

AValiação DAS ALTURAS DE Líquido CLARO PONTUAIS EM PRATOS PERFURADOS DE DESTILAÇÃO POR EXPERIMENTAÇÃO FÍSICA E NUMÉRICA

M. MUNIZ¹, N. Z. RAFAGNIM¹, D. N. VENTURI¹, D. NORILER¹, H. F. MEIER¹

¹Universidade Regional de Blumenau, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: mmuniz_eq@hotmail.com

RESUMO - A destilação é uma operação unitária aplicada na separação de misturas de líquidos miscíveis, com aplicação em diversos segmentos de indústria. Esse processo possui elevado custo energético, sendo alvo de diversos estudos que buscam aperfeiçoá-lo, inclusive por técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD). No presente trabalho realizou-se um estudo de verificação e validação por meio de experimentação física e numérica em um prato perfurado de destilação. Os experimentos físicos foram executados numa bancada experimental composta por uma coluna de acrílico com três pratos perfurados, avaliando a altura de líquido claro em diversos pontos do prato central, em função da vazão volumétrica de líquido (água) e da velocidade superficial do gás (ar). Os experimentos numéricos foram realizados via fluidodinâmica computacional em um código comercial, avaliando-se a altura de líquido claro por pontos de monitoramento virtuais, nas mesmas posições dos experimentos físicos. Os resultados obtidos pela experimentação numérica exibiram concordância com os obtidos pela experimentação física, apontando para a validação do modelo.

1. INTRODUÇÃO

A destilação consiste na separação de componentes de uma mistura com base em suas volatilidades relativas, por meio de processos de condensação e evaporação parciais consecutivas. Essa operação unitária está presente em diversos ramos industriais, podendo-se citar as indústrias farmacêuticas, de aromas e, principalmente, nas indústrias petroquímicas (Seader *et al.* 2011).

Colunas de destilação podem ser constituídas de recheios, ou pratos valvulados, campanulados ou perfurados. Nessas colunas, o escoamento ascendente do gás causa uma variação de pressão dentro da coluna, chamada de perda de carga. Bennett *et al.* (1983) propõe correlações baseadas em experimentação física para determinação de perdas de pressão em uma coluna. De acordo com o autor, existem três principais contribuições que geram uma perda de carga total: as perdas de pressão devidas à passagem do gás pelas perfurações do prato, à tensão superficial do líquido e à camada de líquido sobre o prato. As correlações propostas pelo autor são amplamente utilizadas no dimensionamento e no projeto de colunas de destilação.

Além da experimentação física, a destilação é também objeto de estudo da Fluidodinâmica

Computacional (CFD), que se baseia na solução de modelos matemáticos com equações diferenciais parciais que representam fenômenos físico-químicos. Essa ferramenta possibilita a realização de simulações microscópicas de processos, substituindo a experimentação física, de maneira rápida, dependendo do processo e do nível de discretização. A Fluidodinâmica Computacional necessita, no entanto, de contribuições experimentais para a validação dos modelos matemáticos. Trabalhos como Krishna e Baten (2000), Noriler *et al.* (2010) e Rahimi *et al.* (2012) evidenciam a aplicabilidade das técnicas de CFD para simulação de pratos perfurados de colunas de destilação, mostrando uma boa representação do escoamento presente nesse processo

No presente trabalho, tem-se como principal objetivo determinar a perda de carga devida à altura de líquido claro em diversos pontos de um prato perfurado, obtendo-se assim a distribuição desta grandeza sobre o prato, e compará-los com os dados obtidos por simulação numérica afim de validar os modelos. Esses dados são empregados como ferramenta de validação do modelo numérico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Experimentação Física

Os experimentos físicos foram realizados na Unidade Experimental de Coluna de Destilação (UE-CD) disponível no Laboratório de Verificação e Validação, pertencente ao Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Regional de Blumenau (FURB). A UE-CD consiste em uma coluna de acrílico com três pratos perfurados de 0,350 m de diâmetro e 0,500 m de espaçamento entre pratos. O prato inferior tem como objetivo distribuir a fase gasosa que ascende ao prato central, no qual são realizadas medidas experimentais. O prato superior, por sua vez, fornece as condições reais de entrada de líquido no prato central.

