

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

Evaluation of skimmed milk flow during high pressure homogenization (HPH) using computational fluid dynamics (CFD)

Autores | Authors

Claudia Regina Gonçalves PINHO

Universidade Estadual de Campinas
(UNICAMP)
Faculdade de Engenharia de Alimentos
(FEA)
e-mail: claudiargpinho@hotmail.com

Mark Alexandrow FRANCHI

San Leon Com. Ingredientes Alimentícios e
Químicos Ltda.
e-mail: mark@sanleon.com.br

Pedro Esteves Duarte AUGUSTO

Universidade Estadual de Campinas
(UNICAMP)
Colégio Técnico de Campinas (COTUCA)
e-mail: pedro@cotuca.unicamp.br

✉ **Marcelo CRISTIANINI**

Universidade Estadual de Campinas
(UNICAMP)
Faculdade de Engenharia de Alimentos
(FEA)
Departamento de Tecnologia de Alimentos
(DTA)
Caixa Postal: 6121
CEP: 13083-862
Campinas/SP - Brasil
e-mail: olecram@fea.unicamp.br

✉ Autor Correspondente | Corresponding Author

Recebido | Received: 16/09/2010
Aprovado | Approved: 02/06/2011

■ Resumo

A tecnologia de homogeneização a alta pressão (HAP) tem sido estudada por diversos autores como metodologia não térmica para a conservação de alimentos líquidos. Entretanto, o perfil do fluido durante o processo, assim como os mecanismos de inativação e rompimento celular, ainda não estão totalmente elucidados. O presente trabalho avaliou o escoamento de leite desnatado durante HAP por meio de fluidodinâmica computacional (CFD). Consideraram-se pressões de homogeneização de até 300 MPa, sendo avaliados os perfis de pressão e velocidade do fluido durante o processo. Os resultados obtidos demonstram que as tensões de cisalhamento resultantes do escoamento do fluido dentro do *gap* e a cavitação na saída do mesmo são os mecanismos mais prováveis para inativação microbiana no homogeneizador avaliado.

Palavras-chave: *Homogeneização a alta pressão (HAP); Leite; Fluidodinâmica computacional (CFD).*

■ Summary

High pressure homogenization (HPH) technology has been studied by various authors as a non-thermal process for liquid food preservation. However, the fluid characteristics during processing, as also the cell inactivation and disruption mechanisms have still not been totally elucidated. The present work evaluated the flow of skimmed milk during HPH using computational fluid dynamics (CFD). The homogenization pressure was varied up to 300 MPa and the pressure and velocity profiles evaluated during the process. The results obtained showed that the shear stress due to the flow of the liquid inside the gap and the cavitation on exiting, are the most probable mechanisms of microbial inactivation in the homogenizer evaluated.

Key words: *High pressure homogenization (HPH); Milk; Computational fluid dynamics (CFD).*

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

PINHO, C. R. G. et al.

1 Introdução

A tecnologia de homogeneização a alta pressão (HAP) consiste na pressurização de um fluido (em geral em pressões de até 350 MPa) e na rápida passagem do mesmo por uma válvula com orifício estreito, resultando em despressurização e grande aumento da velocidade de escoamento, com consequente cavitação e alta tensão de cisalhamento. Dessa forma, as partículas, células e macromoléculas em suspensão no fluido são submetidas à alta tensão mecânica, sendo torcidas e deformadas (FLOURY et al., 2004). Essa tecnologia tem sido estudada por diversos autores como metodologia não térmica para a conservação de alimentos líquidos. Observa-se, no entanto, que os mecanismos de inativação e rompimento celular ainda não estão totalmente elucidados (DIELS e MICHIELS, 2006).

Apesar da configuração da válvula de homogeneização a alta pressão ser aparentemente simples, a fluidodinâmica envolvida é bastante complexa. Intensas mudanças de energia ocorrem na válvula de homogeneização quando o líquido passa da zona de alta pressão e baixa velocidade para a de baixa pressão e alta velocidade. Desta forma, a fluidodinâmica computacional (CFD) apresenta-se como uma ferramenta bastante conveniente para a compreensão destas mudanças (FLOURY et al., 2004).

Kleinig e Middelberg (1996, 1997) investigaram o fluxo em uma válvula de homogeneização tipo APV-Gaulin por meio de simulação numérica. Primeiramente, Kleinig e Middelberg (1996) modelaram o fluxo apenas na entrada da válvula e na região do *gap*. Posteriormente, Kleinig e Middelberg (1997) utilizaram os perfis de velocidade na região de saída do *gap* obtidos no trabalho anterior como condições de contorno da entrada da região de impacto da válvula. Na primeira parte, os autores apresentam uma expressão simples que utiliza os resultados numéricos e que permite o cálculo do gradiente de pressão, variável mais adequada para correlação com a destruição celular do que a pressão de operação. Já na segunda parte, foi verificado que o jato de impacto existente no sistema é aproximadamente laminar.

Stevenson e Chen (1997) utilizaram um programa comercial de CFD para avaliação do processo de HAP. Os resultados obtidos fornecem apoio para avaliação do processo por simulações computacionais.

