

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ANA MELINA MENDES**

**ERIC KEEN TORIGOE**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM  
LEITO FLUIDIZADO COM RESISTÊNCIA ELÉTRICA IMERSA**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**ANA MELINA MENDES  
ERIC KEEN TORIGOE**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM  
LEITO FLUIDIZADO COM RESISTÊNCIA ELÉTRICA IMERSA**

**Experimental study of heat transfer in a fluidized bed with immerse  
electrical resistance**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Regina Parise.

Coorientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramírez Behainne

**PONTA GROSSA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ANA MELINA MENDES  
ERIC KEEN TORIGOE**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM  
LEITO FLUIDIZADO COM RESISTÊNCIA ELÉTRICA IMERSA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 16/novembro/2022

---

Maria Regina Parise  
Doutora em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jhon Jairo Ramírez Behainne  
Doutor em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Vitor Otávio Ochoski Machado  
Mestre em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Everton Moraes Matos  
Doutor em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA  
2022**

## RESUMO

A fluidização é um processo em que um aglomerado de partículas assume características de um fluido, devido a sua interação direta com um gás ou líquido de fluxo ascendente. Ao aplicar uma fonte de calor no interior do sistema, observa-se que o leito suspenso se torna um meio eficiente para transferir energia térmica, apresentando gradientes de temperatura muito pequenos devido à intensa movimentação das partículas. Esse processo tem conquistado espaço em diversos segmentos industriais, como no caso da secagem e torra de grãos, bem como na recuperação energética de partículas aquecidas, entre outros. O presente trabalho tem como objetivo realizar o estudo da transferência de calor suspensão-superfície usando uma resistência elétrica imersa dentro de um leito fluidizado borbulhante composto por esferas de vidro ou areia quartzosa. Os resultados em o regime permanente apontaram variação do coeficiente de transferência de calor entre 225  $W/(m^2K)$  a 379  $W/(m^2K)$  para as partículas de areia quartzosa e entre 261  $W/(m^2K)$  e 396  $W/(m^2K)$  para as esferas de vidro. Além disso, verificou-se a presença de maiores coeficientes para as partículas de menor diâmetro, além de velocidades ótimas de fluidização próximas a  $U_o / U_{mf} = 3,00$  para areia quartzosa  $d_p = 0,196$  mm e esfera de vidro  $d_p = 0,447$ . Finalmente, cabe destacar que o método da resistência imersa permite determinar, com boa aproximação, o valor do coeficiente de transferência de calor em leito fluidizado borbulhante com uma montagem experimental mais enxuta.

**Palavras-chave:** fluidização; transferência de calor; escoamento bifásico; leito borbulhante; coeficiente suspensão-parede.

## ABSTRACT

Fluidization is a process in which an agglomerate of particles takes on characteristics of a fluid, due to its direct interaction with an ascending gas or liquid. When applying a heat source inside the system, it is observed that the suspended bed becomes an efficient means to transfer thermal energy, presenting very small temperature gradients as a result of the intense movement of the particles. This process has gained ground in several industrial segments, as in the case of drying and roasting of grains, as well as in the energy recovery of heated particles, among others. The present work aims to study the suspension-surface heat transfer using an electrical resistance immersed inside a bubbling fluidized bed composed of glass spheres or quartz sand. The results in the steady state showed a variation of the heat transfer coefficient between 225 W/(m<sup>2</sup>K) to 379 W/(m<sup>2</sup>K) for quartz sand particles and 261 W/(m<sup>2</sup>K) to 396 W/(m<sup>2</sup>K) for the glass spheres. In addition, the presence of higher coefficients was verified for the particles of smaller diameters, in addition to optimal fluidization velocities close to 3.00 for quartz sand  $d_p = 0,196$  mm and glass spheres  $d_p = 0,447$ . Finally, it should be noted that the immersed resistance method makes it possible to determine, with good approximation, the value of the heat transfer coefficient in a bubbling fluidized bed with a leaner experimental setup.

**Keywords:** fluidization; heat transfer; two-phase flow; bubbling bed; suspension-wall coefficient.

**LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

<b>Figura 1 - Regimes de Fluidização, onde: A - Leito Fixo; B - Transição do leito fixo para o fluidizado (mínima fluidização) e C - Leito Borbulhante (fluidizado).</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2 - Transferência de calor entre uma superfície aquecida e a primeira camada do pacote de partículas.</b>	<b>19</b>
<b>Figura 3 - Distância média entre partícula e superfície</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4 - Fluxograma do sistema experimental</b>	<b>25</b>
<b>Figura 5 - Coluna de fluidização de acrílico do Laboratório de Sistemas Particulados da UTFPR-PG</b>	<b>26</b>
<b>Figura 6 – A: foto da resistência instalada na coluna. B: imagem esquemática da resistência elétrica do tipo cartucho, fornecida pela empresa.</b>	<b>27</b>
<b>Figura 7 - Fixação da resistência elétrica na coluna.</b>	<b>27</b>
<b>Figura 8 - Placas de orifício utilizadas nos experimentos</b>	<b>28</b>
<b>Figura 9 - A: conjunto de peneiras usados no experimento. B: Agitador de peneiras eletromagnético.</b>	<b>30</b>

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 - Resultados experimentais: calibração dos transdutores de pressão</b> .....	<b>29</b>
<b>Tabela 2 - Diâmetros médios de Sauter das partículas utilizadas nos testes experimentais. ....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 3 - Resultados experimentais: densidade média das partículas .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 4 – Valores teóricos de velocidade de mínima fluidização .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 5 - Resultados experimentais: Velocidades de mínima fluidização das partículas do leito.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabela 6 - Resultados Experimentais: duplicata exemplo curva aquecimento do leito.....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 - Velocidade do fluido ascendente (<math>U_0</math>) versus queda de pressão (<math>\Delta P</math>)</b>	<b>16</b>
<b>Gráfico 2 - Classificação de sólidos fluidizados segundo Geldart (1973)</b>	<b>18</b>
<b>Gráfico 3 - Dependência do coeficiente de transferência de calor com a velocidade superficial do gás em sistemas de fluidização.</b>	<b>20</b>
<b>Gráfico 4 - Coeficiente de transferência de calor para esferas de vidro em leito fluidizado contendo tubo de aquecimento horizontal.</b>	<b>21</b>
<b>Gráfico 5 - Coeficientes de transferência de calor encontrados por Boerefijn et al. (1999)</b>	<b>22</b>
<b>Gráfico 6 - Coeficientes de transferência de calor encontrados por Al-Busoul e Abu-Zaid (2000)</b>	<b>23</b>
<b>Gráfico 7 - Coeficientes de transferência de calor encontrados por Sjösten et al. (2004)</b>	<b>24</b>
<b>Gráfico 8 - Coeficientes de transferência de calor encontrados por Jia et al. (2017)</b>	<b>24</b>
<b>Gráfico 9- Resultados experimentais: calibração tradutor de pressão placa de orifício</b>	<b>29</b>
<b>Gráfico 10 - Curva fluidodinâmica para areia quartzosa <math>d_p = 447 \mu\text{m}</math></b>	<b>36</b>
<b>Gráfico 11 - Curva de Aquecimento do Leito – Temperatura do Leito e Resistência</b>	<b>37</b>
<b>Gráfico 12 - Curva de Aquecimento do Leito – Coeficiente de Transferência de Calor</b>	<b>38</b>
<b>Gráfico 13 - Temperatura final do leito - Areia Quartzosa</b>	<b>39</b>
<b>Gráfico 14 - Temperatura final da resistência - Areia Quartzosa</b>	<b>40</b>
<b>Gráfico 15 - Coeficiente de transferência de calor - Areia Quartzosa</b>	<b>41</b>
<b>Gráfico 16 - Temperatura final do leito - Esfera de vidro</b>	<b>42</b>
<b>Gráfico 17- Temperatura do leito: (a) Partículas Menores: Esfera de vidro <math>d_p = 206 \mu\text{m}</math> e Areia Quartzosa <math>d_p = 196 \mu\text{m}</math> (b) Partículas Maiores: Esfera de vidro <math>d_p = 418 \mu\text{m}</math> e Areia Quartzosa <math>d_p = 447 \mu\text{m}</math></b>	<b>43</b>
<b>Gráfico 18 - Temperatura final da resistência - Esfera de vidro</b>	<b>44</b>
<b>Gráfico 19 - Coeficiente de transferência de calor - Esfera de vidro</b>	<b>45</b>
<b>Gráfico 20 - Coeficiente de transferência de calor: (a) Partículas Menores: Esfera de vidro <math>d_p = 206 \mu\text{m}</math> e Areia Quartzosa <math>d_p = 196 \mu\text{m}</math> (b) Partículas Maiores: Esfera de vidro <math>d_p = 418 \mu\text{m}</math> e Areia Quartzosa <math>d_p = 447 \mu\text{m}</math></b>	<b>46</b>



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

FCC	Fluido de craqueamento catalítico
LFB	Leito fluidizado borbulhante
UTFPR-PG	Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa

## LISTA DE SIMBOLOS

$\Delta P$	Queda de pressão	Pa
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido circulante	Pa.s
$A_s$	Area superficial da resistência elétrica de troca térmica	m <sup>2</sup>
$D_i$	Tamanho da abertura da peneira	m
$d_p$	Diâmetro da partícula	$\mu\text{m}$
$d_{ps}$	Diâmetro médio de Sauter	mm
$g$	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$h$	Coefficiente médio de transferência de calor	W/m <sup>2</sup> °C
$h_{\text{máx}}$	Coefficiente máximo de transferência de calor	W/m <sup>2</sup> °C
$I$	Corrente	mA
$n$	Quantidade de peneiras utilizadas	
$P$	Pressão	Pa
$T_b$	Temperatura do leito de partículas	°C
$T_s$	Temperatura da superfície da resistência elétrica	°C
$U_{mf}$	Velocidade de mínima fluidização	m/s
$U_o$	Velocidade superficial do gás	m/s
$U_{otm}$	Velocidade ótima de fluidização	m/s
$U_t$	Velocidade terminal da partícula	m/s
$x_i$	Porcentagem mássica de amostra retida na peneira	%
$\rho_f$	Densidade do ar circulante	g.cm <sup>-3</sup>
$\rho_g$	Massa específica do fluido circulante	g.cm <sup>-3</sup>
$\rho_s$	Densidade das partículas	g.cm <sup>-3</sup>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivo Geral .....	13
1.3	Objetivos Específicos .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1	Regimes de Fluidização .....	15
2.2	Transferência de calor em leito fluidizado borbulhante .....	18
2.3	Revisão de estudos que aplicaram a resistência imersa no leito ....	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	25
3.1	<b>Sistema experimental</b> .....	25
3.1.1	Resistência imersa .....	26
3.1.2	Placa de Orifício .....	28
3.1.3	Transdutores de Pressão .....	28
3.2	<b>Caracterização das partículas</b> .....	29
3.2.1	Diâmetro médio da partícula .....	30
3.2.2	Densidade da partícula.....	32
3.3	<b>Velocidade de mínima fluidização teórica</b> .....	32
3.4	<b>Determinação do coeficiente de transferência de calor</b> .....	33
3.5	<b>Software utilizado para a aquisição dos dados experimentais</b> .....	33
3.6	<b>Condições dos experimentos com leito aquecido</b> .....	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	35
4.1	<b>Dados de mínima fluidização</b> .....	35
4.2	<b>Regime Transiente</b> .....	36
4.3	<b>Regime permanente</b> .....	39
4.3.1	Areia quartzosa .....	39
4.3.2	Esfera de Vidro.....	42
<b>5</b>	<b>Conclusões</b> .....	47
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	49
	<b>APÊNDICE A – Dashboard LABVIEW™</b> .....	50
	<b>APÊNDICE B – Código fonte da Dashboard LABVIEW™</b> .....	52
	<b>APÊNDICE C – Resultados compilados dos experimentos com leito aquecido</b> .....	54
	<b>APÊNDICE D – Resultados experimentais complementares (Regime transiente)</b> .....	56

## 1 INTRODUÇÃO

A fluidização é a operação pela qual uma suspensão de partículas sólidas adquire características semelhantes às de um fluido, devido a sua interação direta com um gás ou líquido de fluxo ascendente. As suas aplicações industriais são inúmeras, tais como transferência térmica, reações de síntese, quebra de hidrocarbonetos, combustão e incineração, carbonização e gaseificação, calcinação, reações envolvendo sólidos e biofluidização (BASU, 2006).

Leitos fluidizados são considerados uma boa escolha em operações, do tipo gás-sólido, em que ocorre transferência térmica devido a elevada movimentação das partículas que ocasiona um transporte rápido de energia, altas taxas de transferência de calor e temperatura uniforme no leito (KUNII E LEVENSPIEL, 1991) (YUSUF et.al., 2012). Por esta consequência, a transferência de calor em leito fluidizado tem sido objeto de intensa pesquisa, procurando encontrar modelos confiáveis para a previsão dos coeficientes de transferência de calor leito-parede (outros termos podem ser empregados como: suspensão e superfície) (YUSUF et.al., 2012).

Elevados coeficientes de transferência de calor, no contato suspensão-parede, foram verificados por Turini (2017) que combinou o leito fluidizado borbulhante (LFB) composto por areia quartzosa em um trocador de calor do tipo jaqueta. Em seus estudos, o autor usa partículas de diâmetro médio de Sauter ( $d_{ps}$ ) de 194  $\mu\text{m}$  e 359  $\mu\text{m}$  e temperaturas do leito de 50°C e 70°C. Na análise dos dados obtidos, o autor observou maiores valores do coeficiente de transferência de calor suspensão-parede ao realizar ensaios com partículas mais finas e durante o uso de maiores temperaturas do leito (TURINI, 2017).

Ao dar continuidade ao estudo de Turini (2017), Torigoe (2019) realizou experimentos preliminares envolvendo o coeficiente de transferência térmica do trocador de calor do tipo jaqueta utilizando esferas de vidro ao invés de areia como material alternativo para compor o leito. Ambos os autores observaram que os maiores coeficientes ocorriam em velocidades de fluidização ( $u_o/u_{mf}$ ) próximas a 3,0.

Outros exemplos do estudo do coeficiente de transferência de calor ocorrem em processos que há a inserção de superfícies no leito, como tubos que transportam fluidos de resfriamento ou aquecimento, ou ainda sondas com aquecimento elétrico para trocar calor diretamente com o leito. Segundo Pistors e Prakash (2011), medições com sondas de resposta rápida fornecem informações sobre a fluidodinâmica e a taxa de transferência de calor local, que levam a um projeto com

uma melhor seleção e posicionamento de tais tubos. Os autores realizaram medições de variações locais de transferência de calor em relação ao tempo em um leito fluidizado de gás e partículas de areia, utilizando uma sonda composta por um termopar tipo T, um sensor de fluxo de calor e um aquecedor tipo cartucho. A sonda de resposta rápida provou ser uma ferramenta útil, particularmente pela possibilidade de suas adaptações radiais e axiais. As medidas locais de transferência de calor permitiram estabelecer uma relação mais próxima entre transferência de calor e fluidodinâmica.

Visando contribuir com os estudos do coeficiente de transferência de calor em leitos fluidizados borbulhantes (LFB) utilizando esfera de vidro e areia quartzosa do Laboratório de Sistemas Particulados da UTFPR-PG, o presente trabalho propõe uma nova metodologia experimental. Serão realizadas alterações no processo de fornecimento de calor para o leito, utilizando uma resistência imersa com termopar embutido. Também, com intuito de comparar os resultados obtidos com os de Turini (2017), serão utilizados o mesmo material, diâmetro de partícula e número de fluidização.

### **1.1 Justificativa**

O presente trabalho dá continuidade às pesquisas de transferência de calor do Laboratório de Sistemas Particulados da UTFPR-PG iniciadas por Turini (2017) e Torigoe (2019), ao buscar novas alternativas de simplificação da configuração da coluna de fluidização. A pesquisa pretende contribuir substituindo o mecanismo de aquecimento do leito previamente existente por uma resistência elétrica imersa em um LFB. O intuito é observar se a nova configuração da bancada seria uma forma mais simples, segura e eficiente para a realização de estudos de transferência de calor em contato suspensão-parede, quando comparado com estudos prévios que usavam outro método de aquecimento no mesmo equipamento.

### **1.2 Objetivo Geral**

Este trabalho tem, como objetivo geral, a obtenção experimental do coeficiente de transferência de calor suspensão-parede em leito fluidizado borbulhante gás-sólido, utilizando como fonte de calor uma resistência elétrica imersa.

### 1.3 Objetivos Específicos

Constituem os objetivos específicos desta pesquisa:

- Realizar experimentos de transferência de calor em leito fluidizado borbulhante utilizando partículas de vidro e areia quartzosa de diâmetros médios distintos, sob diferentes vazões de ar de fluidização, e avaliar a influência desses parâmetros no coeficiente de transferência de calor médio.
- Acompanhar o comportamento térmico do leito desde o regime transiente até o estado de equilíbrio térmico.
- Comparar o coeficiente de transferência de calor resultante dos experimentos com os reportados na literatura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os conceitos relacionados ao fenômeno da fluidização em regime borbulhante e à transferência de calor. Adicionalmente, serão revisados alguns estudos nos quais se utilizou a resistência elétrica imersa no leito fluidizado como fonte de calor, com o objetivo de embasar a hipótese de funcionamento do sistema estudado.