Como materiais, são utilizados ar para representação da fase vapor e água para fase líquida. O ar entra na base da coluna e ascende pelas perfurações dos pratos. A água é bombeada para o topo, escoando por ação da gravidade no sentido do *downcomer* para o vertedouro, em cada prato, e retorna para a base, onde é coletada e reutilizada. A Figura 1 mostra um esquema da UE-DC e do prato perfurado utilizado, o qual tem 68 furos quadrados distribuídos em arranjo triangular e 13 furos adicionais que possibilitam a medida das perdas de carga locais.

O controle e a aquisição dos dados de vazão e perdas de carga são feitos de forma *online*, numa frequência de 2 Hz, por um Controlador Lógico Programável (CLP), que converte sinais analógicos em digitais e os transmite para um computador.

Os dados de perda de carga são coletados por sensores diferenciais de pressão conectados nos pontos numerados do prato perfurado (conforme a Figura 1), tal que os furos quadrados são aqueles por onde escoa o ar e os demais são os pontos de tomada de pressão, que são devidamente fechados para evitar a passagem de ar. A numeração adotada será posteriormente utilizada na apresentação dos resultados, bem como os eixos x e y , tal que o escoamento do líquido ocorre no sentido positivo de x .

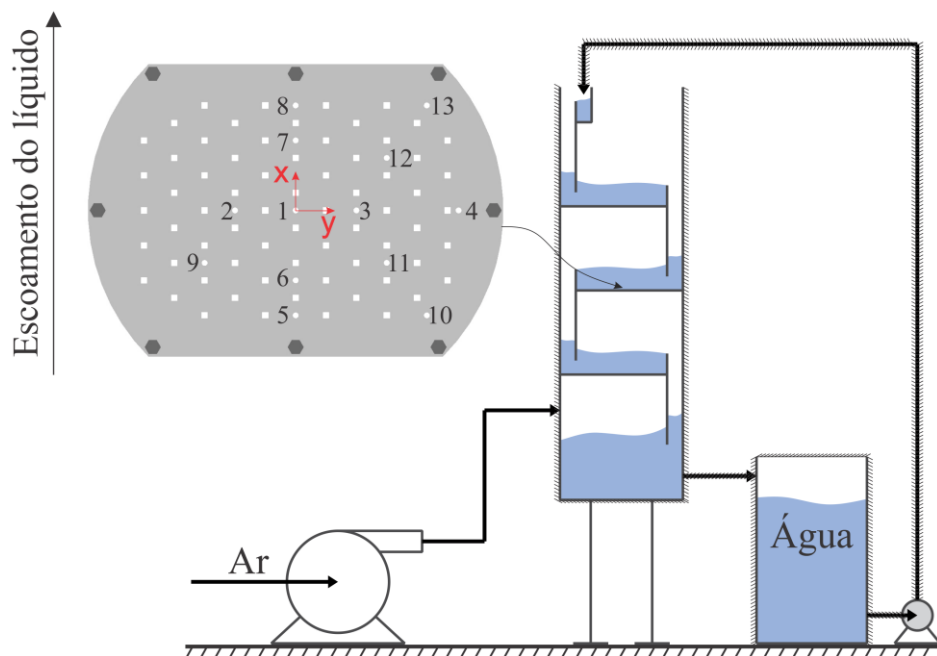


Figura 1 – Esquema da Unidade Experimental de Coluna de Destilação (UE-CD).

Foram obtidos valores de perdas de carga locais para os pontos numerados da Figura 1 em nove condições operacionais distintas, conforme listado na Tabela 1. O planejamento experimental foi feito de forma a se contemplar as vazões máximas e mínimas dentro dos limites de regimes de escoamento aceitáveis na destilação e na coluna disponível.