Floury et al. (2004) estudaram o fluxo em um homogeneizador a alta pressão Stansted na faixa de pressão de 26 a 340 MPa. Esse homogeneizador difere do APV-Gaulin estudado por Kleinig e Middelberg (1996, 1997), já que o mesmo não apresenta anel de impacto. O modelo considerou fluido incompressível e viscosidade e temperatura do fluido constantes (água a 20 °C). O trabalho oferece detalhes em relação ao regime do fluxo,

ao perfil de pressão, à turbulência e às áreas de cavitação no interior da válvula, o que não poderia ser facilmente determinado experimentalmente por causa das grandes alterações que ocorrem em distâncias muito pequenas e a pressões de operação extremamente elevadas.

O objetivo do presente trabalho foi calcular os perfis de velocidade e pressão no interior da válvula do homogeneizador a alta pressão Stansted Fluid Power em diferentes condições de operação ao processar leite desnatado, utilizando-se fluidodinâmica computacional (CFD).

2 Material e métodos

2.1 Processo de homogeneização

Nos homogeneizadores estudados por Kleinig e Middelberg (1996, 1997) e Stevenson e Chen (1997), o fluido pressurizado é alimentado axialmente no centro da válvula e, então, acelerado radialmente no *gap*, deixando essa região como um jato radial que se estagna em um anel de impacto que contorna o *gap*.

O homogeneizador a alta pressão Stansted Fluid Power, objeto deste estudo, apresenta configuração diferente, mas semelhante ao utilizado por Floury et al. (2004), em que o fluxo do produto pressurizado entra na válvula axialmente, porém externamente ao assento da válvula, sendo acelerado radialmente no *gap* até o centro da válvula (Figura 1). O equipamento não possui anel de impacto.

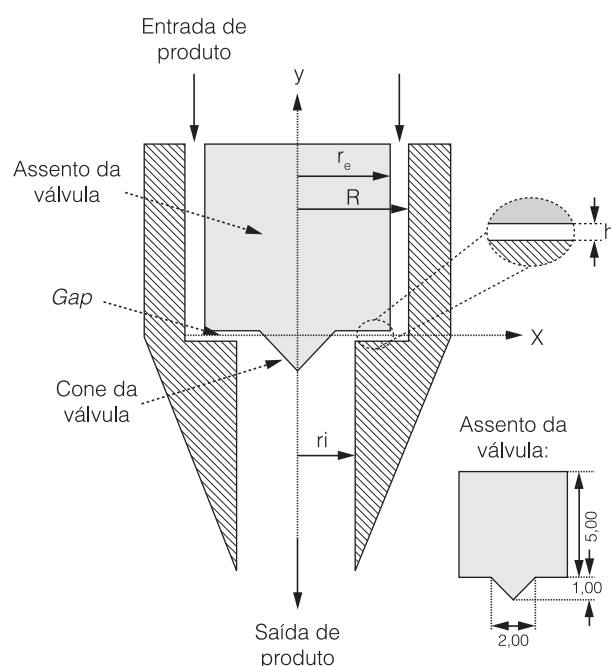


Figura 1. Representação da válvula de homogeneização ($R = 3,00$ mm; $r_e = 2,25$ mm; $r_i = 1,50$ mm) e sistema de coordenadas utilizadas. Dimensões em mm.

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

PINHO, C. R. G. et al.

As dimensões do *gap* e da pressurização do fluido irão, dessa forma, definir os perfis de velocidade e pressão resultantes na válvula e após a mesma.

2.2 Regime do fluxo

A análise do regime do fluxo foi feita dividindo-se o sistema em três partes distintas: parte anterior da válvula, *gap* e parte posterior da válvula, conforme descrito por Flourey et al. (2004).

2.2.1 Parte anterior da válvula

Define-se o diâmetro hidráulico (d_h) como a diferença entre os diâmetros do duto de entrada e o assento da válvula (Equação 1), isto é:

$$d_h = 2(R - r_e) \quad (1)$$

A velocidade média na entrada é calculada pela Equação 2, na qual \dot{Q} é a vazão volumétrica de fluido (270 mL.min⁻¹):

$$\bar{v}_i = \frac{\dot{Q}}{\pi(R^2 - r_e^2)} \quad (2)$$

Então, o número de Reynolds é calculado pela Equação 3, na qual μ é a viscosidade dinâmica (1,89 mPa.s) e ρ é a massa específica (densidade) do leite (1028 kg.m⁻³) (KESSLER, 1981):

$$\bar{v}_i = \frac{2\rho\dot{Q}}{\mu\pi(R + r_e)} \quad (3)$$

Considerando os valores acima, obtém-se um valor de Reynolds de 296. Este valor corresponde a um regime puramente laminar, independentemente da pressão de homogeneização utilizada.

2.2.2 Gap da válvula

O diâmetro hidráulico do *gap* anular pode ser calculado como 2 h, sendo h a altura do *gap* (FLOURY et al., 2004). A velocidade média no *gap* é então calculada pela Equação 4, enquanto o número de Reynolds é calculado pela Equação 5:

$$\bar{v}_{gap} = \frac{\dot{Q}}{2\pi rh} \quad (4)$$

$$Re_{gap} = \frac{\rho\dot{Q}}{\mu\pi r} \quad (5)$$

O valor de r na Equação 5 varia de r_i a r_e , de forma que os valores do número de Reynolds obtidos situam-se entre 350 e 520, sendo o fluxo puramente laminar. Observa-se que o regime de escoamento não é função da pressão de homogeneização nem das dimensões do *gap* (h).