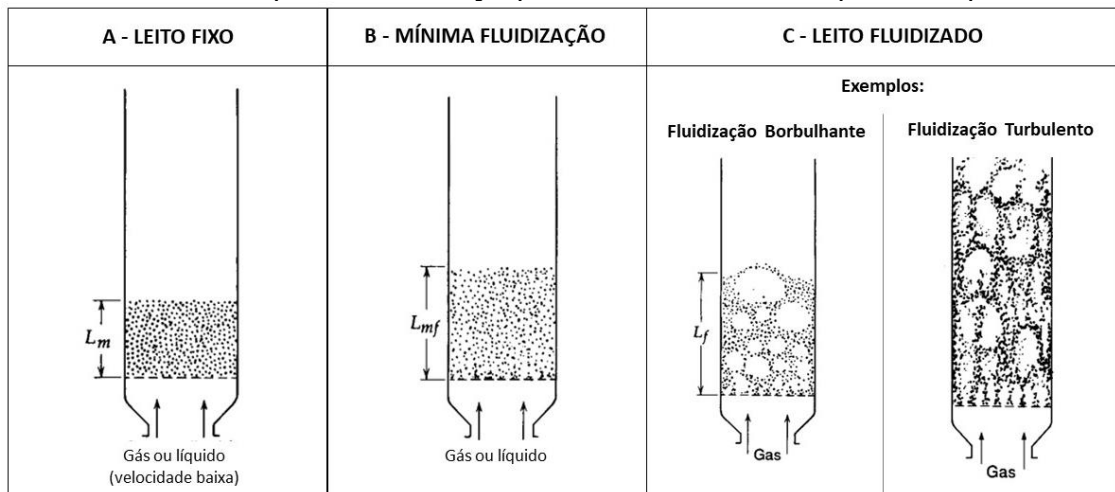
### 2.1 Regimes de Fluidização

Como anteriormente mencionado, a fluidização permite que um leito de partículas sólidas adquira características similares às de um fluido, por meio do seu contato direto com um gás ou líquido (BASU, 2006). Por meio desse contínuo fornecimento de fluido com movimento vertical ascendente através do aglomerado de partículas, o conjunto pode assumir determinadas características para estudos na engenharia (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). O comportamento da suspensão é classificado nos diferentes regimes de fluidização, os quais variam de acordo com certas condições operacionais e geométricas, como diâmetro da coluna de fluidização, diâmetro das partículas e velocidade ascendente do fluido. A figura 1 ilustra alguns desses regimes fluidodinâmicos, resultantes da variação da velocidade superficial de gás no sistema.

No esquema A da figura 1 pode-se observar o leito fixo, o qual ocorre quando o fluido que percola a suspensão de partículas possui uma baixa velocidade. Para este caso, tem-se que o fluido circulante somente penetra por entre os espaços vazios da suspensão estacionária (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Se ocorrer um acréscimo na velocidade do fluido, a queda de pressão aumenta até que a velocidade superficial do fluido alcance um valor crítico, conhecido como velocidade de mínima fluidização (BASU, 2006). Ilustrada no esquema B da figura 1, a velocidade de mínima fluidização ( $u_{mf}$ ) marca a transição do regime de leito fixo para o fluidizado.

Com uma velocidade superficial do gás superior à de mínima fluidização, o leito se expande e as bolhas de gás tornam-se visíveis, resultando na fluidização heterogênea (esquema C da figura 1). A partir deste ponto, a queda de pressão no leito se mantém praticamente constante, independente do aumento da velocidade superficial do gás (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). O LFB apresenta ótima mistura gás-sólido, o que proporciona uma temperatura uniforme em virtude das altas taxas de transferência de calor. (PARISE, 2007).

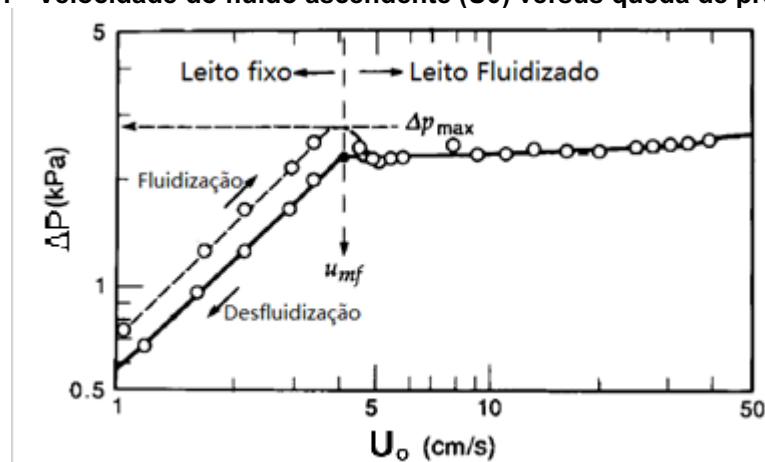
**Figura 1 - Regimes de Fluidização, onde: A - Leito Fixo; B - Transição do leito fixo para o fluidizado (mínima fluidização) e C - Leito Borbulhante (fluidizado).**



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991, p. 2)

No Gráfico 1 é possível observar uma curva fluidodinâmica característica para uma análise de um leito de partículas. Utilizando como parâmetros a queda de pressão ( $\Delta P$ ) obtida experimentalmente para diferentes velocidades do gás ( $U_0$ ), por meio deste diagrama é possível identificar a velocidade de fluidização. O seu valor vai depender da natureza do fluido empregado, da temperatura de operação do sistema e das propriedades físicas do material particulado, tais como tamanho, densidade e esfericidade (TURINI, 2017).

**Gráfico 1 - Velocidade do fluido ascendente ( $U_0$ ) versus queda de pressão ( $\Delta P$ )**



Fonte: adaptado de Kunii e Levenspiel (1991, p. 71)

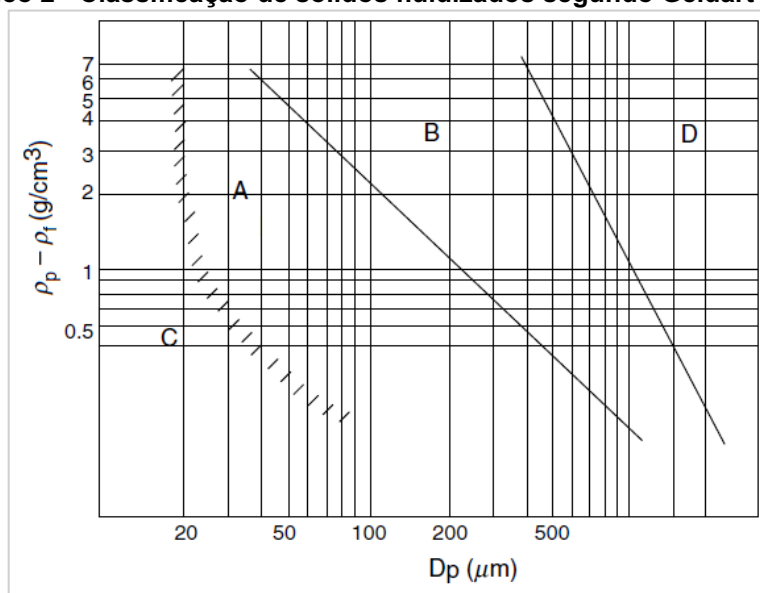
As propriedades da partícula interferem diretamente sobre a facilidade ou não de fluidizarem (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Nesse sentido, Geldart (1973)



classificou os sólidos em quatro grupos, de acordo com sua densidade e tamanho de partícula. Por meio dessa distinção, é possível verificar diferentes comportamentos fluidodinâmicos característicos para cada categoria. A classificação resultante é ilustrada no Gráfico 2, sendo esse válido para a fluidização com ar em condições ambientes e velocidade de fluidização menores que dez vezes à da mínima fluidização (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). A seguir é descrito cada grupo do Gráfico 2.

- Grupo C - Fluidização coesiva: por essas partículas terem os menores diâmetros dos grupos, ocorrem problemas na fluidização, visto que as forças interpartículas são maiores que as forças resultantes da ação do gás. No entanto, a fluidização é possível ou melhorada através da utilização de agitadores mecânicos ou vibradores para evitar a formação de canais preferenciais. Como exemplo de materiais sólidos pertencentes a esse grupo citam-se a farinha de trigo, amido e pó facial (PARISE, 2007).
- Grupo A - Fluidização facilmente aerável: quando esses sólidos são fluidizados, o leito se expande consideravelmente antes das bolhas aparecerem (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Em velocidade do gás mais alta que a mínima velocidade de fluidização, as bolhas elevam-se mais rápido que o fluxo de gás e circulam pela emulsão. Esse grupo é representado pelas partículas de catalisador utilizadas no processo FCC (PARISE, 2007).
- Grupo B - Fluidização borbulhante: para essas partículas, o leito forma bolhas assim que a velocidade do ar excede a velocidade de mínima fluidização (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). O tamanho das bolhas aumenta com a altura do leito e com a velocidade do gás em excesso. A expansão do leito é pequena e seu colapso ocorre rapidamente quando se interrompe o fornecimento de gás fluidizante. O sólido típico desse grupo é a areia (PARISE, 2007).
- Grupo D - Fluidização do tipo jorro: partículas geralmente maiores que 1 milímetro de diâmetro e/ou densas. A fluidização é difícil se o leito dessas partículas for profundo. Apresenta pequena expansão do leito e baixa mistura das partículas. As forças coesivas interpartículas são menores comparadas com a força de arraste (PARISE, 2007). Os grãos de produtos agrícolas são exemplos desse grupo, tais como ervilha, arroz, feijão e café.

**Gráfico 2 - Classificação de sólidos fluidizados segundo Geldart (1973)**



Fonte: adaptado BASU (2006, p. 443)

## 2.2 Transferência de calor em leito fluidizado borbulhante

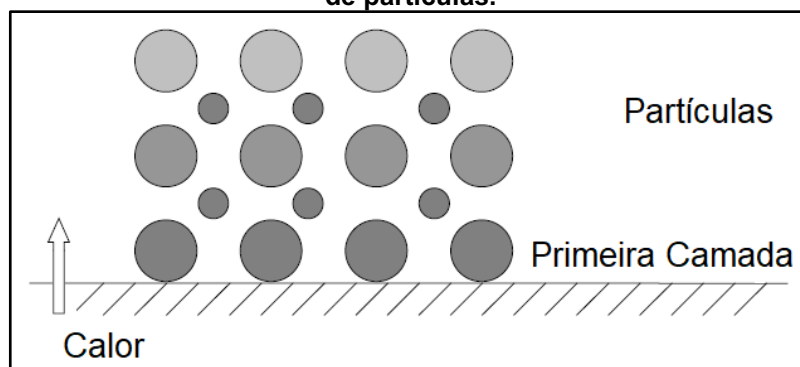
Leitos fluidizados borbulhantes são conhecidos como sistemas eficientes para transferência de energia térmica em diversas aplicações industriais (TURINI, 2017). Por meio desses sistemas, são obtidos elevados coeficientes de transferência térmica devido à intensa movimentação das partículas presentes em um leito suspenso. Estudos realizados apontam que a aplicação de um trocador de calor do tipo jaqueta em sistemas gás-sólido proporciona um eficiente reaproveitamento de energia térmica, sendo este sistema bifásico influenciado pelo tipo de partícula utilizada e a velocidade de fluidização do leito (Tuirini, 2017; Torigoe, 2019).

O processo de transferência de calor em leito fluidizado é composto pelos mecanismos de condução, convecção e radiação, relacionados com as fases gasosa e particulada. Segundo Yang (2003), a transferência de calor por convecção irá ocorrer durante o tempo de contato das bolhas com as superfícies aquecidas, a condução e a convecção no contato das partículas com a superfície e a radiação no caso de altas temperaturas. Ainda segundo o autor, a parcela de transferência de calor por radiação só será significativa em temperaturas acima de 600°C em regime de fluidização borbulhante, e para a transferência de calor por convecção será significativo para leitos formados por partículas de diâmetro grande do grupo B e D.

Teoricamente, pacotes de partículas do leito são arrastados para a superfície de transferência de calor devido a ação das bolhas presentes no regime borbulhante (BASU, 2006). Os pacotes permanecem em contato com a superfície aquecida por

um curto período e, em seguida, são arrastados de volta para o leito (Figura 2). Portanto, a primeira camada de partículas próxima a superfície aquecida é a mais importante para a transferência de calor, sendo assim a responsável pelo mecanismo dominante de troca térmica.

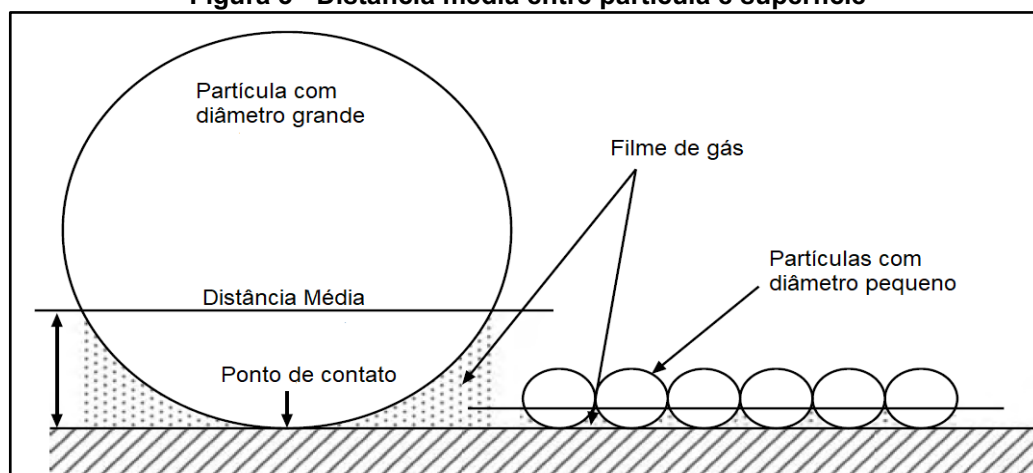
**Figura 2 - Transferência de calor entre uma superfície aquecida e a primeira camada do pacote de partículas.**



Fonte: adaptado de Basu (2006, p.190).

Ao mesmo tempo, tem-se que o diâmetro das partículas apresenta forte influência sobre o processo de troca térmica, como sugerido pela figura 3. Segundo Basu (2006), partículas com grande diâmetro apresentam um filme de gás espesso na vizinhança próxima ao contato partícula-superfície, favorecendo assim a transferência de calor por convecção. Já as partículas com menor diâmetro revelam esse mesmo filme de gás muito menor em sua vizinhança, favorecendo assim o processo de condução térmica devido ao aumento nos pontos de contato direto partícula-superfície.

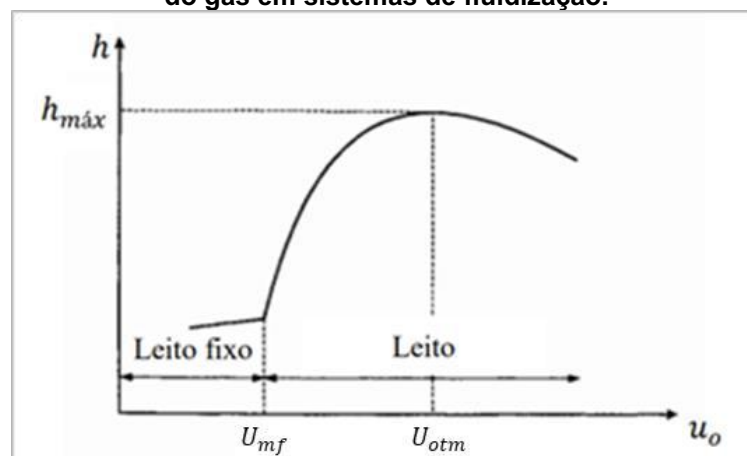
**Figura 3 - Distância média entre partícula e superfície**



Fonte: adaptado de BASU (2006, p. 180)

Por fim, a velocidade de fluidização também promove um efeito direto no processo de transferência de calor em um leito de partículas de tamanho uniforme (KUNII E LEVENSPIEL, 1991). Para o caso de partículas do tipo B de Geldart, no regime de leito fixo, tem-se que o coeficiente de transferência de calor aumenta moderadamente com o incremento no fluxo do fluido passante, até atingir o início do aparecimento das bolhas. Após isso, verifica-se um rápido aumento do coeficiente, resultante do tempo de contato reduzido e aumento da mobilidade das partículas com a superfície da fonte aquecida. Atingindo um valor máximo que representaria o ponto ótimo de operação para o respectivo sistema, o valor do coeficiente começa a diminuir em ritmo moderado, uma vez que o aumento da velocidade do agente fluidizante reduz a concentração de partículas em contato com a superfície aquecida. Na Gráfico 3 pode-se observar a dependência do coeficiente de transferência de calor em função da velocidade do gás circulante.

**Gráfico 3 - Dependência do coeficiente de transferência de calor com a velocidade superficial do gás em sistemas de fluidização.**



Fonte: ROHSENOW, HARTNETT e CHO (1998, p. 13.16).