Tabela 1 – Conjunto das condições operacionais

Vazão de líquido (Ql) (l/min)	Velocidade superficial do gás (Vs) (m/s)		
	0,36	0,43	0,5
20	C1	C4	C7
25	C2	C5	C8
30	C3	C6	C9

Os sensores diferenciais de pressão foram calibrados com o uso de manômetro de água, objetivando-se uma maior precisão dos resultados obtidos. Obteve-se séries de aproximadamente mil dados para cada condição operacional, mas somente é apresentado o valor médio, uma vez que os dados de perda de carga local variam em consequência do escoamento turbulento dentro da coluna.

2.2. Experimentação Numérica

Para a realização dos experimentos numéricos, dispôs-se de um *cluster* computacional localizado no Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LFC), pertencente ao Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Regional de Blumenau (FURB). Para as simulações foi

empregado o código comercial FLUENT 14.0 da ANSYS, que utiliza o método dos volumes finitos, e para a geração da geometria e malha numérica, foi utilizado o *software* ICEM 14.0.

A geometria do prato utilizada para a experimentação numérica possui altura de 0,250 m, com o intuito de reduzir o custo computacional. Há também uma extensão de 0,095 m antes da passagem do gás pelas perfurações, para que o perfil de velocidade possa ser formado. A entrada de líquido é realizada através de uma seção retangular, e sua saída é realizada no vertedouro. Os detalhes geométricos, condições de contorno e cortes da malha numérica são ilustrados na Figura 2. A malha numérica possui aproximadamente 750 mil nós com qualidade ortogonal mínima de 0,6 e ângulo mínimo de 36°, onde 75% dos elementos da malha ficaram com qualidade acima de 0,9 e com ângulo acima de 45°.

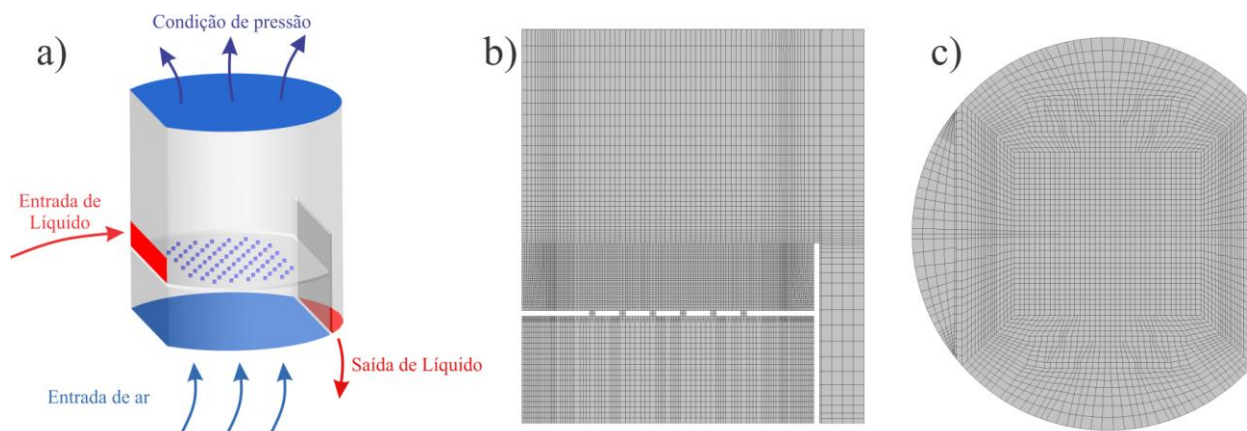


Figura 2 – Geometria computacional, condições de contorno e cortes da malha numérica.

Foi utilizado um modelo multifásico Euleriano-Euleriano, modelo de turbulência k- ϵ padrão para cada fase, e modelo de coeficiente de arraste proposto por Krishna *et al.* (2000), com estimativa da fração volumétrica média baseada na correlação de Bennett *et al.* (1983) (NORILER *et al.*, 2010). Para a solução transiente das equações de conservação se utilizou o método de acoplamento de acoplamento pressão-velocidade “Phase-coupled SIMPLE”, discretização espacial “upwind” de primeira ordem, fatores de relaxação padrões, e como condição inicial, preencheu-se o prato com líquido até a altura da represa com campo de velocidade nulo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados numéricos e experimentais de perda de carga local serão apresentados de forma conjunta para cada ponto de tomada de pressão, facilitando a comparação entre eles. Optou-se por construir gráficos de superfície com os valores de perda de carga obtidos, de forma que se tenha uma representação da distribuição do líquido sobre o prato na coluna de destilação. Na Figura 3 apresentam-se os resultados para as condições operacionais C1, C2 e C3; na Figura 4 para as condições C4, C5 e C6; e na Figura 5, para as condições C7 C5 e C8. Agrupou-se, portanto, os

resultados de mesmas velocidades superficiais de gás (V_s) e variadas vazões de líquido (Q_l).