2.2.3 Parte posterior da válvula

Na parte posterior da válvula, o fluido escoar por um duto cilíndrico. Dessa forma, o número de Reynolds é calculado pela Equação 6:

$$Re_i = \frac{2\rho\dot{Q}}{\mu\pi r_i} \quad (6)$$

Durante o processo, o fluido sofre um aquecimento por causa do atrito com a válvula, afetando a massa específica e a viscosidade do mesmo. O valor do número de Reynolds em cada uma das pressões de homogeneização analisadas foi calculado considerando-se as temperaturas obtidas experimentalmente na saída da válvula de homogeneização durante o processamento de leite desnatado (PINHO, 2007). As temperaturas e valores de massa específica, viscosidade dinâmica e número de Reynolds correspondentes são apresentados na Tabela 1.

Neste tipo de geometria, a transição de regime laminar para turbulento ocorre em Reynolds em torno de 2000 (Flourey et al., 2004). Observa-se que, na faixa de pressões avaliadas neste estudo, o regime é de transição na região posterior da válvula.

2.3 Determinação da dimensão do *gap* da válvula

A dimensão do *gap* da válvula (h) é variável, determinando assim a pressão de homogeneização (P). Kleinig e Middelberg (1996, 1997), Stevenson e Chen (1997) e Flourey et al. (2004) verificaram experimentalmente a validade das correlações de Nakayama (1964) para estimar o tamanho do *gap* em função da pressão.

Flourey et al. (2004) utilizaram a Equação 7, derivada da Equação de Nakayama (1964), para determinação da

Tabela 1. Temperatura de saída da válvula, massa específica, viscosidade dinâmica e número de Reynolds correspondentes a cada uma das pressões de homogeneização avaliadas.

Pressão de homogeneização (MPa)	T _{saída da válvula} (°C)	Massa específica* (kg.m ⁻³)	Viscosidade dinâmica* (mPa s)	Número de Reynolds
100	45,5	1026	1,20	2177
150	56,3	1024	1,90	2794
200	64,3	1018	0,70	2946
250	69,9	1015	0,63	3077
300	80,2	1010	0,57	3384

*(KESSLER, 1981).

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

PINHO, C. R. G. et al.

queda de pressão do fluido no processo (ΔP), quando em regime de fluxo laminar. Entretanto, os autores observam que a correlação de Nakayama se mostrou adequada também para avaliação da queda de pressão em regime transiente. Segundo Stevenson e Chen (1997), apesar das velocidades alcançadas pelo fluido serem muito altas, o fato de o *gap* ser extremamente estreito faz com que o regime de escoamento no processo seja aproximadamente laminar. Optou-se, assim, por utilizar a correlação de Nakayama em todo o trabalho.

$$\Delta P_{\text{laminar}} = \frac{\rho}{4} \left[\frac{\dot{Q}}{2\pi r_e h} \right]^2 + \frac{6\mu\dot{Q}}{\pi h^3} \ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right) + \frac{\rho}{2} \left[\frac{\dot{Q}}{2\pi r_i h} \right]^2 \quad (7)$$

Dessa forma, conhecendo-se a vazão de produto, as dimensões da sede (r_e e r_i) e as propriedades do fluido (viscosidade dinâmica – μ ; viscosidade cinemática – ν ; massa específica – ρ), podem-se estimar os valores do *gap* para cada uma das pressões de operação avaliadas (por meio dos valores de ΔP).

2.4 Método numérico

Considerando-se a transferência de calor desprezível no processo, as equações que governam o fluxo de fluido se baseiam nos princípios de conservação de massa (Equação da Continuidade) e quantidade de movimento (Segunda Lei de Newton do Movimento). Para fluido newtoniano, isotérmico, incompressível e com massa específica e viscosidade dinâmica constantes ao longo do domínio, tais balanços são descritos pelas Equações 8 (Equação da Continuidade) e 9 (Segunda Lei de Newton do Movimento) (KUMAR e DILBER, 2007).

$$\nabla \mathbf{v} = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (9)$$

As simulações computacionais foram realizadas utilizando-se o programa Ansys CFX 10.0 (Ansys Inc., USA) para resolução das equações parciais diferenciais de transporte. Mais informações sobre o método utilizado podem ser obtidas em Menter (1994) e no próprio manual do programa (ANSYS, 2005).

Embora tenha sido demonstrado que o fluxo de leite desnatado no interior da válvula é laminar ou transiente, considerou-se regime turbulento nas simulações, de forma semelhante ao utilizado por Flourey et al. (2004) e Stevenson e Chen (1997). Dessa forma, mesmo jatos locais de fluido a altas velocidades podem ser avaliados adequadamente.

O modelo de turbulência escolhido foi o modelo SST (*shear stress transport model*) descrito por Menter (1994). O autor apresenta detalhadamente as equações envolvidas no modelo, bem como as principais vantagens deste em relação aos demais modelos de turbulência.

De forma resumida, o modelo SST utiliza o modelo $k-\omega$ nas proximidades da parede e $k-\epsilon$ na borda da camada limite e nas demais regiões. A definição da viscosidade cinemática é modificada de modo a considerar o transporte da tensão de cisalhamento, obtendo, assim, valores mais apropriados para os gradientes de pressão.

A formulação de proximidade da parede (*near wall treatment*) é importante na medida em que determina a precisão da tensão de cisalhamento na parede e tem influência no desenvolvimento da camada limite, incluindo o ponto de separação. Como descrito por Flourey et al. (2004), tal fato é de extrema importância no problema em questão por causa das pequenas dimensões da válvula, de forma que os efeitos das paredes são significativos ao fluxo. O modelo SST do programa Ansys CFX 10.0 utiliza uma formulação de proximidade da parede que trata a subcamada viscosa com um modelo para baixos números de Reynolds (laminar) (ANSYS, 2005).