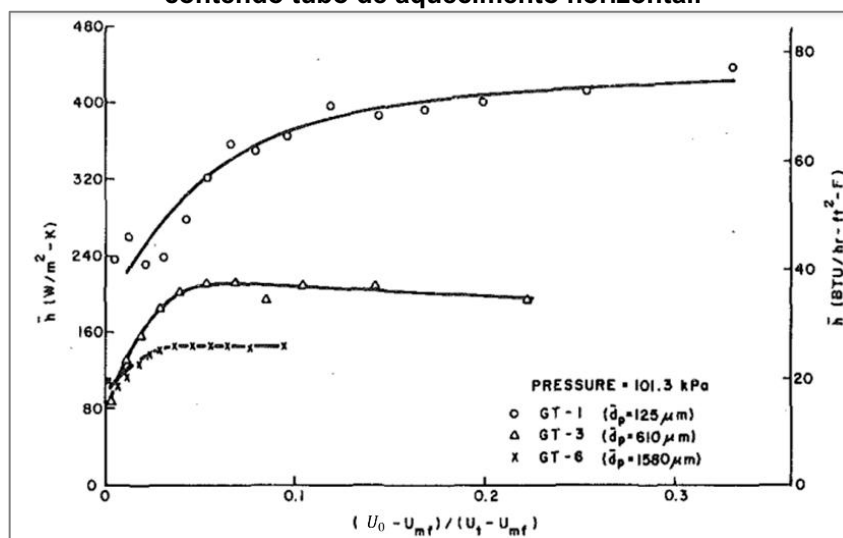
### 2.3 Revisão de estudos que aplicaram a resistência imersa no leito

Estudos envolvendo a aplicação de uma superfície com aquecimento controlado, imersa em um leito fluidizado, são encontrados na literatura. Alguns desses trabalhos são brevemente citados a seguir.

Chandran et al. (1980) investigaram experimentalmente a transferência de calor de tubos horizontais imersos em leitos fluidizados, variando o diâmetro médio de esferas de vidro ( $125 < d_p < 1580 \mu\text{m}$ ) e pressão ( $100 < P < 400\text{kPa}$ ). Os resultados dos testes indicaram que os coeficientes locais de transferência de calor são

fortemente influenciados pela posição angular dos tubos e vazão do ar, bem como pelo tamanho das partículas e pressão do sistema. Os coeficientes de transferência de calor, calculados em torno da circunferência do tubo, exibiram uma tendência geral de aumento com a diminuição do tamanho das partículas e o incremento da pressão sistema. O Gráfico 4 ilustra o comportamento do coeficiente de transferência de calor em função da velocidade do gás e o tamanho da partícula.

**Gráfico 4 - Coeficiente de transferência de calor para esferas de vidro em leito fluidizado contendo tubo de aquecimento horizontal.**

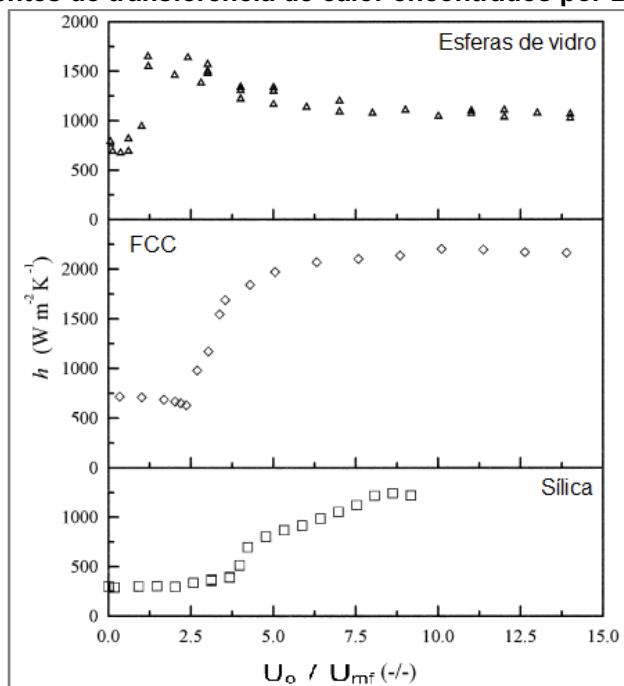


Fonte: Chandran et al. (1980, p.155)

Boerefijn et al. (1999) utilizaram um anemômetro de fio quente em um leito fluidizado com ar, com o objetivo de calcular o coeficiente de transferência de calor médio a partir de séries temporais de coeficientes de transferência de calor instantâneos em diferentes velocidades de ar. Foram usados pós de sílica, FCC e esferas de vidro para compor o leito, sendo os dois primeiros, pertencentes ao grupo A e o último ao grupo B de Geldart. Ao mesmo tempo, os autores desenvolveram um método estocástico para a taxa de transferência de calor com base na hipótese que as flutuações de transferência de calor aconteceriam devido à constante renovação dos pacotes de partículas próximo à superfície aquecida. A simplificação mais relevante para a hipótese foi a consideração de que o tempo de contato entre as partículas e a sonda é menor que o tempo para as partículas aquecerem. Os resultados encontrados para fluidização incipiente e homogênea, comparados ao modelo teórico, mostraram-se menos confiáveis, visto que, as hipóteses simplificadoras têm menos chances de serem efetivadas. Já para a fluidização

totalmente desenvolvida, os resultados experimentais encontrados em comparação com o modelo teórico foram satisfatórios, comprovando que a simplificação para esses casos é válida. Os coeficientes médios de transferência de calor em função do número de fluidização, encontrados pelos autores, são apresentados no Gráfico 5.

**Gráfico 5 - Coeficientes de transferência de calor encontrados por Boerefijn et al. (1999)**

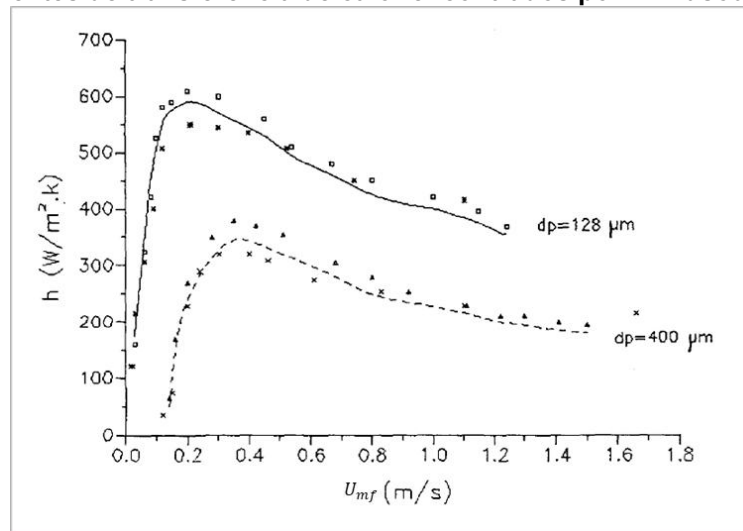


Fonte: adaptado de Boerefijn et al. (1999, p.57)

Os autores Al-Busoul e Abu-Zaid (2000) em seus estudos de predição do coeficiente de transferência de calor entre uma superfície imersa e um leito fluidizado, desenvolveram um modelo empírico baseado em análises dimensionais. Para validar o modelo, uma série de experimentos foram conduzidos em um reator com uma esfera de cobre aquecida e imersa no leito. Foram utilizados três diâmetros de partícula de areia e dois diâmetros de xisto betuminoso. O modelo proposto determinou com sucesso os efeitos de todas as variáveis pertinentes na transferência de calor em leito fluidizado. Os resultados indicaram que o coeficiente de transferência de calor é diretamente proporcional a velocidade do gás até um valor de três a quatro vezes a velocidade de mínima fluidização, e para velocidades de gás mais altas ocorreu uma queda no coeficiente de transferência de calor que persistiu com aumento adicional na velocidade do gás. Os resultados também demonstraram que o coeficiente de transferência de calor é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas em uma faixa de 128 a 400  $\mu\text{m}$ . Os resultados experimentais dos coeficientes de transferência

de calor para dois diâmetros de areia, encontrados pelos autores, são apresentados no Gráfico 6.

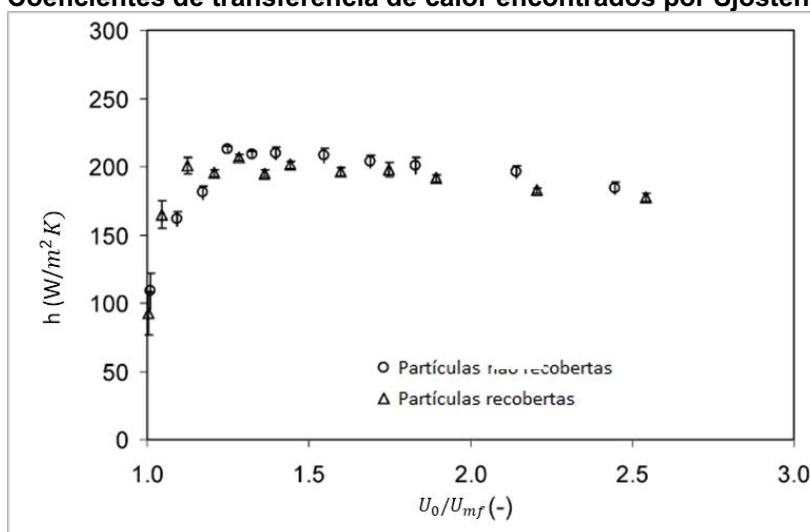
**Gráfico 6 - Coeficientes de transferência de calor encontrados por Al-Busoul e Abu-Zaid (2000)**



**Fonte: Al-Busoul e Abu-Zaid (2000, p.7)**

Sjösten et al. (2004) estudaram o coeficiente de transferência de calor de uma suspensão de areia de sílica revestida e não revestida em LFB, com uma sonda de esfera de aço inoxidável e outra de cilindro de alumínio. Os autores avaliaram a influência do revestimento das partículas no coeficiente de transferência de calor. As condições experimentais utilizadas foram: número de fluidização ( $u_0/u_{mf}$ ) de 1 a 3,5 e diâmetros médios de partículas de 350 e 635  $\mu\text{m}$ . Os autores concluíram que o coeficiente de transferência de calor para as partículas revestidas resultou em 12 a 21% menor do que para as partículas não revestidas. Por meio do Gráfico 7 é possível observar um dos resultados experimentais obtidos pelos autores, o qual demonstra os coeficientes médios de transferência de calor em testes envolvendo uma sonda cilíndrica de alumínio.

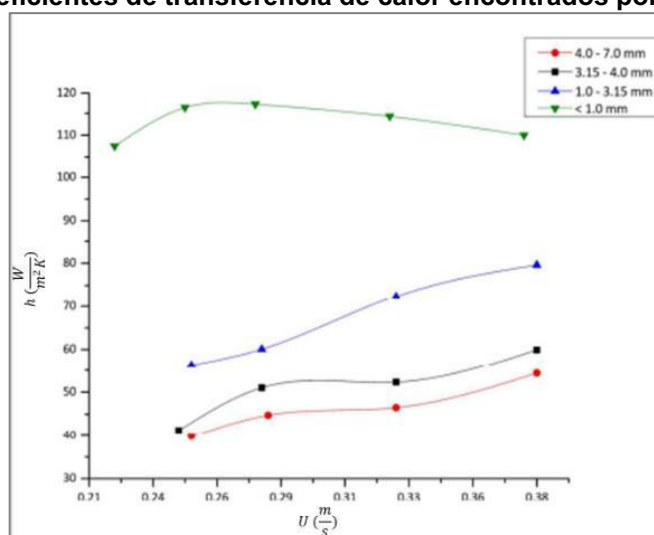
Gráfico 7 - Coeficientes de transferência de calor encontrados por Sjösten et al. (2004)



Fonte: adaptado de Sjösten et al. (2004, p.5767)

Jia et al. (2017) estudaram a transferência de calor entre partículas de biomassa e uma sonda elétrica imersa em leito fluidizado pulsado. Com o acoplamento de dois sensores de temperatura na superfície aquecida, o equipamento utiliza uma alimentação de corrente contínua ajustável em faixa de potencial de 0 a 18 V. Como uma das conclusões descrita pelos autores, tem-se que, de maneira geral, existe uma proporcionalidade no aumento do coeficiente de transferência de calor com a elevação da taxa de fluxo de gás (Gráfico 8).

Gráfico 8 - Coeficientes de transferência de calor encontrados por Jia et al. (2017)



Fonte: adaptado de Jia et al. (2017, p.3752)



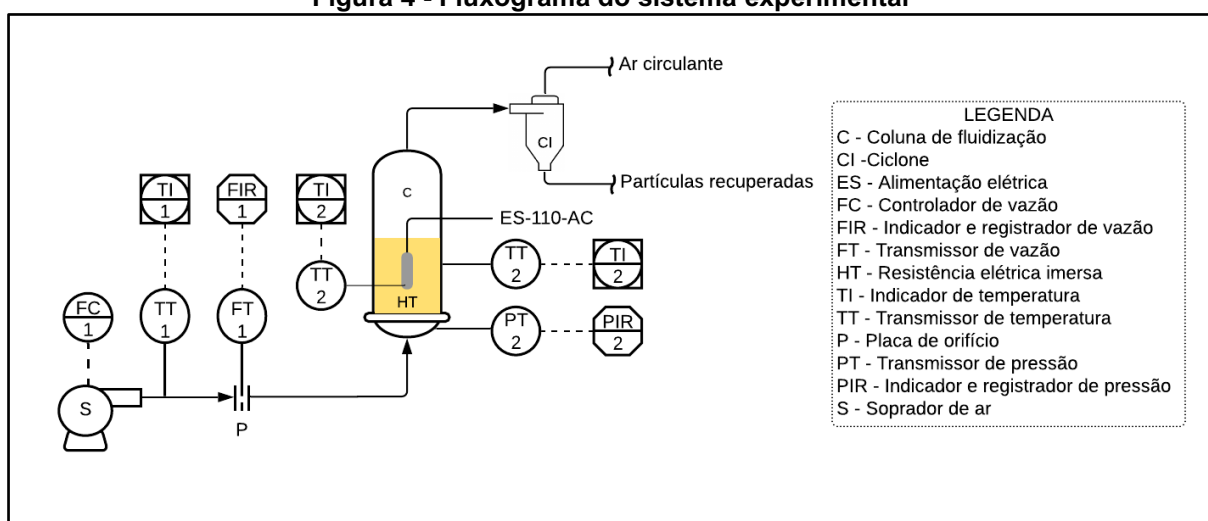
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentados os materiais, métodos e procedimentos empregados durante a realização da pesquisa.

#### 3.1 Sistema experimental

Para a realização dos experimentos, foi utilizada a estrutura fornecida pelo Laboratório de Sistemas Particulados da UTFPR/campus Ponta Grossa. O sistema experimental é composto por uma coluna de acrílico (figura 5) de 1,01 m de altura, com diâmetro interno de 0,11 m. O ar circulante fornecido para todo o sistema é proveniente de um soprador de ar da marca Elan<sup>®</sup> (modelo CRE04) acoplado a um motor de 4 cv. Este soprador é conectado ao leito através de uma tubulação de aço. A rotação do motor do soprador é regulada com auxílio de um inversor de frequência da marca WEG<sup>®</sup> (modelo CFW080160T2024POA1Z). A figura 4 apresenta, de forma esquemática, o sistema experimental utilizado.

Figura 4 - Fluxograma do sistema experimental



Fonte: Os autores (2021)

**Figura 5 - Coluna de fluidização de acrílico do Laboratório de Sistemas Particulados da UTFPR-PG**

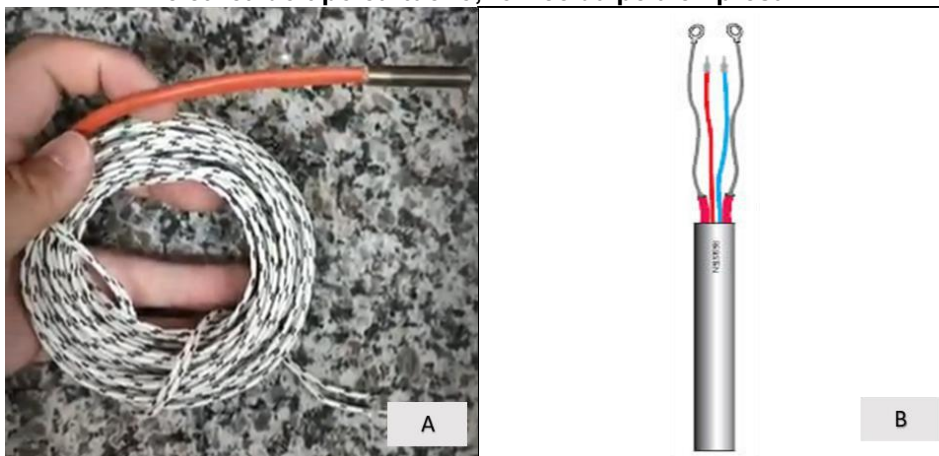


Fonte: os autores (2022)

### 3.1.1 Resistência imersa

Como fonte de calor imersa no leito de partículas, foi utilizada uma resistência elétrica do tipo cartucho da marca Resisten™, com um termopar tipo J embutido (Figura 6). Em relação às suas dimensões, possui um diâmetro de 6,35 mm, 30 mm de comprimento, e 5 m de cabo flexível para a conexão ao equipamento (com proteção de camiseta siliconada e fibra de vidro). A resistência elétrica opera com potência máxima de 50 W (alimentação de 110 V de corrente alternada) e temperatura de operação máxima de 500° C, segundo a fabricante.

**Figura 6 – A: foto da resistência instalada na coluna. B: imagem esquemática da resistência elétrica do tipo cartucho, fornecida pela empresa.**



Fonte: A - os autores (2022); B - Resisten (2021).

A instalação da resistência no leito foi realizada na posição vertical e fixada por meio de um suporte com apoio lateral na coluna (destacado na figura 7). Essa fixação foi definida com o intuito de promover uma mínima interferência da estrutura na movimentação do material no leito durante os experimentos, além de ser resistente às elevadas temperaturas empregadas nos testes.

