

# Determinação de DTR de pedaços de morango num tanque de mistura em presença de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos

Graciela D. Afonso, Maria I. Mota, Nilza A. Pereira, António A. Vicente\*

Centro de Engenharia Biológica, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal. Phone: +351.253.604400; Fax: +351.253.678986

**Keywords:** Distribuição de tempos de residência, fluidos Newtonianos, fluidos não Newtonianos, tempo de residência hidráulico, tempo de residência médio

**Topic:** Catalysis and Reaction Engineering

## Sumário

Em indústrias de processamento de frutas, o estudo da distribuição dos tempos de residência (DTR) torna-se útil para determinar o melhor grau de mistura e garantir uma saída uniforme dos pedaços de fruta (morangos). A DTR de partículas sólidas num fluido varia com vários factores tais como a reologia do meio, a velocidade de agitação, a concentração de sólidos em suspensão, as dimensões do tanque, o tipo de agitador e o caudal de saída.

Os melhores ensaios resultaram na combinação de um tanque de 50 L agitado com um impulsor em âncora independentemente da reologia do meio. Para o fluido Newtoniano (água), a distribuição torna-se mais uniforme quando se combina um caudal de 2,50 L/s, uma velocidade de agitação de 78 rpm e uma concentração de sólidos em suspensão de 6 %. No fluido não-Newtoniano estudado (alginato 0,67 % (m/v)), com reologia semelhante ao da polpa de morango, a melhor distribuição é obtida com um caudal de 0,31 L/s, uma velocidade de agitação de 80 rpm e uma concentração de sólidos de 2 %. Pela comparação dos resultados obtidos para o tanque em estudo com casos ideais, verificou-se que este tende a assemelhar-se a um reactor pistão com dispersão axial ou a uma combinação de um reactor perfeitamente agitado com um reactor pistão e volumes mortos.

## 1. Introdução

Numa indústria de processamentos de frutas, a obtenção de uma mistura homogénea entre a polpa de morango e os pedaços de morango existentes em suspensão é importante a fim de garantir uma saída regular destes pedaços que permita, por sua vez, uma concentração uniforme de pedaços de morango no produto final embalado.

O estudo da distribuição dos tempos de residência permite determinar o tempo que as partículas permanecem no interior do tanque agitado e avaliar o desempenho deste em termos da pretendida distribuição regular dos pedaços de morango. Para isso, podem determinar-se o tempo de residência médio e a variância. A comparação do tempo de residência hidráulico com o tempo de residência médio permite identificar a existência de anomalias no interior do tanque tais como zonas mortas ou curto-circuitos. A variância permite determinar a extensão da distribuição: quanto maior a variância maior é a propagação da distribuição.

A agitação é um parâmetro importante para explicar o afastamento do reactor da idealidade. Num reactor perfeitamente agitado ideal, todas as partículas que se encontram no interior do reactor têm a mesma hipótese de sair, independentemente da sua idade ou da sua posição no interior do reactor. Uma má agitação pode provocar o aparecimento de zonas mortas ou de curto-circuitos levando a que os resultados se afastem do idealmente esperado.

A reologia do meio influencia o grau de mistura obtido. Num fluido Newtoniano a tensão de corte é proporcional ao gradiente de velocidade para um escoamento laminar o que se traduz numa viscosidade constante com a variação do gradiente de velocidade. Já para um fluido não-Newtoniano a

---

\* Corresponding author: Tel + 351-253-604419; e-mail: [avicente@deb.uminho.pt](mailto:avicente@deb.uminho.pt)

viscosidade varia com o gradiente de velocidade. A polpa de morango é um fluido não-Newtoniano, pseudo-plástico, cuja viscosidade diminui apenas com a aplicação de tensões de corte.

Neste trabalho experimental pretende-se estudar a distribuição dos tempos de residência (DTR) de partículas sólidas num tanque agitado, em presença de um fluido Newtoniano (água) e de um fluido não-Newtoniano (solução de alginato 0,67 % (m/v), que apresenta as mesmas características reológicas da polpa de morango). Por simplicidade e conveniência, utilizaram-se cubos de polipropileno com características semelhantes aos cubos de morango utilizados industrialmente: aresta de 8 mm e massa volúmica de  $886 \text{ kg.m}^{-3}$ .

De modo a caracterizar o desempenho do tanque também se pretende determinar o tempo de residência hidráulico, o tempo de residência médio e a variância, a fim de identificar a existência de zonas mortas ou curto-circuitos e de obter conclusões sobre a extensão de mistura obtida.