A malha hexaédrica estruturada foi gerada por meio do programa Ansys ICEM CFD 10.01 (Ansys Inc., USA), composta por 77.049 elementos e 158.082 nós. Posteriormente, foi importada no programa Ansys CFX 10.0 para realização das simulações. Considerou-se a simetria radial da válvula e a geometria utilizada, representando-se apenas 0,1° dos 360° totais e reduzindo, assim, o esforço computacional. Utilizou-se refino da malha na região do *gap* em função da drástica redução nas dimensões da válvula que ocorre nesta área, como pode ser observado na Figura 2.

Com o objetivo de acelerar a convergência dos cálculos, adotou-se a estratégia a seguir. Inicialmente, as simulações foram realizadas considerando-se escoamento em regime laminar. Nesta etapa, utilizou-se como condição de contorno a velocidade média na entrada da válvula (0,36 m.s⁻¹), calculada em função da vazão de (270 mL.min⁻¹). Os resultados obtidos nesta etapa foram utilizados como valores iniciais para a segunda simulação realizada. Na segunda etapa, a queda de pressão foi a condição de contorno aplicada e o modelo de turbulência empregado foi o SST, já descrito. Considerou-se regime transiente com passo de tempo de 10⁻⁹ s. Como critério de convergência, estabeleceu-se que todos os resíduos normalizados deveriam ser inferiores a 5 10⁻⁵, valor considerado satisfatório para os problemas de engenharia (ANSYS, 2005).

3 Resultados e discussão

A Figura 3 apresenta os valores da dimensão do *gap* (h) em função da pressão de homogeneização, obtidos partir da correlação de Nakayama (1964), (Equação 7), considerando-se leite desnatado. Estes valores foram utilizados na construção da geometria para análise de CFD.

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

PINHO, C. R. G. et al.

A Tabela 2 apresenta os valores de pressão obtidos numericamente na primeira etapa de simulação e de vazão obtidos na segunda etapa, assim como o desvio entre os valores experimentais e obtidos pelas simulações numéricas. As pressões experimentais foram obtidas diretamente por meio da leitura dos manômetros.

Observa-se que, mesmo utilizando modelo de escoamento laminar (com velocidade prescrita na entrada), os resultados obtidos para queda de pressão se aproximaram dos experimentais, com desvios inferiores a 4%. Os resultados destas simulações foram então utilizados como valores iniciais para as simulações finais, nas quais se empregou o modelo de turbulência SST e a pressão de homogeneização como condição de contorno. Obtiveram-se, então, as vazões do fluido, com valores também próximos dos experimentais (desvios inferiores a 2%).

Os resultados apresentados nos itens a seguir são todos provenientes da segunda etapa da simulação, isto é, considerando-se escoamento em regime turbulento.

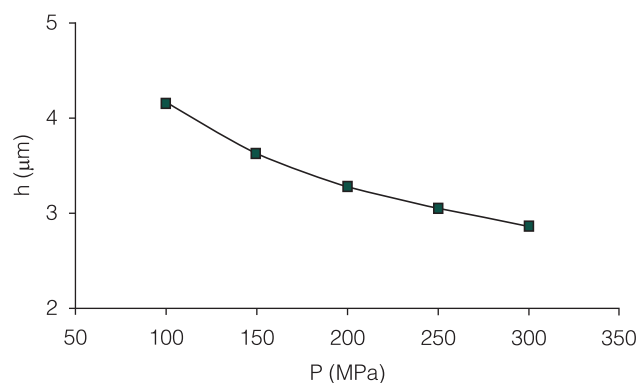


Figura 3. Valores da dimensão do gap (h) previstos pela correlação de Nakayama (1964); (Equação 7) em função da pressão de homogeneização.

