor total, h é o coeficiente de transferência de calor, a_t é a área de troca térmica e ΔT é a diferença entre as temperaturas de entrada e saída. Entretanto, para a transferência de calor gás-partículas, a área de troca térmica (a_t) é adotada como sendo a superfície total de

partículas. Segundo Strumillo e Kudra (1986) a maioria dos autores calcula o coeficiente de transferência de calor aplicando o modelo “plug flow” para o gás escoando através do leito, assumindo que todo o leito tem a mesma temperatura. Desta forma a diferença de temperatura é adotada conforme a seguinte equação:

$$\overline{\Delta T} = \frac{T_e - T_s}{\ln \frac{T_e - T_M}{T_s - T_M}} \quad (7)$$

onde T_e é a temperatura de entrada, T_s é a temperatura de saída e T_M é a temperatura média.

Kunii e Levenspiel (1991) propuseram uma equação geral (Equação 8) baseada na análise de estudos experimentais os quais aplicaram o modelo “plug flow” e é indicada para Número de Reynolds 0,1 e 80 e Número de Prandtl igual 0,7:

$$Nu = 0,03 Re^{1,3} \quad (8)$$

Onde Nu é o número adimensional de Nusselt e Re é o Número de Reynolds.

Além das equações gerais, apresentadas anteriormente, para a obtenção do coeficiente de transferência de calor gás-partícula, alguns pesquisadores determinaram o coeficiente global de transferência de calor em uma operação de secagem de leite de soja desnatado em leito vibrofluidizado, baseados em um balanço de energia.

Pan *et al.* (2000) utilizaram esta equação para a determinação do coeficiente de transferência de calor volumétrico:

$$h = \frac{Q_T}{V \Delta T_{ln}} \quad (9)$$

em que h é o coeficiente de transferência de calor, Q_T é o calor total, V é o volume da região de troca térmica e ΔT_{ln} é a temperatura média logarítmica.

Nesta equação o calor total (Q_T) consumido era a soma do calor necessário para aquecer a água da temperatura de entrada até a temperatura de saída, para a evaporação da água e para aquecer o material seco, de acordo com as respectivas equações:

$$Q_1 = G \frac{x_e}{100 - x_e} c_w (T_s - T_e) \quad (10)$$

$$Q_2 = G w_e \Delta H \left(\frac{x_e - x_s}{100 - x_s} \right) \quad (11)$$

$$Q_3 = G(100 - x_e) c_s (T_s - T_e) \quad (12)$$

onde Q_1 é o calor consumido para aquecer a água desde a temperatura de entrada até a de saída, x_e é o conteúdo de umidade na entrada, c_w é a capacidade calorífica da água, Q_2 é a quantidade de calor consumido para evaporar a água, G é a vazão mássica do ar, ΔH é a variação de entalpia da água, x_s é o conteúdo de umidade na saída, Q_3 é o calor consumido para aquecer o material seco e c_s é a capacidade calorífica do material seco.

Estes pesquisadores observaram um aumento no coeficiente de transferência de calor com o aumento da vazão de alimentação de líquido, fator que pode estar relacionado ao fato que a baixas vazões de alimentação somente uma parcela das partículas inertes é recoberta com líquido e participa da evaporação da água. Com o aumento da vazão de alimentação a quantidade de partículas recobertas aumenta, até que se atinja um limite na

quantidade de líquido a partir do qual o coeficiente de transferência de calor começa a diminuir e a possibilidade da ocorrência de instabilidades aumenta. Isto é resultado da redução da intensidade da vibração devido ao aumento da pegajosidade entre as partículas causada pelo líquido. De acordo com as equações sugeridas pelos autores, para uma velocidade do ar constante, o coeficiente de transferência de calor aumenta quando a diferença entre as temperaturas de entrada e saída diminuem e diminui com o aumento da temperatura de entrada.

2.3.2 Transferência de calor corpo submerso-partículas

O processo de transferência de calor ao redor de um corpo submerso pode ser separado em três tipos, representadas na Figura 2.9, segundo Kurosaki *et al.* (1995):

- troca de calor por contato, neste caso a energia térmica é transferida diretamente para uma partícula, a qual está em contato com a superfície aquecedora por meio da área de contato, depois de um certo tempo de contato, a partícula se distancia do aquecedor e a energia térmica é transferida para o leito;
- partícula na camada limite; nesta situação, energia térmica é transferida indiretamente para a partícula que passa sobre a camada limite do aquecedor, mas a partícula não entra em contato direto com o aquecedor e
- efeito devido às partículas estagnantes; é quando as partículas estão sobre a superfície de troca térmica por um longo tempo, o calor penetra na partícula numa extensão maior que seu diâmetro, neste caso, a transferência de calor pela superfície da partícula é predominante e as partículas estagnantes na superfície do corpo submerso agem como uma superfície estendida do aquecedor.

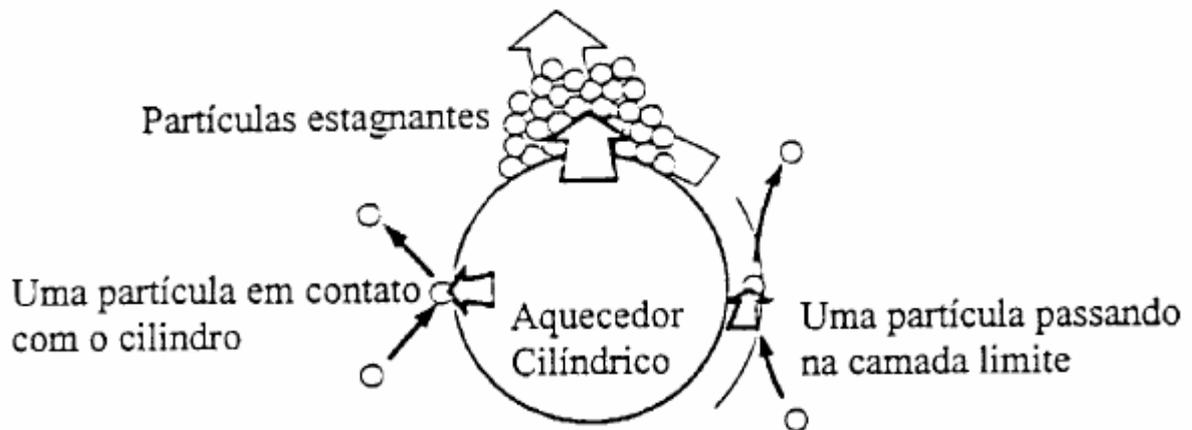


Figura 2.9 – Tipos de processos de transferência de calor de partículas ao redor de um corpo submerso (KUROSAKI *et al.*, 1995).

Camargo (2003) realizou um estudo do coeficiente global de transferência de calor em corpos submersos utilizando leito vibrofluidizado e fluidizado com partículas inertes de vidro em diferentes tamanhos. Para a determinação do coeficiente global de transferência de calor o autor construiu dois corpos, um com geometria cilíndrica e outro de geometria esférica. O primeiro foi confeccionado em latão e era equipado internamente com uma resistência elétrica, que fornecia a quantidade de calor dissipada pelo cilindro. Ligada ao cilindro de latão existia uma peça de teflon que servia de conexão deste com duas hastes de sustentação de fenolite. Foram conectados ao cilindro de latão termopares do tipo K e termopares do tipo J ao longo da peça de teflon para a obtenção do perfil de temperatura.

Os corpos de geometria esférica foram confeccionados em cobre. Internamente ao dispositivo existia uma resistência elétrica, responsável por fornecer calor. Uma peça de teflon foi usada como conexão entre a esfera e a haste de fenolite que sustentava a esfera. Foram utilizados termopares do tipo K instalados na esfera e termopares do tipo J instalados ao longo da peça de teflon para a obtenção do perfil de temperatura.

Desta forma, Camargo (2003) verificou que para o leito fluidizado o coeficiente global de troca térmica resultou em maiores valores nos menores diâmetros de partículas. Em leitos vibrofluidizados, para um adimensional de vibração constante, maiores

velocidades de ar resultaram em maiores coeficientes de transferência de calor. Observou que baixas velocidades do ar provocaram uma maior dependência do coeficiente de troca térmica com o adimensional de vibração, embora não tenha avaliado o efeito de A e f sobre o processo.

Eccles (1990) estudou a transferência de calor corpo submerso-leito vibrofluidizado. Segundo este, a circulação das partículas pode ser um processo dominante na transferência de calor em leitos de partículas. Nos leitos fluidizados, altas taxas de transferência de calor são obtidas com o aumento da vazão de ar, e conseqüentemente, nas taxas de circulação das partículas. Nos leitos vibrados, o acréscimo no coeficiente é obtido com o aumento da circulação pela vibração. Malhotra e Mujumdar (1985) verificaram em seus experimentos que todas as curvas de coeficiente térmico em função do parâmetro vibracional apresentaram um máximo e que isto ocorreu progressivamente à medida que U/U_{mf} foi aumentado. Thomas *et al.* (1998) e Muchowski (1980) relataram que tanto a taxa de circulação dos sólidos como o tamanho dos espaços de ar aumentaram quando a intensidade vibracional foi aumentada, mas sem deixar claro o efeito de A e f sobre este efeito.

Thomas *et al.* (1998) estudaram os coeficientes de transferência de calor utilizando cilindros horizontais e verticais e superfícies planas em leito vibrado. O leito vibrado utilizado continha esferas de alumina e de vidro de alta e baixa densidade para uma altura de leito estático de 30mm. Os autores verificaram que as superfícies planas proporcionaram maiores coeficientes de transferência de calor e que são sensíveis à geometria do pó e vigor da circulação das partículas.

Zhang e Koksall (2006) estudaram a transferência de calor superfície submersa-leito em um leito fluidizado borbulhante e pulsante, utilizando esferas de vidro e partículas de areia, com diâmetros médios variando de 37 μm a 700 μm . Observaram os efeitos da pulsação

na transferência de calor e na hidrodinâmica do leito. O corpo de prova (superfície submersa) foi imerso horizontalmente no leito de partículas e podia ser movido radial e axialmente. O corpo de prova era composto por um cilindro aquecedor o qual foi firmemente revestido por cobre. O calor fornecido pela superfície era controlado por um variador de tensão. Os autores verificaram que a pulsação é uma técnica promissora para aumentar a transferência de calor leito-superfície em um leito fluidizado borbulhante. A pulsação pode ser potencialmente benéfica para aplicações nas quais a magnitude da transferência de calor entre uma superfície submersa e o leito é importante.

Suyandal (2006) desenvolveu um modelo baseado em um balanço de energia, equacionando separadamente as taxas de transferência de calor da parede aquecida para o leito e do leito para o gás. O coeficiente de transferência de calor parede-leito e leito-gás foram calculados pelas equações do modelo. O modelo desenvolvido considerava o processo em estado estacionário, operação adiabática, que o leito poderia ser representado por um tanque bem agitado e que para a fase gás era válido o escoamento pistonado. O autor verificou que o modelo desenvolvido era uma maneira simples de se determinar os coeficientes de transferência de calor necessários para projeto de leitos fluidizados.

2.4 Secagem

A secagem é uma operação presente em praticamente todos os setores industriais, desde o agrícola até o farmacêutico. É uma operação unitária das mais antigas e mais comum em engenharia química (KUDRA e MUJUMDAR, 2002). Acima de 400 tipos de secadores são reportados na literatura dos quais em torno de 50 tipos distintos são normalmente encontrados na prática (MUJUMDAR, 2004). Segundo Strumillo e Kudra (1986) a secagem é um assunto interdisciplinar e muito amplo, bem como um processo energeticamente intenso. A secagem compete com a destilação como

a mais energeticamente intensa operação unitária devido ao alto calor latente de vaporização e à ineficiência inerente ao uso de ar quente (mais comum) como meio de secagem (MUJUMDAR, 2004). Os objetivos básicos da secagem são a redução nos custos com transporte, diminuição das atividades microbiológicas contribuindo na preservação, redução das mudanças físicas e químicas durante a estocagem, necessidade de se acentuar algumas características do produto, dentre outros. Segundo McCormick (1983) a secagem é normalmente considerada um processo de remoção de umidade de um sólido por evaporação. É uma operação termofísica e físico-química que envolve a transferência de calor e massa. De acordo com Mujumdar (2004) a operação de secagem converte um semi-sólido em um sólido através da evaporação do líquido para uma fase vapor através da aplicação de calor.

Desta forma, encontra-se um grande número de tipos de secadores (ou sistemas de secagens) que estão disponíveis (técnica ou economicamente) para diversos tipos de aplicações. No Quadro 2.3 é apresentada uma classificação de secadores de acordo com critérios relacionados à operação, variáveis de processo, características de projeto, dentre outros (MUJUMDAR, 2004).

De acordo com Geankoplis (2003), por causa da enorme complexidade do processo não existe uma teoria simples que possa ser utilizada para todos os tipos de materiais e secadores. Strumillo e Kudra (1986) afirmaram que a análise teórica e o projeto de sistemas de secagem é complicada por inúmeros fatores, como, transferências simultâneas de calor e massa da e para a superfície e dentro do material, a hidrodinâmica do movimento da partícula no interior do secador, os vários mecanismos de migração de umidade, características de alimentação e sistemas de limpeza do gás; estes são somente alguns dos problemas envolvidos. Segundo Mujumdar (2004) a secagem é uma operação complexa que envolve transferência transiente de calor e massa com rápidas mudanças

durante o processo, como físicas e químicas, as quais podem ocasionar mudanças na qualidade do produto, bem como, nos mecanismos de transferências de calor e massa.

Quadro 2.1 - Classificação dos secadores

Critério	Tipos
Modo de operação	Batelada Contínuo
Tipo de adição de calor	Convecção (ar aquecido), condução (superfície submersa aquecida ou camisa de aquecimento), radiação, campos eletromagnéticos, combinação de diferentes modos de transferência de calor Intermitente ou contínuo Adiabático ou não adiabático
Estado do material no secador	Estacionário Movendo, agitado, disperso
Pressão de operação	Vácuo Atmosférica
Agente de secagem	Ar Corrente superaquecida Gás de exaustão
Temperatura de secagem	Abaixo da temperatura de evaporação Acima da temperatura de evaporação Abaixo da temperatura de congelamento
Movimento relativo entre o agente de secagem e do material a ser seco	Co-corrente Contra-corrente Escoamento misto
Número de estágios	Simples Múltiplos
Tempo de residência	Curto (< 1min) Médio (1 – 60min) Longo (>60min)

Fonte: Mujumdar (2004)

De acordo com Mujumdar (2006) a performance energética de um secador ou processo de secagem é caracterizada por vários índices como taxa de evaporação volumétrica, perda de calor na superfície, consumo de vapor, consumo de unidades de calor e eficiência térmica (energética). Para baixas umidades e baixas temperaturas de secagem em que as capacidades caloríficas são constantes, a eficiência energética pode ser aproximada pela eficiência térmica (η_T), a qual é função da temperatura do ar de entrada (T_e), da temperatura

do ar de saída (T_s) e da temperatura ambiente (T_0) de acordo com a seguinte equação:

$$\eta_T = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_0} \quad (13)$$

que pode variar de 0 ($T_s = T_e$) a 1 ($T_s = T_0$).

A equação 13 pode ser utilizada para calcular a eficiência energética para uma dada temperatura se a variação da temperatura de saída com o tempo ou a umidade é conhecida. Sabendo-se que a temperatura do ar de saída não pode ser menor que a temperatura do material a qualquer instante durante o processo de secagem, pode-se concluir que existe uma eficiência máxima determinada pela seguinte equação:

$$\eta_T = \frac{T_e - T_{bu}}{T_e - T_0} \quad (14)$$

em que T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido.

É claro, observando-se as equações 13 e 14, que a eficiência energética do processo de secagem depende das temperaturas de entrada e saída do agente que proporciona a secagem e da temperatura ambiente. Altas eficiências energéticas são atingidas pelo uso de altas temperaturas de entrada e pelo arranjo das condições de saída mais próxima da saturação. Portanto um mesmo secador operando a baixas temperaturas terá menor eficiência energética que operando a altas temperaturas.

2.4.1 Cinética de Secagem

A cinética de secagem está associada às mudanças da umidade média do material e da sua temperatura média com o tempo. Por meio da cinética de secagem é possível

calcular a quantidade de água evaporada, o tempo de secagem, a energia consumida, etc. As mudanças que ocorrem na quantidade de umidade durante o tempo são consequência de parâmetros de processo como temperatura, umidade do ar, velocidade superficial do ar, etc. (STRUMILLO e KUDRA; 1986).

A cinética de secagem pode ser determinada considerando-se uma curva obtida por meio de pesagens sucessivas, ao longo do tempo, de uma batelada de amostra inserida no secador, determinando-se, assim, a umidade perdida durante a secagem. Nas Figuras 2.10 e 2.11 são mostrados exemplos de gráficos de conteúdo de umidade por tempo de secagem e taxa de secagem por conteúdo de umidade, respectivamente. Neste caso, a taxa de secagem é definida como a quantidade de água removida por unidade de tempo e por unidade de superfície de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

Na Figura 2.10, do ponto B ao ponto C a relação conteúdo de umidade=f(tempo) é linear, desta forma a taxa de secagem, que é igual ao coeficiente angular da reta BC, durante este período é constante, em que o sólido está tão úmido que um filme contínuo de água, existente sobre toda a superfície, atua como se o sólido não estivesse presente. A taxa de evaporação é independente do sólido e é como se fosse essencialmente a mesma taxa de evaporação de água livre (GEANKOPLIS, 2003). Se o sólido é não-poroso, a água removida neste período é toda a água da superfície do sólido. Se o sólido é poroso, a maioria da água retirada é suprida pelo interior do sólido (McCABE *et al.*, 1993). A variação linear do conteúdo de umidade em função do tempo ocorre até o ponto crítico C.

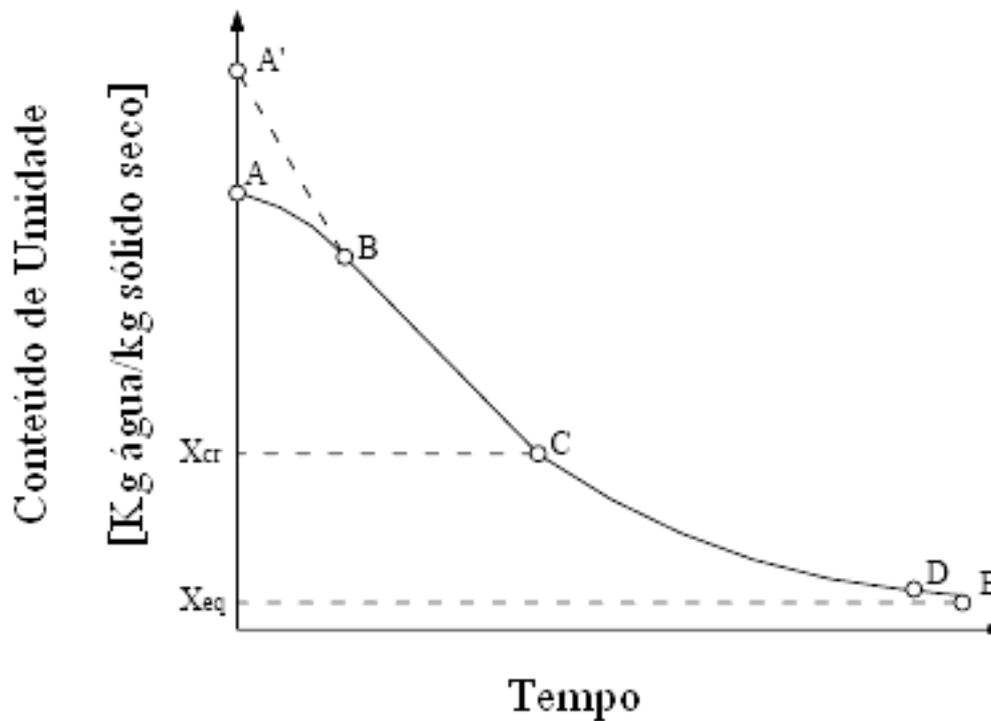


Figura 2.10 – Conteúdo de umidade em função do tempo de secagem (adaptado de Strumillo e Kudra, 1986).

A partir do ponto C da Figura 2.10, a taxa de secagem assume um período de taxa decrescente até atingir o ponto D. Neste período existe água insuficiente na superfície para manter um filme contínuo de água. A superfície não está totalmente molhada e a área molhada decresce continuamente até ficar completamente seca, este período é chamado de primeiro período de taxa decrescente. O segundo período de taxa decrescente inicia-se a partir do ponto D quando a superfície está completamente seca e decresce rapidamente até atingir o ponto E de equilíbrio, em que a umidade de equilíbrio é atingida. O calor necessário à evaporação é transferido através do sólido para a zona de evaporação, então água vaporizada se move através do sólido até a corrente de ar. Em alguns materiais a região CD pode desaparecer completamente (GEANKOPLIS, 2003).

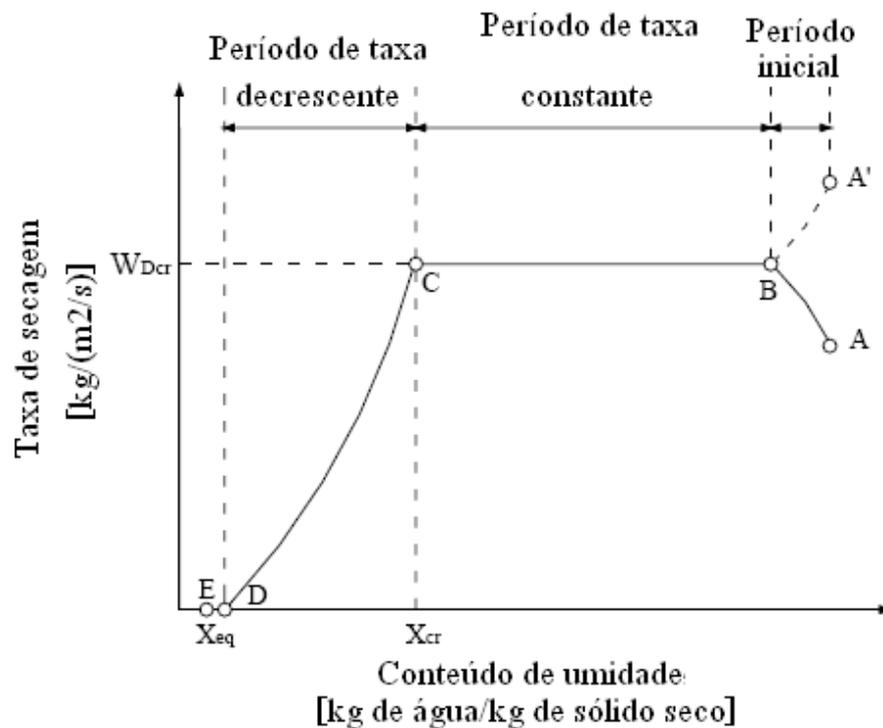


Figura 2.11 – Taxa de secagem em função da umidade livre (adaptado de Strumillo e Kudra 1986).

Segundo Oliveira Jr. (2003) grande parte dos estudos cinéticos são realizados em secadores de leito fixo de camada fina cujo o estudo em leito fixo de camada fina cresce em importância quando se trata de materiais para os quais informações acerca de seu comportamento cinético são escassas. Utilizando-se esta metodologia é possível obter-se informações relevantes sobre a influência das variáveis de processo nos fenômenos de transferência de calor e massa, uma vez que há um amplo controle das condições operacionais (PRADO, 1999).

2.4.2 Secagem de Pastas e Materiais Porosos

A maioria dos estudos realizados e publicados sobre secagem em leitos fluidizados e vibrofluidizados trata da secagem de material particulado poroso dos mais diversos tipos (pedaços, fatias, grãos, pós, sementes, entre outros) avaliando principalmente a

dinâmica do leito durante o processo, a cinética de secagem e a qualidade do produto final. A secagem de material particulado poroso possibilita a descrição do fenômeno da secagem levando-se em conta a retirada de umidade presente na superfície do material (secagem convectiva) e da umidade interna (secagem difusiva).

A remoção da umidade superficial do material se refere ao período de secagem à taxa constante, sendo que neste período as taxas de transferência de calor e massa dependem, principalmente, do mecanismo de transporte na camada limite (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Neste período, em material poroso, ocorre a migração da umidade do interior para a superfície do sólido, ou seja, a remoção da água da superfície é compensada pelo suprimento da água do interior do sólido. Este período é caracterizado pela remoção de água não ligada. A água comporta-se como se o sólido não estivesse presente (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2003).

Quando ocorre a evaporação total do filme líquido da superfície inicia-se o processo de evaporação nas extremidades capilares (secagem difusiva). Portanto, a intensidade da secagem pode ser maior, pois há uma ampliação da superfície de evaporação (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Desta forma, quando o movimento da umidade do interior do sólido não mantém a superfície do material saturada com líquido, elimina-se o resfriamento causado pela evaporação e, então, a temperatura da superfície do material aumenta gradativamente aproximando-se da temperatura do ar de secagem. Neste período a taxa de secagem é controlada pelo escoamento interno da água e do vapor de água (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

Luccas (1996) estudou o processamento de bananas desidratadas na forma de “snacks” em leito fluidizado. Os experimentos foram realizados a altas temperaturas (130 e 150°C) sendo necessária uma secagem final em leito de bandeja para a obtenção da banana desidrata com 6% de umidade. O autor verificou que a pré-secagem em leito fluidizado foi

suficiente para a inativação de enzimas indesejáveis no produto final. Além disso, o leito fluidizado foi importante para a promoção do aumento do volume das amostras obtendo, assim, produtos com propriedades funcionais superiores aos desidratados pelo método convencional de bandeja.

Oliveira Jr. (2003) realizou ensaios para a determinação da cinética de secagem de partículas porosas (alumina e sílica-gel) em leito fixo, fluidizado, vibrofluidizado e de camada fina e observou que a velocidade do ar teve influência mais significativa que a temperatura do ar de secagem e que até a velocidade do ar de 1,5 m/s o efeito convectivo era muito pronunciado, entretanto, acima desta velocidade o efeito difusivo passou a preponderar. Verificou ainda que o adimensional de vibração teve pouca influência nos coeficientes de transferência de calor e massa, porém, foram maiores para o leito vibrofluidizado quando comparado ao fluidizado.

Narimatsu (2004) utilizou partículas de alumina para a análise do comportamento fluidodinâmico e térmico de um leito pneumático vertical. Com isso, verificou que na secagem em leito pneumático existe uma grande dificuldade em se determinar precisamente os valores pontuais de umidade do ar e dos sólidos e a temperatura dos sólidos, principalmente em escoamento em regime diluído.

Souza (2008) estudou a secagem de sais orgânicos (acetato de sódio) e inorgânicos (cloreto de potássio) em leito pulso-fluidizado. Estes sais são higroscópicos e coesivos quando úmidos, portanto são materiais de difícil fluidização. Verificou que a utilização da pulsação contribuiu para a obtenção de taxas de secagem maiores que as obtidas em leito fluidizado convencional.

Akhavan *et al.* (2009) estudaram a secagem de um granulado formado de celulose, lactose e água para simular um material farmacêutico na temperatura de 64° C em um leito fluidizado assistido por pulsação (frequência de pulsação de 3 Hz) e verificaram que a utilização

da pulsação aumenta a taxa de secagem do material e melhora a uniformidade do produto obtido.

Já a secagem de pastas ainda é considerada uma “arte”, pois é uma operação extremamente complexa devido à grande diversidade de tipos de pastas, com características muito distintas e que mudam durante o processo. A escolha da técnica a ser utilizada para a secagem está diretamente relacionada às características do material a ser seco e do produto a ser obtido. Assim, cada pasta requer um estudo específico para a determinação do método de secagem mais adequado (FREIRE, 1992).

A pasta, em termos reológicos, pode ser definida como sendo um sistema sólido-líquido constituído ou de partículas microscópicas ou de partículas coloidais, dispersas em uma fase líquida (WELTMAN, 1960). Strumillo *et al.* (1983) forneceram uma classificação para os materiais pastosos:

- duros → tortas de filtração, precipitados, etc.;
- fofos → pastas de amido, polpas em geral, etc.;
- emulsões → leite natural, maionese, etc.;
- suspensões → leite de cal, $\text{Al}(\text{OH})_3$ em água, enxofre em água, etc.;
- soluções → sangue, salmoura, açúcar em água, etc..

Freire (1992) afirmou que as principais características físicas do material a ser seco são suas propriedades reológicas e sua resistência térmica, e que podem ser determinadas experimentalmente. O produto final, assim como a pasta, é encontrado sob diversas formas que pode variar desde um pó finamente disperso (partículas menores que 10 μm), pós granulados grosseiros (entre 10-200 μm), grânulos (entre 0,2-5,0 mm) até pós aglomerados. O grande número de variáveis envolvidas tanto nas características da pasta quanto do produto final implica em diversas possibilidades de secadores para a realização da secagem.

A secagem de pasta pode ser realizada em leitos preenchidos com partículas inertes, utilizadas como suporte para a operação. Segundo Kudra e Mujumdar (2002) este tipo de

processo foi desenvolvida na antiga URSS na década de 50 e usada para a secagem de pigmentos, química fina, produtos farmacêuticos e alguns materiais de origem biológica, e foi esquecida por diversos anos, principalmente devido às barreiras relativas à língua. Após mais de duas décadas, entretanto, surgiu um interesse renovado nesta técnica devido à sua habilidade de produzir pós de um líquido disperso às taxas de evaporação competitivas com secadores spray-dryer, de tambor e de filme rotativo.

Quando um material do tipo pasta é desidratado sobre a superfície de partículas inertes (por exemplo, esferas de vidro), ocorrem, continuamente, alterações qualitativas nas propriedades mecânicas da camada do produto, à medida que seu conteúdo de umidade vai diminuindo (REGER *et al.*, 1967). O princípio da secagem sobre partículas inertes baseia-se na renovação da película de pasta, devido à colisão e abrasão causadas pelo movimento e choque das partículas. No início do processo de secagem, forma-se um filme líquido sobre as partículas, neste estado as forças de coesão entre as partículas e o filme, devido à presença de água, são muito grandes, o filme deforma pela movimentação das partículas inertes, em vez de ser destruído pela abrasão. Ao longo do processo este filme irá secar devido à transferência convectiva de calor a partir da corrente de ar e à transferência por condução devido ao calor sensível acumulado nas partículas inertes. Neste estado, as forças que aglomeram as partículas sólidas são forças de coesão, mais frágeis. Quando este filme está seco o suficiente a colisão entre as partículas, causada pela movimentação do leito, e a colisão entre as partículas e a parede do secador causam a quebra da película. O pó formado é transportado juntamente com a corrente do ar de exaustão (REGER *et al.*, 1967).

Assim, pode-se dividir o processo de secagem em duas fases: inicialmente, na fase que é determinada pela cinética de secagem e, posteriormente, pela fase determinada pela abrasão do filme seco pela movimentação das partículas inertes. Qualquer uma das fases pode ser a limitante do processo, dependendo das propriedades do material a ser seco. Se a fase de secagem

é a limitante e o seu curso é determinado pela velocidade de evaporação de água, este processo é viável tecnicamente. Se a etapa limitante for associada à abrasão, o processo é inviável, visto que o filme do material irá crescer criando um colapso no leito (REGER *et al.*, 1967).

Para este tipo de processo o regime permanente é alcançado quando a taxa de recobrimento dos inertes for igual à taxa de remoção do filme. A taxa de remoção do filme depende de sua força de adesão ao inerte, que por sua vez depende da friabilidade do filme, a qual é afetada pela umidade e composição da pasta e do número de colisões efetivas das partículas (DALEFFE, 2002). Essas colisões são dependentes dos seguintes fatores:

- circulação de sólidos, que determina o tempo em que os inertes serão novamente recobertos e a energia de colisão que por sua vez são controladas por fatores como vazão de ar, altura de inertes e aceleração vibracional caso seja um leito vibrofluidizado;
- massa da pasta por massa de inerte, que é controlada pela vazão de alimentação de material e pela altura do leito de inerte; e
- taxa de secagem, já que com uma secagem mais rápida, a friabilidade do filme aumenta mais rapidamente.

A secagem de pastas em leitos com partículas inertes ocorre em uma variedade de leitos fluidizados (fluidizado clássico, leito de jorro, leito de jorro fluidizado, leito vibrofluidizado, secador ciclônico, etc.) bem como em outros secadores adequados para a dispersão de materiais, como secadores de corrente agitada ou leitos pneumáticos (KUDRA e MUJUMDAR, 2002).

Outro aspecto importante na secagem de pastas em leitos fluidizado e vibrofluidizado é a caracterização do comportamento fluidodinâmico. Chevilenko *et al.* (1979) mostraram a dependência da velocidade mínima de vibrofluidização com a concentração de água e perceberam que o aumento da concentração de água no leito provocou o aumento da velocidade mínima de vibrofluidização e esse aumento foi atenuado pelo aumento da amplitude de vibração, para uma frequência vibracional constante.

Erdész e Ormós (1986) estudaram a secagem de pastas com partículas inertes em um leito vibrofluidizado de vidro com geometria cilíndrica não apresentando qualquer informação sobre quais foram as amplitudes e frequências de vibração utilizadas. Concluíram que a eficiência de secagem foi melhorada pelo aumento da intensidade de vibração, justamente por aumentar a eficiência da transferência de calor e de umidade e melhorar a taxa de remoção da pasta seca que recobria os inertes, evitando o crescimento descontrolado deste filme.

Novy e Kieckbusch (1988) estudaram a secagem de leite em pó reconstituído em um leito vibrofluidizado de PVC com geometria cilíndrica não informando quais condições vibracionais foram utilizadas e observaram que o diâmetro dos inertes apresentou maior influência sobre a taxa de secagem e que a temperatura do ar e a concentração de alimentação do leite tiveram efeito desprezível sobre esta. Apesar de não citarem o efeito dos parâmetros vibracionais sobre o processo deixaram claro que o mesmo teve um papel importante evitando aglomerações e movimentando as partículas.

Luna-Solano *et al.* (2003) estudaram a secagem de uma pasta de leveduras de cervejaria em leito fluidizado e em spray dryer verificando que a secagem, em ambos os secadores, pode diminuir a cinética de crescimento das leveduras e a produção de álcool, entretanto a habilidade de fermentação foi mantida. Desta forma, a secagem contribuiu na preparação das leveduras, pois possibilitou o transporte das mesmas sem a necessidade de refrigeração.

Moris (2002) estudou a secagem de ácido adípico em leito vibrofluidizado com vibração imposta na placa distribuidora verificando que a utilização de um leito vibrofluidizado possibilitou uma melhor qualidade do produto final, pois este material apresentou dificuldades em atingir o regime de fluidização em um leito fluidizado convencional. A aplicação da vibração melhorou a taxa de circulação e reduz a formação de bolhas, fatores importantes para uma secagem de maior qualidade.

Para esta caracterização deste comportamento em presença de pasta, alguns autores, geralmente utilizam glicerol simulando o efeito de um líquido que praticamente não evapora nas condições normalmente utilizadas. Malhotra *et al.* (1984) estudaram o comportamento fluidodinâmico de partículas inertes de vidro recobertas com glicerol em um leito vibrofluidizado retangular e observaram o regime fluidizado para valores de saturação de glicerol de até 0,0216 mesmo sem ajuda de vibração, porém, caracterizada pela presença de canais preferenciais e de fluidização instável. Acima desta saturação de glicerol, não conseguiram fluidizar o material sem intensa vibração ($\Gamma > 4$). Para o leito sem a adição de líquido, observaram a compactação das partículas com o aumento da intensidade de vibração até Γ próximo de 2, sem especificar o efeito da amplitude e frequência sobre esta observação.

Uma importante contribuição a respeito do comportamento do leito vibrofluidizado frente à adição de glicerol pode ser encontrada nos trabalhos de Daleffe (2002), Daleffe e Freire (2004) e Daleffe (2005). Alguns trabalhos também apresentam a influência do glicerol só que sobre o comportamento do leito de jorro (PATEL *et al.*, 1986; SCHNEIDER e BRIDGEWATER, 1993; PASSOS e MUJUMDAR, 2000; SPTIZNER NETO, 2001; BACELOS *et al.*, 2005), e do leito fluidizado (PASSOS e MUJUMDAR, 2000; PASSOS e MASSARANI, 2001).

A revisão bibliográfica apresentada permitiu uma maior compreensão dos leitos fluidizado e vibrofluidizado no que diz respeito às características mecânicas, fluidodinâmicas e de transferência de calor, além, da secagem de diversos materiais, líquidos ou sólidos. Com isso, foi possível traçar as etapas para a realização deste trabalho com o intuito de contribuir para um melhor entendimento destes equipamentos em áreas ainda não completamente compreendidas. No próximo capítulo serão apresentados detalhes dos equipamentos e da metodologia utilizada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas e descritas as partículas, pastas, equipamentos e periféricos utilizados neste trabalho. Além disso, serão detalhadas as metodologias utilizadas nos procedimentos experimentais. Todos os ensaios foram realizados no Centro de Secagem de Pastas, Sementes e Suspensões localizado no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos.

3.1 Equipamento

O equipamento de leito fluidizado/vibrofluidizado está representado esquematicamente na Figura 3.1 e através de uma fotografia na Figura 3.2. O ar era fornecido ao sistema por um soprador radial IBRAM de 7,5 cv, o qual passa por uma válvula *by-pass* que auxilia no ajuste da vazão. A vazão de ar era obtida por meio da queda de pressão monitorada por meio de uma placa de orifício, previamente calibrada, ligada a transdutores de pressão (Autotran Incorp, 0 a 5 psi, Figura 3.3). Foi medida a perda de carga no leito utilizando-se transdutores de pressão (Autotran Incorp, 0 a 5 psi) e a velocidade na entrada do leito foi obtida utilizando-se correções de temperatura e de diâmetro na velocidade na placa de orifício. Com o intuito de se descontar a queda de pressão provocada pelo equipamento vazio, foi levantada a variação da mesma com a velocidade do ar para que este efeito fosse descontado.

A temperatura do ar injetado no sistema era mantida constante por meio de um aquecedor a resistências elétricas (Figura 3.4) ligadas a um controlador Flyever FE50RP (Figura 3.3). O ar fornecido pelo soprador era injetado ao leito em contracorrente por meio de duas entradas no pleno do leito abaixo da placa distribuidora com o objetivo de homogeneizá-lo. A placa distribuidora apresentava 2×10^{-3} m com furos de $0,8 \times 10^{-3}$ m, o que resultava em

uma área livre de aproximadamente 50%.

O vaso era composto por uma câmara de vidro com seção circular de 0,114 m de diâmetro, 0,50 m de altura e 0,003 m de espessura. As vibrações foram impostas à câmara por uma haste ligada a um mecanismo excêntrico que converte o movimento rotacional produzido por um motor WEG de 0,5 HP para o movimento senoidal vertical no leito. Este motor possuía um variador de velocidade Ringcogne modelo RXM-750, o que possibilitava a obtenção da frequência desejada. A amplitude de vibração era ajustada manualmente no próprio mecanismo excêntrico e a frequência vibracional era medida com um tacômetro ótico Minipa MDT-2244A.. A aceleração, a velocidade e o deslocamento, com o qual o sistema reagia à vibração imposta, foram obtidos por um acelerômetro piezelétrico Brüel & Kjær 4371 previamente calibrado, o qual envia o sinal para um amplificador de sinais Brüel & Kjær 2525 previamente ajustado ao acelerômetro, informando os valores na escala de amplitude em RMS ou de 0 a pico, diretamente. O sistema vibracional foi colocado em uma base independente da mesa, com o intuito de evitar que as vibrações provocadas pelo motor influenciassem o leito.

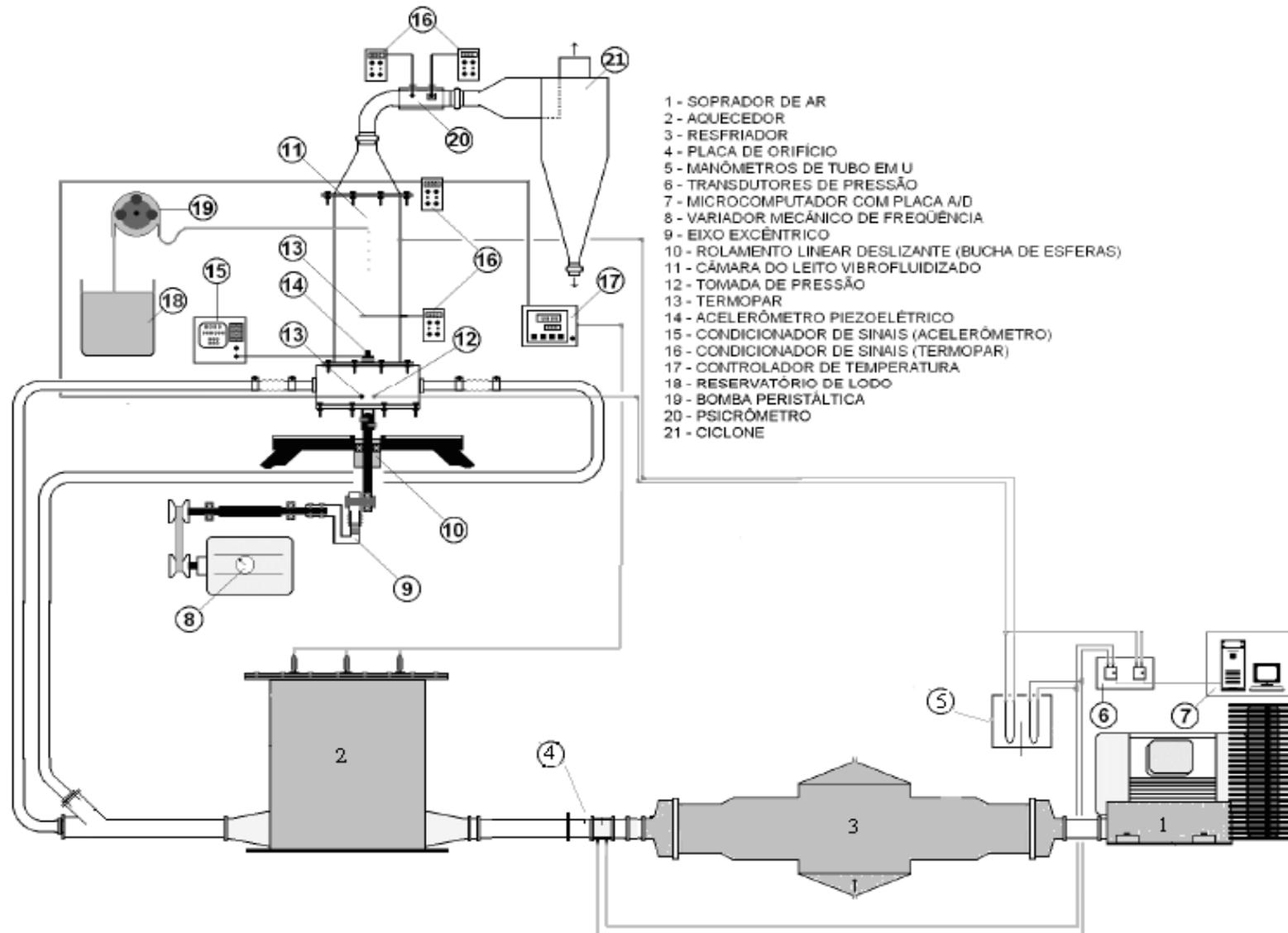


Figura 3.1 - Esquema do secador de leito vibrofluidizado e fluidizado.



Figura 3.2 - Unidade experimental.

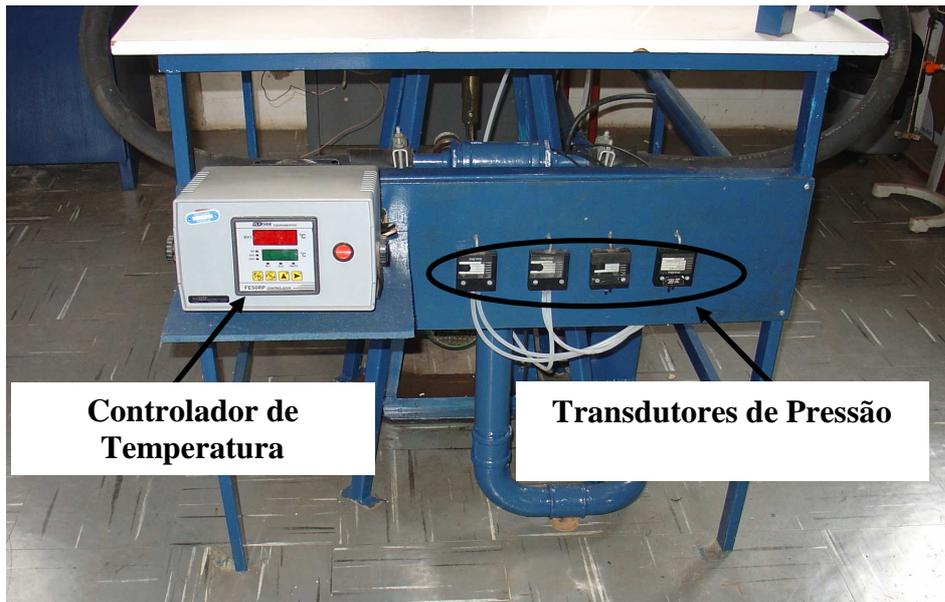


Figura 3.3 - Placa suporte para controlador de temperatura e transdutores de pressão.



Figura 3.4 - Aquecedor elétrico.

Foram realizadas medidas da temperatura ambiente, na placa de orifício, na entrada do leito, na saída e de bulbo seco e úmido. Os termopares utilizados eram do tipo J foram calibrados em um bloco calibrador de termopares (DB-35L) com resolução de $0,1^\circ\text{C}$ e precisão de $0,5^\circ\text{C}$.

Todos os instrumentos responsáveis pelas medidas de temperatura e pressão estavam ligados a um sistema de aquisição de dados que foi desenvolvido em linguagem G, utilizando o Labview 7 Express, com uma placa de aquisição A/D PCI-6024E da National Instruments, instalada em um microcomputador AMD Athlon XP 1800+. Na Figura 3.5 está apresentada a tela principal do software, que é a interface entre o usuário e o sistema de aquisição de dados. O software foi desenvolvido para que o usuário pudesse executar os comandos da aquisição de sinais a partir de uma tela frontal e, se necessário, escolher o formato do arquivo de dados gerado e as unidades dos valores gerados e inserir novos valores de calibração da placa de orifício. Com isso, foi possível a obtenção e tratamento rápidos e eficientes de uma grande quantidade de dado, agilizando e flexibilizando a realização dos experimentos.



Figura 3.5 – Tela principal do software desenvolvido em labview.

3.2 Pasta e material particulado

Neste trabalho foram utilizadas partículas de vidro em três diâmetros diferentes de 463 μm , 780 μm e 2,19 mm e densidade de 2500 kg/m^3 (obtida por picnometria). A escolha do vidro foi baseada na regularidade de forma e tamanho e por ser um material inerte e atóxico amplamente utilizado na literatura. O material particulado escolhido é comumente utilizado em trabalhos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, facilitando comparações.

A água destilada foi utilizada para os ensaios de evaporação e para a secagem foram utilizadas três diferentes pastas: lodo de esgoto, leite desnatado e uma solução aquosa de carbonato de cálcio, este em três concentrações de sólidos.

O lodo de esgoto foi escolhido pelo interesse de se utilizar uma pasta com baixa concentração de sólidos, inferior a 5%. Além disso, é um material de grande interesse ambiental, pois é um dos principais subprodutos gerados nas unidades de tratamento de esgoto. Este pode apresentar em sua composição uma grande carga de elementos patogênicos ao homem. O lodo de esgoto utilizado foi obtido na Estação de Tratamento de Esgotos Sanitário da Universidade (ETEs) de São Paulo (USP/São Carlos – SP), com concentração de sólidos de 4,88 %, determinada por método gravimétrico. As características físicas, químicas e biológicas dos lodos gerados pelas ETEs podem ser muito variadas e dependem do tipo de esgoto afluente, dos processos de tratamento empregados e dos produtos químicos utilizados. Uma composição típica do lodo está disposta na Tabela 3.1.

As amostras de lodo de esgoto foram previamente preparadas, devido à presença de aglomerados sólidos em suspensão e cabelos humanos, por meio de:

- trituração da biomassa em liquidificador de elevada rotação, e
- peneiramento.

Tabela 3.1 – Composição típica do lodo bruto e digerido.

Parâmetro	Lodo Digerido	
	Faixa de Valores	Valor Típico
Sólidos Secos Totais – ST (%)	6 – 12	10
Sólidos Voláteis (% do ST)	30 – 60	40
Graxas e Gorduras Solúveis (% do ST)	5 – 20	18
Proteínas (% do ST)	15 – 20	18
Nitrogênio - N ₂ (% do ST)	1,6 – 6,0	3,0
Fósforo - P ₂ O ₅ (% do ST)	1,5 – 4,0	2,5
Potássio – K ₂ O (% do ST)	0,0 – 3,0	1,0
Celulose (% do ST)	8 – 15	10
Sílica – SiO ₂ (% do ST)	10 – 20	-
pH	6,5 – 7,5	7,0

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (1991).

O leite desnatado foi escolhido por ser um material com características coesivas superiores às encontradas na água e lodo de esgoto, pois apresenta em sua composição lipídeos e carboidratos, componentes que podem ocasionar dificuldades fluidodinâmicas durante a secagem. O leite desnatado (marca Argenzio®) utilizado nos ensaios de secagem foi obtido no comércio local e apresentava densidade de 1032,83±0,13 kg/m³ e concentração de sólidos de 8,90 %. Sua composição básica está apresentada na Tabela 3.2, segundo a Tabela Brasileira de Composição fornecida pela USP. Já a solução de Carbonato de Cálcio (CaCO₃) foi utilizada com o intuito de se analisar a influência de diferentes concentrações de sólidos durante a secagem. As três soluções utilizadas; de concentração de sólidos de 3 , 6 e 9%; foram obtidas utilizando-se CaCO₃ P.A. da marca Qhemis® com 99% de pureza.

Tabela 3.2 – Composição do leite desnatado.

Parâmetro	Composição centesimal (valor por 100g)
Umidade (g)	91,24
Energia (Kcal)	35
Proteínas (g)	3,26
Lipídeos Totais (g)	0,44
Carboidratos Totais – por diferença (g)	4,40
Carboidratos Disponíveis – por diferença (g)	4,40
Cinzas (g)	0,66

Fonte: Adaptado da Tabela brasileira de composição dos alimentos (USP)

3.3 Procedimento Experimental

Para a definição das condições operacionais utilizadas em cada experimento foram realizados testes preliminares a fim de se obter condições favoráveis para as realizações dos ensaios, priorizando a estabilidade estrutural, melhorando assim a qualidade dos dados e prevenindo também danos ao equipamento. Na Tabela 3.3 estão as condições operacionais utilizadas para a realização dos experimentos fluidodinâmicos com as partículas de vidro de diâmetros de 463 e 780 μm .

Tabela 3.3 – Parâmetros experimentais utilizados nos ensaios fluidodinâmicos com partículas de 463 e 780 μm .

Γ	[-]		0	0,5	1,0	2,0	3,0
$A \times f$	[m x RPM]	A [m]	f [RPM]				
		0,014	0	179	253	357	438
		0,020	0	150	211	299	366
		0,026	0	131	185	262	321
		0,032	0	118	167	236	290
H_0	[m]	0,08					
T	[°C]	50					

Para os ensaios de evaporação de água, secagem de lodo de esgoto, leite desnatado e carbonato de cálcio foram utilizadas partículas de vidro com diâmetro de 2,19 mm, com altura de leito de 0,09 m, o que correspondente a 1,5 kg de partículas. Os experimentos de evaporação e secagem foram realizados nas temperaturas de 80 e 100° C e nas velocidades superficiais do ar de 1,33 m/s e 1,55 m/s, correspondentes a 20 e 40% acima da velocidade de mínima fluidização (1,11m/s) obtida através da curva fluidodinâmica para o leito fluidizado na temperatura de 50° C. As condições vibracionais correspondiam a $\Gamma = 0,00$ e 4,00, em que o último era obtido por meio de duas combinações entre amplitude e frequência de vibração, 0,015 m com 8,14 Hz e 0,003 m com 18,24 Hz.

3.3.1 Obtenção da curva fluidodinâmica

Os ensaios fluidodinâmicos foram realizados da seguinte forma: fez-se o ajuste dos parâmetros de operação e manteve-se o leito em regime fluidizado até a estabilização das condições operacionais; em seguida foram obtidas as curvas características para leito fluidizado, ou vibrofluidizado, medindo-se a queda de pressão em função da velocidade superficial de ar (U_s), metodologia já clássica que pode ser vista em Bratu e Jinescu (1971). Para cada condição vibracional, a queda de pressão era obtida decrescendo-se a velocidade de ar. Simultaneamente, o sistema de aquisição de dados também fornecia os valores de desvio padrão da queda de pressão no leito. Cada ponto de queda de pressão foi obtido por meio da média aritmética de 1024 pontos coletados no intervalo de 3 segundos (342 Hz).

A velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) foi determinada por meio da intersecção de duas retas na curva de queda de pressão no leito em função de U_s , uma tangente à curva de leito fixo e a outra tangente à curva de leito fluidizado. Para assegurar a qualidade dos dados, foram obtidas réplicas de todos os experimentos realizados.

3.3.2 Secagem de pasta

Para cada condição de evaporação, após o sistema atingir o regime permanente iniciou-se a alimentação de 10 mL/min de pasta utilizando-se uma bomba peristáltica da marca Cole Parmer modelo 7518-10. A unidade experimental foi monitorada, utilizando-se o sistema de aquisição de dados. Assim que foi detectado que um novo regime permanente foi atingido, a vazão de alimentação de pasta foi aumentada em 4 mL/min e assim sucessivamente. Este processo somente foi interrompido quando o ar na saída estava saturado ou por problemas fluidodinâmicos do leito, como, por exemplo, instabilidades. Durante todo o processo de evaporação foram medidas as temperaturas de bulbo úmido e seco na saída do equipamento e, a partir destes valores, as umidades absolutas e relativas foram calculadas

utilizando-se uma rotina desenvolvida em Matlab®. As umidades foram determinadas subtraindo-se a umidade inicial da umidade para cada tempo a fim de se diminuir interferências relativas a mudanças climáticas. Além das temperaturas, a velocidade do ar na entrada do equipamento e a queda de pressão no leito também foram obtidas através do sistema de aquisição de dados. O próprio sistema de aquisição de dados forneceu a média e o desvio padrão de cada uma das variáveis na tela principal e em uma planilha modo Excel. Também foi realizada a coleta do pó seco no “underflow” do ciclone de 10 em 10 minutos para a determinação da taxa de produção e umidade do pó seco em base úmida utilizando o método direto da estufa a 105° C por 24 h.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa, constituído basicamente de 3 itens:

- fluidodinâmica na fluidização e na vibrofluidização de partículas de vidro com diâmetros inferiores a 1,0 mm, sendo que os detalhes da fluidização e da vibrofluidização das partículas de vidro de 2,19 mm não serão abordados uma vez que já foram apresentados em Daleffe (2005);
- análise fluidodinâmica durante o período da evaporação de água e secagem de lodo de esgoto, leite e carbonato de cálcio, este em três concentrações para os leitos fluidizado e vibrofluidizado operando com partículas de vidro de 2,19 mm;
- análise da evaporação/secagem em leitos fluidizados e vibrofluidizados com partículas de vidro de 2,19 mm.

4.1 Análise fluidodinâmica das partículas de vidro com diâmetros inferiores a 1,0 mm

4.1.1 Leito fluidizado

Em todas as condições experimentais utilizadas foram obtidas réplicas das curvas características e dos desvios padrões correspondentes, sendo que a boa reprodutibilidade das curvas foi verificada em todos os casos estudados. Nas Figuras 4.1 e 4.2 estão as curvas características, os desvios padrões e as respectivas réplicas para o leito fluidizado operando com as partículas de 463 e 780 μm , respectivamente.

Em ambas as figuras nota-se uma curva típica para o leito fluidizado, onde verifica-se uma região bem definida na transição do leito fixo para o leito fluidizado. Pode-se verificar que o aumento do diâmetro da partícula inerte causa uma suavização da curva

característica ocasionando ainda um menor desvio padrão. Além disso, durante a realização dos experimentos, foi possível detectar visualmente que a fluidização foi mais estável e homogênea quando o leito operava com partículas de maior diâmetro.

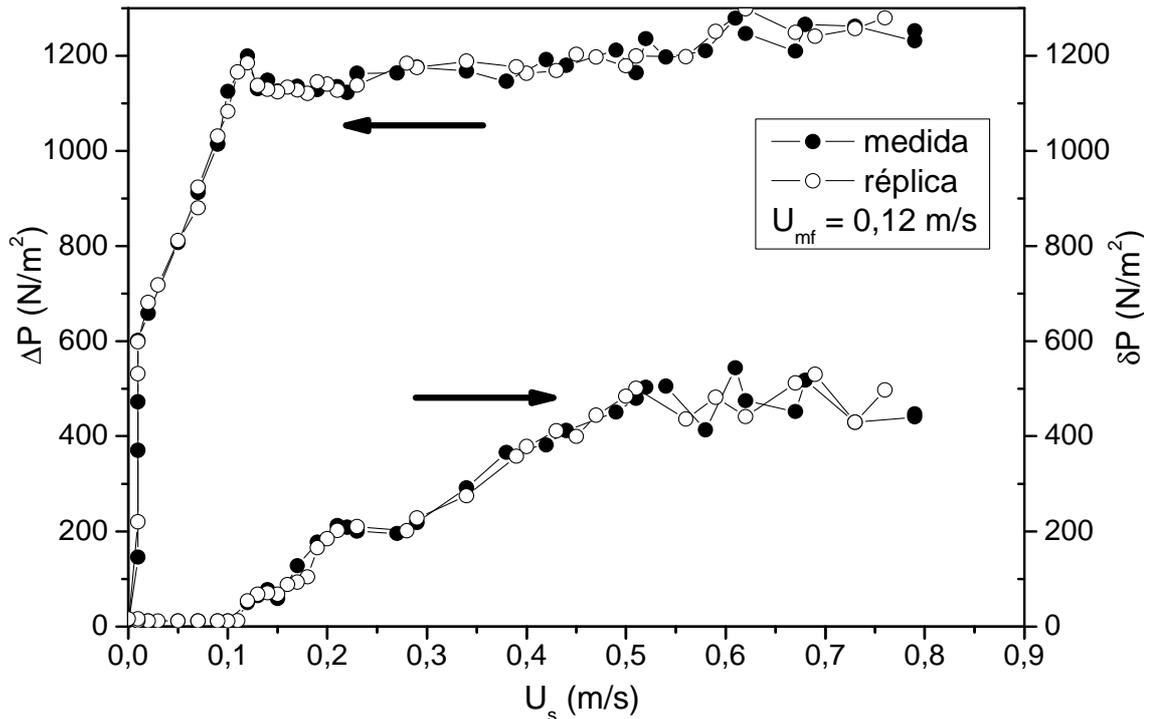


Figura 4.1 – Queda de pressão no leito em função de U_s , desvio padrão e réplica dos dados; leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) e $d_p = 463 \mu\text{m}$.

Segundo Wen e Yu (1966) a velocidade de mínima fluidização pode ser afetada de forma equivalente pela densidade e diâmetro da partícula. Neste trabalho, a densidade da partícula foi fixada, pois foram utilizadas somente partículas de vidro, e, assim, analisou-se somente a influencia do diâmetro da partícula isoladamente. O aumento do diâmetro da partícula ocasiona um aumento na velocidade de mínima fluidização de 0,12 m/s para 0,43 m/s. A explicação está relacionada ao fato de que quando há o aumento no tamanho da partícula ocorre, conjuntamente, o aumento da massa individual da mesma, necessitando-se, assim, de maior velocidade para mantê-la suspensa.

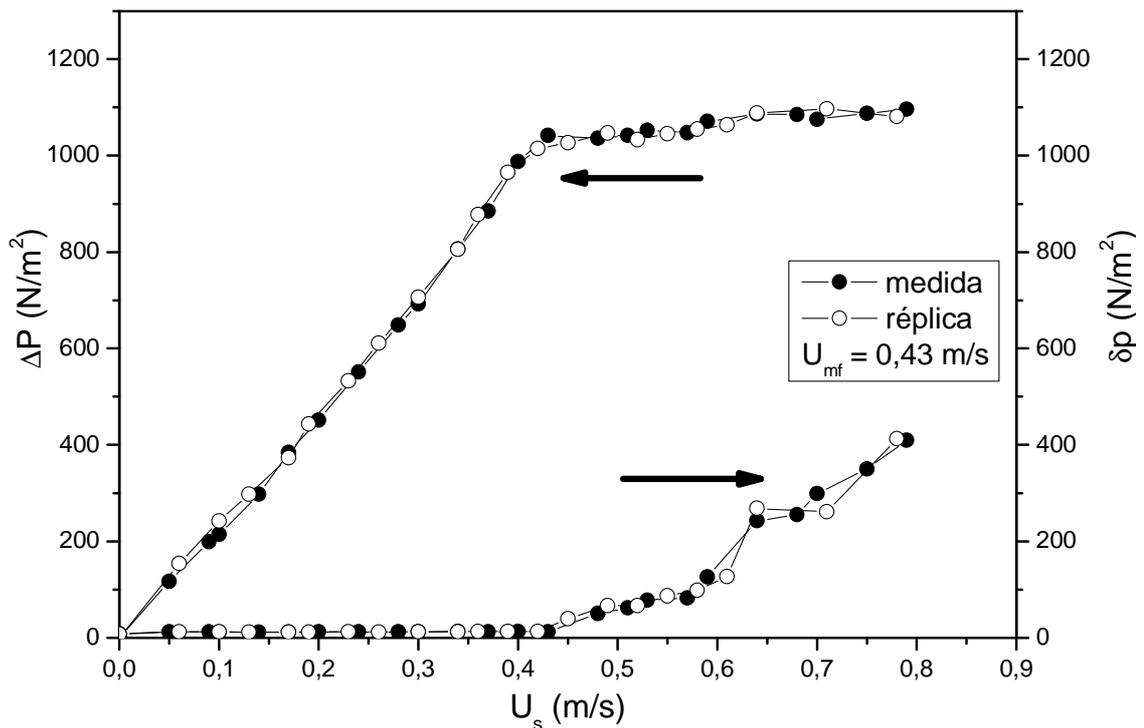


Figura 4.2 - Queda de pressão no leito em função de U_s , desvio padrão e réplica dos dados; leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) e $d_p = 780 \mu m$.

Para uma mesma velocidade do ar, pode-se, ainda, notar que a queda de pressão na região de leito fixo é menor para o maior diâmetro de partícula. Isto pode estar relacionado ao fato de que nos maiores diâmetros há maior espaço entre as partículas o que facilita a passagem do ar diminuindo a queda de pressão. Estes mesmos comportamentos foram observados por Daleffe (2002; 2005) para partículas com diâmetros superiores a 1 mm.

Por meio das Figuras 4.1 e 4.2, pode-se, ainda, notar que os valores de desvio padrão da queda de pressão (δp), quando o leito comporta-se como leito fixo estão muito próximos de zero e vão aumentando significativamente na fluidização incipiente. Este comportamento é comum no início da fluidização já que as velocidades do ar são maiores e a movimentação das partículas é bastante intensa. Visualmente observa-se o aparecimento de bolhas e de “slugs”, fatores que contribuem para estas oscilações. Daleffe e Freire (2004) observaram comportamentos semelhantes e propuseram a utilização das curvas de desvio padrão da queda de pressão para auxiliar na determinação da U_{mf} em leitos fluidizados.

4.1.2 Leito vibrofluidizado

Inicialmente serão analisados os resultados referentes ao efeito da amplitude e frequência de vibração sobre o comportamento fluidodinâmico do leito. Por concisão as réplicas dos resultados obtidos para este equipamento não serão apresentadas. As Figuras 4.3 a 4.6 apresentam as curvas de queda de pressão do leito vibrofluidizado para $\Gamma = 0,5$ e $3,0$ e para os diâmetros de 463 e $780 \mu\text{m}$ parametrizadas nas diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência de vibração (f). As curvas para o leito fluidizado serão também apresentadas nas figuras como referência.

Na Figura 4.3 estão apresentados os resultados para o leito vibrofluidizado para as partículas de $463 \mu\text{m}$ para diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência de vibração (f) com $\Gamma = 0,5$. Observa-se nesta figura que apesar do adimensional da vibração ser inferior a unidade o comportamento dinâmico do leito sofre influência da vibração, comparando-se com o leito fluidizado. Pode-se observar em todos os casos que a queda de pressão após o início da fluidização foi inferior ao observado no leito fluidizado e para as amplitudes de $0,026$ e $0,032 \text{ m}$, as velocidades mínimas de fluidização (U_{mf}) também foram menores que para o leito fluidizado. Nesta mesma figura pode-se ainda notar que o aumento da vibração causa a diminuição nos valores de U_{mf} e de queda de pressão na região de fluidização. A redução na queda de pressão pode estar associada ao fato de que nesta condição de operação ocorreu a expansão do leito com o aumento da amplitude, fator que facilita a passagem de ar através das partículas. Este comportamento pode ser verificado observando-se o desvio padrão da queda de pressão, o qual aumenta com o aumento da amplitude, indicando uma maior movimentação das partículas com a expansão do leito. Nota-se uma elevação nos valores de desvio padrão da queda de pressão para velocidades maiores que $0,25$. Em altas velocidades do ar, a movimentação das partículas pode ser bastante intensa provocando oscilações nas medidas de queda de pressão.

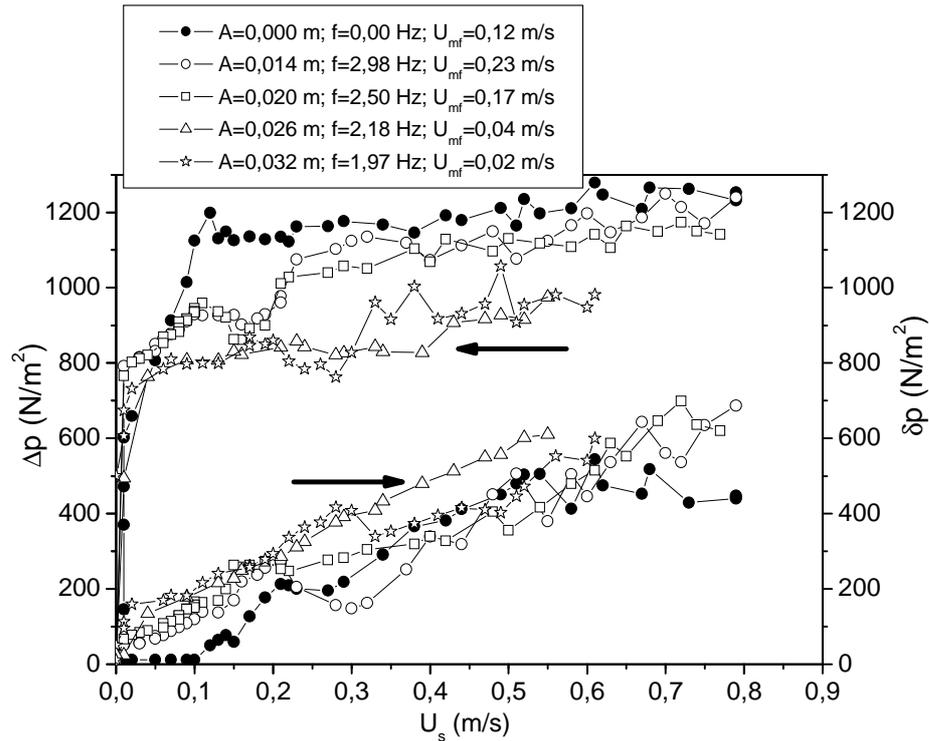


Figura 4.3 - Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,50$; $d_p = 463 \mu\text{m}$.

Na Figura 4.4 estão apresentados os resultados para o leito vibrofluidizado no maior adimensional de vibração ($\Gamma = 3,00$) e para o menor tamanho de partícula inerte. Para as diferentes configurações vibracionais em um mesmo Γ podem-se notar claramente comportamentos distintos. O leito tende a se expandir com o aumento da amplitude de vibração (redução da frequência), comportamento que facilita o escoamento de ar e reduz a queda de pressão. Já se pode notar que o aumento da frequência de vibração promoveu um aumento na queda de pressão, possivelmente relacionado ao melhor rearranjo das partículas. Analisando-se as curvas de desvio padrão da queda de pressão confirma-se a observação visual de que o escoamento era agitado, provavelmente ocasionado pelo alto valor de adimensional de vibração ($\Gamma = 3,00$).

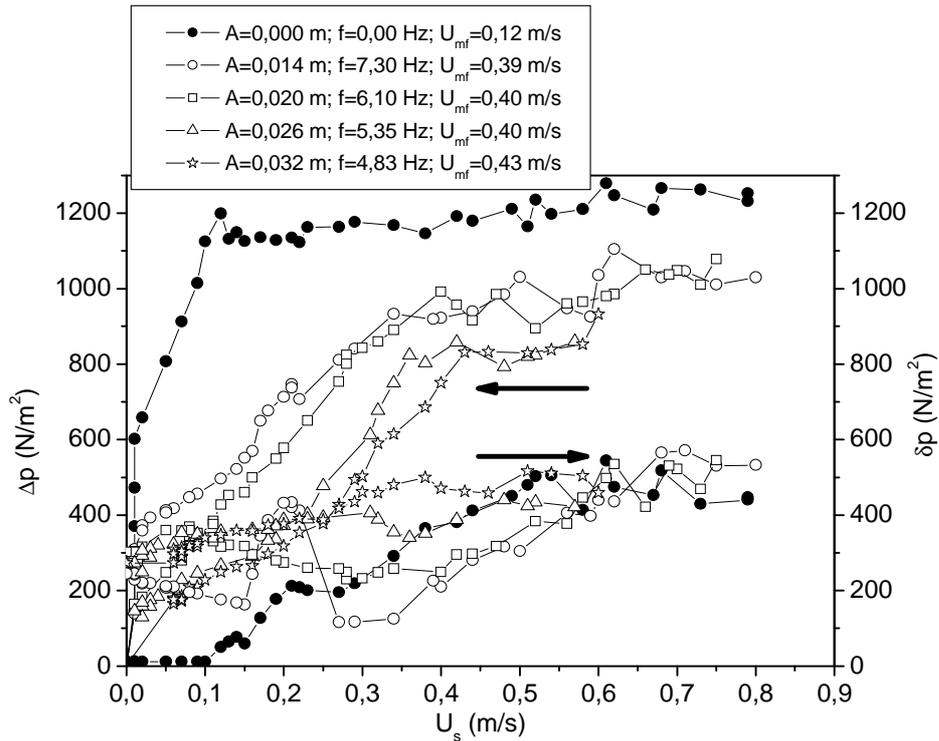


Figura 4.4 - Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 3,00$, $d_p = 463 \mu\text{m}$.

Na Figura 4.5 estão apresentados os resultados para o leito vibrofluidizado com $\Gamma = 0,5$, em diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência (f) de vibração e para a partícula de $780 \mu\text{m}$. Nesta figura observa-se que, diferentemente do observado para as partículas de $463 \mu\text{m}$, diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração não ocasionaram alterações significativas entre as curvas de queda de pressão. Este comportamento, provavelmente, está ligado ao fato de que o adimensional de vibração pequeno ($\Gamma = 0,5$) não foi suficiente para proporcionar grandes mudanças na dinâmica do leito operando com as partículas maiores. Para as partículas menores a intensidade de vibração foi capaz de causar as alterações observadas, provavelmente, porque a massa das partículas era menor. Para velocidades do ar superiores a $0,45 \text{ m/s}$ há um distanciamento entre as curvas de desvio padrão, pois, nesta condição, as diferentes configurações vibracionais foram suficientes para alterar o padrão de movimentação das partículas.

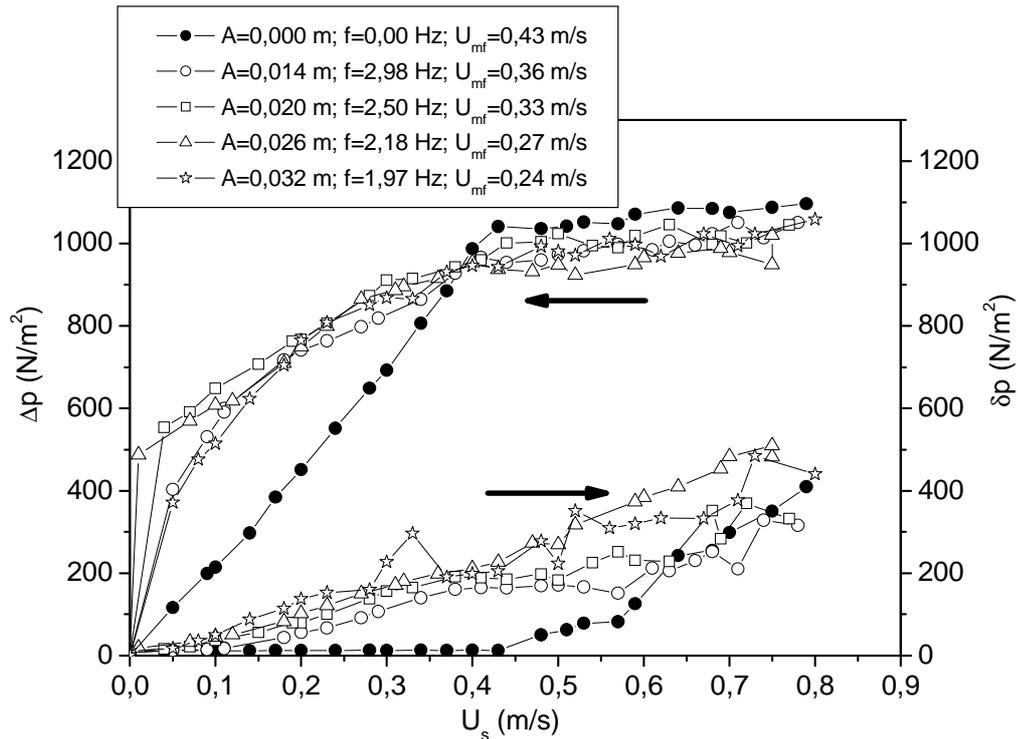


Figura 4.5 - Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,50$; $d_p = 780 \mu\text{m}$.