As figuras mostram que há a mesma tendência entre os resultados numéricos e experimentais. Observa-se, no entanto, que as alturas de líquido obtidas por experimentação numérica são maiores que as provenientes da experimentação física, coincidindo apenas no ponto de tomada de pressão central (ponto 1). O acúmulo da água nas laterais mostra concordância com o perfil de escoamento que se espera do gás – como a velocidade no centro é maior, a água é deslocada para as bordas.

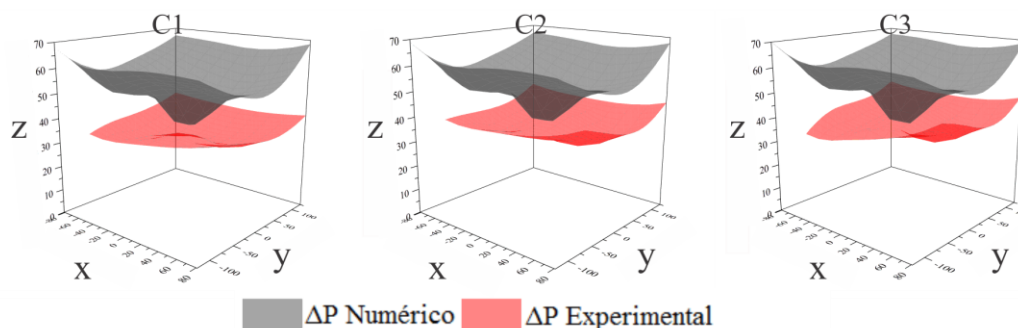


Figura 3 – Superfície de resposta para $V_s = 0,36$ m/s e Q_l variando em 20, 25 e 30 L/min, respectivamente.

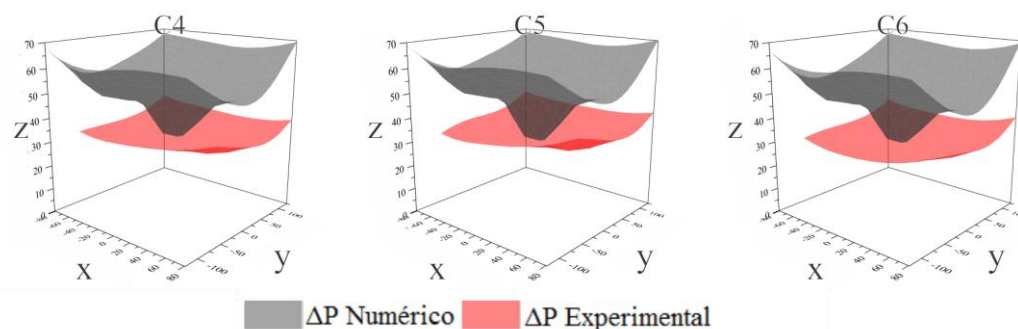


Figura 4 – Superfície de resposta para $V_s = 0,43$ m/s e Q_l variando em 20, 25 e 30 L/min, respectivamente.