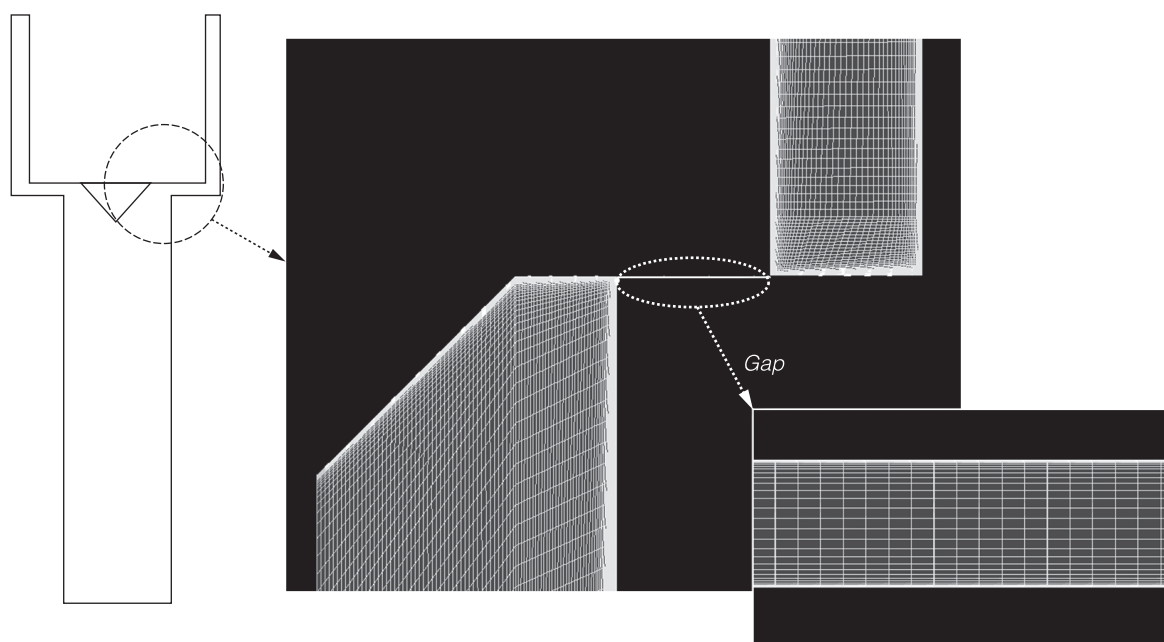


Figura 2. Malha utilizada para resolução das equações. Em razão das dimensões da região do gap, esta é mostrada no destaque. Observa-se o maior refino nas extremidades do fluido, isto é, próximas às paredes.

Tabela 2. Resultados obtidos nas duas etapas de simulação. O subíndice “e” se refere aos valores experimentais e o “m” se refere aos obtidos pelo modelo.

P_e (MPa)	Etapa 1: laminar		Etapa 2: turbulento	
	P_m (MPa)*	$(P_e - P_m)/P_e$ (%)	\dot{Q}_m (mL.min ⁻¹ **	$\frac{\dot{Q}_e - \dot{Q}_m}{\dot{Q}_e}$ (%)
100	102,4	2,40	265,0	1,85
150	155,4	3,60	266,2	1,41
200	204,3	2,15	266,4	1,33
250	256,5	2,60	267,2	1,04
300	306,4	2,13	268,9	0,41

*Utilizando-se vazão prescrita; **utilizando-se pressão prescrita.

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

PINHO, C. R. G. et al.

3.1 Perfis de velocidade e pressão no interior da válvula de homogeneização

Quando o fluido aproxima-se da região do *gap*, observa-se um rápido aumento na velocidade do fluido e uma correspondente queda da pressão. Desta forma, a energia correspondente à pressurização é convertida em energia cinética.

As Figuras 4 e 5 apresentam o rápido aumento de velocidade na entrada do *gap* e a queda de pressão observada ao longo do mesmo ($y = 0$). Observa-se que quanto maior a pressão de homogeneização e, portanto, menor o tamanho do *gap*, maiores são as velocidades obtidas. As velocidades atingidas pelo leite desnatado na entrada do *gap* passam de 80 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 100 MPa e de 120 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 300 MPa.

Por causa da condição estacionária do fluido na parede da válvula, as velocidades obtidas implicam em grande gradiente de velocidade no interior do *gap*. Os gradientes de velocidade obtidos constituem importante fenômeno que garantem rompimento de células e demais características do processo, uma vez que resultam em altas tensões de cisalhamento ao longo da válvula. Observa-se que, para o fluido Newtoniano em questão, tais tensões são linearmente proporcionais aos gradientes de velocidade.

A Figura 6 apresenta os perfis de velocidade em três pontos diferentes ao longo do *gap*, considerando-se a pressão de homogeneização de 300 MPa: 2,25 mm (entrada), 1,87 mm (interior) e 1,50 mm (saída). Na Figura 7, podem ser observados os perfis de velocidades na saída do *gap* para as diferentes pressões avaliadas ($x=1,5$ mm).

Observa-se que as velocidades são mais altas ao se aproximar da saída do *gap*, sendo crescentes em relação à pressão de homogeneização. Tais resultados são esperados, uma vez que a despressurização é maior à medida que se atravessa o *gap*, e, conseqüentemente, maior é a conversão de energia para energia cinética.

Além disso, observa-se que os gradientes de velocidade obtidos são maiores (diferenças mais acentuadas entre a velocidade máxima e mínima) em pressões de homogeneização mais elevadas (Figura 7), o que explica a maior eficiência de processos de HAP nessas faixas.

Lander et al. (2000) calcularam a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) na parede de um homogeneizador APV por meio da Equação 10. Com base nos valores obtidos no presente trabalho (velocidades médias na ordem de grandeza de 10^1 – 10^2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; dimensão do *gap* na ordem de grandeza de 10^{-6} m) e utilizando a Equação 10, obtêm-se taxas de deformação na ordem de grandeza de 10^8 – 10^9 s^{-1} . Ao considerar a viscosidade dinâmica do leite (ordem de grandeza de 10^{-3} Pa s), observa-se que

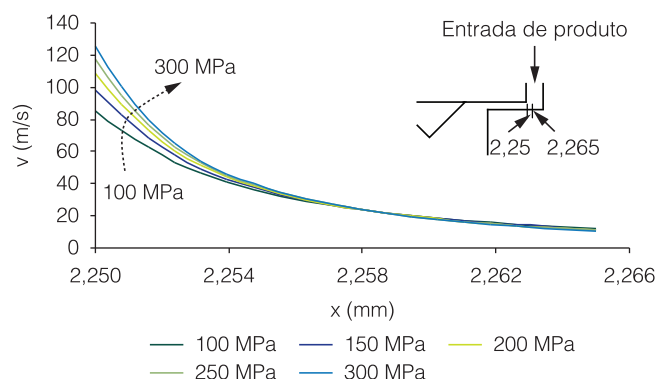


Figura 4. Velocidade máxima de leite desnatado na entrada do *gap* da válvula de HAP para diferentes pressões de homogeneização. O sistema de coordenadas referenciado é apresentado na Figura 1.