Por fim pretende-se ainda tratar os resultados obtidos através da aplicação de modelos que combinam Reactor perfeitamente agitado (RPA), Reactor pistão (RP) ou volumes mortos. Para o efeito, neste trabalho aplicaram-se os seguintes modelos: RPA com volumes mortos; Combinação de vários RPA em série; RP com dispersão axial; Combinação de um RP e um RPA ou Combinação de um RP, um RPA e volumes mortos.

## 2. Material e métodos

Como fluido Newtoniano utilizou-se água. Para o fluido não-Newtoniano utilizou-se uma solução de alginato 0,67 % (m/v) visto esta se assemelhar a polpa de morango. Utilizaram-se cubos de polipropileno com 8 mm de aresta e  $886 \text{ kg.m}^{-3}$  de massa volúmica para representar os pedaços de morango.

A distribuição do tempo de residência é determinada experimentalmente através da injeção das partículas sólidas no reactor por impulso rápido e a sua saída do tanque é contabilizada através da pesagem das partículas que vão abandonando o tanque ao longo do tempo. Para comparação com diferentes reactores, a função DTR é posteriormente normalizada ( $E(\theta) = \tau \times E(t)$  em que

$$\tau = \frac{V_{\text{reactor}}}{Q} \text{ e } E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}.$$

Para cada um dos fluidos variaram-se os seguintes parâmetros, de modo a determinar o melhor grau de mistura: tipo de agitador (hélice ou âncora); caudal (entre  $0,45$  e  $2,86 \text{ dm}^3.\text{s}^{-1}$  para água e  $0,31$ - $1,33 \text{ dm}^3.\text{s}^{-1}$  para a solução de alginato); volume útil do tanque ( $50 \text{ dm}^3$  ou  $100 \text{ dm}^3$ ); concentração das partículas (2 % ou 6 % m/v) e velocidade de agitação (75 a 98 rpm para a água e 70 a 80 rpm para a solução de alginato).

Para caracterizar o desempenho do reactor, determinou-se o tempo de residência hidráulico, o tempo

de residência médio ( $t_m = \frac{\int_0^{\infty} t \times C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$ ) e a variância ( $\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \tau)^2 E(t) dt$ ).

## 3. Resultados

Para determinar o melhor grau de mistura variou-se um conjunto de parâmetros como indicado na tabela 1.

Tabela 1: Registo da combinação de % de partículas, volume de fluido, diâmetro da tubagem, posição de agitação e respectiva velocidade e caudal utilizadas em cada ensaio

Ensaio	% partículas	V /L	Meio	d /cm	Posição de Agitação	v /rpm	Q /L.s <sup>-1</sup>
1	2	50	Água	3,0	2	78	0,89
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9			Alginato	4,7	2	70	1,33
10							
11							
12							
13							
14							
15			3,0	3	80	0,50	
16							
17							
18	100	Água	3,0	2	75	1,07	
19							
20	6	50	Água	4,7	2	78	2,50
21							

Para estas diferentes condições, estudaram-se a distribuição dos tempos de residência das partículas sólidas e construíram-se os gráficos da figura 1 para o fluido Newtoniano (água) e da figura 2 para o fluido não-Newtoniano (solução de alginato), com o objectivo de determinar em qual dos ensaios se obtém uma melhor distribuição das partículas.

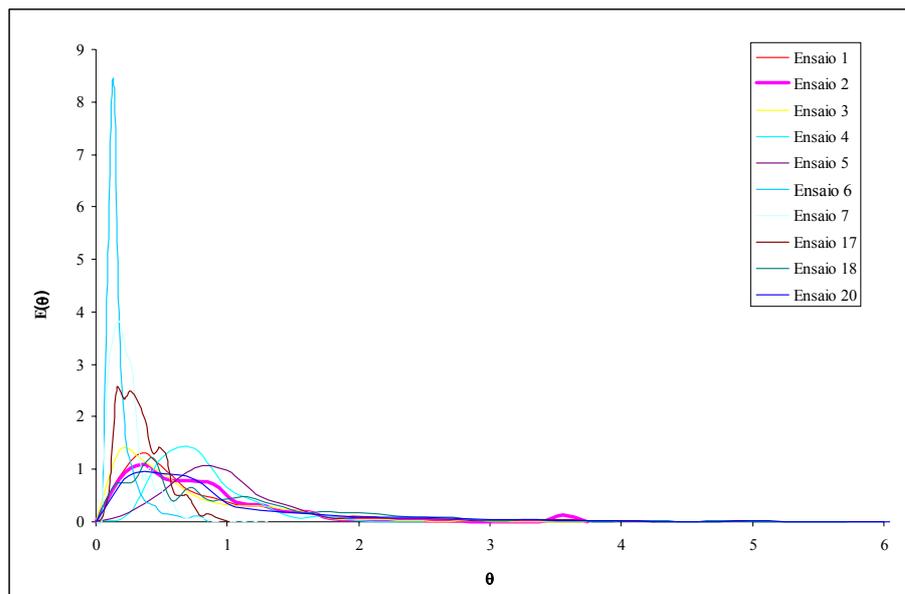


Figura 1: Variação de  $E(\theta)$  em função de  $\theta$  para os diferentes ensaios efectuados com água.