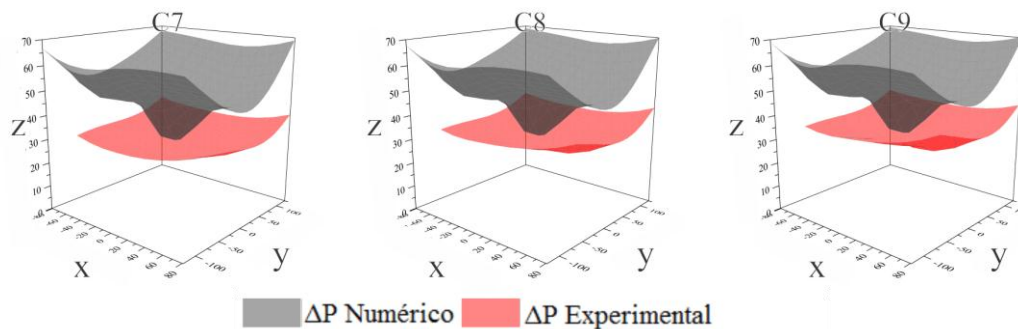


Figura 5 – Superfície de resposta para $V_s = 0,50$ m/s e Q_l variando em 20, 25 e 30 L/min, respectivamente.

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam a perda de carga local em função da vazão volumétrica de líquido (Q_l) e da velocidade superficial de gás (V_s), respectivamente, para o ponto de tomada de pressão central, com o objetivo de verificar como esses parâmetros influenciam nas alturas de líquido sobre o prato.

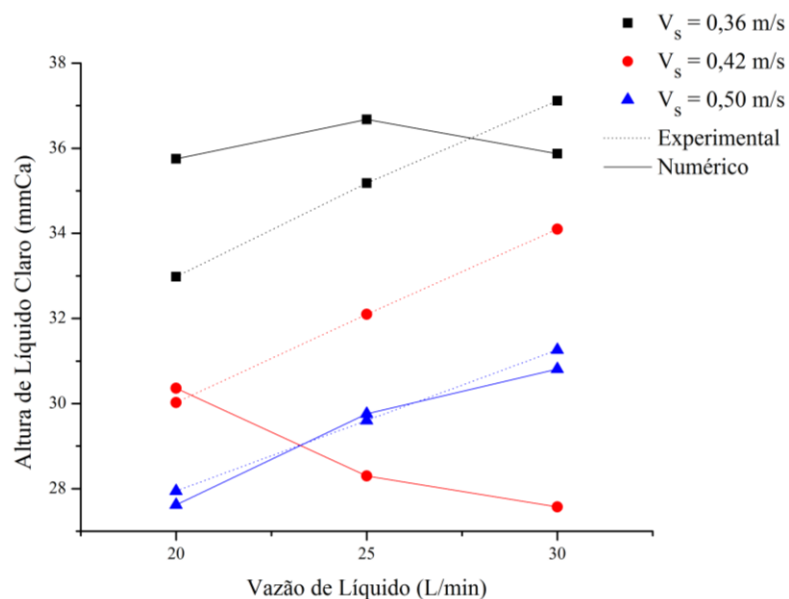


Figura 6 – Variação da altura de líquido claro no ponto de tomada de pressão central com a vazão de líquido (Q_l).

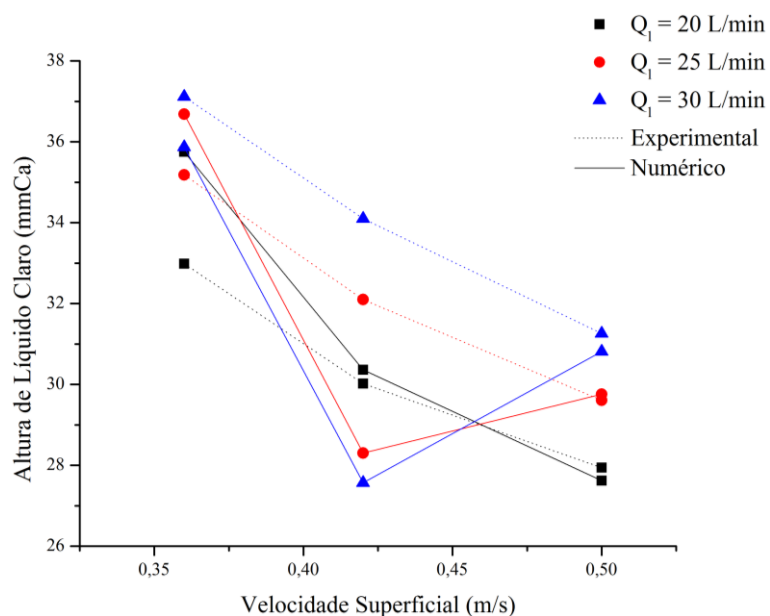


Figura 7 – Variação da altura de líquido claro no ponto de tomada de pressão central com a velocidade superficial do gás (V_s).