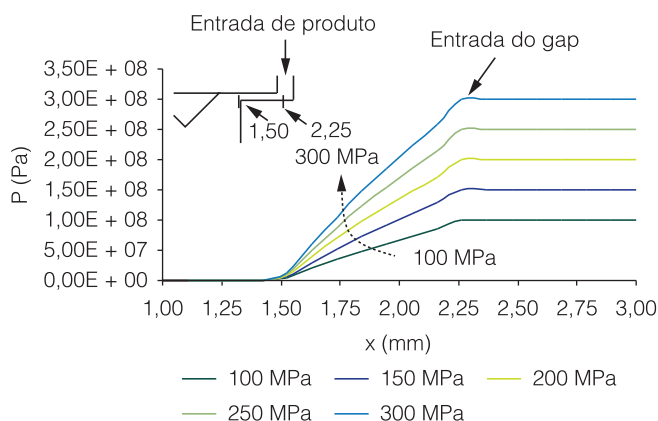


Figura 5. Pressão absoluta de leite desnatado escoando no *gap* da válvula de HAP para diferentes pressões de homogeneização. O sistema de coordenadas referenciado é apresentado na Figura 1.

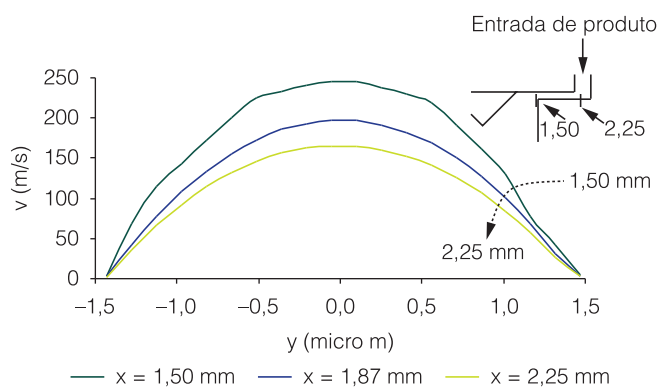


Figura 6. Perfil de velocidade de leite desnatado ao longo do *gap* da válvula de HAP (pressão de homogeneização de 300 MPa). O sistema de coordenadas referenciado é apresentado na Figura 1.

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

PINHO, C. R. G. et al.

as tensões de cisalhamento envolvidas na passagem do leite pelo *gap* estão na ordem de grandeza de 10^6 Pa, reiterando a importância da tensão de cisalhamento no mecanismo de ruptura e inativação celular.

$$\gamma_{\text{parede}} = \frac{6\bar{v}}{h} \quad (10)$$

As velocidades máximas obtidas variam de cerca de 150 m.s^{-1} para processos a 100 MPa até cerca de 250 m.s^{-1} a 300 MPa. Tais valores são próximos dos apresentados por Flourey et al. (2004), utilizando água a uma vazão de aproximadamente 167 mL.min^{-1} . Os autores reportam velocidades máximas de cerca de 200 m.s^{-1} em processos a 340 MPa.

Flourey et al. (2004) observam que grande parte dos trabalhos relacionados com os mecanismos de homogeneização considera que toda a energia de pressurização é convertida em energia cinética. Entretanto, caso isso ocorresse no presente trabalho, a velocidade de saída do *gap* à pressão de homogeneização de 300 MPa seria de 764 m.s^{-1} , sendo que a velocidade máxima observada nesta condição foi de 245 m.s^{-1} . Observa-se, assim, a energia mecânica dissipada pelo atrito do fluido com o corpo da válvula, o que acarreta o aumento da temperatura do fluido.

Outro mecanismo proposto para ruptura celular em homogeneizadores é a colisão do jato radial de fluido com o anel de impacto (item 2.1). A Figura 8 apresenta as velocidades do fluido na saída do *gap*, para cada pressão de homogeneização avaliada. Observa-se que, no caso do homogeneizador avaliado no presente trabalho, o fenômeno de colisão não é significativo, uma vez que as velocidades na região próxima ao cone do assento da válvula são muito baixas. Além disso, observa-se na Figura 9 que o jato de fluido escoou sem impactar o cone da válvula ao sair do *gap*. Tais resultados apontam a importância da tensão de cisalhamento resultante dos perfis de velocidade no *gap* como provável causa mais importante na inativação microbiana (observe-se que tal avaliação só é válida para o equipamento aqui avaliado, sem anel de impacto).

Os perfis de velocidade obtidos (Figura 9) apresentam escoamento contínuo sem recirculações após a saída do *gap*, ao contrário do observado por Stevenson e Chen (1997), em homogeneizador com anel de impacto.