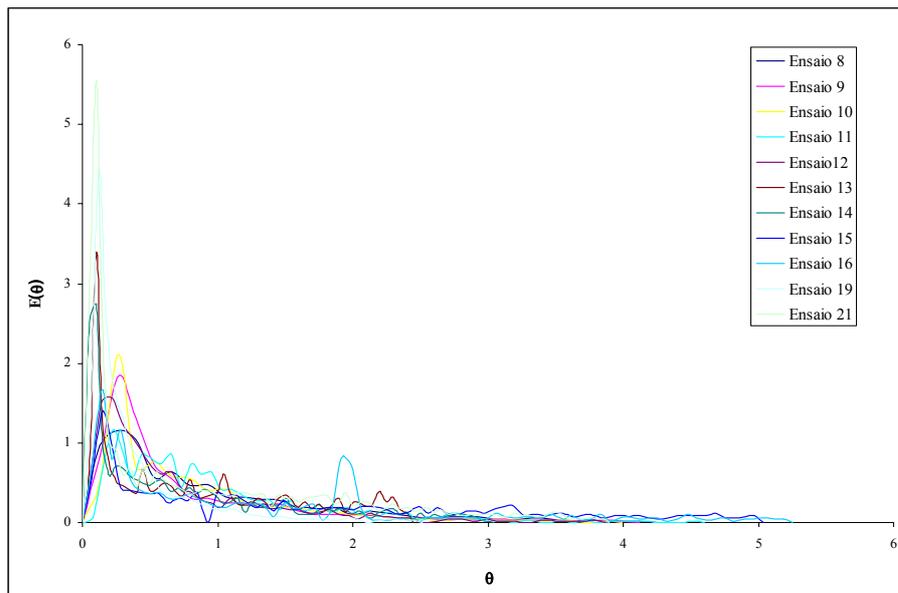


Figura 2: Variação de  $E(\theta)$  em função de  $\theta$  para os diferentes ensaios efectuados com a solução de alginato 0,67 % (m/v).

Com estes gráficos, é feita uma comparação dos resultados obtidos através do reactor real com os seguintes casos ideais:

- Reactor perfeitamente agitado com zonas mortas;
- Combinação de vários RPA's em série;
- Reactor pistão ideal com dispersão axial;
- Combinação de um RP e um RPA;
- Combinação de um RP, um RPA e zonas mortas.

As combinações que mais correspondem ao reactor real em estudo são o caso do reactor pistão com dispersão axial e a combinação de um RPA com um RP e zonas mortas. Para cada um destes casos, determinaram-se o número de Peclet (modelo de dispersão), os volumes do reactor perfeitamente agitado, do reactor pistão e o volume morto (modelo combinado). Estes parâmetros foram determinados de modo a se ajustarem o mais possível das diferentes distribuições obtidas em cada situação estudada. Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2: Resultados obtidos para um volume de 50 L e uma concentração de partículas de 2 %

Fluído	Velocidade agitação /rpm	Caudal /dm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Modelo dispersão	Modelo RPA + RP + VM			$\sigma^2$	$\tau$ /s <sup>-1</sup>	$t_m$ /s <sup>-1</sup>
			Nº Peclet	V <sub>RPA</sub> /dm <sup>3</sup>	V <sub>RP</sub> /dm <sup>3</sup>	V <sub>morto</sub> /dm <sup>3</sup>			
Água	78	0,89	1,25	<b>33</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	948,60	56,18	0,024
		2,50	<b>11,00</b>	30	7	13	119,04	20,00	0,055
	98	0,45	*	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>40</b>	7805,04	111,11	0,043
Alginato	70	0,73	1,40	<b>37</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	2429,26	68,49	0,019
		1,33	0,75	<b>29</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	526,45	37,59	0,037
	80	0,31	<b>0,95</b>	35	4	11	11800,55	161,29	0,010
		0,50	<b>0,35</b>	20	4	26	5375,19	100,00	0,013

\* O modelo de dispersão encontra-se muito afastado dos valores experimentais.