Na Figura 4.6, para o maior valor de adimensional de vibração ($\Gamma = 3,00$) e para a maior partícula ($d_p = 780 \mu\text{m}$), as diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração não foram capazes de causar um efeito significativo no comportamento das curvas de queda de pressão no leito. Com relação à queda de pressão, este comportamento pode ter relação com o fato deste parâmetro estar ligado à permeabilidade do leito e ao equilíbrio entre as forças de arraste e a gravitacional, que neste caso, provavelmente, não foram afetadas. Em todas as amplitudes analisadas observam-se comportamentos diferentes nos valores do desvio padrão, fator provavelmente relacionado com as oscilações nas medidas de queda de pressão, demonstrando a intensa movimentação do leito. Durante a experimentação foi possível observar uma grande movimentação das partículas com o aumento da amplitude de vibração, comprovando as observações feitas a partir do desvio padrão.

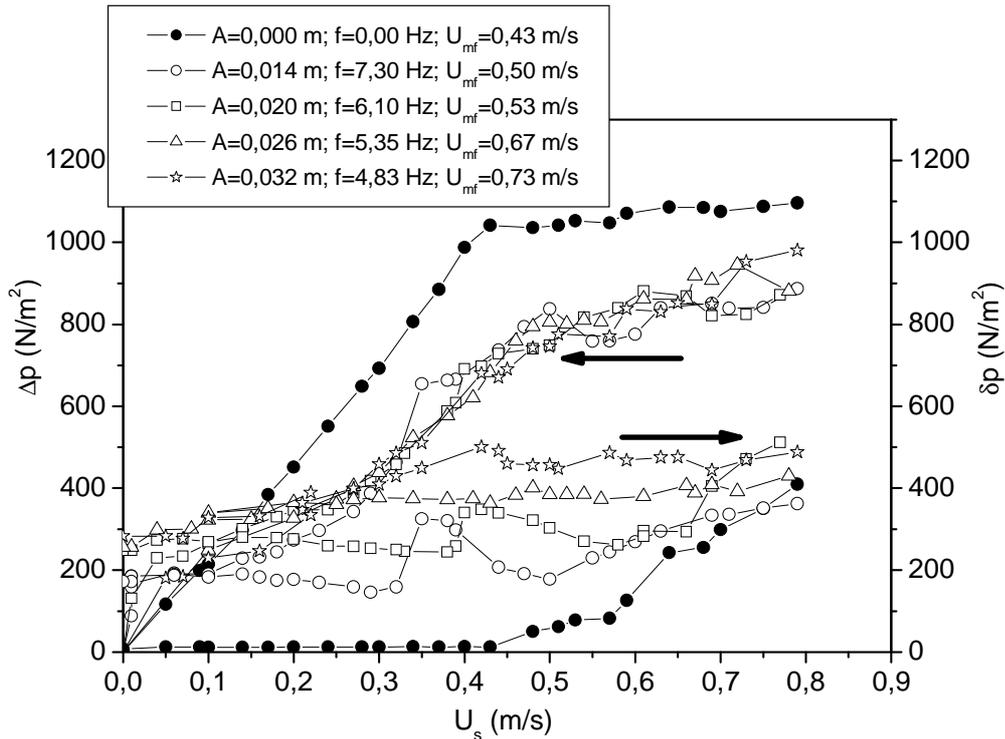


Figura 4.6 - Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 3,00$; $d_p = 780 \mu\text{m}$.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 analisam-se os resultados para o efeito da variação do adimensional de vibração por meio da variação da frequência, sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, mantendo sempre a amplitude fixa. Os resultados para a partícula de $780 \mu\text{m}$ foram qualitativamente semelhantes aos obtidos para a menor partícula, e por concisão, não serão apresentados.

Na Figura 4.7, foi mantida a amplitude em $0,014$ m e variados os valores da frequência, obtendo-se adimensionais de vibração entre $0,00$ e $3,00$. Com o aumento do adimensional de vibração a uma baixa amplitude pode-se notar uma redução na queda de pressão. O aumento da frequência de vibração ocasionou uma menor resistência para a passagem do ar, pois era observada uma expansão no leito, ocasionando, além disso, um retardamento no início da fluidização. Observa-se que a aplicação da vibração pode reduzir por volta de 25% a queda de pressão em torno da velocidade de mínima fluidização, quando comparado o leito vibrofluidizado com o fluidizado, demonstrando que a aplicação da

vibração tem grande importância quando se deseja reduzir a perda de carga no leito.

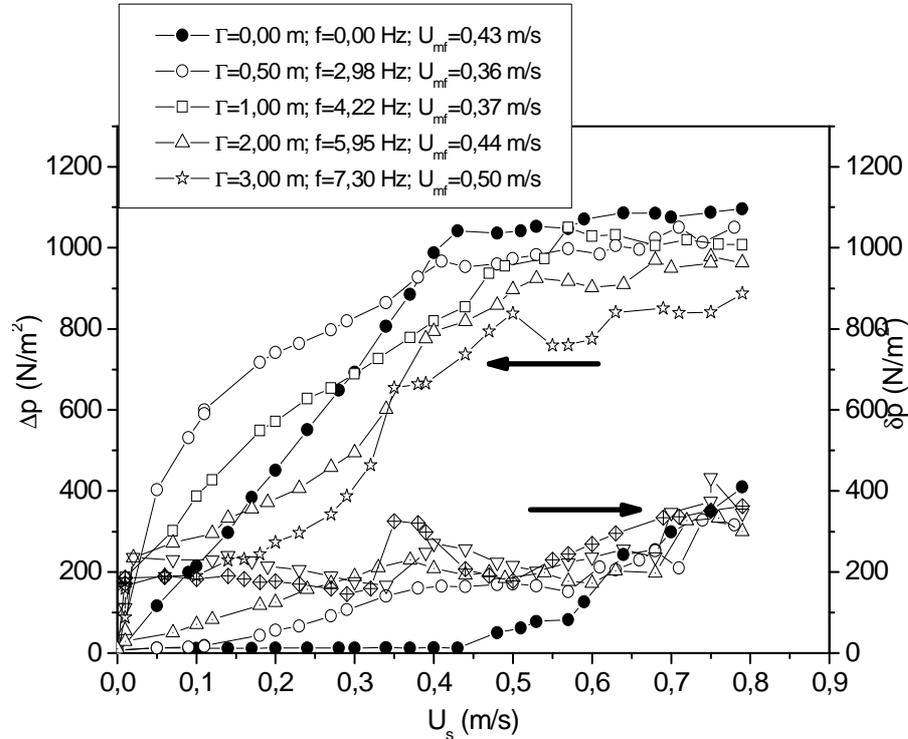


Figura 4.7 - Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $A = 0,014$ m; $d_p = 780$ μm .

Na Figura 4.8, a amplitude foi mantida em 0,032 m e variou-se a frequência de modo a se obter variação no adimensional de vibração entre 0,0 e 3,0. Nesta situação, houve uma redução significativa da queda de pressão no leito, superior a encontrada na Figura 4.7. Pode-se observar na Figura 4.8 que há um maior distanciamento entre as curvas, em comparação com a utilização de uma amplitude mais baixa, em que o aumento da frequência pode até contribuir para a compactação do leito. Este comportamento pode estar relacionado ao fato de que maiores amplitudes causam um arremesso das partículas e maior movimentação do leito. Por ocorrer uma grande expansão do leito pode-se notar um aumento significativo nos valores de velocidade de mínima fluidização, pois o ar escoava com mais facilidade através do leito necessitando de maior velocidade para iniciar a fluidização das partículas.

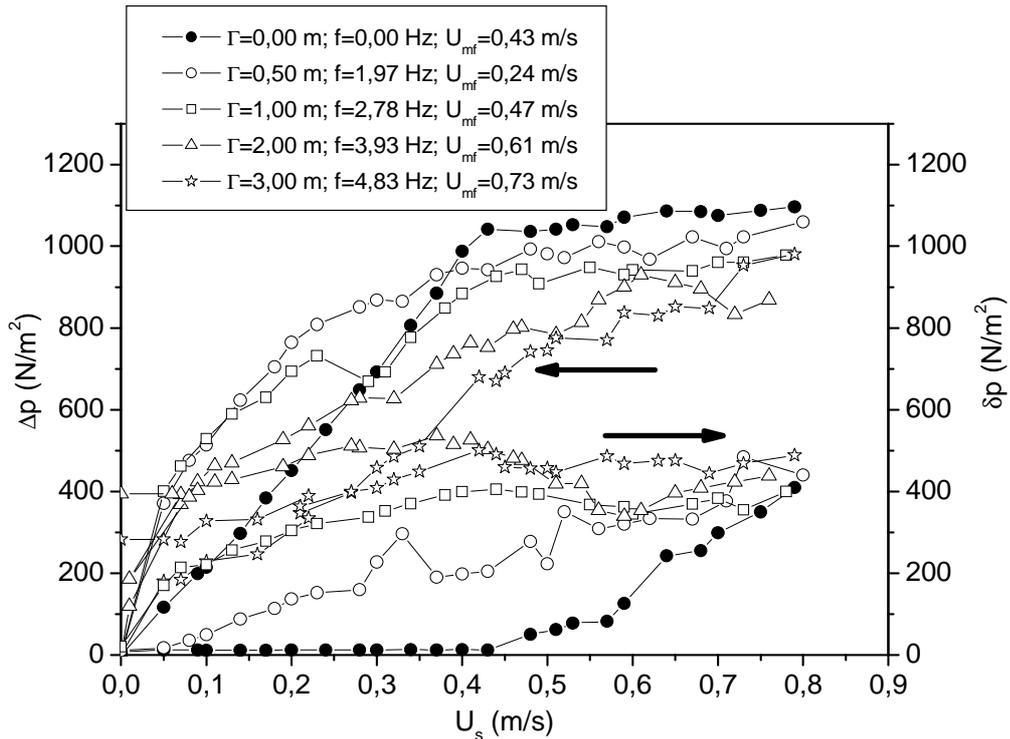


Figura 4.8 - Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $A = 0,032$ m; $d_p = 780 \mu\text{m}$

Com relação aos resultados apresentados para partículas de vidro de diâmetros inferiores a 1 mm, as quais geralmente são de fácil fluidização, pode-se afirmar que para um mesmo adimensional de vibração em diferentes pares A e f , a dinâmica do leito também não é a mesma. Com isso, o adimensional de vibração é um parâmetro que deve ser utilizado com cautela, pois não apresenta características universais e sempre deve ser informado juntamente com as outras variáveis vibracionais.

4.1.3 Conclusões

Para os resultados da fluidodinâmica em leitos fluidizado e vibrofluidizado operando com partículas de diâmetro inferior a 1 mm pode-se afirmar:

- o aumento no diâmetro da partícula ocasiona uma leve diminuição na curva característica, uma fluidização mais estável e homogênea e, obviamente, um aumento no valor da U_{mf} ;

- na região de leito fixo o aumento do d_p ocasiona uma diminuição nos valores de queda de pressão, provavelmente relacionados ao aumento nos espaços interpartícula e
- para o leito vibrofluidizado operando com partículas de diâmetros inferiores a 1,00 mm verificou-se que em todos os intervalos de condições experimentais investigados neste trabalho o adimensional de vibração (Γ) tem que ser utilizado com bastante cuidado, se for o único parâmetro para configurar o efeito vibracional na fluidodinâmica do leito, uma vez que os resultados indicaram claramente que o comportamento fluidodinâmico do leito é muito dependente das diferentes combinações entre A e f , para um mesmo Γ . Tal conclusão evidencia fortemente a não universalidade do adimensional de vibração na fluidodinâmica do leito vibrofluidizado, pois complementa os resultados obtidos por Daleffe (2005) para partículas de diâmetros superiores a 1,00 mm onde o adimensional de vibração também não representa de maneira única o comportamento fluidodinâmico do leito. Desta forma, sugere-se, a utilização da amplitude ou da frequência de vibração além do adimensional de vibração para melhor caracterização o efeito vibracional sobre o comportamento fluidodinâmico do leito.

4.2 Análise fluidodinâmica durante o período transiente da secagem com partículas de vidro com diâmetro de 2,19 mm

4.2.1 Leito Fluidizado

Na Figura 4.9 É apresentada a curva característica para o leito fluidizado com partículas esféricas do tipo “balotini” de 2,19 mm de diâmetro. Observa-se uma curva característica típica para leito fluidizado com uma transição entre as regiões de

leito fixo e fluidizado bem definida delimitada pela velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) de 1,1 m/s. A partir da velocidade de mínima fluidização obtida neste gráfico foram determinadas as velocidades utilizadas na análise fluidodinâmica e secagem de pastas durante o período transiente para os leitos fluidizado e vibrofluidizado. As velocidades do ar utilizadas nestas análises foram de 1,33 m/s e 1,55 m/s, correspondentes a 20 e 40 % acima da U_{mf} , respectivamente.

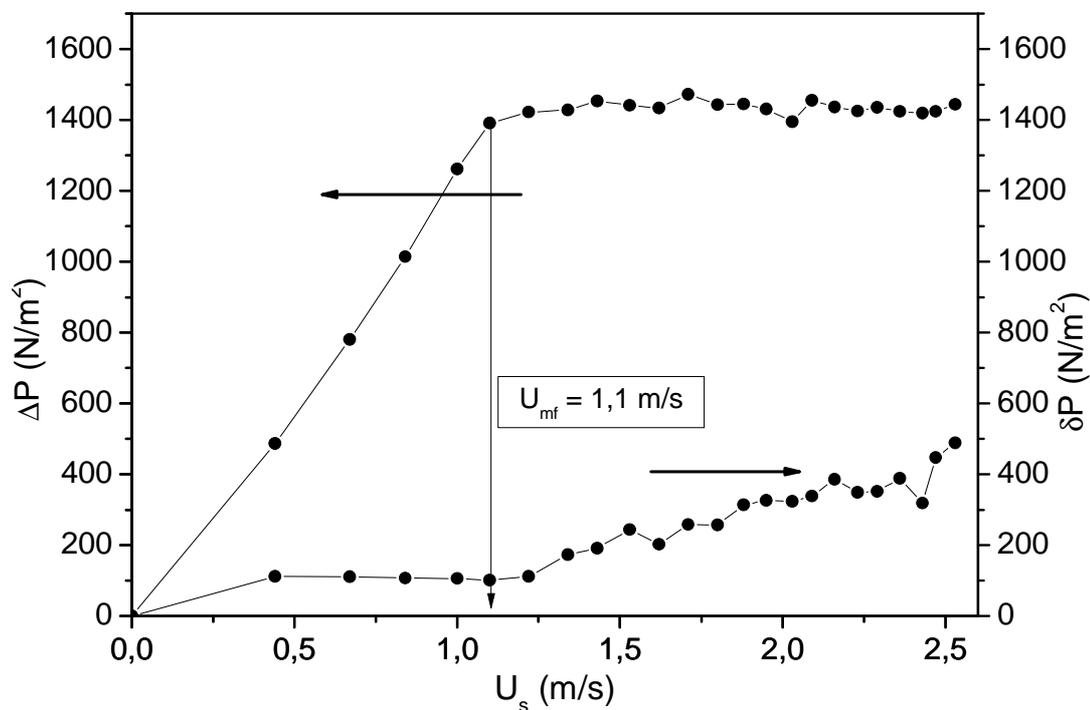


Figura 4.9 - Queda de pressão e desvio padrão em função da U_s para o leito fluidizado.

Nas Figuras 4.10 a 4.13 estão apresentados os adimensionais da queda de pressão no leito durante o período transiente da evaporação de água parametrizadas em diferentes vazões de alimentação. O adimensional de queda de pressão foi calculado dividindo-se cada valor de queda de pressão coletada no tempo pelo valor inicial. Observa-se, em todos os casos, que o adimensional da queda de pressão oscila ao longo do tempo de operação, para todas as vazões de alimentação de água. Segundo Daleffe (2005), para partículas de vidro de 2,19 mm, a queda de pressão apresenta valores oscilatórios após o estabelecimento da fluidização sendo amplificados

com o aumento da velocidade do ar. Os dados do adimensional de queda de pressão deste trabalho foram obtidos com o regime de fluidização estabelecido em velocidades do ar maiores que a velocidade de mínima fluidização, assim, pode-se afirmar que a oscilação observada era prevista.

Comparando-se a Figura 4.10 com a 4.11, para a temperatura de entrada igual a 80° C e a Figura 4.12 com a 4.13, para temperatura de entrada de 100° C, pode-se observar que ocorre um aumento da vazão máxima de alimentação de 22 ml/min para 30 ml/min para o primeiro caso e de 34 ml/min para 42 ml/min para o segundo caso, devido ao aumento da velocidade do ar de secagem. Comparando-se as Figuras 4.10 com a 4.12, velocidade do ar de secagem igual a 1,33 m/s, e a Figura 4.11 com a 4.13, velocidade do ar de secagem igual a 1,55 m/s, pode-se afirmar que o aumento na temperatura do ar de secagem proporciona um aumento de 22 ml/min para 34 ml/min, no primeiro caso, e de 30 ml/min para 42 ml/min, no segundo caso. Com isso, pode-se dizer que o aumento da capacidade evaporativa do leito está relacionada com a quantidade de calor inserida no mesmo, seja pelo aumento da velocidade do ar de secagem seja pelo aumento da temperatura.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 (80° C) observa-se que a mudança de velocidade do ar de 1,33 m/s para 1,55 m/s não provocou uma diferença visualmente significativa nos resultados do adimensional de queda de pressão, entretanto, comparando-se as Figuras 4.12 e 4.13 (100° C), o mesmo aumento da velocidade do ar ocasionou oscilações mais intensas nos resultados de queda de pressão. Isto mostra que o aumento da velocidade do ar de secagem ocasiona maior movimentação das partículas melhorando assim a capacidade evaporativa do leito. Além disso, pode-se dizer que na maior temperatura o leito torna-se mais sensível a mudanças na velocidade do ar. Assim, um leito fluidizado operando a 100° C pode ter as taxas de transferência de quantidade de movimento, calor e massa modificados com uma simples alteração na velocidade do ar, o mesmo não pode ser dito para o leito operando a 80° C.

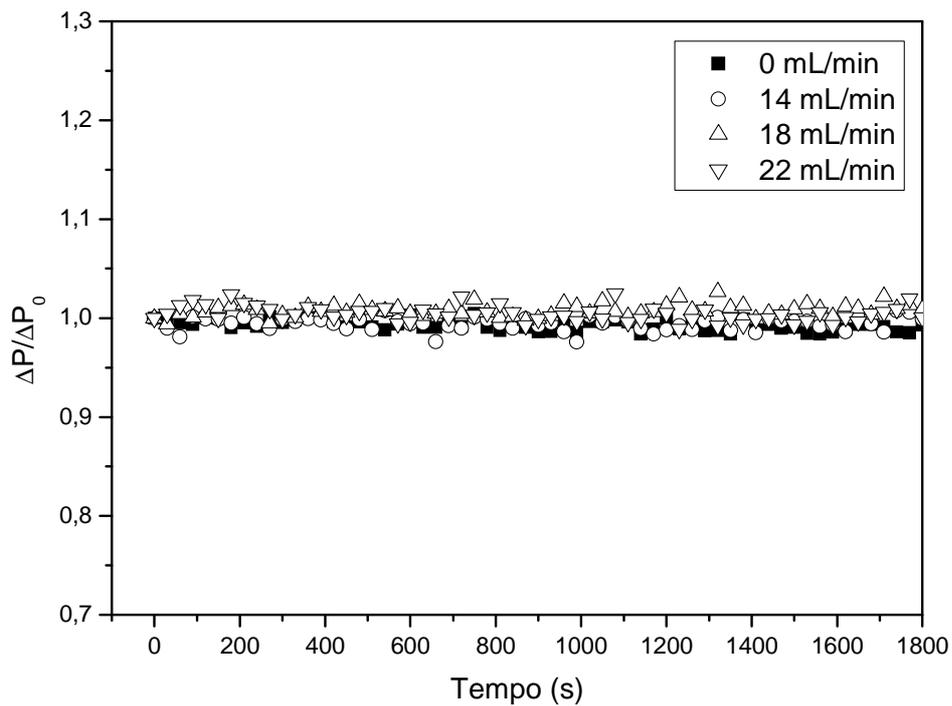


Figura 4.10 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de água para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

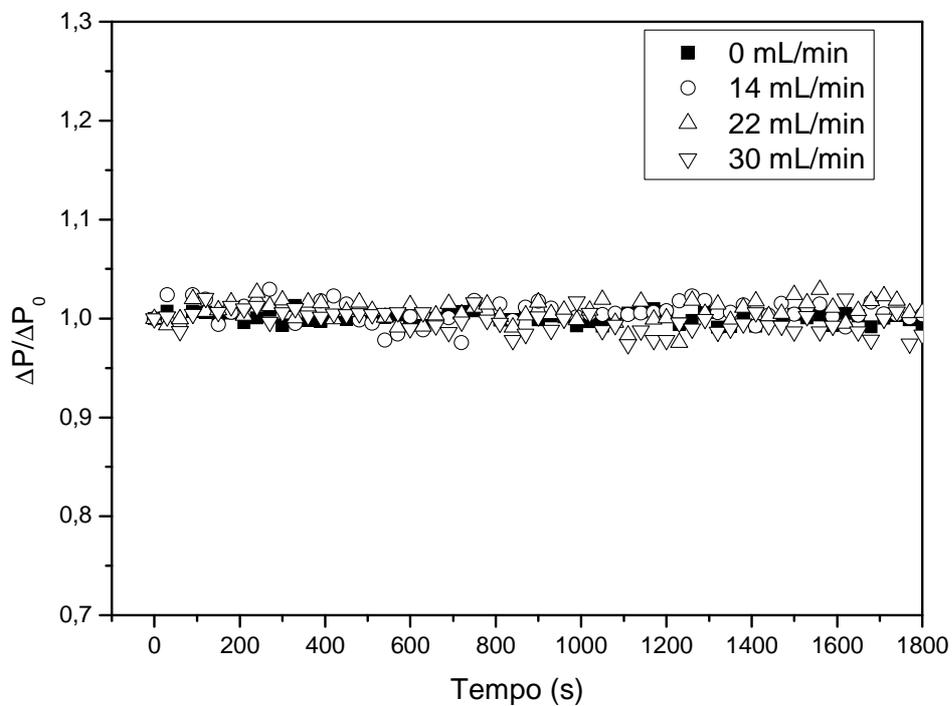


Figura 4.11 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de água para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

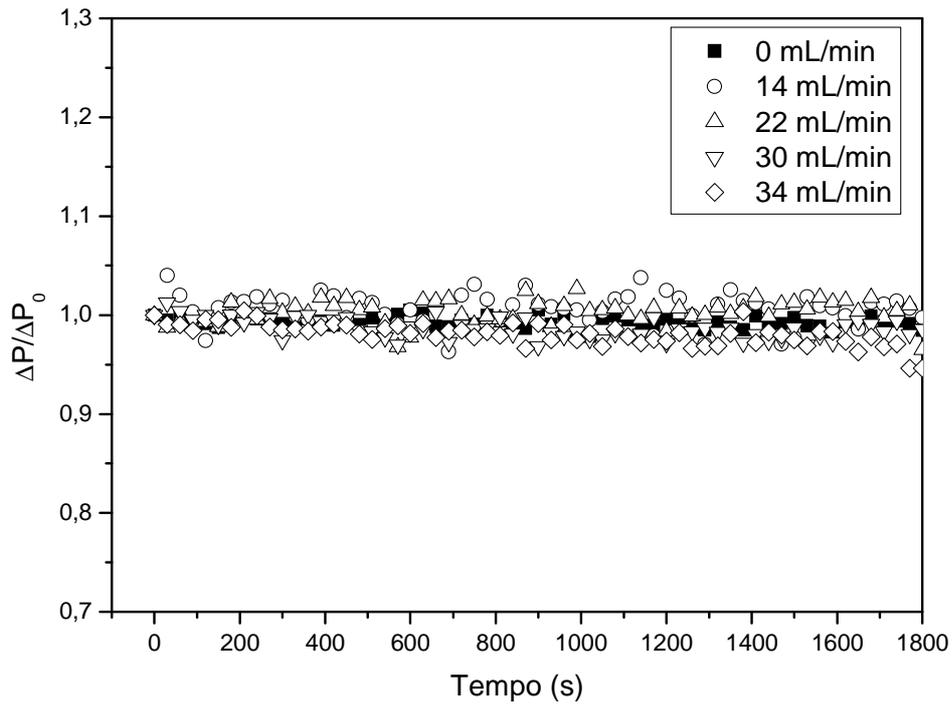


Figura 4.12 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de água para $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

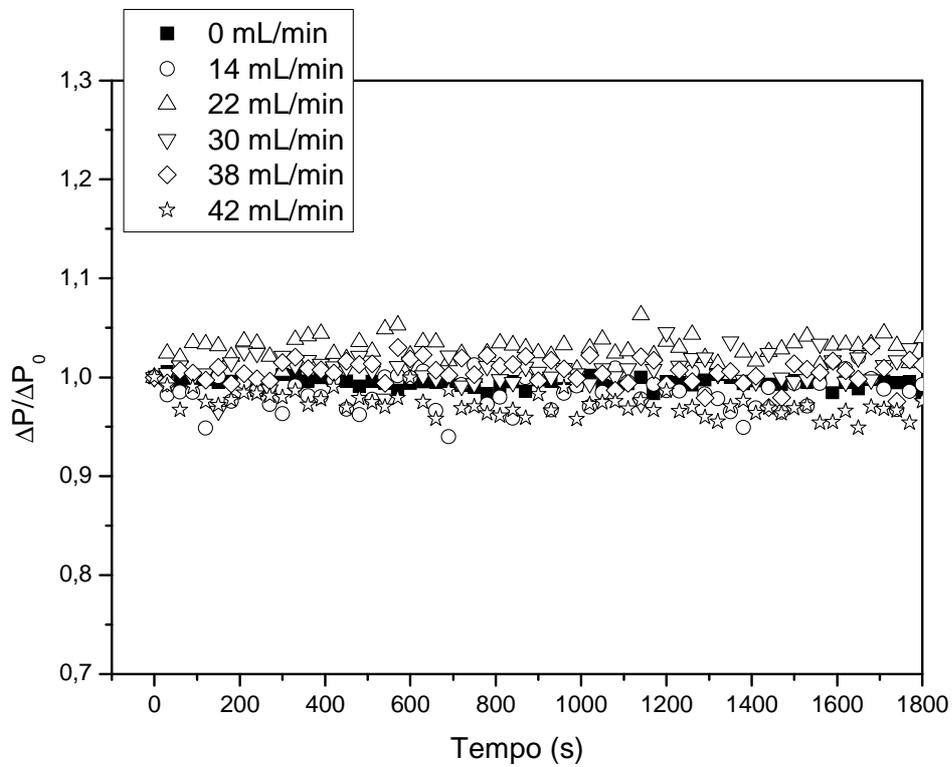


Figura 4.13 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de água para $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

Nas Figuras 4.11 a 4.13, observa-se claramente que nas maiores vazões de alimentação à medida que se aproxima a saturação ou colapso do leito ocorre uma diminuição dos valores do adimensional da queda de pressão ao longo do tempo. Esta observação pode ser melhor visualizada na Figura 4.14, em que são comparados os adimensionais de queda de pressão para uma vazão de alimentação com o leito operando em boas condições fluidodinâmicas com outra vazão de alimentação em que o leito opera na condição em que ocorre a saturação ou colapso do leito.

Durante a evaporação de água no leito fluidizado, para todas as vazões de alimentação, há um acúmulo de água no leito ao longo do tempo até o momento em que se chega ao regime permanente, condição na qual ocorre um equilíbrio entre a água alimentada e evaporada. Entretanto, na vazão máxima de alimentação a energia térmica aplicada não é suficiente para a retirada de toda a água necessária para que o leito seja mantido operando de forma estável, ocorrendo a saturação do ar de saída ou o colapso do leito. Assim, esta quantidade maior de líquido no leito proporciona um aumento no peso das partículas, pela presença do líquido recobrando as partículas na forma de um filme, e a formação de aglomerados pela ação de pontes líquidas entre as partículas. Desta forma, torna-se difícil a manutenção das partículas fluidizando de forma dinamicamente estável, tornando-se ora leito fixo ora fluidizado até o colapso total do mesmo, ocasionando, assim, a diminuição da queda de pressão. Almeida (2009) observou uma diminuição da queda de pressão no decorrer dos experimentos de “secagem” com água para todas as vazões de alimentação de pasta, porém trabalhou com leito de jorro, o qual apresenta uma dinâmica bastante distinta da encontrada em leitos fluidizados.

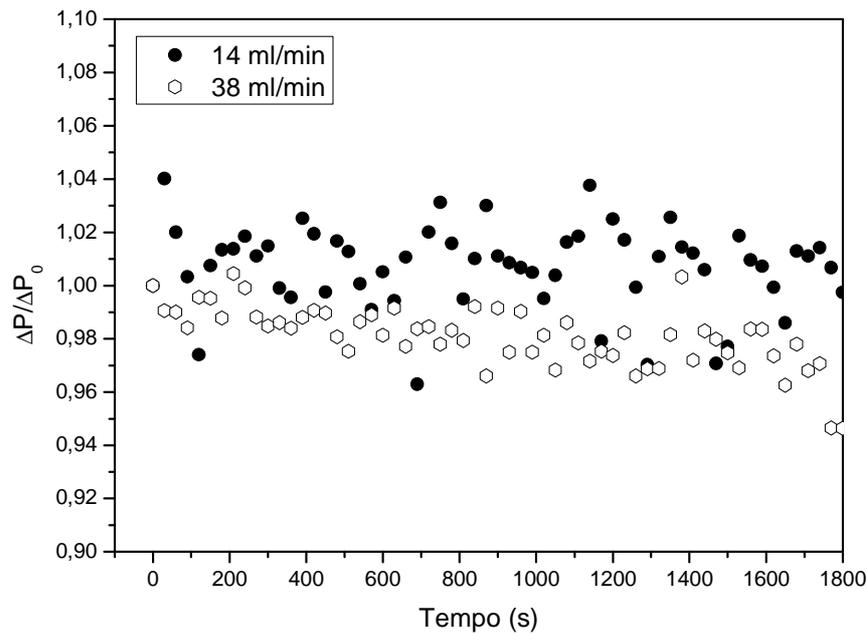


Figura 4.14 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) para duas vazões de alimentação de água para $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

A influência da presença de outras cargas com características distintas da água foi analisada durante a secagem no período transiente nas condições de 80°C com $1,33 \text{ m/s}$ e 100°C com $1,55 \text{ m/s}$. Optou-se por trabalhar somente nas condições extremas de velocidade do ar e temperatura com o intuito de viabilizar a pesquisa tanto com relação ao tempo de realização de ensaios como com relação ao consumo e custos de material. Por concisão serão somente apresentados os resultados referentes à condição de operação à 100°C e $1,55 \text{ m/s}$, os demais resultados estão apresentados no Apêndice A e tiveram comportamentos qualitativamente semelhantes aos que serão apresentados. Para o leite desnatado não foram realizados experimentos à 80°C e $1,33 \text{ m/s}$, pois não foi possível a fluidização nestas condições operacionais.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 estão apresentados os resultados do adimensional de queda de pressão para o leito fluidizado a 100°C e $1,55 \text{ m/s}$ com alimentação de lodo de esgoto e leite desnatado, respectivamente. Pode-se notar que no caso do lodo de esgoto a secagem ocorreu em situação estável até vazões de 46 ml/min . Observa-se, entretanto, que no caso do leite desnatado não foi possível a alimentação acima da vazão de 18 ml/min , pois observou-se

visualmente durante os ensaios que a operação era bastante instável, com formação de zonas periodicamente estagnadas e de aglomerados. O leite desnatado apresenta lipídeos e carboidratos, os quais são componentes que podem causar a formação de pontes sólidas entre as partículas, mais resistentes que as pontes líquidas, dificultando a manutenção do leito em operação.

Para o lodo de esgoto e leite desnatado observa-se que a queda de pressão apresenta o mesmo comportamento oscilatório observado para a evaporação de água. Desta forma, pode-se dizer que as oscilações nos dados de queda de pressão estão mais ligadas às características do equipamento, conforme Daleffe (2005), que devido à presença do líquido. Para o lodo de esgoto não foi verificada a diminuição da queda de pressão na maior vazão de alimentação, isto pode estar relacionado ao fato de que a operação foi encerrada assim que o leito entrou em colapso, provavelmente, se os dados de queda de pressão continuassem sendo coletados este comportamento seria observado.

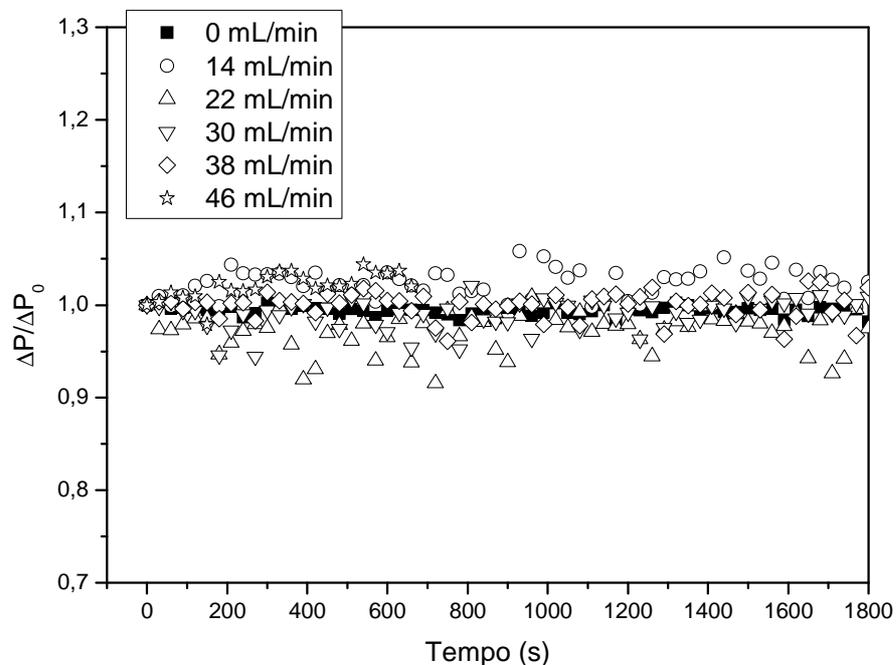


Figura 4.15 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{m/s}$.

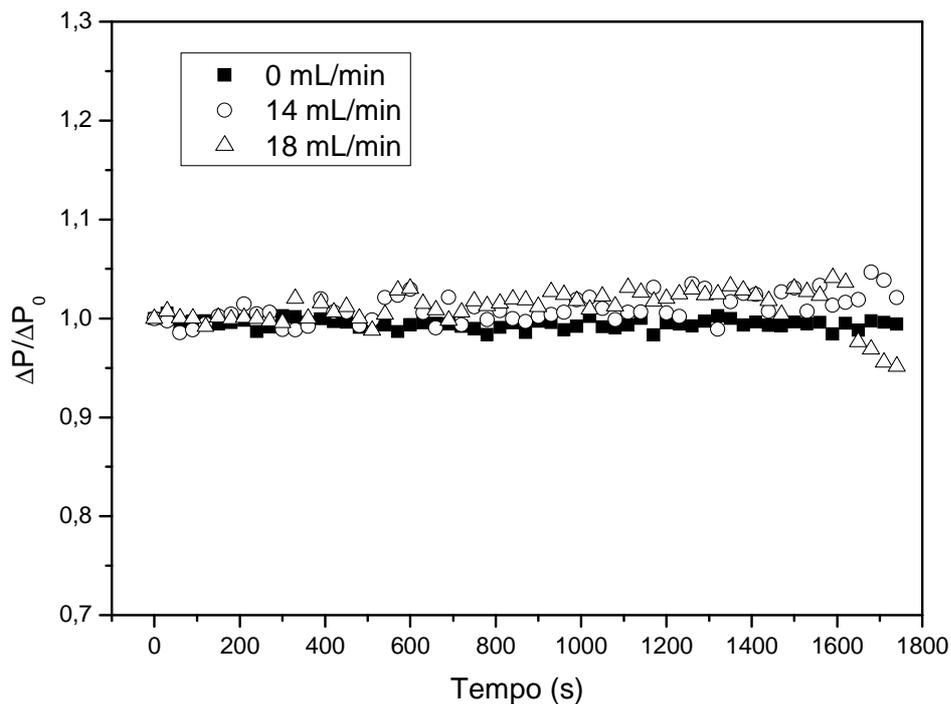


Figura 4.16 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de leite desnatado $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55\text{m/s}$.

Nas Figuras 4.17 a 4.19 estão apresentados os adimensionais da queda de pressão para o carbonato de cálcio nas três concentrações (3, 6 e 9 %), respectivamente. Verifica-se que o aumento da concentração do carbonato de cálcio ocasiona uma diminuição no comportamento oscilatório da queda de pressão encontrado nas demais pastas. Com o aumento da concentração de sólidos há um favorecimento na capacidade de se formarem pontes sólidas entre as partículas ocasionando a formação de aglomerados e canais preferenciais. O aparecimento de canais preferenciais ocasiona a diminuição nas oscilações nos valores da queda de pressão, pois facilita a passagem do ar. Além disso, na maior vazão de alimentação de pasta para maiores concentrações de carbonato (Figuras 4.18 e 4.19) ocorre uma brusca diminuição na queda de pressão, fator relacionado com o colapso do leito, devido à formação de aglomerações e canais preferenciais.

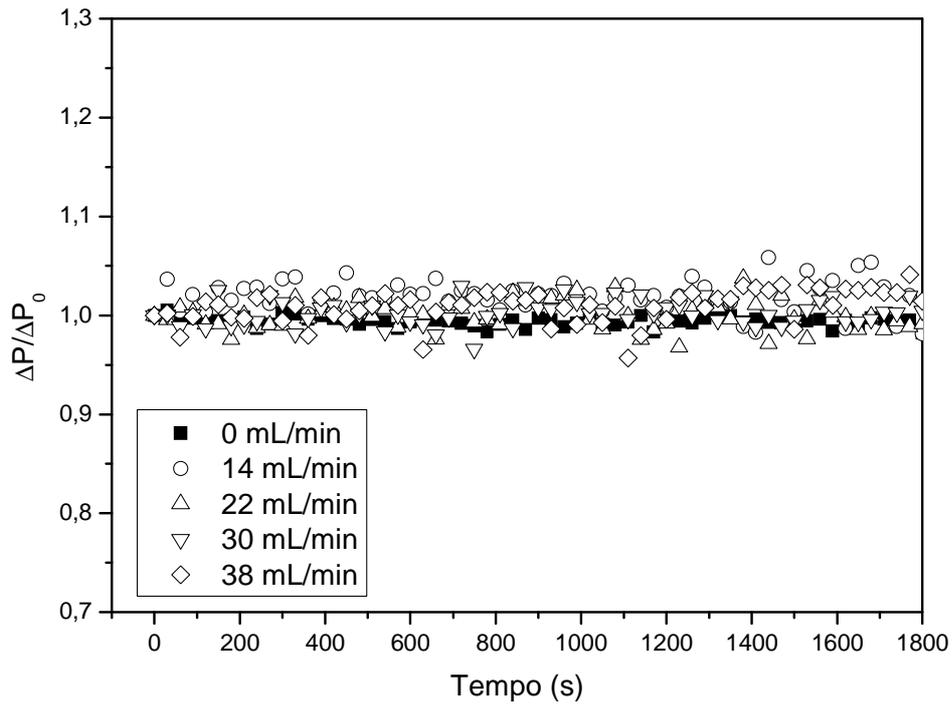


Figura 4.17 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (3 %) $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{m/s}$.

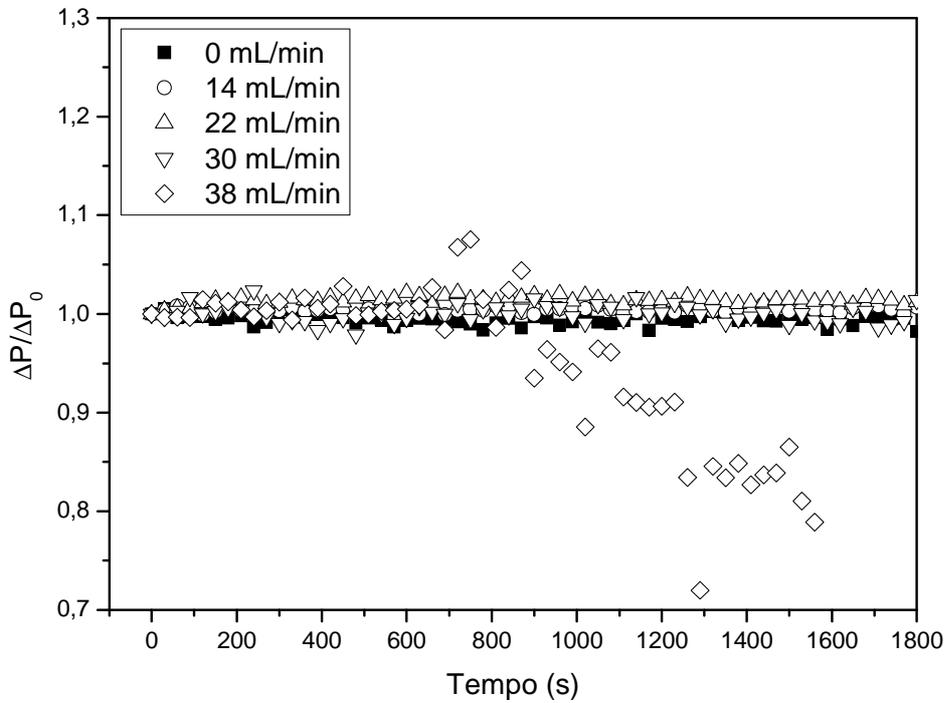


Figura 4.18 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (6%) $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{m/s}$.

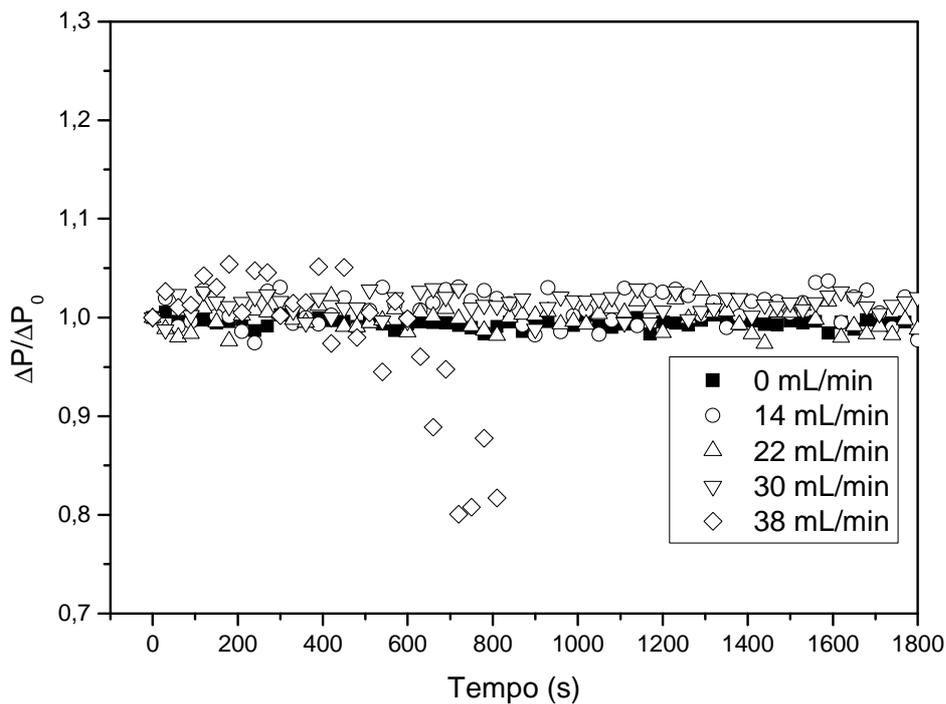


Figura 4.19 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (9 %) $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{m/s}$.

Na análise fluidodinâmica do leito fluidizado durante o período transiente de evaporação/secagem foi observado, também, o comportamento da velocidade do ar na entrada do leito. Da mesma forma que para a queda de pressão a velocidade do ar foi analisada na forma de adimensional, assim, o adimensional da velocidade do ar foi calculado dividindo-se cada valor de velocidade do ar coletado no tempo pelo valor inicial. Nas Figuras 4.20 a 4.23 estão apresentadas as curvas do adimensional da velocidade do ar na entrada do leito fluidizado no período transiente de evaporação de água em função do tempo para as condições de operação utilizadas parametrizadas nas vazões de alimentação.

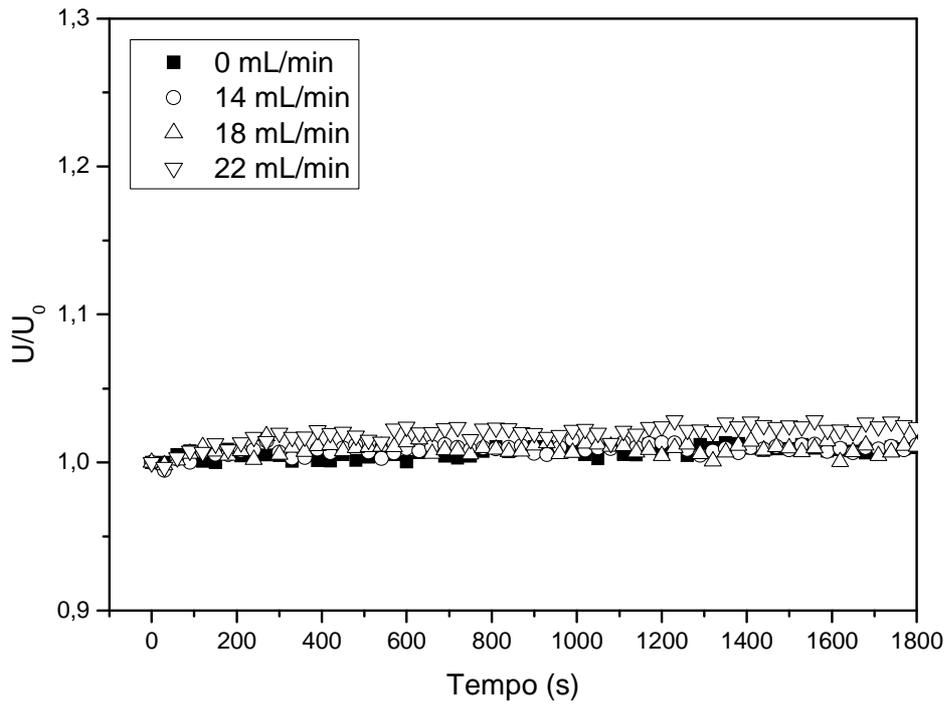


Figura 4.20 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de água para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

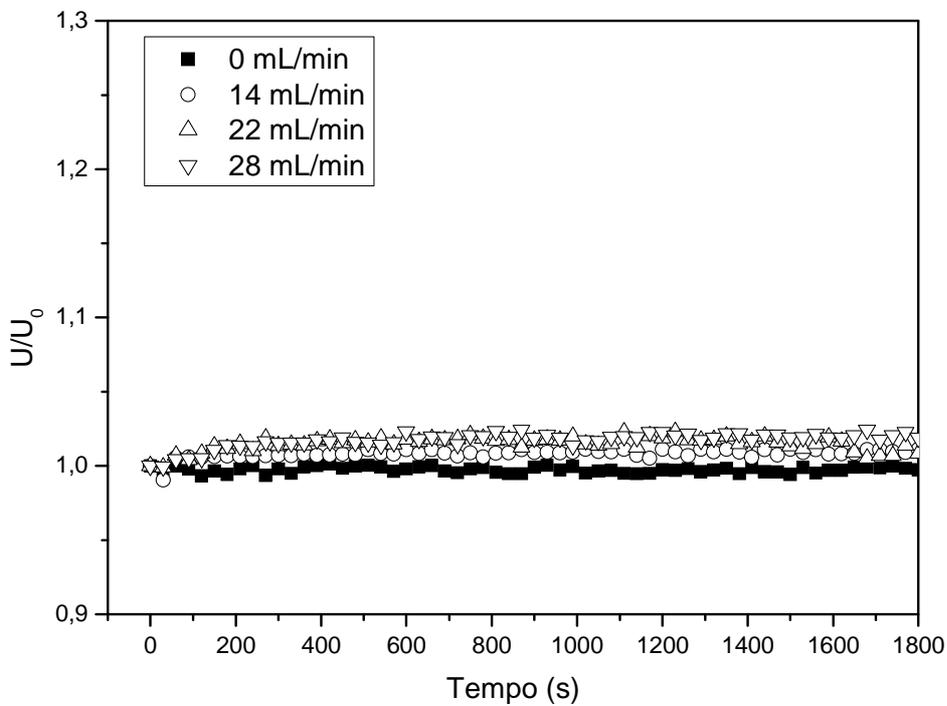


Figura 4.21 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de água para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

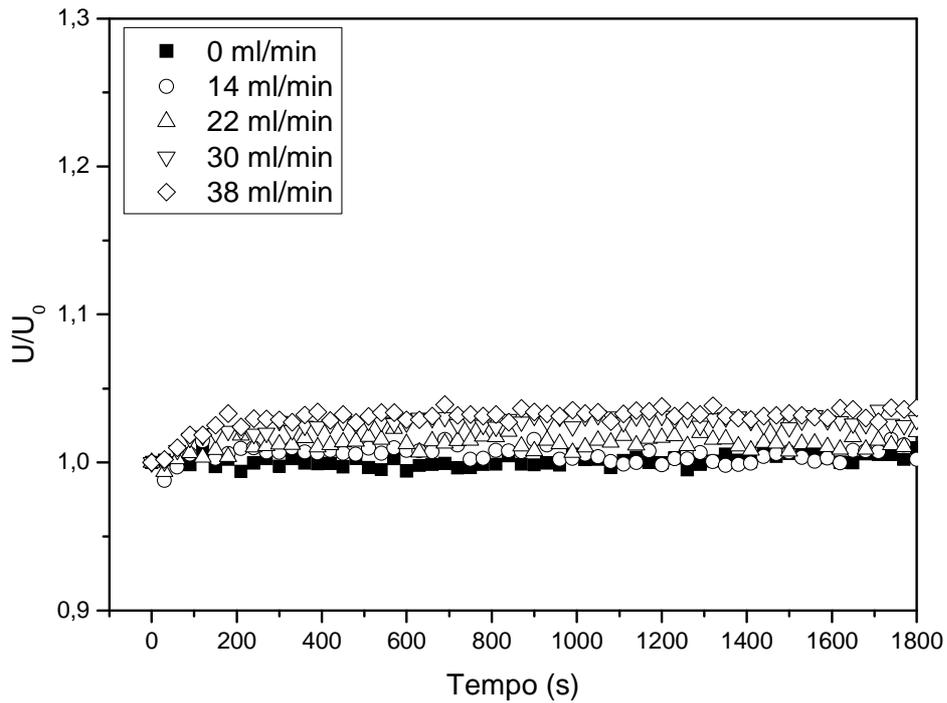


Figura 4.22 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de água para $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

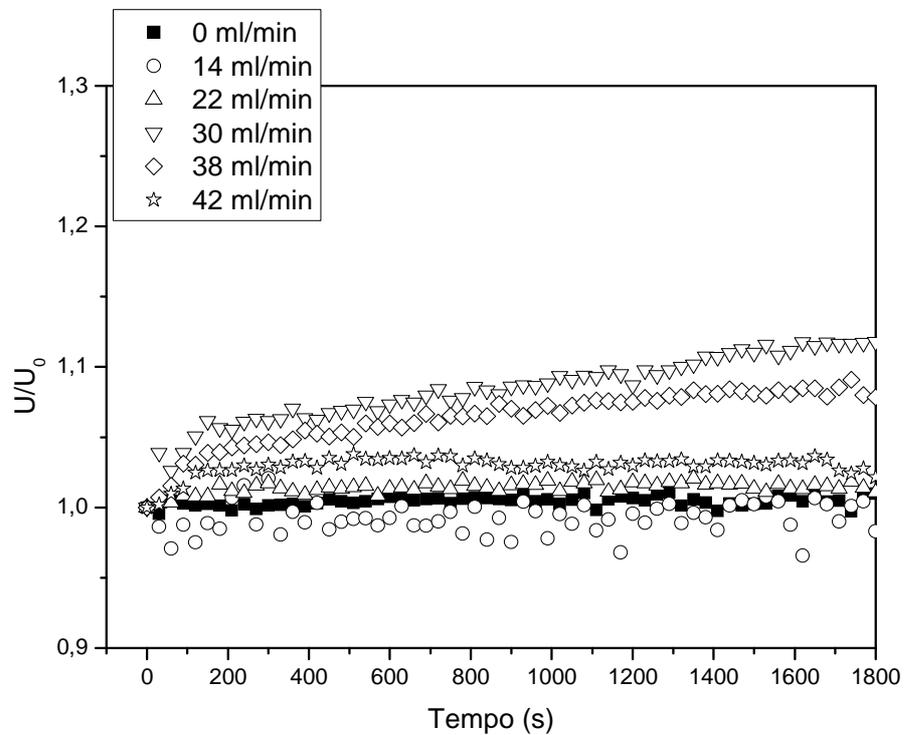


Figura 4.23 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de água para $T=100^\circ \text{C}$ e $U_s=1,55 \text{ m/s}$.

Observa-se nestas figuras que a velocidade do ar no leito de partículas aumenta ao longo do tempo até atingir o regime permanente, para todas as condições de operação estudadas. Além disso, maiores vazões de alimentação de pasta proporcionam maiores aumentos nas velocidades do ar no leito fluidizado. Este comportamento está relacionado ao fato de que a presença de um líquido ou pasta aumenta as forças de interação entre as partículas formando aglomerados de partículas e canais preferenciais, fatores que facilitam a passagem do ar no leito, aumentando assim a velocidade do ar desde a entrada do leito. Nas vazões de alimentação de água em que ocorre a saturação ou colapso do leito, verifica-se que além do aumento da velocidade do ar de entrada do leito ocorre conjuntamente a diminuição da queda de pressão (Figuras 4.11, 4.12 e 4.13).

Comparando-se as Figuras 4.20 e 4.21 (80° C) verifica-se que com o aumento da velocidade do ar de secagem, para uma mesma vazão de alimentação de água, não ocorre um aumento significativo no adimensional da velocidade do ar na entrada do leito. Entretanto, comparando-se as Figuras 4.22 e 4.23 (100° C) para uma mesma vazão de alimentação observa-se que ocorre um aumento no adimensional da velocidade do ar de entrada do leito com o aumento da velocidade do ar de secagem. Desta forma, a fluidodinâmica do leito fluidizado durante o período transiente de evaporação de água sofre maior influência da velocidade do ar de secagem quando o leito opera na maior velocidade de entrada do ar. Esta constatação é importante para a definição de uma condição de operação na qual poderia obter-se um maior controle da operação, em que, para uma mesma temperatura, seria possível, somente com a manipulação da velocidade do ar de secagem, obter diferentes características fluidodinâmicas no leito conseguindo provocar as alterações desejadas nas taxas de transferência de calor e massa.

Nas Figuras 4.24 e 4.25 estão apresentados os adimensionais de velocidade do ar de entrada do leito fluidizado durante o regime transiente de secagem de lodo de esgoto e

leite desnatado a 100° C e 1,55 m/s. Esperava-se que os resultados para o lodo de esgoto, tanto para o adimensional de queda de pressão quanto para o adimensional de velocidade do ar de secagem fossem diferentes quando comparados aos da água. Uma explicação para este comportamento pode estar no fato de que o lodo de esgoto apresenta em torno de 95 % de água em sua composição e, além disso, o restante de sua composição é formada por minerais não apresentando quantidades significativas de gorduras açúcares ou outros componentes com características que dificultem a fluidização. Já o adimensional de velocidade do ar para o leite desnatado não é influenciado de maneira significativa pelo aumento da vazão de alimentação.

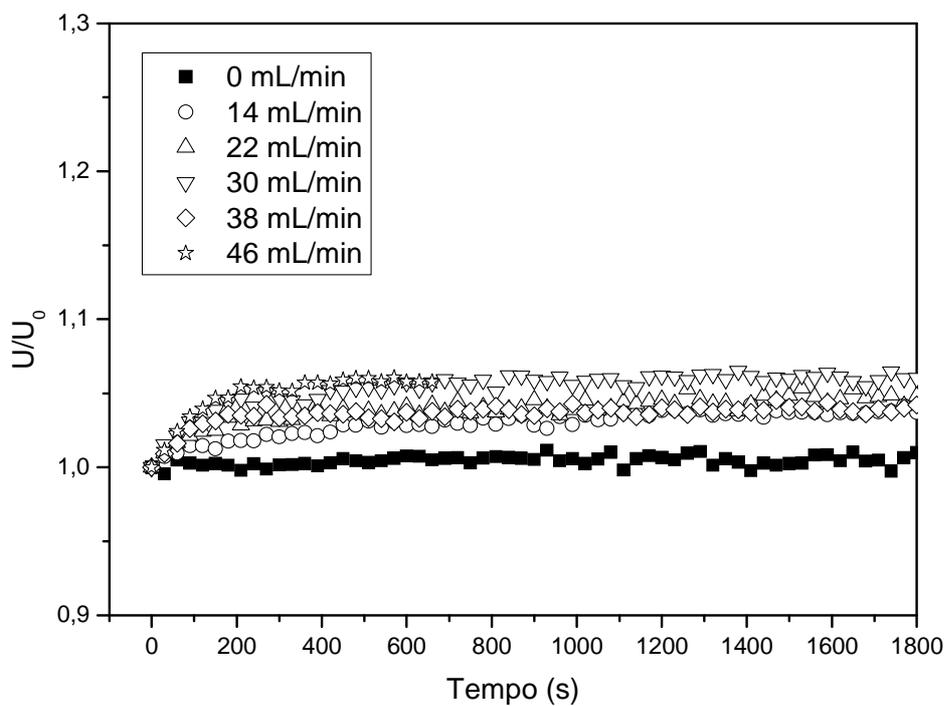


Figura 4.24 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de lodo de esgoto para $T=100^\circ\text{C}$ e $U_s=1,55\text{ m/s}$.

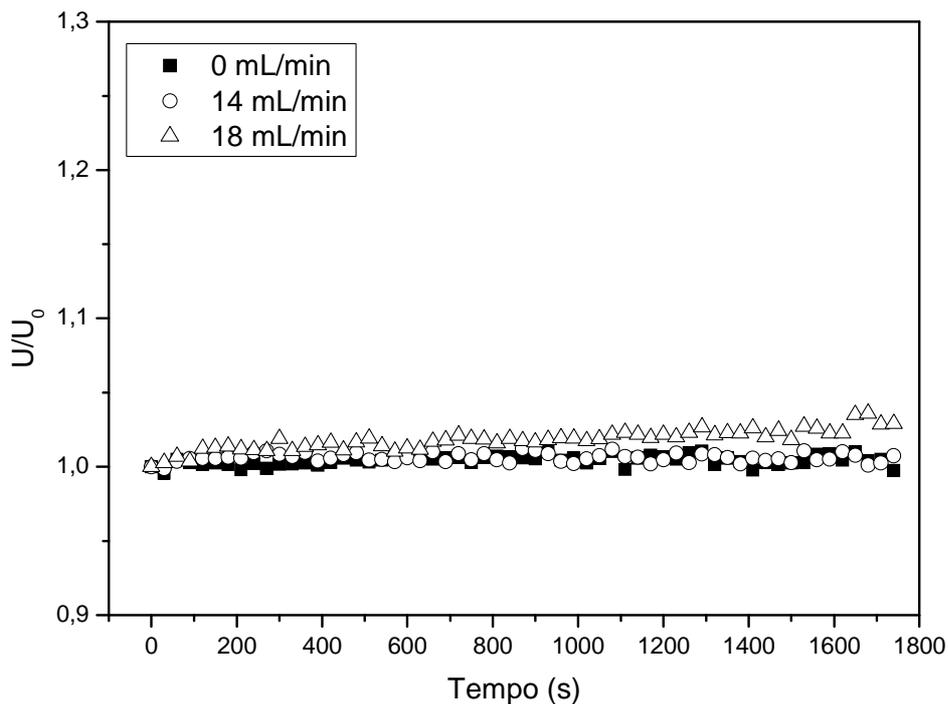


Figura 4.25 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de leite desnatado para $T=100^{\circ}\text{C}$ e $U_s=1,55\text{ m/s}$.

Nas Figuras 4.26 a 4.28 estão os resultados dos adimensionais de velocidade do ar na entrada do leito fluidizado para as três concentrações de carbonato de cálcio a 100°C e $1,55\text{ m/s}$. Comparando-se as Figuras 4.26 e 4.28 observa-se um aumento no adimensional de velocidade do ar com o aumento da concentração. Como na maior concentração de sólidos, provavelmente, o aparecimento de canais preferenciais é favorecido, conseqüentemente, a velocidade tem a tendência de aumentar, já que a passagem do ar de secagem é facilitada. Pode-se ainda dizer que na maior vazão de alimentação de pasta (Figuras 4.27 e 4.28) há um aumento acentuado na velocidade do ar de secagem, comparando-se estes resultados com os de queda de pressão, pode-se notar que esta diminui para esta mesma condição. Isto pode ser explicado pelo fato de que em condições extremas de vazão de alimentação, pode ocorrer a formação de canais preferenciais, este fenômeno favorece a passagem do ar, ocasionando seu aumento e diminuição na queda de pressão.

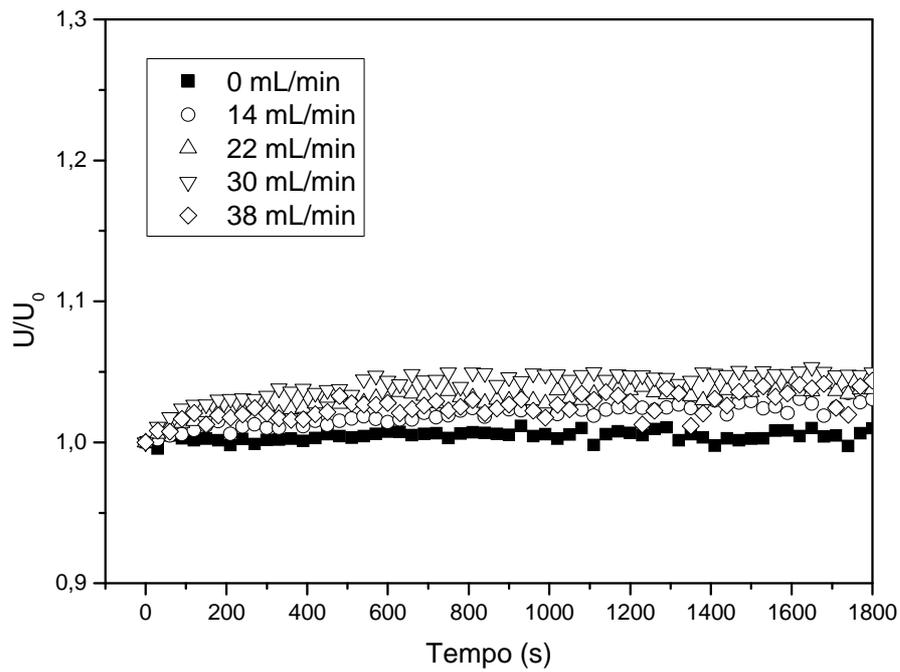


Figura 4.26 – Adimensional da velocidade do ar no na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de carbonato de cálcio (3%) para $T=100^\circ\text{C}$ e $U_s=1,55\text{ m/s}$.

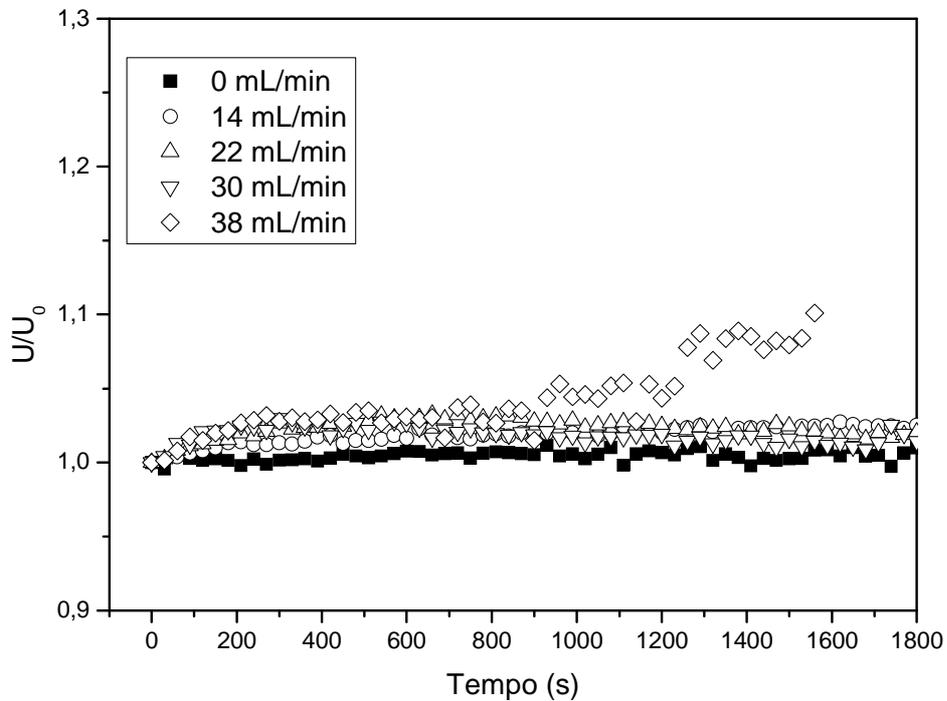


Figura 4.27 – Adimensional da velocidade do ar no na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de carbonato de cálcio (6%) para $T=100^\circ\text{C}$ e $U_s=1,55\text{ m/s}$.

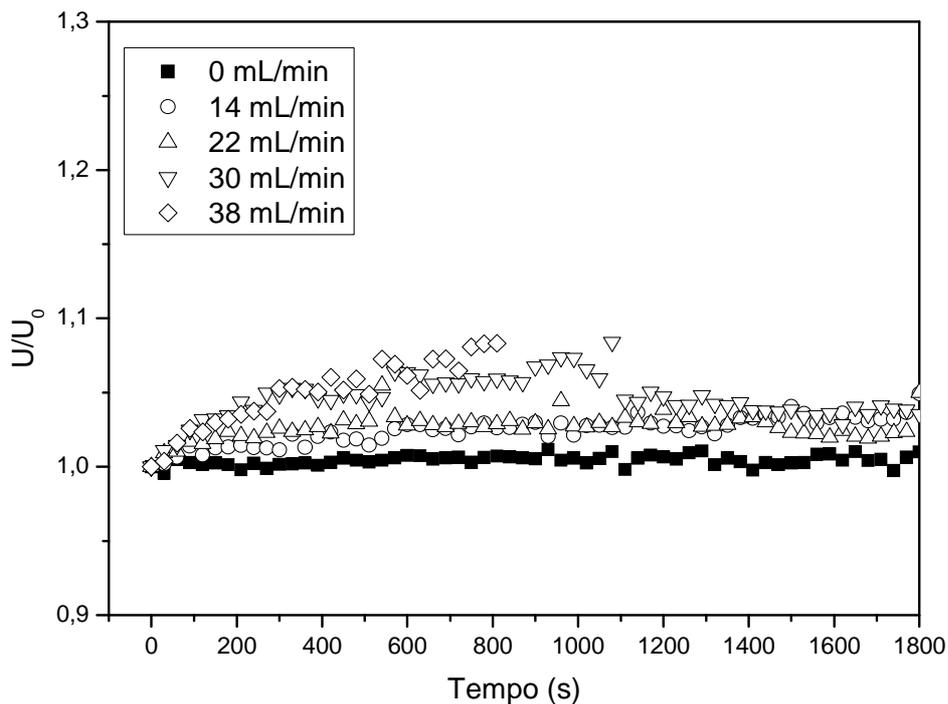


Figura 4.28 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito fluidizado em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de carbonato de cálcio (9%) para $T=100^\circ\text{C}$ e $U_s=1,55\text{ m/s}$.

4.2.2 Leito vibrofluidizado

Nesta etapa será analisado o comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado operando com partículas inertes de vidro de 2,19 mm durante o período transiente de evaporação/secagem de pastas. Na Figura 4.29 estão apresentados os adimensionais de queda de pressão para a evaporação de água em leito vibrofluidizado operando com $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$) e na Figura 4.30 estão os resultados para $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$). Estes resultados são referentes à temperatura de 100°C e velocidade do ar de secagem de $1,55\text{ m/s}$, os resultados para 80°C e $1,33\text{ m/s}$ estão dispostos no Apêndice A e tiveram comportamento qualitativamente semelhante.

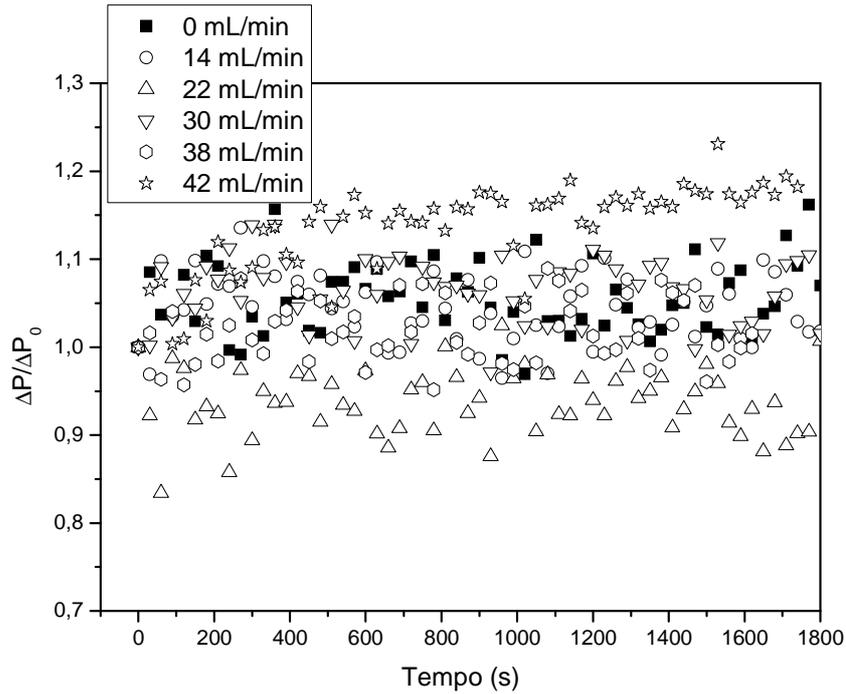


Figura 4.29 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de água para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

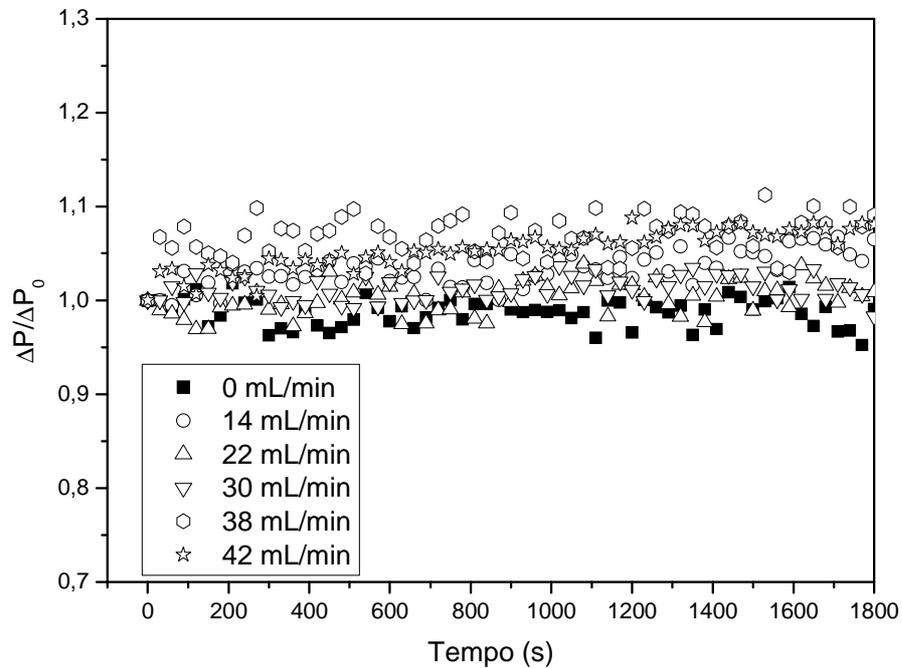


Figura 4.30 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de água para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

Por meio das Figuras 4.29 e 4.30 pode-se notar que o comportamento fluidodinâmico durante a evaporação de água no período transiente é distinto para um mesmo adimensional de vibração ($\Gamma = 4,00$), obtido através de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração. Ainda nestas figuras observa-se que o aumento da amplitude (diminuição da frequência de vibração) intensificou o comportamento oscilatório da queda de pressão no leito. Realizando-se uma análise visual durante os experimentos verificou-se que na maior amplitude de vibração a fluidização foi do tipo *slugging*. Este tipo de escoamento é caracterizado pelo aparecimento de bolsões de ar ascendentes (maiores que um terço do leito), acompanhado por grandes flutuações de pressão (BAEYENS e GELDART; 1973). Durante o movimento ascendente do leito neste tipo de fluidização, ocorre o arremesso das partículas e expansão do leito, já durante o movimento descendente ocorre a compactação. Isto pode explicar a amplificação das oscilações na queda de pressão durante a operação com maior amplitude. Já na menor amplitude este movimento oscilatório de expansão e compactação não foi observado com tanta intensidade, verificou-se, somente, que a vibração proporcionou uma fluidização um pouco mais vigorosa que para o leito fluidizado. Estes resultados estão de acordo com Daleffe (2005), que afirmou que a utilização de altos valores de amplitude (menores valores de frequência) provocam o aparecimento de altos valores de desvio padrão da queda de pressão, já menores valores de amplitude (maiores valores de frequência) há uma diminuição nos valores de desvio padrão, indicando, possivelmente, uma redução na movimentação das partículas e alterações no tipo de escoamento.

Para o leito fluidizado as curvas de queda de pressão ficaram no máximo em torno de 5 % afastadas do valor inicial de queda de pressão ($\Delta P/\Delta P_0 = 1,00$), enquanto que para os leito vibrofluidizado este valor ficou em 10 % para a menor amplitude e para a maior amplitude em 20 %. Nota-se, desta forma, que a utilização da vibração proporciona

uma maior movimentação do leito ocasionando uma fluidização mais vigorosa, fato que pode proporcionar melhoras significativas durante um processo de secagem, aumentando as taxas de transferência de calor e massa. Além disso, foi possível observar claramente que a utilização de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração para um mesmo adimensional de vibração pode ocasionar o aparecimento de diferentes regimes de fluidização.