**Figura 7 - Fixação da resistência elétrica na coluna.**



Fonte: os autores (2022).

### 3.1.2 Placa de Orifício

Para o monitoramento da velocidade do ar de fluidização, foi utilizado um medidor de vazão do tipo placa de orifício (figura 8), juntamente com dois transdutores de pressão posicionados na entrada e na saída do equipamento. Por meio da medição da queda de pressão provocada pela instalação desse elemento primário, foi possível calcular a vazão de fluido circulante no sistema.

**Figura 8 - Placas de orifício utilizadas nos experimentos**



**Fonte: os autores (2022)**

Foram selecionados dois diâmetros de placa de orifício para as medições de vazão de ar circulante, sendo elas 10 mm e 14 mm (Norma NBR-ISO 5167-1, ABNT, 1994), a depender do fluxo de ar requerido nos experimentos.

### 3.1.3 Transdutores de Pressão

Para a medição das flutuações de pressão no leito e queda de pressão na placa de orifício, foram utilizados transdutores de pressão da marca Cole Parmer® (modelo 98073-14 e modelo 68071-14). Esses instrumentos foram conectados a um sistema de aquisição de dados (modelo NI USB 6211) para o reconhecimento do sinal de pressão gerado e, computacionalmente, monitorados através do software LabVIEW™ versão 2010, ambos fornecidos pela National Instruments™. Esses equipamentos foram posicionados para aquisição de dados de pressão em 3 principais pontos durante a realização dos experimentos: à montante e jusante da placa de orifício e no plenum da coluna de fluidização.

Para a padronização dos dados obtidos por meio dos transdutores de pressão, foram utilizadas frequência de amostragem de 400 Hz, e 2048 leituras para cada amostra.

Para a verificação do funcionamento dos transdutores de pressão, foi utilizado um sistema de variação de pressão manual (tubo de assopro e válvula de bloqueio) conectado ao equipamento eletrônico e ao medidor de pressão estática (Tubo em U). A calibração foi realizada mediante a comparação do sinal elétrico, fornecido pelo transdutor de pressão, e a correspondente pressão visualizada na coluna de líquido. Foram coletados valores, para toda a faixa de medição útil dos transdutores, para construir as equações da reta, assim convertendo o sinal elétrico em pressão. O conjunto de resultados desta calibração são apresentados na tabela 1.

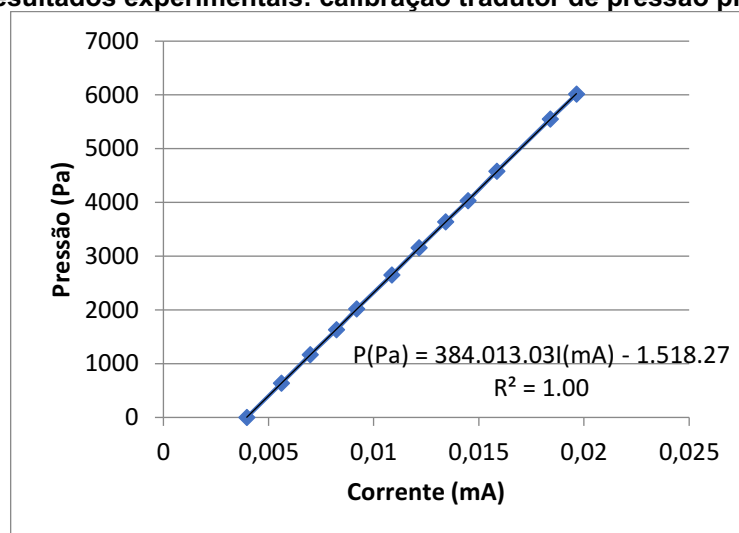
**Tabela 1 - Resultados experimentais: calibração dos transdutores de pressão**

Transdutor	Equação da reta	Faixa de medição (Pa)
Placa de orifício	$P(Pa) = 384.013,03 I(mA) - 1.518,27$	0,00 – 6.221,00
Plenum	$P(Pa) = 376.366,90 I(mA) - 1.660,90$	0,00 – 6.221,00
Montante	$P(Pa) = 784.55,67 I(mA) - 3.012,42$	0,00 – 12.442,00

Fonte: os autores (2022)

O Gráfico 9 ilustra um exemplo dos resultados obtidos na calibração dos transdutores de pressão.

**Gráfico 9- Resultados experimentais: calibração tradutor de pressão placa de orifício**



Fonte: os autores (2022)

### 3.2 Caracterização das partículas

Para compor o leito de partículas foram selecionados dois grupos de amostras: um grupo composto por partículas de esferas de vidro e outro por areia quartzosa.

Como observado no Gráfico 2, a classificação de sólidos fluidizados é realizada com o conhecimento de dois parâmetros: diâmetro e densidade da partícula. Assim, para confirmar que as partículas das amostras usadas nos experimentos pertencem ao grupo de fluidização borbulhante (ou grupo B), foram realizadas análises granulométricas por peneiramento para determinar o diâmetro médio dos sólidos, bem como, análises de densidade aplicando a técnica de picnometria.

### 3.2.1 Diâmetro médio da partícula

Para determinar o diâmetro das partículas, foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento, utilizando seis peneiras da marca Bertel® (figura 9-A) com as seguintes malhas (série Tyler): 28, 35, 48, 65, 100, 200 e fundo. Os experimentos foram realizados em duplicatas, utilizando um agitador de peneiras eletromagnético Vibrotech® CT 025 por 15 minutos, como visualizado na figura 9-B.

**Figura 9 - A: conjunto de peneiras usados no experimento. B: Agitador de peneiras eletromagnético.**



Fonte: os autores (2022)

Para o cálculo do diâmetro médio das partículas do leito, foi utilizada a relação do diâmetro de Sauter ( $d_{ps}$ ):

$$d_{ps} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{D_i} \right)^{-1} \quad (1)$$

Onde:

$D_i$  é o tamanho médio de abertura de malha entre peneiras subsequentes,  $x_i$  a porcentagem mássica de amostra retida entre peneiras subsequentes,  $n$  a quantidade de peneiras utilizadas em cada experimento.

Os resultados obtidos podem ser resumidos na tabela 2.

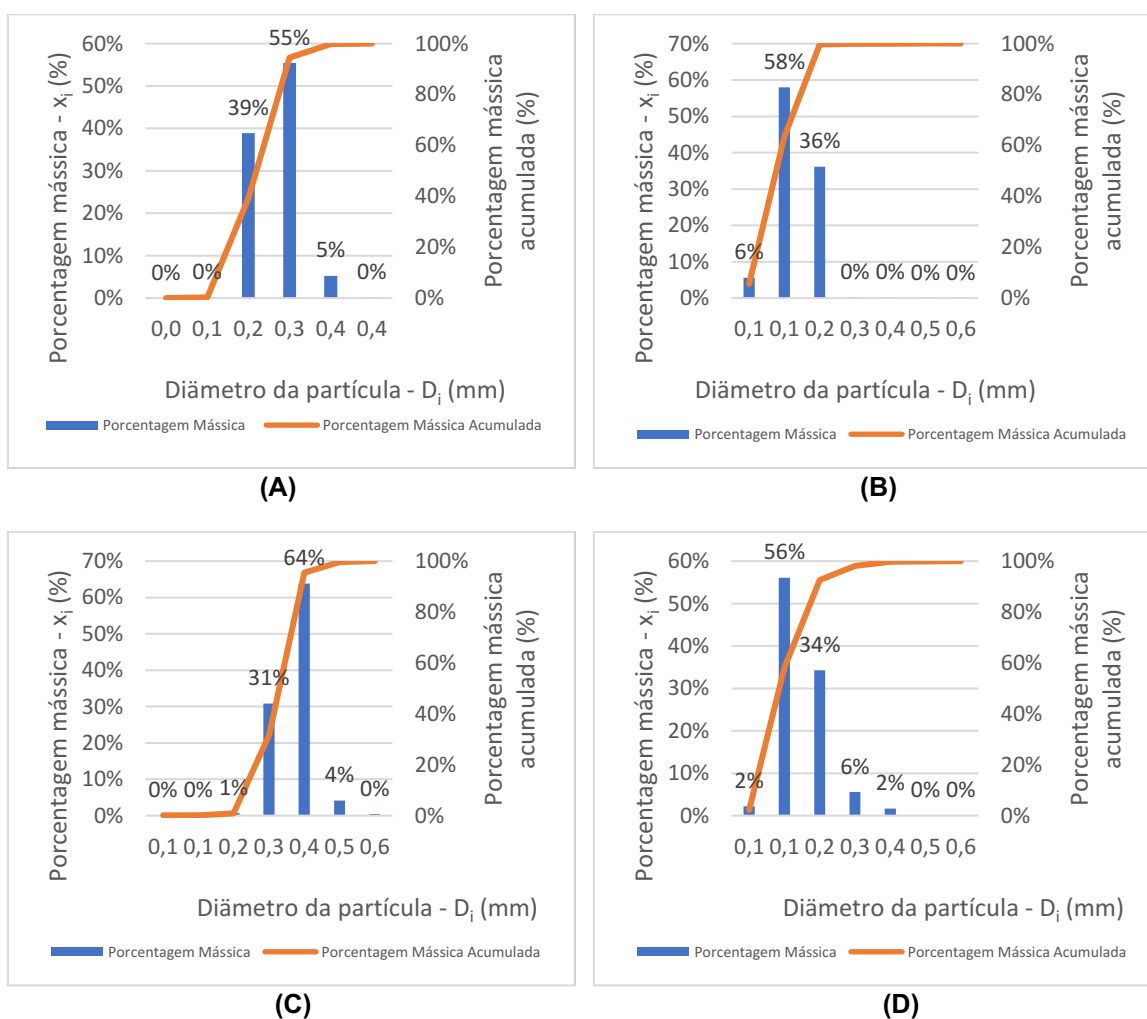
**Tabela 2 - Diâmetros médios de Sauter das partículas utilizadas nos testes experimentais.**

$d_{ps}$ (mm)	Partículas de areia		Partículas de vidro	
	Maior Diâmetro	Menor Diâmetro	Maior Diâmetro	Menor Diâmetro
	0,447	0,196	0,418	0,206

Fonte: os autores (2022)

Tais diâmetros de partículas permitem a comparação dos valores de coeficiente de transferência de calor obtidos com os valores encontrados por Turini (2017) e Torigoe (2019) em seus respectivos estudos. Os resultados da distribuição mássica das partículas presentes em cada peneira são ilustrados através do Gráfico 10

**Gráfico 10 – Distribuição mássica das partículas no peneiramento: A – Areia de quartzosa ( $d_p = 0,196\text{mm}$ ). B – Areia de quartzosa ( $d_p = 0,447\text{mm}$ ). C – Esfera de vidro ( $d_p = 0,206\text{mm}$ ). D – Esfera de vidro ( $d_p = 0,418\text{mm}$ )**



Fonte: os autores (2022)

### 3.2.2 Densidade da partícula

O valor de densidade relativa das partículas foi determinado mediante picnometria líquida. Para os experimentos foram utilizados: um picnômetro de vidro de 25 ml, uma balança analítica de precisão e água destilada à temperatura ambiente. Os experimentos foram realizados em triplicata. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.

**Tabela 3 - Resultados experimentais: densidade média das partículas**  
Partículas de areia    Partículas de vidro

Densidade média (kg/m <sup>3</sup> )	2.639,38 ± 27,66	2.511,10 ± 24,74
--------------------------------------	------------------	------------------

Fonte: os autores (2022)

### 3.3 Velocidade de mínima fluidização teórica

A velocidade de mínima fluidização pode ser obtida através de correlações empíricas encontradas na literatura. No presente trabalho, utilizou-se a correlação apresentada por Kunni e Levenspiel (1991):

$$\frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} = [(28,7)^2 + 0,0494 \left( \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right)]^{0,5} - 28,7 \quad (2)$$

Onde:

$u_{mf}$  é a velocidade de mínima fluidização (m/s),

$d_p$  é o diâmetro das partículas utilizadas (m),

$\rho_s$  é a massa específica das partículas (kg/m<sup>3</sup>),

$\rho_g$  é a massa específica do fluido circulante (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),

$\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido circulante (Pa.s).

A tabela 4 mostra a velocidade de mínima fluidização teórica para cada uma das partículas sólidas estudadas.

**Tabela 4 – Valores teóricos de velocidade de mínima fluidização**

Material	Diâmetro (mm)	$U_{mf}$ (m/s)
Areia quartzosa	0,196	0,05
	0,447	0,22
Esfera de vidro	0,206	0,05
	0,418	0,19

Fonte: os autores (2022)



### 3.4 Determinação do coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) foi calculado de acordo com o balanço de energia utilizado por Jia et al. (2017, p. 2749):

$$h = \frac{P}{A_s(T_s - T_b)} \quad (3)$$

Onde:

$P$  é a potência da resistência elétrica utilizada,

$A_s$  é a área superficial da resistência elétrica para troca térmica,

$T_s$  é a temperatura da superfície da resistência elétrica,

$T_b$  é a temperatura do leito de partículas.

Segundo Yang (2003), muitos investigadores calcularam o coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) para diferentes condições operacionais e geometrias, e observaram algumas características:

- $h$  aumenta abruptamente à medida que a velocidade do gás excede a velocidade mínima de fluidização;
- $h$  atinge um valor máximo em alguma velocidade específica que depende do tamanho da partícula;
- Além do ponto máximo,  $h$  diminui ligeiramente com o aumento da velocidade do gás;
- $h$  diminui com o aumento do tamanho da partícula.

### 3.5 Software utilizado para a aquisição dos dados experimentais

A aquisição e acompanhamento dos parâmetros experimentais dos testes fluidodinâmicos aquecidos foram realizadas no *software* LABVIEW 2010, utilizando a interface criada para controle do sistema, que podem ser observadas no apêndice A e B.

Mediante o registro dos dados de temperatura, pressão e vazão de forma simultânea, foi possível visualizar o comportamento térmico durante as análises, confirmar a estabilidade da condição fluidodinâmica do sistema e validar o estado de regime permanente.

### **3.6 Condições dos experimentos com leite aquecido**

Para a realização dos experimentos com leite aquecido foram definidas as seguintes condições experimentais:

- Experimento realizado em duplicata;
- Velocidade de fluidização constante durante o experimento;
- Potência da resistência elétrica de 50W mantida constante;
- Temperatura inicial do sistema com um limite de 30°C, visto testes prévios apontarem lentidão no resfriamento completo do leite;
- Temperatura final do leite medida após verificação de estabilização da temperatura do sistema, a qual valida o regime permanente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e analisados os resultados dos testes experimentais. Inicialmente serão expostos os dados de mínima fluidização. Na sequência, são apresentados os experimentos aquecidos durante o regime transiente, mediante o desenvolvimento das curvas de temperaturas e coeficiente de transferência de calor. Por fim, são apresentados os resultados dos experimentos aquecidos em regime permanente para cada material.

### 4.1 Dados de mínima fluidização

Na tabela 5 estão apresentados os valores da velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) experimental e teórica, para cada uma das partículas estudadas.

**Tabela 5 - Resultados experimentais: Velocidades de mínima fluidização das partículas do leito**

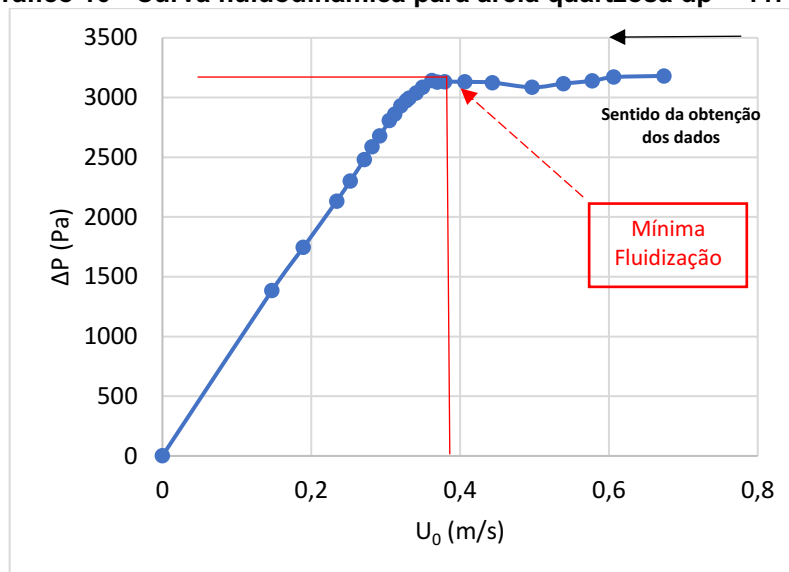
Partícula	Diâmetro Partícula (mm)	$U_{mf,experimental}$ (m/s)		$U_{mf,teórico}$ (m/s)
		Resultado	Média $\pm$ desvio padrão	
Areia Quartzosa	0,196	0,1135	0,1138 $\pm$ 0,0004	0,05
		0,1142		
	0,447	0,3614	0,3619 $\pm$ 0,0005	
		0,3624		
Esfera de Vidro	0,206	0,0793	0,0784 $\pm$ 0,0009	0,05
		0,0774		
	0,418	0,1474	0,1476 $\pm$ 0,0001	
		0,1477		

Fonte: os autores (2022)

É possível verificar na tabela 5 que os valores de  $U_{mf}$  experimental foram, em alguns casos, bastante diferentes dos calculados teoricamente. Isso deve-se a possíveis desvios experimentais do sistema utilizado e às restrições das equações semiempíricas adotadas, que garantem precisão somente sob as mesmas condições em que elas foram obtidas. Ao mesmo tempo temos que a amostragem de partículas utilizadas neste trabalho apresentam uma distribuição de tamanhos, podendo assim influenciar empiricamente o valor de velocidade de mínima fluidização. Apesar de não apresentarem um comportamento passível de previsão, proveniente das aproximações utilizadas nas equações empíricas, porém validam os experimentos realizados. Também, fica evidente que os valores de  $U_{mf}$  são maiores para diâmetros de partículas maiores, o que confirma que a fluidização é dificultada pelo maior tamanho e densidade dos sólidos.