Na Figura 10, são apresentados os perfis de pressão absoluta por meio da válvula de HAP, considerando-se processo a 100 e 300 MPa. As zonas de cavitação, determinadas por pressões abaixo da pressão de vapor da água, são assinaladas pela linha branca pontilhada. Observa-se, assim, a existência de regiões de turbulência e cavitação na saída do *gap*. O processo de cavitação resulta em altas tensões de cisalhamento no rompimento das bolhas de vapor, o que provavelmente exerce

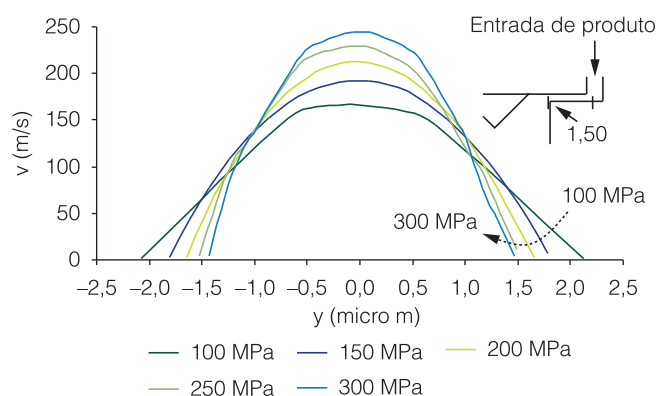


Figura 7. Perfil de velocidade de leite desnatado na saída do *gap* da válvula de HAP para diferentes pressões de homogeneização. O sistema de coordenadas referenciado é apresentado na Figura 1.

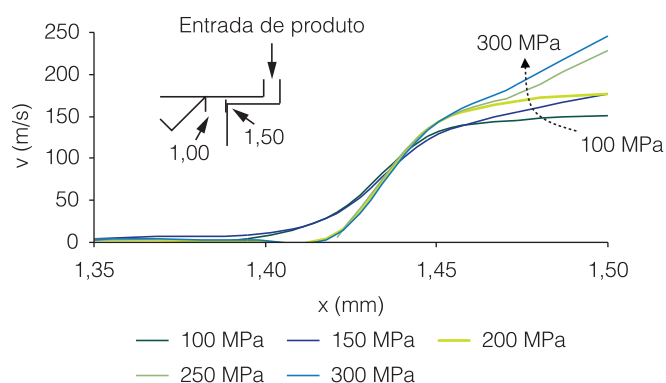


Figura 8. Velocidades máximas de leite desnatado na saída do *gap* da válvula de HAP para diferentes pressões de homogeneização. O sistema de coordenadas referenciado é apresentado na Figura 1.

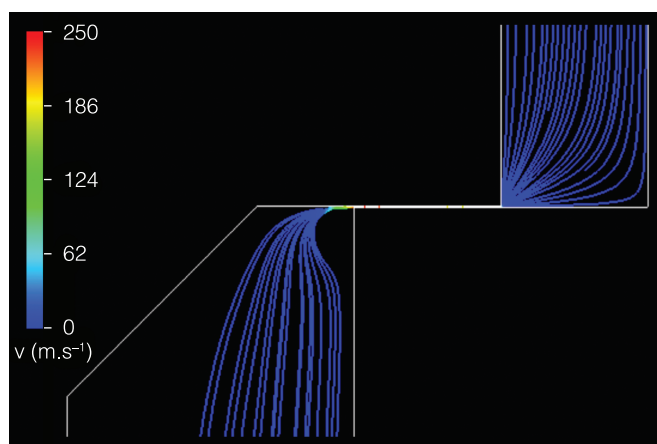


Figura 9. Linhas de fluxo para velocidade de leite desnatado por meio da válvula de HAP, considerando-se processo a 300 MPa.

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

PINHO, C. R. G. et al.

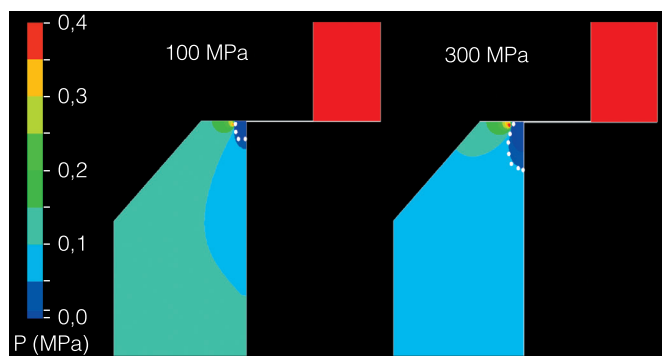


Figura 10. Perfis de pressão absoluta de leite desnatado por meio da válvula de HAP, considerando-se processo a 100 MPa e 300 MPa. A linha branca pontilhada marca as zonas de cavitação.

uma importante função na inativação microbiana e no rompimento celular.

Na literatura, são apresentadas diversas hipóteses sobre o mecanismo de rompimento e inativação de células pelo processo de homogeneização a alta pressão. Os resultados aqui obtidos demonstram que o impacto com partes da válvula do jato de fluido ao sair do *gap* é muito pequeno na geometria da válvula utilizada e que, portanto, provavelmente tal impacto possui pouca influência na inativação celular. Por outro lado, as tensões de cisalhamento resultantes do escoamento dentro do *gap* e a cavitação na saída do mesmo se mostram os mecanismos mais prováveis para inativação microbiana.

Nas condições geralmente utilizadas no processamento de alimentos, considera-se que as propriedades dos fluidos, tais como massa específica e viscosidade dinâmica, são independentes da pressão absoluta do sistema, como a simplificação adotada no presente trabalho. Tal simplificação, no entanto, resulta em pequenos desvios do comportamento real do fluido. Como exemplo, pode-se citar a variação isotérmica no volume específico e na viscosidade da água.

Likhachev (2003), Först et al. (2000) e Stanley e Batten (1969) descrevem a variação da viscosidade da água em relação a temperatura e pressão. Segundo os autores, a viscosidade da água a 20 °C aumenta cerca de 10% entre 0 e 350 MPa. Embora em pressões de 100 MPa a variação isotérmica no volume específico da água esteja na ordem de 3%, a 350 MPa tal variação corresponde a cerca de 12-15% (VEDAMUTHU et al., 1995; FINE e MILLERO, 1973).