Além das observações anteriores, verifica-se ainda nestas figuras, que, diferentemente do que ocorre para o leito fluidizado, não há uma redução na queda de pressão nas vazões de alimentação máximas. Isto está relacionado ao fato de que para a maioria dos experimentos de evaporação com leito vibrofluidizado foi observada somente a saturação do ar de saída, embora tenham sido verificadas formações de aglomerações não houve o colapso do leito, pois a vibração foi responsável por manter a contínua movimentação do leito de partículas mesmo em condições desfavoráveis de fluidização. O fato de não ter ocorrido o colapso do leito pode ter contribuído para que a queda de pressão não diminuísse na maior vazão de alimentação.

Com o objetivo de se ter um texto mais conciso os resultados para 80° C e 1,33 m/s não serão apresentados para a secagem de lodo de esgoto e leite desnatado, os mesmos estão dispostos no Apêndice A e apresentaram comportamento qualitativamente semelhante ao observado para 100° C e 1,55 m/s.

Nas Figuras 4.31 e 4.32 tem-se os resultados do adimensional de queda de pressão no leito para o lodo de esgoto nas condições de vibração de $A = 0,015$ m e $f = 8,14$ Hz e $A = 0,003$ m e $f = 18,20$ Hz, respectivamente, ambas para $\Gamma = 4,00$. Observa-se que a utilização de um mesmo adimensional de vibração obtido através de duas diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração ocasiona comportamento fluidodinâmico distinto durante a secagem no regime transiente de lodo de esgoto. Como

já se esperava, os resultados mostraram-se semelhantes aos obtidos para a água, em que na maior amplitude (menor frequência) de vibração a queda de pressão apresentou valores mais oscilatórios que os observados para a menor amplitude (maior frequência de vibração). Além disso, pode-se notar ainda que a utilização da vibração, quando comparada com os resultados para o leito fluidizado, amplifica a movimentação do leito melhorando suas características para a secagem.

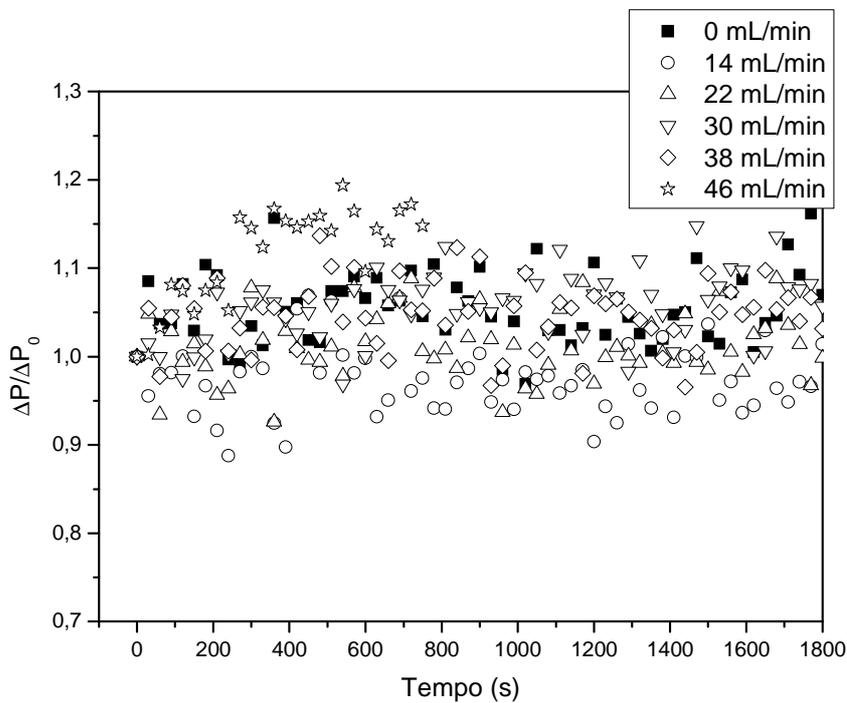


Figura 4.31 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

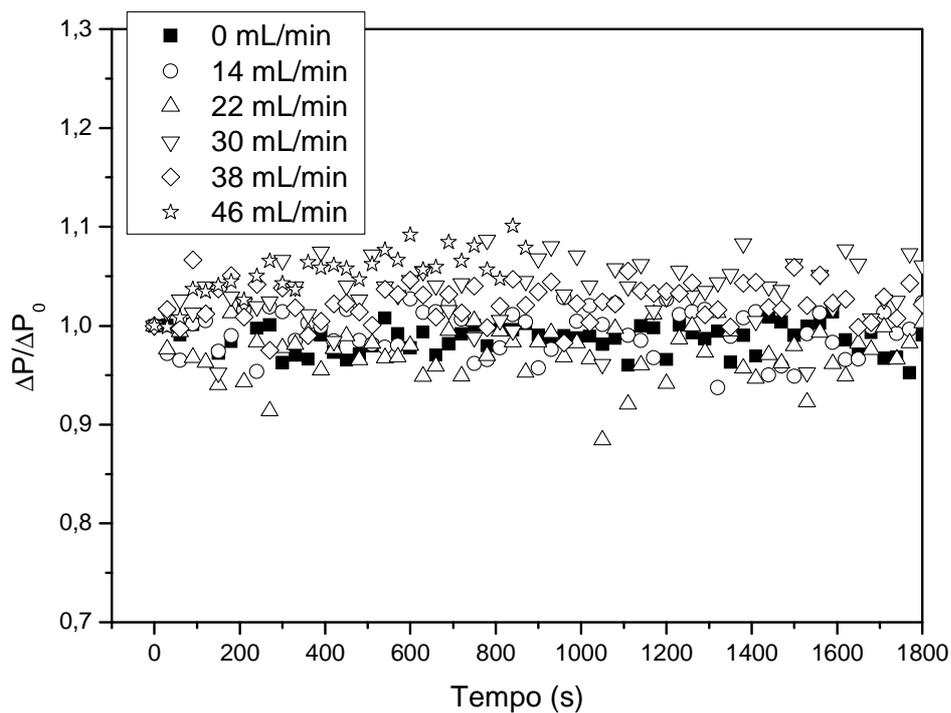


Figura 4.32 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

Nas Figuras 4.33 e 4.34 estão os resultados do adimensional de queda de pressão no leito vibrofluidizado para o leite desnatado nas duas configurações de vibração $A = 0,015 \text{ m}$ com $f = 8,14 \text{ Hz}$ e $A = 0,003 \text{ m}$ com $f = 18,20 \text{ Hz}$, respectivamente, ambas para $\Gamma = 4,00$. Nesse caso observa-se que a aplicação da vibração possibilita a alimentação de maior vazão de pasta, diferentemente do encontrado nas demais pastas em que a vazão máxima de alimentação foi a mesma, tanto, para o leito fluidizado quanto para o vibrofluidizado. Este aumento pode estar relacionado com o fato da vibração dificultar a formação de aglomerações e canais preferenciais, fenômenos que ocorrem com maior facilidade em uma pasta como o leite desnatado, que tem características que ocasionam maior aderência entre as partículas. Esta característica, provavelmente, está ligada à presença de componentes como lipídeos e carboidratos que, como é de conhecimento da comunidade especialista em secagem com leitos “móveis”, são componentes que causam a adesão entre as partículas dificultando a movimentação do leito. Além disso, pode-se notar nestas figuras que a vibração na maior amplitude causa um afastamento de quase 20 % da

queda de pressão com relação ao valor de queda de pressão inicial ($\Delta P/\Delta P_0 = 1$), a 10 % na menor amplitude e para o leito fluidizado não chega a 5 %. Isto novamente demonstra a importância da aplicação da vibração na intensificação da movimentação do leito, fator extremamente importante na fluidização de materiais coesivos como o leite desnatado. Pode-se, ainda, afirmar que o adimensional de vibração não deve ser utilizado como parâmetro único para definir a dinâmica de um leito vibrofluidizado durante a secagem de uma pasta coesiva como o leite desnatado, já que as curvas de queda de pressão e as observações visuais apontam para comportamentos significativamente diferentes.

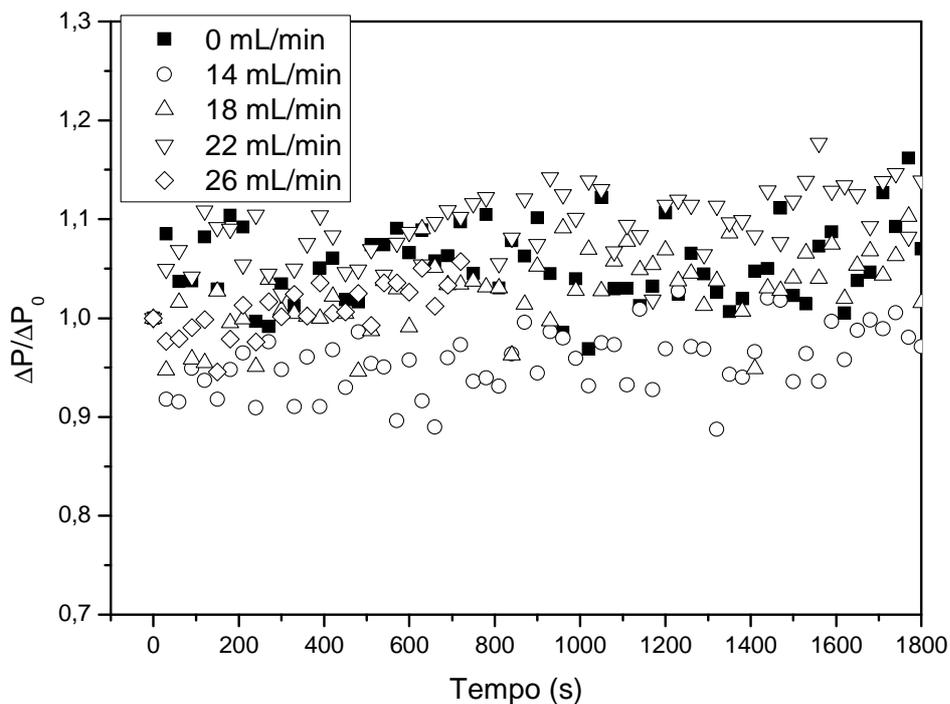


Figura 4.33 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de leite desnatado para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

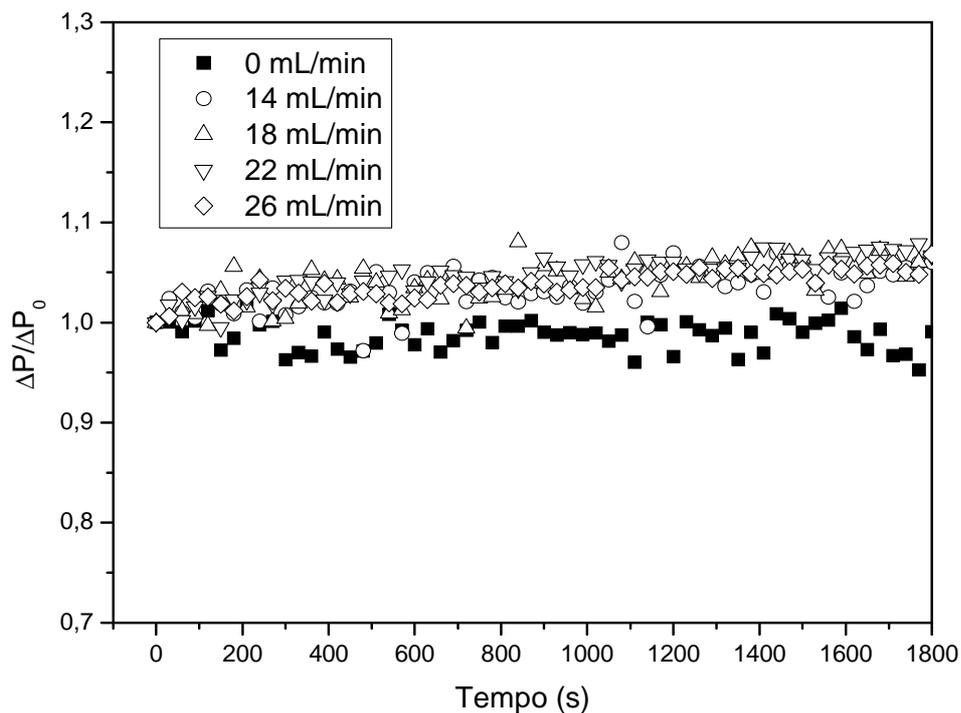


Figura 4.34 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de leite desnatado para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

Nas Figuras 4.35 a 4.40 estão apresentados os resultados do adimensional da queda de pressão para o leito vibrofluidizado durante a secagem de carbonato de cálcio nas três concentrações utilizadas. Comparando-se os pares, Figuras 4.35 e 4.36, para concentração de sólidos de 3%, Figuras 4.37 e 4.38, para concentração de sólidos 6% e Figuras 4.39 e 4.40, para concentração de sólidos 9%, pode-se notar que para um mesmo adimensional de vibração obtido por duas diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração os comportamentos do adimensional de queda de pressão são nitidamente diferentes. Observa-se que o aumento da amplitude (diminuição da frequência) ocasiona uma intensificação das oscilações da queda de pressão, com isto pode-se dizer que maiores valores de amplitude ocasionam uma maior movimentação no leito de partículas (expansão do leito). Assim, o adimensional de vibração é um parâmetro que, independentemente da concentração de sólidos da solução utilizada na secagem, não deve ser utilizado isoladamente para caracterizar a dinâmica de um leito vibrofluidizado, assim, propõe-se que sempre seja utilizado em conjunto com os outros parâmetros que o definem, como a

amplitude ou a frequência.

Ainda, destas figuras, pode-se observar que o aumento da concentração de sólidos ocasiona uma diminuição do comportamento oscilatório verificado nos resultados de queda de pressão. Da mesma forma que para o leito fluidizado, pode-se dizer neste caso que a inserção de uma pasta com maior concentração de sólidos ocasiona a formação de um filme sólido mais espesso sobre as partículas. A presença deste filme pode facilitar a aglomeração entre as partículas ao se chocarem, com isso, a formação de canais preferenciais é favorecida. A presença de caminhos preferenciais ocasiona a diminuição das oscilações nos valores de queda de pressão, já que o ar não passa de forma homogênea no leito. Além disso, observa-se claramente que a utilização do maior valor de amplitude (menor frequência) mantém as maiores oscilações nos valores de queda de pressão, tanto para a menor concentração quanto para a maior, podendo-se dizer que maiores valores de amplitude de vibração (menor frequência) tem uma maior eficiência no que diz respeito à maior movimentação do leito e melhora nas características dinâmicas do mesmo, já que dificulta o aparecimento de caminhos preferenciais.

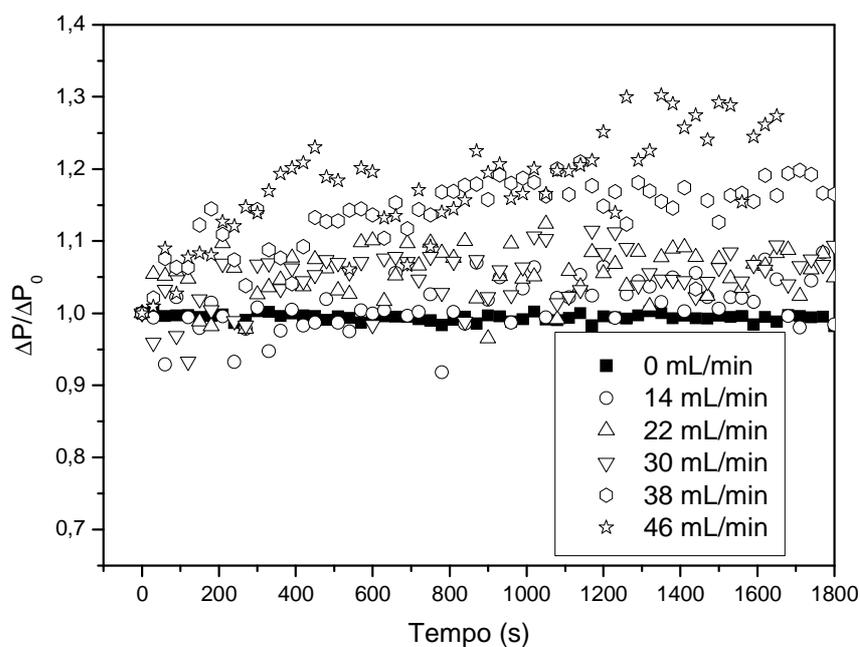


Figura 4.35 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (3%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

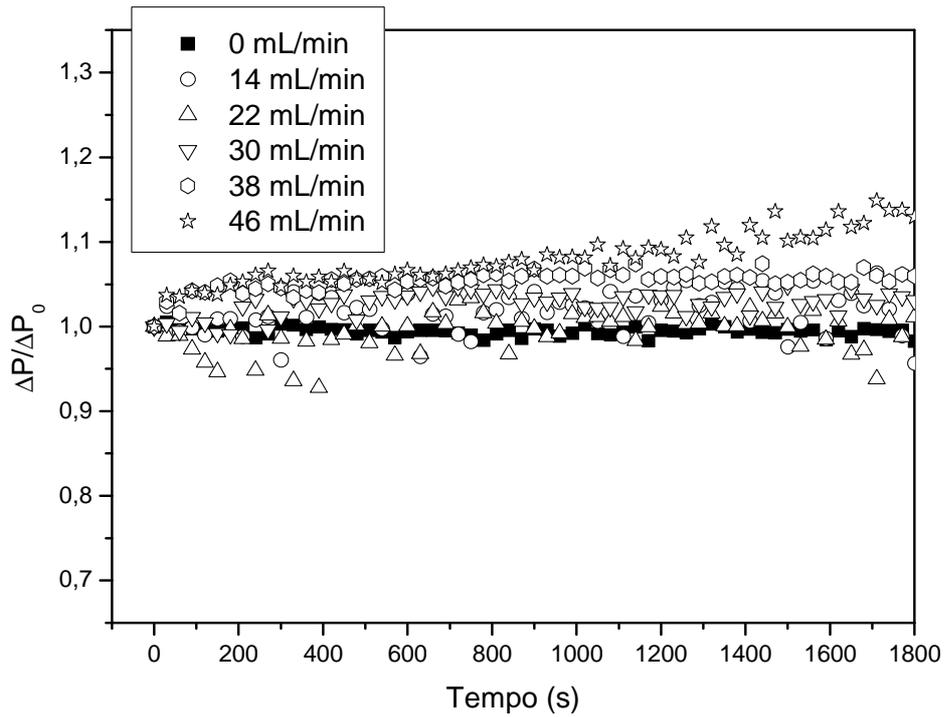


Figura 4.36 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (3%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

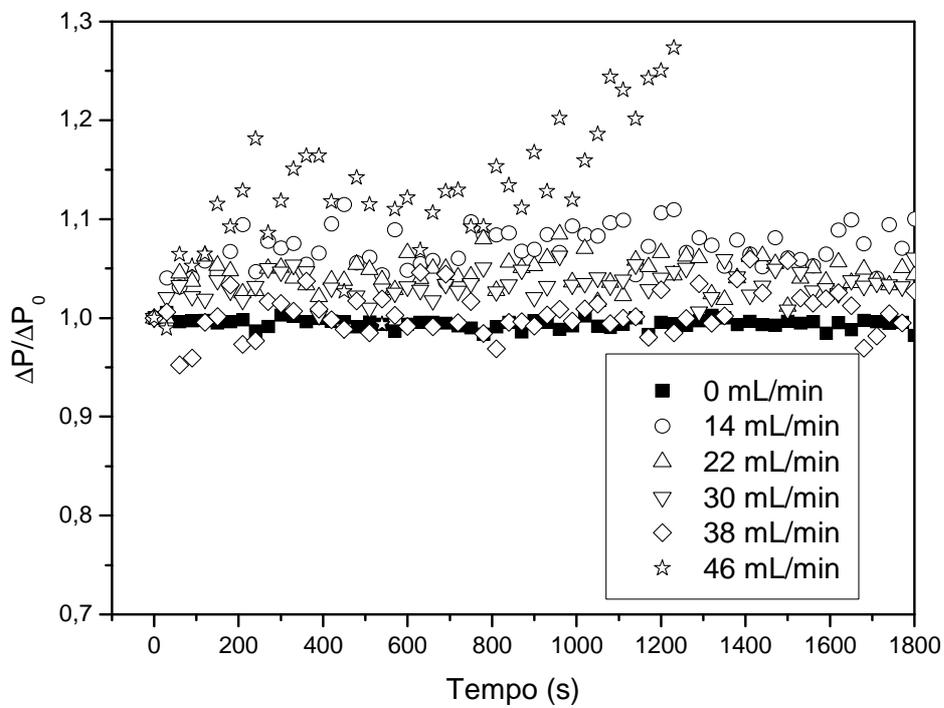


Figura 4.37 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (6%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

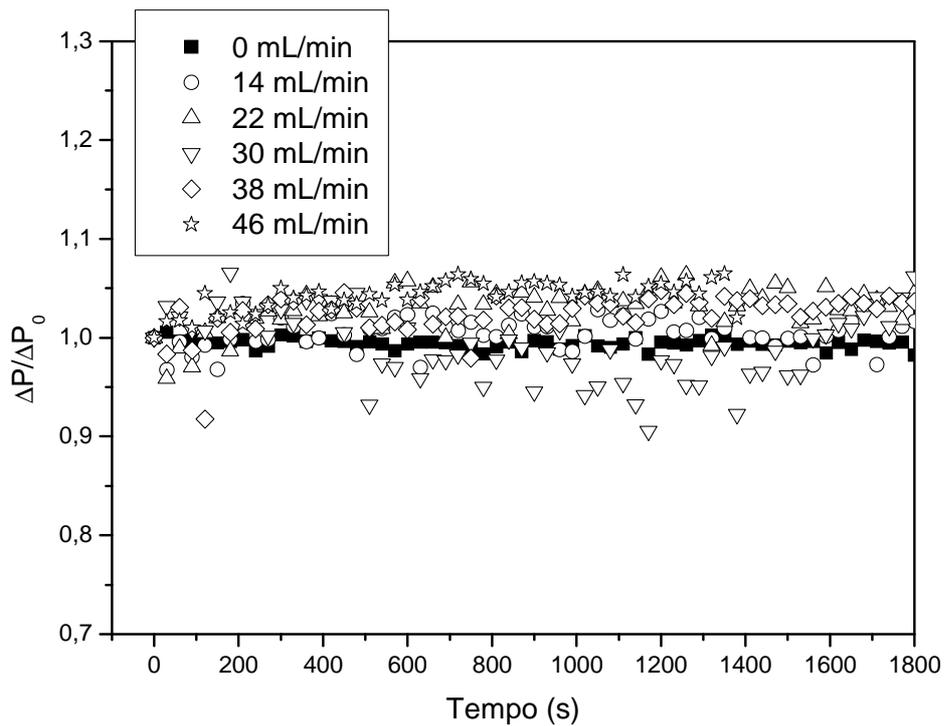


Figura 4.38 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (6%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

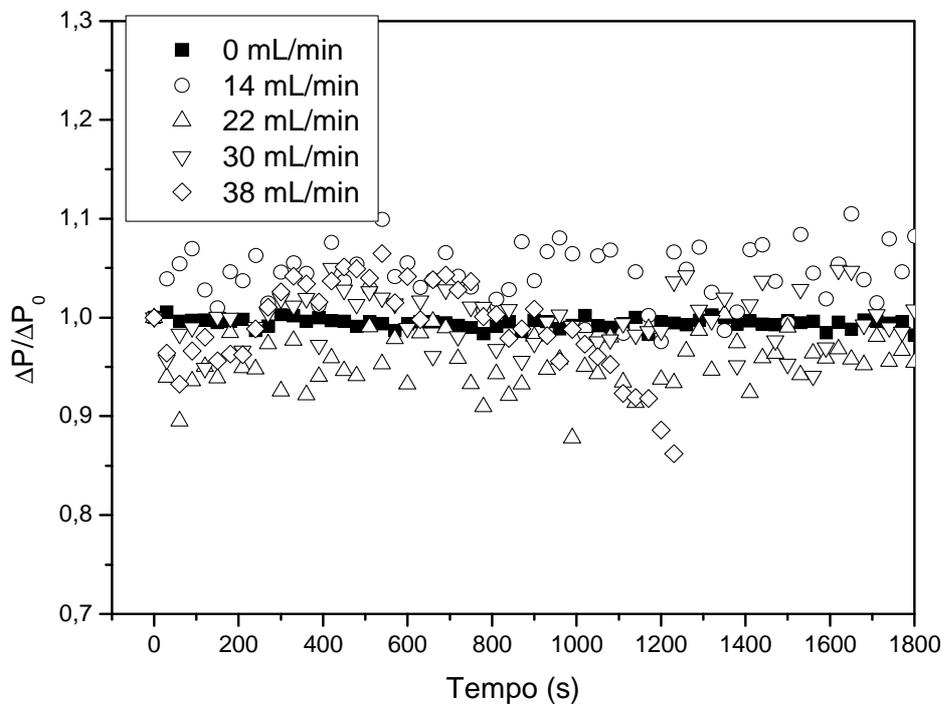


Figura 4.39 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (9%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

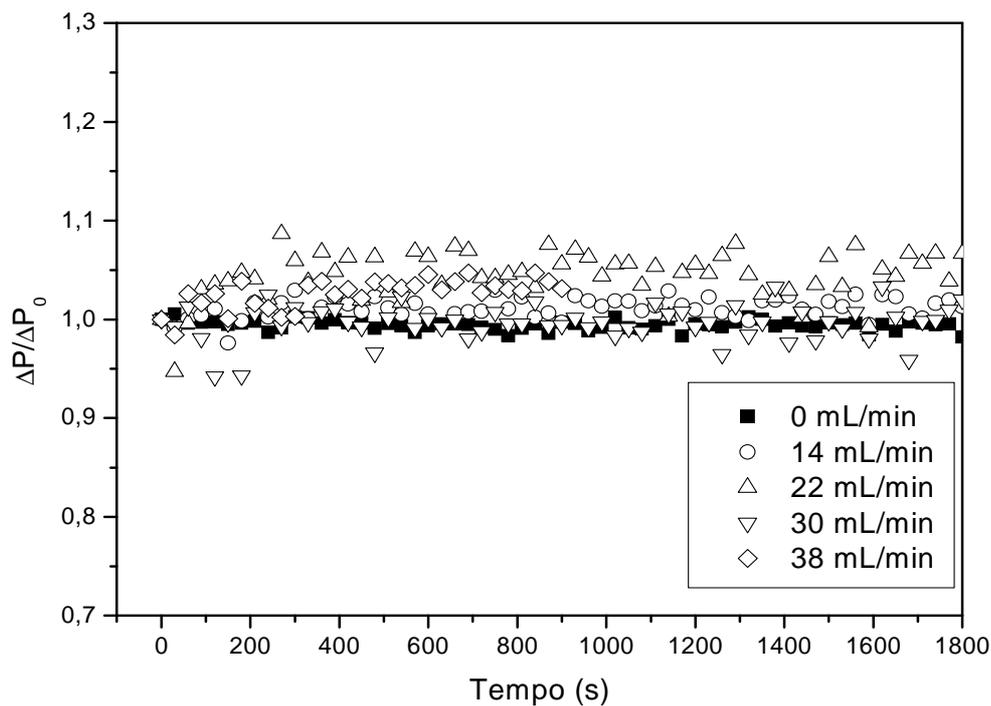


Figura 4.40 – Adimensional da queda de pressão em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (9%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

Nas Figuras 4.41 e 4.42 estão apresentados os resultados do adimensional de velocidade do ar durante a evaporação de água em leito vibrofluidizado no regime transiente. Nestas figuras, da mesma forma que para o leito fluidizado, o adimensional de velocidade do ar no leito vibrofluidizado tende a aumentar com o aumento da vazão de alimentação de pasta e que na menor amplitude as curvas do adimensional de velocidade do ar de secagem encontram-se mais espaçadas. Este comportamento, provavelmente, está relacionado ao fato de que a inserção do líquido ocasiona o aparecimento de aglomerações que aumentam os espaços vazios no leito ocasionando o aparecimento de canais preferenciais que podem facilitar a passagem do ar. Portanto, apesar da vibração aplicada ter ocasionado maior movimentação no leito o aumento da quantidade de pasta alimentada influenciou de maneira significativa a velocidade do ar. Na maior amplitude de vibração este mesmo comportamento foi observado, entretanto com menor intensidade. Isto pode estar relacionado ao fato de que a aplicação de uma alta amplitude de vibração causa uma

intensa movimentação do leito e, conseqüentemente, quebra das aglomerações dificultando o aparecimento de canais preferenciais. Desta forma, nota-se que o comportamento do adimensional de velocidade do ar de secagem teve comportamento significativamente distinto para um mesmo adimensional de vibração obtido através de diferentes combinações entre amplitude e freqüência de vibração, reforçando a teoria de que este parâmetro não deve ser utilizado isoladamente.

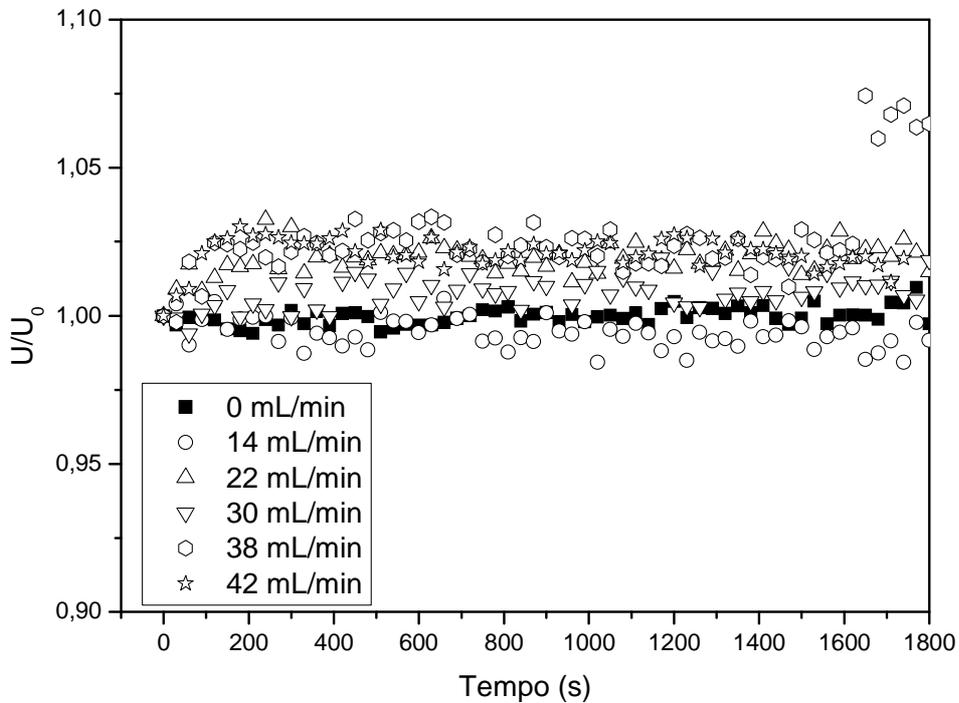


Figura 4.41 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de água para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

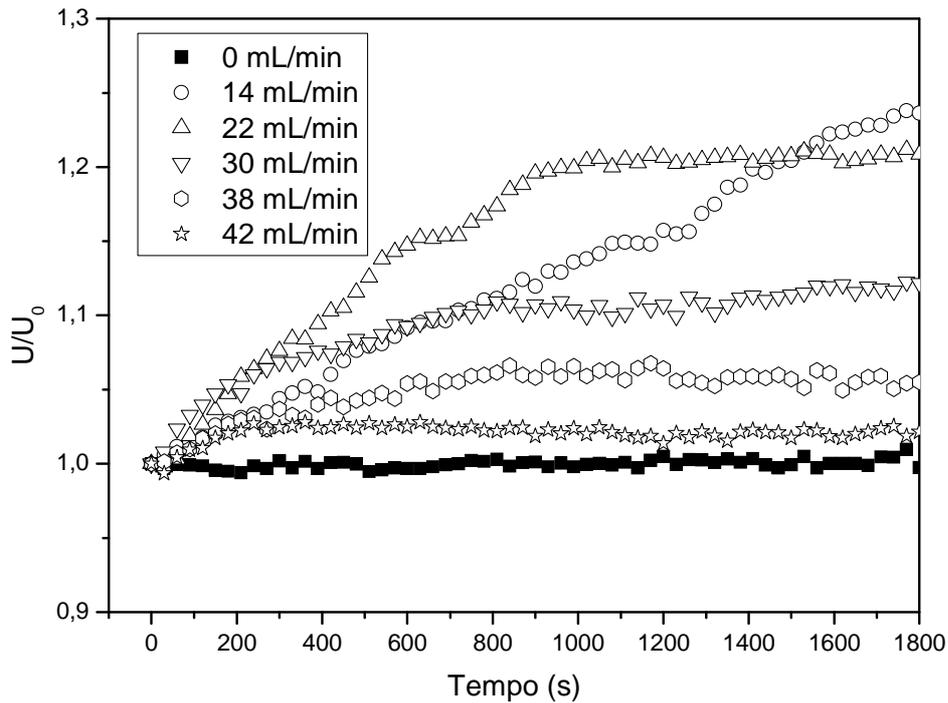


Figura 4.42 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de água para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

Nas Figuras 4.43 e 4.44 estão apresentados os adimensionais de velocidade do ar na entrada do leito para o lodo de esgoto nas configurações vibracionais de $A = 0,015 \text{ m}$ com $f = 8,14 \text{ Hz}$ e $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$, ambas para $\Gamma = 4,0$. Para esta pasta os resultados do adimensional de velocidade do ar de secagem tiveram comportamento qualitativamente semelhante ao observado para a água. Como já destacado anteriormente, o lodo de esgoto apresenta em torno de 95 % de água em sua composição e os sólidos presentes são em sua maioria minerais. O mais importante neste caso é a diferença significativa entre os resultados obtidos para as duas configurações do leito vibrofluidizado para um mesmo adimensional de vibração. Outra característica importante é a diminuição da velocidade do ar na maior vazão de alimentação de pasta. Pode-se afirmar, portanto, que apesar da intensa vibração imposta ao leito de partículas pode estar ocorrendo a formação de aglomerações e caminhos preferenciais nas condições limites de instabilidade e saturação do leito.

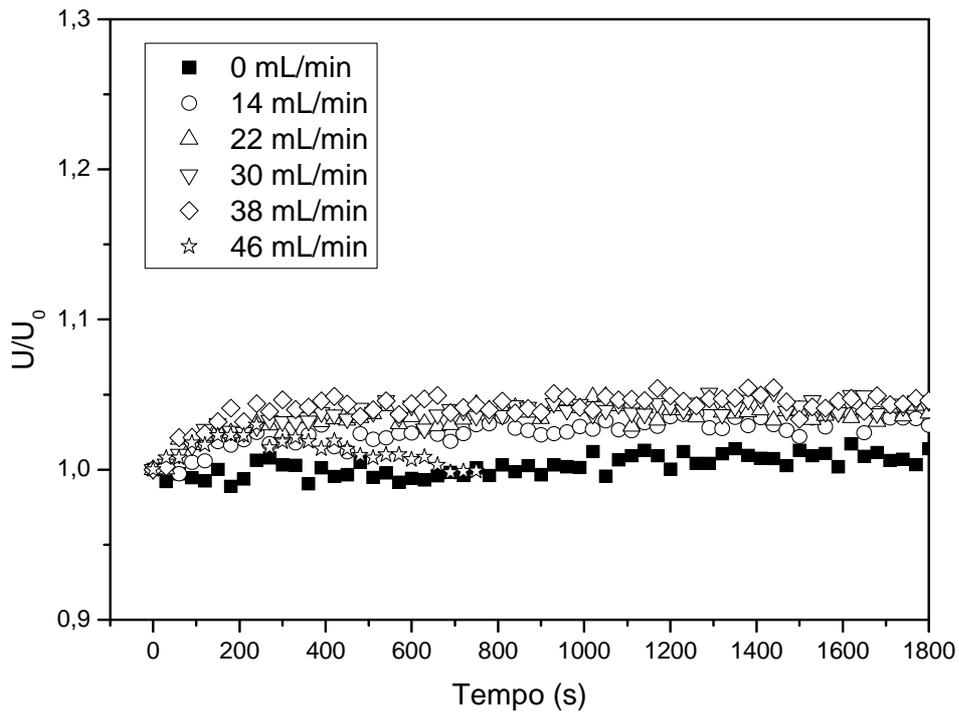


Figura 4.43 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

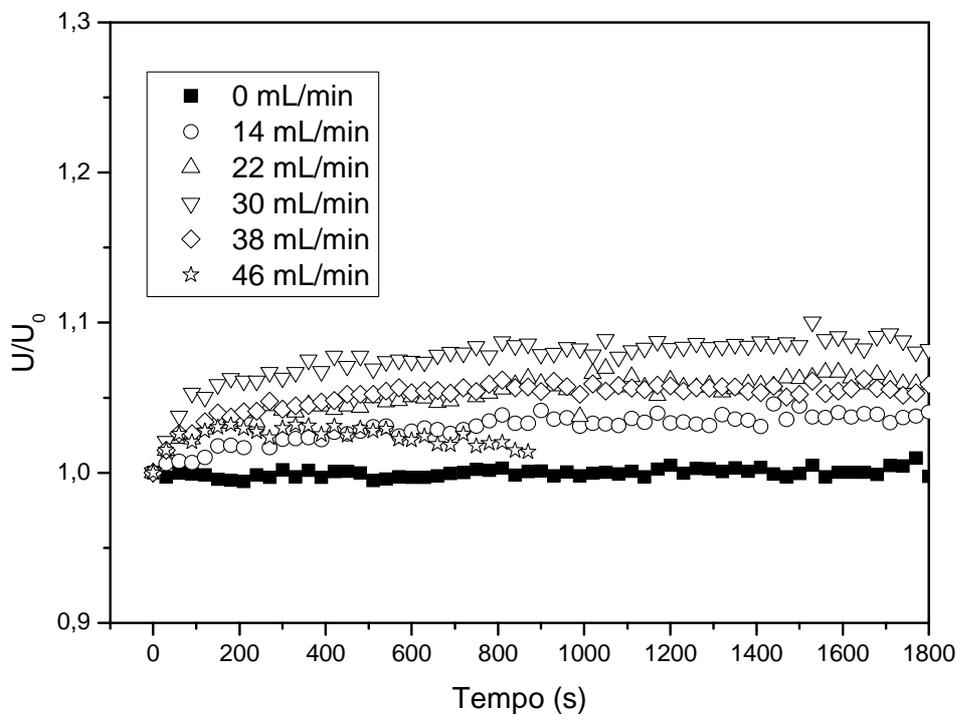


Figura 4.44 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

Nas Figuras 4.45 e 4.46 estão apresentados os resultados do adimensional de velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado para o leite desnatado nas duas configurações vibracionais para o adimensional de vibração igual a 4,00. Verifica-se que o adimensional de velocidade do ar não sofreu influência da vazão de alimentação de pasta mesmo com a aplicação da vibração. Além disso, o comportamento da velocidade do ar não apresentou diferenças significativas entre os resultados para duas combinações entre amplitude e frequência de vibração para um mesmo adimensional de vibração. Entretanto, para os resultados de queda de pressão é clara a diferença entre os comportamentos obtidos para as duas configurações do leito vibrofluidizado, como já apresentado. Observa-se, ainda, que a aplicação da vibração favoreceu a secagem aumentando a vazão máxima de alimentação de pasta de 22 ml/min para 26 ml/min, quando comparado ao leito fluidizado. Este resultado demonstra que a aplicação da vibração ocasiona uma melhora na dinâmica do leito possibilitando sua operação em condições impossíveis de serem realizadas apenas em leito fluidizado.

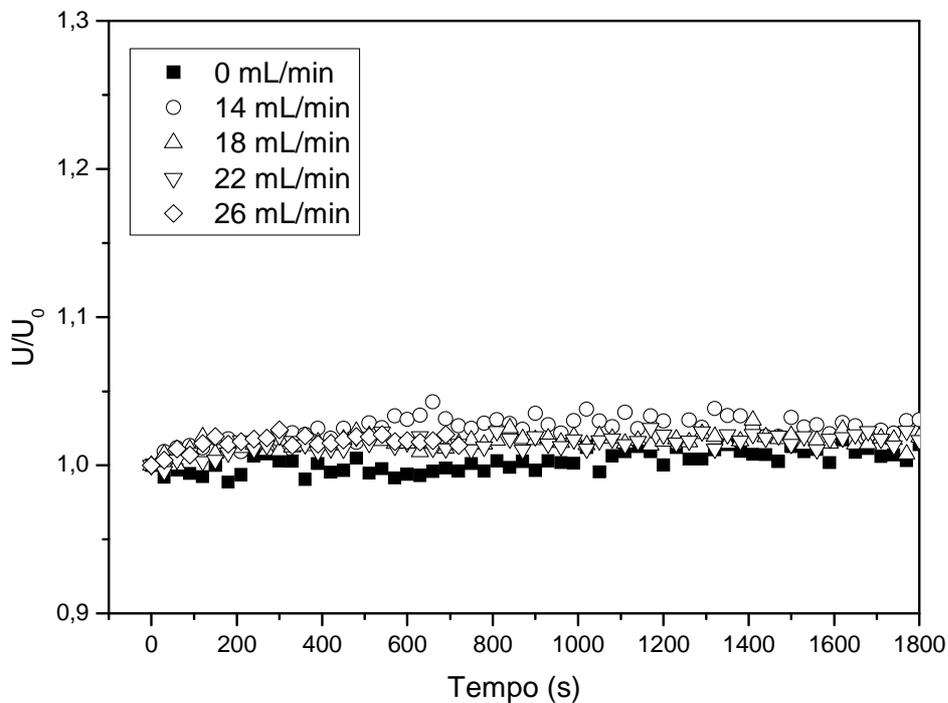


Figura 4.45 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de leite desnatado para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

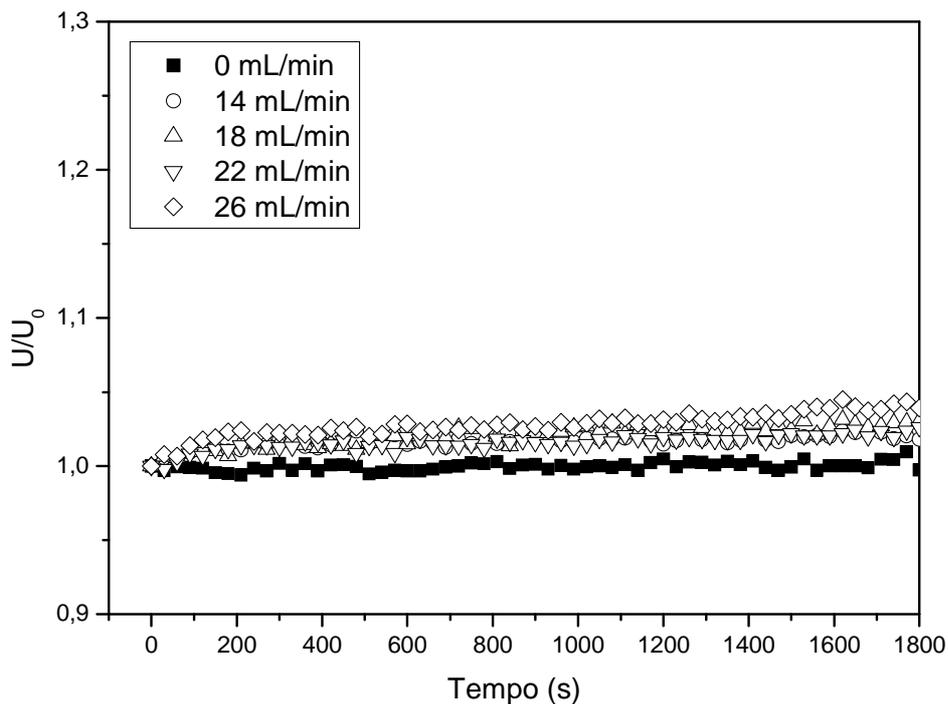


Figura 4.46 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de leite desnatado para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

O comportamento do adimensional de velocidade do ar na entrada do leito para a secagem de carbonato de cálcio em três concentrações no leito vibrofluidizado em diferentes configurações vibracionais está apresentado nas Figuras 4.47 a 4.52. Nestes resultados é possível observar que para uma mesma concentração o aumento da amplitude (diminuição da frequência) não ocasionou mudanças significativas nos resultados do adimensional de velocidade do ar. Mesmo comportamento foi obtido quando se comparou as três concentrações de sólidos para uma mesma configuração do leito vibrofluidizado. Entretanto, quanto aos resultados do adimensional de queda de pressão foram notadas diferenças significativas que justificam a não utilização do adimensional de vibração como parâmetro universal.

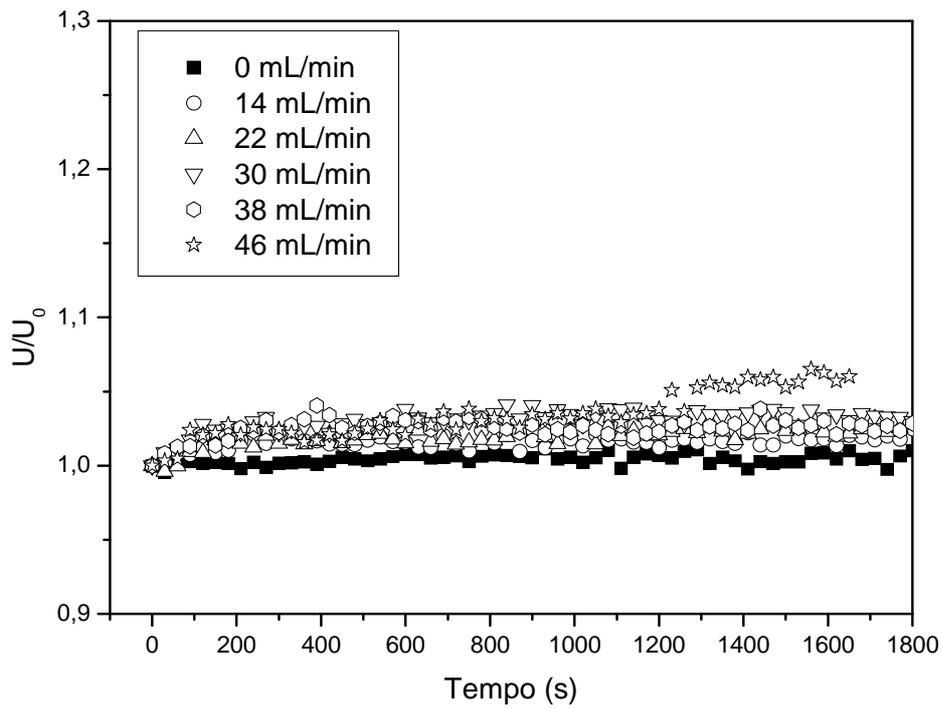


Figura 4.47 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (3%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

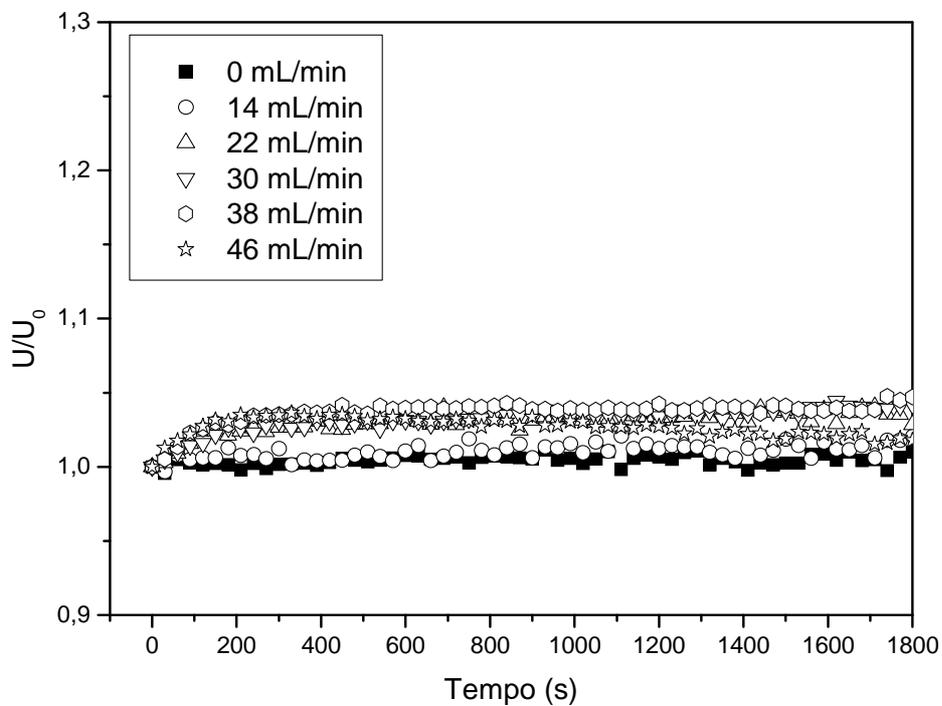


Figura 4.48 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (3%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

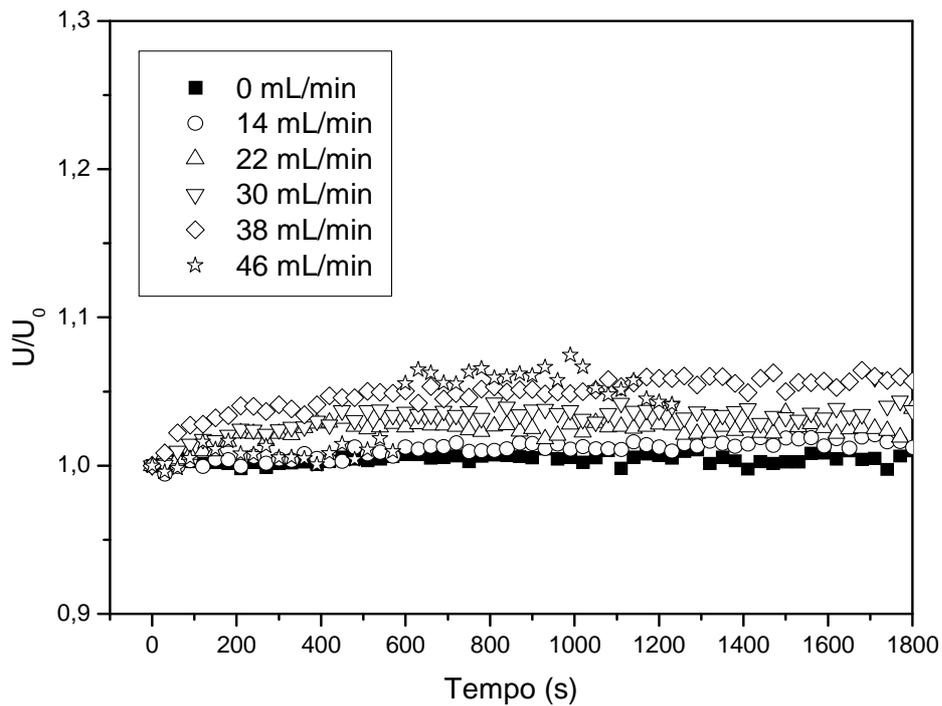


Figura 4.49 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (6%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

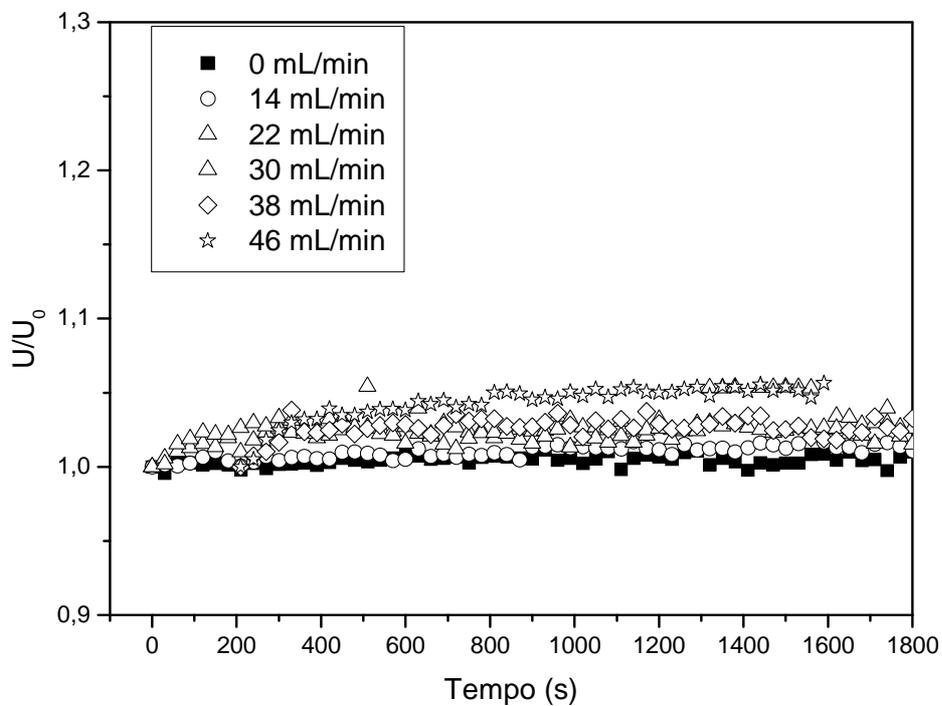


Figura 4.50 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (6%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

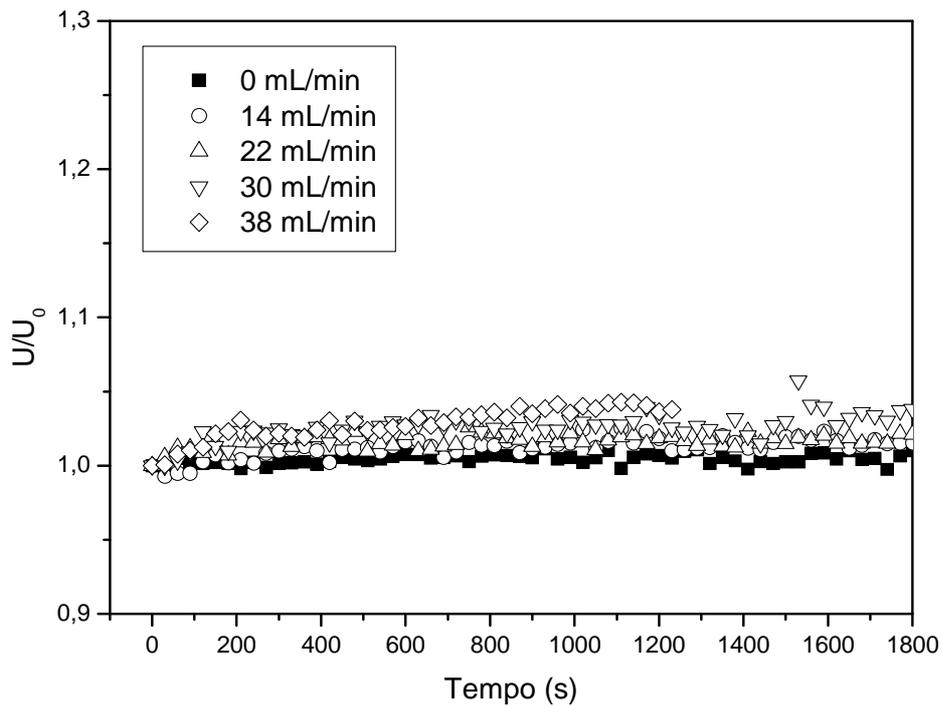


Figura 4.51 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (9%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

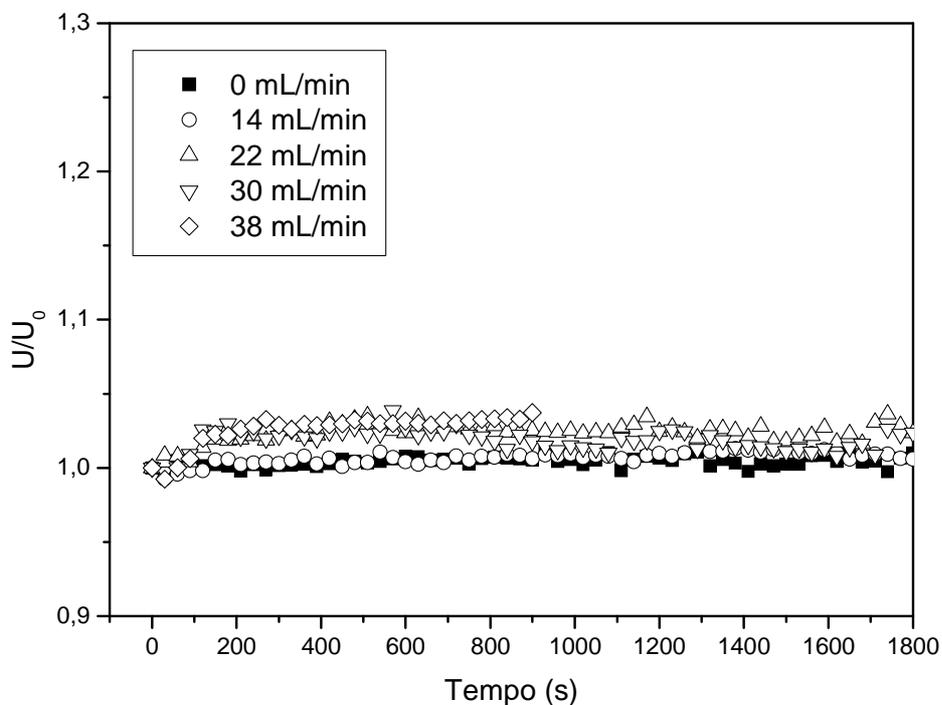


Figura 4.52 – Adimensional da velocidade do ar na entrada do leito vibrofluidizado em função do tempo de operação ($\Gamma = 4,00$) com alimentação de carbonato de cálcio (9%) para $T = 100^\circ \text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

4.2.3 Conclusões

A partir dos resultados fluidodinâmicos obtidos para os leitos fluidizado e vibrofluidizado úmidos durante a secagem de líquidos e pastas durante o período transiente pode-se afirmar que:

- as oscilações no adimensional de queda de pressão no leito são características da dinâmica do equipamento, pois continuam a aparecer independentemente da mudança na pasta, temperatura, velocidade do ar ou configuração vibracional;
- o aumento na capacidade evaporativa do leito está relacionado com a inserção de mais calor ao leito, causado tanto pelo aumento da velocidade do ar a uma mesma temperatura quanto pelo aumento da temperatura a uma mesma velocidade do ar, comportamento comprovado pela ampliação na capacidade de alimentação de pasta quando ocorria um aumento de velocidade do ar (temperatura constante) ou de temperatura (velocidade do ar constante);
- para o lodo de esgoto, o comportamento fluidodinâmico tanto do leito fluidizado quanto do vibrofluidizado foi muito semelhante ao obtido para a água, provavelmente, devido à sua composição ser formada na maioria por minerais e por volta de 95 % de água;
- para o leite desnatado, em leito fluidizado foi possível uma alimentação de pasta de somente 18 ml/min. Esta baixa vazão de alimentação pode estar relacionada às características coesivas dos lipídeos e carboidratos presentes na composição do leite desnatado. Entretanto, com a aplicação da vibração foi possível ampliar a vazão de alimentação para 26 ml/min, mostrando que a vibração proporciona melhorias significativas na dinâmica do leito diminuindo o aparecimento de fatores que dificultam a fluidização, comuns ao tratar-se pastas como esta;
- observou-se para o leito fluidizado e vibrofluidizado que o

adimensional de velocidade do ar de secagem aumentou com o aumento da vazão de alimentação da pasta. Uma explicação para este comportamento pode estar relacionada ao fato de que a inserção de um líquido pode modificar a dinâmica do leito ocasionando uma facilitação à passagem do ar pela formação de aglomerações;

- para o carbonato de cálcio, o aumento da concentração de sólidos ocasiona uma diminuição nas oscilações da queda de pressão ao longo do tempo tanto para o leito fluidizado quanto para o vibrofluidizado. Pode-se dizer que a inserção de uma pasta com maior concentração de sólidos ocasiona a formação de um filme sólido mais espesso, que pode facilitar a aglomeração entre as partículas e a formação de canais preferenciais. A presença de caminhos preferenciais ocasiona a diminuição das oscilações nos valores de queda de pressão, já que o ar não passa de forma homogênea no leito;

- o aumento da amplitude (diminuição da frequência) e o aumento da concentração não ocasionaram mudanças significativas no comportamento do adimensional de velocidade do ar de secagem e

- para o leito vibrofluidizado observou-se, de maneira geral, que o comportamento fluidodinâmico durante o período transiente de evaporação e secagem de pastas foi distinto entre as duas combinações entre amplitude e frequência de vibração para o mesmo adimensional de vibração ($\Gamma = 4,0$). Observou-se visualmente durante a realização dos experimentos que na maior amplitude e menor frequência de vibração uma movimentação bastante vigorosa com formação de *slugging* e arremesso das partículas durante o movimento ascendente, além de compactação e expansão do leito durante a movimentação. Este comportamento pode explicar a amplificação nas oscilações do adimensional de queda de pressão para esta condição vibracional. Para a menor amplitude observou-se visualmente uma fluidodinâmica semelhante com a do leito fluidizado, entretanto, um pouco mais vigorosa, o que pode explicar a semelhança entre as curvas do adimensional de queda de pressão e do

adimensional de velocidade do ar nesta condição vibracional com as curvas para o leito fluidizado;

4.3 Secagem de pastas em leitos fluidizado e vibrofluidizado

4.3.1 Umidades relativa e absoluta

Os experimentos de secagem e evaporação de água foram conduzidos a duas velocidades do ar de entrada no leito iguais a 1,33 m/s e 1,55 m/s, correspondentes a 20 e 40% acima da velocidade de fluidização mínima obtida em leito fluidizado, e em duas temperaturas, 80 e 100°C. Trabalhou-se com um mesmo valor de adimensional de vibração ($\Gamma = 4,00$) em diferentes combinações entre A e f (A = 0,003 m com f = 18,20Hz e A = 0,015 m com f = 8,14 Hz), a fim de avaliar a influência dos parâmetros vibracionais sobre o processo de secagem. Os valores de umidade relativa e absoluta foram obtidos subtraindo-se os valores no tempo pelo valor inicial com o intuito de se eliminar interferências de possíveis mudanças ambientais durante os experimentos. Portanto, a partir deste ponto onde estiver escrito umidade relativa (UR) ou absoluta (UA) leia-se UR – UR₀ ou UA – UA₀.

Nas Figuras 4.53 a 4.56 são apresentados os valores da umidade relativa na saída do leito em função do tempo de operação para várias vazões de alimentação de água, em leito fluidizado. Nas duas primeiras figuras, para a temperatura de 80° C, há um aumento de 22 ml/min para 30 ml/min e nas outras duas, para 100° C, há um aumento de 34 ml/min para 42 ml/min com o aumento da velocidade superficial do ar de secagem de 1,33 m/s para 1,55 m/s. Esse aumento era esperado, já que ao aumentar-se a velocidade do ar injetado no leito também ocorreu o aumento da energia térmica alimentada ao sistema, favorecendo a transferência de calor e massa e, também, aumentando a movimentação das partículas melhorou o contato entre as fases. Além disso, utilizando-se como referência a vazão de alimentação de água

de 22 mL/min (para as Figuras 4.53 e 4.54), constata-se que o aumento da velocidade do ar de secagem de 1,33 m/s para 1,55 m/s promoveu redução no tempo necessário para se atingir o regime permanente de 870 para 750 segundos aproximados (indicado pelas setas). Já para as Figuras 4.55 e 4.56 utilizando como referência a vazão de alimentação de 30 ml/min ocorreu uma redução de 750 s para 610 s, para o mesmo aumento na velocidade do ar de secagem.

Observa-se ainda que para uma mesma vazão de referencia a umidade relativa diminuiu com o aumento da velocidade do ar. Considerando-se que a mesma quantidade de água é evaporada durante a passagem do ar, pode-se dizer que quando há um aumento na velocidade do ar há uma diminuição na umidade relativa, pois esta mesma quantidade de água está presente numa maior vazão da corrente gasosa, diminuindo sua quantidade total com relação ao total da vazão da corrente gasosa. No caso inverso, quando há uma diminuição na velocidade do ar há um aumento na umidade relativa, pois a água, na forma de vapor, está em maior quantidade com relação à vazão total da corrente gasosa.

Comparando-se as Figuras 4.53 (80° C) e 4.55 (100° C) (para $U_s = 1,33$ m/s) e a 4.54 (80° C) e 4.56 (100° C) (para $U_s = 1,55$ m/s) observa-se para o primeiro caso um aumento na vazão máxima de alimentação de 22 ml/min para 34 ml/min e para o segundo caso um aumento de 30 ml/min para 42 ml/min. Além disso, ocorreu uma diminuição no tempo necessário para se atingir o regime permanente com o aumento da temperatura. Tomando-se como referência a vazão de alimentação de 22 ml/min para todos os casos, pode-se notar para as Figuras 4.53 e 4.55 que houve uma diminuição de 870 s para 540 s, já para as Figuras 4.54 e 4.56 houve uma diminuição de 750 s para 405 s. Observa-se ainda, que para esta mesma vazão de alimentação de referência, em todos os casos, houve uma diminuição da umidade relativa com o aumento da temperatura. Este comportamento está relacionado ao fato de que na maior temperatura o ar alimentado tem maior capacidade de “suportar” a água evaporada, conseqüentemente, a umidade diminuiu e a

vazão máxima de alimentação pôde ser incrementada. Pode-se dizer que estes comportamentos observados são clássicos, uma vez que a energia térmica aplicada ao leito é proporcional a vazão do ar multiplicada pela diferença entre a temperatura de entrada e a temperatura ambiente. Além disso, como foi observado nos resultados para o adimensional da queda de pressão no leito fluidizado, um aumento na velocidade do ar de secagem proporciona maior movimentação do leito de partículas, notado pelo aumento das oscilações nos dados de queda de pressão, principalmente para a temperatura de 100° C. A maior movimentação do leito fluidizado é de grande importância na melhora do contato entre as fases, o que favorece os fenômenos de transferência de calor e massa e, conseqüentemente, a secagem.

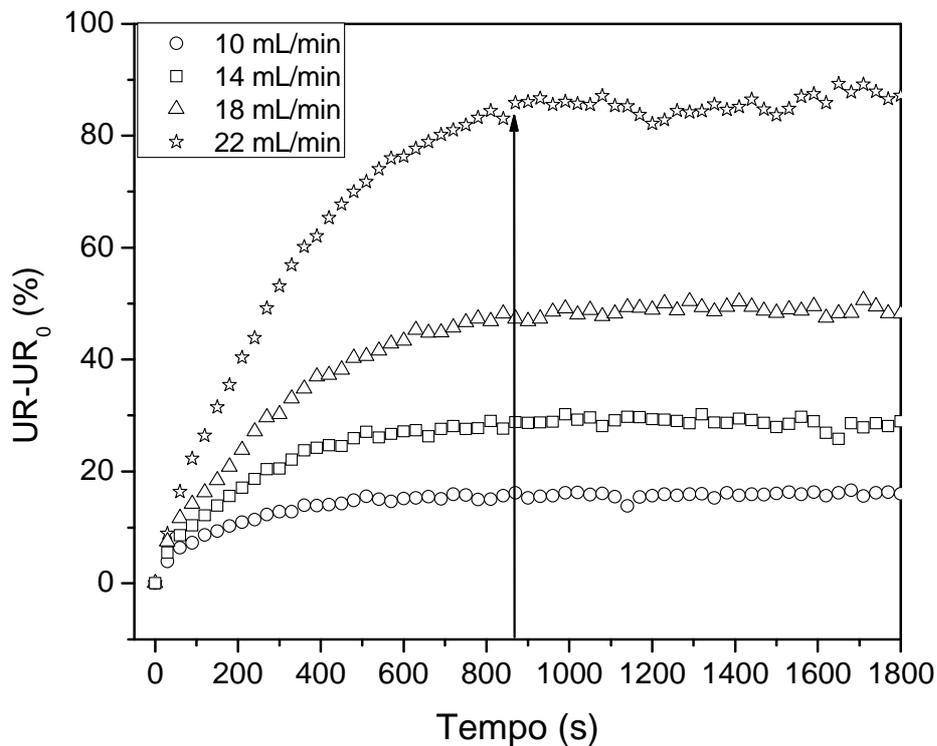


Figura 4.53 - Umidade relativa ($UR-UR_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo durante a evaporação de água; $T = 80^\circ\text{C}$; $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

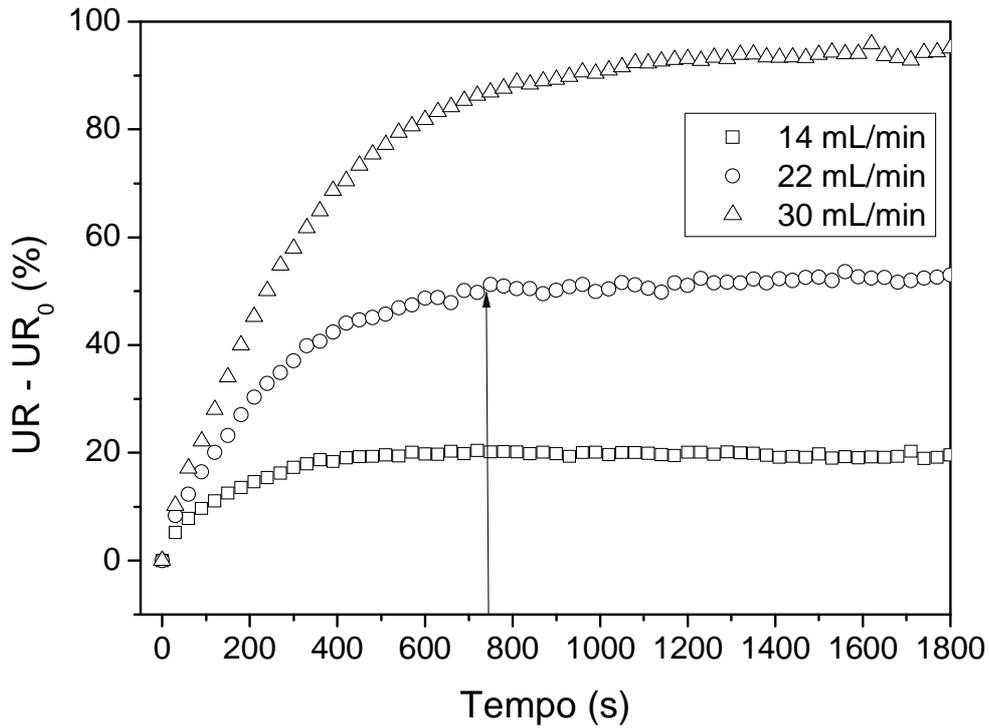


Figura 4.54 - Umidade relativa ($UR-UR_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo durante a evaporação de água; $T = 80^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

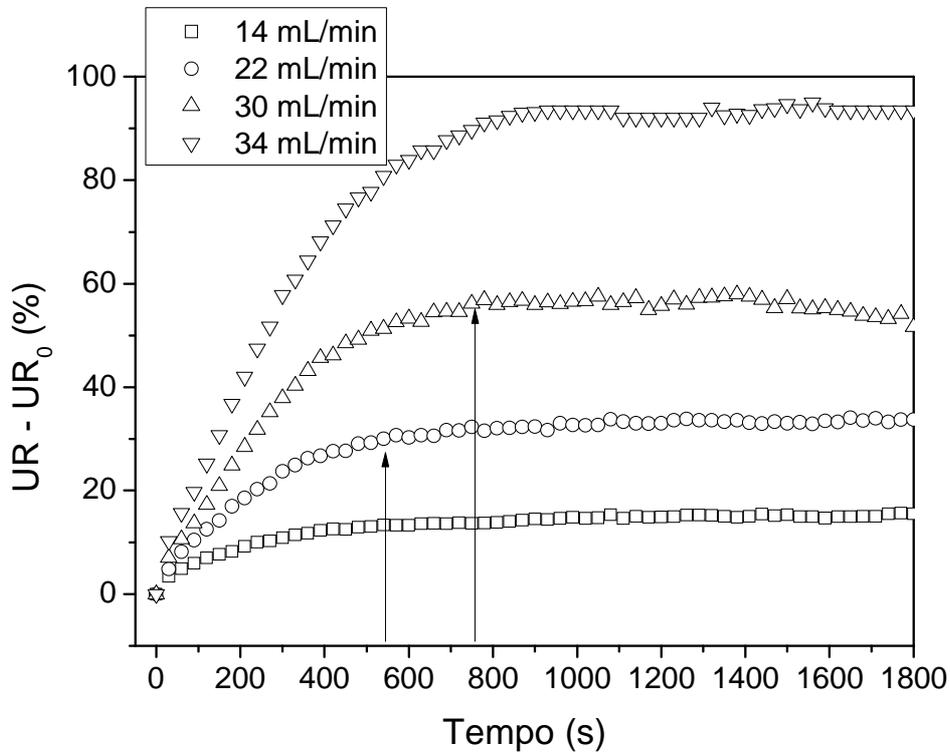


Figura 4.55 - Umidade relativa ($UR-UR_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo durante a evaporação de água; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

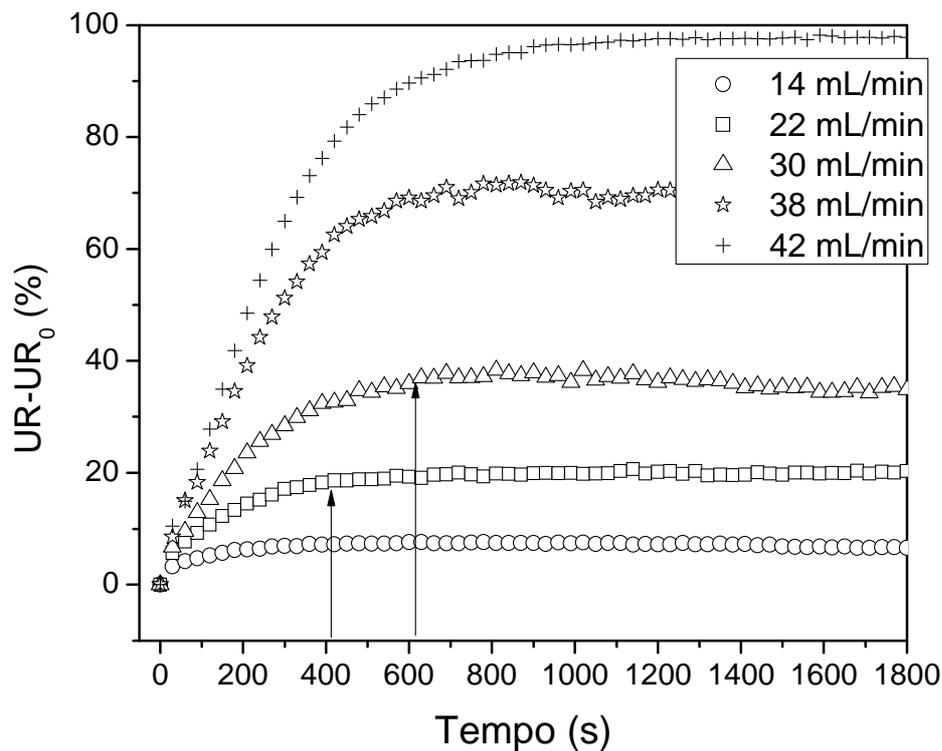


Figura 4.56 - Umidade relativa ($UR-UR_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo durante a evaporação de água; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

Por concisão e com o objetivo de somente avaliar a influência da pasta no comportamento do equipamento e da inserção da vibração ao leito, serão apresentados a seguir os resultados referentes à operação na temperatura de 100°C e velocidade superficial do ar de secagem de $1,55 \text{ m/s}$. Os demais resultados estão dispostos no Apêndice B.