O Gráfico 10 apresenta a curva fluidodinâmica para areia. Pode-se verificar que a velocidade de mínima fluidização que marca a transição do leito fluidizado para o fixo, a qual ocorre na queda de pressão com a diminuição da velocidade do ar. Experimentalmente, essa transição é marcada pelo desaparecimento de bolhas características de partículas do tipo B de Geldart no regime de borbulhamento.

**Gráfico 10 - Curva fluidodinâmica para areia quartzosa  $d_p = 447 \mu\text{m}$**

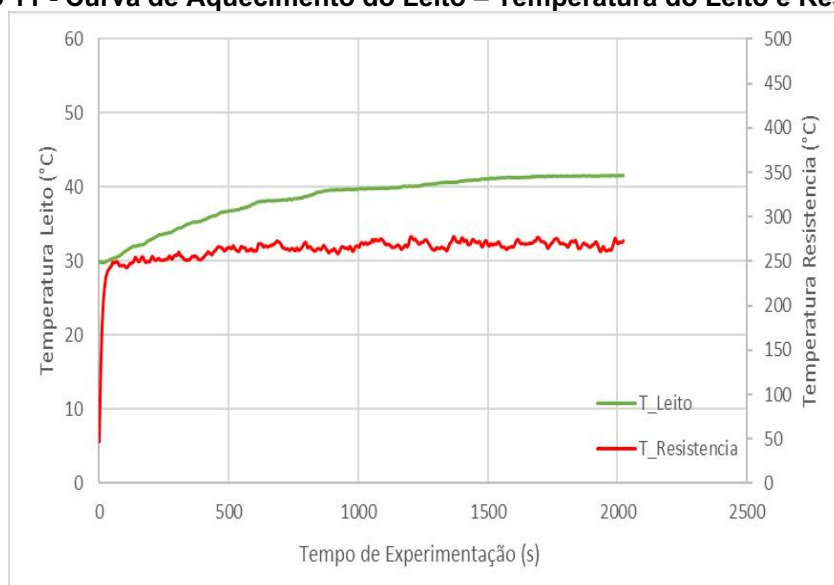


Fonte: os autores (2022)

## 4.2 Regime Transiente

Antes de serem apresentados os resultados referentes ao regime permanente de cada um dos experimentos com leito aquecido, foi preciso avaliar o comportamento dos seguintes parâmetros: temperatura do leito e temperatura da resistência, durante o regime transiente.

Com os dados coletados pelo *software* LABVIEW™, foi possível avaliar graficamente o comportamento do sistema, e perceber a transição do regime transiente para o permanente, como mostra o Gráfico 11.

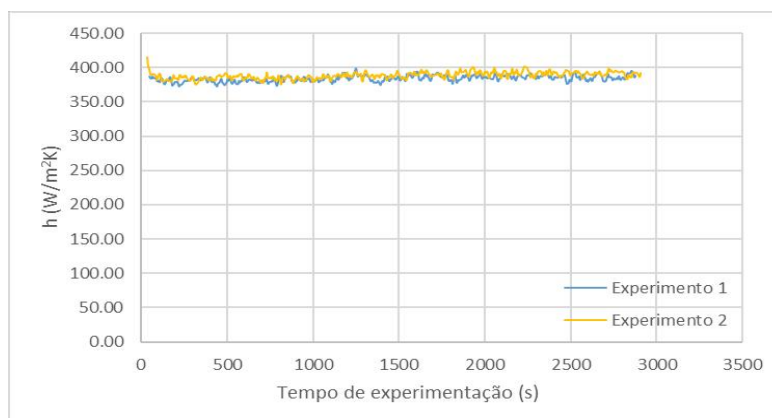
**Gráfico 11 - Curva de Aquecimento do Leito – Temperatura do Leito e Resistência**

Fonte: os autores (2022)

No Gráfico 11 tem-se o comportamento térmico do leito e da resistência imersa. Por meio desse exemplo, é possível visualizar o rápido acréscimo na temperatura da resistência no início do experimento, momento em que o dispositivo é acionado, o que demonstra a resposta rápida do equipamento. Também, verifica-se que ambas as temperaturas sofrem um acréscimo, para o leito de aproximadamente 10°C e a resistência de 20°C, ao longo do experimento, e que decorridos 1750 segundos (29 minutos) a temperatura do leito tende a estabilizar.

O experimento do Gráfico 11, durou aproximadamente 34 minutos, com temperatura inicial do leito de 30,05 °C e temperatura final de 41,19 °C, resultando numa taxa média de aquecimento global de 0,34 °C/min. Esses valores variariam de acordo com as condições para cada um dos experimentos, porém ilustram de forma geral o comportamento do sistema.

Ao mesmo tempo, temos o Gráfico 12 que ilustra a variação temporal do coeficiente de transferência de calor para a esfera de vidro na razão de velocidade  $U_0 / U_{mf} = 4,0$ . Sendo esse uma das condições experimentais apresentada, cada um dos testes foi submetido a mesma análise em duplicata.

**Gráfico 12 - Curva de Aquecimento do Leito – Coeficiente de Transferência de Calor**

Fonte: os autores (2022)

Os resultados do Gráfico 12 mostram o comportamento do coeficiente de transferência de calor das duplicatas. Visualmente, é perceptível que o coeficiente se manteve aproximadamente constante no desenvolvimento do regime transiente de aquecimento do leito, além das duplicatas apresentarem valores próximos. Os valores próximos obtidos entre duplicatas mostram a confiabilidade dos experimentos realizados, obtendo-se valores médios com baixo desvio padrão.

Ainda sobre a constância do coeficiente de transferência de calor durante o regime transiente, a resposta é proporcional a estabilidade da temperatura da resistência imersa, uma vez que o cálculo do coeficiente depende somente da diferença de temperatura entre a resistência imersa e o leito de partículas (a área superficial da resistência e a potência da resistência são constantes).

Na Tabela 6 são apresentados os resultados especificamente para uma das condições analisadas. O Apêndice D contém os gráficos obtidos para os outros testes realizados.

**Tabela 6 - Resultados Experimentais: duplicata exemplo curva aquecimento do leito**  
**Areia Quartzosa  $d_p = 196 \mu\text{m}$  (Partícula Menor) e  $U_o / U_{mf} = 4,0$**

	Experimento 1	Experimento 2	Média	Variância	Unidade
Temperatura ambiente	25,00	23,80	24,40	0,60	°C
Temperatura leito inicial	30,05	26,97	28,51	1,54	°C
Temperatura leito final	41,55	40,82	41,19	0,37	°C
Temperatura resistência final	269,94	269,58	269,76	0,18	°C
Velocidade de fluidização	0,4618	0,4619	0,4619	0,001	m/s
Quantidade de pontos	396	428	-	-	-

Fonte: os autores (2022)

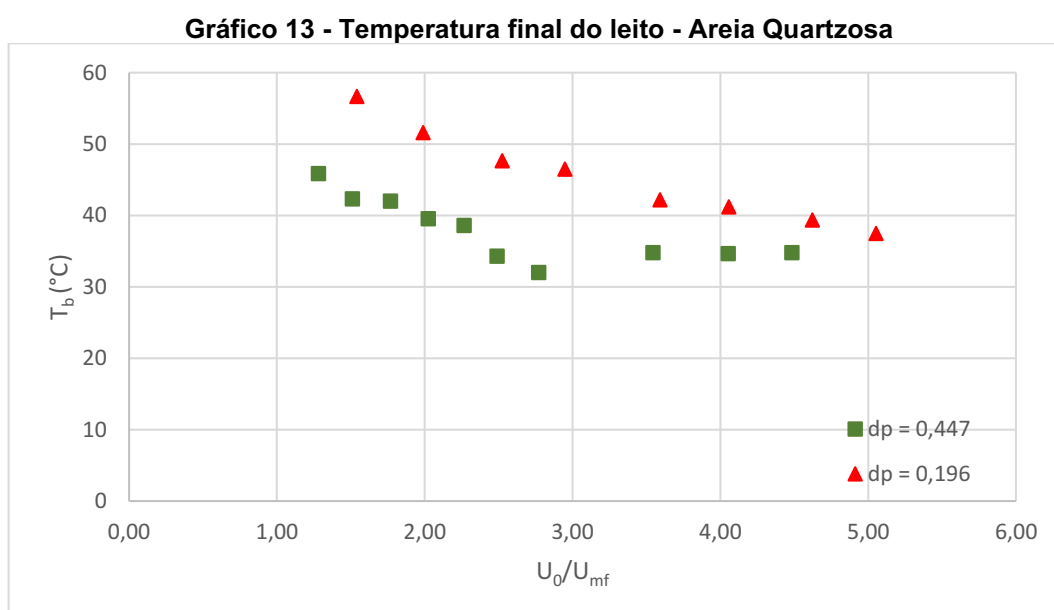
### 4.3 Regime permanente

Os resultados obtidos em regime permanente estão divididos por material do leito, sendo uma seção para areia quartzosa e outra para esfera de vidro, respectivamente. Todos os gráficos desta seção foram desenvolvidos a partir dos dados apresentados no Apêndice C.

Um ponto importante a ser mencionado é a ausência de valores nos Gráficos de temperatura e coeficiente de transferência de calor nos pontos onde o número de fluidização ( $U_o / U_{mf}$ ) é igual ou próximo a 1. Isto porque a resistência imersa apresentou temperaturas de operação acima do suportado ( $500^{\circ}\text{C}$ , segundo fabricante), representando assim um risco de operação. Tal problema foi mencionado por Torigoe (2019), onde o autor descreve que nessa condição fluidodinâmica as partículas se condicionam imóveis pelo desaparecimento das bolhas durante a operação, devido à redução da velocidade de ar circulante. Assim, tal condição impede a renovação de partículas que entram em contato direto com a resistência, o que resulta em um acúmulo de calor em torno dessa, ocasionando problemas de operação no sistema e colocando em risco a vida útil do equipamento.

#### 4.3.1 Areia quartzosa

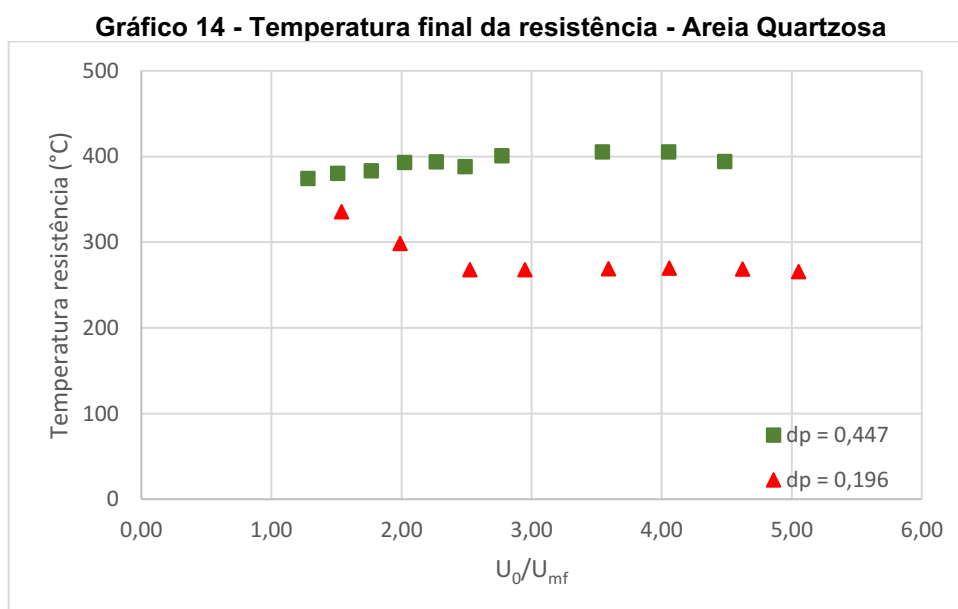
O Gráfico 13 apresenta os resultados de temperatura de leito obtidos para a areia quartzosa, para ambos os tamanhos de partícula e número de fluidização entre 1,0 e 5,0.



Fonte: os autores (2022)

No Gráfico 13, pode-se verificar uma variação na temperatura do leito de partículas no regime permanente para cada uma das razões de velocidade de ar circulante, mesmo após fixar a energia térmica fornecida ao sistema fluidodinâmico (potência da resistência constante de 50W). As partículas de menor diâmetro apresentaram temperaturas de leito superiores quando comparados com as partículas de maior diâmetro. Também pode-se verificar uma diminuição da temperatura final com o incremento na razão de velocidade  $U_o / U_{mf}$ . A variação de temperatura foi de 19,21°C para partículas de menor diâmetro e 13,86°C de diferença para partículas de maior diâmetro.

Quando tratado da temperatura da resistência, em contrapartida à temperatura do leito, as partículas de maior diâmetro levaram a temperaturas da resistência maior quando comparado com as partículas de menor diâmetro, como pode ser observado no Gráfico 14. Também, é possível perceber que a temperatura da resistência permaneceu praticamente constante com a variação do ar circulante para as duas partículas, com exceção das razões de velocidade menores que 2,5 para a partícula de menor diâmetro.



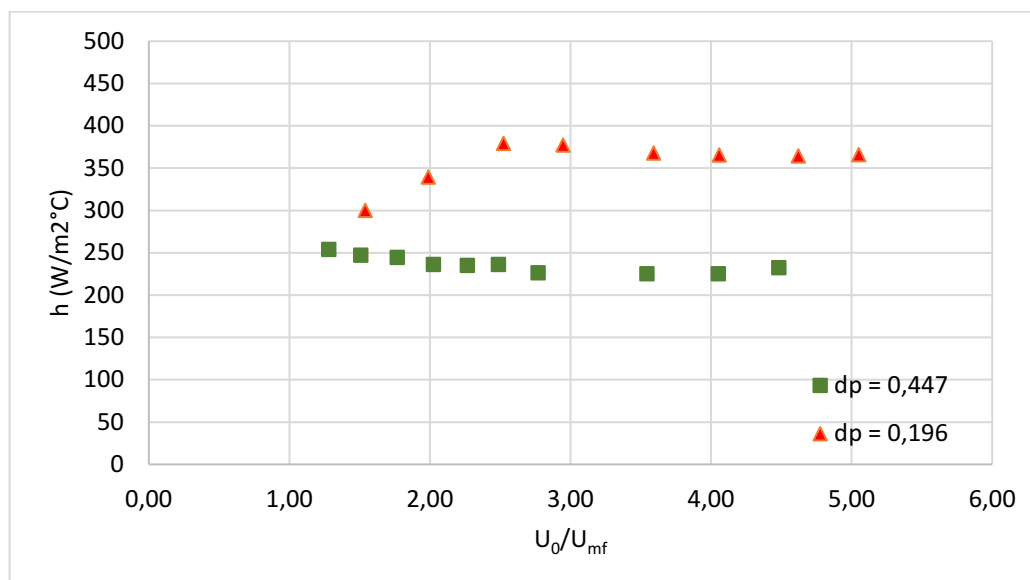
Fonte: os autores (2022)

Com relação ao coeficiente de transferência de calor, os resultados envolvendo partículas de menor diâmetro obtiveram valores maiores quando comparados às partículas maiores, como pode ser observado no Gráfico 15. Esse



comportamento foi verificado por Turini (2017), que também obteve coeficientes superiores para as partículas de menor diâmetro de areia quartzosa em seu sistema de troca térmica em leito fluidizado borbulhante.

**Gráfico 15 - Coeficiente de transferência de calor - Areia Quartzosa**



Fonte: os autores (2022)

No Gráfico 15, é possível identificar uma região ótima de transferência de calor ocorrendo entre  $U_0 / U_{mf} = 2,5$  e  $3,0$ , para partículas de menor diâmetro, com um ponto máximo de  $h = 379,30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Também é possível verificar que o coeficiente de transferência de calor varia entre  $300,03$  à  $379,30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Um comportamento semelhante do coeficiente de transferência de calor foi identificado por Turini (2017) durante seus testes. Apesar deste autor ter padronizado a temperatura do leito em  $50^\circ\text{C}$  ou  $70^\circ\text{C}$ , também identificou um ponto ótimo do coeficiente para a razão de velocidade na faixa de  $2,5$  e  $3,0$ . Também vale destacar, que o ponto ótimo do coeficiente de transferência de calor é identificado no menor valor de temperatura da resistência imersa. Visto a temperatura da resistência ser significativamente superior à temperatura do leito, e possuir proporcionalidade inversa no cálculo, seu valor possui influência majoritária na determinação do coeficiente de transferência de calor, quando comparado à temperatura do leito.