Sugere-se, assim, a realização de futuros trabalhos, considerando-se a variação dessas propriedades com as pressões utilizadas durante o processo de homogeneização. Observa-se mais uma vez que os resultados obtidos no presente trabalho se referem apenas ao modelo de homogeneizador estudado, sem

anel de impacto. Sugere-se, assim, a realização de futuros trabalhos avaliando-se diferentes geometrias de válvulas de homogeneização.

4 Conclusões

O presente trabalho avaliou o escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD). Consideraram-se pressões de homogeneização de até 300 MPa. Os perfis de pressão e velocidade do fluido durante o processo foram descritos e analisados. Observaram-se velocidades máximas de até 250 m.s⁻¹ (300 MPa) na saída da válvula e tensões de cisalhamento na ordem de 10⁶ Pa. A análise dos perfis de pressão por meio da válvula destacou as zonas de cavitação. Os resultados obtidos demonstram que as tensões de cisalhamento resultantes do escoamento do fluido dentro do *gap* e a cavitação na saída do mesmo são os mecanismos mais prováveis para inativação microbiana no homogeneizador avaliado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento dos projetos 2007/04121-6, 2005/53668-2, 2004/07074-0 e 2001/06872-2.

Referências

- ANSYS. **Ansys CFX 10.0 User Manual**. ANSYS, Inc. 2005.
- DIELS, A. M. J.; MICHIELS, C. W. High pressure homogenization as a non-thermal technique for the inactivation of microorganisms. **Critical Reviews in Microbiology**. New York, v. 32, n. 4, p. 201-216, 2006.
- FINE, R. A.; MILLERO, F. J. Compressibility of water as a function of temperature and pressure. **The Journal of Chemical Physics**, Philadelphia, v. 59, n. 10, p. 5529-5536, 1973.
- FLOURY, J.; BELLETTRE, J.; LEGRAND, J.; DESRUMAUX, A. Analysis of a new type of high pressure homogeniser. A study of the flow pattern. **Chemical Engineering Science**. Oxford, v. 59, n. 4, p. 843-853, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2003.11.017>
- FÖRST, P.; WERNER, F.; DELGADO, A. The viscosity of water at high pressures – especially at subzero degrees centigrade. **Rheologica Acta**, Heidelberg, v. 39, n. 6, p. 566-573, 2000. <http://dx.doi.org/10.1007/s003970000114>
- KESSLER, H. G. **Food Engineering and Dairy Technology**. 1981, 654 p.
- KLEINIG, A. R.; MIDDLEBERG, A. P. J. The correlation of cell disruption with homogeniser valve pressure gradient determined by computational fluid dynamics. **Chemical Engineering**

Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD)

PINHO, C. R. G. *et al.*

- Science**. Oxford, v. 51, n. 23, p. 5103-5110, 1996. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509\(96\)00354-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509(96)00354-5)
- KLEINIG, A. R.; MIDDLEBERG, A. P. J. Numerical and experimental study of a homogeniser impinging jet. **AICHE Journal**. New York, v. 43, n. 4, p. 1100-1107, 1997.
- KUMAR, A.; DILBER, I. Fluid flow and its modeling using computational fluid dynamics. In: SABLANI, S. S.; DATTA, A. K.; SHAFIUR RAHMAN, M.; MAJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques**. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- LANDER, R.; MANGER, W.; SCOULOUDIS, M.; KU, A.; DAVIS, C.; LEE, A. Gaulin homogenization: a mechanistic study. **Biotechnology Progress**, Malden, v. 16, n. 1, p. 80-85, 2000. PMID:10662494. <http://dx.doi.org/10.1021/bp990135c>
- LIKHACHEV, E. R. Dependence of water viscosity on temperature and pressure. **Technical Physics**, Heidelberg, v. 48, n. 4, p. 514-515, 2003. <http://dx.doi.org/10.1134/1.1568496>
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**. Herndon, v. 32, n. 8, p. 1598-1604, 1994. <http://dx.doi.org/10.2514/3.12149>
- NAKAYAMA, Y. Action of the fluid in the air-micrometer (3rd report, characteristics of double-disc nozzle No. 1, in the case of compressibility being ignores. **Bulletin of the JSME**, v. 7, p. 689-707, 1964.
- PINHO, C. R. G. **Processamento de Leite Desnatado Através da Tecnologia de Homogeneização a Ultra Alta Pressão (HUAP)**. 2007. 193 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- STANLEY, E. M.; BATTEN, R. C. Viscosity of water at high pressures and moderate temperatures. **The Journal of Physical Chemistry**, Philadelphia, v. 73, n. 5, p. 1187-1191, 1969. <http://dx.doi.org/10.1021/j100725a002>
- STEVENSON, M. J.; CHEN, X. D. Visualization of the Flow Patterns in a high-pressure homogenizing valve using a CFD package. **Journal of Food Engineering**. Oxford, v. 33, n. 1/2, p. 151-165, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00046-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00046-0)
- VEDAMUTHU, M.; SINGH, S.; ROBINSON, G. W. Properties of liquid water. 4. The isothermal compressibility minimum near 50 °C. **The Journal of Physical Chemistry**, Philadelphia, v. 99, p. 9263-9267, 1995. <http://dx.doi.org/10.1021/j100022a047>