Nas Figuras 4.57 e 4.58 são apresentados os valores da umidade absoluta na saída do leito fluidizado e vibrofluidizado, respectivamente, em função do tempo decorrido para várias vazões de alimentação de água. De acordo com Almeida *et al.* (2006) existe sempre uma quantidade total máxima de água que pode ser retirada pelo ar de secagem para uma determinada temperatura independentemente da grandeza da vazão de ar de secagem alimentada. Nos resultados obtidos para o leito fluidizado e vibrofluidizado o mesmo comportamento pode ser observado. Para ambas as configurações do leito a umidade absoluta máxima foi de $0,027 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$. Isto demonstra que a quantidade de água que pode ser

retirada durante um processo de secagem independe da vazão de ar de secagem alimentada e da vibração imposta ao leito, sendo somente função da temperatura do ar de secagem.

Almeida *et al.* (2006) ainda afirmaram que a máxima quantidade de água que pode ser retirada para cada vazão de alimentação já é obtida no início do processo e não muda durante o transcorrer do tempo. Para os leitos fluidizado e vibrofluidizado o mesmo comportamento é observado, mostrando, novamente, que a umidade absoluta é uma variável fortemente ligada à temperatura do ar de secagem. Entretanto, para o leito vibrofluidizado para uma mesma vazão de alimentação de água, a umidade absoluta apresentou-se oscilatória. Este comportamento pode estar ligado ao fato de que a inserção da vibração ocasiona intensa movimentação das partículas, o que é evidenciado nos resultados do adimensional de queda de pressão para o leito vibrofluidizado. Nestes resultados as oscilações na queda de pressão, que é uma característica do leito fluidizado/vibrofluidizado operando em regime de fluidização, sofrem uma ampliação devido a aplicação da vibração ao leito.

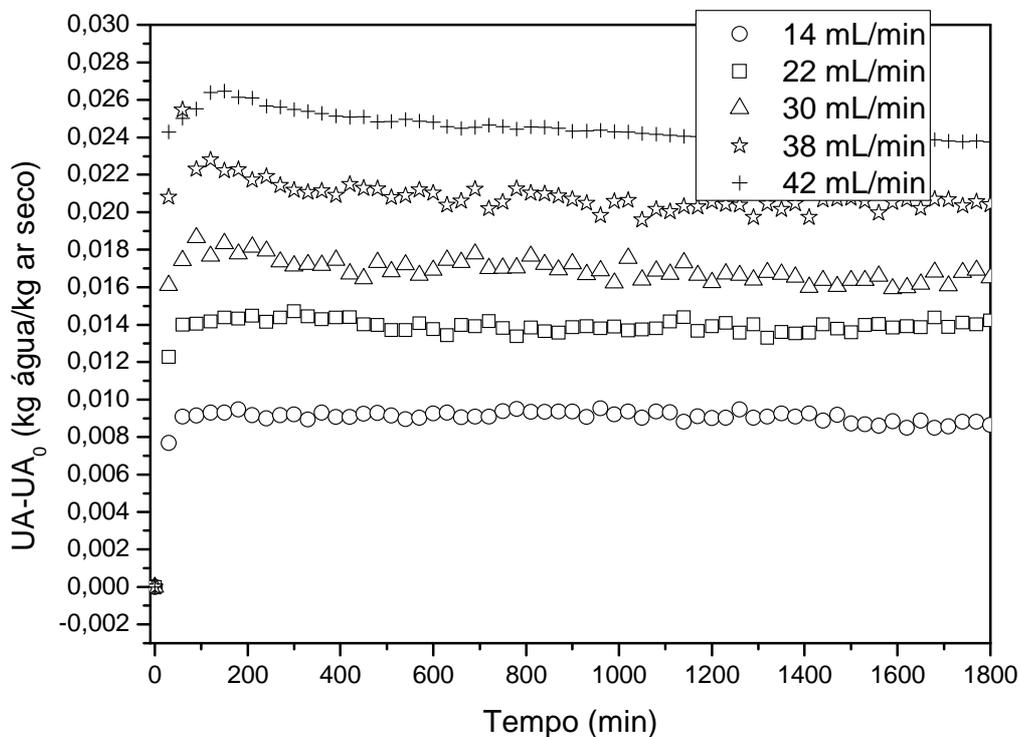


Figura 4.57 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo durante a evaporação de água; $T = 100^\circ\text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

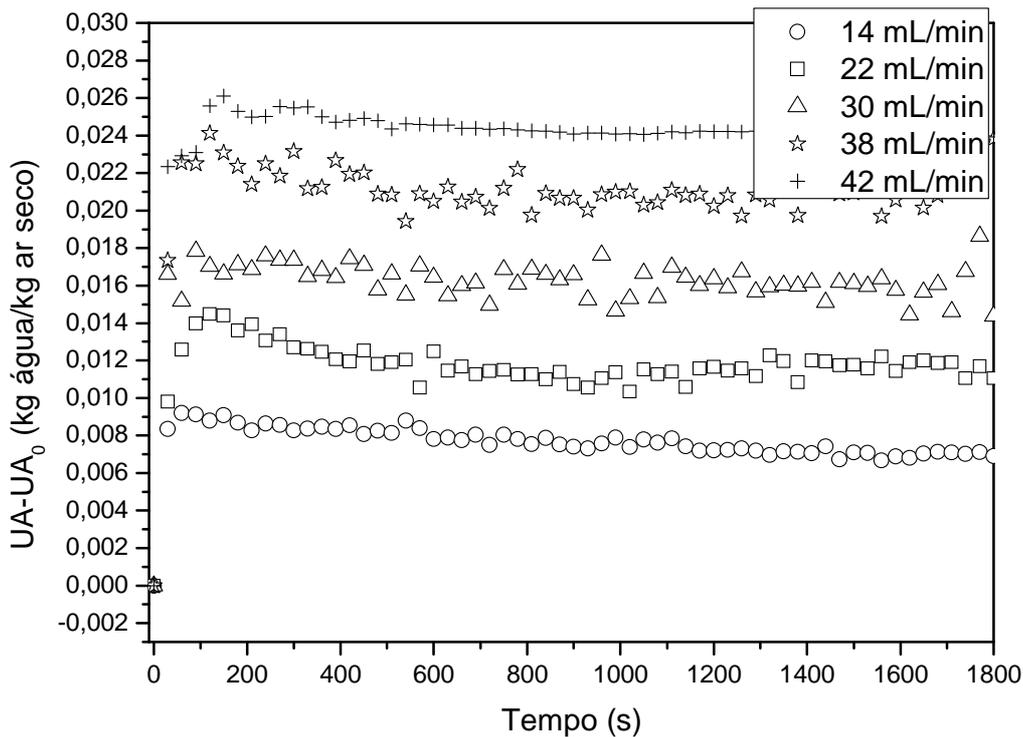


Figura 4.58 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo durante a evaporação de água; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55$ m/s, $A = 0,003$ m e $f = 18,20$ Hz ($\Gamma = 4,00$).

Nas Figuras 4.59 e 4.60 tem-se os valores da umidade relativa na saída do leito em função do tempo decorrido, para várias vazões de alimentação de água, em leito vibrofluidizado, a 100°C e $1,55$ m/s. Na Figura 4.59 estão os resultados para amplitude $0,015$ m e frequência de vibração de $8,14$ Hz e na Figura 4.60 para amplitude de $0,003$ m e frequência de $18,20$ Hz, ambas para adimensional de vibração igual a $4,00$.

Fazendo-se uma comparação entre os resultados apresentados nestas figuras é possível notar algumas diferenças quando se utilizam diferentes combinações entre A e f , para um mesmo adimensional de vibração. Pode ser observado que para a amplitude de $0,015$ m o regime permanente é atingido à 250 s (14 mL/min) e 470 s (42 mL/min), aproximadamente. Para a amplitude de $0,003$ m vai de 290 s (14 mL/min) à 800 s (42 mL/min), aproximadamente. Nota-se, portanto, que a utilização de maior amplitude de vibração (menor frequência de vibração) permite se atingir o regime permanente mais

rapidamente. Observou-se visualmente durante os experimentos que a aplicação da maior amplitude de vibração (menor frequência) promoveu maior movimentação das partículas, provocando o aparecimento de *slugging*, ocasionando o arremesso das mesmas e expandindo o leito. Este comportamento de intensa movimentação foi comprovado por meio dos resultados de adimensional de queda de pressão no leito vibrofluidizado, em que na maior amplitude as oscilações foram amplificadas. Desta forma, com o aumento da massa de água sobre as partículas, maior é o volume de material que precisa recobrir homoganeamente todo o leito, ser aquecido e evaporado, aumentando o tempo necessário para se atingir o regime permanente. Assim, a maior movimentação do leito facilita a mistura do material líquido sobre as partículas, melhorando o contato gás-sólido pela redução dos aglomerados e pela maior movimentação das mesmas. Nesta condição operacional, a aplicação de um mesmo adimensional de vibração (Γ) em diferentes combinações entre A e f , promoveu comportamentos distintos no processo de secagem de água, isto mostra o caráter não universal do Γ . Isto está de acordo com Daleffe *et al.* (2005, 2007) que obtiveram comportamentos fluidodinâmicos distintos para um mesmo valor de adimensional de vibração.

Daleffe e Freire (2004) observaram que a inserção de uma pasta (glicerol) ao leito vibrofluidizado provocava significativa redução da queda de pressão na região de leito fixo e aumento na velocidade mínima de fluidização. Este comportamento foi explicado como sendo causado pelo aumento do grau de aderência entre as partículas, ampliando o efeito da aglomeração entre estas. Este aumento do volume de partículas aglomeradas provocou escoamento irregular através do leito, caracterizado pela formação de canais preferenciais, facilitando o escoamento de ar. Os autores afirmaram que o efeito provocado pela vibração pode se sobrepor ao efeito da presença de pasta e reduz a necessidade de ar para fluidizar o leito em presença de líquido. Isto melhora a

movimentação das partículas, devido ao rompimento das pontes líquidas formadas e a utilização do leito vibrofluidizado para processamento de pastas pode resultar em economia energética, reduzindo o investimento do sistema para fornecimento de ar.

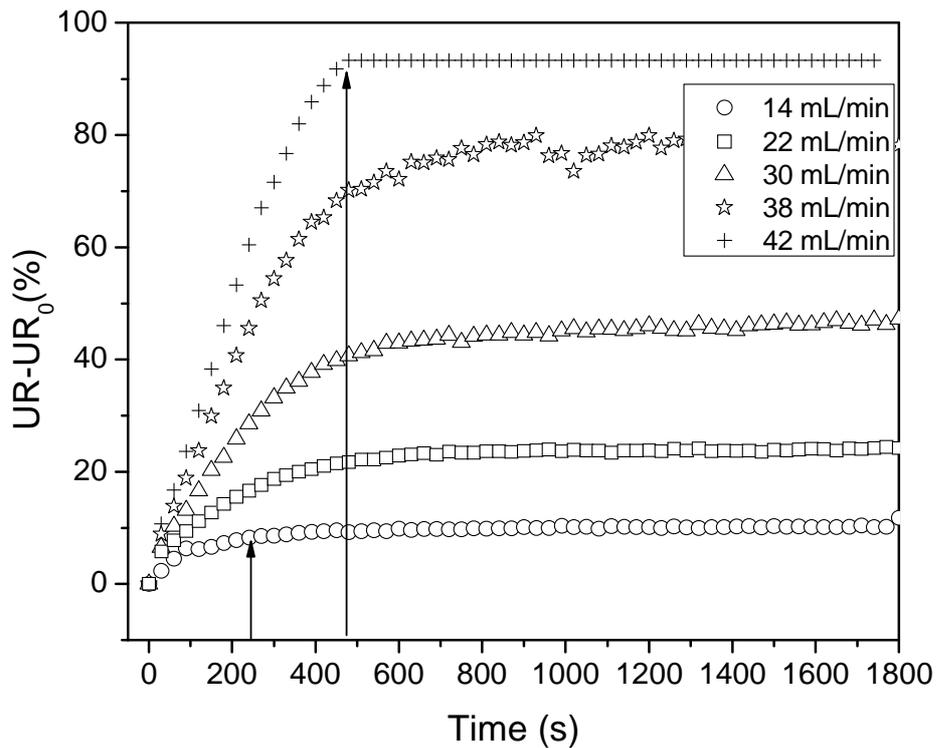


Figura 4.59 - Umidade relativa ($UR-UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo durante a evaporação de água; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{m}$; $f = 8,14\text{Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

Comparando-se a Figura 4.59 com a Figura 4.56 pode-se notar que em uma mesma temperatura e velocidade de ar, a vibração (em uma alta amplitude e baixa frequência) possibilitou a redução no tempo necessário para se atingir o regime permanente, em uma mesma vazão de alimentação de água. Para vazão de alimentação de 42 mL/min, verifica-se que o tempo requerido para que se atingisse o regime permanente reduziu de 925 s para 470 s, com a adição de vibração.

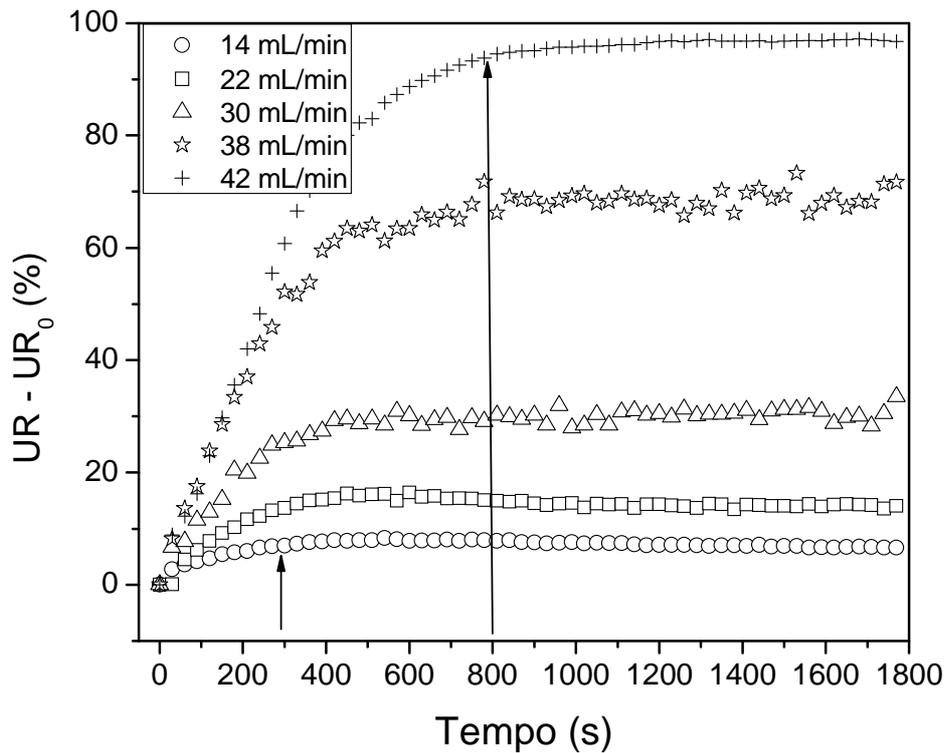


Figura 4.60 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo; evaporação de água; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55 \text{ m/s}$; $A = 0,003\text{m}$; $f = 18,24\text{Hz}$.

No caso da evaporação de água observa-se que a utilização da vibração proporcionou uma economia de tempo para que o leito atingisse o regime permanente, condição em que normalmente se realizam os processos de secagem. Com a agitação das partículas rompem-se as pontes líquidas e, assim, se reduz o efeito da aglomeração e o escoamento irregular através do leito, caracterizado pela formação de canais preferenciais. Entretanto para a água, as pontes líquidas são fracas, já que não é possível observar uma diferença muito grande entre as umidades relativas atingidas no regime permanente para os leitos analisados. Assim, a utilização de pastas reais, como o lodo de esgoto, leite desnatado e carbonato de cálcio, torna-se interessante para se observar como a inserção da vibração influencia no comportamento do leito durante o período transiente de secagem de pastas com características diferentes da água.

Na Figura 4.61 estão apresentados os valores da umidade relativa em relação ao tempo para várias vazões de alimentação de lodo de esgoto em leito fluidizado, a 100°C e $1,55 \text{ m/s}$.

Nas Figuras 4.62 e 4.63 são apresentados os resultados de secagem de lodo para o leito vibrofluidizado, em diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração, para um mesmo adimensional de vibração ($\Gamma = 4,00$). Para o leito fluidizado (Figura 4.61) verifica-se que o tempo requerido para que se atingisse o regime permanente foi de 300 s (em 14 mL/min) e 640 s (em 46 mL/min). Para o leito vibrofluidizado (Figura 4.62), o regime permanente foi atingido à 300 s (14 mL/min) e 690 s (46 mL/min) e na Figura 4.63 foi de 300 s (14 mL/min) à 720 s (46 mL/min).

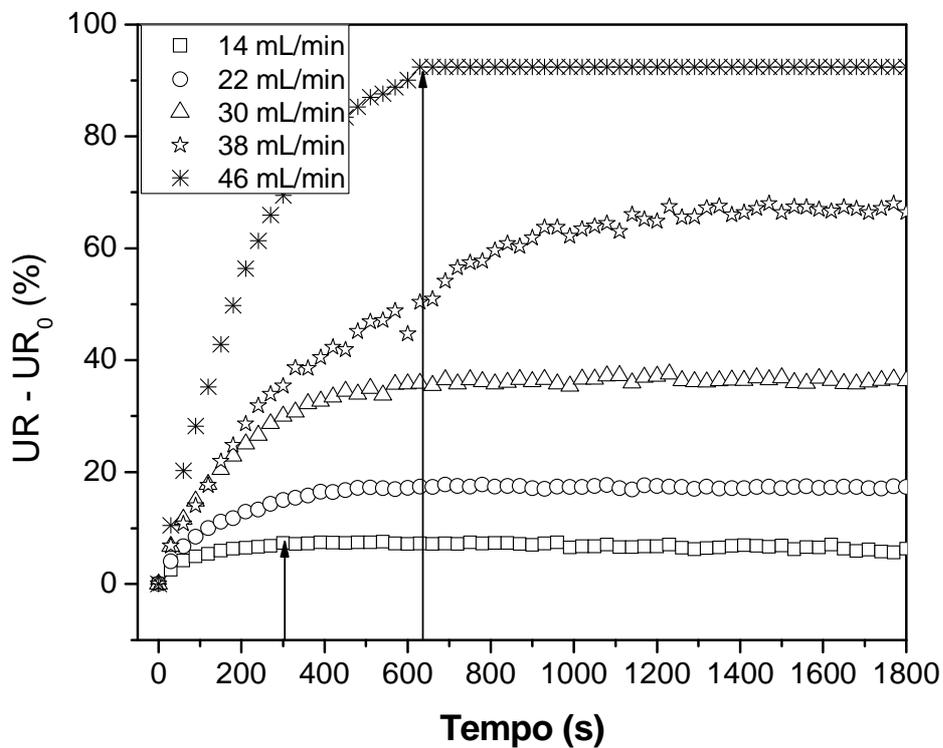


Figura 4.61 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo; secagem de lodo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

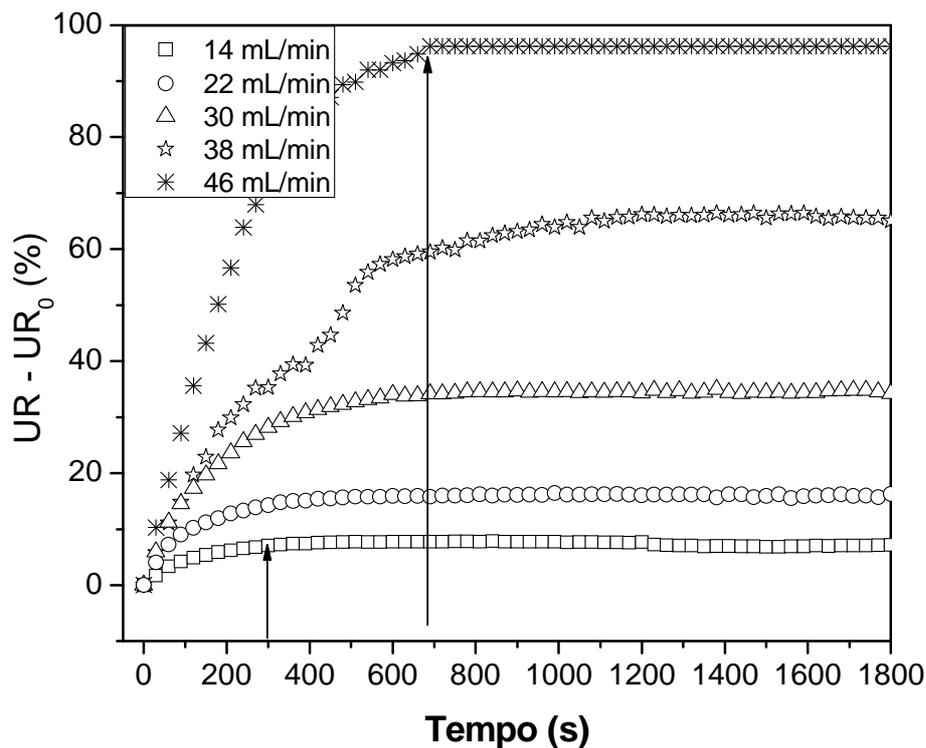


Figura 4.62 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo; secagem de lodo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55 \text{ m/s}$; $A = 0,015\text{m}$; $f = 8,14\text{Hz}$.

Nota-se, portanto, que para o tempo necessário para se atingir o regime permanente, as diferenças entre as três configurações de leitos de secagem não foram significativas. Entretanto, na Figura 4.64 para duas vazões de alimentação de pasta constante, pode-se comparar a influência da vibração nos resultados de umidade relativa. Os resultados de secagem complementam o que já foi observado nos resultados fluidodinâmicos, que o comportamento do leito vibrofluidizado na menor amplitude ($A = 0,003\text{m}$) foi muito semelhante ao do leito fluidizado. Durante a realização dos experimentos observou-se visualmente que a movimentação das partículas no leito apresentava-se semelhante à do leito fluidizado. De acordo com Pakowski *et al.* (1984) a influência da vibração sobre a taxa de secagem do material depende da faixa de velocidade do ar de secagem. Para velocidades do ar de secagem menor que a velocidade de mínima fluidização, a influência da vibração é maior do que quando a velocidade do ar de secagem é maior. Portanto, esta pode ser uma explicação para pequena influência da vibração tanto na cinética de secagem da pasta quanto no

comportamento fluidodinâmico do leito, já que os ensaios realizados neste trabalho foram com velocidades superficiais de ar 20 e 40% acima da velocidade de mínima fluidização.

Entretanto, na maior amplitude de vibração a curva da umidade relativa encontra-se em um patamar inferior às demais, demonstrando que a capacidade evaporativa do leito é maior, embora a vazão máxima de alimentação de pasta, a velocidade do ar e a temperatura de secagem sejam as mesmas que para as outras duas configurações do leito. Novamente, os resultados de secagem vêm complementar os fluidodinâmicos, já que estes resultados para a umidade relativa estão relacionados ao fato de que na maior amplitude ocorre uma intensa movimentação das partículas no leito. Esta intensa movimentação foi observada visualmente e comprovada pela amplificação das oscilações nos dados de queda de pressão. Outro caso em que pode-se dizer novamente que o adimensional de vibração não é um parâmetro universal, já que são obtidos comportamentos distintos para um mesmo adimensional de vibração (obtido através de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração).

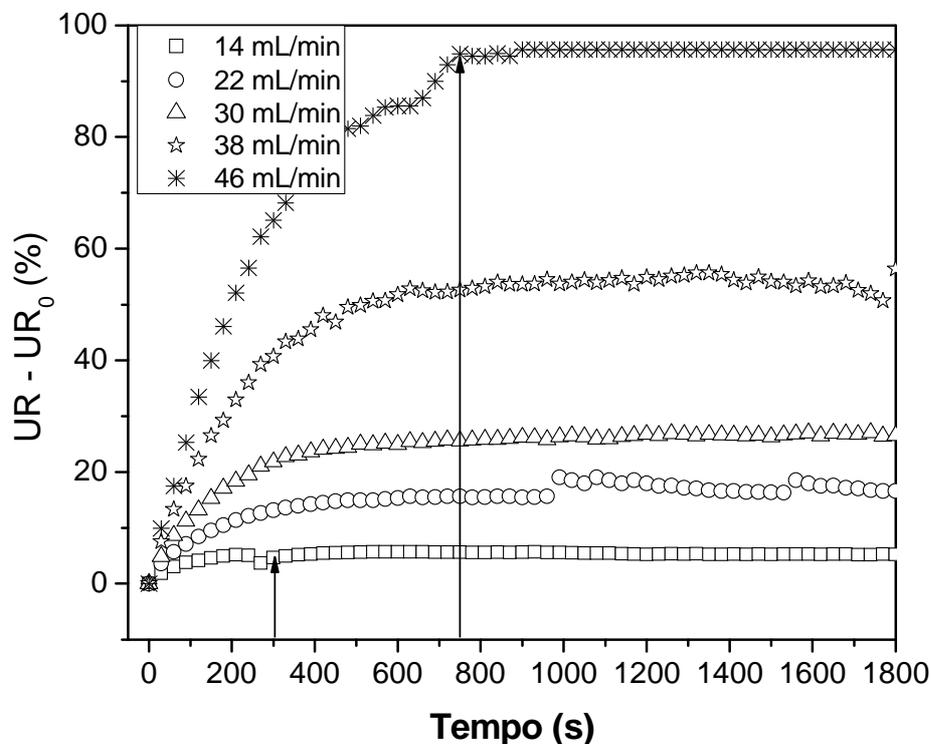


Figura 4.63 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo; secagem de lodo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55 \text{ m/s}$; $A = 0,003\text{m}$; $f = 18,24\text{Hz}$.

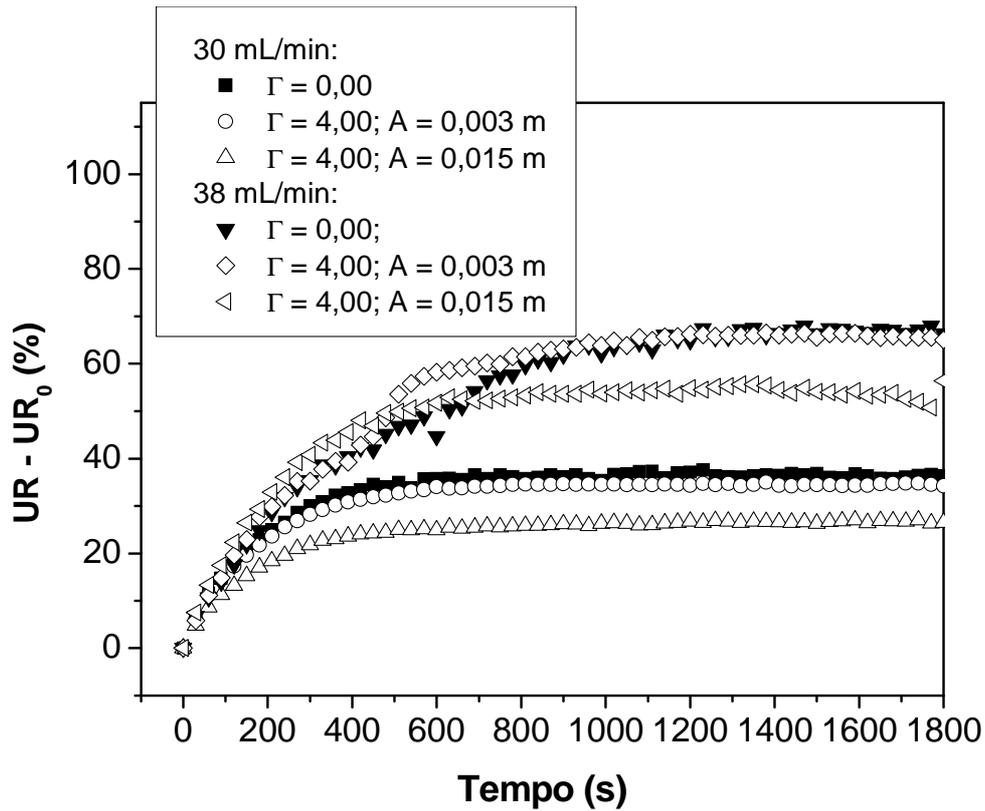


Figura 4.64 – Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado e fluidizado em função do tempo; secagem de lodo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

Nas Figuras 4.65 e 4.66 são apresentados os valores da umidade absoluta na saída do leito fluidizado e vibrofluidizado, respectivamente, em função do tempo decorrido para várias vazões de alimentação de lodo. Observa-se, neste caso, que para ambas as configurações do leito a umidade absoluta máxima foi de $0,027 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$, o que está de acordo com o obtido para a evaporação de água. Pelo motivo já exposto, os resultados para a umidade absoluta para o leite e o carbonato de cálcio tiveram comportamento qualitativamente semelhante ao encontrado para a água e lodo de esgoto e estão apresentados no Apêndice B.

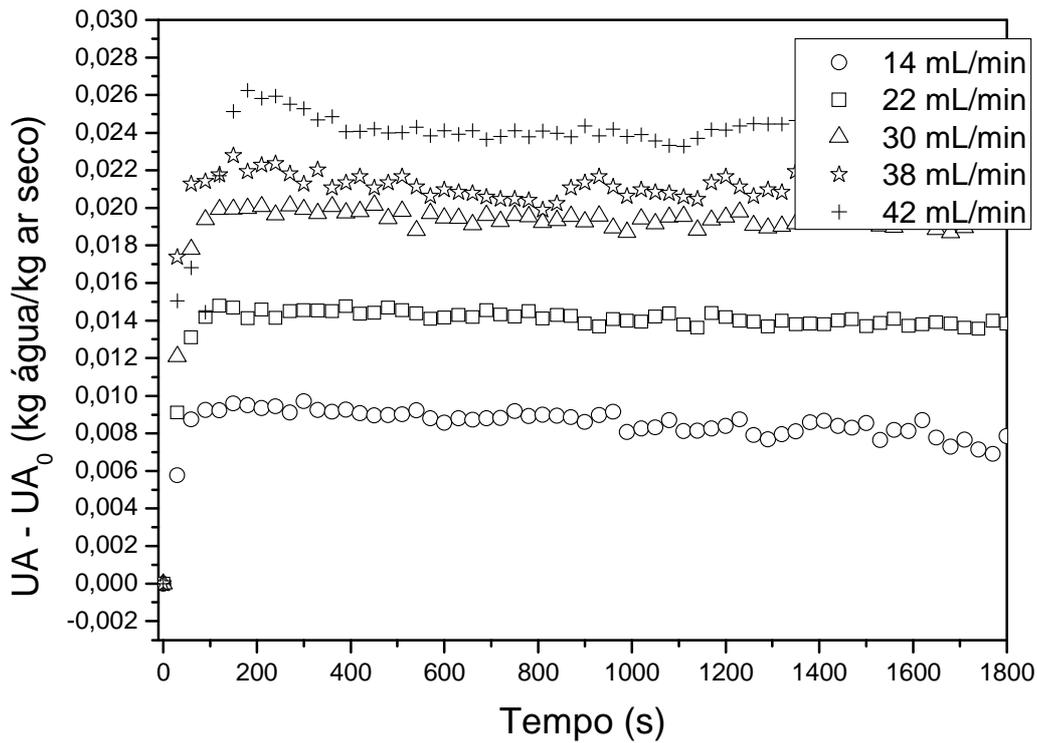


Figura 4.65 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto; $T = 100^\circ\text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

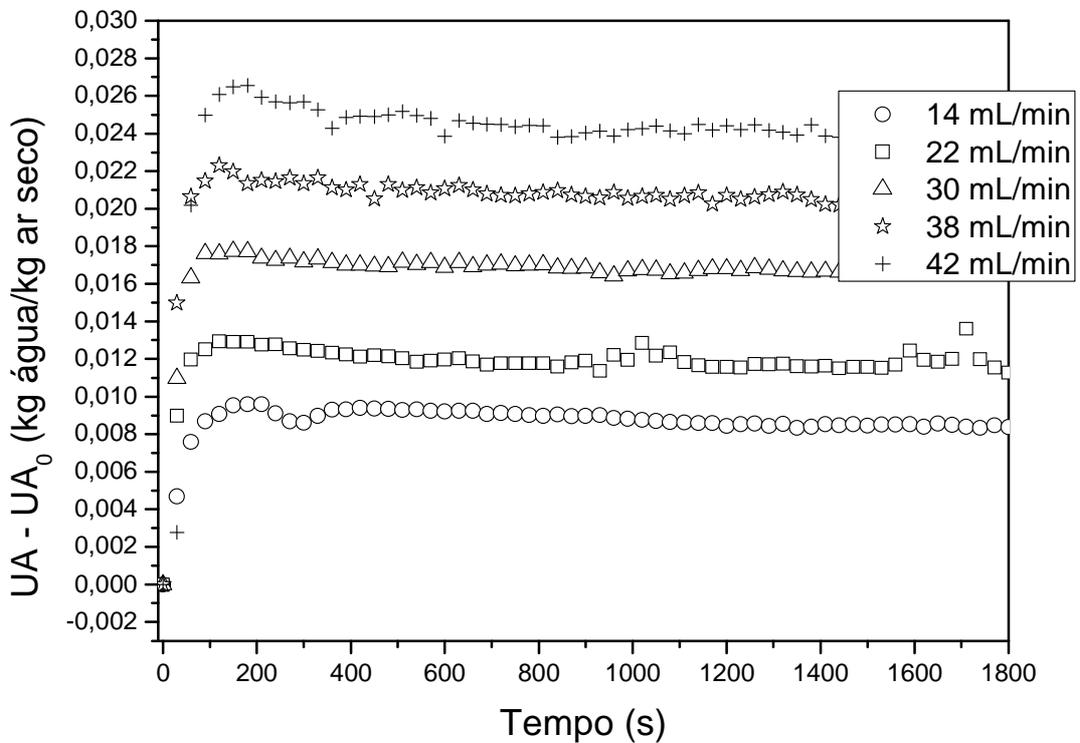


Figura 4.66 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55 \text{ m/s}$; $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

Nas Figuras 4.67 e 4.68 estão os resultados da umidade relativa para a secagem de leite desnatado em leito fluidizado e vibrofluidizado, respectivamente, onde a utilização da vibração possibilitou um aumento na vazão máxima de alimentação de pasta de 18 ml/min (leito fluidizado) para 26 ml/min (obtida para ambos os leitos vibrofluidizados). Diferentemente da água e do lodo de esgoto, o leite desnatado apresentou uma composição completamente distinta em que foi possível encontrar lipídeos e carboidratos. Estes componentes podem ocasionar a formação de pontes líquidas e sólidas mais fortes que as encontradas na água e lodo de esgoto, fatores que dificultam a fluidização. Assim, a utilização da vibração pode solucionar os problemas encontrados quando se deseja trabalhar com pastas que apresentem estas características.

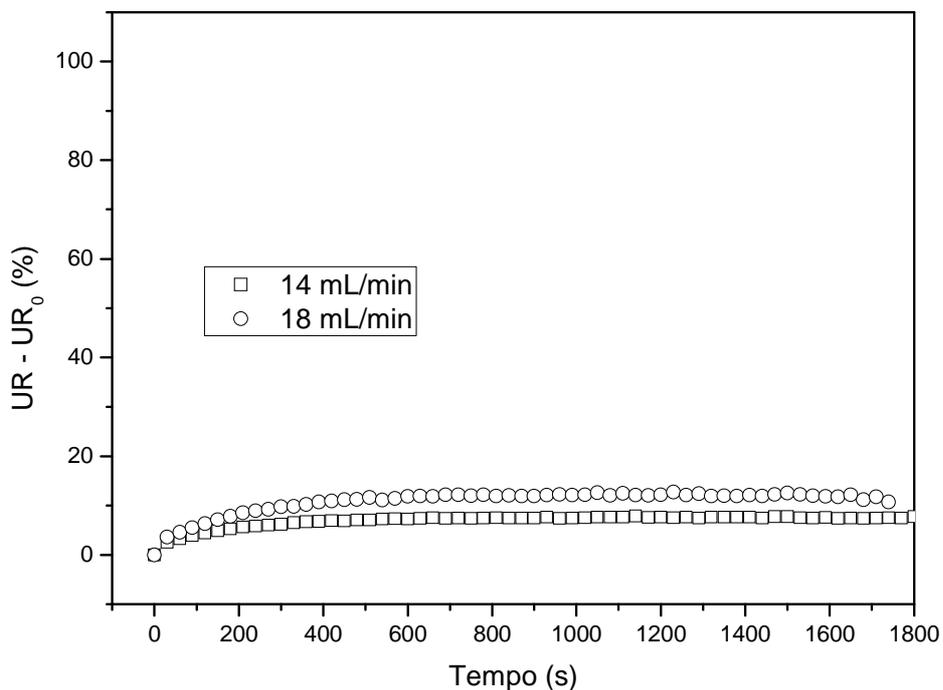


Figura 4.67 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo para a secagem de leite desnatado; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

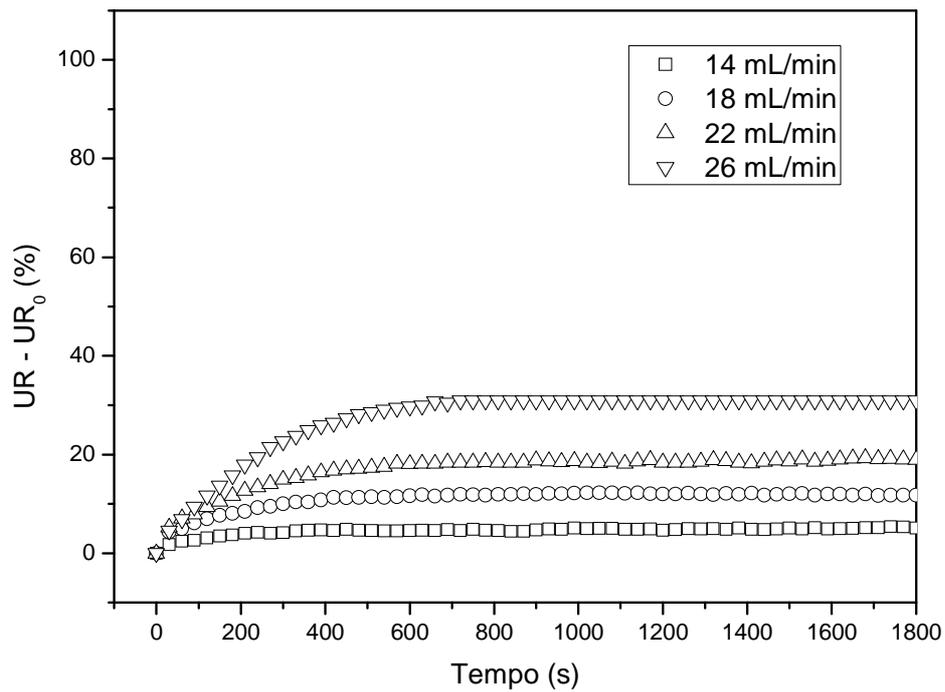


Figura 4.68 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo para a secagem de leite desnatado; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$; $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

A partir da Figura 4.69 pode-se fazer uma comparação entre as curvas de umidade relativa para o leito vibrofluidizado nas duas configurações na vazão de alimentação de pasta de 22 mL/min. Da mesma forma que para o lodo de esgoto, pode-se observar que a curva para a maior amplitude encontra-se num patamar inferior à da menor amplitude. A explicação deste comportamento pode ser a mesma apresentada para o lodo de esgoto. Além disso, tanto para o leite quanto para o lodo de esgoto, pode-se afirmar que o adimensional de vibração não apresenta caráter universal.

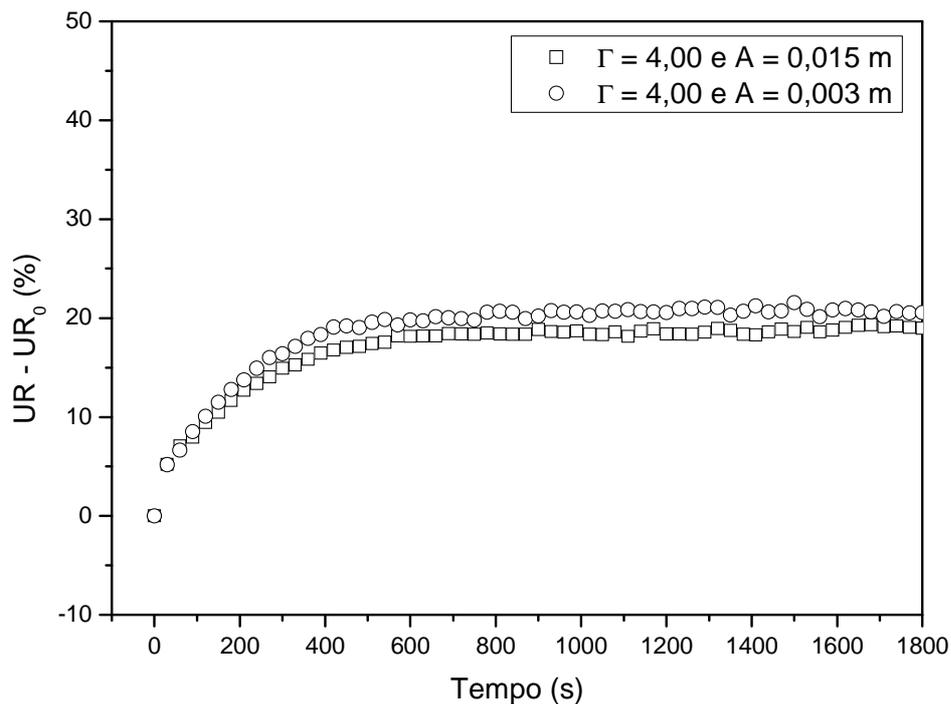


Figura 4.69 – Umidades relativas ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo para a secagem de leite desnatado na vazão de 22 mL/min; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $\Gamma = 4,00$.

Na Figura 4.70 estão apresentados os resultados da umidade relativa para a secagem em leito fluidizado de carbonato de cálcio na concentração de 6%. Para as outras concentrações o comportamento foi qualitativamente semelhante, sendo obtida para todas as concentrações a vazão máxima de alimentação no valor de 38 ml/min. As figuras para as outras concentrações estão apresentadas no Apêndice B. A principal diferença entre estas figuras está no tempo necessário para se atingir o regime permanente, para as menores vazões, e para entrar em colapso, nas maiores vazões, para 3% varia de 360 s (14 ml/min) a 1560 s (38 ml/min), para 6% varia de 300 s (14 ml/min) a 720 s (38 ml/min) e para 9% varia de 300 s (14 ml/min) a 600 s (38 ml/min). Observa-se que nas menores vazões de alimentação a concentração não ocasionou diferença nenhuma no tempo necessário para que se atingisse o regime permanente. Entretanto, na maior vazão de alimentação o tempo necessário para que o leito entrasse em colapso foi menor para a maior concentração. Isto pode estar relacionado ao fato de que nas maiores concentrações a maior quantidade de sólidos ocasionou a formação de pontes sólidas mais fortes que dificultam a

fluidização, provocando um rápido colapso do leito.

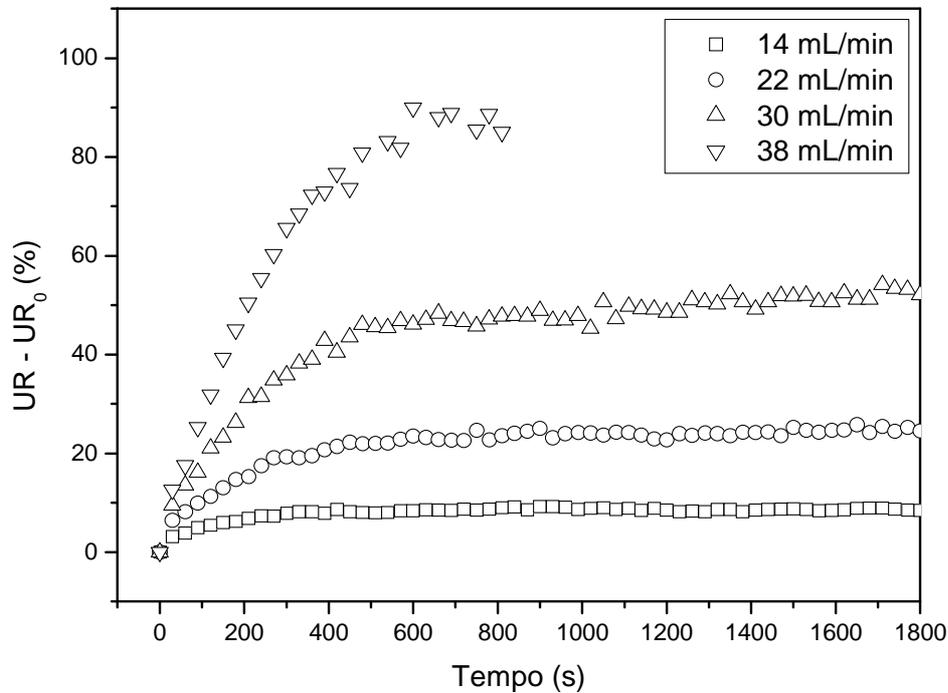


Figura 4.70 – Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado em função do tempo para a secagem de carbonato de cálcio (6 %); $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

Através da Figura 4.71 pode-se fazer uma comparação entre as curvas para a umidade relativa para as três concentrações de sólidos para o leito vibrofluidizado e em duas vazões de alimentação de pasta. As principais características a serem notadas são que as curvas para a maior concentração (9 %) apresentam-se em um patamar superior às demais e as curvas para as concentrações de sólidos de 3 e 6 % encontram-se sobrepostas. Os resultados aqui apresentados estão de acordo com o que foi encontrado para o adimensional de queda de pressão, onde houve uma diminuição das oscilações com o aumento da concentração de sólidos. Estes comportamentos demonstram que a capacidade evaporativa do leito operando com uma pasta com maior concentração de sólidos é menor já que a capacidade de formar pontes sólidas é maior para maiores concentrações de sólidos, o que ocasiona a formação de aglomerações e canais preferenciais.

Nas Figura 4.72 e 4.73 estão apresentadas as curvas para a umidade relativa para o leito vibrofluidizado nas duas configurações e em duas vazões de alimentação. Por meio destas figuras pode-se dizer mais uma vez que o adimensional de vibração não deve ser utilizado como único parâmetro para definir um regime de operação, pois se pode observar que as curvas de umidade relativa têm comportamentos significativamente distintos para um mesmo valor de Γ , obtido através de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração.

Para as soluções de carbonato de cálcio, diferentemente do encontrado para as demais pastas, observa-se que a curva para a maior amplitude encontra-se acima da curva para a menor amplitude. Neste caso, pode-se dizer que o potencial evaporativo do leito durante a secagem de carbonato de cálcio é maior quanto o leito opera a menores amplitudes e maiores frequências de vibração. Este comportamento diferenciado do carbonato de cálcio pode estar ligado às características artificiais da pasta, já que a mesma foi obtida por meio da solubilização em água.

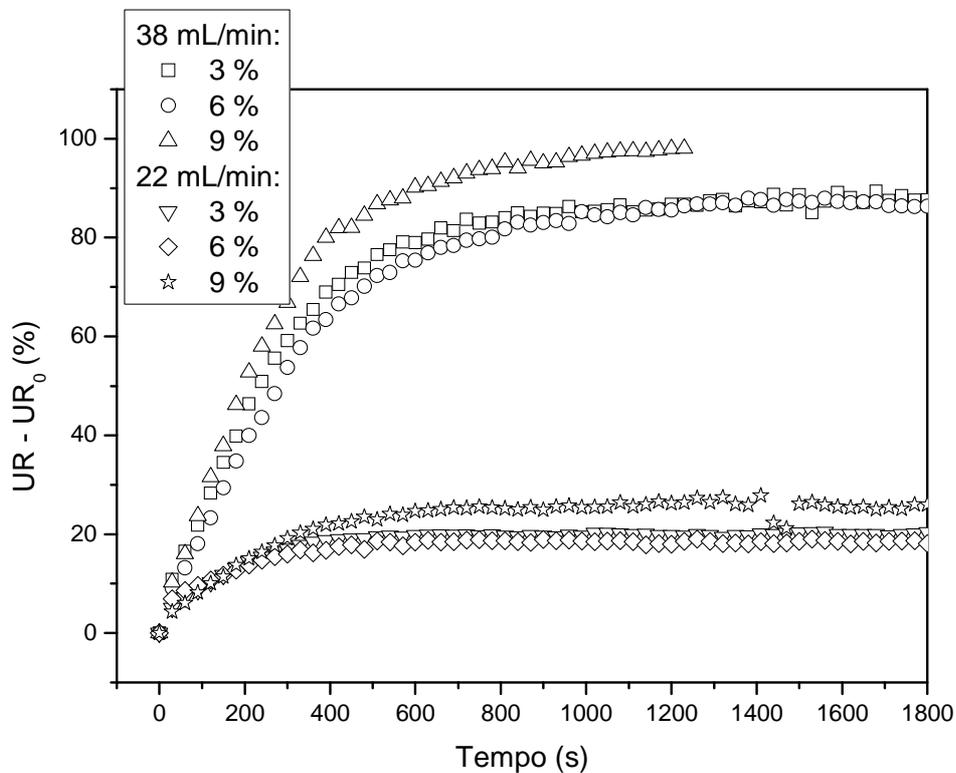


Figura 4.71 – Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo para a secagem de carbonato de cálcio nas três concentrações; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$; $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

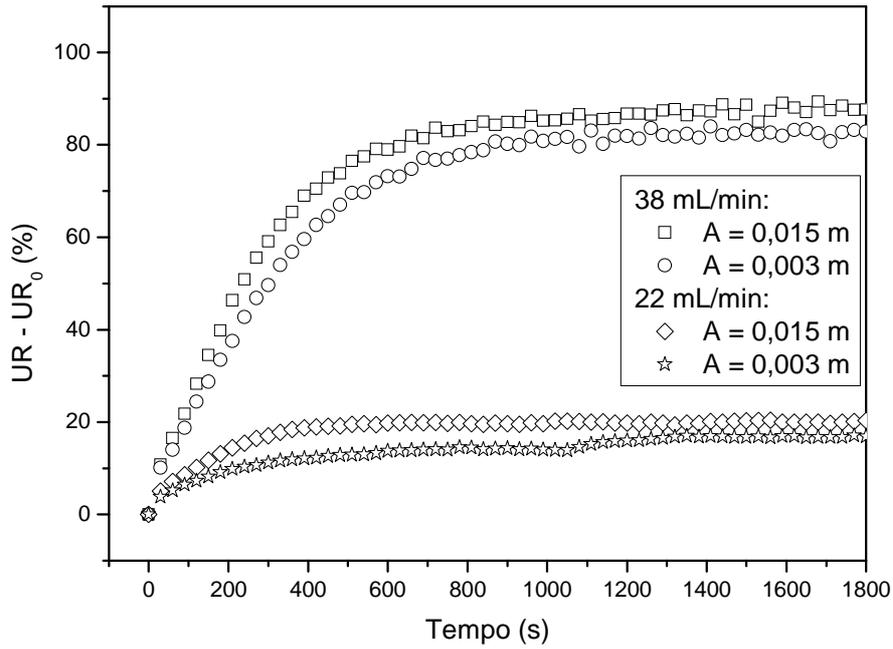


Figura 4.72 – Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo para a secagem de carbonato de cálcio (3%); $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$, $\Gamma = 4,00$.

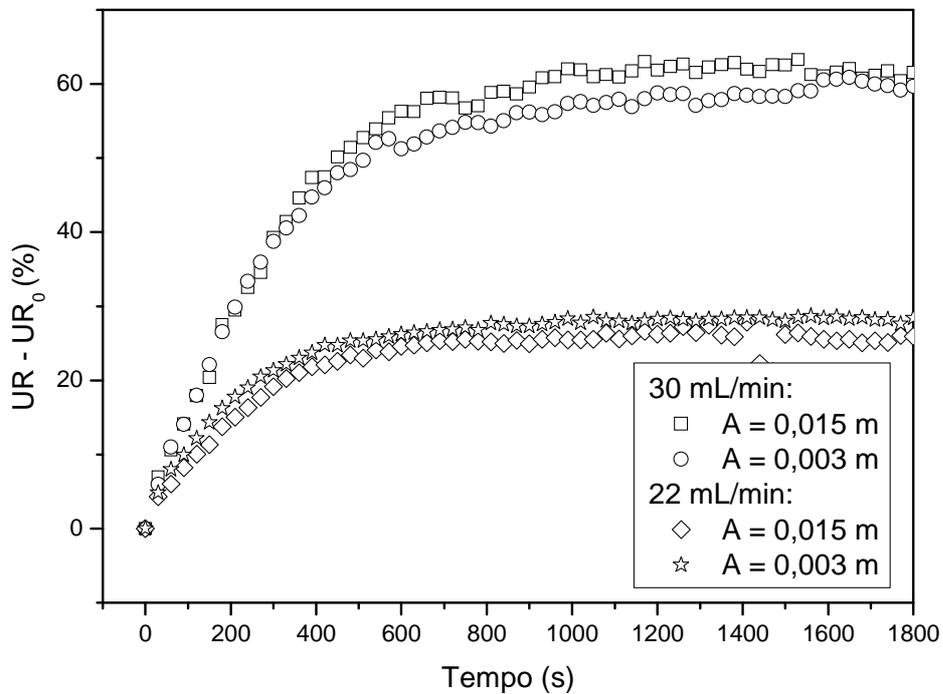


Figura 4.73 – Umidades relativas ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado em função do tempo para a secagem de carbonato de cálcio (9%); $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$, $\Gamma = 4,00$.

4.3.2 Taxa de produção de pó

Neste item serão apresentados os resultados referentes à produção de pó à $T = 100^\circ$ C e $U_s = 1,55$ m/s em leitos fluidizado e vibrofluidizado. Os resultados para as menores temperatura e velocidade do ar de secagem apresentaram comportamento qualitativamente semelhante e estão apresentados no Apêndice B. Na Figura 4.74 e 4.75 tem-se os resultados para a taxa de produção de lodo de esgoto e leite desnatado em leito fluidizado, respectivamente.

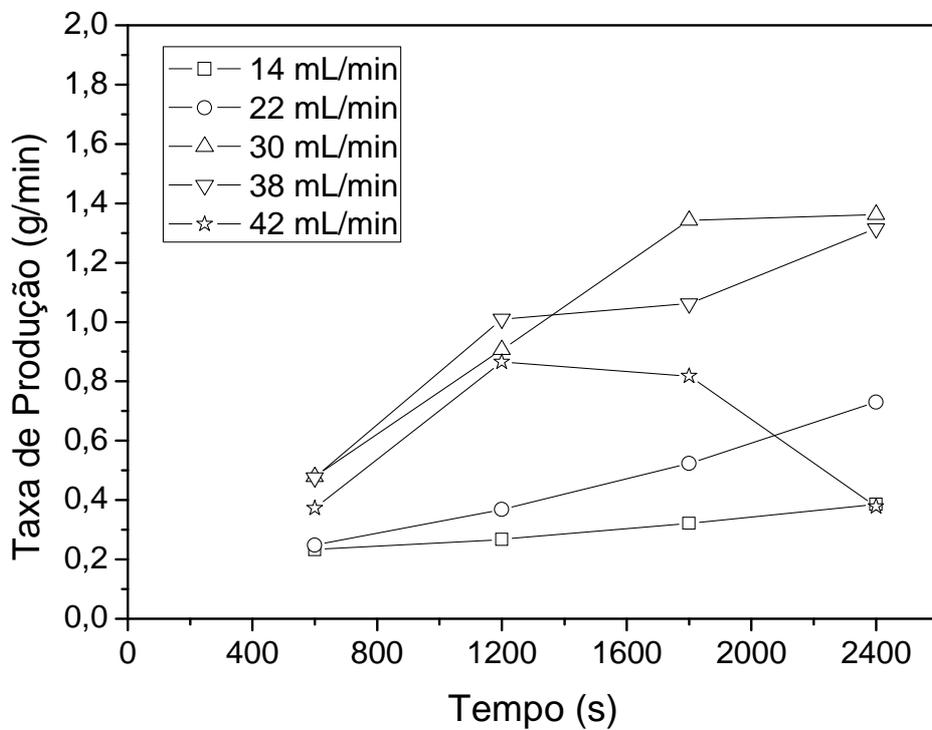


Figura 4.74 – Taxa de produção de pó de lodo de esgoto seco em leito fluidizado em função do tempo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

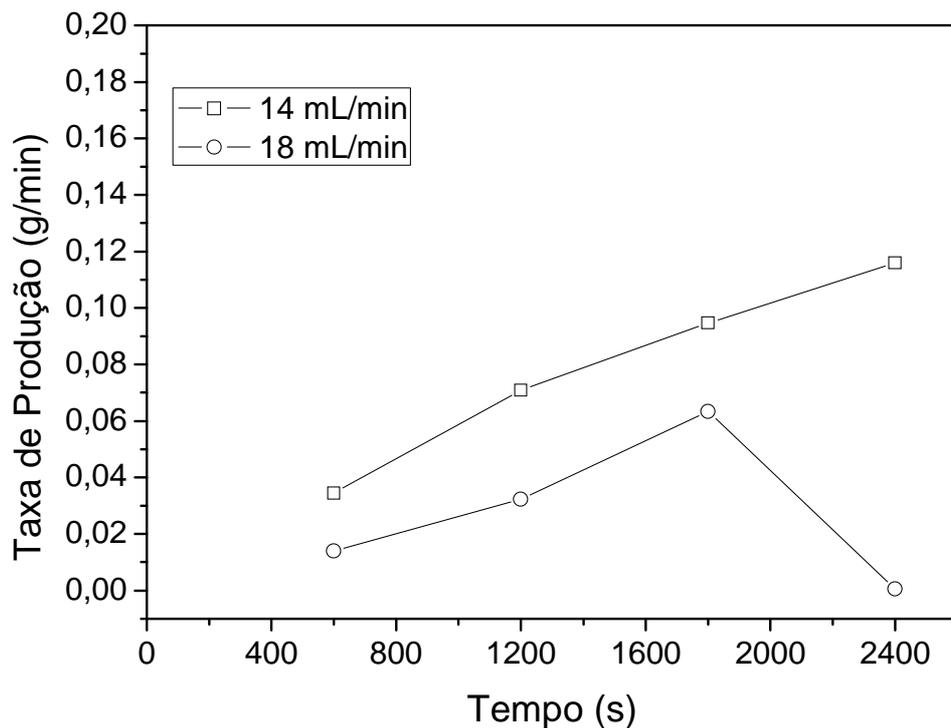


Figura 4.75 – Taxa de produção de pó de leite desnatado em leito fluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

Para o lodo de esgoto e leite desnatado observa-se que a taxa de produção tem uma tendência de aumentar com o aumento da vazão de alimentação. Este comportamento era esperado, já que se houve um aumento na quantidade de pasta alimentada, também, ocorreu um aumento na quantidade de sólidos úmidos alimentados no leito, conseqüentemente, um aumento na quantidade de sólidos secos coletados. Tanto para o lodo de esgoto quanto para o leite desnatado observou-se que na condição de saturação ou colapso do leito, na vazão máxima de alimentação de pasta, a taxa de produção tem uma tendência de diminuir, como pode ser observado na curva para a vazão de 42 ml/min (para o lodo de esgoto) e de 18 ml/min (para o leite desnatado). De acordo com o observado anteriormente nos resultados fluidodinâmicos, nesta condição de alimentação de pasta os dados de queda de pressão no leito tendem a diminuir e os de velocidade do ar tendem a aumentar. Isto está relacionado com o fato de que nesta condição há um acúmulo de pasta no leito, já que a energia térmica não é suficiente para equilibrar a quantidade de pasta alimentada com a quantidade de pasta seca, ocasionando a formação de

aglomerações e canais preferenciais que facilitam a passagem do ar diminuindo o contato entre as partículas e a fase gasosa (aumentado U/U_0 e diminuindo $\Delta P/\Delta P_0$). Desta forma, ocorre uma redução na quantidade de pó seco sendo coletado e um aumento na quantidade de pó úmido no interior do leito, o que, provavelmente, ocasionaria o colapso do mesmo pelo aumento da massa de leito que deveria ser fluidizada.

Além disso, esperava-se que valores constantes de taxa de produção fossem obtidos nas condições de regime permanente. As curvas de umidade relativa em função do tempo mostram que, por exemplo, para a vazão de alimentação de 38 ml/min (maior vazão de alimentação com estabilidade operacional), para o lodo de esgoto, a condição de regime permanente foi observada após 20 minutos de operação. A taxa de produção de pó seco ainda não está estabilizada nesse tempo indicando que as dinâmicas de elutriação do pó e da secagem são governadas por diferentes fatores. Enquanto que a umidade relativa na saída do leito é governada pelas cinéticas de transferência de calor e massa, a taxa de produção é afetada pelas taxas de atrito e pela tensão de cisalhamento local, parâmetros que podem mudar ao longo da secagem. No início do processo existe um acúmulo de líquido sobre a superfície das partículas e o filme líquido não se torna imediatamente friável. Com o decorrer da operação o filme líquido fica aderido às partículas, a friabilidade aumenta e a quantidade de pó elutriado tende a aumentar. O pó pode ficar acumulado dentro do leito e aderido às paredes do leito, ciclone e conexões. A quebra e elutriação desses aglomerados pode ocorrer a qualquer momento durante o processo, aumentando artificialmente a taxa de produção.

Nas Figuras 4.76 a 4.79 estão apresentadas as curvas de taxa de produção para o lodo de esgoto e leite desnatado secos em leito vibrofluidizado nas duas configurações vibracionais. Para o lodo de esgoto, os resultados para o leito vibrofluidizado foram qualitativamente similares dos observados para o leito fluidizado, entretanto a quantidade de pó produzido foi ampliada para condições idênticas de U_s e T . A utilização da vibração contribui para

umentar a movimentação das partículas, fator que favorece o choque entre as mesmas, contribuindo no descolamento do sólido seco aderido às partículas. No caso da taxa de produção de pó um aumento na frequência e diminuição da amplitude de vibração afeta positivamente a produção do pó. De acordo com o observado para a fluidodinâmica do leito vibrofluidizado durante a secagem uma maior amplitude e menor frequência de vibração ocasiona uma movimentação mais intensa no leito de partículas, enquanto uma menor amplitude e maior frequência de vibração aumenta a movimentação do leito, entretanto, o mesmo apresenta comportamento semelhante ao do leito fluidizado. Apesar disso, provavelmente, uma maior frequência de vibração e menor amplitude favorece as colisões efetivas entre as partículas favorecendo o descolamento do pó aderido a elas. Desta forma, este comportamento contribui, mais uma vez, para afirmar que o adimensional de vibração não deve ser utilizado como parâmetro universal, sendo necessária a informação de outra variável conjuntamente.

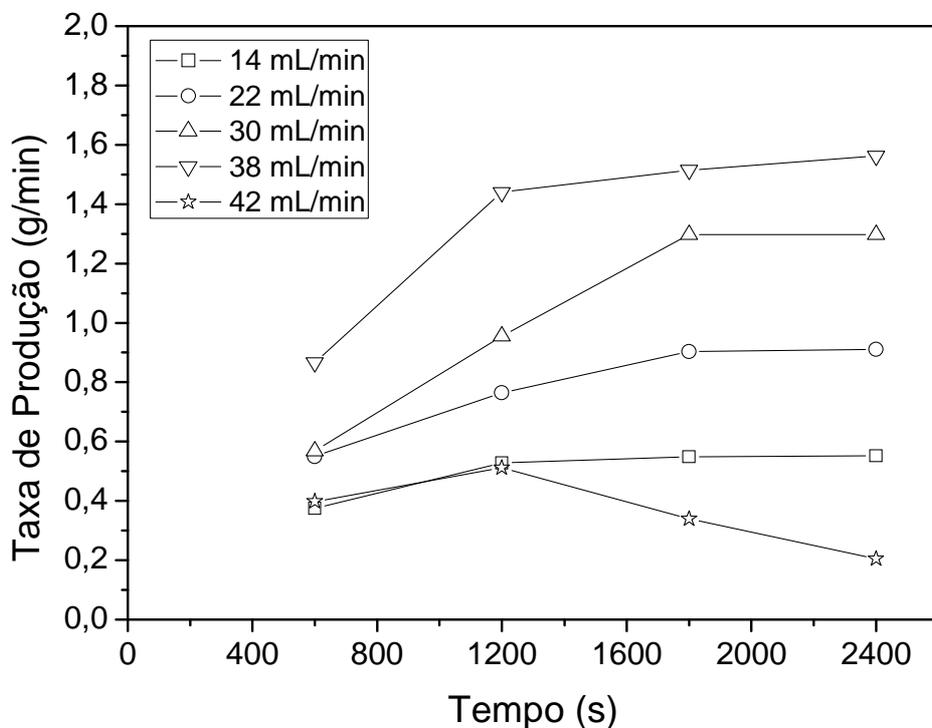


Figura 4.76 – Taxa de produção de pó de lodo de esgoto seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$; $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

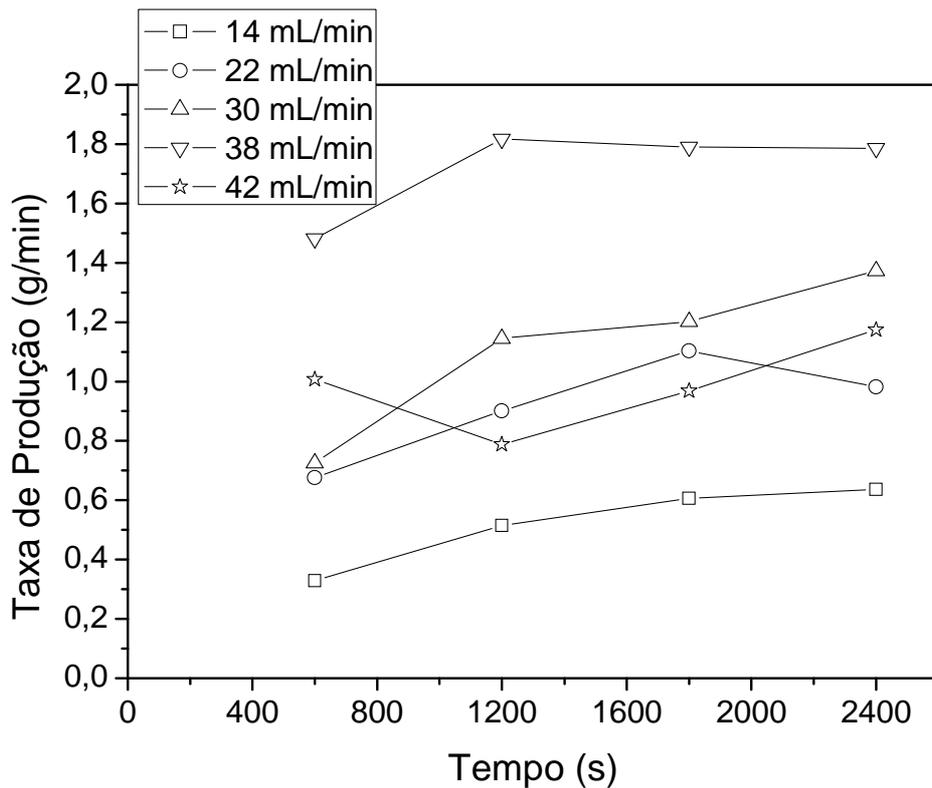


Figura 4.77 – Taxa de produção de pó de lodo de esgoto seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$; $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

Para o leite desnatado (Figuras 4.78 e 4.79) observa-se que a utilização da vibração proporcionou um aumento da vazão máxima de alimentação, fato já comentado anteriormente, o qual, obviamente, possibilitou o aumento da taxa produção. Além disso, vê-se claramente que as curvas de produção de leite são bastante distintas para as duas combinações entre amplitude e frequência de vibração, demonstrando novamente a não universalidade do adimensional de vibração. Tanto para o leito fluidizado quanto para as duas configurações do leito vibrofluidizado pode-se notar que a produção de leite desnatado foi muito inferior à do lodo de esgoto. Esperava-se o contrário, já que o lodo de esgoto apresenta concentração de sólidos de 4,8 % enquanto o leite desnatado quase 9 %. Pode-se tentar explicar este comportamento através de duas hipóteses: no primeiro caso o dimensionamento do ciclone não foi o adequado para a coleta das partículas de leite desnatado produzidas, já que as mesmas poderiam apresentar diâmetro muito inferior ao

diâmetro de corte do ciclone; entretanto, durante os experimentos não foi observada a saída de quantidade significativa de pó pelo *overflow* do ciclone e no segundo caso a baixa produção está relacionada com o acúmulo de material tanto no leito e suas paredes como nas paredes do ciclone e tubulações que fazem parte da exaustão do ar. De acordo, com as experiências em laboratório, acredita-se que a justificativa mais adequada é a segunda, já que foi visível o grande acúmulo de material no interior do equipamento e em suas paredes. Entretanto, apesar destas dificuldades apresentadas a análise da taxa de produção mostrou-se adequada para os fins propostos neste trabalho, que é analisar a influência da vibração e a não universalidade do adimensional de vibração (Γ).

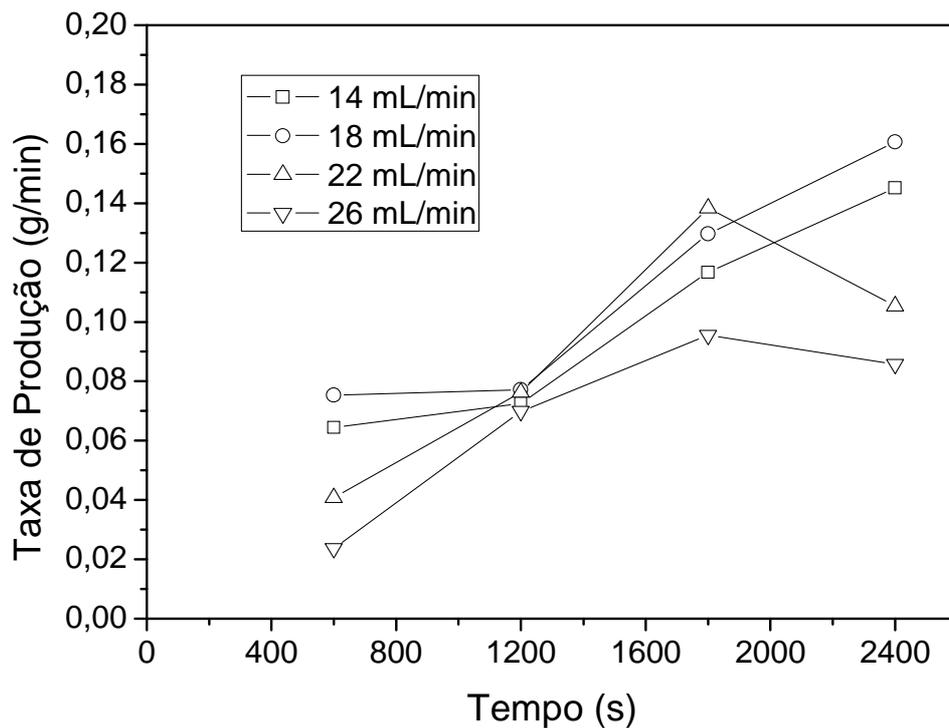


Figura 4.78 – Taxa de produção de pó de leite desnatado seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$; $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

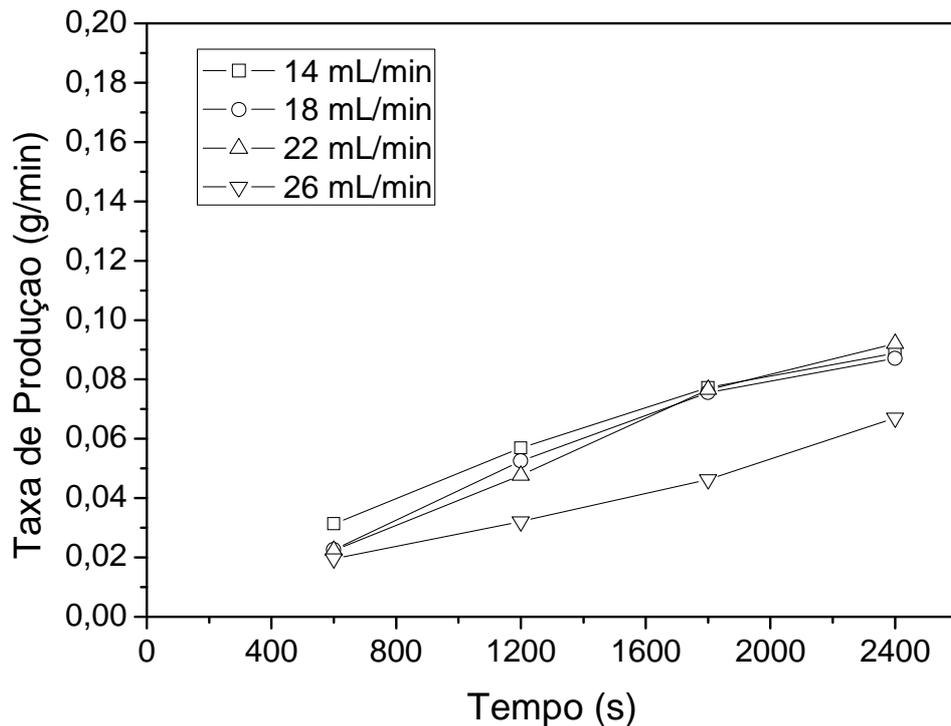


Figura 4.79 – Taxa de produção de pó de leite desnatado seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$; $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

Para o carbonato de cálcio serão apresentados somente os resultados referentes à maior e menor concentração de sólidos com o intuito de se analisar a influência da concentração de sólidos, da vibração e do comportamento do adimensional de vibração. Os demais resultados estão apresentados no Apêndice B e tiveram comportamento qualitativamente semelhante.