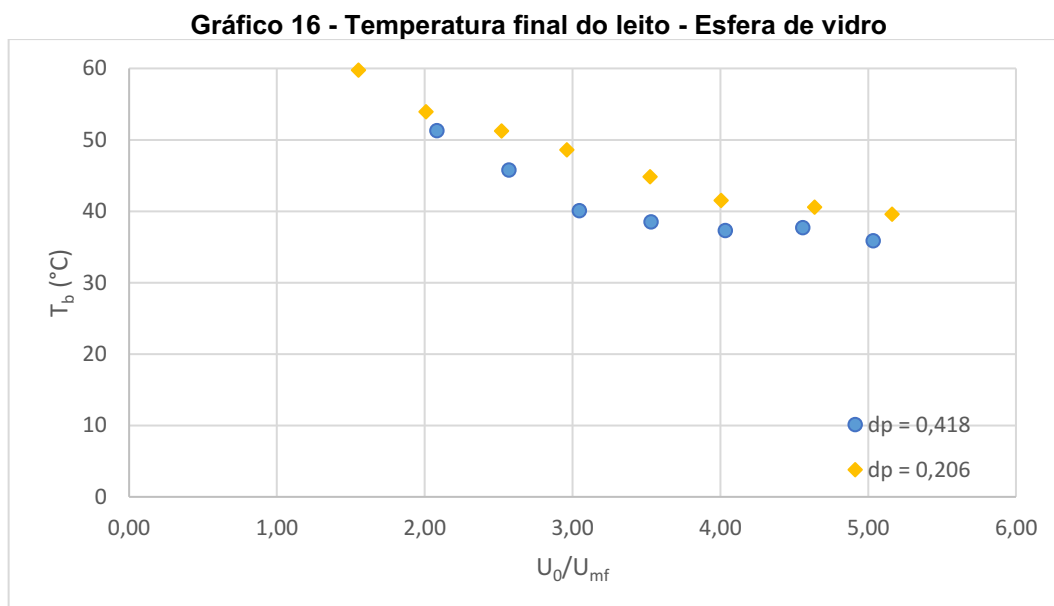
Já, para as partículas de maior diâmetro, o coeficiente de transferência de calor apresentou comportamento praticamente constante durante todos os números de fluidização, sendo o valor máximo de  $h = 254,21 \text{ W/m}^2\text{°C}$  para  $U_0 / U_{mf} = 1,28$  e mínimo de  $h = 225,35 \text{ W/m}^2\text{°C}$  para  $U_0 / U_{mf} = 4,05$ . Diferentemente do observado para

as partículas de menor diâmetro, as partículas de maior diâmetro não apresentaram um número de fluidização ótimo.

Em relação ao rendimento do trocador de calor tipo casco e tubo projetado por Turini (2017), o autor indica valores do coeficiente de transferência de calor suspensão-parede na faixa de 169,93 W/(m<sup>2</sup>K) a 468,43 W/(m<sup>2</sup>K). Para o presente trabalho, os valores encontrados foram de 225,35 W/(m<sup>2</sup>K) a 379,30 W/(m<sup>2</sup>K), valores que se encontram próximos de Turini (2017), considerando semelhança na faixa de temperatura e diâmetro do material particulado.

#### 4.3.2 Esfera de Vidro

Os Gráficos 16 e 17 ilustram a temperatura final do leito em relação ao número de fluidização para as partículas sólidas estudadas. Nesses Gráficos, é possível observar que a temperatura do leito apresenta comportamento similar à da areia quartzosa, sendo maior para as partículas de menor diâmetro, e o mesmo decréscimo da temperatura com o incremento do número de fluidização, com as maiores temperaturas para  $U_o / U_{mf}$  entre 1,5 e 2,0.

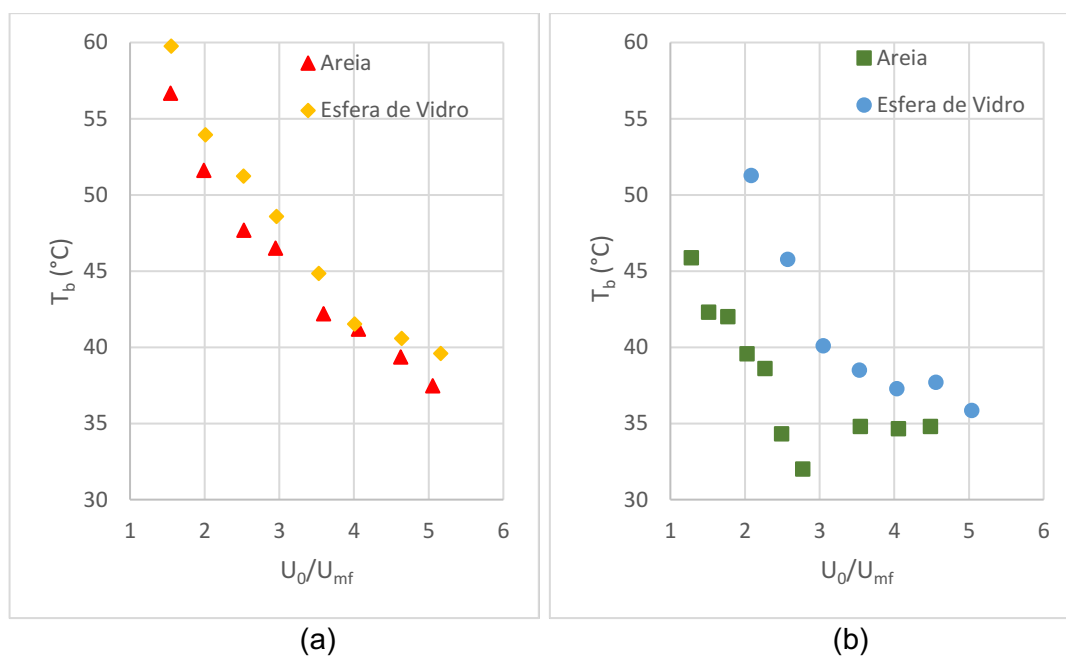


Fonte: os autores (2022)

Para as partículas de menor diâmetro, as temperaturas finais de leito variaram entre  $T_b = 59,73^\circ\text{C}$  para  $U_o / U_{mf} = 1,55$  e  $T_b = 39,59^\circ\text{C}$  para  $U_o / U_{mf} = 5,16$ . Já, para as partículas de maior diâmetro tem-se temperaturas entre  $T_b = 51,28^\circ\text{C}$  para  $U_o / U_{mf} = 2,08$  e  $T_b = 35,86^\circ\text{C}$  para  $U_o / U_{mf} = 5,03$ .

Verifica-se que as partículas de esfera de vidro apresentaram valores superiores em relação à areia quartzosa para todos os números de fluidização, como pode ser observado no Gráfico 17, sendo maior a diferença para partículas de maior diâmetro. De forma geral, tem-se que a temperatura do leito se apresentou máxima ( $T_b = 59,76^\circ\text{C}$ ) para as esferas de vidro de  $d_p = 0,206\text{mm}$  e  $U_o / U_{mf} = 1,55$ , e mínima ( $T_b = 32,01^\circ\text{C}$ ) para areia quartzosa de  $d_p = 0,447\text{mm}$  e  $U_o / U_{mf} = 2,77$ .

**Gráfico 17- Temperatura do leito: (a) Partículas Menores: Esfera de vidro  $d_p = 206 \mu\text{m}$  e Areia Quartzosa  $d_p = 196 \mu\text{m}$  (b) Partículas Maiores: Esfera de vidro  $d_p = 418 \mu\text{m}$  e Areia Quartzosa  $d_p = 447 \mu\text{m}$**



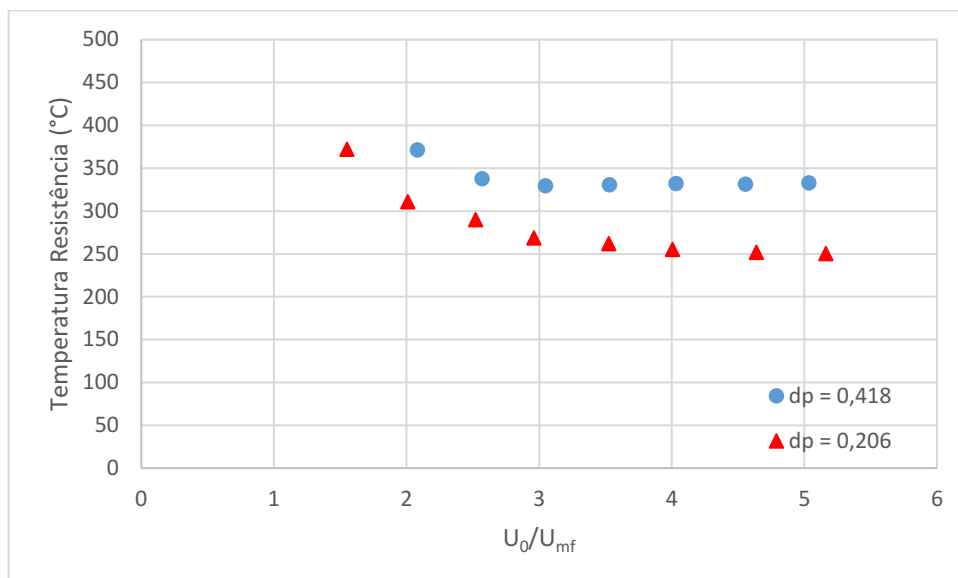
Fonte: os autores (2022)

Assim como apresentado para as partículas de areia quartzosa, para as esferas de vidro a temperatura da resistência se apresentou maior para as partículas de maior diâmetro. A diferença entre as curvas é de  $47,67^\circ\text{C}$  para  $U_o / U_{mf} \cong 2,5$  e  $82,61^\circ\text{C}$  para  $U_o / U_{mf} \cong 5,0$ , com uma média geral de  $66,52^\circ\text{C}$ . As temperaturas variaram entre  $250,22^\circ\text{C}$  e  $372,16^\circ\text{C}$  para as partículas de menor diâmetro e entre  $229,27^\circ\text{C}$  e  $371,21^\circ\text{C}$  para as partículas de maior diâmetro para a faixa de velocidade analisada.

O Gráfico 18 apresenta o comportamento da temperatura da resistência em função do número de fluidização. Pode-se verificar que os resultados são semelhantes aos obtidos para a areia quartzosa (Gráfico 14). Em ambos os casos, para a partícula de maior diâmetro é verificado uma tendência de estabilização na temperatura da resistência em velocidades maiores que 3,0. Para as partículas de menor diâmetro, a

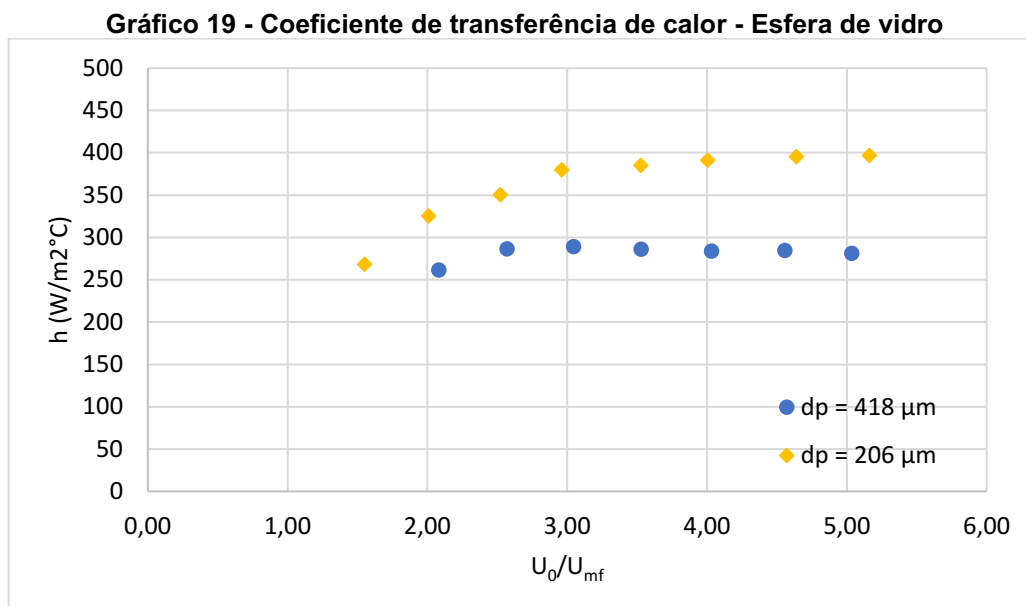
temperatura possui comportamento muito próximo, onde a temperatura decai até uma velocidade perto de 3,0, estabilizando em velocidades superiores.

**Gráfico 18 - Temperatura final da resistência - Esfera de vidro**



Fonte: os autores (2022)

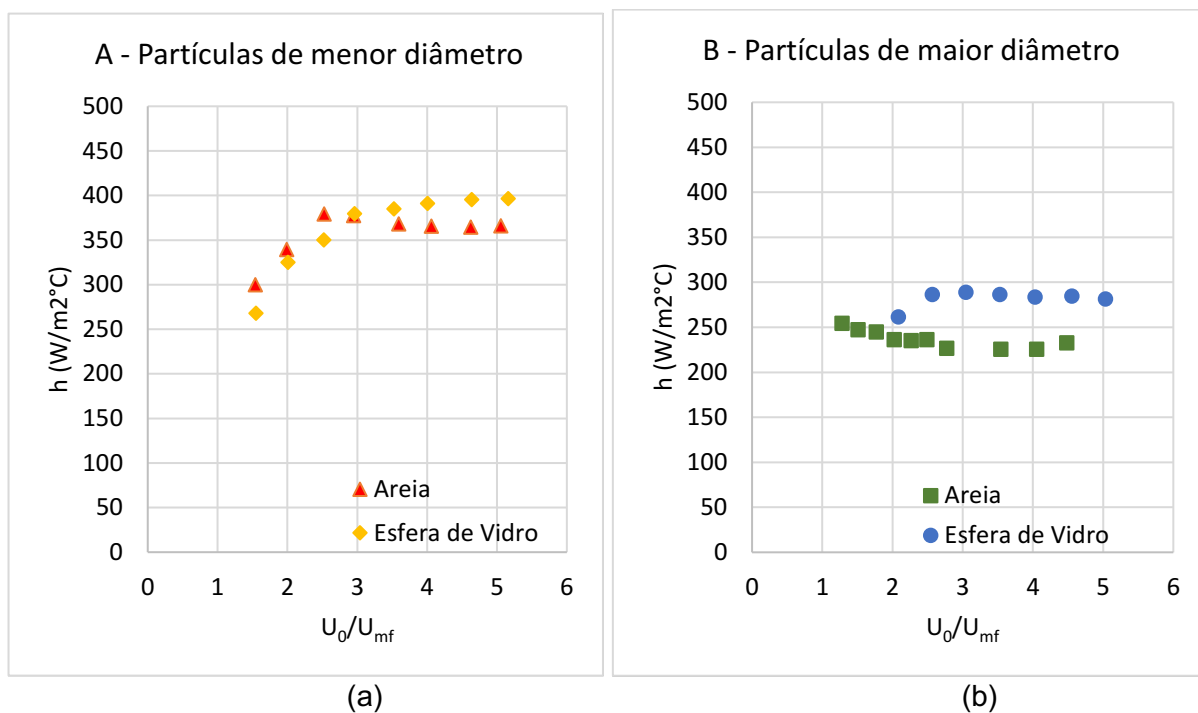
A influência da razão de velocidade de ar circulante no coeficiente de transferência de calor para esfera de vidro é mostrada no Gráfico 19. Como pode ser observado neste, bem como no Gráfico 15, obteve-se valores maiores de coeficiente de transferência de calor para partículas menores, assim como percebido por Turini (2016) em seus estudos com areia quartzosa. Segundo Abu-Zaid (2000) e Basu (2006), isso ocorre porque à medida que o tamanho da partícula aumenta, a área superficial das partículas sólidas em contato com a superfície aquecida diminui, resultando na redução da transferência de calor por condução e conseqüentemente no decréscimo do coeficiente de transferência de calor.



Fonte: os autores (2022)

O Gráfico 20 mostra o comportamento do coeficiente de transferência de calor em função do número de fluidização para todas as partículas e diâmetros estudados neste trabalho. Verifica-se que para as partículas de menor diâmetro, os valores se demonstraram similares entre os diferentes números de fluidização e materiais, porém as esferas de vidro de maior diâmetro apresentaram coeficientes de transferência de calor superiores em relação a areia quartzosa. Isto sugere que as partículas de esfera de vidro sofrem menor variação no coeficiente de transferência de calor com a mudança de diâmetro de partícula, característica que lhe confere uma vantagem em relação à areia para uso em operações de troca térmica em leito fluidizado borbulhante, onde o tamanho de partícula pode mudar consideravelmente com o tempo.

**Gráfico 20 - Coeficiente de transferência de calor: (a) Partículas Menores: Esfera de vidro  $d_p = 206 \mu\text{m}$  e Areia Quartzosa  $d_p = 196 \mu\text{m}$  (b) Partículas Maiores: Esfera de vidro  $d_p = 418 \mu\text{m}$  e Areia Quartzosa  $d_p = 447 \mu\text{m}$**



Para os experimentos envolvendo esfera de vidro, não foram identificados números de fluidização ótimos para o coeficiente de transferência de calor. As partículas de maiores diâmetros médio apresentaram constância no resultado do coeficiente, independentemente da variação do número de fluidização, com valor mínimo de  $261,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  para  $U_0 / U_{mf} = 2,08$ , e máximo de  $288,92 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  para  $U_0 / U_{mf} = 3,05$ . Já, as partículas de menor diâmetro de esfera de vidro apresentaram incremento no coeficiente com o acréscimo do número de fluidização até o último ponto de teste, indicando valor mínimo de  $268,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  para  $U_0 / U_{mf} = 1,55$  e máximo de  $396,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  para  $U_0 / U_{mf} = 5,16$ .