Tabela 0: Resultados obtidos para um volume de 100 L e uma concentração de partículas de 2 %

Fluído	Velocidade agitação / rpm	Caudal / $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Modelo dispersão Nº Peclet	Modelo RPA + RP + VM			$\sigma^2$	$\tau$ / $\text{s}^{-1}$	$t_m$ / $\text{s}^{-1}$
				$V_{\text{RPA}}$ / $\text{dm}^3$	$V_{\text{RP}}$ / $\text{dm}^3$	$V_{\text{morto}}$ / $\text{dm}^3$			
Água	75	1,07	0,50	<b>34</b>	<b>15</b>	<b>51</b>	3909,79	93,46	0,030
		2,86	<b>1,80</b>	80	15	5	498,70	34,96	0,031
Alginato	78	1,17	0,53	<b>24</b>	<b>8</b>	<b>68</b>	3718,12	85,47	0,038

Tabela 4: Resultados obtidos para um volume de 50 L e uma concentração de partículas de 6 %

Fluído	Velocidade agitação / rpm	Caudal / $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Modelo dispersão Nº Peclet	Modelo RPA + RP + VM			$\sigma^2$	$\tau$ / $\text{s}^{-1}$	$t_m$ / $\text{s}^{-1}$
				$V_{\text{RPA}}$ / $\text{dm}^3$	$V_{\text{RP}}$ / $\text{dm}^3$	$V_{\text{morto}}$ / $\text{dm}^3$			
Água	78	2,50	<b>2,53</b>	50	0	0	251,69	20,00	0,052
Alginato	80	0,50	<b>0,12</b>	20	6	24	5116,22	100,00	0,034

#### 4. Conclusão

As partículas exibem comportamentos diferentes na água e na solução de alginato. Pela análise da DTR nos dois tipos de fluido estudados pode-se concluir que a melhor distribuição é conseguida quando se utiliza um impulsor tipo âncora e com uma velocidade de agitação situada entre 75 e 80 rpm. Este resultado é observado independentemente do volume utilizado. Para velocidades superiores a 80 rpm a formação de vórtex aumenta drasticamente o volume de zonas mortas e para velocidades inferiores a 70 rpm as partículas tendem a flutuar.

O caudal para o qual as partículas se encontram mais uniformemente distribuídas à saída do reactor é de  $2,50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}$  para a água e  $0,31 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}$  para a solução de alginato, para um volume de  $50 \text{ dm}^3$ . Com o aumento do volume para  $100 \text{ dm}^3$ , o valor de caudal obtido para a água altera-se para  $2,86 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}$ ; para o alginato não foi possível concluir se o aumento do volume alteraria significativamente o caudal de saída.

Relativamente ao aumento da concentração de partículas verifica-se que, para água, a distribuição das partículas se torna mais homogênea à saída do reactor à medida que se aumenta a sua concentração de 2 para 6 %. Já o mesmo não se verifica quando na presença da solução de alginato.

A melhor distribuição de partículas obtém-se, para água, com uma velocidade de agitação de 78 rpm e um caudal de  $2,50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}$ , utilizando um volume de  $50 \text{ dm}^3$  estando o tanque provido de um impulsor tipo âncora e uma concentração de partículas de 6 % (m/v). Para a solução de alginato, o melhor resultado é obtido com uma velocidade de agitação de 80 rpm e um caudal de  $0,31 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}$ , utilizando um volume de  $50 \text{ dm}^3$  estando o tanque provido de um impulsor tipo âncora e uma concentração de partículas de 2 % (m/v).

O comportamento das partículas apresenta um desfazamento relativamente ao esperado idealmente verificando-se desvios nos parâmetros tempo de residência médio e variância, obtidos para cada conjunto de condições experimentais estudadas. Uma vez que para cada uma das condições experimentais o tempo de residência médio é menor que o tempo de residência hidráulico pode-se concluir que existem zonas mortas no tanque naquelas condições.

O comportamento das partículas no tanque em estudo foi aproximado a casos ideais, sendo os mais adequados para descrever este caso o modelo de RP com dispersão axial e a combinação de um RPA com um RP e volumes mortos.

**Referências**

Fogler, H. S. (1986). *Elements of Chemical Reaction Engineering*. Prentice-Hall Inc., New Jersey.

Bailey, J. E., Ollis, D. F. (1986). *Biochemical Engineering Fundamentals*. 2<sup>nd</sup> edition, Mc Graw-Hill Book Comp.

Blanch, H. W., Clarck, D. S. (1996). *Biochemical Engineering*. Marcel Dekker Inc.. New York.