Nas Figuras 4.80 a 4.82 estão apresentados os resultados para a secagem de carbonato de cálcio na concentração 3% em leito fluidizado, em leito vibrofluidizado com $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ e com $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$, ambas para $\Gamma = 4,0$, respectivamente, e nas Figuras 4.83 a 4.85 estão apresentados os resultados para a secagem de carbonato de cálcio na concentração de sólidos 9% em leito fluidizado, em leito vibrofluidizado com $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ e com $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$, ambas para $\Gamma = 4,0$, respectivamente. Nas figuras para a concentração 3% observa-se claramente que a utilização da vibração ocasiona um aumento significativo na taxa de produção de pó seco. Estes resultados corroboram com os resultados fluidodinâmicos, com os quais foi possível concluir que a utilização da vibração ocasiona

aumento significativo na movimentação do leito, indicados pela ampliação das oscilações na queda de pressão do leito. Além disso, para a menor amplitude a taxa de produção tem uma tendência de aumento ao longo do tempo, diferentemente do obtido para a maior amplitude, em que nota-se que as curvas estão num patamar constante ao longo do tempo. Assim, pode-se dizer, que, da mesma forma que para o lodo de esgoto, provavelmente, a maior frequência de vibração e menor amplitude ocasiona choques mais efetivos que o observado para a menor frequência de vibração e maior amplitude. Pode-se notar que comportamentos distintos são obtidos para as duas configurações entre amplitude e frequência de vibração, assim, é possível afirmar, também para a taxa de produção de carbonato de cálcio seco, que são obtidos comportamentos distintos para um mesmo adimensional de vibração através de duas combinações diferentes entre amplitude e frequência de vibração para baixas concentrações.

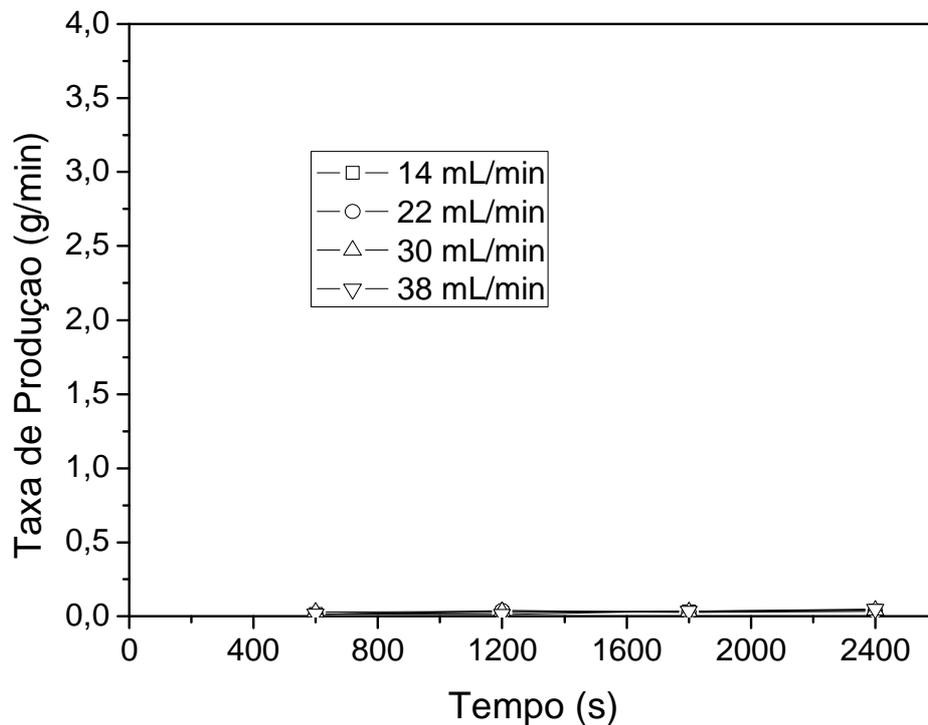


Figura 4.80 – Taxa de produção de pó de CaCO_3 (3%) em leito fluidizado em função do tempo; $T = 100^\circ\text{C}$ e $U_s = 1,55\text{m/s}$.

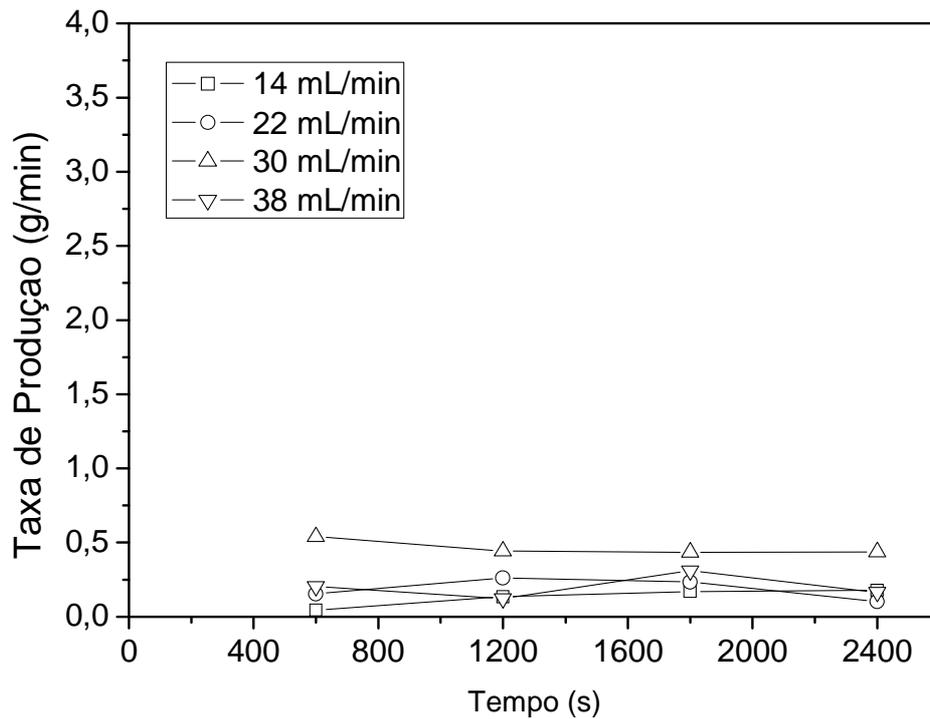


Figura 4.81 – Taxa de produção de pó CaCO_3 (3%) em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$; $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

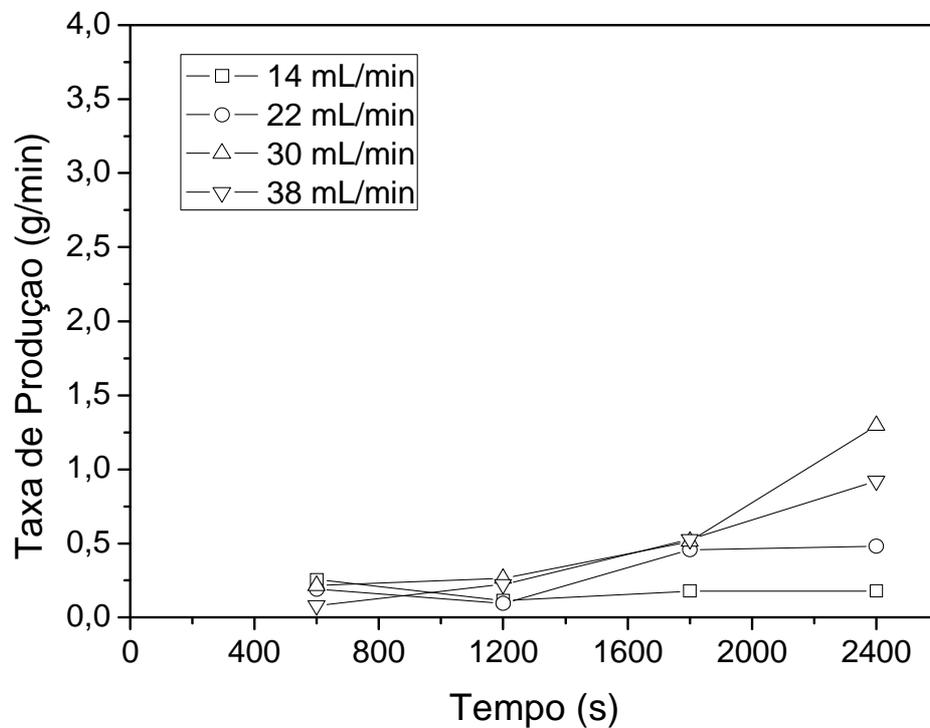


Figura 4.82 – Taxa de produção de pó de CaCO_3 (3%) em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$; $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

Para a concentração de sólidos 9 %, comparando-se o leito fluidizado com o vibrofluidizado (Figuras 4.83 e 4.84), observa-se que a utilização da vibração não tem uma influência tão significativa quanto a encontrada para 3 %. Este comportamento não era esperado já que, de acordo com os resultados fluidodinâmicos e da cinética da umidade relativa para as soluções de carbonato de cálcio existem claras diferenças entre os resultados para o leito fluidizado e vibrofluidizado e entre as duas configurações deste leito. De acordo com os resultados anteriores para a queda de pressão pode-se dizer que o aumento da concentração ocasionou uma maior aglomeração das partículas e formação de canais preferenciais, diminuindo as oscilações no $\Delta P/\Delta P_0$. Já, para a umidade relativa tem-se que o aumento da concentração diminuiu a capacidade evaporativa do leito, já que as curvas de umidade relativa encontram-se acima das de menor concentração. Desta forma, poder-se-ia afirmar que o aumento da concentração causaria dificuldades fluidodinâmicas e, conseqüentemente, a aplicação da vibração melhoraria os resultados obtidos para o leito fluidizado, não observado neste caso.

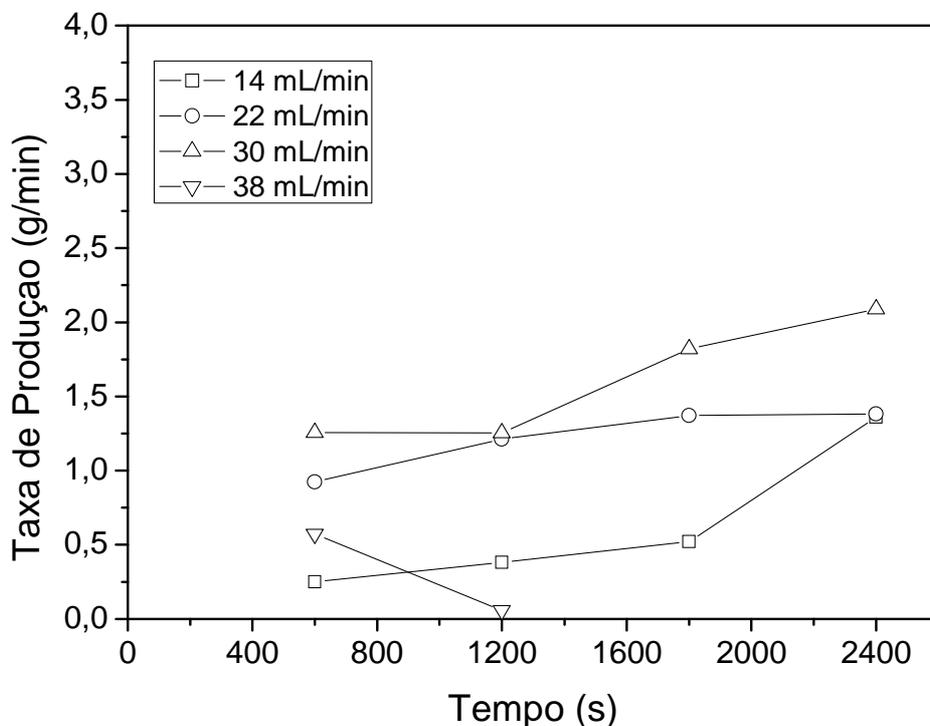


Figura 4.83 – Taxa de produção de pó de CaCO₃ (9%) em leito fluidizado em função do tempo; T = 100°C e U_s = 1,55m/s.

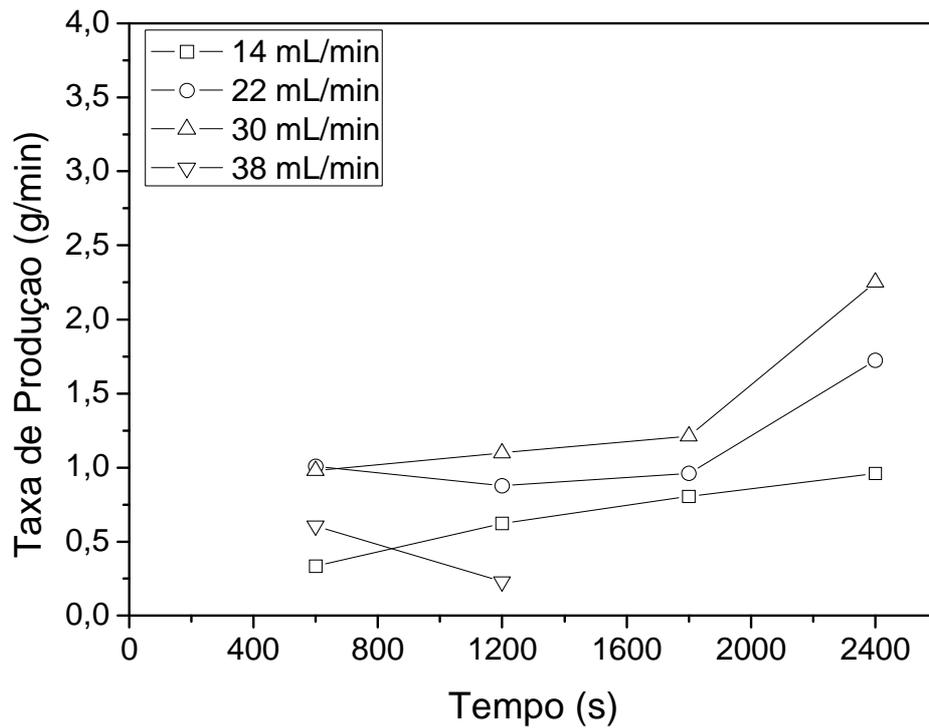


Figura 4.84 – Taxa de produção de pó CaCO₃ (9%) em leito vibrofluidizado em função do tempo; T = 100°C; U_s = 1,55m/s; A = 0,015 m; f = 8,14 Hz (Γ = 4,00).

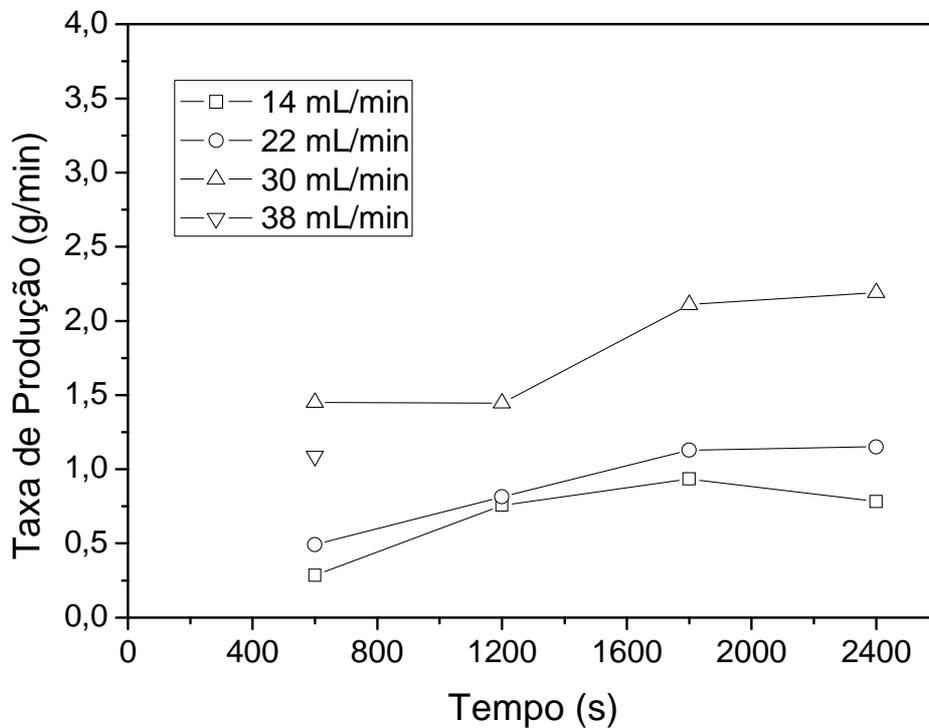


Figura 4.85 – Taxa de produção de pó de CaCO₃ (9%) em leito vibrofluidizado em função do tempo; T = 100°C; U_s = 1,55m/s; A = 0,003 m; f = 18,20 Hz (Γ = 4,00).

4.3.3 Conteúdo de umidade do pó

O conteúdo de umidade do pó foi analisado para todos os experimentos, entretanto somente serão apresentados os resultados para aqueles realizados a $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, os demais resultados estão apresentados no Apêndice B. Nas Figuras 4.86 a 4.88 tem-se os resultados da umidade do pó para a secagem de lodo de esgoto e nas Figuras 4.89 a 4.91 os resultados para o leite desnatado.

Para o lodo de esgoto observa-se que de maneira geral o conteúdo de umidade do pó seco coletado não sofreu variações durante o período de operação do secador. Além disso, não se nota diferença significativa entre os resultados para o leito fluidizado e para os leitos vibrofluidizados nas duas configurações. Pode-se dizer que o descolamento do filme sólido aderido às partículas só ocorre quando o material atinge determinado conteúdo de umidade, no qual somente nestas condições os choques entre as partículas serão efetivos para a liberação do filme, independentemente da utilização da vibração ou não. Entretanto, esperava-se que houvesse uma diferença entre a umidade no início do processo e no final, já que é necessário um determinado tempo para que se atinja a umidade necessária para que o filme sólido seja descolado das partículas. Com isso, pode-se dizer que: a secagem da pasta é praticamente instantânea, já que não há variações significativas entre a umidade no início e no fim do processo e não há diferenças significativas entre os comportamentos do conteúdo de umidade do lodo de esgoto para as duas configurações do leito vibrofluidizado, como pode ser observado nas Figuras 4.87 e 4.88.

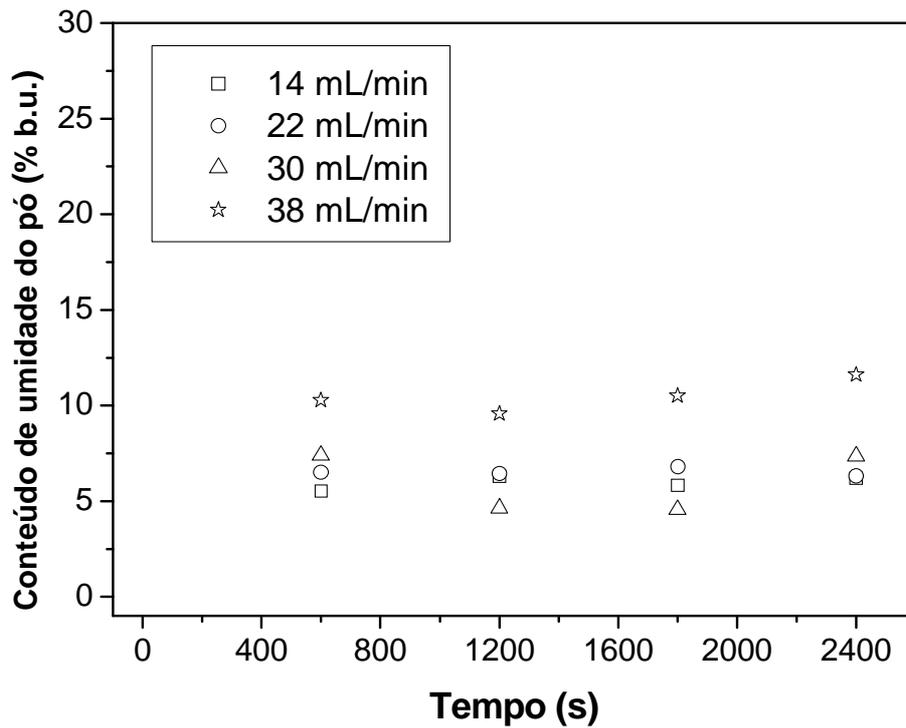


Figura 4.86 – Conteúdo de umidade do pó de lodo de esgoto seco em leito fluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

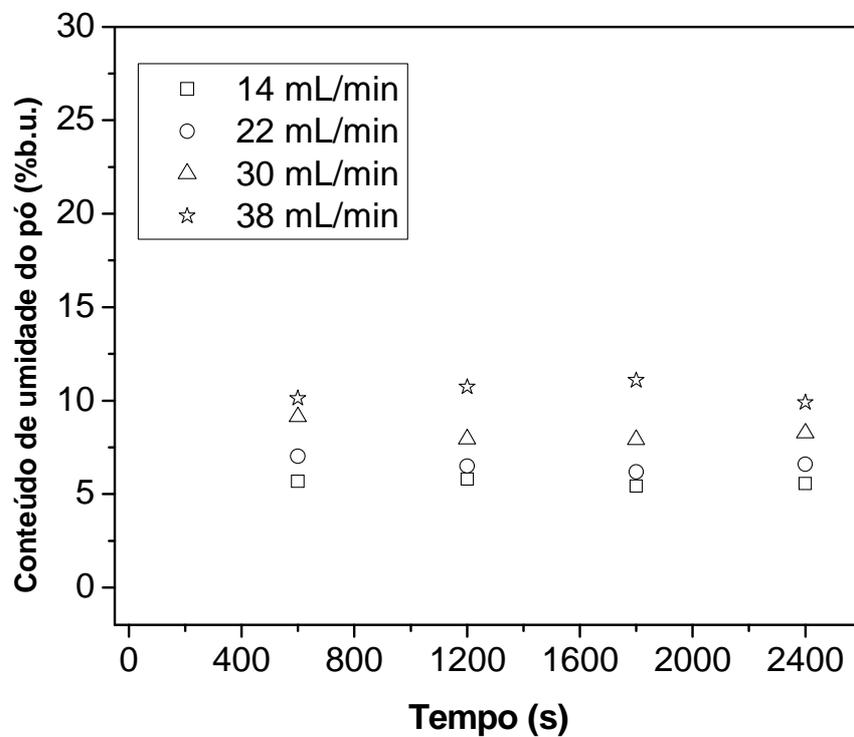


Figura 4.87 – Conteúdo de umidade do pó de lodo de esgoto seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$; $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

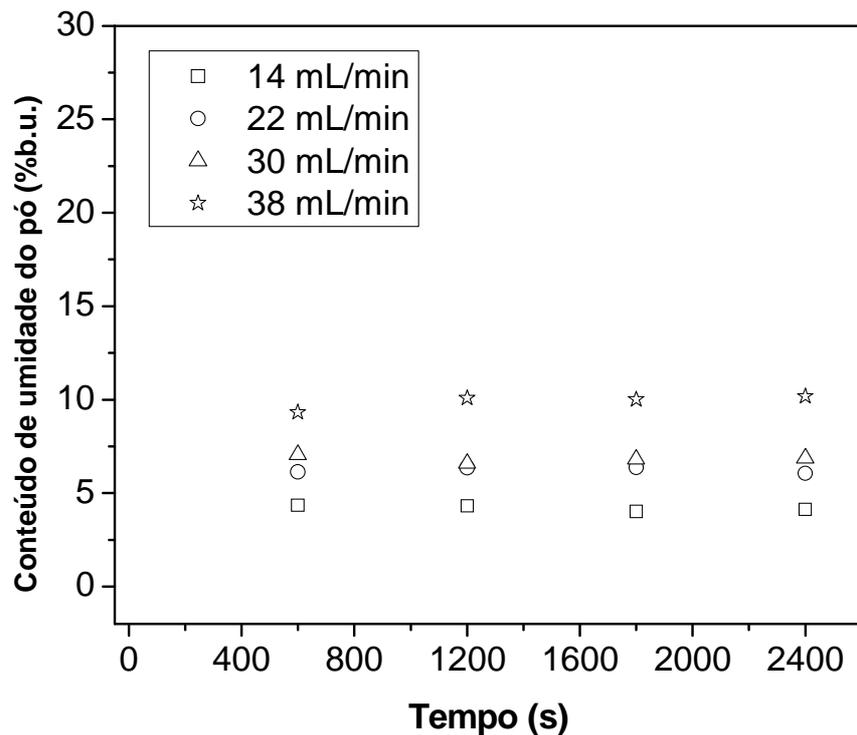


Figura 4.88 – Conteúdo de umidade do pó de lodo de esgoto seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$; $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

Para o caso do leite desnatado nota-se que o conteúdo de umidade para o leito fluidizado apresenta comportamento semelhante ao observado para o lodo de esgoto, não havendo mudanças ao longo da operação. Entretanto, para as duas configurações do leito vibrofluidizado o conteúdo de umidade tem a tendência de diminuir ao longo do tempo. Este comportamento pode estar relacionado ao fato de que, por ter características muito distintas das do lodo de esgoto, o filme sólido de leite desnatado é descolado previamente pelo efeito da vibração. Pode-se afirmar ainda, a partir das Figuras 4.90 e 4.91 que não há diferença significativa entre as duas configurações para o leito vibrofluidizado para um mesmo adimensional de vibração. Assim, dependendo da análise realizada o adimensional de vibração pode ter um caráter universal, com isso o mesmo deve sempre ser utilizado com cautela.

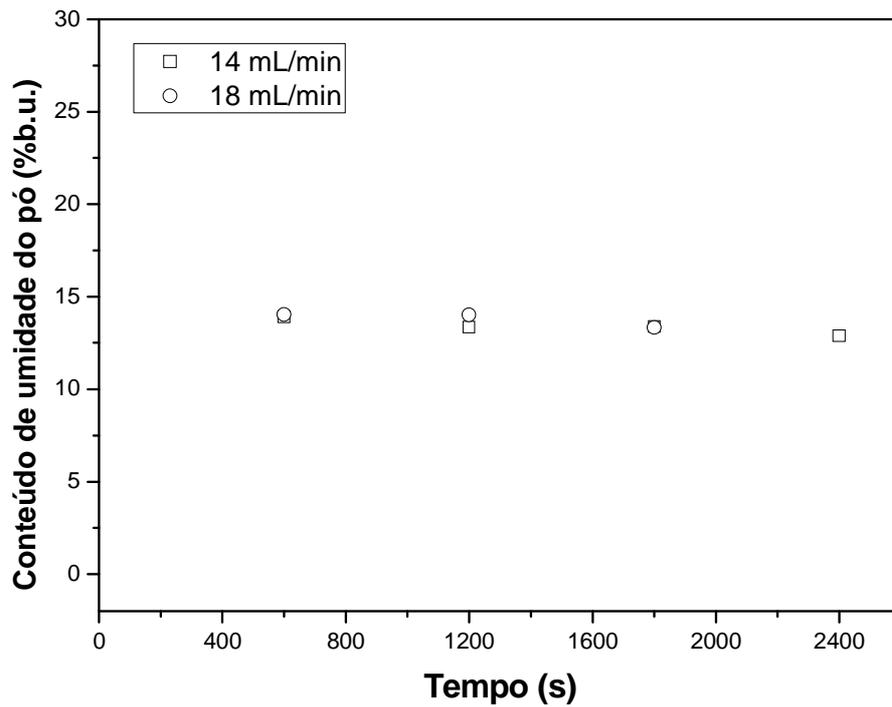


Figura 4.89 – Conteúdo de umidade do pó de leite desnatado seco em leito fluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

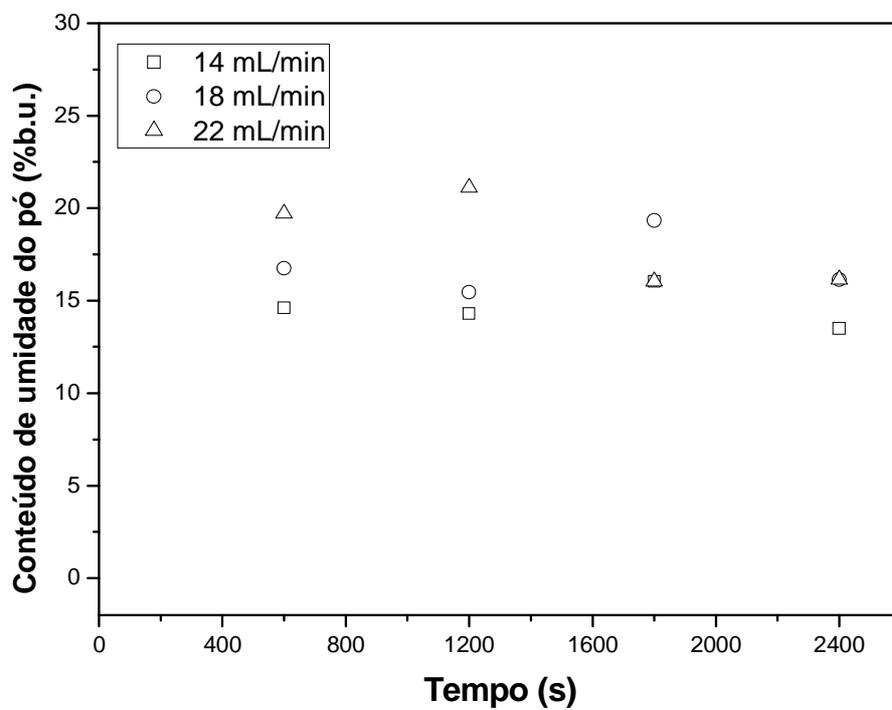


Figura 4.90 – Conteúdo de umidade do pó de leite desnatado seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$; $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

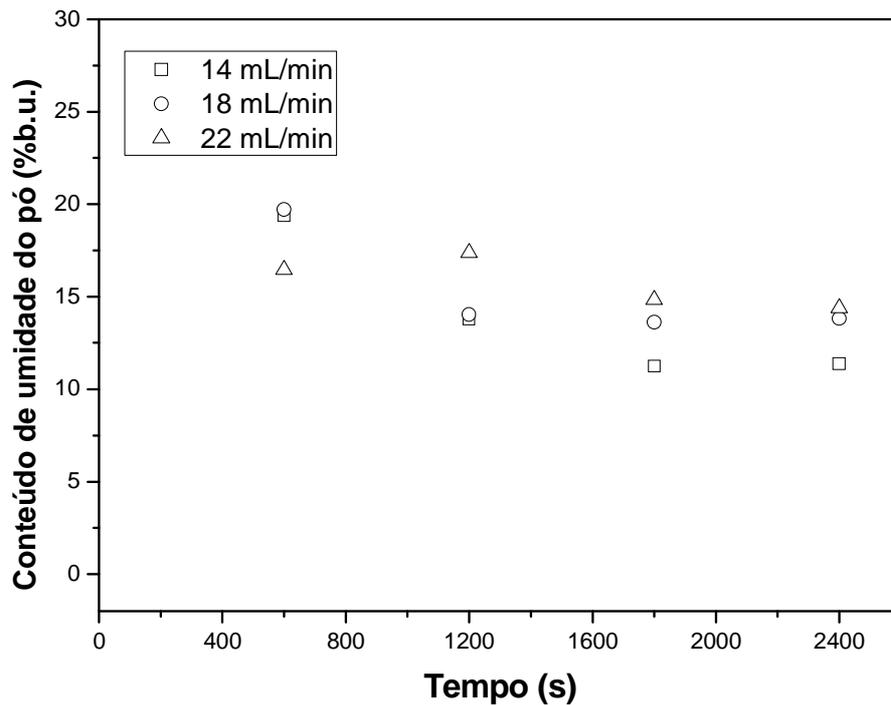


Figura 4.91 – Conteúdo de umidade do pó de leite desnatado seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$; $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

Para o carbonato de cálcio serão apresentados somente os resultados referentes à maior concentração de sólidos (9%). Os resultados para as demais concentrações foram qualitativamente e quantitativamente semelhantes, já para a maioria das condições operacionais o conteúdo de umidade do pó obtido foi de no máximo 3 % operando na estabilidade. Portanto, na Figura 4.92 está o resultado da umidade do pó para a maior concentração de CaCO_3 em leito fluidizado a $T = 100^{\circ}\text{C}$ e $U_s = 1,55\text{ m/s}$ e nas Figuras 4.93 e 4.94 estão os resultados para o leito vibrofluidizado a $T = 100^{\circ}\text{C}$ e $U_s = 1,55\text{ m/s}$ em duas condições vibracionais, $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ e $A = 0,003\text{m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ (ambas para $\Gamma = 4,0$), respectivamente.

De maneira geral o conteúdo de umidade do pó seco de carbonato de cálcio não sofreu variações durante o período de operação do secador e nem mesmo influência do tipo de secador utilizado, sendo que a explicação para este comportamento pode ser a mesma dada para o lodo de esgoto. Nas Figuras para o carbonato de cálcio pode-se notar que para todas as condições de alimentação de pasta o conteúdo de umidade foi de no máximo 3 % b.u., sendo que a diferença

entre as curvas foi muito pequena, ficando em no máximo 1%, com exceção da maior vazão de alimentação. Na maior vazão de alimentação observa-se na Figura 4.93 um acréscimo acentuado no conteúdo de umidade cujo comportamento está relacionado ao fato de que a energia térmica aplicada ao sistema não ter sido suficiente para ocasionar o equilíbrio entre a quantidade de água alimentada e a quantidade evaporada causando o acúmulo de líquido no leito. Assim, a dinâmica do leito é instável e a secagem é prejudicada sendo o pó, carregado pela corrente de ar com alta umidade. Para as outras figuras não é possível observar uma curva indicando um aumento no conteúdo de umidade, isto se deve à realização da análise de umidade de somente uma amostra, referente ao primeiro ponto de coleta, já que para os subseqüentes ocorreu o colapso do leito, a saturação do ar de saída ou a quantidade de amostra foram insuficientes. Desta forma, não existe uma curva, mas sim somente um ponto indicando o conteúdo de umidade desta amostra.

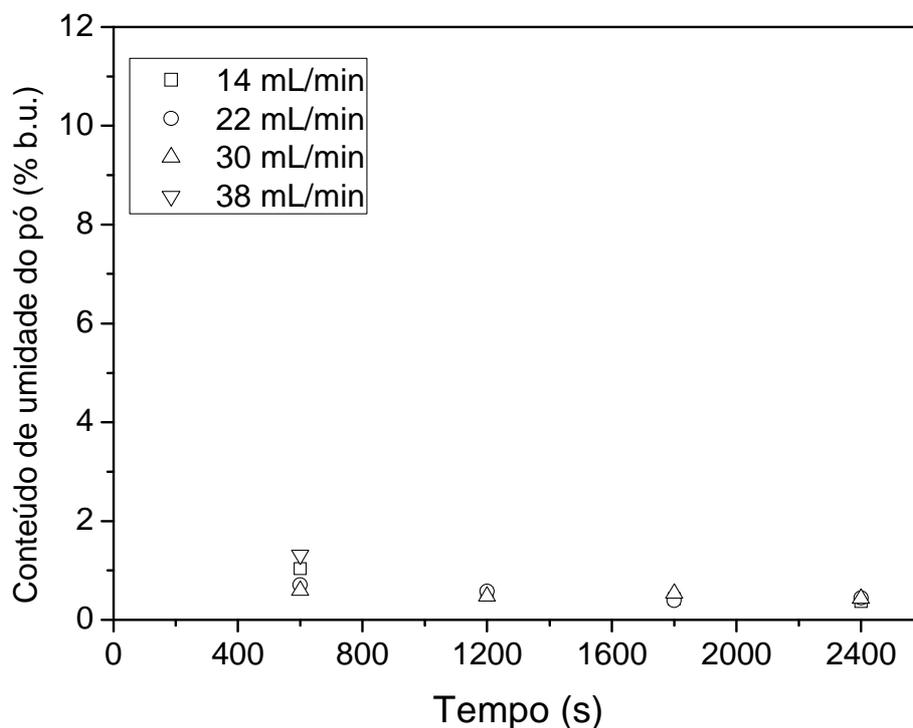


Figura 4.92 – Conteúdo de umidade do pó de CaCO_3 (9%) seco em leito fluidizado em função do tempo; $T = 100^\circ\text{C}$ e $U_s = 1,55\text{m/s}$.

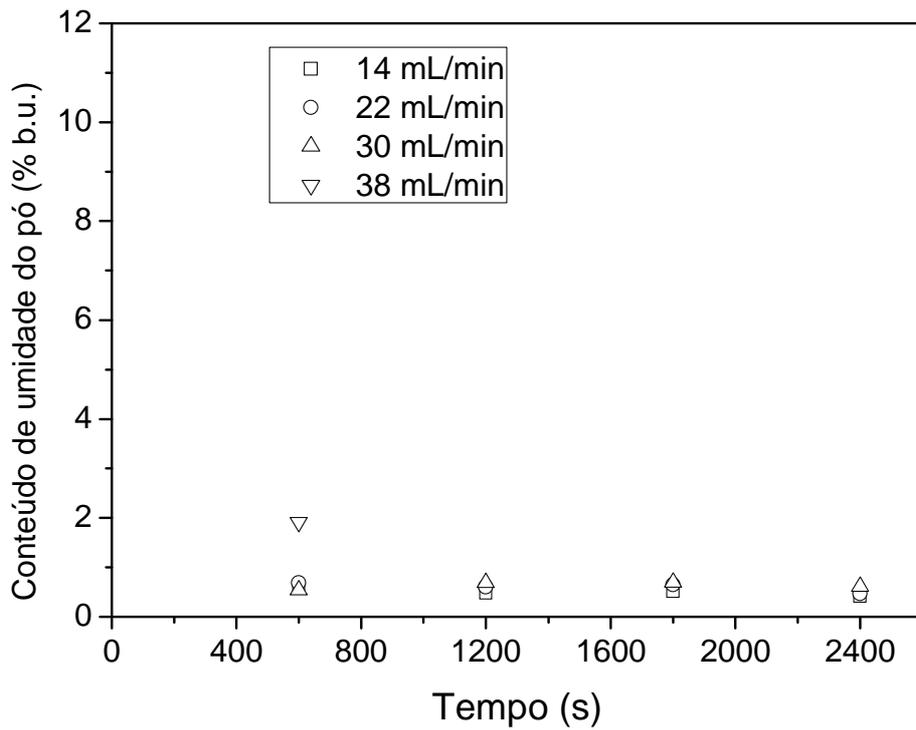


Figura 4.93 – Conteúdo de umidade do pó de CaCO_3 (9%) seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$; $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

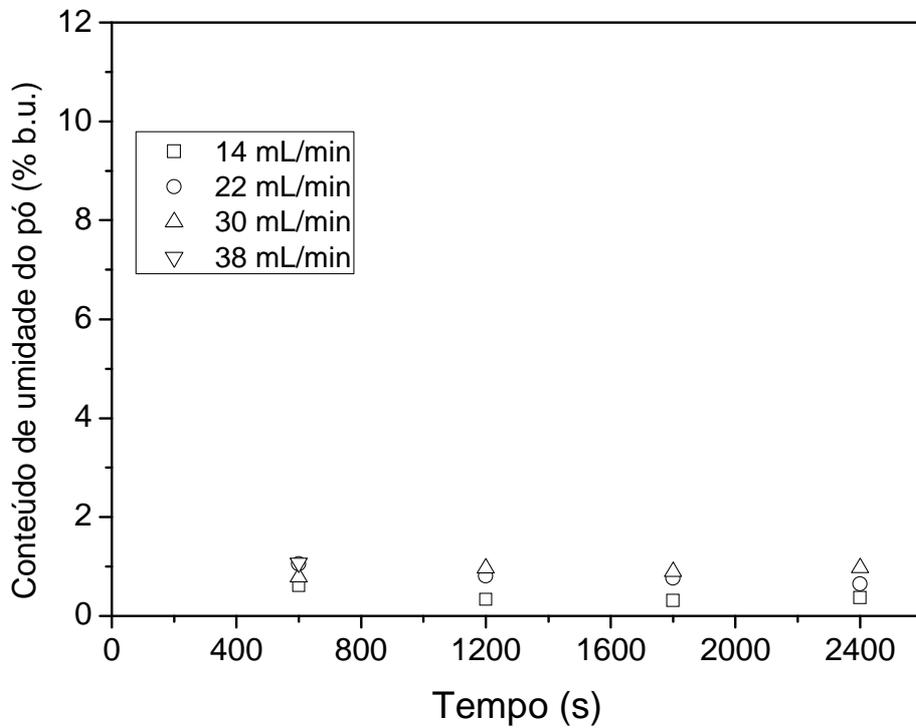


Figura 4.94 – Conteúdo de umidade do pó de CaCO_3 (9%) seco em leito vibrofluidizado em função do tempo; $T = 100^\circ\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$; $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

4.3.4 Eficiência energética de secagem

Os dados de eficiência energética de secagem e eficiência máxima de secagem foram obtidos utilizando-se as equações 15 e 16, respectivamente. Na Figura 4.95 está apresentado o comportamento da eficiência energética de secagem durante o período transiente de evaporação de água. Da mesma forma que para umidade relativa, observa-se que ocorre um aumento da eficiência energética ao longo do tempo até que se atinja o regime permanente, no qual não há mais variação da mesma ao longo do tempo. De acordo com Mujumdar (2006) a eficiência energética do processo de secagem depende das temperaturas de entrada e saída do agente que proporciona a secagem e da temperatura ambiente. Altas eficiências energéticas são atingidas pelo uso de altas temperaturas de entrada e pelo arranjo das condições de saída mais próximas da saturação. Portanto um mesmo secador operando a baixas temperaturas terá menor eficiência energética que operando a altas temperaturas. Neste caso, a temperatura de entrada é a mesma para todas as condições estudadas, entretanto, a evaporação da água, que acontece ao longo de toda a operação, causou uma diminuição nas temperaturas de saída até atingir o regime permanente. A diminuição da temperatura de saída ao longo de tempo ocasionou aumento das diferenças entre as temperaturas de entrada e saída, como pode ser observado na Figura 4.96, o que proporcionou o aumento da eficiência energética de secagem.

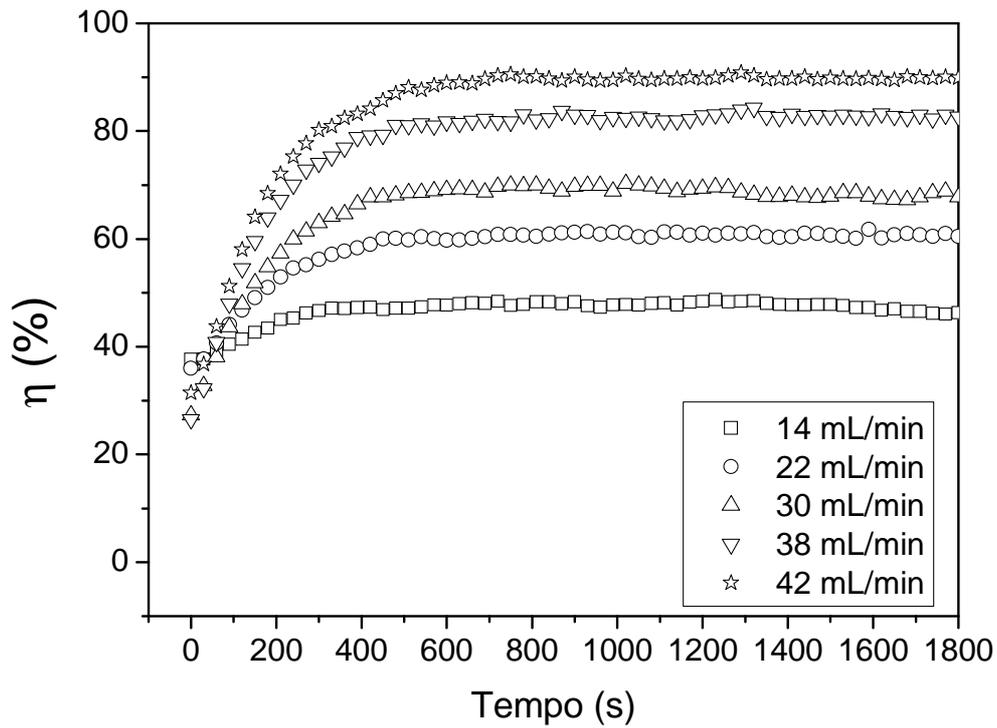


Figura 4.95 – Eficiência energética de secagem para o leito fluidizado em função do tempo durante a evaporação da água; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

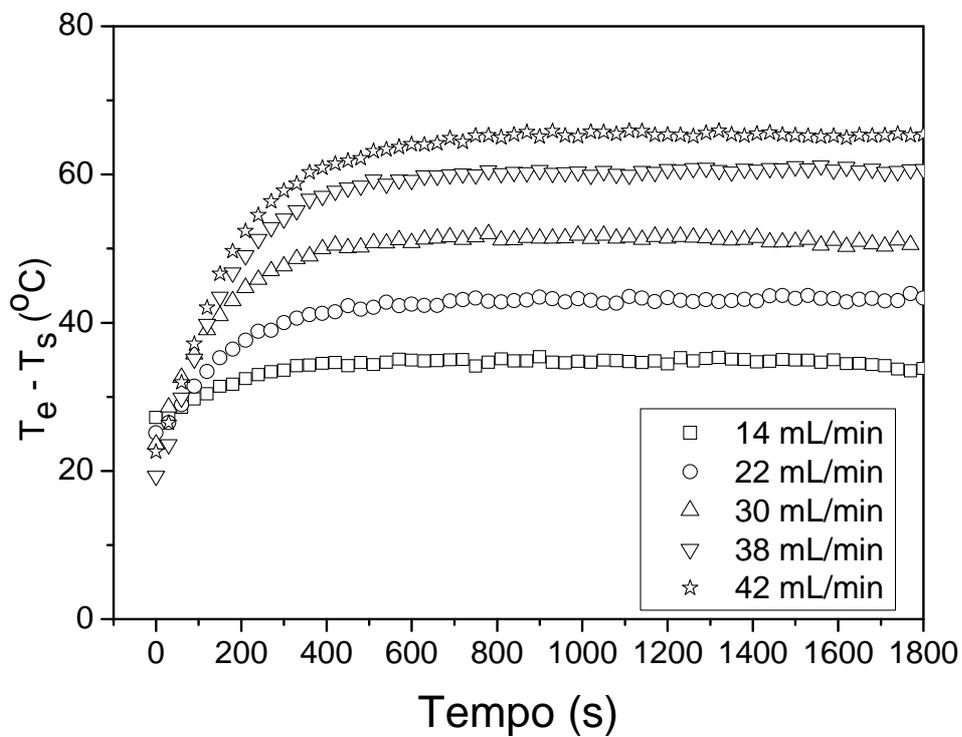


Figura 4.96 – Diferença entre temperaturas de entrada e saída para o leito fluidizado em função do tempo durante a evaporação da água; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

Na Figura 4.97 estão apresentados os dados médios de eficiência energética de secagem (após 1200 s de operação, considerou-se que o leito entrou em regime permanente após este tempo de operação) em função da vazão de alimentação de água. Observa-se que altas vazões de alimentação de pasta proporcionam maiores valores de eficiência energética de secagem, mesmo comportamento observado por Pan *et al.* (2000). Verifica-se na Figura 4.96 que o aumento na vazão de alimentação causou uma maior diferença entre as temperaturas de entrada e saída o que, conseqüentemente, ocasionou um aumento na eficiência energética. Na Figura 4.97 pode-se notar que o aumento da vazão de alimentação proporciona uma aproximação dos valores de eficiência energética de secagem com os valores de eficiência energética máxima até o momento em que há a intersecção entre as duas curvas. A eficiência energética máxima é obtida em função da temperatura de bulbo úmido, portanto, a intersecção entre as curvas mostra que as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido se igualam, o que causando a saturação do leito.

Na Figura 4.98 pode observar-se que o aumento da temperatura de entrada ocasiona uma diminuição nos valores de eficiência energética de secagem, este mesmo comportamento pode ser observado no trabalho de Pan *et al.* (2000). De acordo com estes pesquisadores, o fluxo do material e sua umidade são constantes, dessa forma o excesso de calor sensível na corrente de ar com maior temperatura não é totalmente utilizada, portanto a temperatura de saída é muito maior que a da corrente com menor temperatura. Conseqüentemente, a diferença entre a temperatura de entrada e de saída diminui e também a eficiência energética do secador com o aumento da temperatura de entrada.

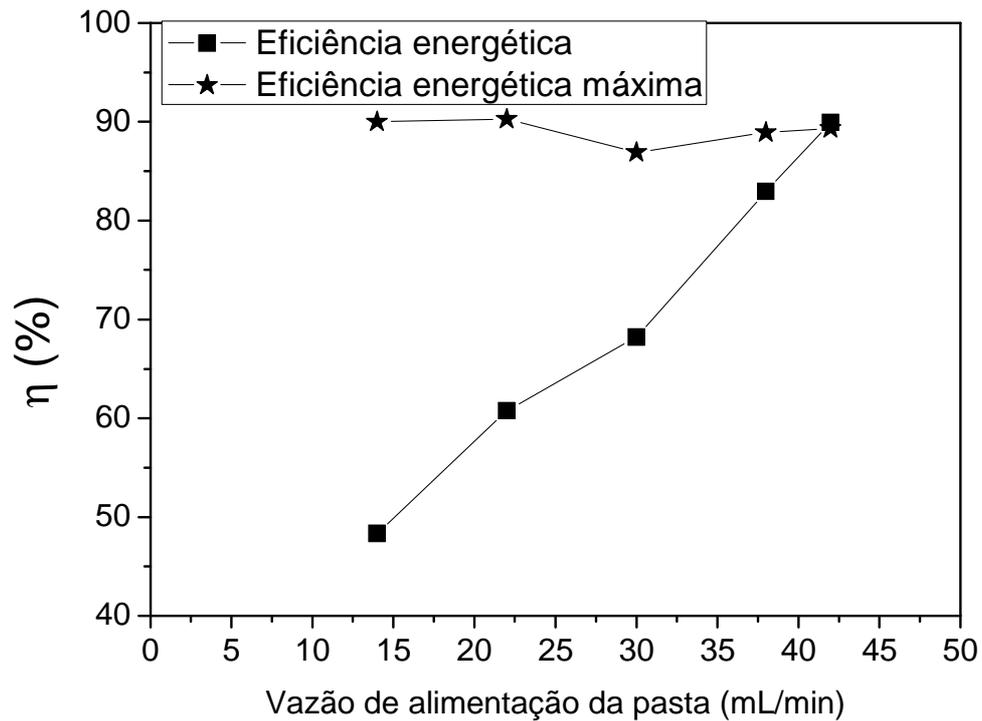


Figura 4.97 – Eficiência energética de secagem e eficiência energética máxima médios (após 1200 s de operação) para o leito fluidizado durante a evaporação da água; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

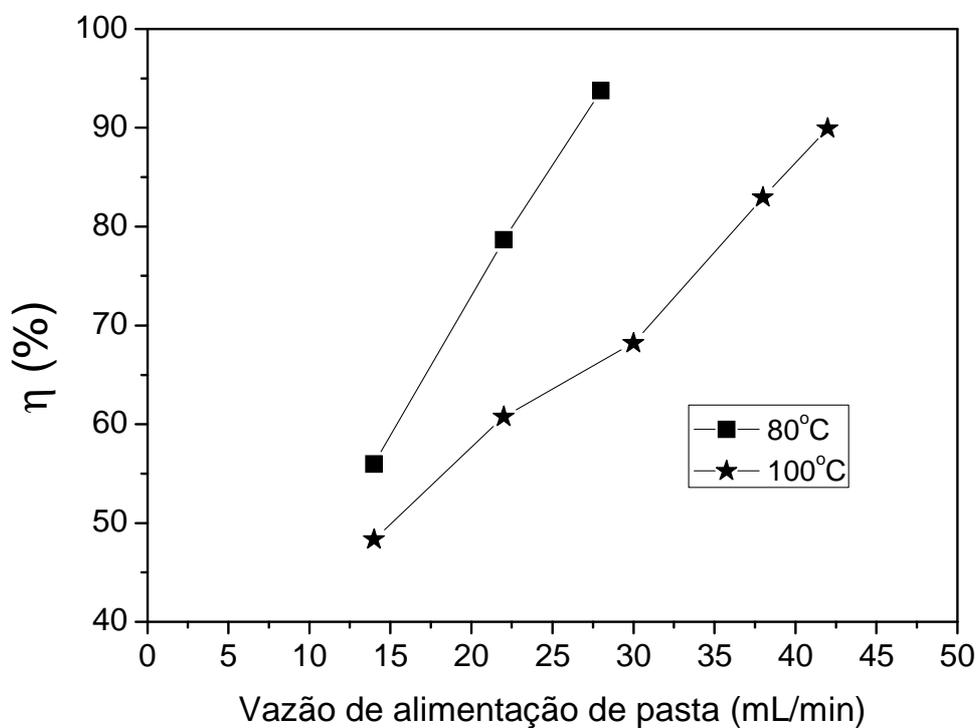


Figura 4.98 – Eficiência energética de secagem média (após 1200 s de operação) para o leito fluidizado durante a evaporação da água a $U_s = 1,55\text{m/s}$.

Observa-se na Figura 4.99 que nas maiores velocidades do ar são obtidos menores valores de eficiência de secagem, para um mesmo valor de vazão de alimentação de pasta. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que uma maior velocidade do ar proporciona maior movimentação do leito aumentando a quantidade de energia que pode ser usada para a evaporação da água, entretanto, este excesso de energia não é totalmente utilizado, assim, a temperatura da corrente de saída para a maior velocidade do ar é maior que para a menor velocidade. Assim, a eficiência energética de secagem diminui com o aumento da velocidade do ar de secagem.

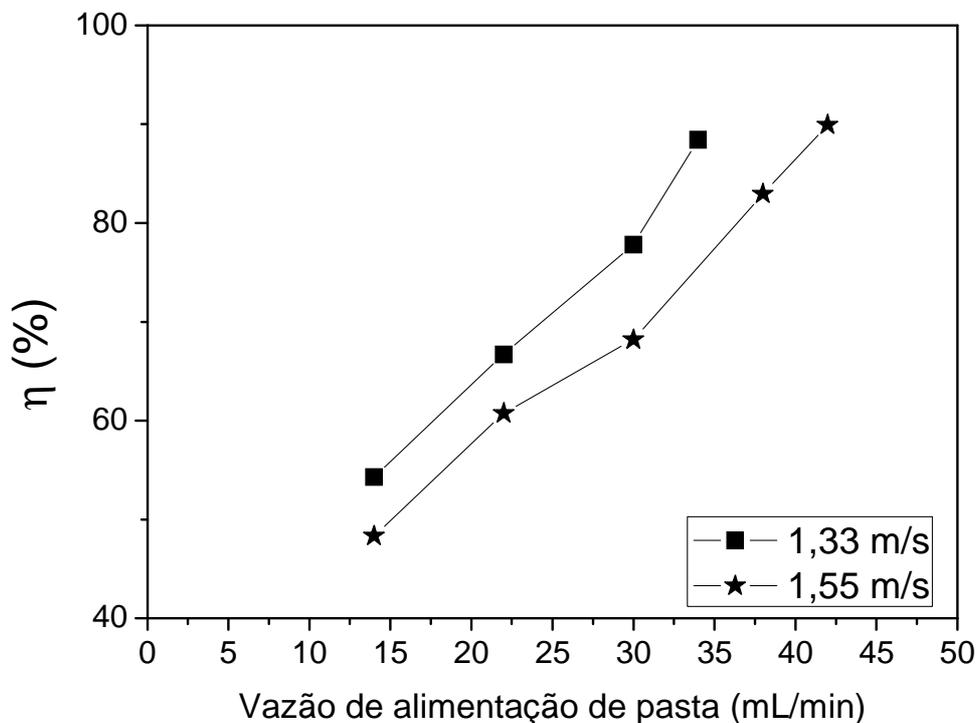


Figura 4.99 – Eficiência energética de secagem média (após 1200 s de operação) para o leito fluidizado durante a evaporação da água a $T = 100^\circ \text{C}$.

Na Figura 4.100 está apresentada a eficiência energética de secagem para os leitos fluidizado e vibrofluidizado durante a evaporação de água à $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$. Pode-se notar que não há um afastamento muito grande entre as curvas, provavelmente, devido ao fato de que a pasta utilizada (pasta “ideal”, água) não forma pontes líquidas fortes, assim a aplicação da vibração não proporciona diferenças significativas com relação ao leito fluidizado. Entretanto,

mesmo assim, pode-se observar que a curva para o leito vibrofluidizado operando com a maior amplitude encontra-se acima da curva do leito fluidizado. De acordo com Pan *et al.* (2000), a aplicação de uma vibração mecânica promove uma melhora na fluidização e na secagem, principalmente com relação à estrutura do leito (não há formação de canais preferenciais e zonas estagnadas) e na redução na espessura do filme líquido formado sobre as partículas. Nesta figura é possível notar, ainda, que as curvas para os leitos vibrofluidizados a $A = 0,015\text{ m}$ e $A = 0,003\text{ m}$ são distintas para um mesmo adimensional de vibração. Com isto pode-se dizer, também neste caso, que um mesmo adimensional de vibração pode produzir comportamentos distintos, caso ele seja obtido através de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração.

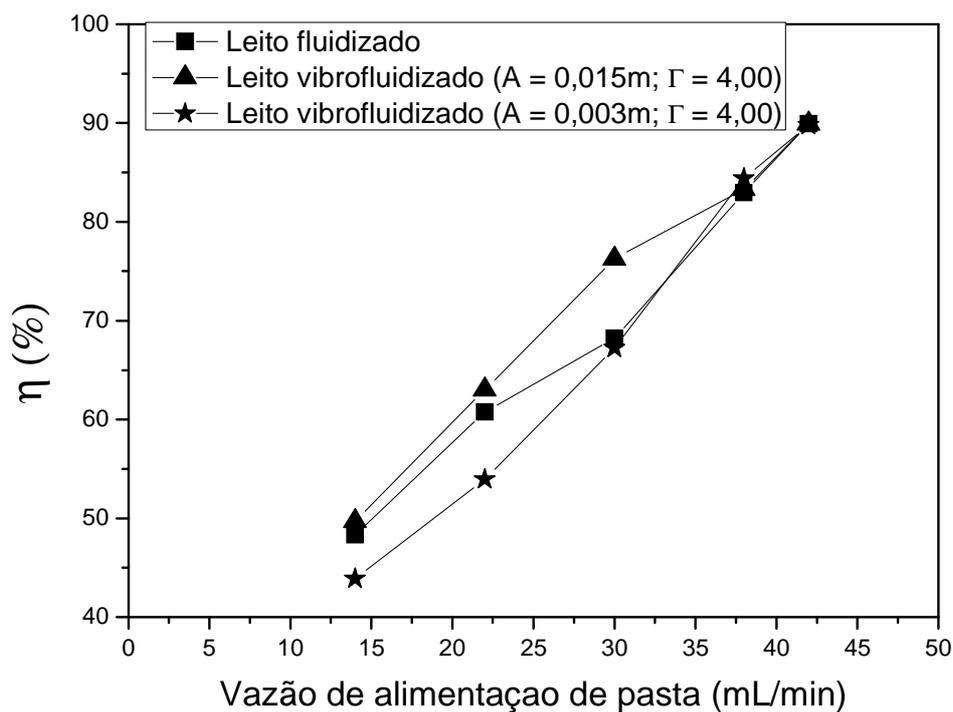


Figura 4.100 –Eficiência energética de secagem média (após 1200 s de operação) entre os leitos fluidizado e vibrofluidizado durante a evaporação da água a $T = 100^\circ\text{ C}$ e $U_s = 1,55\text{ m/s}$.

A eficiência energética pode ser analisada com relação a alimentação de diferentes pastas. Neste caso, na Figura 4.101 são comparadas as eficiências energéticas para a evaporação da água, secagem de lodo de esgoto e leite desnatado em leito fluidizado e pode-se notar na figura que

as curvas de eficiência estão muito próximas, mostrando que as diferentes composições destas pastas não causam influência na eficiência energética em leito fluidizado.

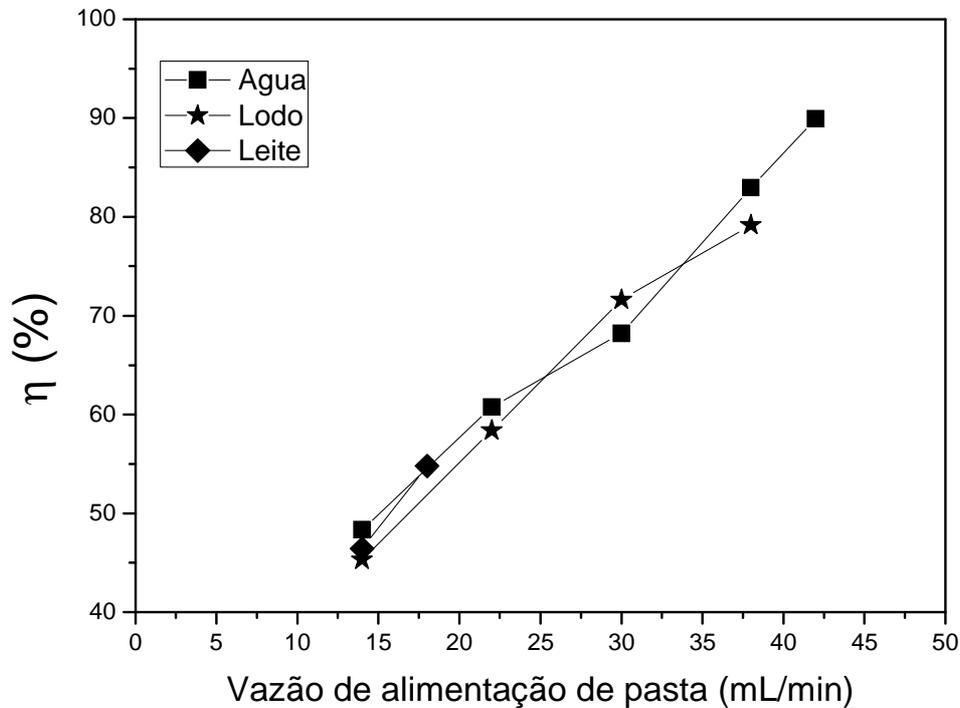


Figura 4.101 – Eficiência energética de secagem média (após 1200 s de operação) para o leito fluidizado entre a água, lodo de esgoto e leite desnatado a $T = 100^{\circ}\text{C}$ e $U_s = 1,55\text{ m/s}$.

A partir da Figura 4.102 pode-se comparar as eficiências energéticas para a evaporação da água e secagem de CaCO_3 nas três concentrações e observa-se que as curvas para o Carbonato de cálcio encontram-se acima da curva para a água e não apresentam diferença significativa entre as diferentes concentrações.

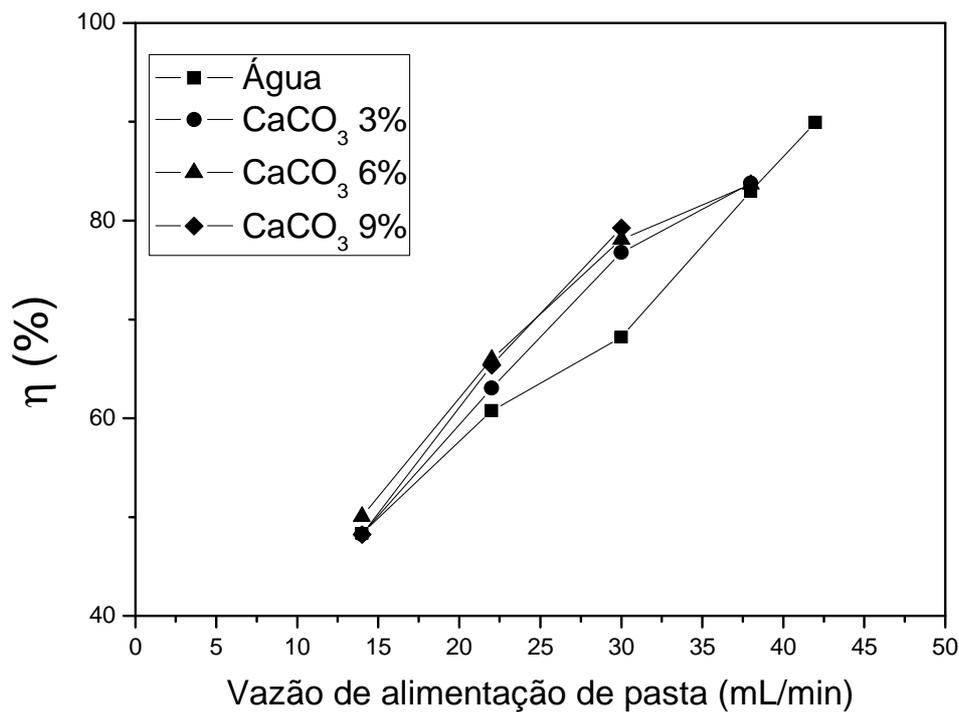


Figura 4.102 – Comparação das eficiências energéticas de secagem médias (após 1200 s de operação) para o leito fluidizado entre a evaporação da água e secagem de CaCO_3 nas três concentrações a $T = 100^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

Na Figura 4.103 é possível a comparação entre as eficiências energéticas do leito fluidizado e vibrofluidizado nas duas configurações para a secagem de lodo de esgoto. Da mesma forma que para a água não se observou diferença significativa entre as curvas para as configurações apresentadas. Esperava-se que para o leite desnatado o comportamento fosse diferente devido à grande capacidade coesiva da pasta, entretanto, na Figura 4.104, não se verifica diferença significativa entre as curvas. Assim, é possível afirmar que para estas pastas a eficiência energética não sofreu a influência da composição do material que é alimentado.

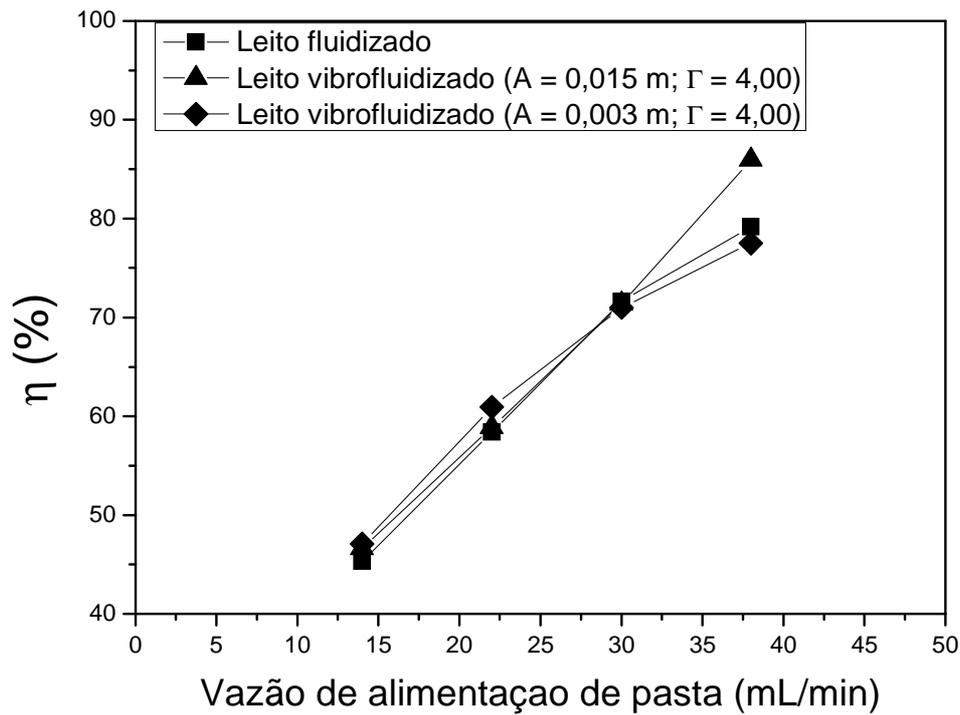


Figura 4.103 – Eficiência energética de secagem média (após 1200 s de operação) entre os leitos fluidizado e vibrofluidizados para a secagem do lodo de esgoto a $T = 100^{\circ}\text{C}$ e $U_s = 1,55\text{ m/s}$.

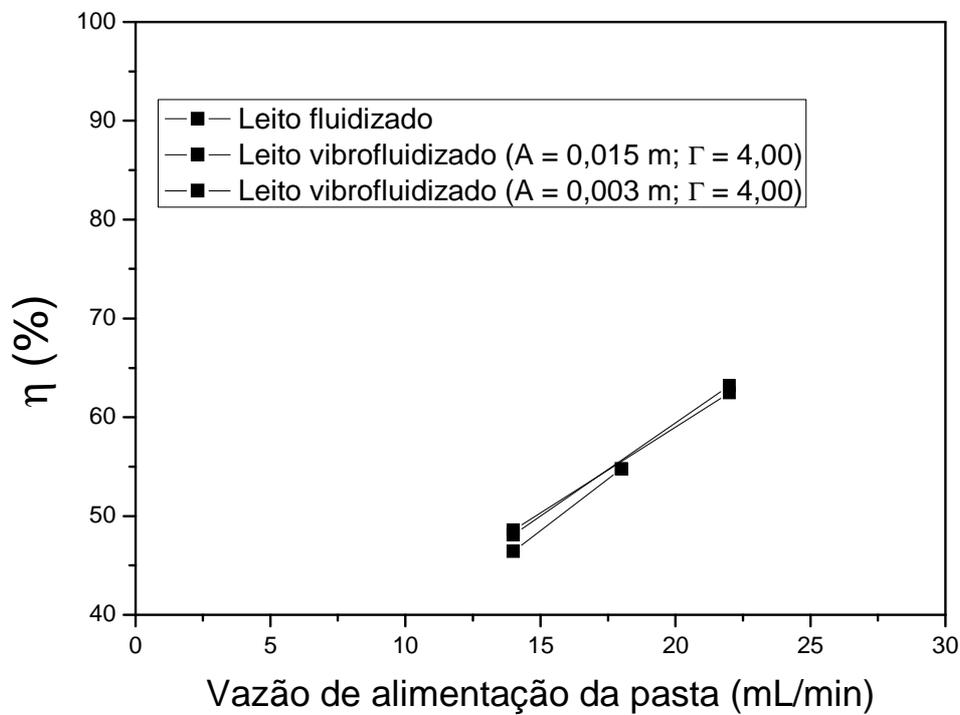


Figura 4.104 – Eficiência energética de secagem média (após 1200 s de operação) entre os leitos fluidizado e vibrofluidizados para a secagem de leite desnatado a $T = 100^{\circ}\text{C}$ e $U_s = 1,55\text{ m/s}$.

4.3.5 Conclusões

Com os resultados obtidos durante a evaporação/secagem de líquidos e pastas foi possível obter informações importantes à cerca do comportamento da umidade relativa, umidade absoluta, taxa de produção de pó, conteúdo de umidade do pó e eficiência de secagem. Portanto, com relação à estas análises pode-se afirmar que:

- quando há um aumento na velocidade do ar de secagem ou aumento na temperatura ocorre uma ampliação na vazão máxima de alimentação de pasta e redução no tempo necessário para que o sistema atinja o regime permanente. Estes comportamentos observados são clássicos, uma vez que a energia térmica aplicada ao leito é proporcional a vazão do ar multiplicada pela diferença entre a temperatura de entrada e a temperatura ambiente;
- com relação à umidade absoluta, existe sempre uma quantidade total máxima de água que pode ser retirada do ar de secagem para uma determinada temperatura não importando a grandeza da vazão de ar de secagem alimentada e que a máxima quantidade de água que pode ser retirada para cada vazão de alimentação já é obtida no início do processo e não muda durante o transcorrer do tempo;
- ocorre uma economia de tempo para que o leito atinja o regime permanente quando a vibração é utilizada, isto ocorre devido à melhora na dinâmica do leito, pois a formação de canais preferenciais e aglomerações são dificultadas;
- para a evaporação de água em leito vibrofluidizado o regime permanente é atingido mais rapidamente na maior amplitude e menor frequência de vibração. Este comportamento está relacionado à intensa movimentação do leito durante a operação, comprovada pelas observações visuais durante os experimentos e pelos dados oscilatórios de queda de pressão;
- para o lodo de esgoto as diferenças entre as três configurações de leitos

de secagem não foram significativas quanto ao tempo necessário para se atingir o regime permanente. O comportamento da umidade relativa na maior amplitude de vibração foi diferente do observado para o leito fluidizado e vibrofluidizado na menor amplitude. Assim, provavelmente, a capacidade evaporativa do leito na maior amplitude e menor frequência é maior, pois a curva de umidade relativa encontra-se em patamar inferior às demais, embora a vazão máxima de alimentação de pasta, a velocidade do ar e a temperatura de secagem sejam as mesmas que para as outras duas configurações do leito;

- para o leite desnatado a utilização da vibração possibilitou um aumento na vazão máxima de alimentação de pasta. O leite desnatado é uma pasta com características coesivas e de difícil fluidização, assim, a utilização da vibração pode solucionar os problemas encontrados quando se deseja trabalhar com pastas que apresentem estas características;

- para o carbonato de cálcio houve uma redução no tempo para que o leito entrasse em colapso com o aumento da concentração de sólidos e as curvas de umidade relativa para a maior concentração (9 %) apresentam-se em um patamar superior às curvas para as concentrações de sólidos de 3 e 6 %, que encontram-se sobrepostas.. O aumento na concentração de sólidos ocasiona dificuldades fluidodinâmicas maiores, pois, provavelmente, a presença de uma pasta com maior quantidade de sólidos no leito ocasiona a formação de filmes mais espessos sobre as partículas, favorecendo a formação de aglomerações e canais preferenciais;

- um mesmo adimensional de vibração, obtido através de duas combinações entre amplitude e frequência, é capaz de causar diferentes comportamentos na cinética da secagem independentemente da pasta utilizada, causando diferenças significativas nos resultados de umidade relativa para o leito vibrofluidizado;

- a taxa de produção apresenta uma tendência de aumentar com o aumento da vazão de alimentação, já que se há um aumento na quantidade de pasta alimentada, também, há um aumento na quantidade de sólidos secos coletados;

-
- na vazão máxima de alimentação de pasta a taxa de produção apresenta uma tendência de diminuição, comportamento relacionado às instabilidades operacionais ocasionadas pelo acúmulo de pasta no leito;
 - a cinética de elutriação do pó seco é diferente da de secagem, uma vez que o regime permanente para ambos não são atingidos no mesmo tempo de operação. Isto justifica o fato de que na maioria dos casos não há o aparecimento de um patamar nos resultados de taxa de produção;
 - a taxa de produção foi ampliada com a aplicação da vibração, para condições idênticas de U e T. O aumento na frequência de vibração e diminuição da amplitude de vibração afeta positivamente a produção do pó, fator, provavelmente relacionado com o aumento dos choques efetivos para esta condição vibracional;
 - tanto para o leite desnatado quanto para o lodo de esgoto, o comportamento da taxa de produção foi distinto para as duas combinações entre amplitude e frequência de vibração para um mesmo adimensional de vibração;
 - para o carbonato de cálcio esperava-se que o aumento da concentração causaria dificuldades fluidodinâmicas e, conseqüentemente, a aplicação da vibração melhoraria os resultados obtidos para o leito fluidizado, entretanto, isto não foi observado. A utilização da vibração ocasionou um aumento significativo na taxa de produção de pó seco para a concentração de sólidos de 3%, mas para 9% a utilização da vibração não tem uma influência significativa;
 - com relação ao conteúdo de umidade do pó seco, para o lodo de esgoto e leite desnatado, não houve diferença significativa entre os resultados para o leito fluidizado e para os leitos vibrofluidizados nas duas configurações;
 - para o lodo de esgoto não houve variações no conteúdo de umidade do pó durante o período de operação do secador. Pode-se dizer que o descolamento do filme sólido

aderido às partículas só ocorre quando o material atinge determinado conteúdo de umidade, no qual somente nestas condições os choques entre as partículas serão efetivos para a liberação do filme, independentemente da utilização da vibração ou não. A secagem da pasta é praticamente instantânea, já que não há uma diferença significativa entre a umidade no início do processo e no final, pois seria necessário um determinado tempo para que se atinja a umidade necessária para que o filme sólido seja descolado das partículas;

- para o carbonato de cálcio o conteúdo de umidade do pó obtido foi de no máximo 3 % para as corridas fluidodinamicamente estáveis. De maneira geral o conteúdo de umidade do pó seco de carbonato de cálcio não sofreu variações durante o período de operação do secador e nem mesmo influencia do tipo de secador utilizado;

- a eficiência energética aumenta ao longo do tempo até que se atinja o regime permanente, no qual não há mais variação da mesma ao longo do tempo;

- o aumento na vazão de alimentação de pasta proporciona maiores valores de eficiência energética de secagem, pois com seu aumento ocorre um aumento nas diferenças entre as temperaturas de entrada e saída do leito ocasionando o aumento da eficiência;

- à medida que há um aumento da vazão de alimentação ocorre uma aproximação dos valores de eficiência energética de secagem com os valores de eficiência energética máxima até o momento em que há a intersecção entre as duas curvas, demonstrando que o ar de saída atingiu o seu limite de saturação;

- nos maiores valores de temperatura de entrada e de velocidade do ar de secagem são obtidos menores valores de eficiência energética, uma vez que qualquer aumento em uma das duas variáveis aumenta a quantidade de energia que pode ser utilizada para a evaporação da água. Entretanto, este excesso de energia não é totalmente utilizado, assim, a temperatura da corrente de saída para as maiores temperatura e velocidade do ar é maior que para as menores. Assim, a diferença entre a temperatura de entrada e de saída é menor, diminuindo a eficiência

energética;

- para a evaporação de água não há um afastamento muito grande entre curvas de eficiência energética para o leito fluidizado e os leitos vibrofluidizados nas duas configurações;

- para a alimentação de diferentes pastas em leito fluidizado e vibrofluidizado não há diferença significativa entre as eficiências energéticas obtidas e

- além disso, não é possível observar diferenças nas eficiências energéticas entre as duas configurações para o leito vibrofluidizado há um mesmo Γ ;

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as considerações mais relevantes sobre o trabalho apresentado a partir das conclusões obtidas para cada item avaliado: fluidodinâmica dos leitos fluidizado e vibrofluidizado operando com partículas de diâmetro inferior a 1 mm, análise da fluidodinâmica do leito úmido durante o período transiente de evaporação e secagem de líquidos e pastas operando com partículas inertes de 2,19 mm durante o período transiente.