## 5 Conclusões

Neste trabalho estudou-se o comportamento térmico de materiais particulados do tipo Geldart B em um leito fluidizado borbulhante com uma resistência elétrica do tipo cartucho imersa como fonte de calor. Submetendo o sistema fluidodinâmico em diferentes condições de número de fluidização, os testes também envolveram alteração do material particulado que compõe o leito, sendo utilizado areia quartzosa ( $d_p = 0,196\text{mm}$  e  $0,447\text{mm}$ ) e esfera de vidro ( $d_p = 0,206\text{mm}$  e  $0,418\text{mm}$ ). Como resultado foram realizados 33 testes em duplicata, e nesses experimentos avaliou-se parâmetros de processo como o comportamento da temperatura do leito, temperatura da resistência e coeficiente de transferência de calor suspensão-superfície.

Para os resultados envolvendo o regime permanente, foram obtidos coeficientes de transferência de calor que variaram entre  $225,35\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  a  $379,30\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  para as partículas de areia quartzosa e  $261,22\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  a  $396,65\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  para as esferas de vidro. Em ambos os grupos de experimentos foi constatado a presença de maiores coeficientes para as partículas de menor diâmetro (areia quartzosa  $d_p = 0,196\text{ mm}$  e esfera de vidro  $d_p = 0,206\text{ mm}$ ). Foram identificadas velocidades ótimas de fluidização próximas a  $U_o / U_{mf} = 3,00$  para areia quartzosa  $d_p = 0,196\text{ mm}$  e esfera de vidro  $d_p = 0,447$ . Para os outros grupos amostrais estudados, não foi verificado tal ponto.

A proposta de alteração de *layout* do sistema de transferência térmica em leito fluidizado com imersão direta de resistência elétrica trouxe uma simplificação na montagem experimental. Com este novo sistema, retira-se a necessidade da presença de um trocador de calor robusto ou um segundo fluido circulante a ser aquecido. Além disso, também vale ressaltar a baixa potência de  $50\text{ W}$ , superfície de troca térmica limitada de  $6\text{ cm}^2$  e possibilidade de inserção de um medidor de temperatura dentro do equipamento, representando assim elevado controle e segurança durante funcionamento.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a experimentação com uma resistência imersa no leito de potência variada, podendo assim comparar o comportamento térmico do sistema em diferentes condições para a fonte de energia, ou padronizar temperaturas fixas de operação para o leito de partículas. Outros trabalhos também podem se basear neste estudo e utilizar materiais particulados de composição distinta, comparando assim os resultados com base nas propriedades

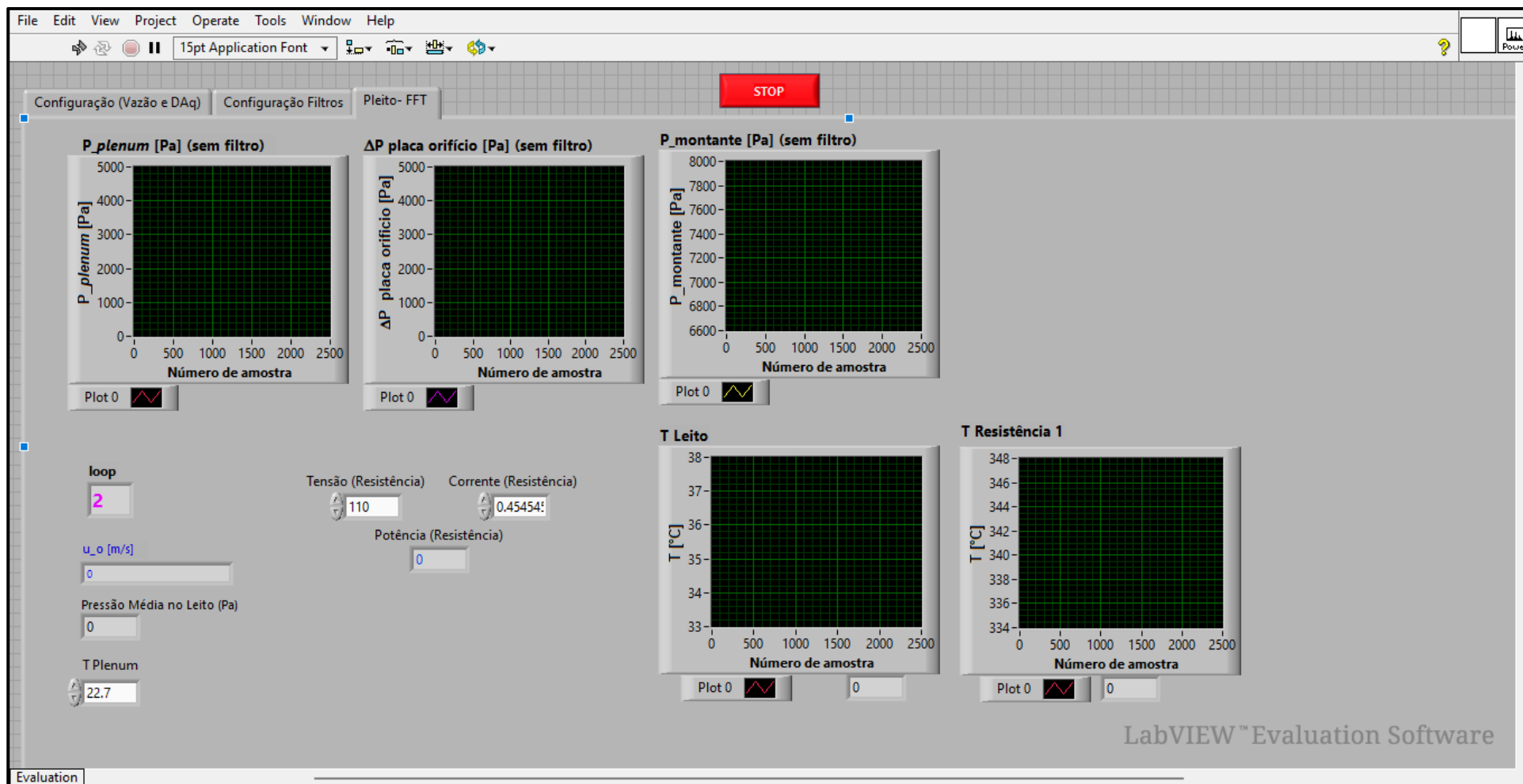
dos materiais. Além disso, para abordagens práticas em relação ao sistema fluidodinâmico, também é possível estudar a viabilidade do sistema experimental para o processo de secagem de grãos, ou até mesmo decaagem térmica de ferramentas metálicas em leito fluidizado.



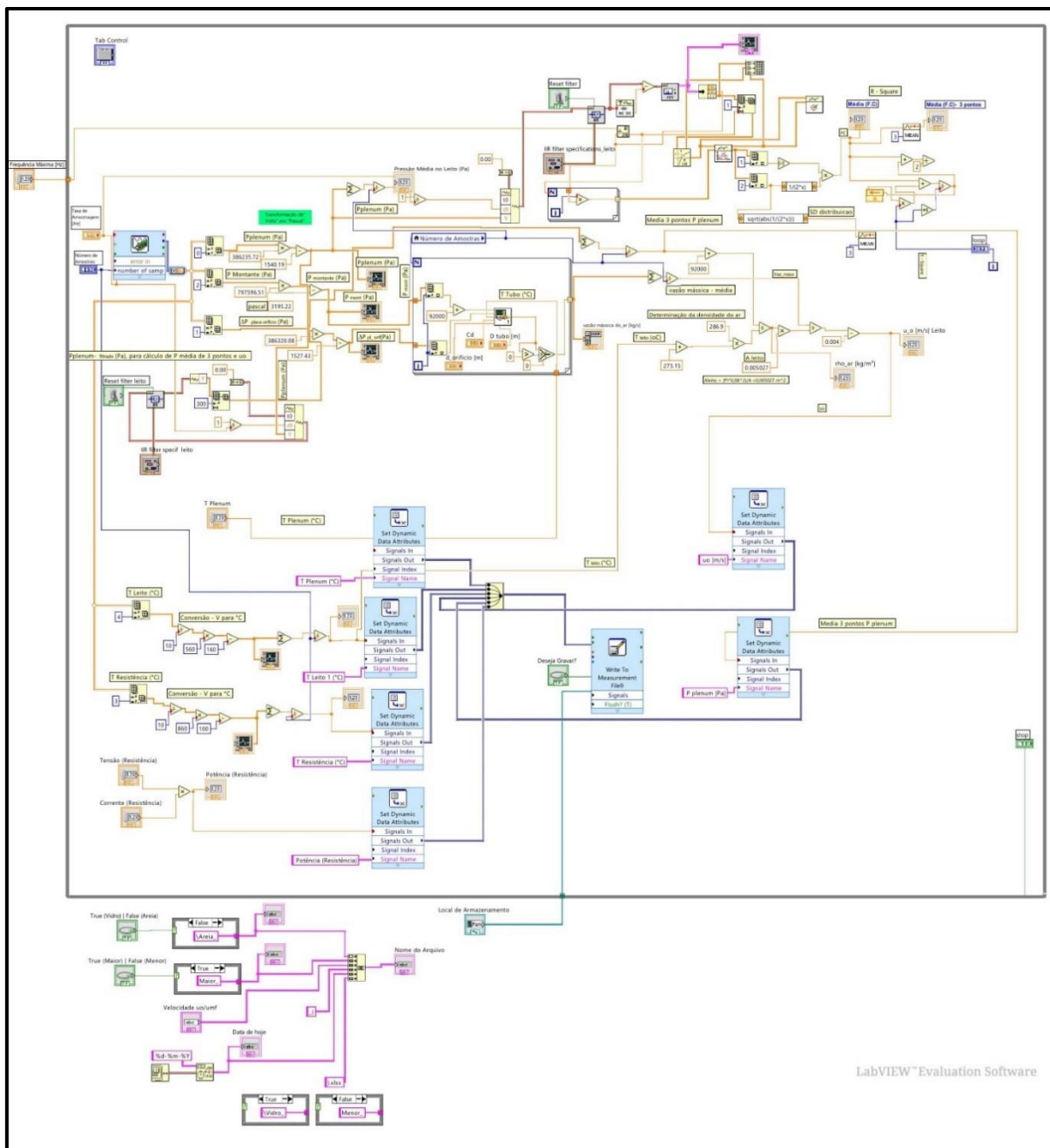
## REFERÊNCIAS

- AL-BUSOUL, M; ABU-ZAID, M. Prediction of heat transfer coefficient between immersed surfaces and fluidized beds. **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, v. 27, n. 4, p. 549-558, 2000.
- BASU, Prabir. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. 1. ed. Nova Scotia: CRC Press, 2006.
- BOEREFIJN, R. et al. Analysis of the dynamics of heat transfer between a hot wire probe and gas fluidized beds. **Powder Technology**. n. 102, p. 53 - 63, 1999.
- CHANDRAN, R., Chen, J. C., & Staub, F. W. (1980). Local Heat Transfer Coefficients around Horizontal Tubes in Fluidized Beds. **Journal of Heat Transfer**, 102(1), 152.
- GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**. p. 285-292, 1973.
- JIA, D. et al. Heat transfer in a pulsed fluidized bed of biomass particles. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. n. 56, p. 3740 - 3756, 2017.
- KUNII, D; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Boston, London, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington: Butterworth-Heinemann, 1991.
- PARISE, Maria Regina. **Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- PISTERS, K; PRAKASH, A. Investigations of axial and radial variations of heat transfer coefficient in bubbling fluidized bed with fast response probe. **Powder Technology** . n. 207, p. 224–231, 2011.
- RESISTEN RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS. Resistência elétrica cartucho alta carga e baixa carga. **Resistência Cartucho**. 2021. Disponível em: <<https://www.resisten.com.br/resistencia-cartucho>>. Acesso em: 04 de ago. de 2021.
- ROHSENOW, W. M., HARTNETT, J. P., CHO, Y. I. **Handbook of Heat Transfer: McGraw-Hill**, 3rd ed. New York, 1998, 1501 p.
- SJÖSTEN, J. et al. Effect of particle coating on fluidized-bed heat transfer. **Ind. Eng. Chem. Res.** v. 43, n. 18, p.5763-5769, 2004.
- TORIGOE, Eric Keen. **Estudo experimental do trocador de calor de jaqueta em leito fluidizado**. 2019. Relatório de Pesquisa (Programa de Iniciação Científica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.
- TURINI, Bruno Alves Figueroa. **Avaliação experimental do coeficiente de transferência de calor suspensão-parede em leito fluidizado borbulhante monitorado pelo método da frequência central gaussiana**. 2017.131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.
- YANG, W.C. **Handbook of Fluidization and Fluid-particle Systems**. Nova Yorque: Marcel Dekker Inc, 2003.

## **APÊNDICE A – *Dashboard* LABVIEW™**



**APÊNDICE B – Código fonte da *Dashboard* LABVIEW™**



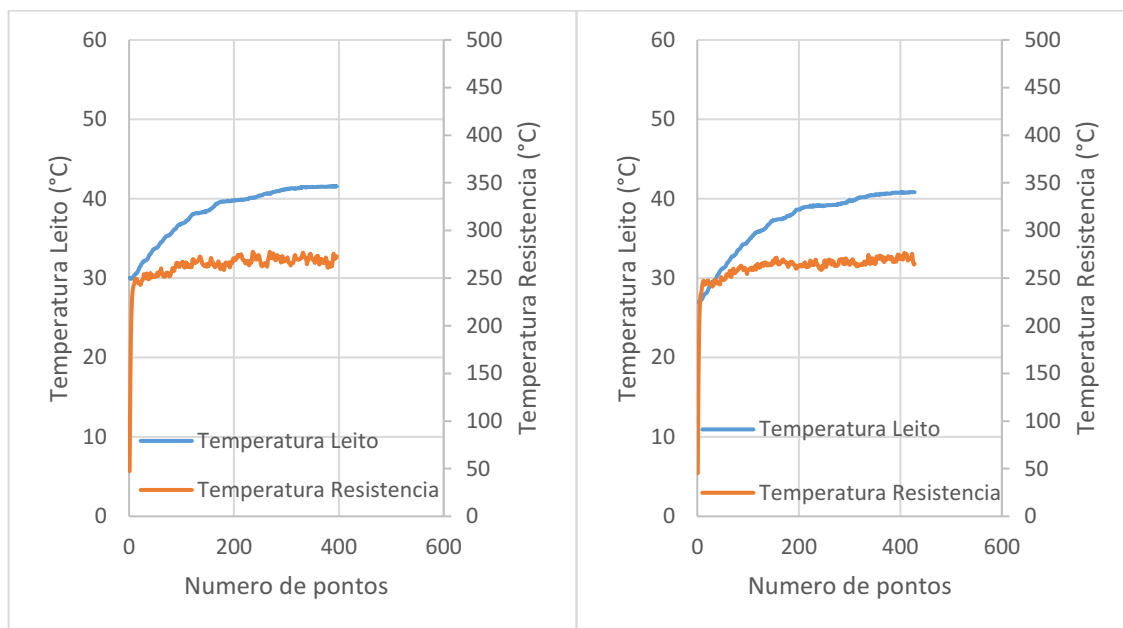
**APÊNDICE C – Resultados compilados dos experimentos com leite aquecido**

Tipo de Partícula	Diâmetro da partícula (mm)	Velocidade Mínima Fluidização (m/s)	Velocidade Média (m/s)	Número de fluidização	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura Leito - Inicial (°C)	Temperatura Leito - Final (°C)	Temperatura Resistência (°C)	Tempo de Experimento (min)	Coefficiente de TC (W/m <sup>2</sup> *C)
Areia Quartzosa	0,196	0,11382	0,18	1,54	24,15	26,15	56,68	335,56	00:45:34	300,03
			0,23	1,99	24,95	29,79	51,61	298,45	00:35:15	339,47
			0,29	2,52	25,00	29,78	47,68	267,95	00:33:37	379,30
			0,34	2,95	24,60	27,79	46,51	267,89	00:42:09	377,39
			0,41	3,59	25,00	29,79	42,20	269,26	00:27:26	368,00
			0,46	4,06	24,40	28,51	41,19	269,76	00:35:09	365,51
			0,53	4,62	24,25	29,18	39,37	268,56	00:33:30	364,54
			0,58	5,05	24,25	26,06	37,47	265,86	00:30:10	365,87
	0,447	0,36191	0,46	1,28	24,40	29,71	45,87	374,55	00:34:46	254,21
			0,55	1,51	24,15	29,72	42,30	380,51	00:27:11	247,12
			0,64	1,77	24,30	29,82	42,01	383,46	00:27:13	244,73
			0,73	2,02	24,00	30,47	39,56	393,16	00:23:28	236,31
			0,82	2,27	23,60	29,85	38,60	393,96	00:26:04	235,11
			0,90	2,49	23,40	24,55	34,32	388,28	00:24:17	236,13
			1,00	2,77	20,00	21,82	32,01	400,86	00:43:52	226,58
			1,28	3,54	22,40	27,61	34,80	405,34	00:26:35	225,49
			1,47	4,05	21,80	25,57	34,66	405,50	00:44:40	225,35
			1,62	4,48	21,00	29,09	34,80	394,12	00:33:22	232,51
Esfera de Vidro	0,206	0,07836	0,12	1,55	22,20	26,44	59,76	372,16	00:35:43	268,10
			0,16	2,01	22,00	27,79	53,94	310,87	00:41:31	325,22
			0,20	2,52	20,00	23,67	51,24	289,85	01:02:18	350,36
			0,23	2,96	21,50	27,81	48,58	268,63	01:00:15	379,67
			0,28	3,53	23,00	25,76	44,84	261,87	00:57:33	385,04
			0,31	4,01	21,75	23,88	41,53	255,06	00:48:13	391,25
			0,36	4,64	22,00	27,88	40,58	251,87	00:51:09	395,45
			0,40	5,16	23,00	26,75	39,59	250,22	00:45:44	396,65
	0,418	0,14756	0,31	2,08	23,00	25,99	51,28	371,21	00:54:27	261,22
			0,38	2,57	23,00	28,17	45,77	337,52	00:45:24	286,38
			0,45	3,05	22,70	22,37	40,09	329,27	00:52:31	288,92
			0,52	3,53	22,00	26,39	38,51	330,50	00:39:08	286,12
			0,59	4,03	22,00	30,63	37,29	331,97	00:35:04	283,58
			0,67	4,56	23,00	27,17	37,70	331,40	00:34:03	284,47
			0,74	5,03	23,00	28,38	35,86	332,93	00:31:06	281,23