É possível observar na Figura 6, que um aumento da vazão de líquido ocasiona um aumento da altura de líquido claro local. Essa tendência é bem definida para os dados experimentais em todos os casos, mas para os dados numéricos é somente observada para a velocidade superficial do gás de 0,5m/s. Ao observar a Figura 7, por sua vez, percebe-se uma diminuição da altura de líquido claro local com o aumento da velocidade superficial do gás. Novamente, essa tendência é bem definida para os dados experimentais em todos os casos, mas para os dados numéricos é somente observada para a vazão de líquido de 20L/min.

De maneira global, a comparação dos dados apresentou melhores resultados nos casos com maior velocidade superficial do gás, ou menor vazão volumétrica de líquido. A causa desse comportamento pode estar associada ao regime formado no prato durante o processo. Maiores velocidades superficiais do gás combinadas com menores vazões de líquido ocasionam a formação de um regime de emulsão bem distribuído, ou até mesmo um regime de *spray* dependendo do caso. Dessa forma, o campo de pressão ao longo do prato tende a apresentar uma maior simetria, suavizando de certa forma possíveis erros locais entre os dados numéricos e experimentais.

Outro fator que pode estar relacionado é o cálculo do coeficiente de arraste, o qual depende da estimativa da fração volumétrica média, a qual nesse trabalho foi utilizada a correlação proposta por Bennett *et al.* (1983). Essa correlação é dependente somente da velocidade superficial do gás e das propriedades físicas dos fluidos envolvidos. Assim, a vazão de líquido e a fração de área perfurada podem ter influência significativa na estimativa da fração volumétrica média do gás, e que nos casos apresentados acima estão sendo negligenciadas.

5. CONCLUSÃO

A presença de colunas de destilação em diversos ramos industriais confere uma grande importância para esse processo. Assim, as técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) aparecem como aplicáveis ferramentas no dimensionamento e simulação de colunas de destilação. Nesse trabalho se apresentou um estudo de modelagem e simulação aplicado a pratos perfurados largamente utilizados nesse tipo de processo. Como resultado desse estudo, obteve-se uma concordância entre as simulações e os experimentos em grande parte dos casos apresentados, mesmo que de forma qualitativa. Dessa forma, apesar do modelo matemático proposto ainda não poder ser validado completamente, os resultados apresentam boas estimativas para maiores velocidades superficiais de gás e menores vazões volumétricas de líquido.

6. REFERÊNCIAS

- BENNETT, D. L. *et al.* New Pressure Drop Correlations for Sieve Tray Distillation Columns. *AIChE J.*, v.26, p.432-442, 1983.
- KRISHNA, R.; BATEN, J. M. van. Modelling sieve tray hydraulics using computational fluid dynamics. *Chem. Eng. J.*, v. 77, p. 143-151, 2000.
- KRISHNA, R.; BATEN, J. M. van; URSEANU, M. I. Three-phase Eulerian simulations of bubble column reactors operating in the churn-turbulent regime: a scale up strategy. *Chem. Eng. Sci.*, v.

55, p. 3275-3286, 2000.

NORILER, D. ; BARROS, A. A. C. ; MACIEL, M. R. W. ; MEIER, H. F. Simultaneous Momentum, Mass, and Energy Transfer Analysis of a Distillation Sieve Tray Using CFD Techniques: Prediction of Efficiencies. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 49, p. 6599-6611, 2010.

RAHIMI, R.; SOTOODEH, M. M.; BAHRAMIFAR, E. The effect of tray geometry on the sieve tray efficiency. *Chem. Eng. Sci.*, v. 76, p. 90-98, 2012.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. *Separation process principles : chemical and biochemical operations*. Hoboken : Wiley, 2011. 821p.