Assim, de maneira geral pode-se afirmar que a utilização da vibração aliada à ação pneumática do leito fluidizado pode ocasionar melhorias significativas nos fenômenos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa, proporcionando condições mais favoráveis para a secagem de pastas difíceis de fluidizar.

Além disso, pode-se dizer que o adimensional de vibração não deve ser utilizado como parâmetro universal para caracterizar a dinâmica de um leito vibrofluidizado, como foi observado tanto na fluidodinâmica de partículas de diâmetro inferior a 1mm quanto na secagem. Observaram-se comportamentos distintos de umidade relativa, umidade absoluta, taxa de produção de pó seco, umidade do pó, eficiência de secagem e fluidodinâmicos para duas diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração para um mesmo adimensional de vibração.

Com isso, sugere-se que este parâmetro não seja utilizado isoladamente. Desta forma, com o objetivo de minimizar os erros referentes à utilização inadequada do Γ , propõe-se que sempre que o adimensional de vibração for utilizado seja informada conjuntamente a amplitude de vibração ou frequência de vibração.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade deste trabalho são dadas as seguintes sugestões:

- estudar o comportamento fluidodinâmico e da secagem do leito fluidizado e vibrofluidizado operando com pastas com características mais coesivas que as apresentadas, por exemplo, xantana ou melação, com o intuito de observar a influência da vibração nestas condições;
- estudar a fluidodinâmica e a secagem de material poroso em leito fluidizado e vibrofluidizado, verificando a importância da aplicação da vibração e o comportamento do adimensional de vibração;
- analisar a influência do tipo de inerte no comportamento fluidodinâmico e de secagem em leito fluidizado e vibrofluidizado;
- realizar simulações da secagem de pastas em leito fluidizado e vibrofluidizado e
- realizar simulações em CFD da fluidodinâmica do leito fluidizado e vibrofluidizado, observando a influência da vibração e do adimensional de vibração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKHAVAN, A.; VAN OMMEN, J. R.; NIJENHUIS, J.; WANG, X. S.; COPPENS, M. O.; RHODES, M. J. (2009). Improved Drying in a Pulsation-Assisted Fluidized Bed. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Washington D.C., v. 48, p. 302-309.
- ALMEIDA, A. R. F. (2009). *Análise da Secagem de Pastas em Leito de Jorro*. São Carlos, SP, UFSCar, 164 p. (Tese).
- ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. (2006). Preliminary Approach to the Transient Analysis of Water Evaporation in a Spouted Bed. *International Drying Symposium*, Hemisphere Publishing Corporation, New York (Em CD-ROM).
- BACELOS, M. S.; SPITZNER NETO, P. I.; SILVEIRA, A. M.; FREIRE, J. T. (2005). Analysis of Fluid Dynamics Behavior of Conical Spouted Bed in Presence of Pastes. *Drying Technology*, New York, v.23, n.3, p.427-453.
- BAEYENS, J.; GELDART, D. (1973). In: DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. (1985). *Fluidization*. Academic Press, London.
- BARKER, G. C.; MEHTA, A. (1993). Size Segregation Mechanisms. *Nature*, v.364, p.486-487.
- BRATU, E.; JINESCU, G.I. (1971). Effect of vertical vibration on the pressure drop in a fluidized layer. *British Chemical Engineering*, v.16, n.8, p.691-695.
- BROD, F. P. R. (1999). *Construção e Teste de um Secador Vibro-Fluidizado*. Campinas, SP, UNICAMP (Dissertação).
- CAMARGO, C. F. S. (2003). *Desenvolvimento de um leito vibro-fluidizado e estudos dos coeficientes de transferência de calor de corpos submersos*. São Carlos-SP, UFSCar (Tese).
- CARDOSO, C. S. B.; KIECKBUSCH, T. H. (1999). Secagem de Fatias de Banana em Leito Vibro-Fluidizado a Altas Temperaturas por Curto Tempo. In: *Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXVI*, Teresópolis, RJ, 1998. *Anais do XXVI ENEMP*, Teresópolis, RJ, Editora da UFRRJ, v. 2, p. 385-392.
- CHEN, Y. L.; LIN, P. S.; PENG, Y. L. (1991). Particle Agglomeration Characteristics in Vibro-Fluidized Bed Dryers. *J. Chem. Eng. Jpn.*, v.24, n.5, p.669-673.
- CHEVILENKO, V. A.; MUSHTAYEV, V. I.; KOROTOKOV, V. M.; IZHORIM, G. L.; LYALIN, V. A.; PLANOVSKI, A. N. (1979). In: PAKOWSKI, Z.; MUJUNDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984). *Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process*. *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v.3, p.245-306.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. (1965). In: PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C.. *Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for*

- Drying Process. In: *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226, 1984.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V.. *Vibrokipyashchii Sloi* (1972). In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z.. *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: *Drying '80*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p. 211-226, 1980.
- DALEFFE, R. V. (2002). *Análise da Presença do Glicerol no Comportamento Fluidodinâmico de Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado*. São Carlos, SP, UFSCar (Dissertação).
- DALEFFE, R. V. (2005). *Contribuições para a Análise do Comportamento Fluidodinâmico de um Leito Vibrofluidizado*. São Carlos, SP, UFSCar (Tese).
- DALEFFE, R.V.; FREIRE, J.T. (2004) Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol. *Braz. J. Chem. Eng.* v.21, n.1, p.35-46.
- DALEFFE, R.V.; FERREIRA, M.C.; FREIRE, J.T. (2005) "Drying of Pastes in Vibro-Fluidized Beds: Effects of the Amplitude and Frequency of Vibration" *Drying Technology*, v.23, n.9-11, p.1765-1781.
- DALEFFE, R.V.; FERREIRA, M.C.; FREIRE, J.T. (2007) "Analysis of Particle Size Distributions on the Fluid Dynamic Behavior and Segregation Patterns of Fluidized, Vibrated and Vibrofluidized Beds" *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, v.2, p.3-11.
- DELLA TONIA JR. V.G. (1990) *Desenvolvimento, instrumentação e fluidodinâmica de um leito vibro-fluidizado*. São Carlos, SP, UFSCar 142p. (Dissertação).
- DORNEY, J.; GINSBURG, A. S.; SIROYEDOV, V. I. (1981). *Élelmezésipar*, v.11, p.411-& (Em Húngaro). In: ERDÉSZ, K. (1990). *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. *Powder Handling & Processing*, Germany, v.2, n.4, p.327-339.
- ECCLES, E. R. A. (1990). *Flow and heat transfer phenomena in aerated vibrated beds*. Montreal, McGill University (Ph.D. Thesis).
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A. S.; RINGER, D.U. (1986). Hydrodynamic similarity of conventional and vibrated fluidized beds. In: *Drying '86*, Hemisphere Pub., New York, v.1, p.169-176.
- ERDÉSZ, K.; ORMÓS, Z. (1986). *Drying of Past-like Materials in Vibro-fluidized Bed of Inert Packing*. In: *Drying '85*, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v.1, p.177-82.
- FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. (1992). *Secagem em Sistemas com Vibração*. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M.. *Tópicos Especiais em Secagem*, UFSCar, São Carlos, SP, v.1, p.87-127.
- FREIRE, J. T. (1992). *Secagem de Pastas em Leito de Jorro*, In: Freire, J. T.; Sartori, D. J. M. *Tópicos Especiais em Secagem*, Editora da UFSCar, São Carlos – SP, Vol.1, p.41-85.

- GALLAS, J. A. C.; HERRMANN, H. J.; SOKOLOWSKI, S. (1992). Molecular Dynamics Simulation of Powder Fluidization in Two Dimensions. *Physica A*, v.189, p.437-446.
- GARIM, M.M. (1998). Estudo dos coeficientes de transferência de massa em leito fluidizado e vibro-fluidizado. São Carlos, SP, UFSCar, 140p. (Tese).
- GARIM, M. M.; FREIRE, J. T. (1994). Leito Vibro-fluidizado Aerado: Estudos Relacionados a Determinação de U_{mvf} e ΔP_{mvf} . In: Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Química (10º COBEQ), São Paulo - SP, v.1, p.295-300.
- GEANKOPLIS, C. J.(2003). Transport processes and separation process principles (includes unit operations). 4. ed., Prentice Hall, New Jersey.
- GELDART, D. (1973). Types of Gas Fluidization. *Powder Technology*, v. 7, p. 285 – 292.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980) Aerodynamic and thermal characteristics of vibrated fluid beds: a review. In: *Drying '80*, Hemisphere Pub., New York, v.1, p.141-150.
- HERRON, D. J.; TUNNO, J. J.. Fluid Bed Dryer. In: BHATIA, M. V.; CHEREMISINOFF, P. N. (1983). Process Equipment Series – vol 5. Transfer Operations in Process Industries: Design and Equipment. Lancaster: Technomic Publ., p. 46-50.
- IBARZ, A; BARBOSA-CANÓVAS, G. V. (2003). Unit Operations in Food Engineering. Boca Raton: CDR Press, 889 p..
- JINESCU, G.; TABRENCU, C.; IONESCU, E; PETRESCU, M; JINESCU, C. (2000). Hydrodynamic Aspects at Vibrated Fluidized Drying of Polydisperse Powdery Materials. *Drying '2000*, Proceedings of 12th International Drying Symposium (IDS' 2000), Noordwijkerhout, The Netherlands. Paper No.244 (Em CD-ROM).
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. (1991). Fluidization Engineering, 2.ed, Butterworth-Heinemann – USA.
- KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. (2002). Advanced Drying Technologies. Marcel Dekker, Inc, New York.
- KUROSAKI, Y.; ISHIGURO, H.; TAKAHASHI, K (1995). Mechanisms of heat transfer enhancement of gas-solid fluidized bed: estimation of direct contact heat exchange from heat transfer surface to fluidized particles using a optical visualization technique. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, p. 104-112.
- LUCCAS, V. (1996) Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado. Campinas, SP, UNICAMP (Tese).
- LUNA-SOLANO, G.; SALGADO-CERVANTES, M. A.; RAMIREZ-LEPE, M.; GARCIA-ALVARADO, M. A.; RODRIGUES-JIMENES, G. C. (2003). Effect of Drying Type and Drying Conditions Over Fermentative Ability of Brewer's Yeast. *Journal of Food Process Engineering*, Trumbull, Conecticut, v. 26, 135-147.
- MALHOTRA, K.; LAW-KWET-CHEONG, L.; MUJUMDAR, A. S. (1984). Pressure Drop Characteristics for Vibrated Beds of Dry and Sticky Particles. *Powder Technology*, Holanda, v.39, p.101-5.

- MALHOTRA, K.; MUJUMDAR, A. S. (1985). Single tube heat transfer in aerated vibrated beds. In: TOEI, R. & MUJUMDAR, A. S., *Drying' 85*. New York, Hemisphere Publishing Corporation, p. 186-194.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. (1993). *Unit operations of chemical engineering*. Quinta edição, McGraw-Hill, USA.
- McCORMICK, P. Y. (1983). Solids Drying Fundamentals. In: PERRY, J.; CHILTON, C. H.. *Chemical Engineering Handbook*, McGraw Hill Co., sec. 20-24.
- MEILI, L.; DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. (2010). Analysis of the influence of dimensionless vibration number on the drying of pastes in vibrofluidized beds. *Drying Technology: Special Issue* (No prelo).
- METCALF; EDDY, INC. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. Terceira edição, McGraw Hill Co.
- MORIS, V. A. S. (2002). *Fluidodinamica e secagem do acido adipico em leito vibrofluidizado*. Campinas-SP, UNICAMP, 189 p. (Tese).
- MUCHOWSKI, E. (1980). Heat Transfer from heated surfaces to spherical packings of spheres at atmospheric pressure and under vacuum. *International Chemical Engineering*, vol. 20, n° 4, p. 564-576.
- MUJUMDAR, A. S. (2004). *Guide to industrial drying – principles, equipment and new developments*. IWSID2004, Mumbai, India.
- MUJUMDAR, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying*. 3. ed. Taylor & Francis Group.
- NARIMATSU, C. P. (2004). *Contribuições ao estudo da secagem em um leito pneumático vertical*. São Carlos, SP, UFSCar, 284p (dissertação).
- NOVY, M. G.; KIECKBUSH, T. G. (1988). Secagem de Alimentos Líquidos em Leito Vibrofluidizado Contendo Inertes. In: *Anais do XV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XV ENEMP)*, Uberlândia - MG, Ed. UFU, v.2, p.430-40.
- OLIVEIRA Jr., A. B. (2003). *Estudo da Transferência de Calor e Massa no Processo de Secagem em Leito Vibro-Fluidizado*. São Carlos, SP, UFSCar (dissertação).
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984). Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process. In: *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226.
- PAN, Y. K.; LI, J. G.; ZHAO, L. J.; YE, W. H.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. (2000). Drying of a dilute suspension in a vibrated fluidized bed of inert particles. *International Drying Symposium*, v.12, paper n. 266.
- PASSOS, M. L.; MASSARANI, G. (2001). Análise das Forças Coesivas Interpartículas em Leito Fluidizado. In: *Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXVIII*, Rio de Janeiro, RJ. *Anais do XXVIII ENEMP*, Rio de Janeiro, RJ, Editora da COPPE/UFRJ, v.2, p.498-503.

-
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. (2000). Effect of Cohesive Forces on Fluidized and Spouted Beds of Wet Particles. *Powder Technology*, Switzerland, v.110, n.3, p.222-238.
- PATEL, K.; BRIDGEWATER, J.; BAKER, C. G. J.; SHNEIDER, T. (1986). Spouting Behavior of Wet Solids. In: *Drying '86, Proceedings of 5th International Drying Symposium (IDS` 86)*, Boston, USA, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v. 1, p.183-189.
- PORTER, E. E.; KAERWER, H. E. (1974). *Coated Seeds and Methods: Patents*, Minneapolis, USA, n. 3, 80.
- PRADO, M. M. (1999). *Secagem de Sementes de Mamão Papaya*. São Carlos, SP, UFSCar (dissertação).
- REGER, E. O.; ROMANKOV, P. G.; RASHKOVSKAYA, N. B. (1967). Drying of Paste Materials on Inert Substances in Spouted Beds. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*. v.40, n.10, p.2276-80, 1967.
- SCHNEIDER, T.; BRIDGEWATER, J. (1993). The Stability of Wet Spouted Beds. *Drying Technology*, New York, v.11, n.2, p.277-301.
- SHAH, R. M.; GOYEL, S. K. (1980). Drying Characteristics of Tea Fluidized on a Vibrating Bed (Part I). In: *Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS '80)*, Montreal, Canada, Hemisphere Publishing Corporation, New York, , v.2, p.176-181.
- SPITZNER NETO, P.I. (2001). *Estudo da Secagem de Pastas e da Fluido dinâmica do Leito de Jorro na Presença de Pastas e Líquidos*, Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, 284p.
- SOUZA, L. F. G. (2008). *Fluidodinamica e secagem de cloreto de potassio e acetato de sodio em leito pulso fluidizado*. Campinas, SP, UNICAMP, 134 p. (Dissertação).
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. (1986). *Drying: Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland.
- STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. (1983). Modern Developments in Drying of Pastelike Materials. *Advances in Drying*, McGraw Hill, Washington, v.2, p.193-231.
- STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds. In: *Drying '80*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p. 211-226.
- SUYADAL, Y. (2006). A simple energy balance to determine heat transfer coefficients from low temperature measurements in a fluidized bed. *Powder Technology*, 161, p. 53-58.
- THOMAS, B.; MASON, M. O.; SPRUNG, R.; LIU, Y. A.; SQUIRES, A. M. (1998). Heat transfer in shallow vibrated beds. *Powder Technology*, 99, p. 293-301.

-
- WELTMAN, R.M. (1960) *Reology*, vol. 3, Academic Press, New York. In: OLIVEIRA, W.P. (1996). *Estudo da Secagem de Pastas em Leito de Jorro Cônico*. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, 202p, (Tese).
- WEN, C. Y.; YU, Y. H. (1966). A Generalized Method for Predicting Minimum Fluidization Velocity. *AICHE Journal*, New York, v.12, n.3, p.610-&.
- ZABRODSHYI, S. S.; ZAMNIUS, I. L.; MALYUKOVICH, S. A. (1968). Heat Transfer by a Layer of Thin-Dispersed Material Fluidized by a Gas Flow or Vibrational Superposition. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, v. 14, n. 3, p.448 (Em Russo). In: ERDÉSZ, K. (1990). *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. Powder Handling & Processing, Germany, v.2, n.4, p.327-339.
- ZHANG, D.; KOKSAL, M. (2006). Heat transfer in a pulsed bubbling fluidized bed. *Powder Technology*, 168, p. 21-23.

**APÊNDICE A -
RESULTADOS FLUIDODINÂMICOS DURANTE O PERÍODO TRANSIENTE DE
EVAPORAÇÃO/SECAGEM DE PASTAS**

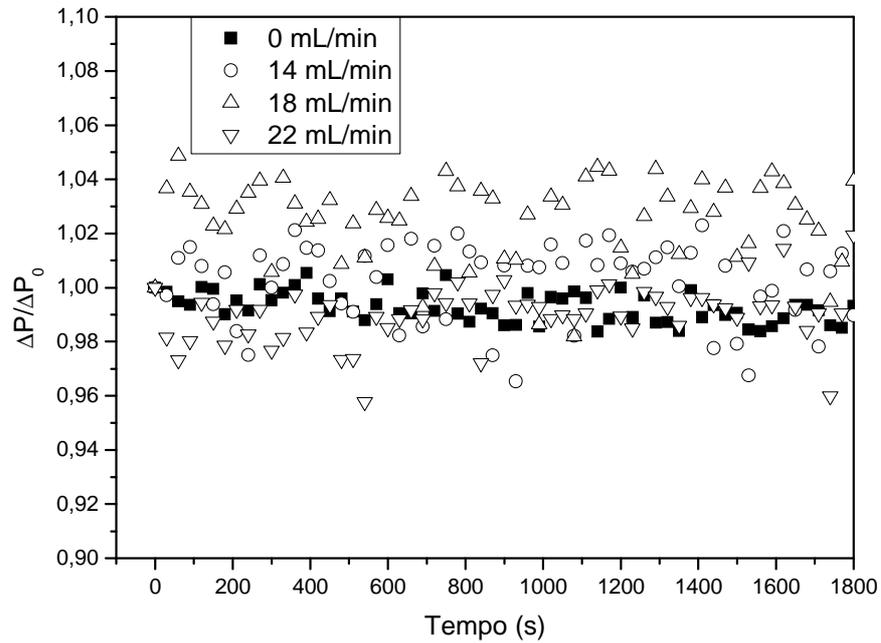


Figura A 1 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

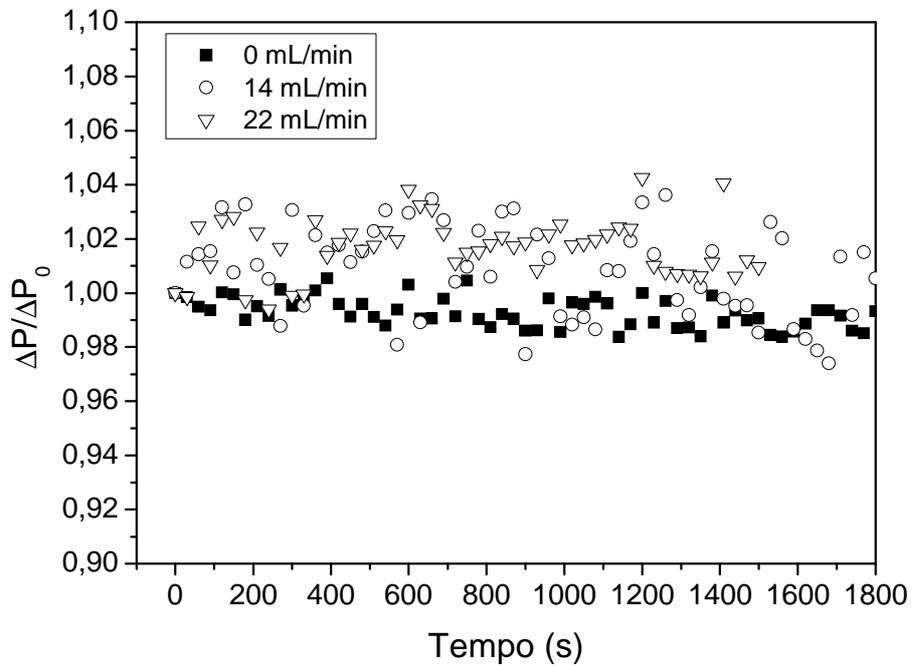


Figura A 2 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (3%) para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

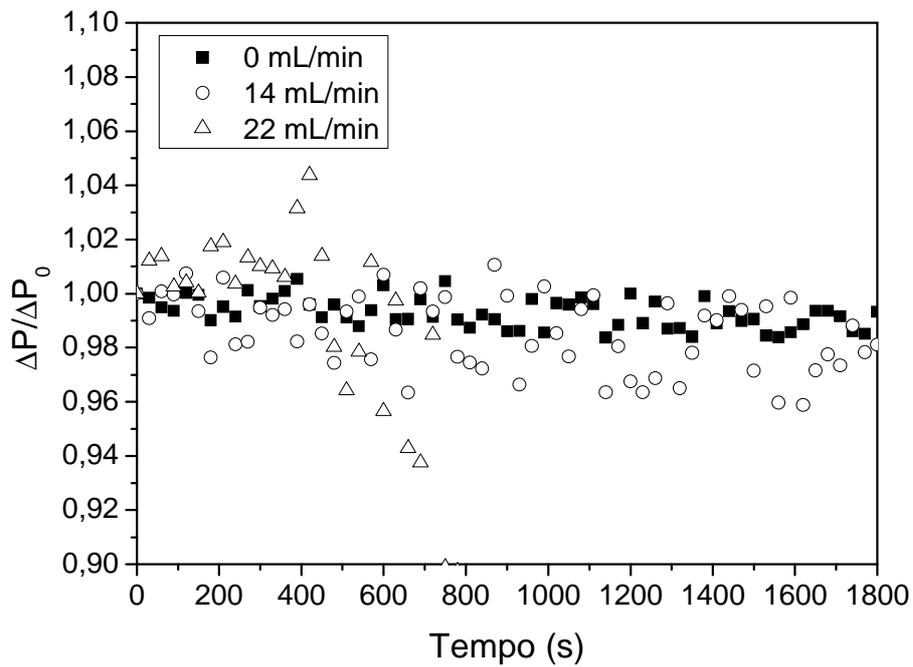


Figura A 3 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (6%) para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

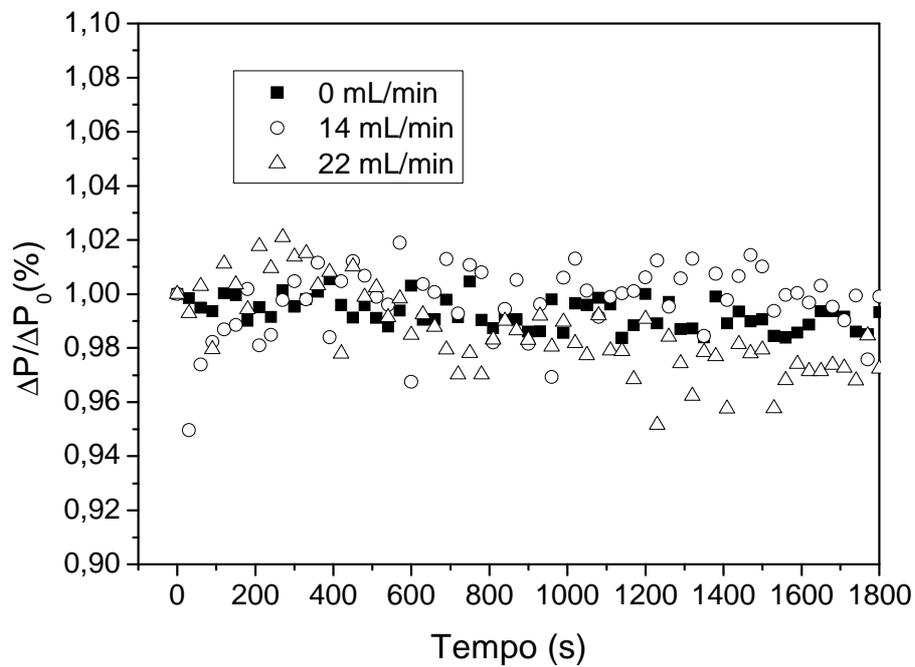


Figura A 4 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (9%) para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

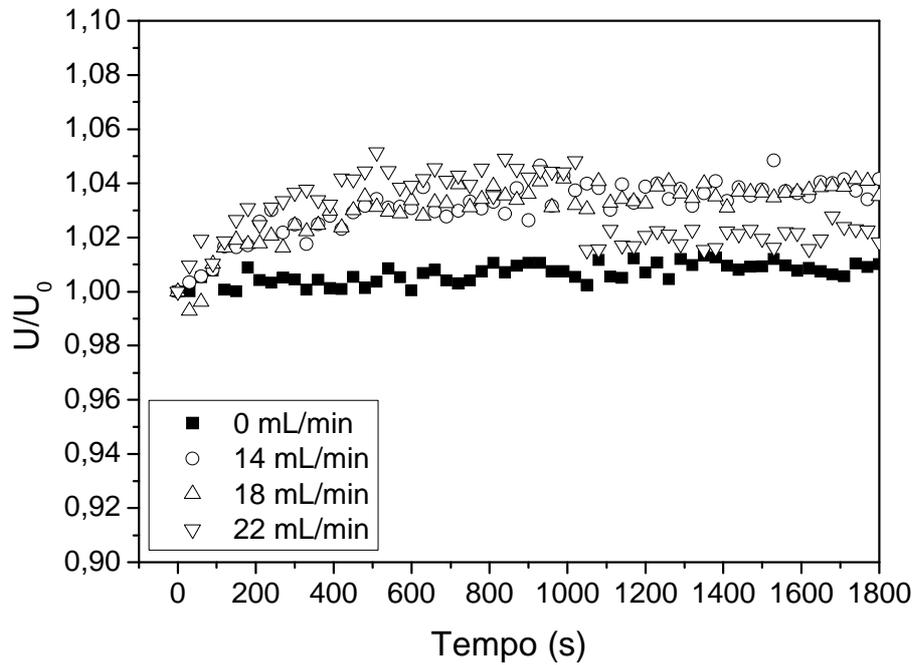


Figura A 5 – Adimensional de velocidade do ar de secagem em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

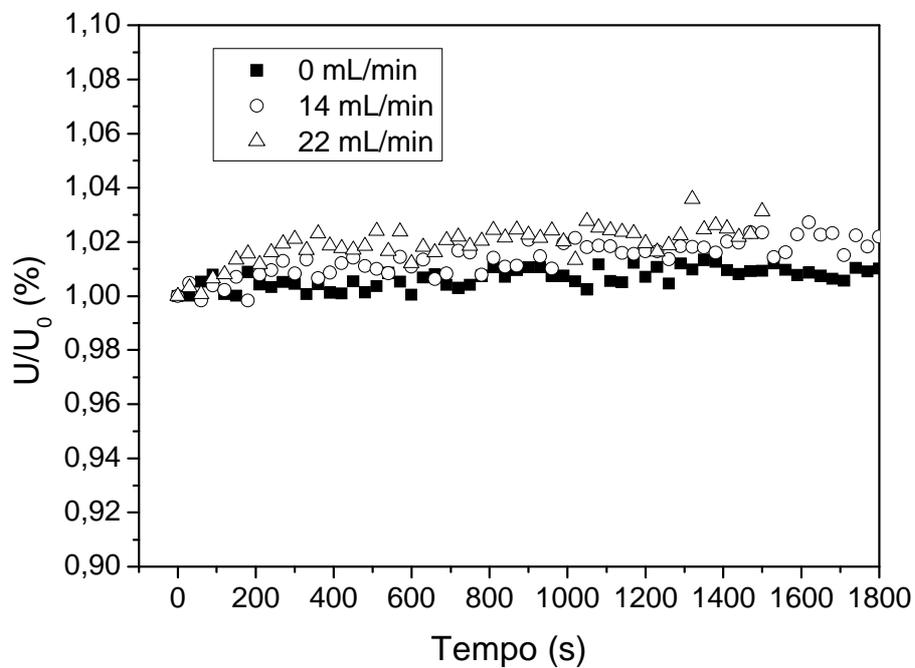


Figura A 6 – Adimensional de velocidade do ar de secagem em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (3%) para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

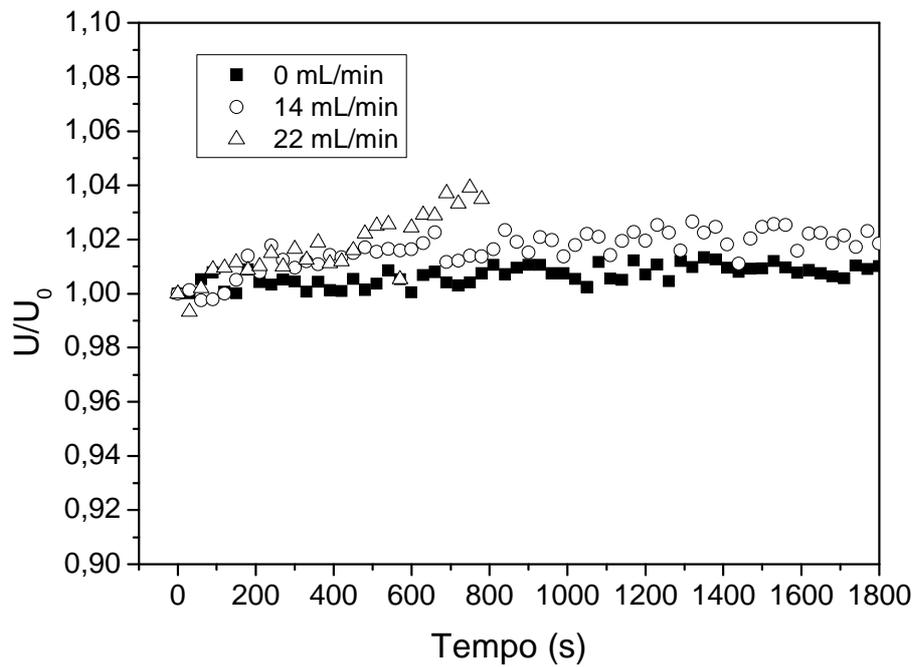


Figura A 7 – Adimensional de velocidade do ar de secagem em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (6%) para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

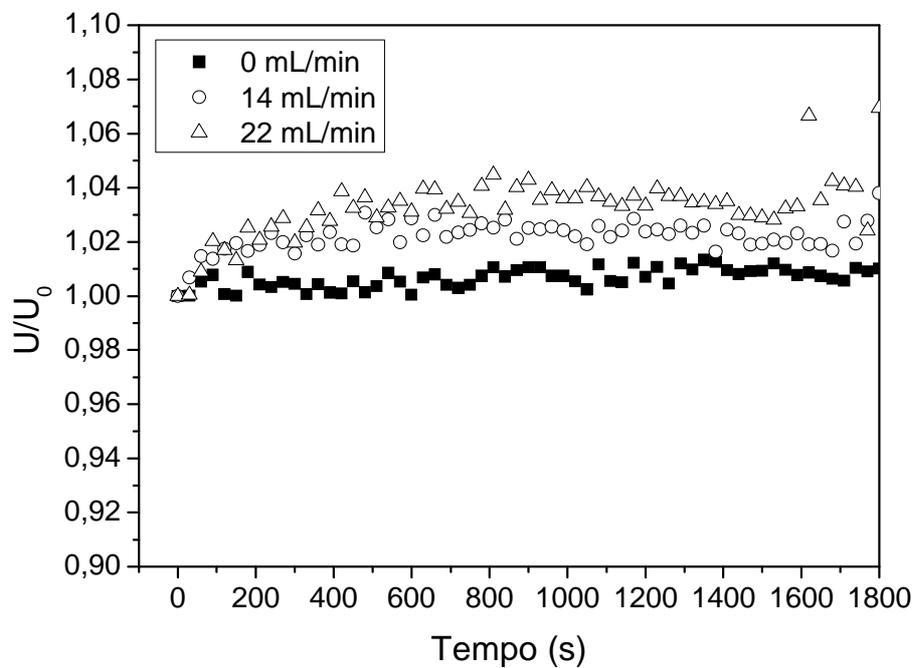


Figura A 8 – Adimensional de velocidade do ar de secagem em função do tempo de operação para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,0$) com alimentação de CaCO_3 (9%) para $T = 80^\circ \text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

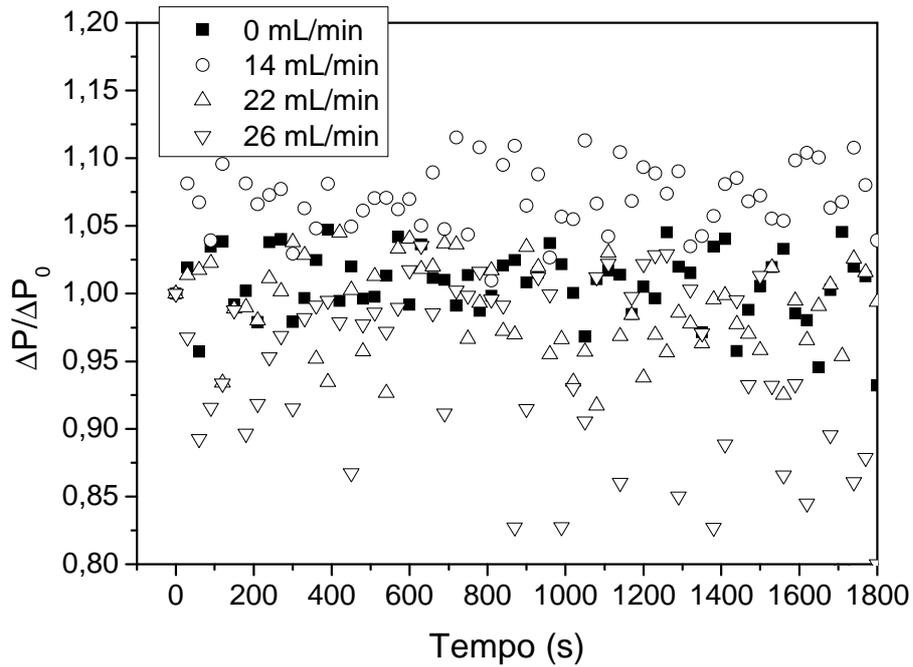


Figura A 9 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

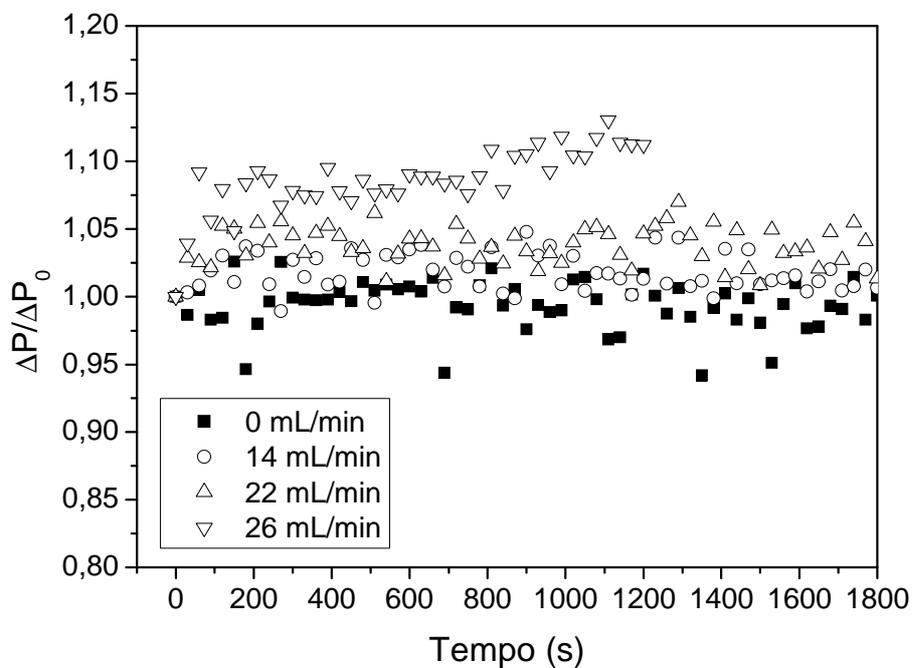


Figura A 10 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

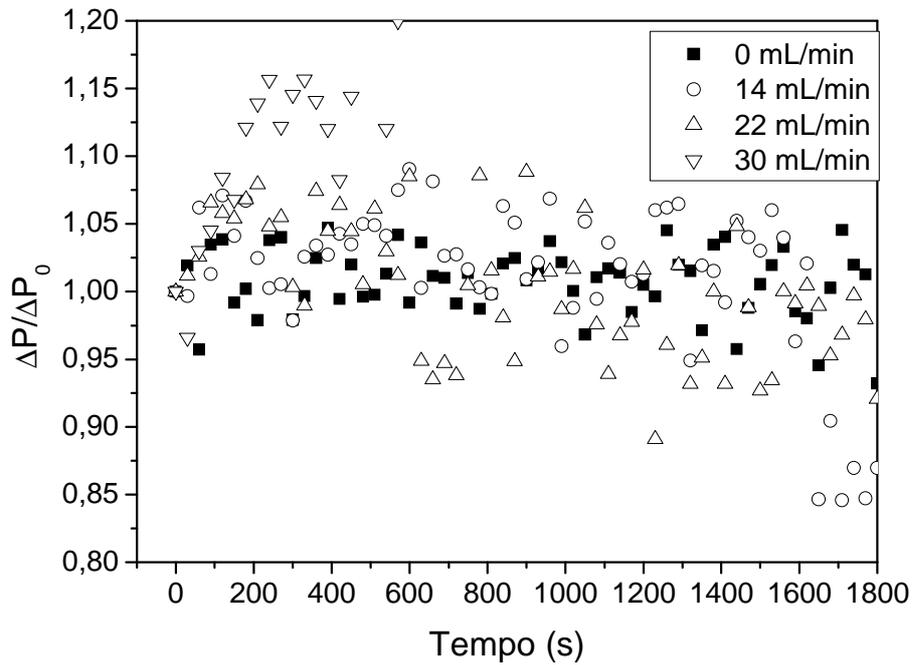


Figura A 11 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (3%) para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

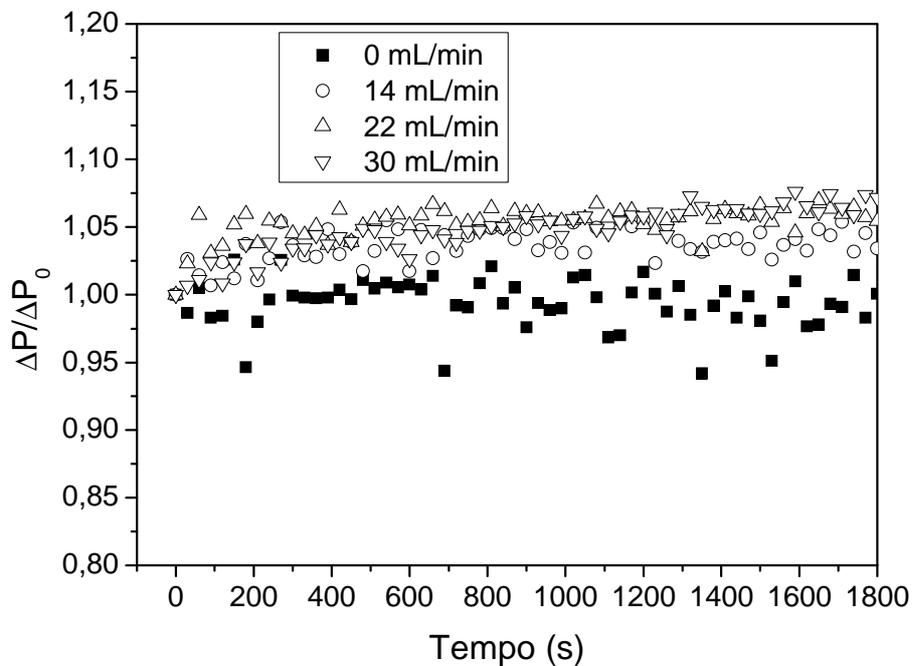


Figura A 12 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (3%) para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

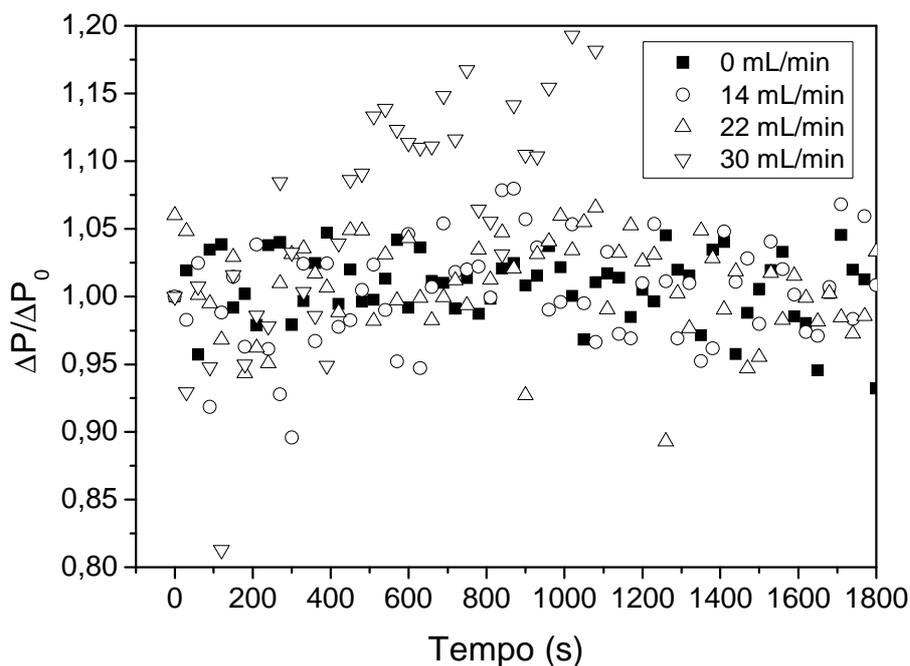


Figura A 13 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (6%) para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

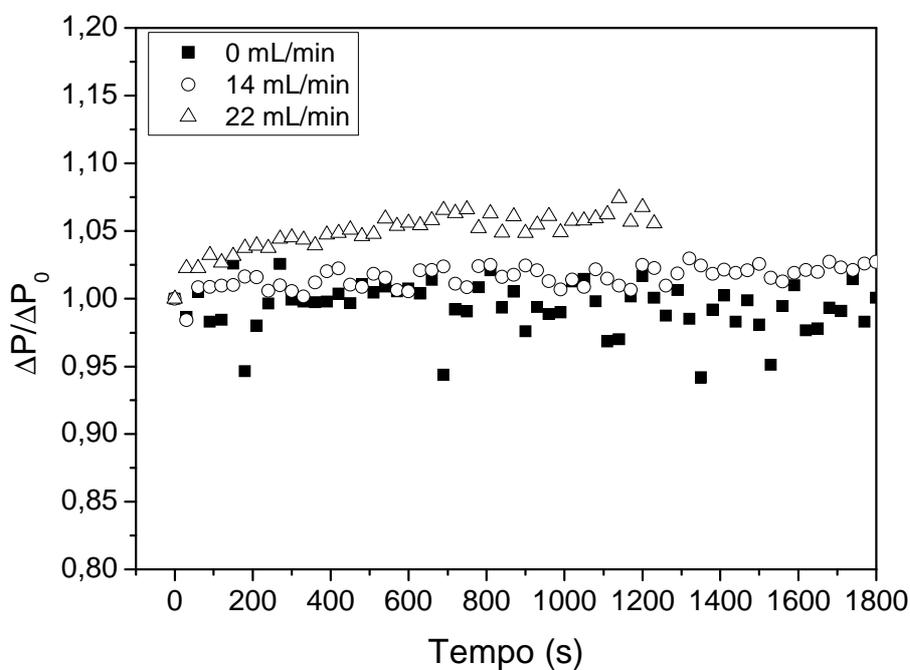


Figura A 14 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (6%) para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

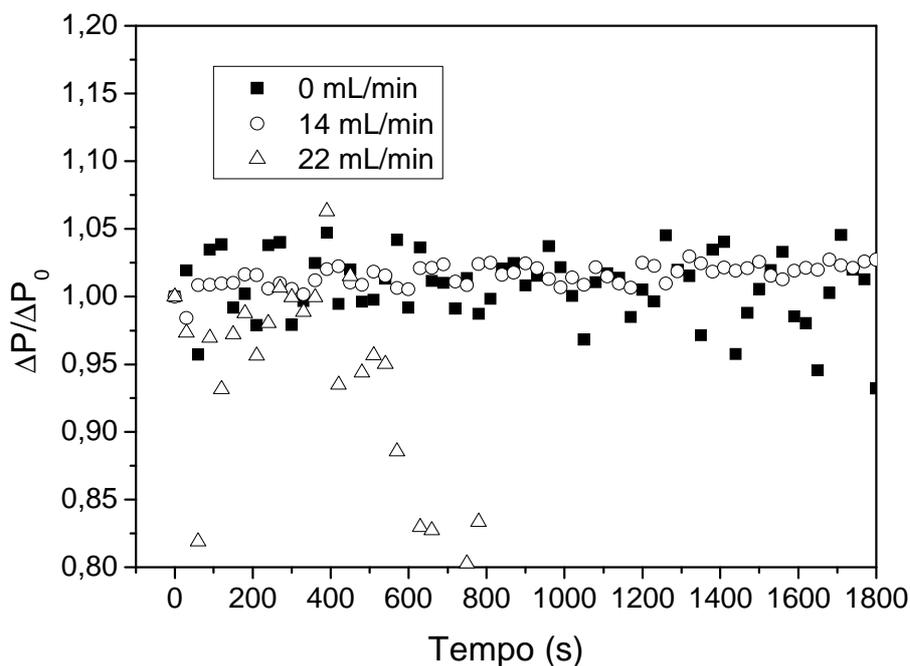


Figura A 15 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (9%) para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

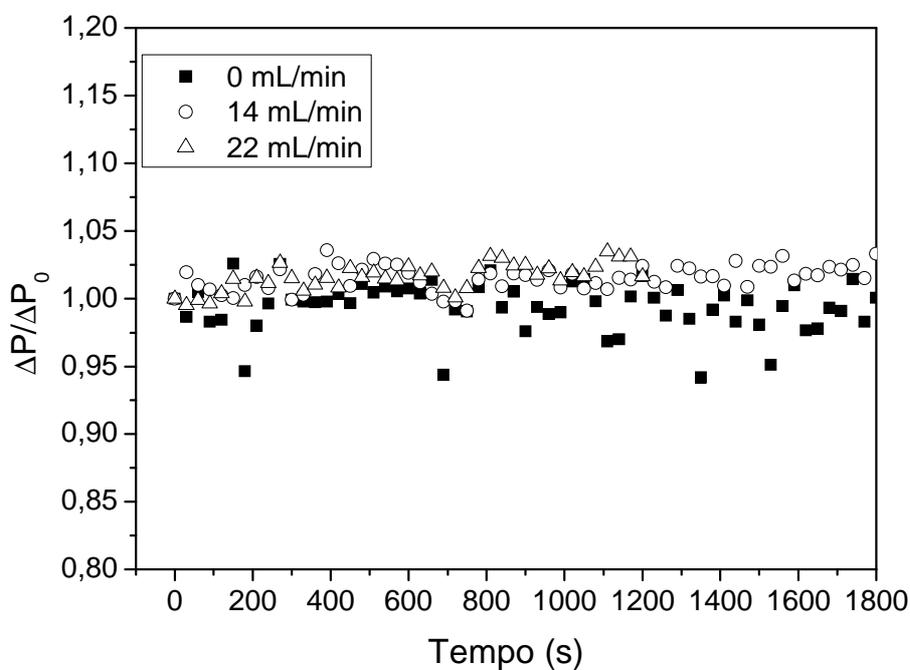


Figura A 16 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (9%) para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

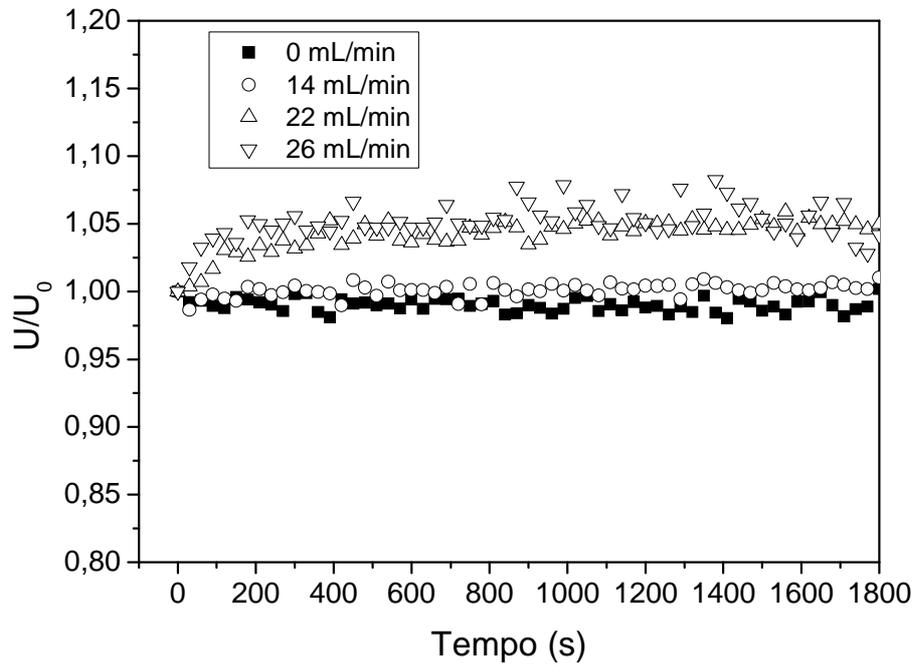


Figura A 17 – Adimensional de velocidade do ar em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

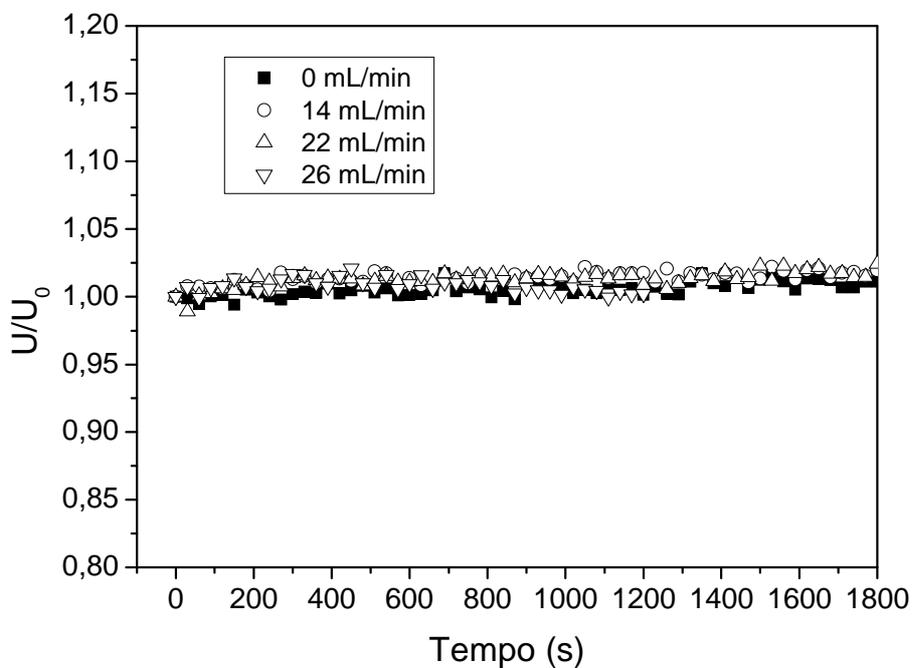


Figura A 18– Adimensional de velocidade do ar em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de lodo de esgoto para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

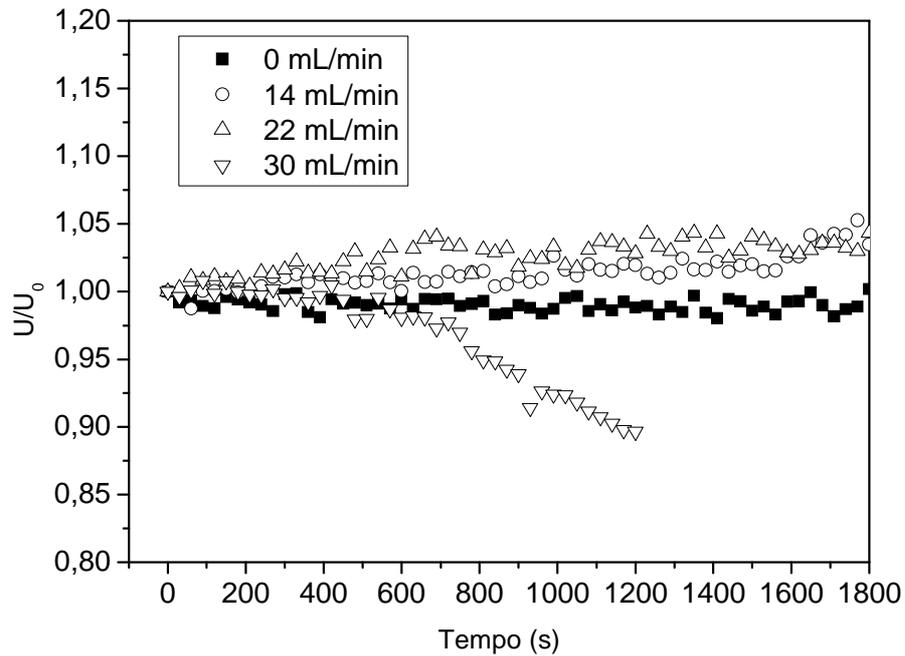


Figura A 19 - Adimensional de velocidade do ar em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (3%) para $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33\text{ m/s}$, $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$.

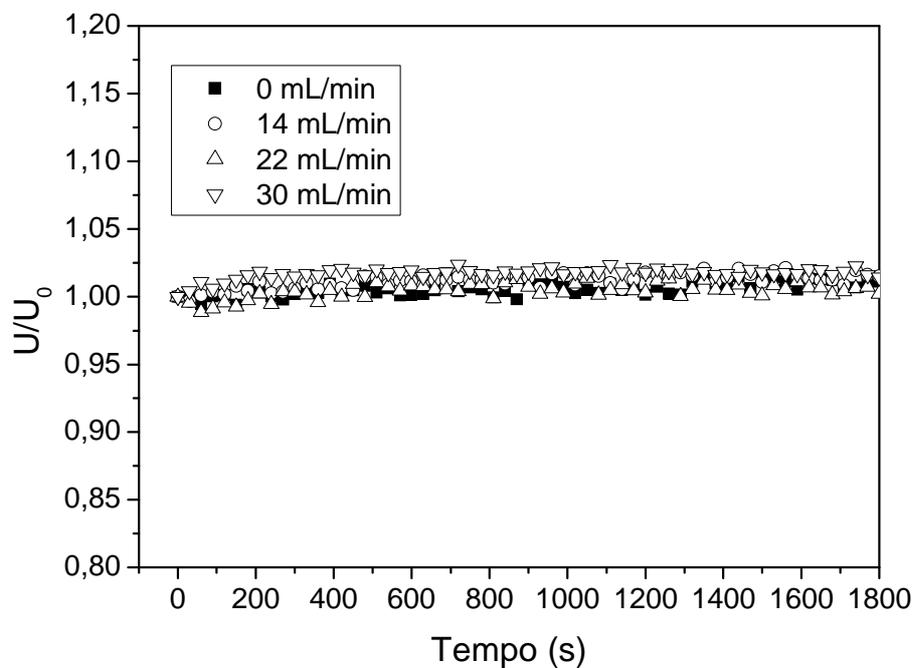


Figura A 20 - Adimensional de velocidade do ar em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (3%) para $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33\text{ m/s}$, $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$.

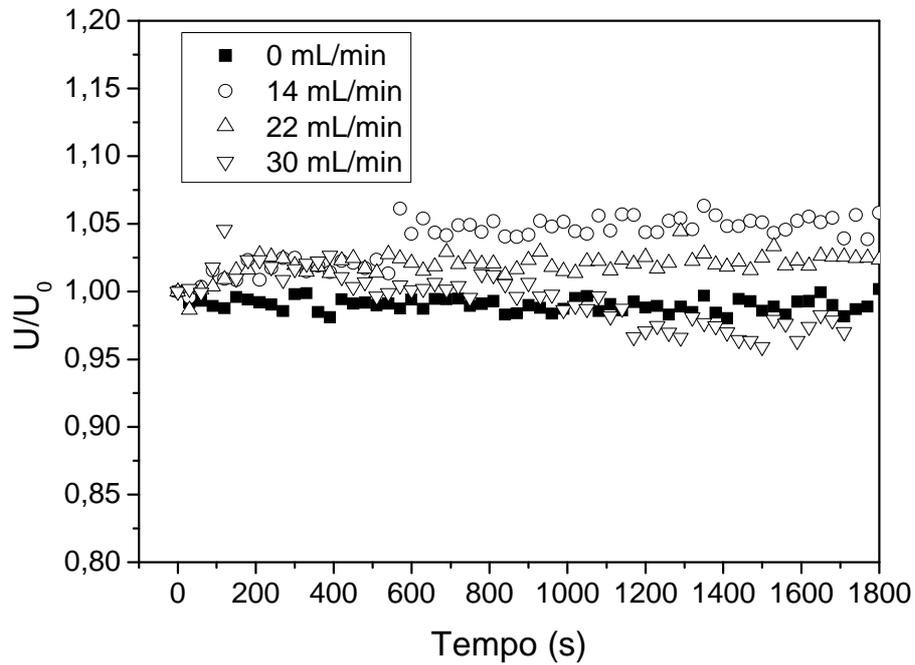


Figura A 21 - Adimensional de velocidade do ar em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (6%) para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$.

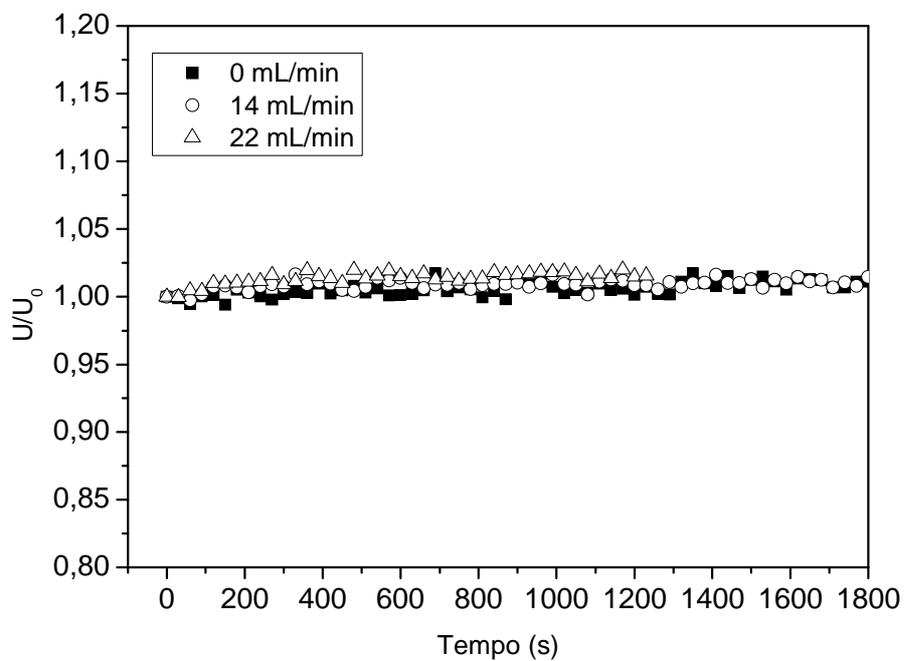


Figura A 22 - Adimensional de velocidade do ar em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (6%) para $T = 80^\circ \text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$.

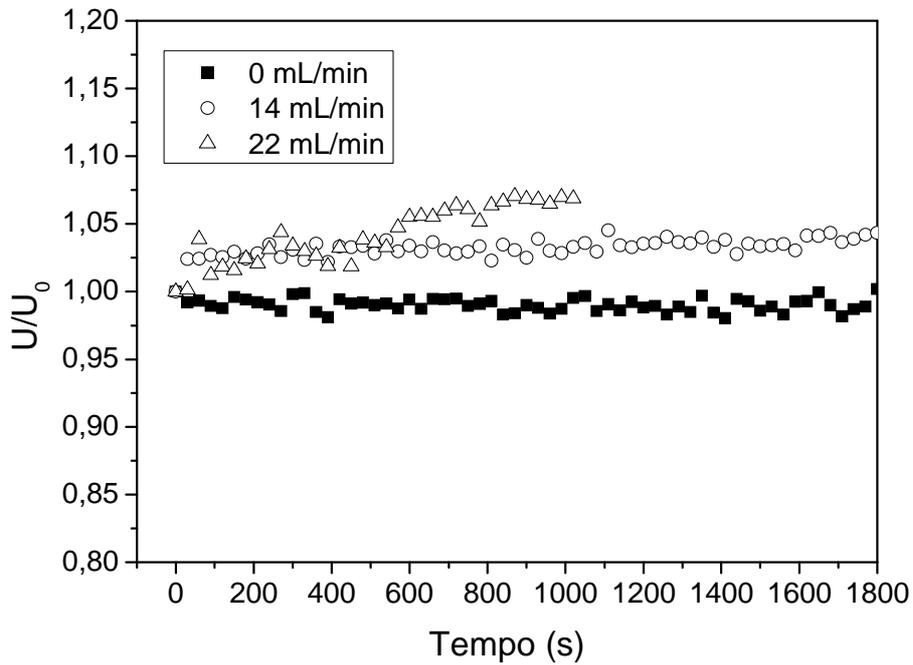


Figura A 23 - Adimensional de velocidade do ar em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (9%) para $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33\text{ m/s}$, $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$.

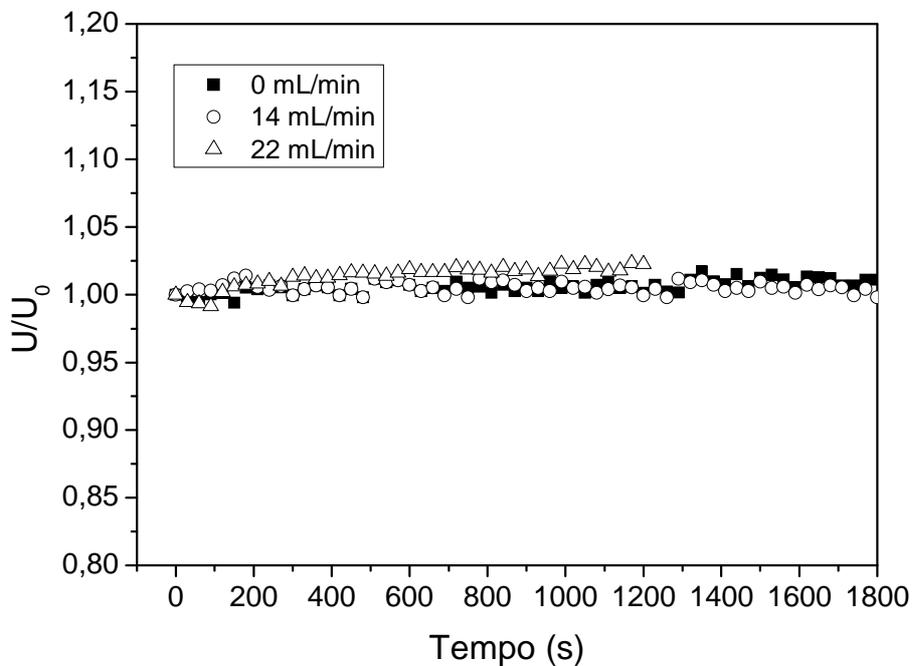


Figura A 24 - Adimensional de velocidade do ar em função do tempo de operação para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,0$) com alimentação de CaCO_3 (9%) para $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33\text{ m/s}$, $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$.

**APÊNDICE B -
RESULTADOS DA EVAPORAÇÃO/SECAGEM DE PASTAS DURANTE O REGIME
TRANSIENTE**

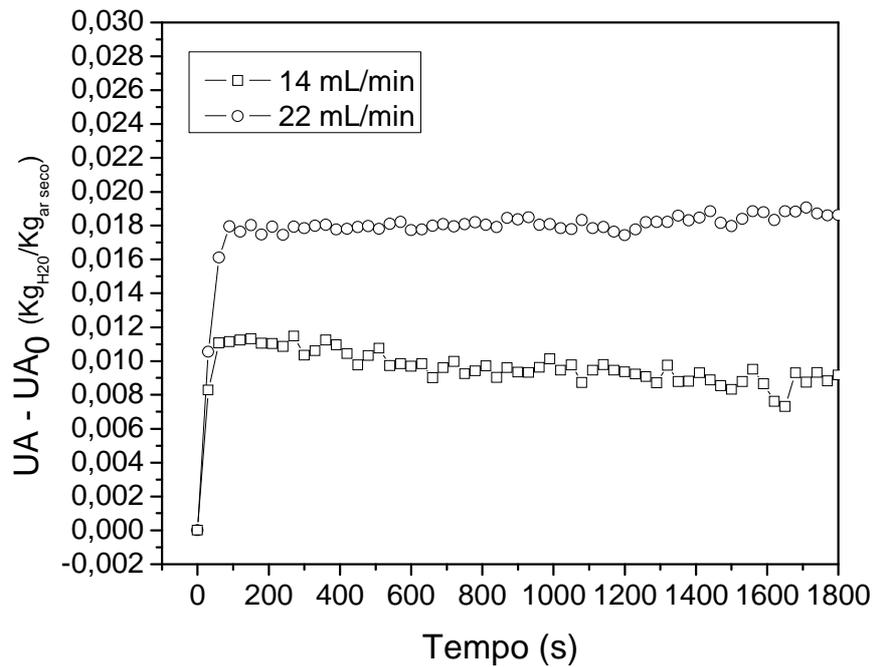


Figura B1 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a evaporação de água; $T = 80^\circ\text{C}$ e $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

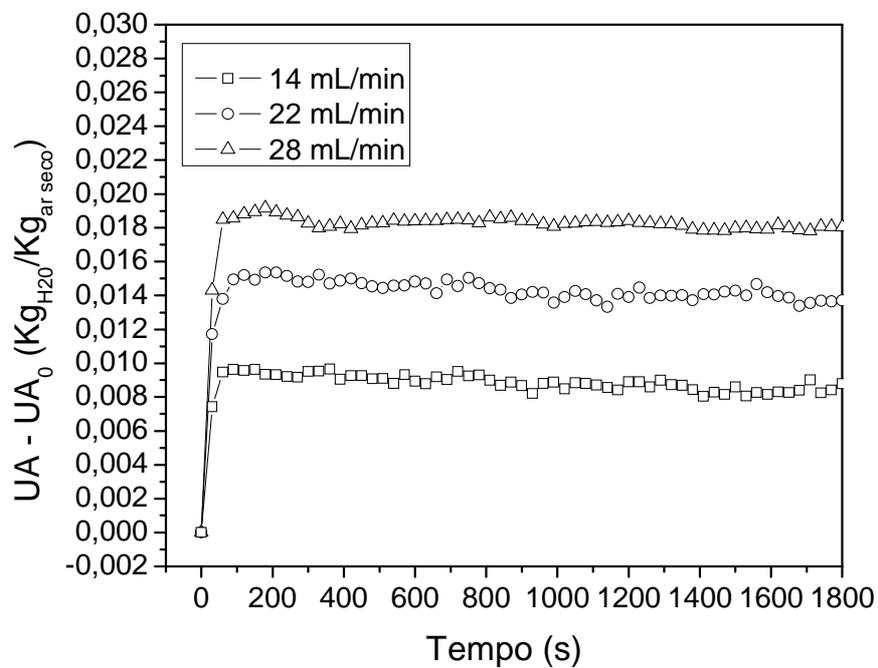


Figura B2 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a evaporação de água; $T = 80^\circ\text{C}$ e $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

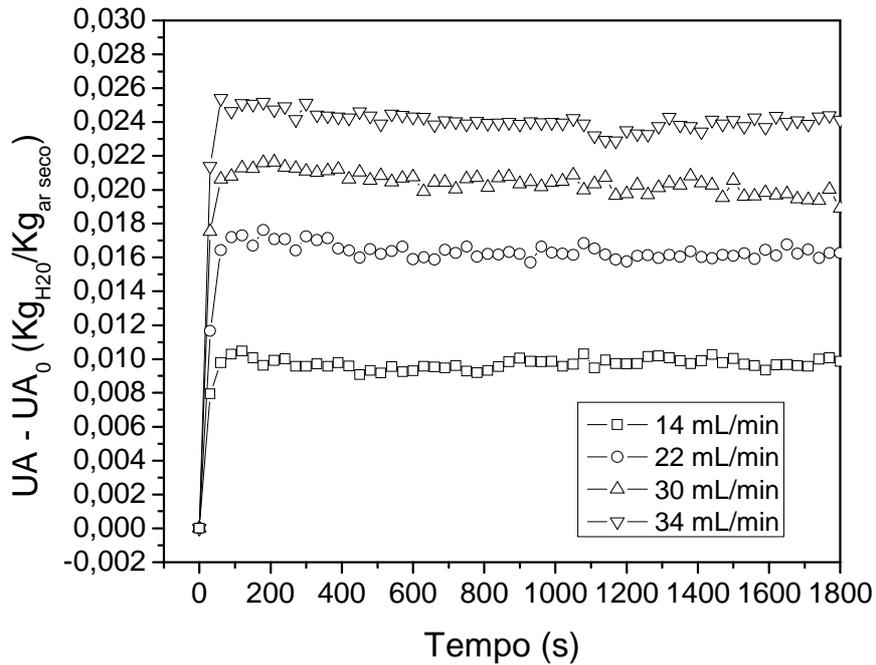


Figura B3 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a evaporação de água; $T = 100^\circ\text{C}$ e $U_s = 1,33$ m/s.