**APÊNDICE D – Resultados experimentais complementares (Regime transiente)**



**Gráfico D.1 - Curva de Aquecimento do Leito – Temperatura do Leito e Resistência**  
**Areia Quartzosa  $d_p = 196 \mu\text{m}$  (Partícula Menor) e  $U_o / U_{mf} = 4,0$**

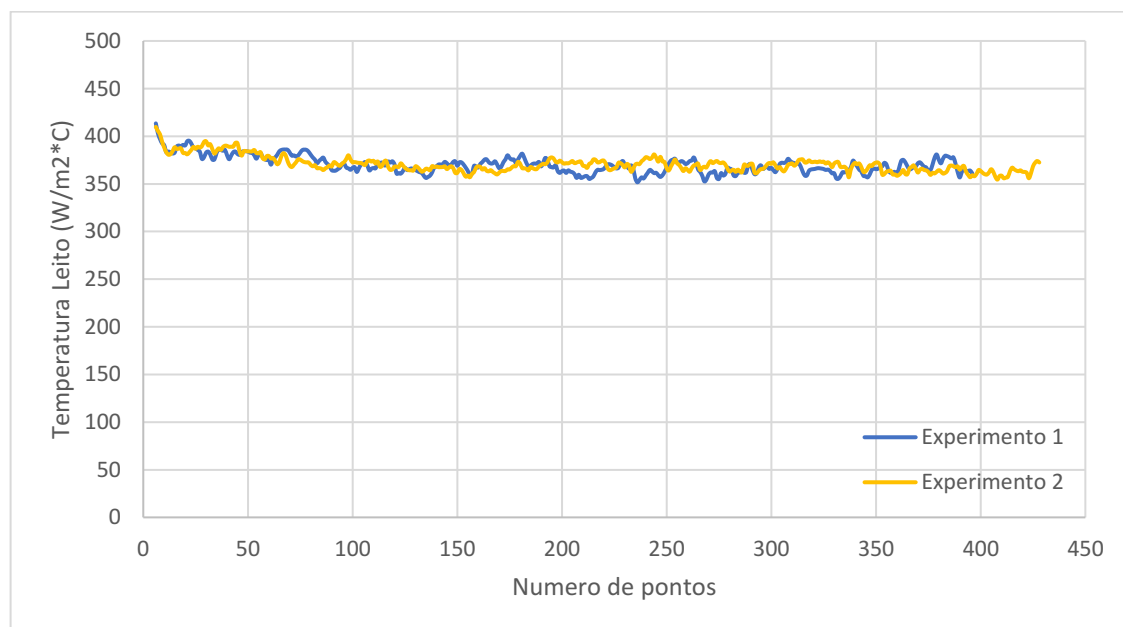


(a) Experimento 1

(b) Experimento 2

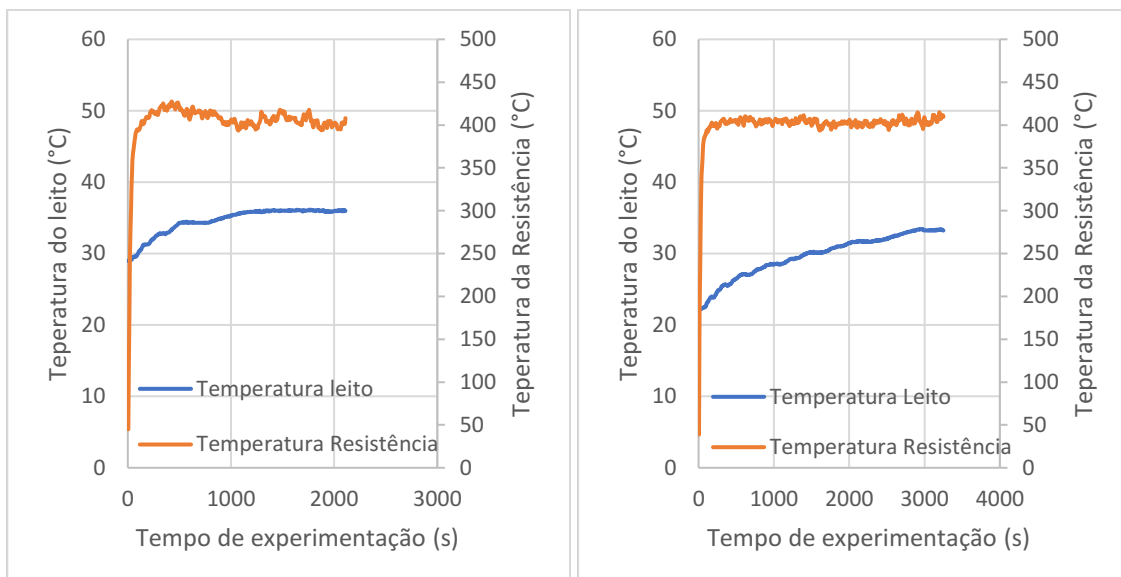
Fonte: os autores (2022)

**Gráfico D.2 - Curva de Aquecimento do Leito – Temperatura do Leito e Resistência**  
**Areia Quartzosa  $d_p = 196 \mu\text{m}$  (Partícula Menor) e  $U_o / U_{mf} = 4,0$**



Fonte: os autores (2022)

**Gráfico D.3 - Curva de Aquecimento do Leito – Temperatura do Leito e Resistência**  
**Areia Quartzosa  $d_p = 447 \mu\text{m}$  (Partícula Maior) e  $U_o / U_{mf} = 3,5$**

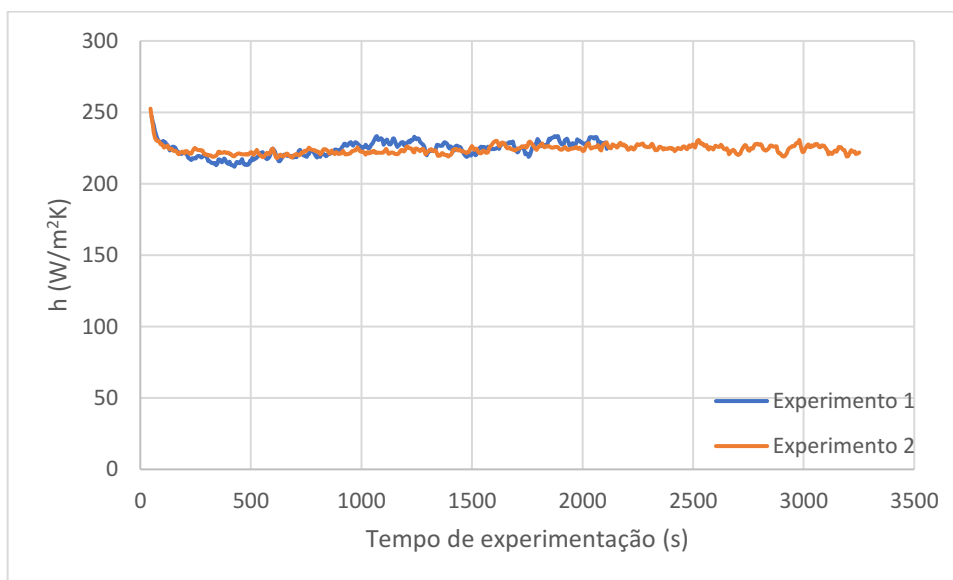


(a) Experimento 1

(b) Experimento 2

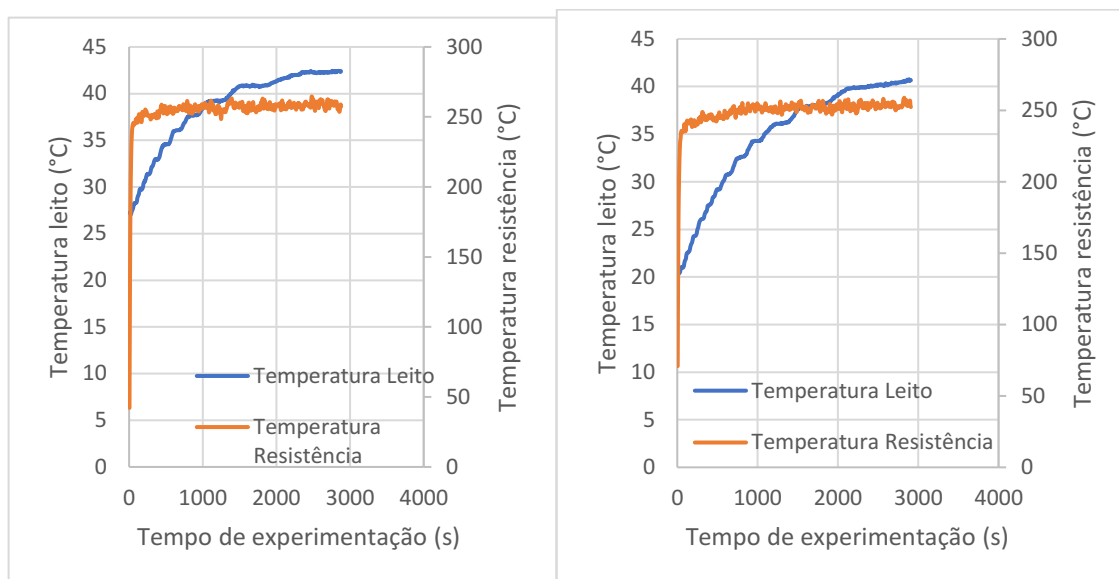
Fonte: os autores (2022)

**Gráfico D.4 – Curva de Aquecimento do Leito – Coeficiente de Transferência de Calor**  
**Areia Quartzosa  $d_p = 447 \mu\text{m}$  (Partícula Maior) e  $U_o / U_{mf} = 4,0$**



Fonte: os autores (2022)

**Gráfico D.5 - Curva de Aquecimento do Leito – Temperatura do Leito e Resistência**  
**Esfera de vidro  $d_p = 206 \mu\text{m}$  (Partícula Menor) e  $U_o / U_{mf} = 4,0$**

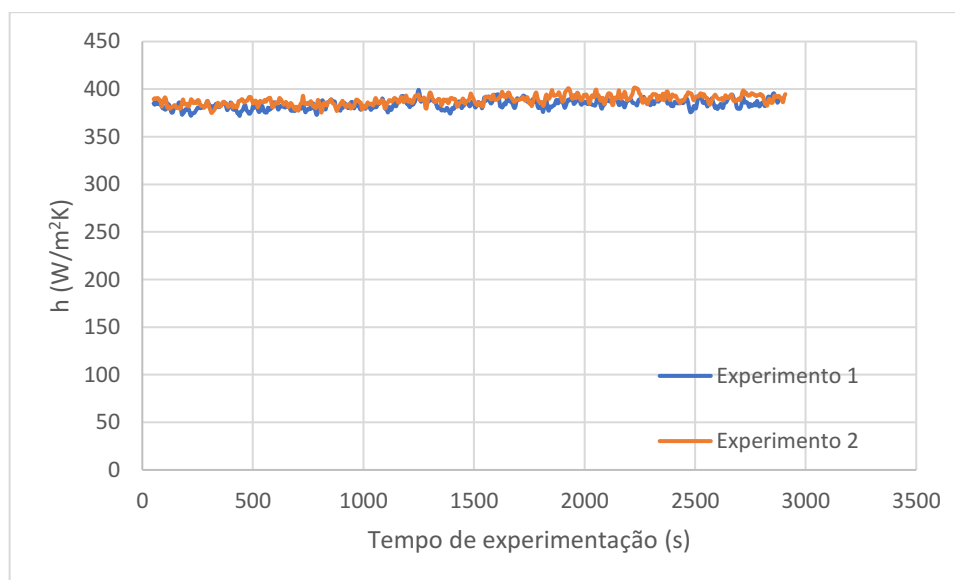


(a) Experimento 1

(b) Experimento 2

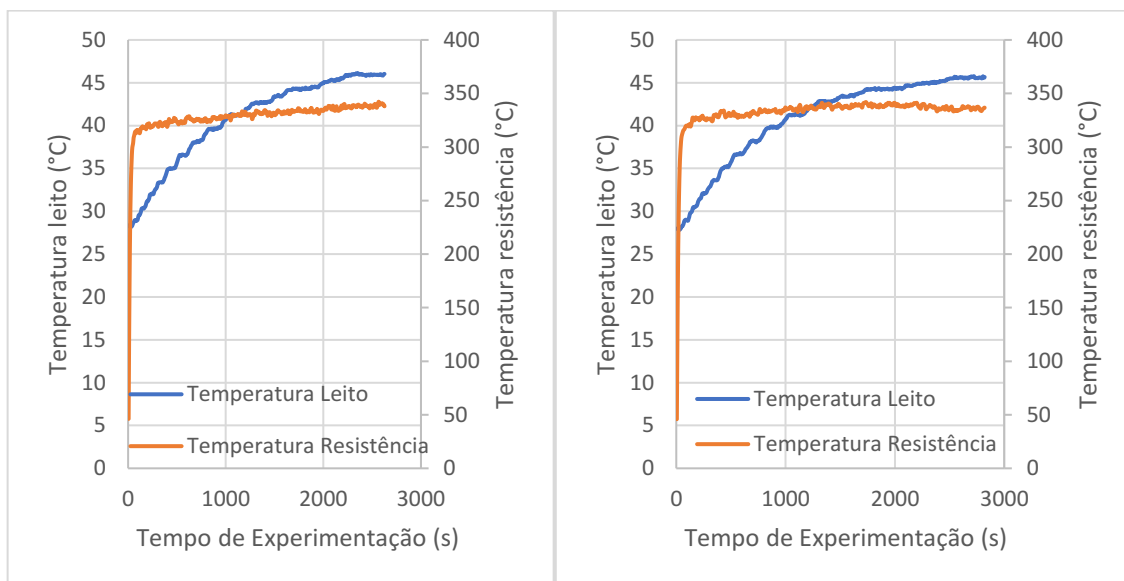
Fonte: os autores (2022)

**Gráfico D.6 – Curva de Aquecimento do Leito – Temperatura do Leito e Resistência**  
**Esfera de vidro  $d_p = 206 \mu\text{m}$  (Partícula Menor) e  $U_o / U_{mf} = 4,0$**



Fonte: os autores (2022)

**Gráfico D.7 – Curva de Aquecimento do Leito – Temperatura do Leito e Resistência**  
**Esfera de Vidro  $d_p = 418 \mu\text{m}$  (Partícula Maior) e  $U_o / U_{mf} = 2,5$**

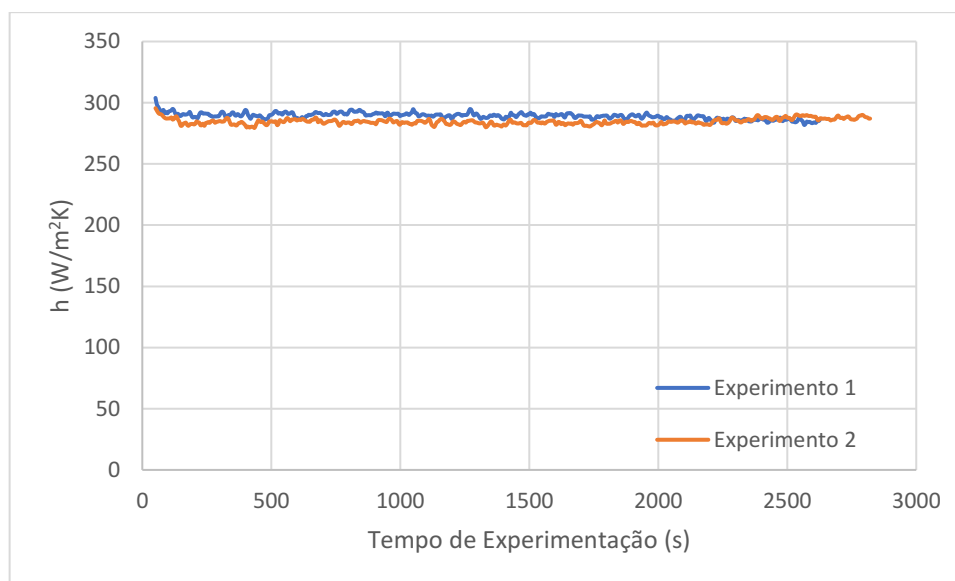


(a) Experimento 1

(b) Experimento 2

Fonte: os autores (2022)

**Gráfico D.8 – Curva de Aquecimento do Leito – Coefi de Transferência de Calor**  
**Esfera de Vidro  $d_p = 418 \mu\text{m}$  (Partícula Maior) e  $U_o / U_{mf} = 2,5$**



Fonte: os autores (2022)