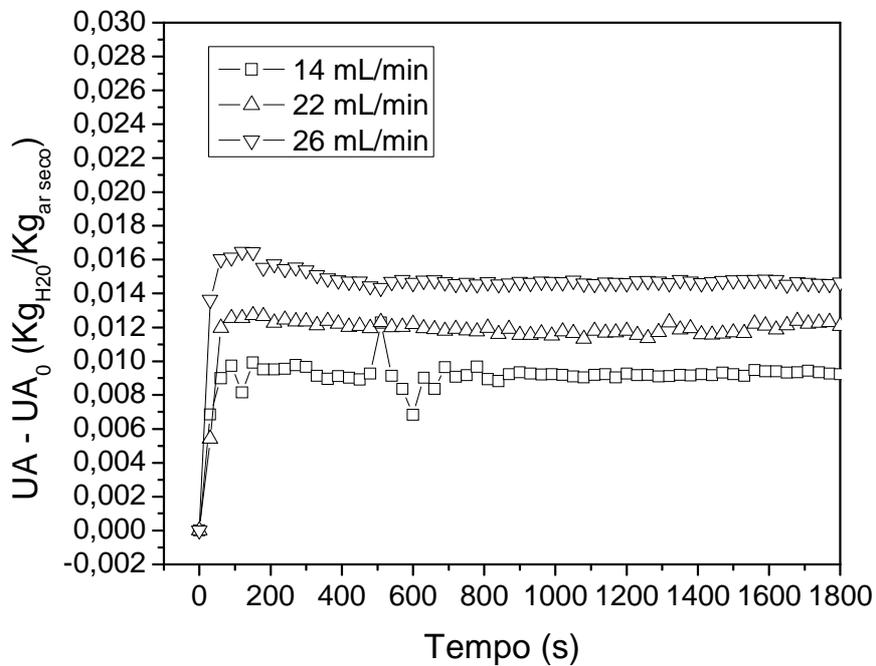


Figura B4 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a evaporação de água; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33$ m/s, $A = 0,015$ m e $f = 8,14$ Hz ($\Gamma = 4,00$).

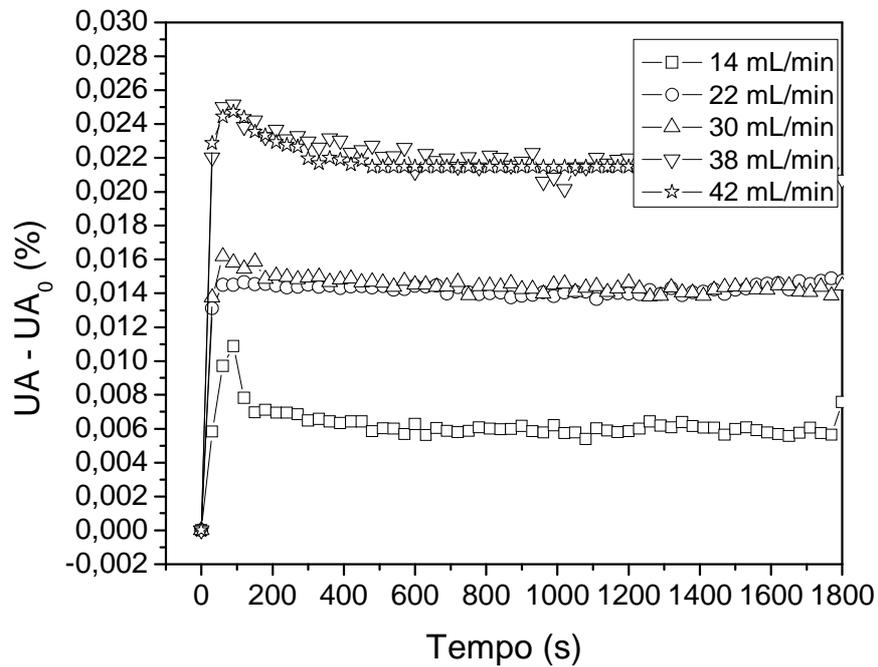


Figura B5 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a evaporação de água; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55$ m/s, $A = 0,015$ m e $f = 8,14$ Hz ($\Gamma = 4,00$).

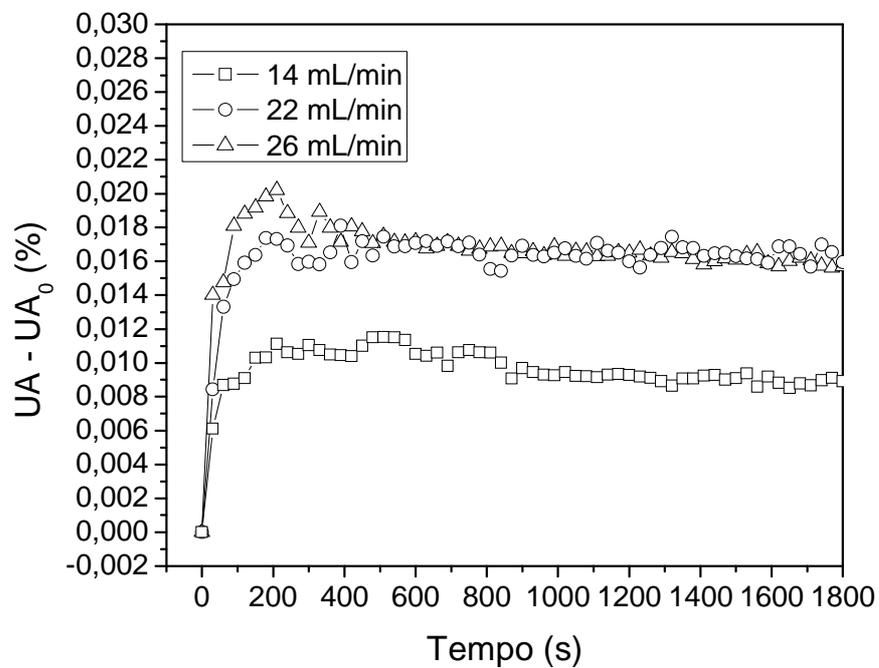


Figura B6 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a evaporação de água; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33$ m/s, $A = 0,015$ m e $f = 8,14$ Hz ($\Gamma = 4,00$).

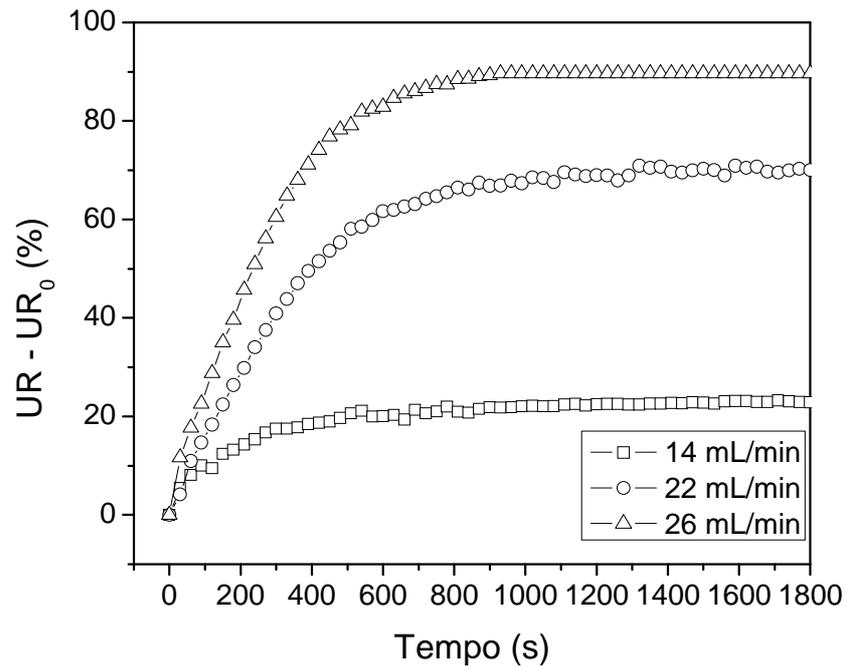


Figura B7 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a evaporação de água; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

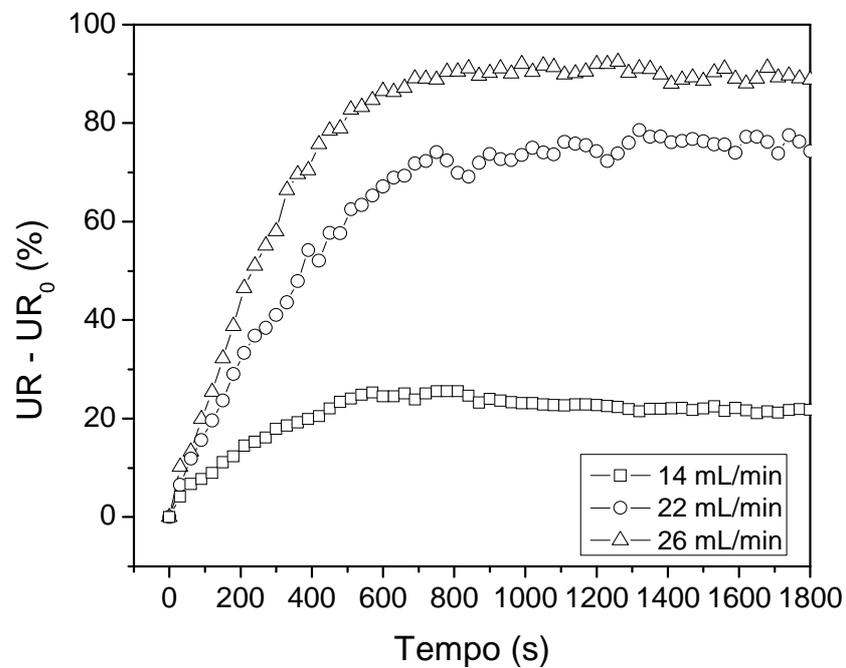


Figura B8 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a evaporação de água; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

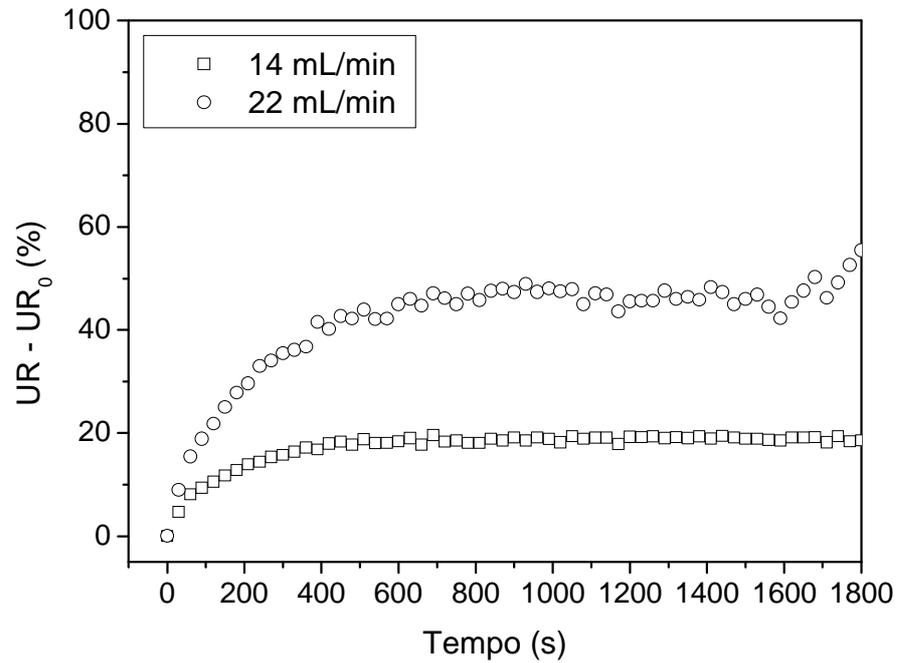


Figura B9 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de lodo de esgoto; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

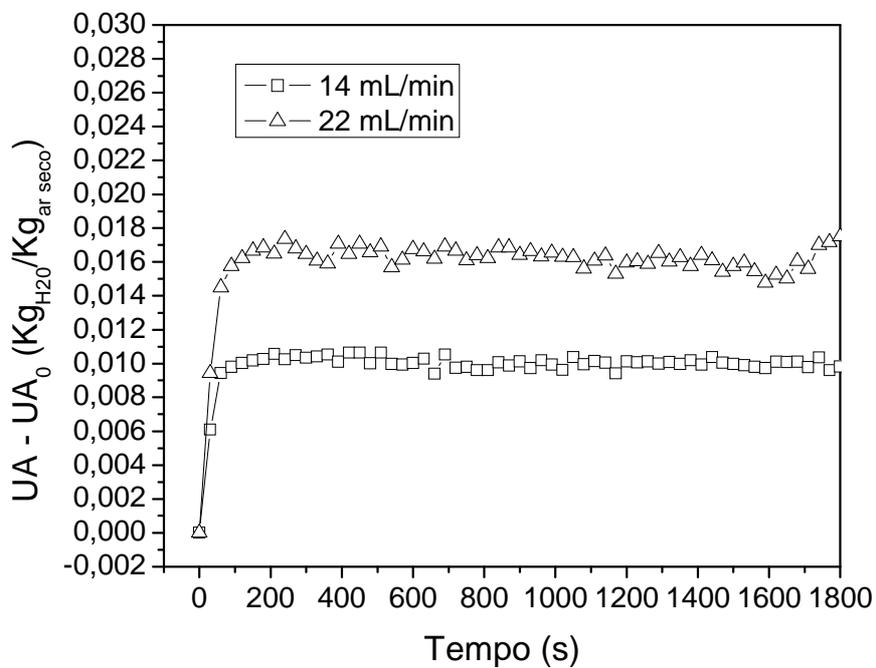


Figura B10 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de lodo de esgoto; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

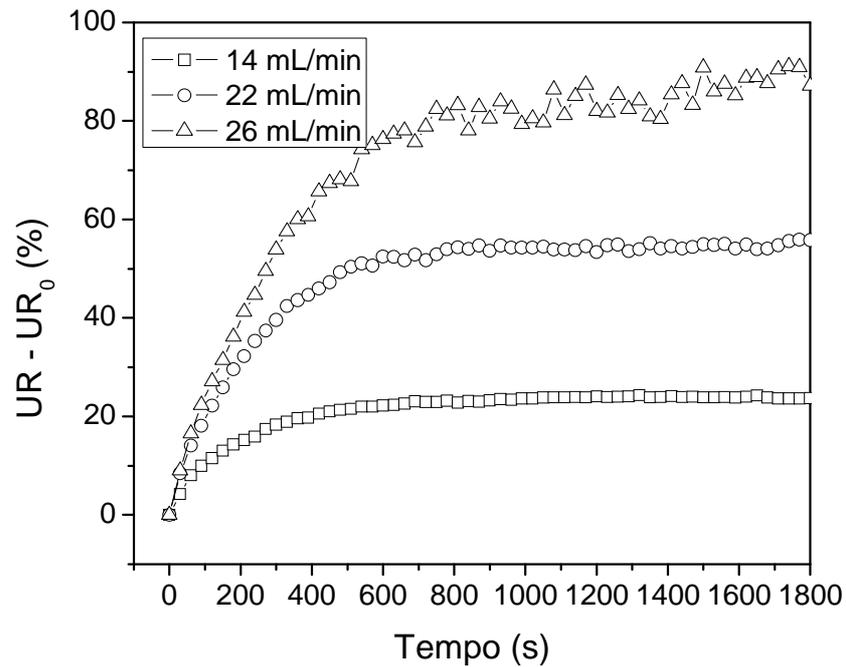


Figura B11 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de lodo de esgoto; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

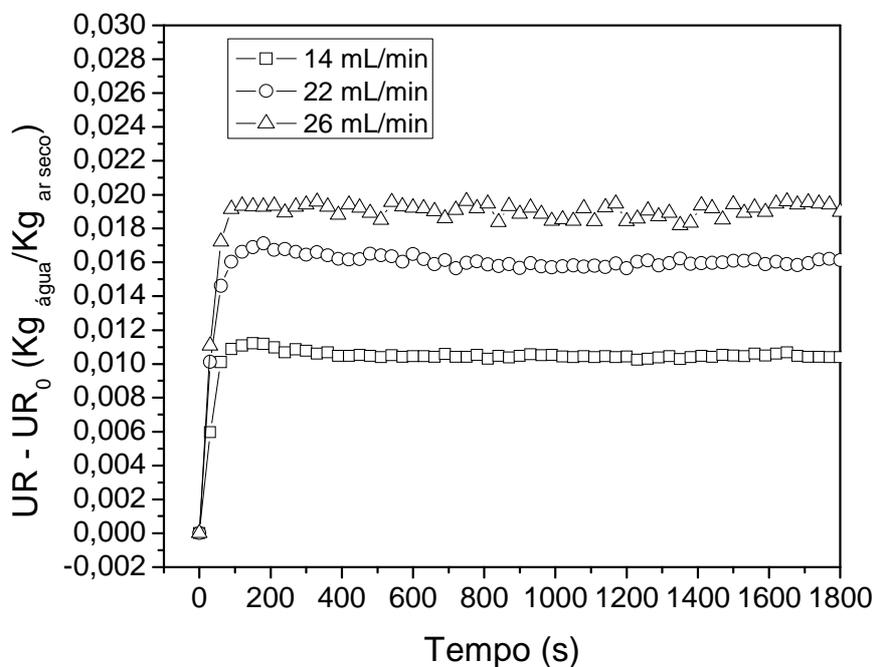


Figura B12 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de lodo de esgoto; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

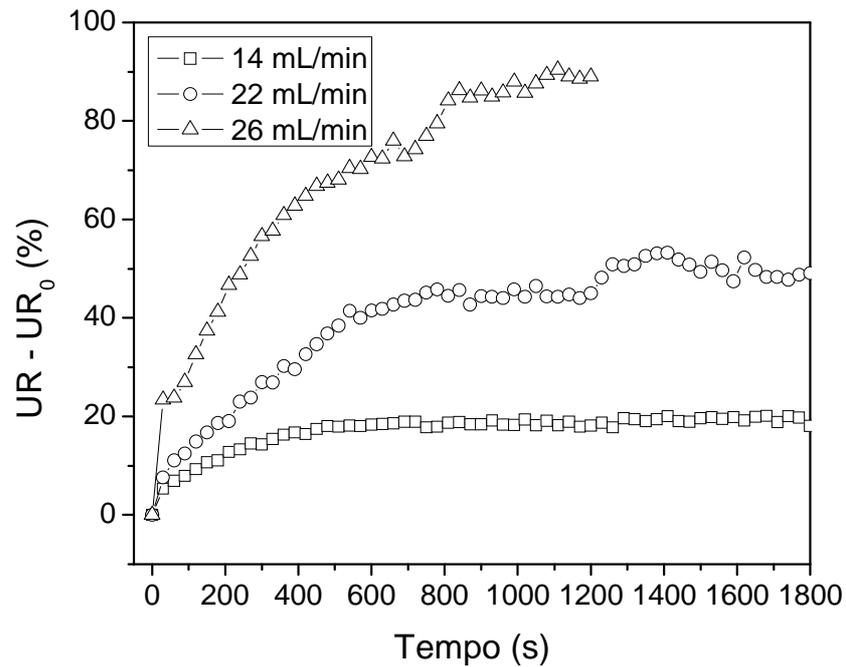


Figura B13 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de lodo de esgoto; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

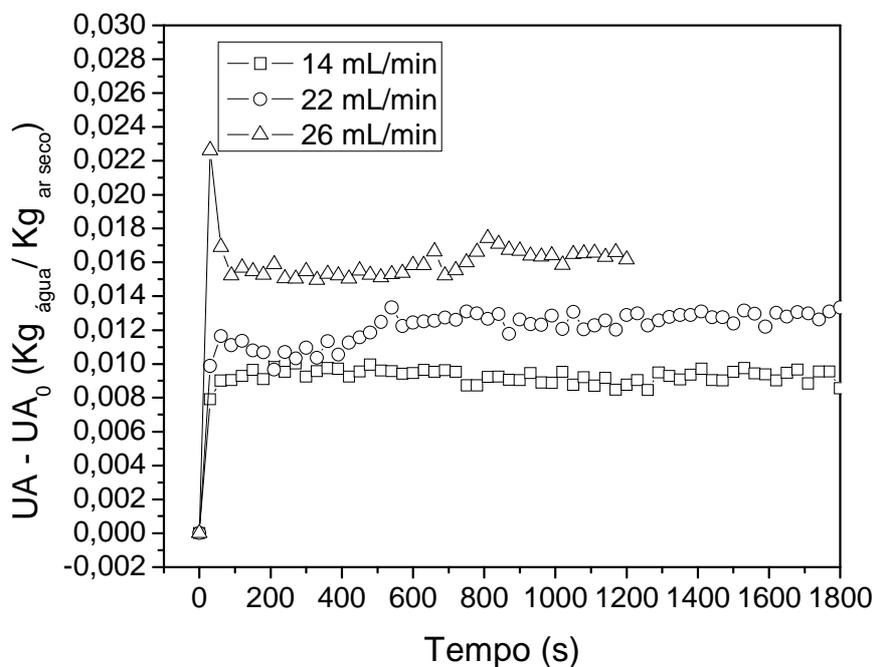


Figura B14 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de lodo de esgoto; $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

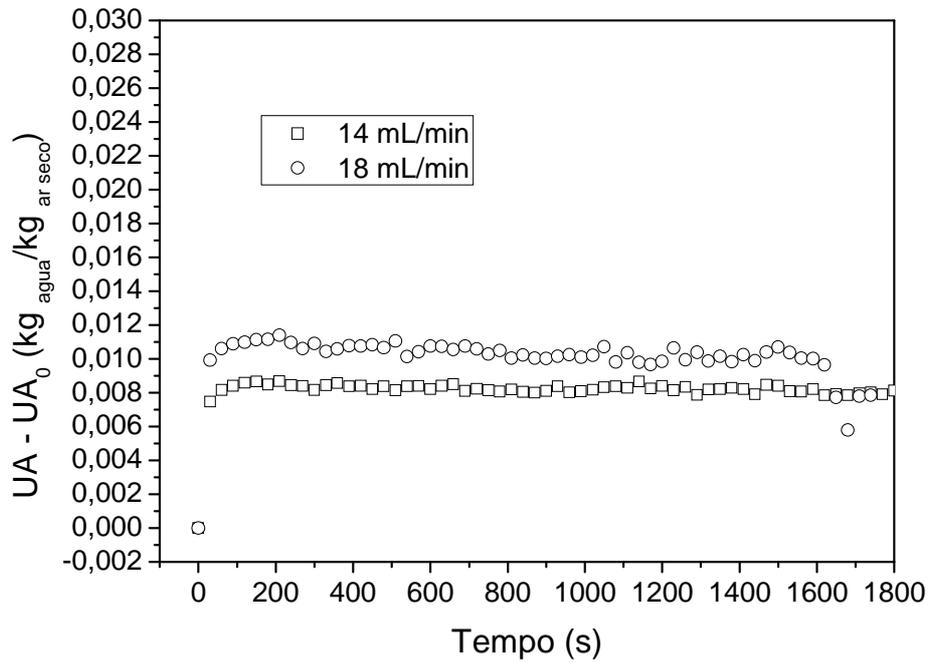


Figura B15 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de leite desnatado; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

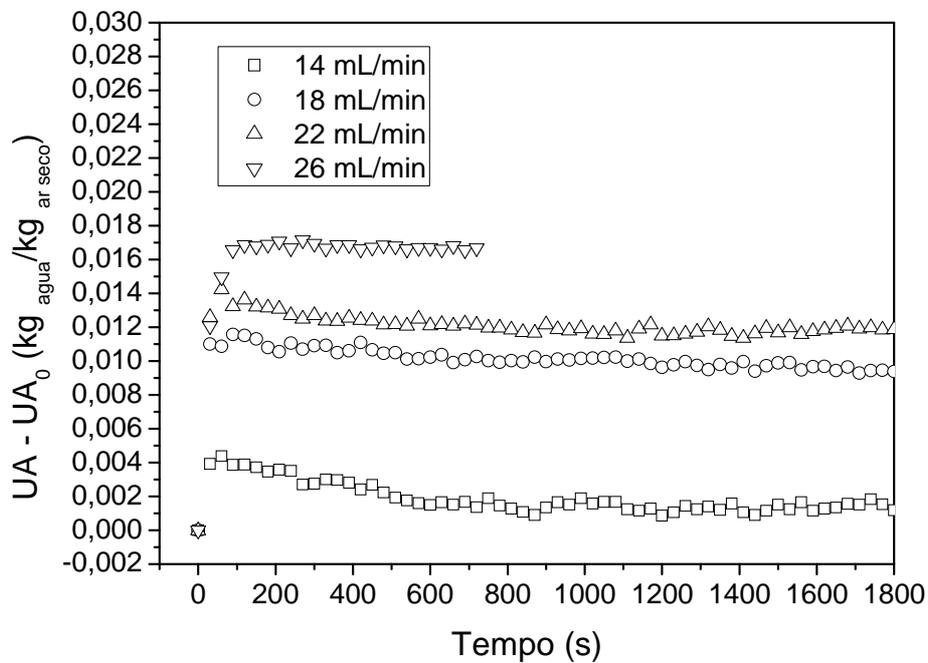


Figura B16 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de leite desnatado; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

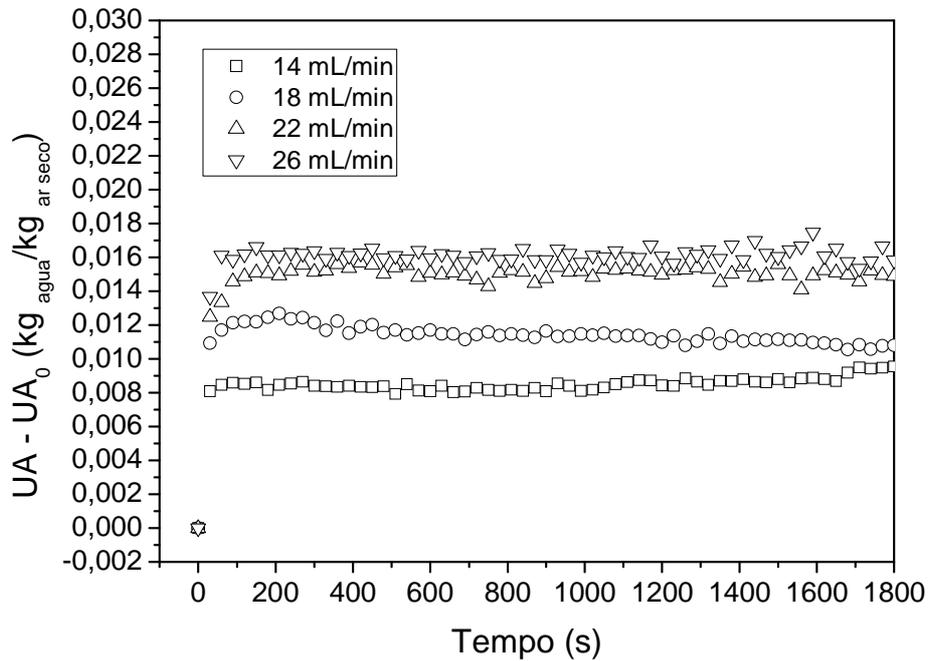


Figura B17 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de leite desnatado; $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

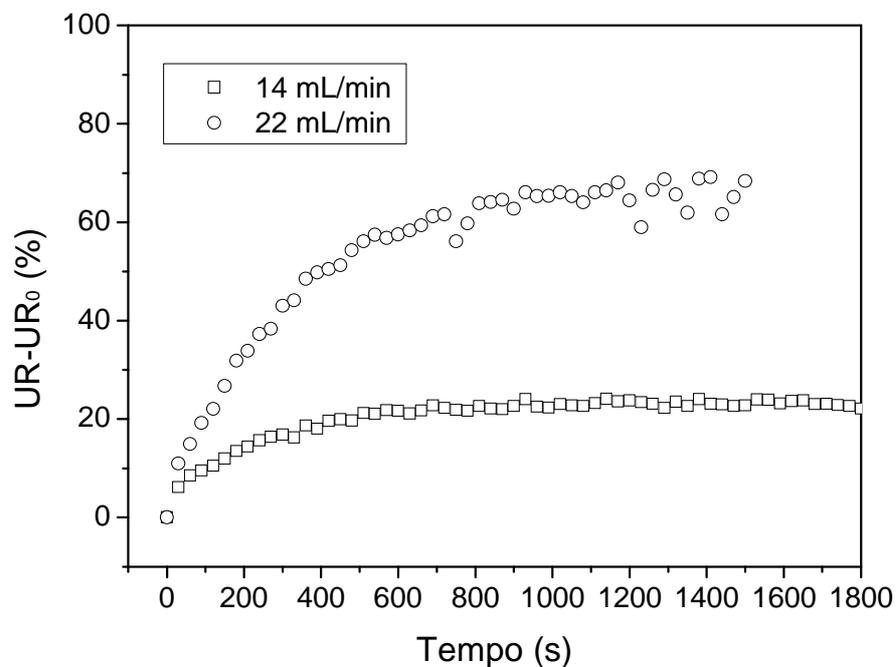


Figura B18 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

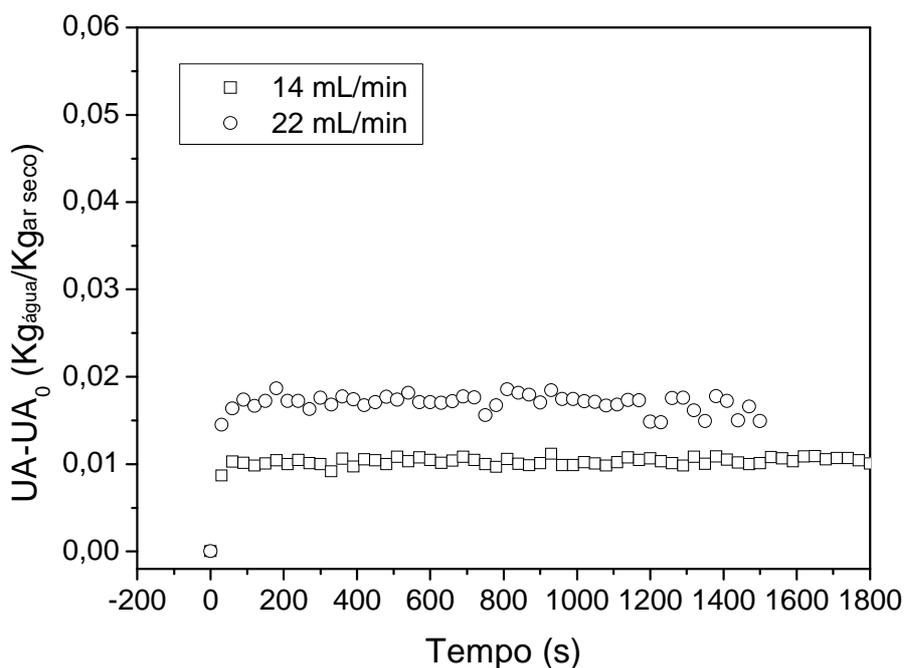


Figura B19 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de cálcio (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

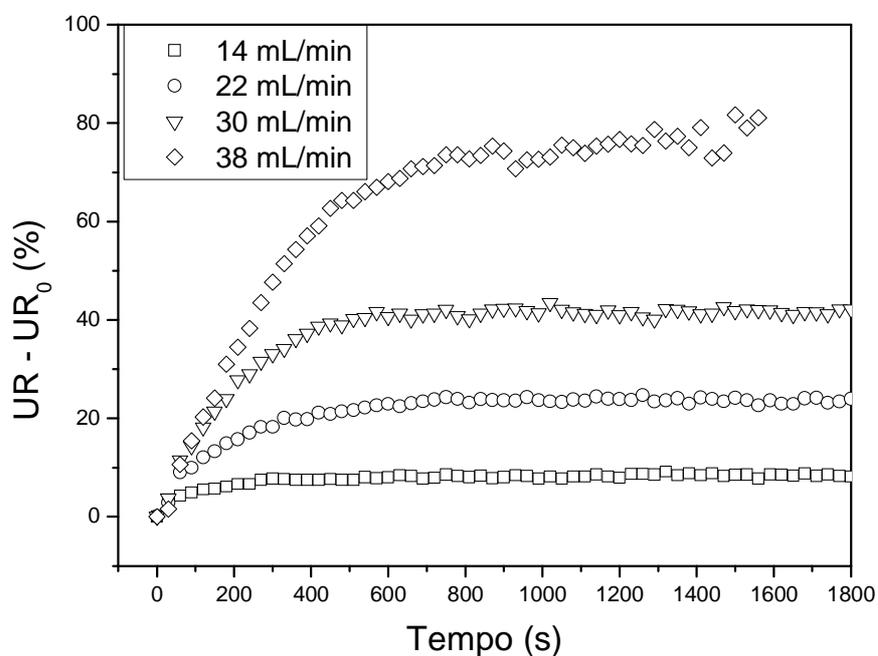


Figura B20 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

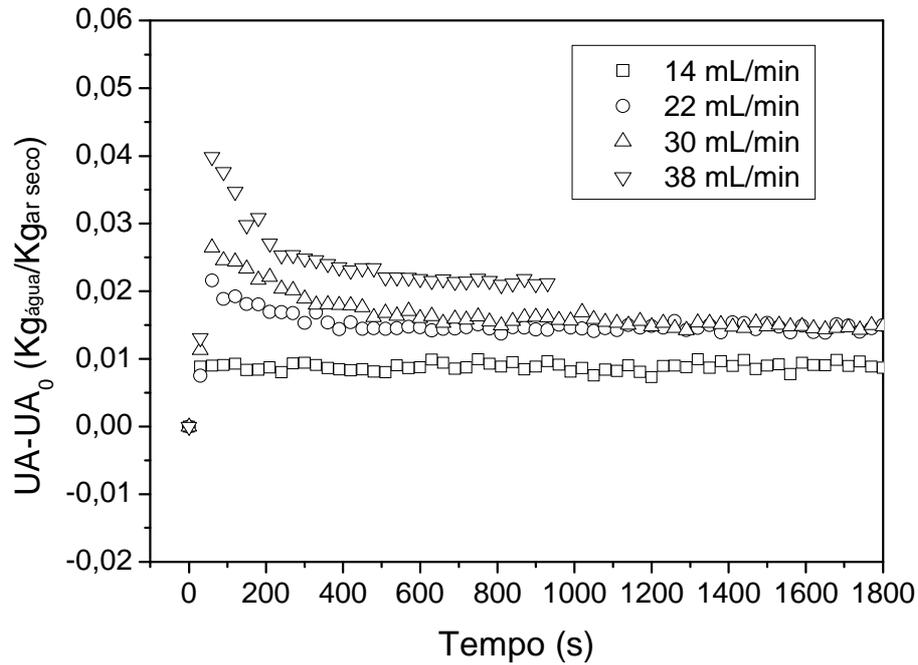


Figura B21 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de cálcio (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

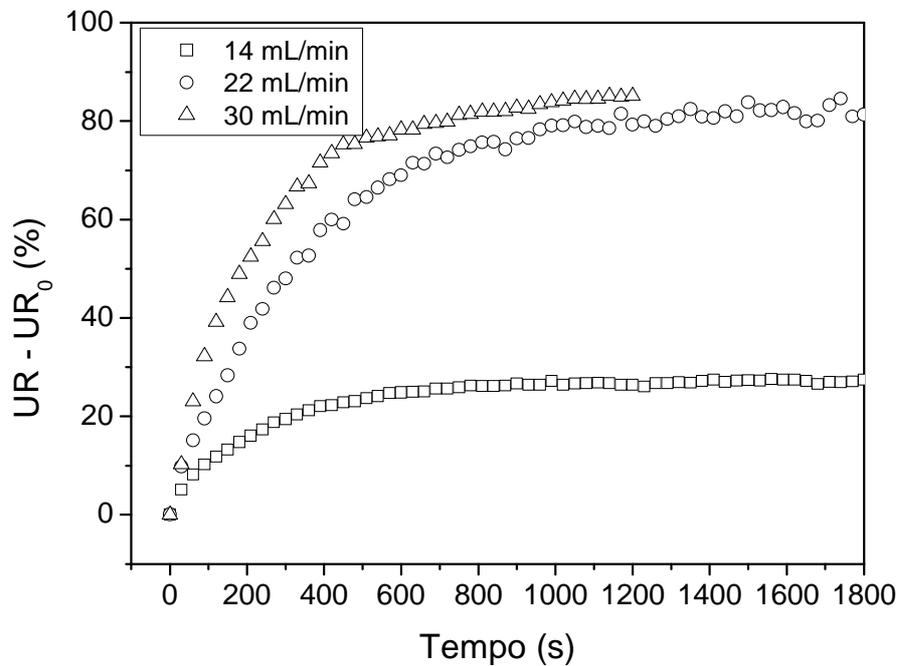


Figura B22 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

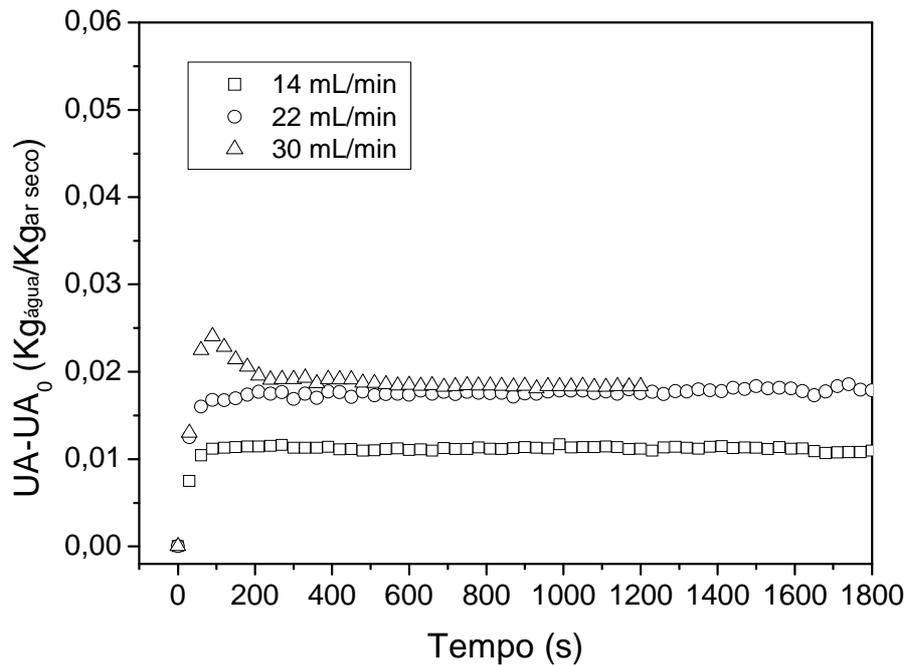


Figura B23 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de cálcio (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

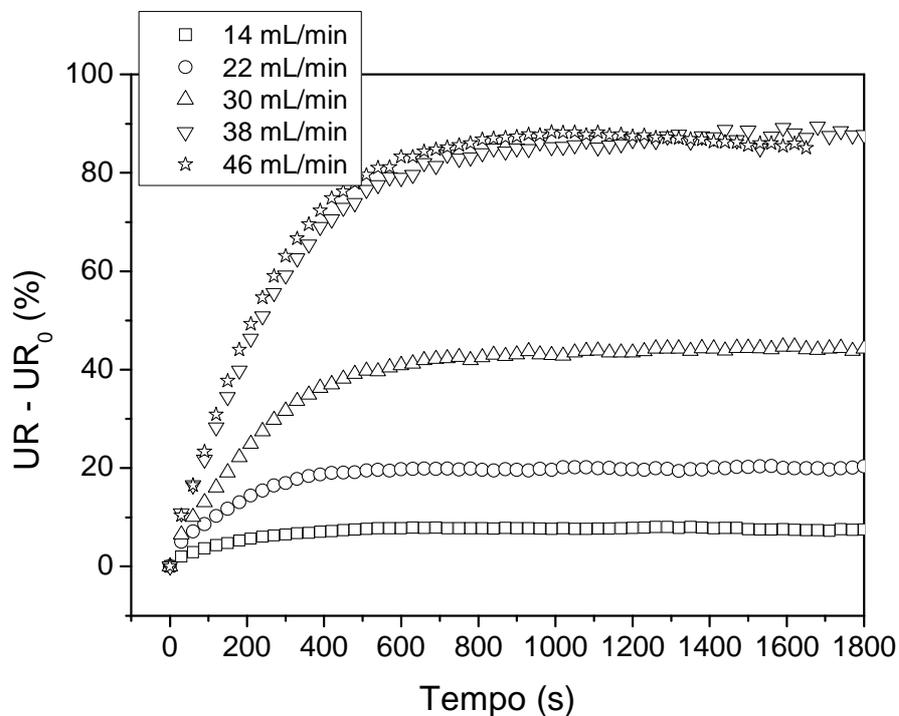


Figura B24 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

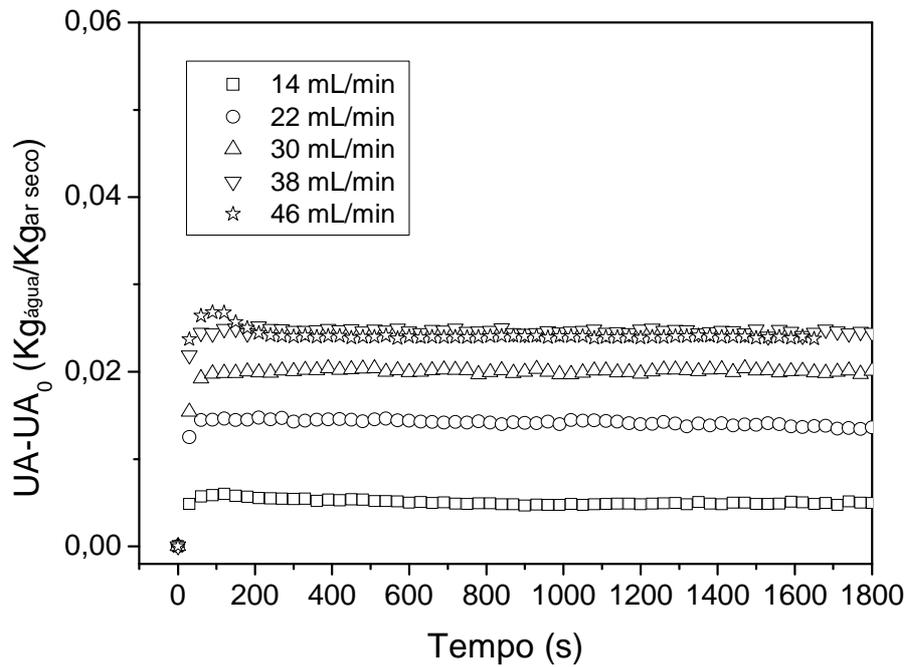


Figura B25 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de cálcio (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

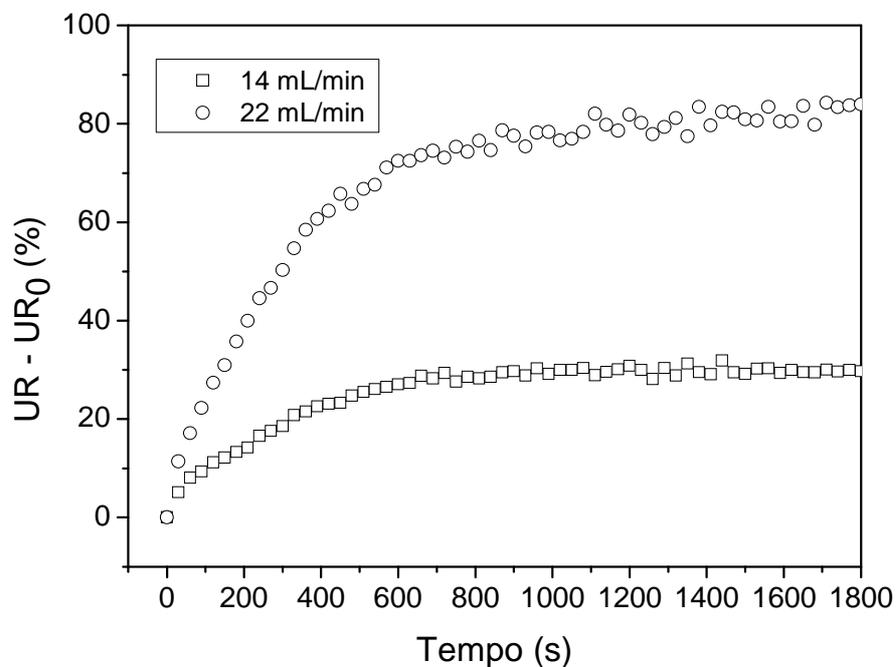


Figura B26 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

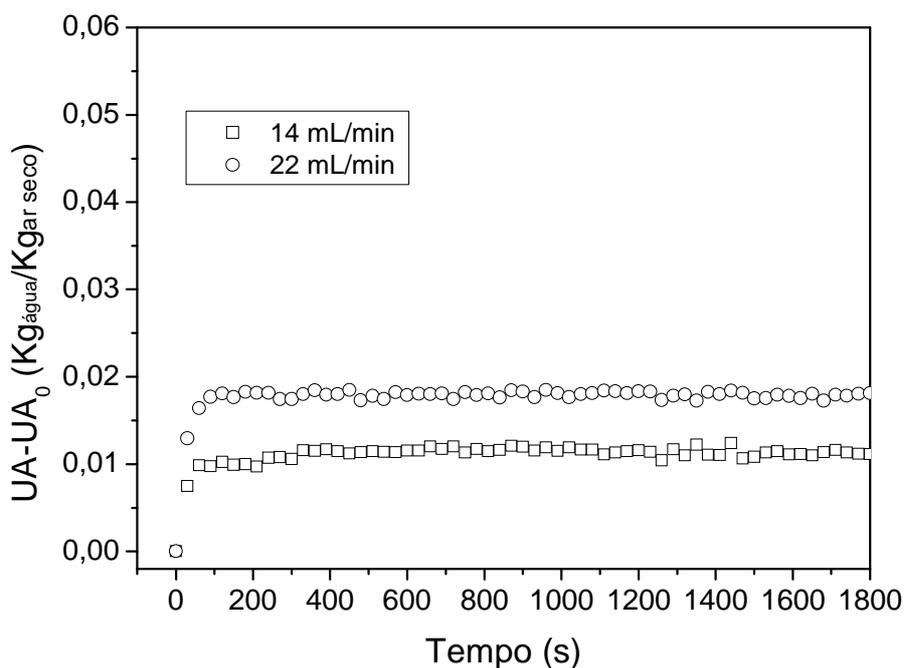


Figura B27 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (3%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

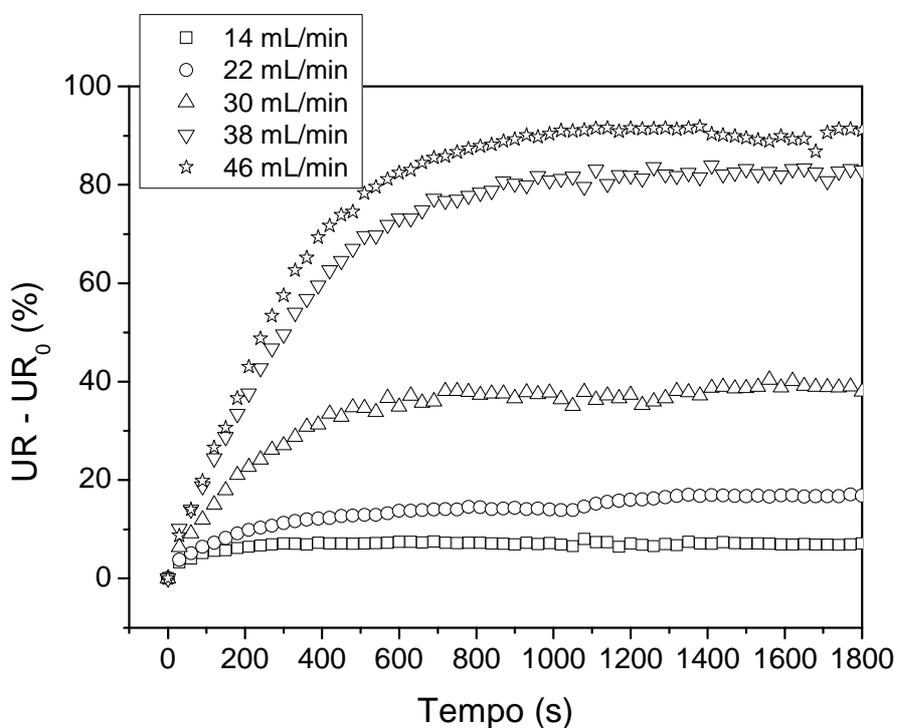


Figura B28 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

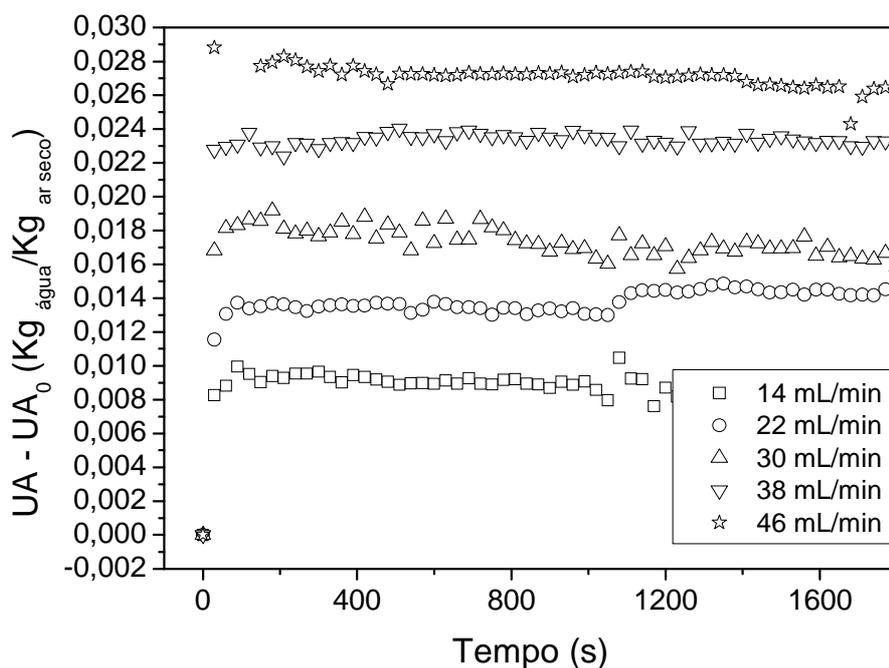


Figura B29 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (3%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

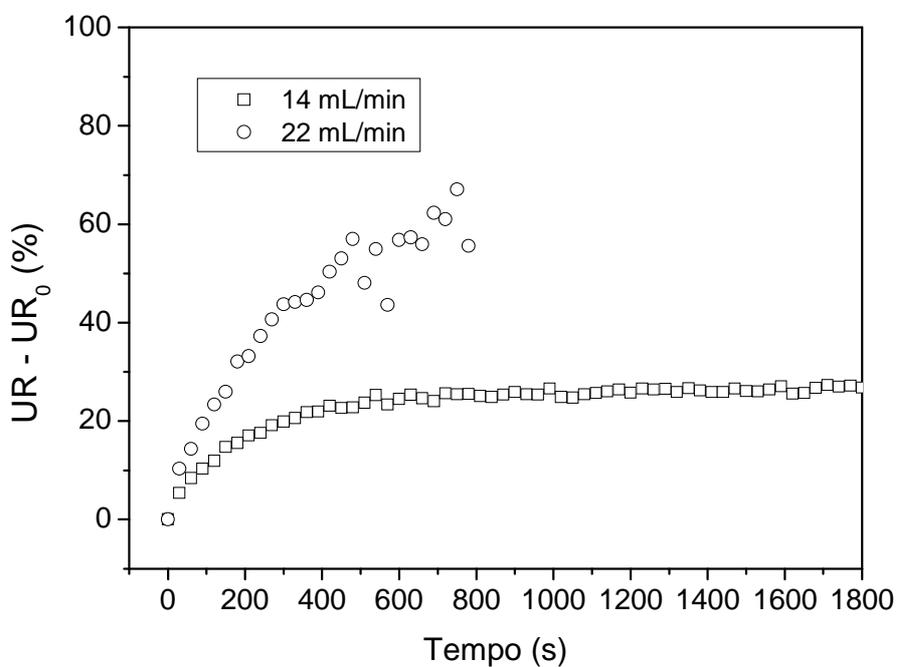


Figura B30 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

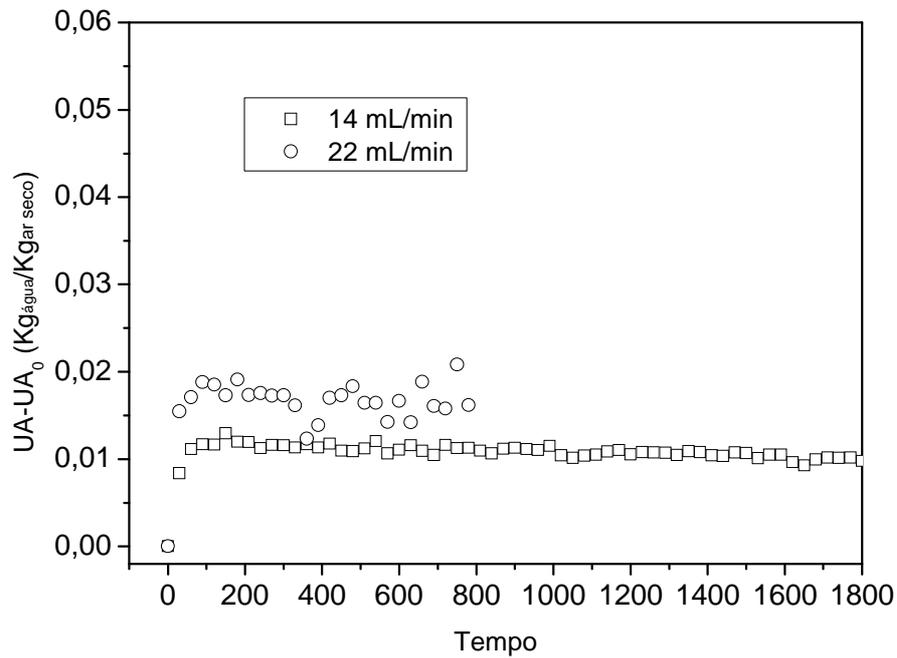


Figura B31 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

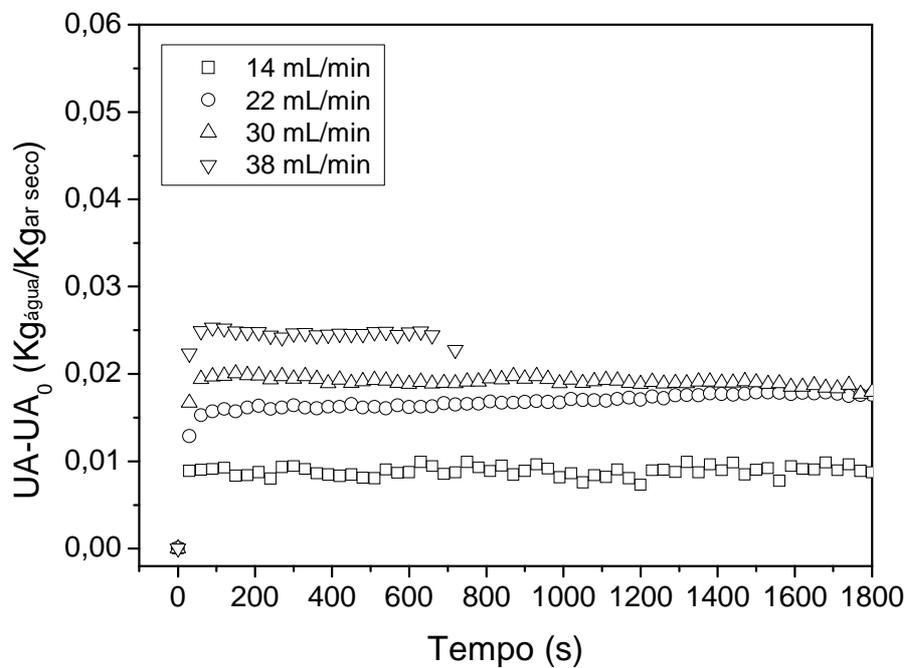


Figura B32 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

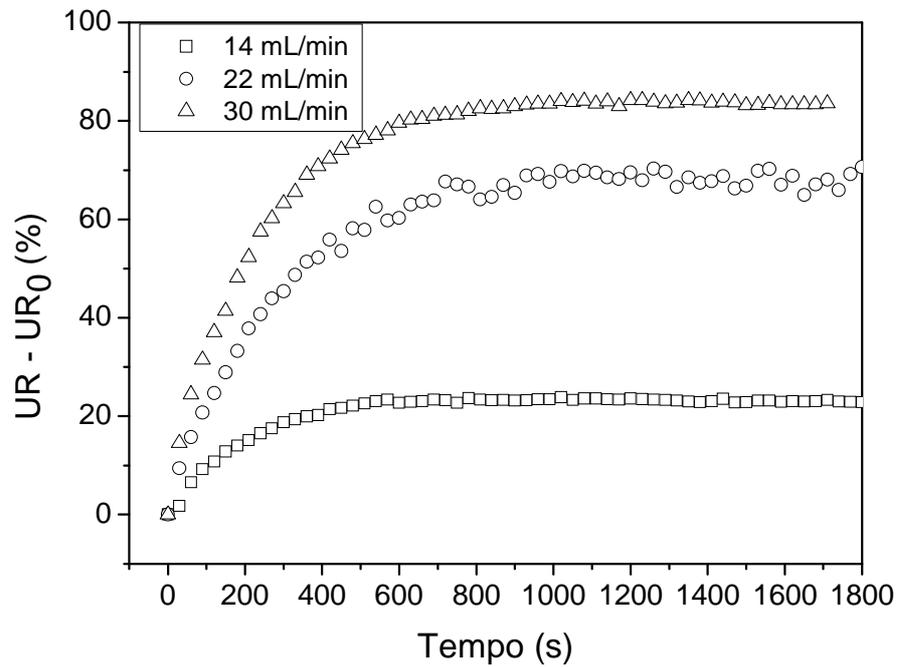


Figura B33 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

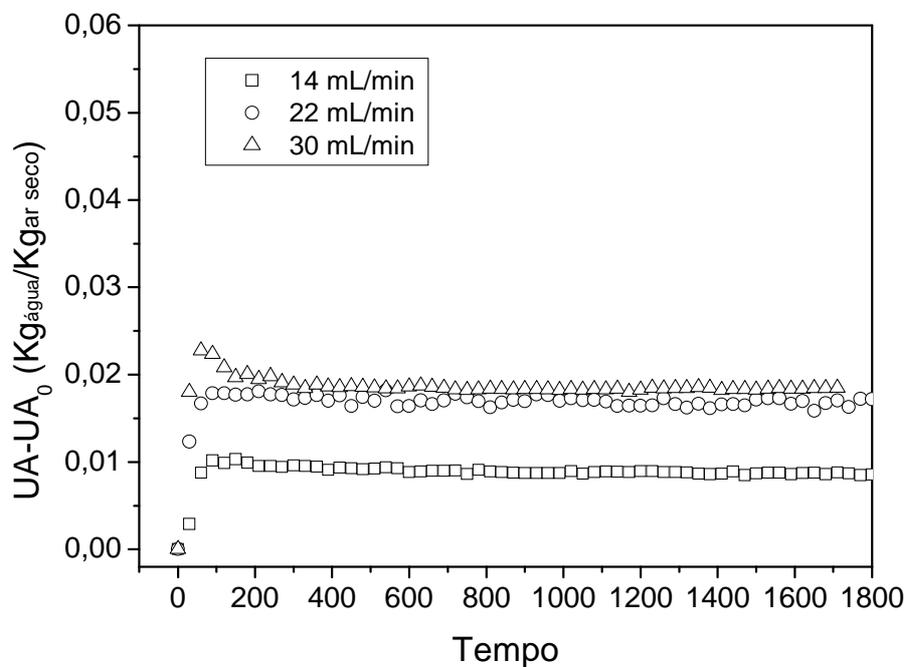


Figura B34 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

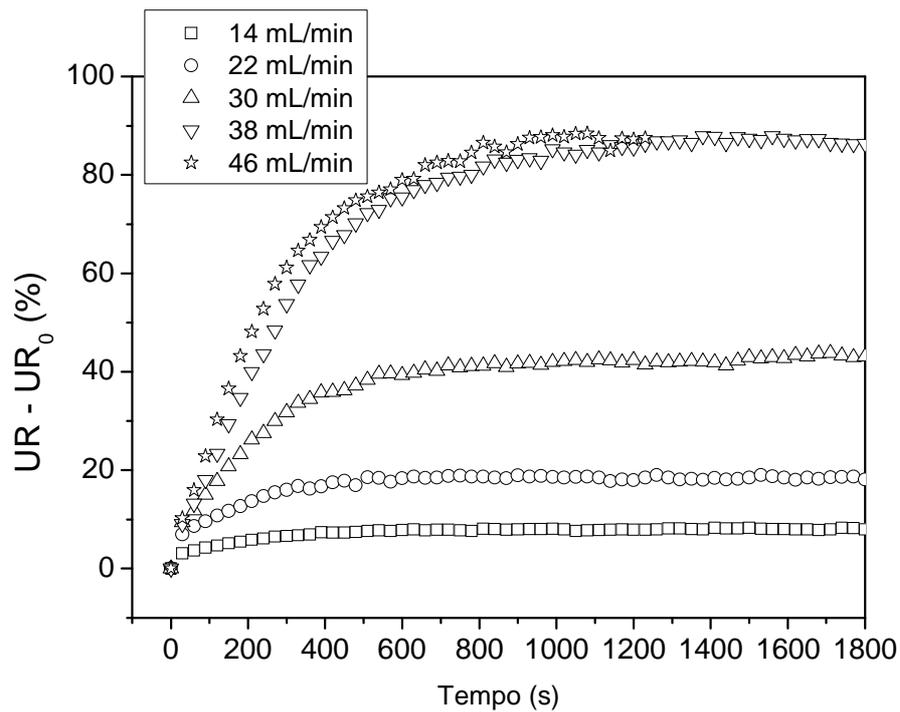


Figura B35 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

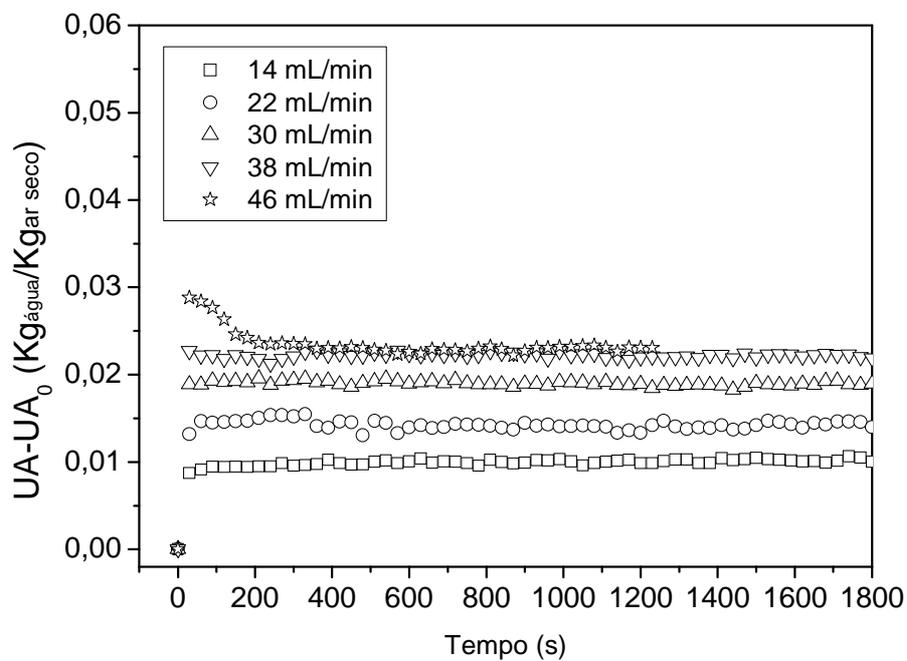


Figura B36 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

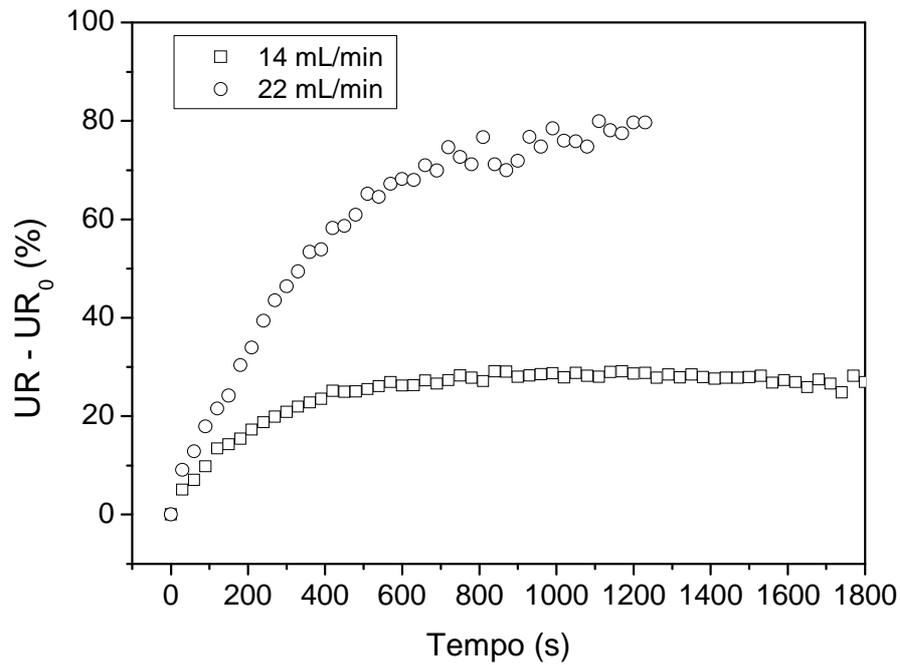


Figura B37 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

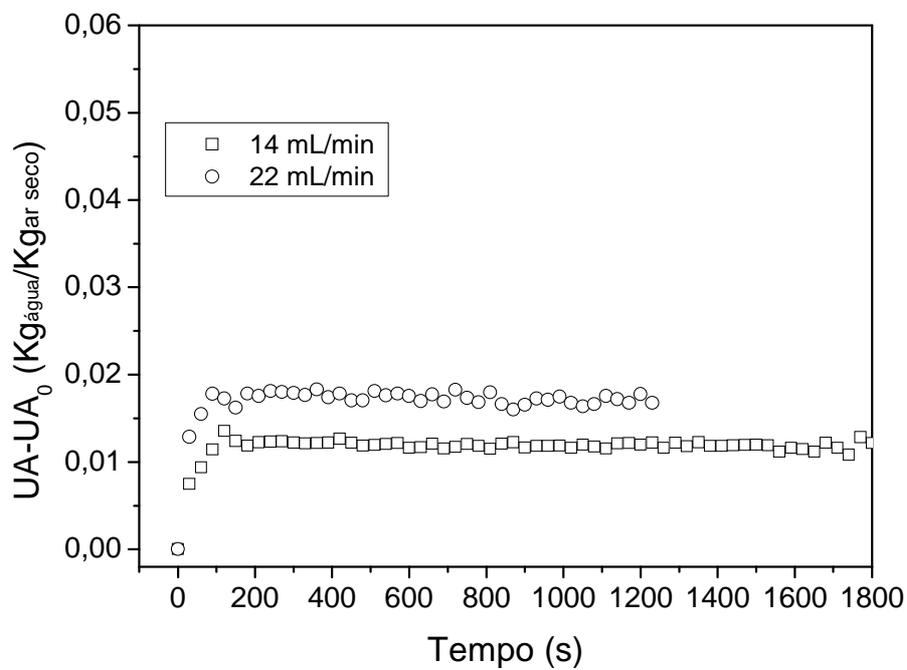


Figura B38 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

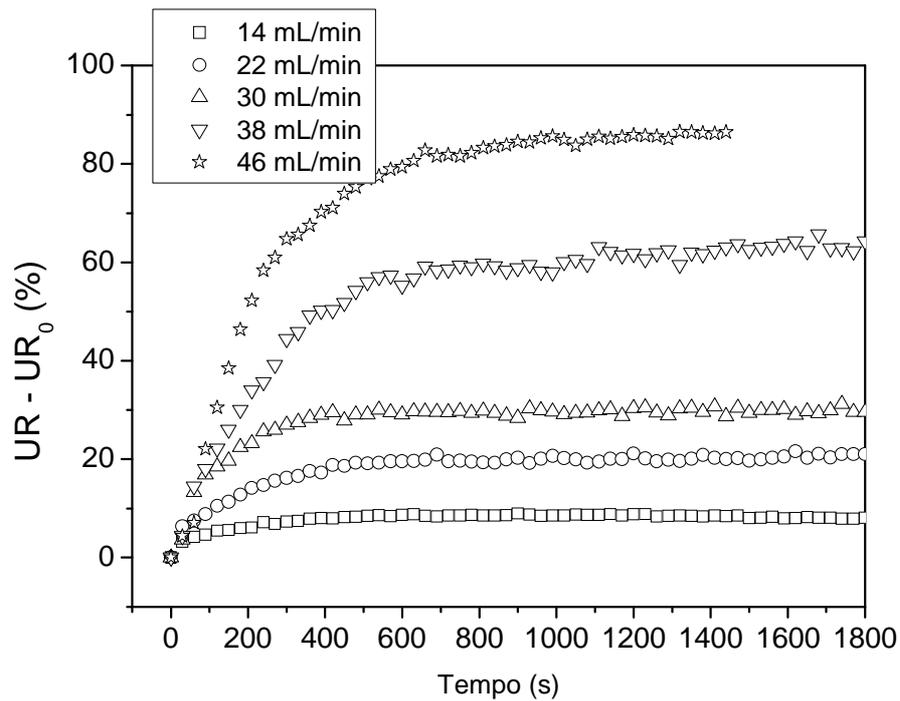


Figura B39 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

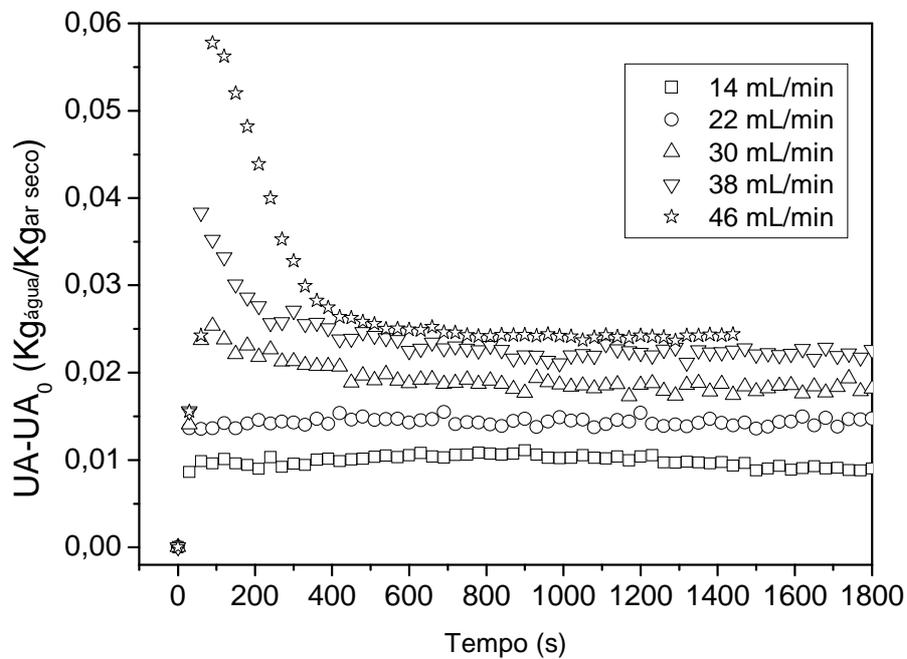


Figura B40 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito vibrofluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (6%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

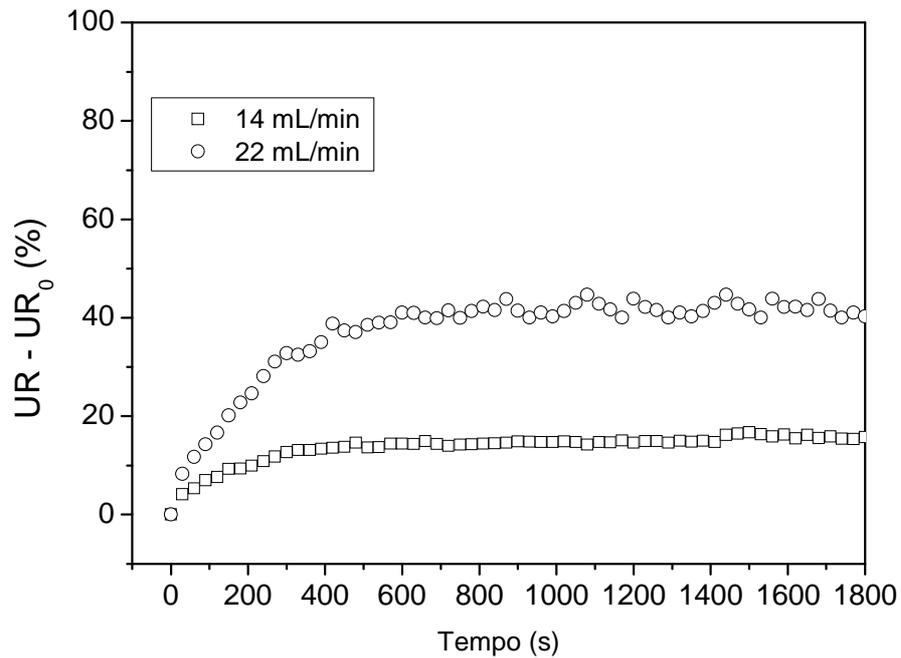


Figura B41 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

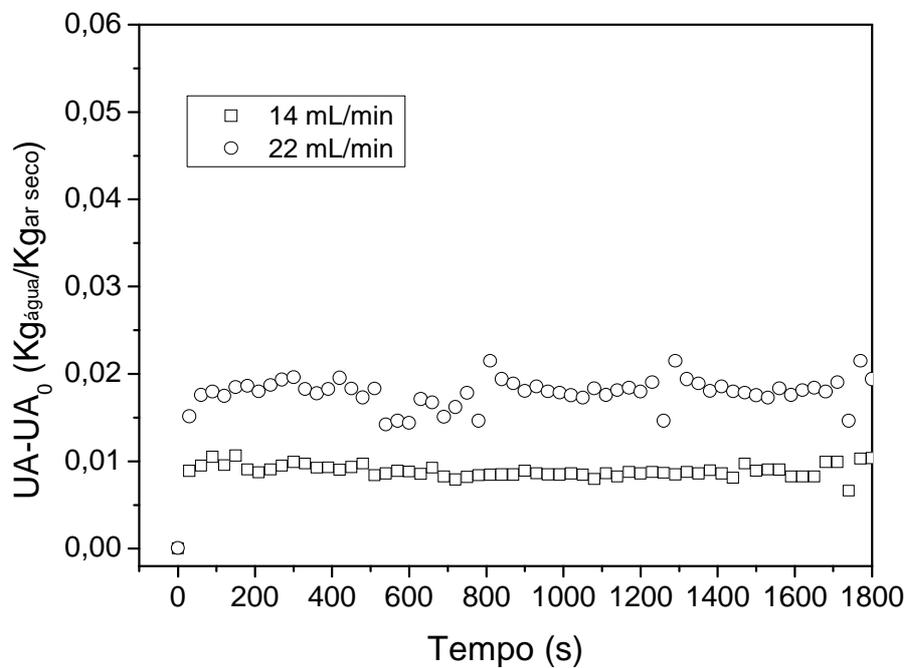


Figura B42 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$.

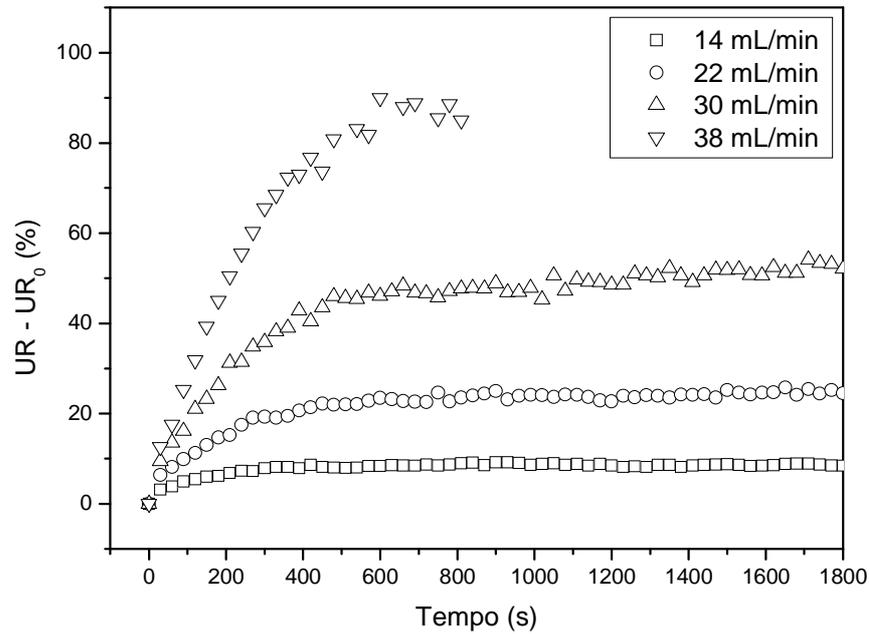


Figura B43 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

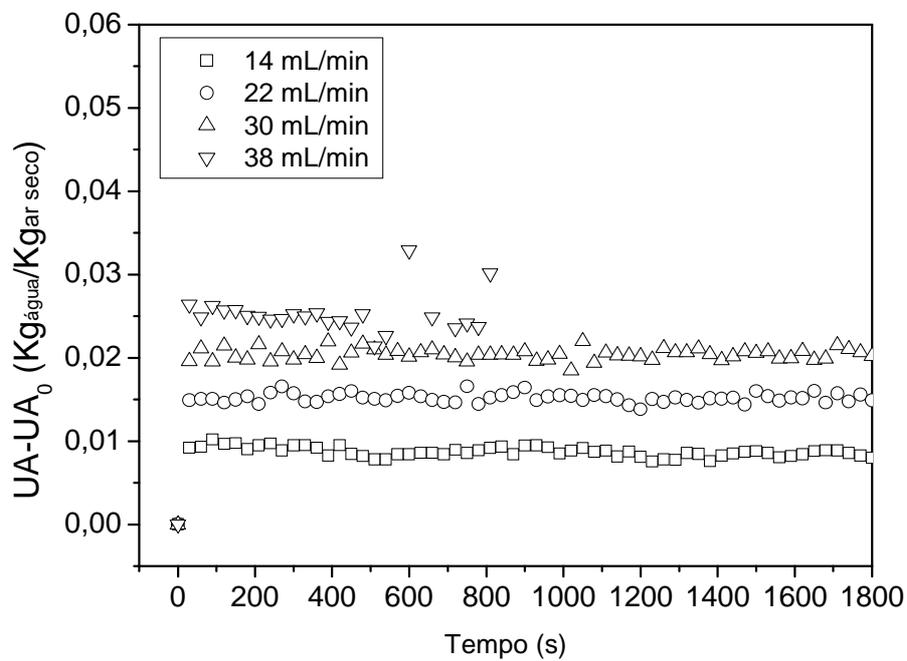


Figura B44 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$.

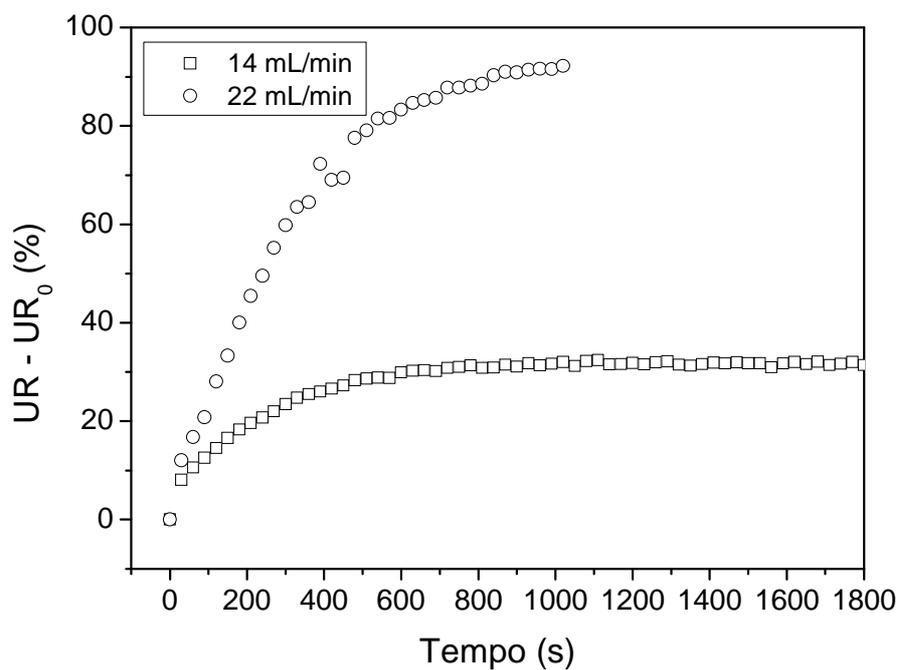


Figura B45 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

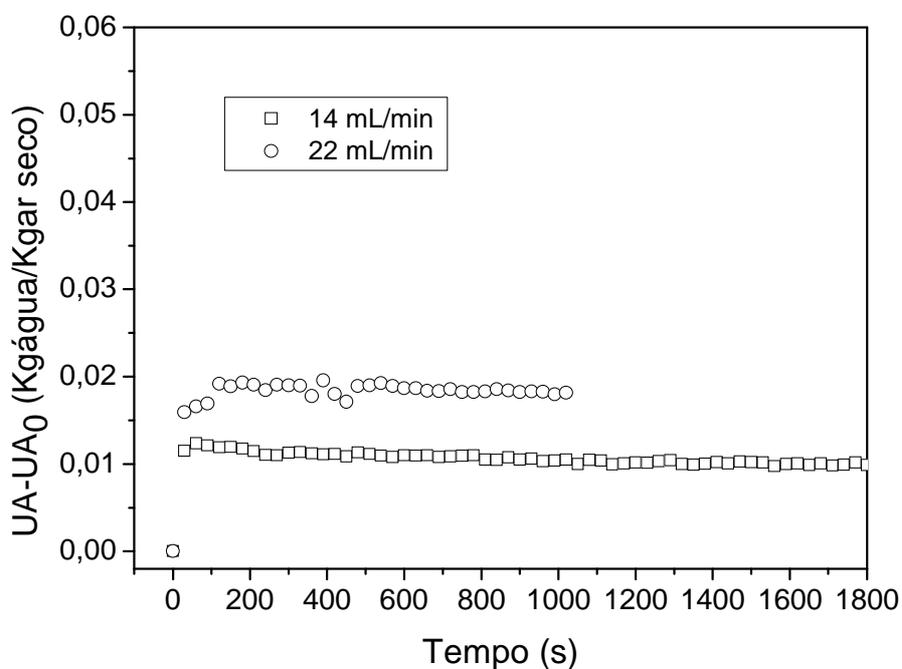


Figura B46 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

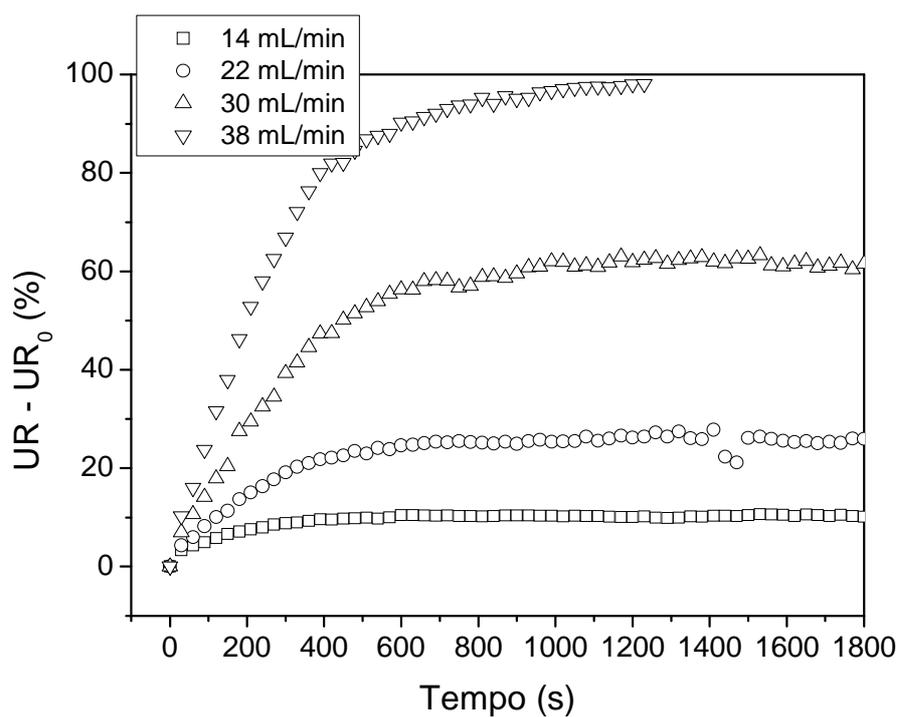


Figura B47 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

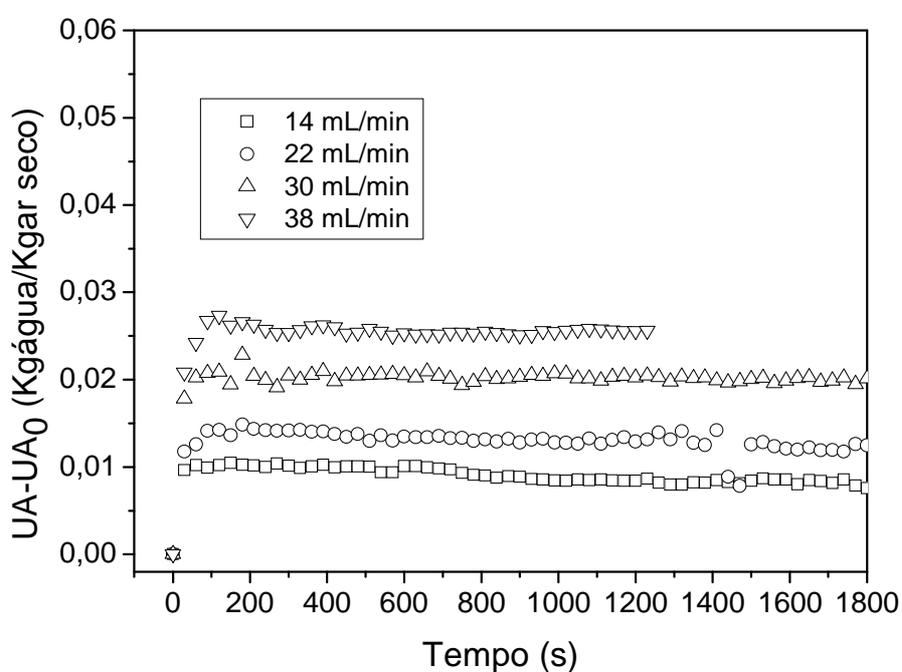


Figura B48 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,015 \text{ m}$ e $f = 8,14 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

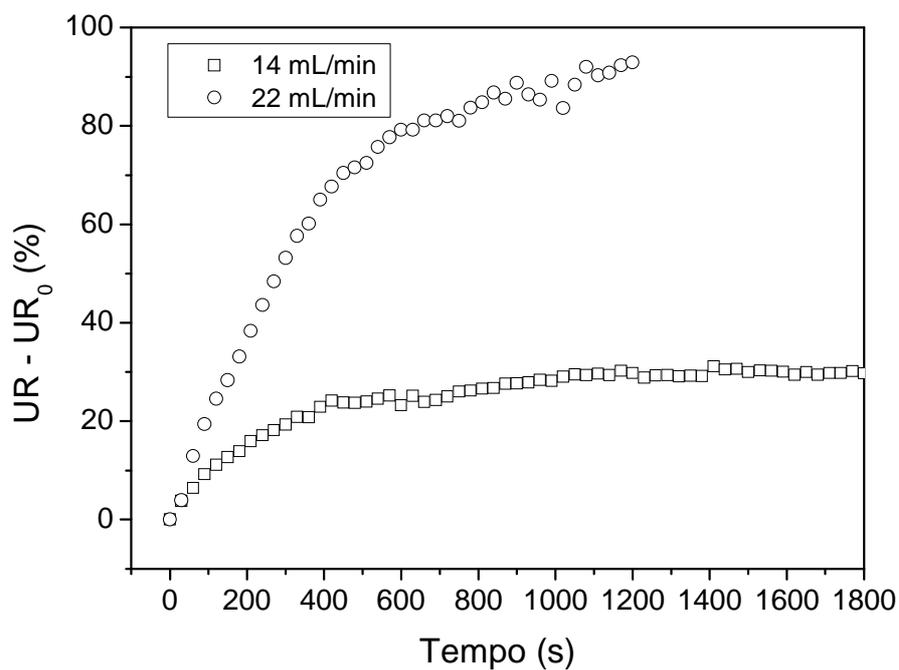


Figura B49 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

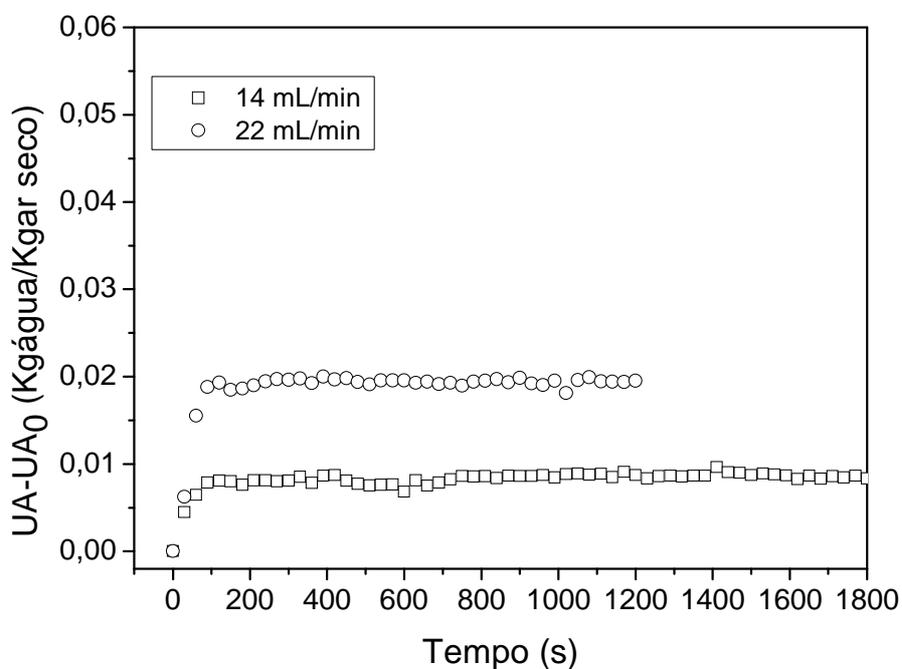


Figura B50 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 80^\circ\text{C}$, $U_s = 1,33 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

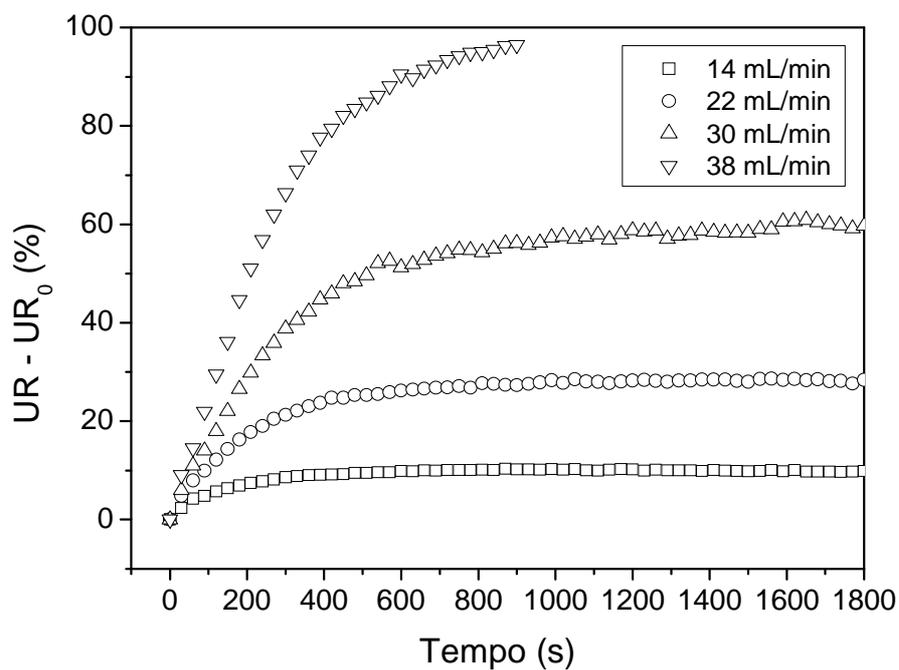


Figura B51 - Umidade relativa ($UR - UR_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

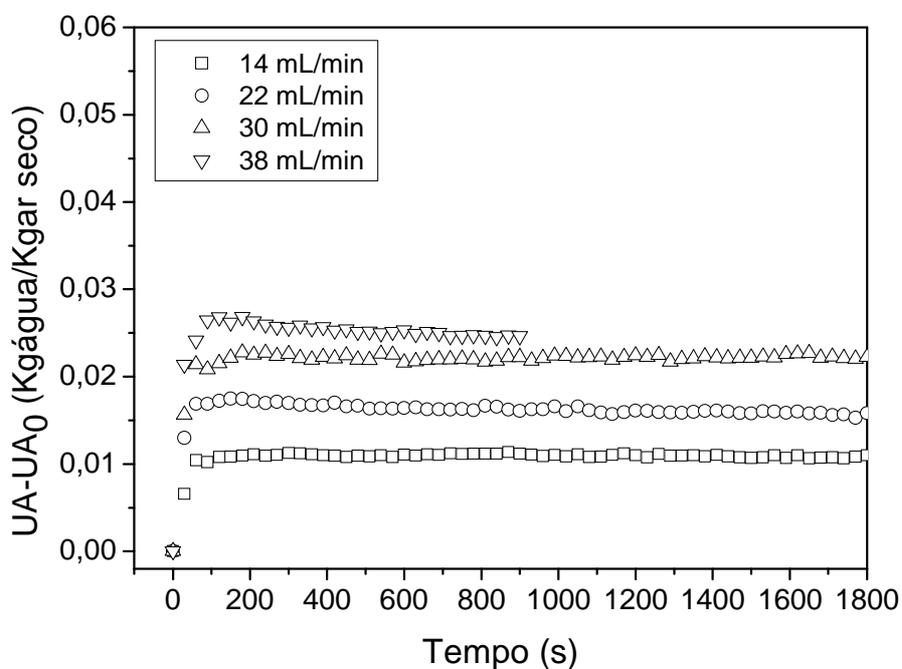


Figura B52 - Umidade absoluta ($UA - UA_0$) na saída do leito fluidizado versus tempo durante a secagem de Carbonato de Cálcio (9%); $T = 100^\circ\text{C}$, $U_s = 1,55 \text{ m/s}$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 18,20 \text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

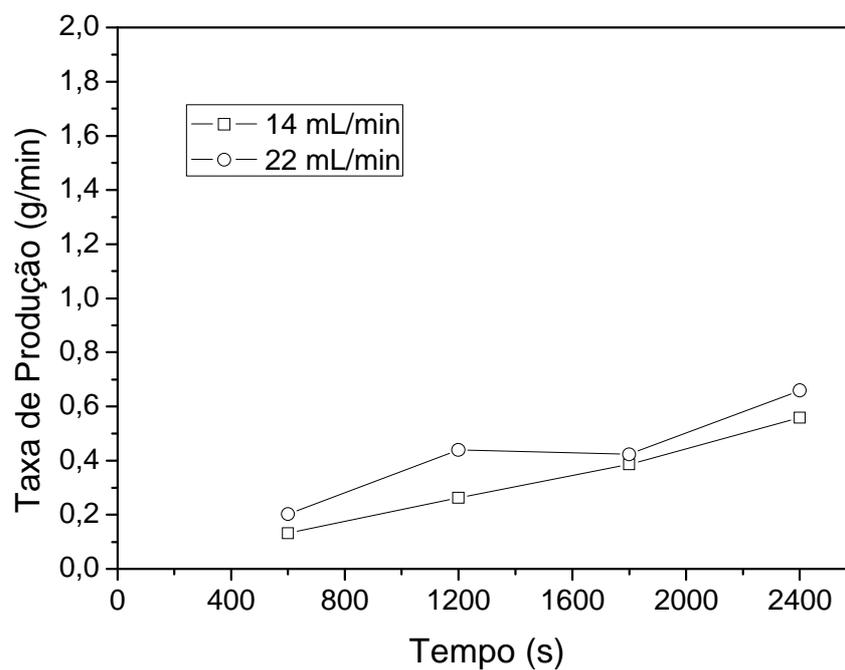


Figura B53 – Taxa de produção de pó de lodo de esgoto seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$.

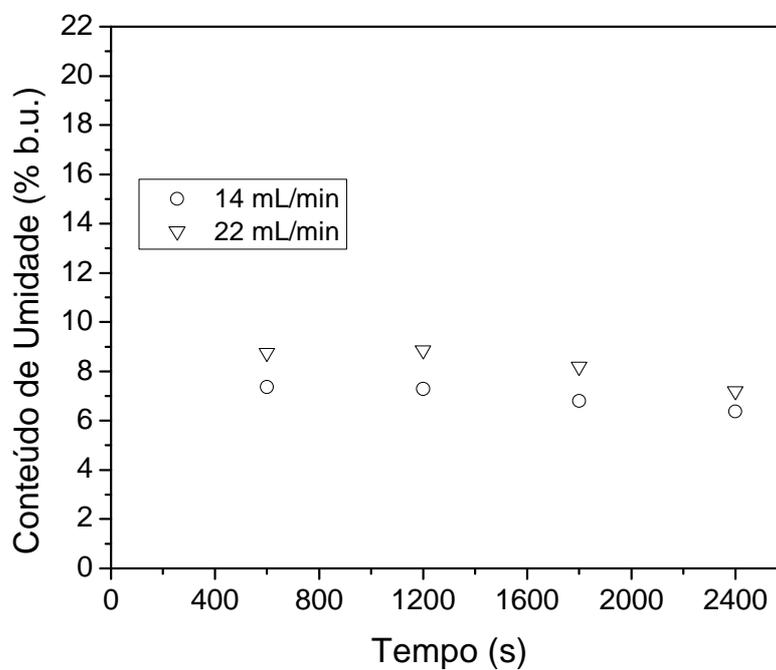


Figura B54 – Conteúdo de umidade do pó seco de lodo de esgoto seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$.

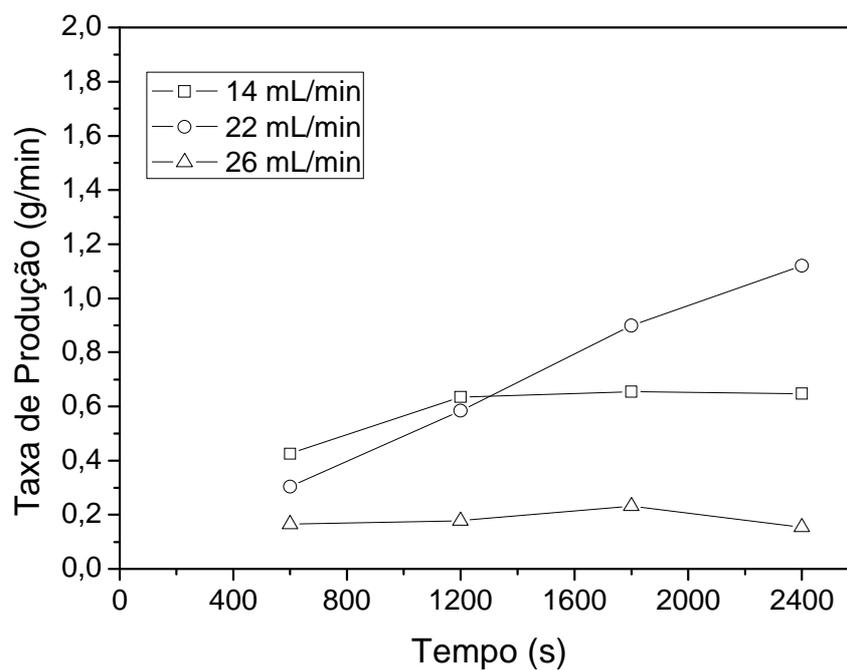


Figura B55 – Taxa de produção de pó de lodo de esgoto seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

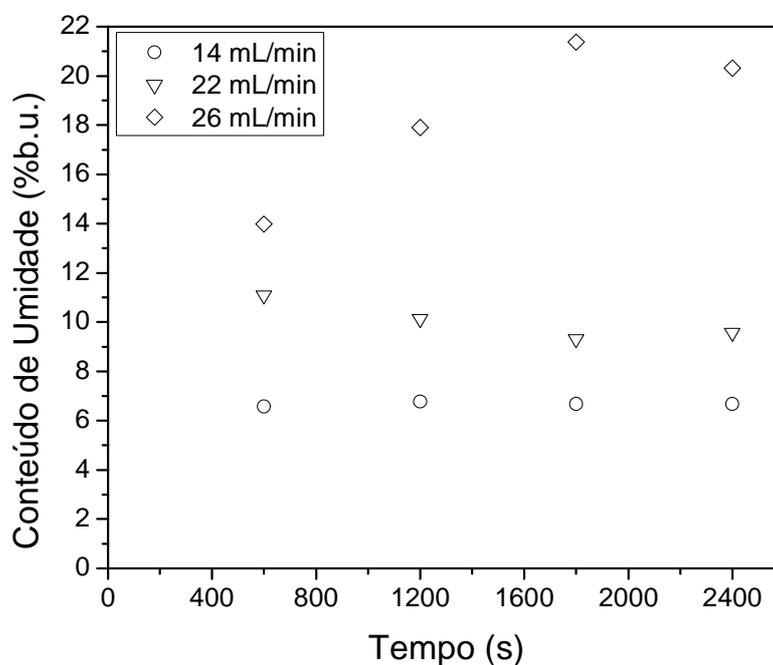


Figura B56 – Conteúdo de umidade de pó de lodo de esgoto seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

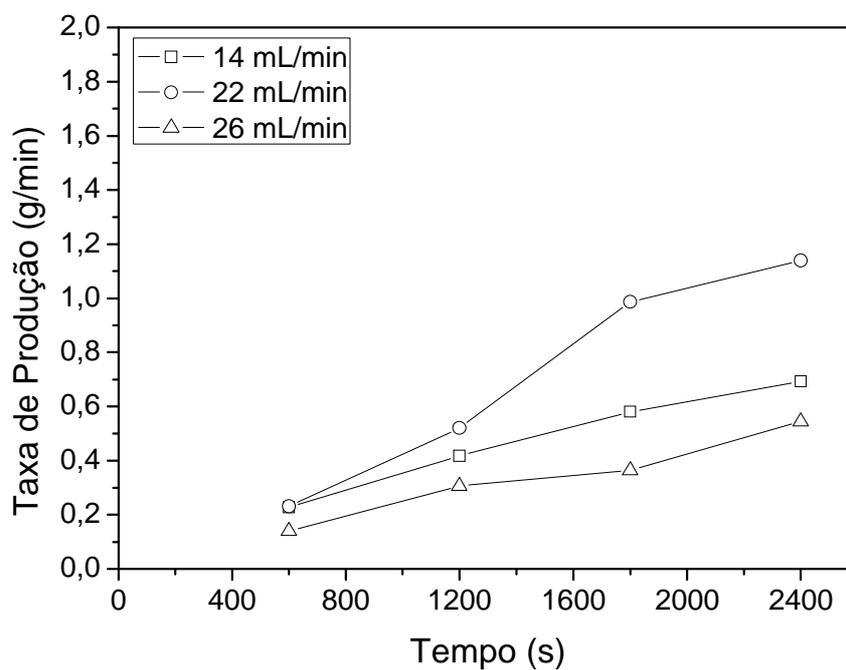


Figura B57 – Taxa de produção de pó de lodo de esgoto seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

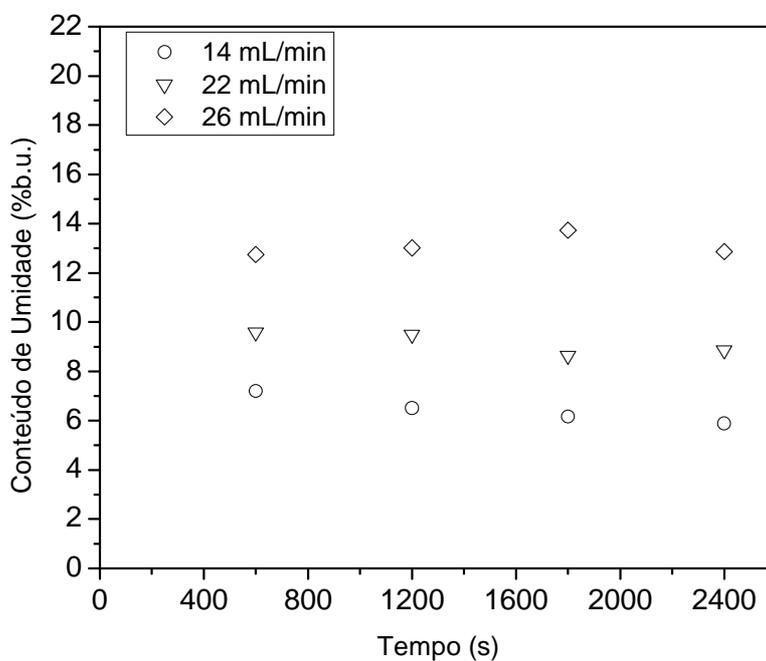


Figura B58 – Conteúdo de umidade de pó de lodo de esgoto seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

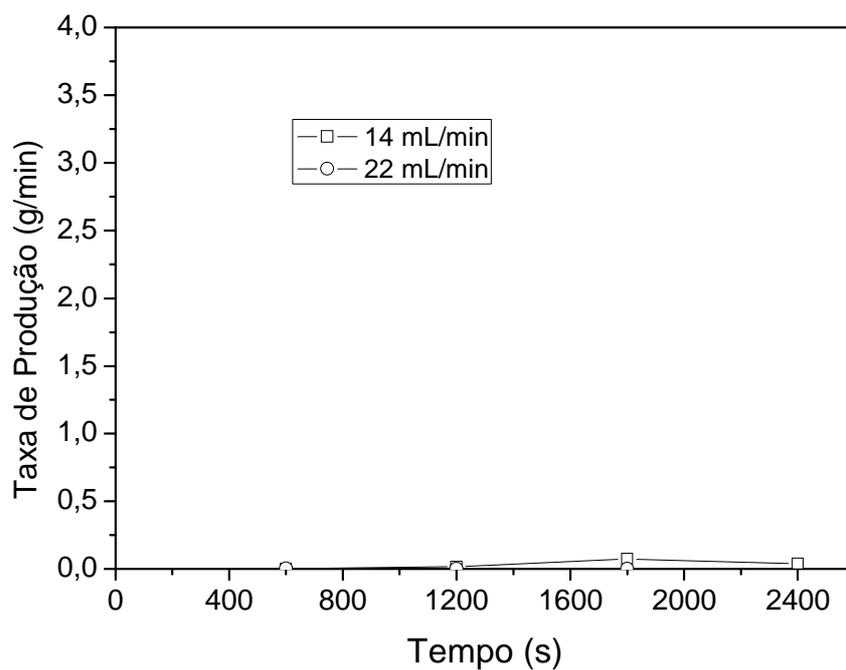


Figura B59 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (3%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$.

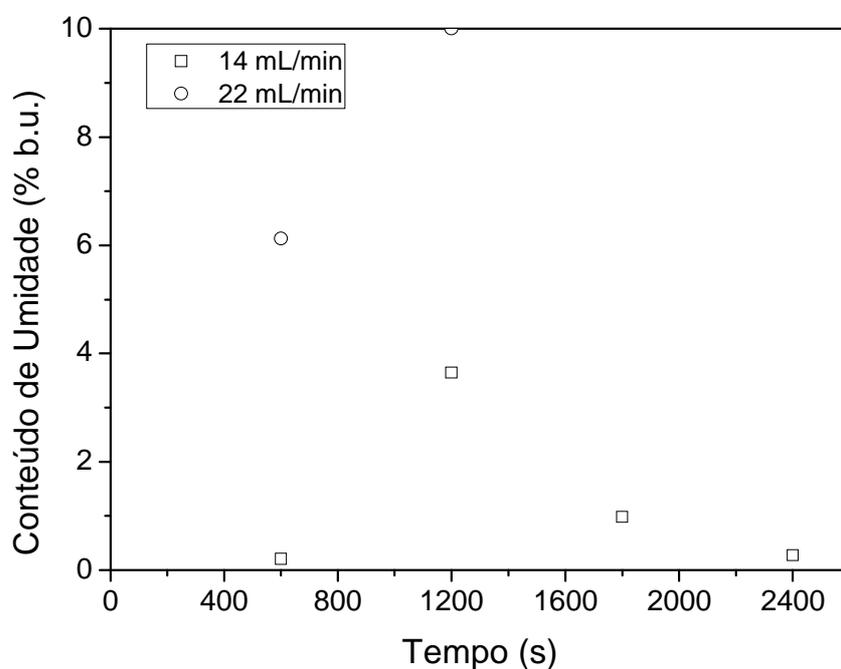


Figura B60 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (3%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$.

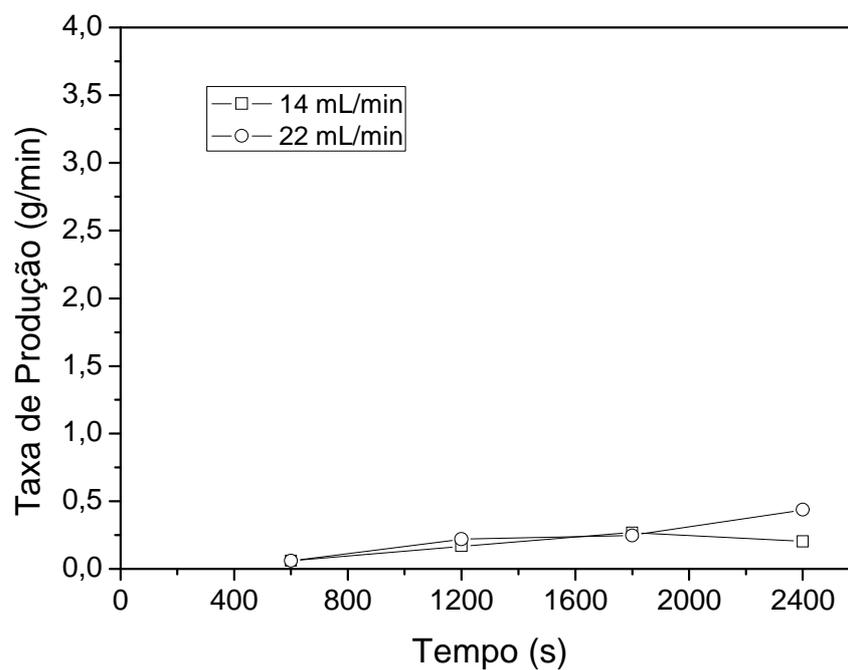


Figura B61 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (3%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

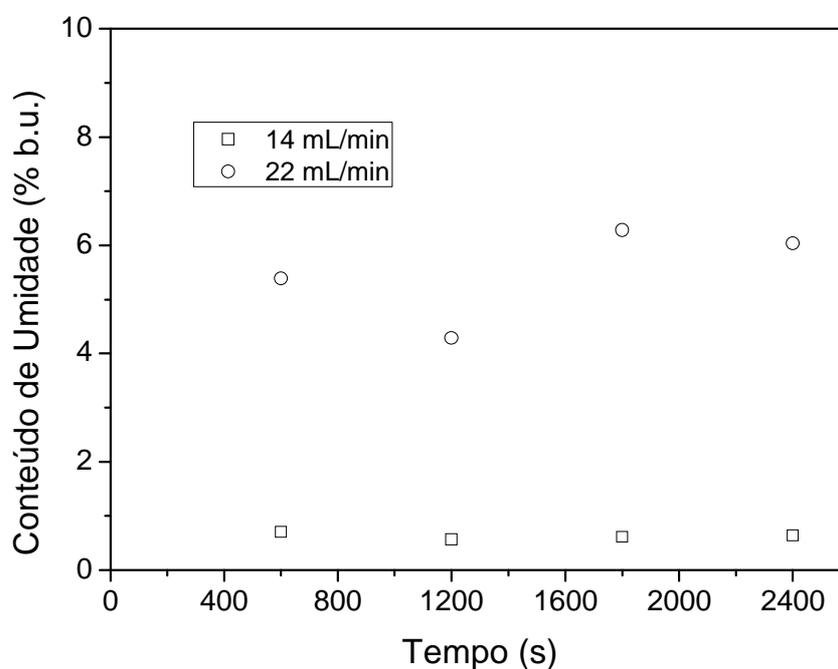


Figura B62 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (3%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

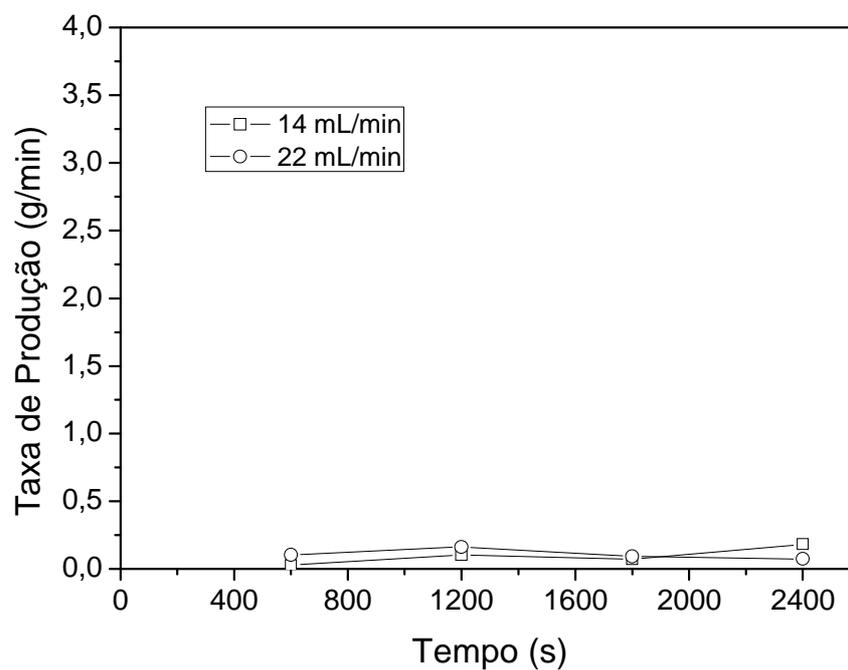


Figura B63 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (3%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

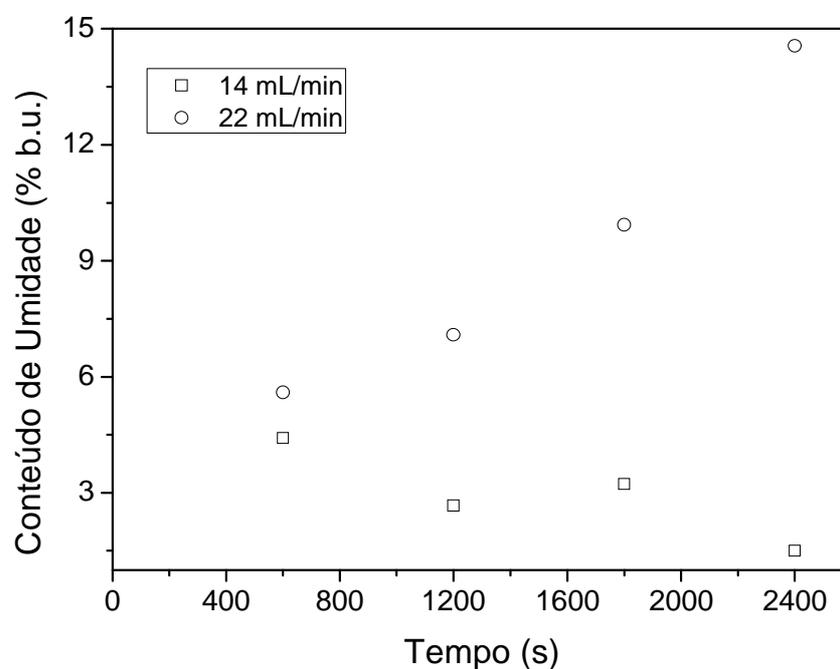


Figura B64 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (3%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

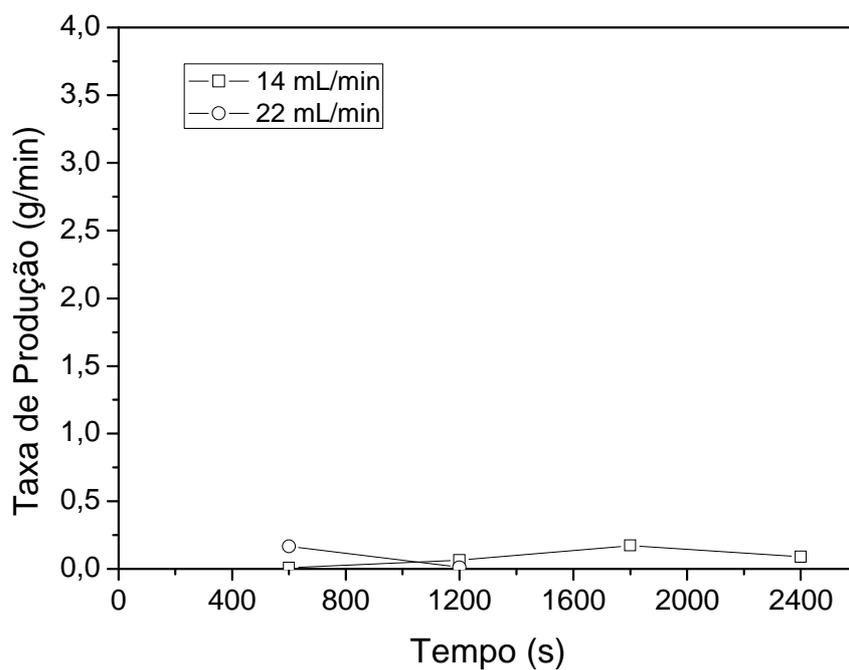


Figura B65 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$.

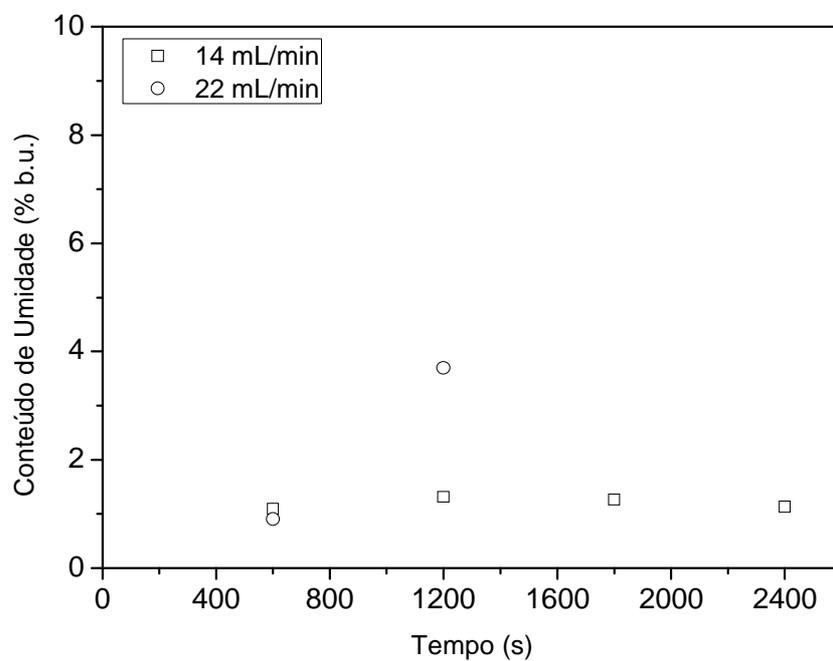


Figura B66 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$.

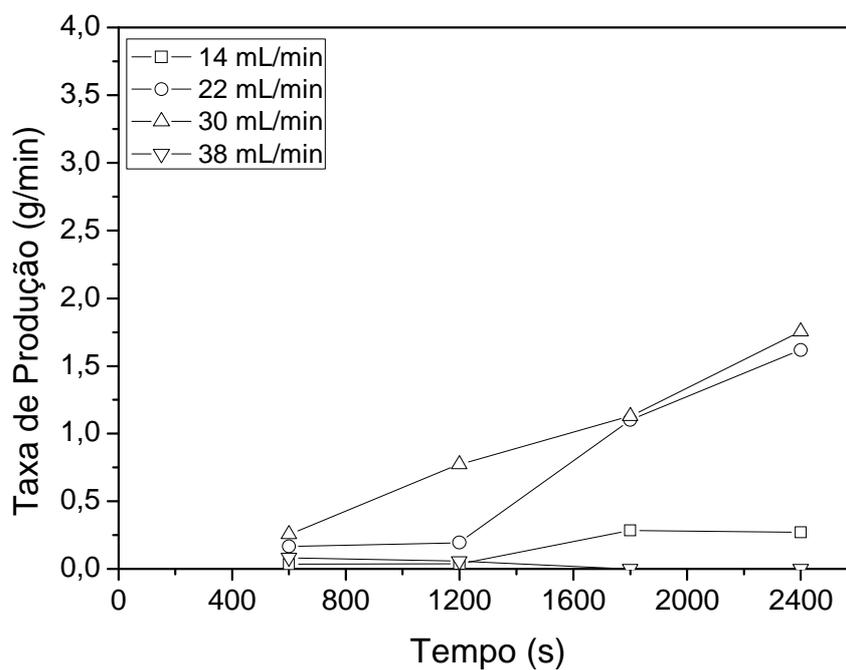


Figura B67 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

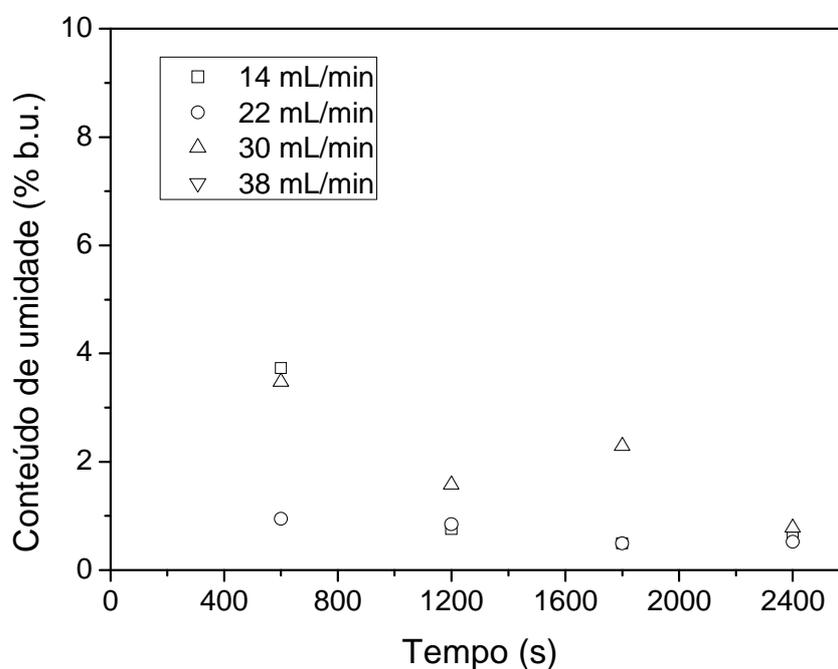


Figura B68 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$.

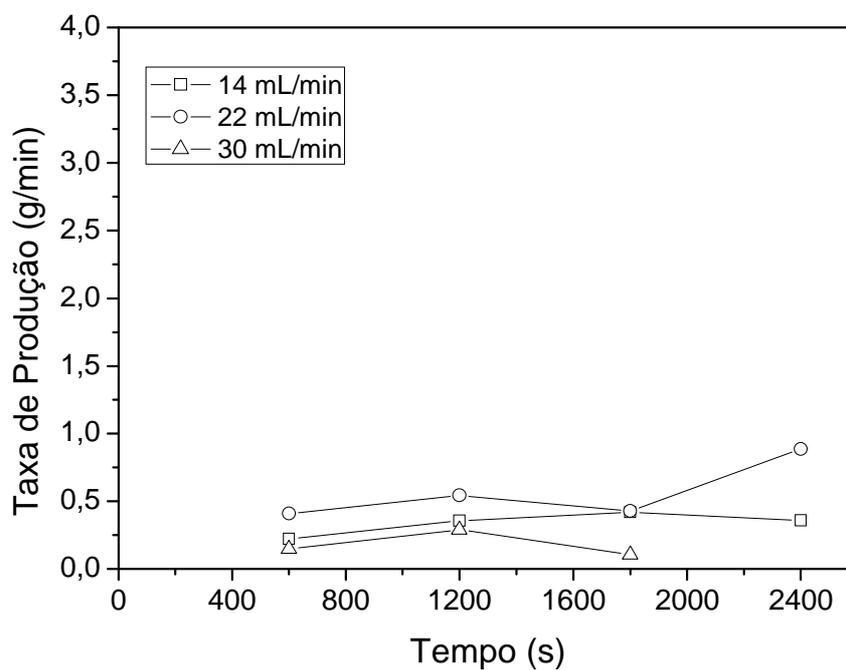


Figura B69 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

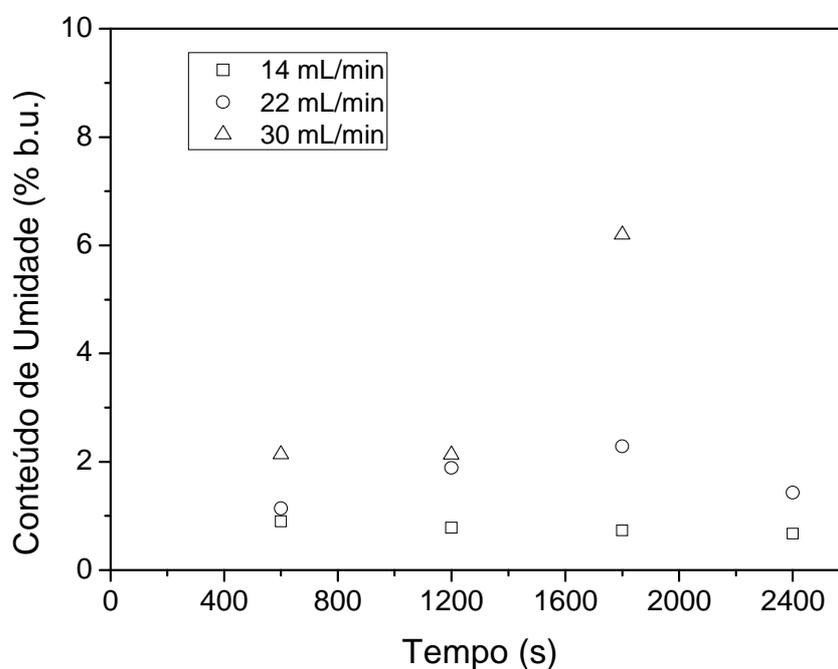


Figura B70 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

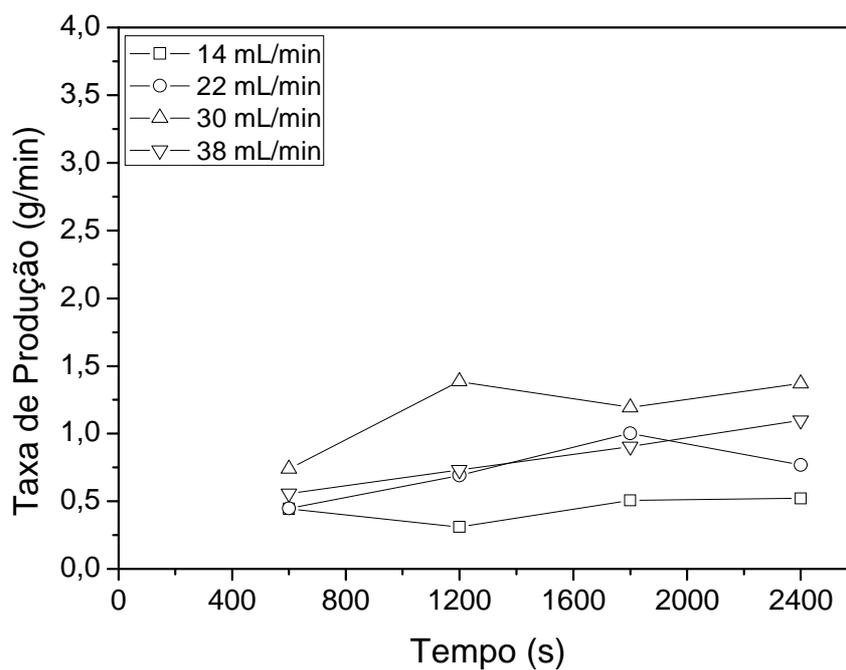


Figura B71 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

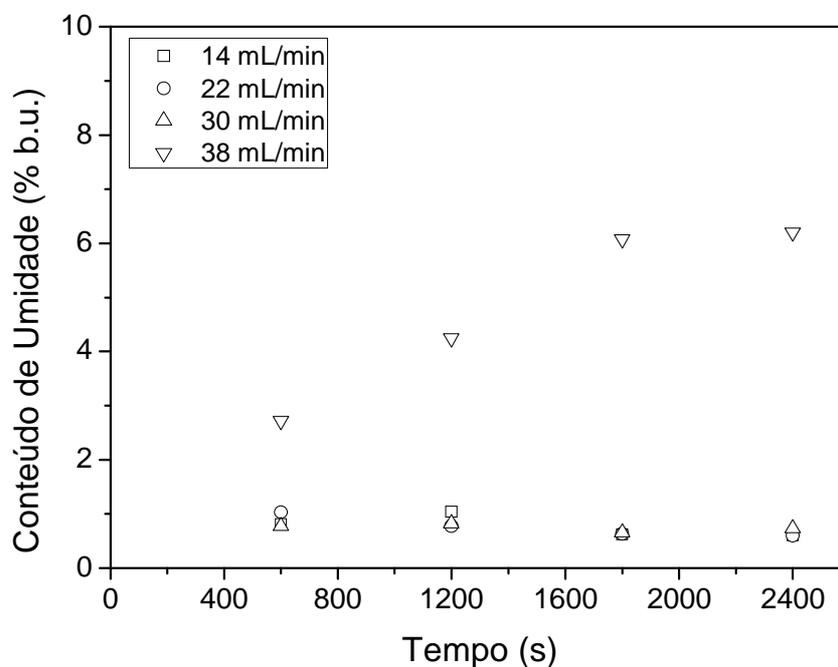


Figura B72 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

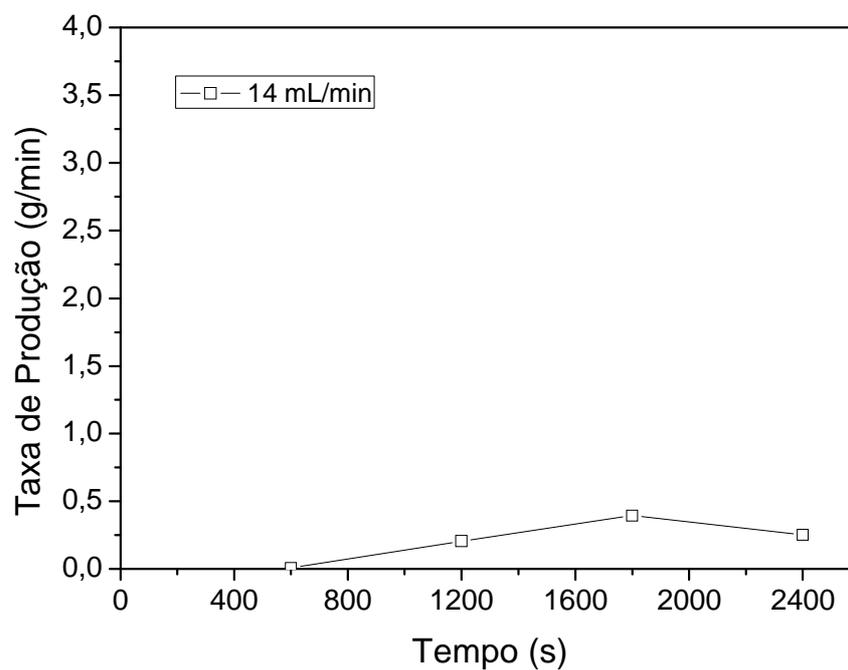


Figura B73 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

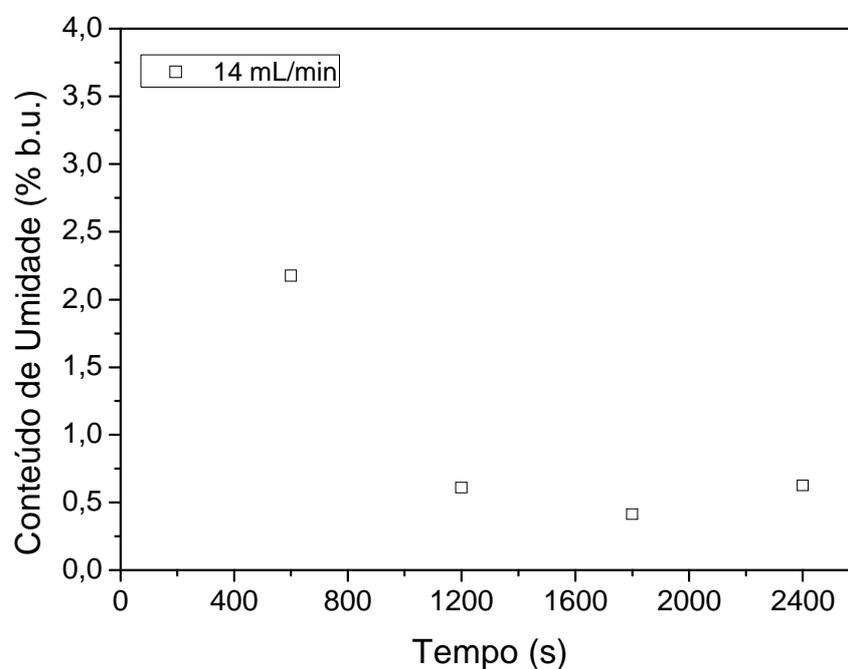


Figura B74 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

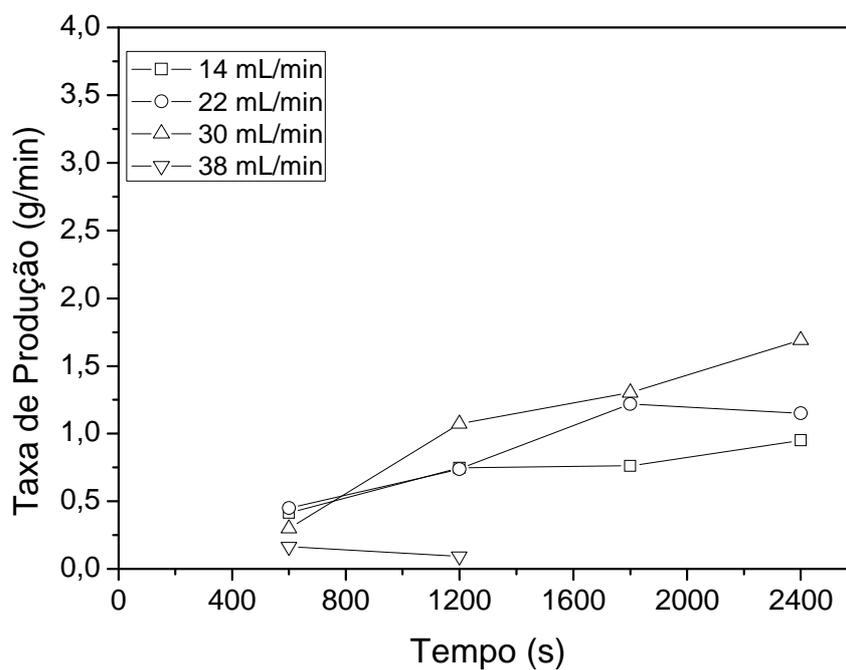


Figura B75 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

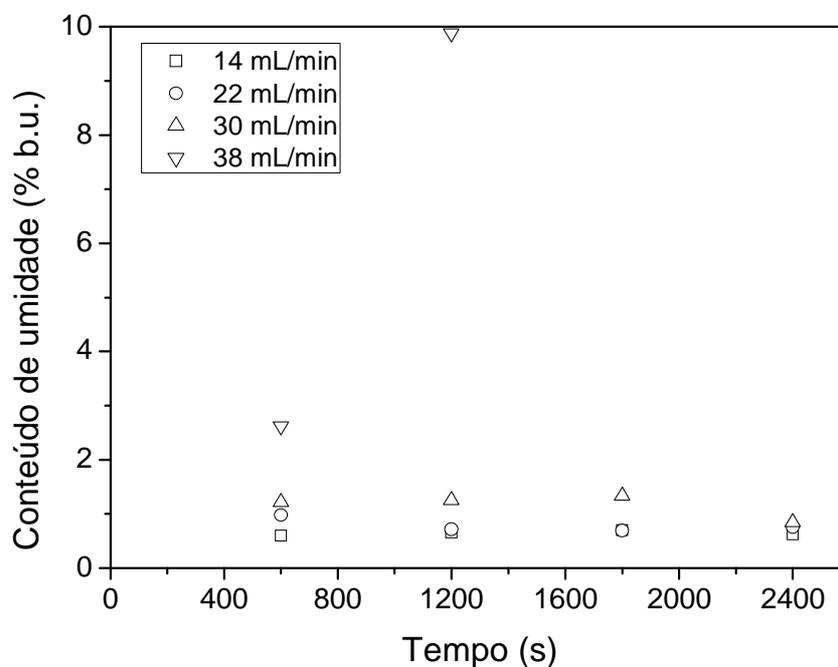


Figura B76 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (6%) seco em leito vibrofluidizado versus tempo; $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,55\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,00$).

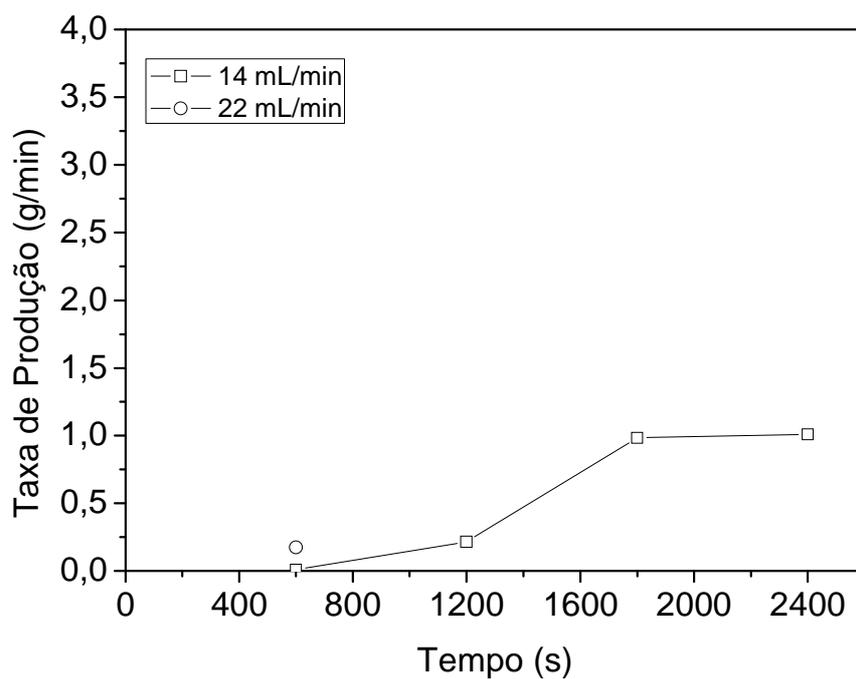


Figura B77 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (9%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$.

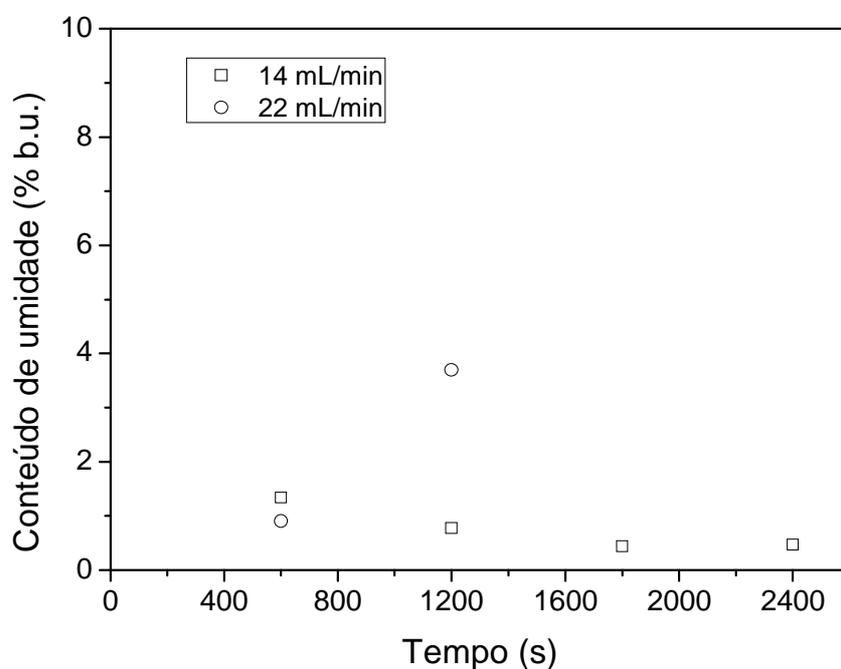


Figura B78 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (9%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$.

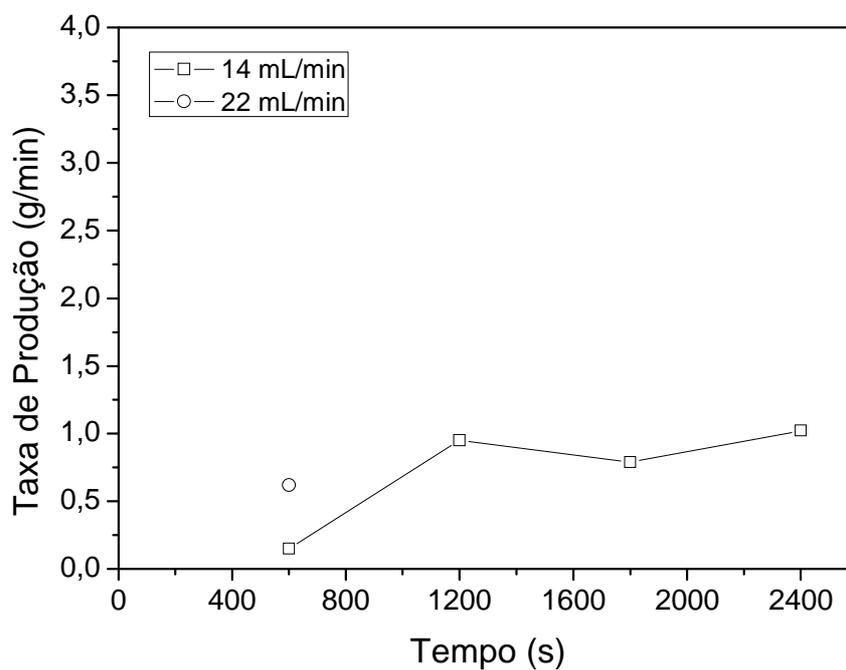


Figura B79 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (9%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

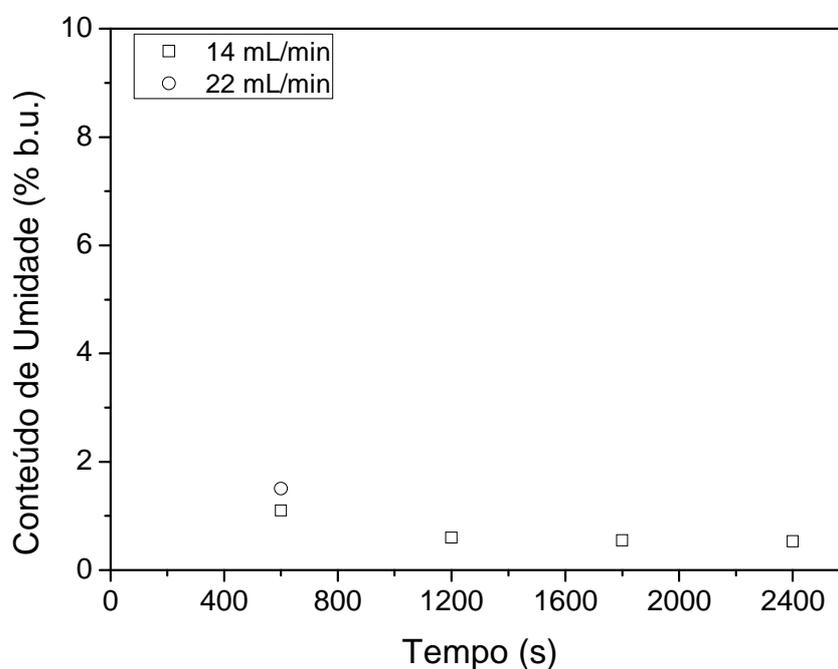


Figura B80 – Conteúdo de umidade do pó de Carbonato de cálcio (9%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,015\text{ m}$ e $f = 8,14\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

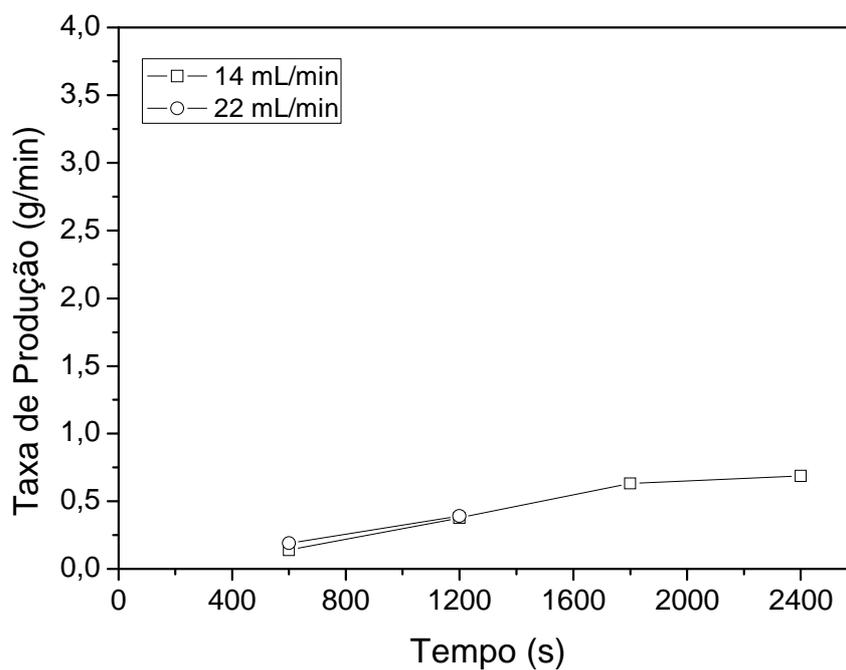


Figura B81 – Taxa de produção de pó de Carbonato de cálcio (9%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).

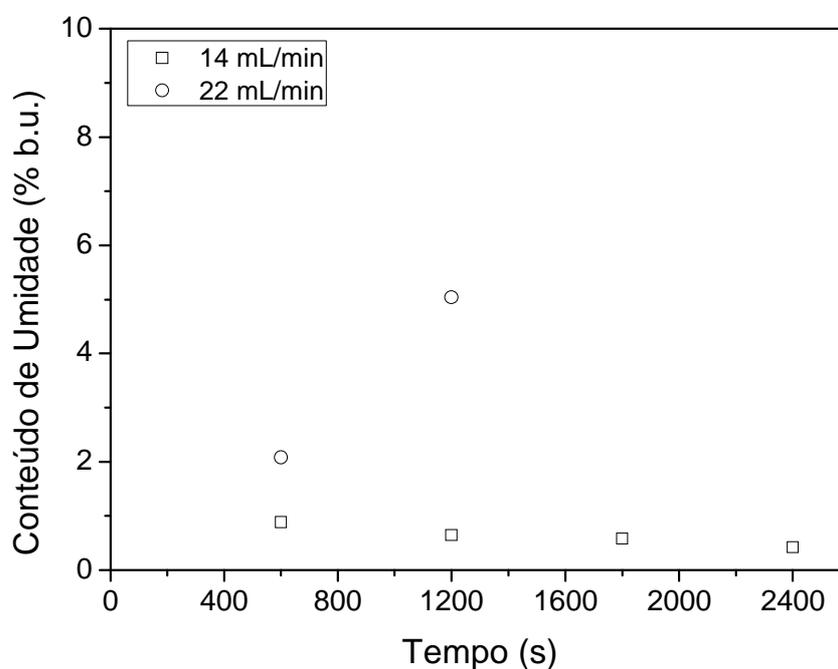


Figura B82 – Conteúdo de Umidade do pó de Carbonato de cálcio (9%) seco em leito fluidizado versus tempo; $T = 80^{\circ}\text{C}$; $U_s = 1,33\text{m/s}$; $A = 0,003\text{ m}$ e $f = 18,20\text{ Hz}$ ($\Gamma = 4,0$).