

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO VOLUMÉTRICA DA ÁGUA DE COCO

ESTIMATE OF VOLUMETRIC EXPANSION COEFFICIENT OF COCONUT WATER

César Augusto Canciam

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa, Avenida Monteiro Lobato, km 04, Ponta Grossa, Paraná, CEP: 84016-210. E-mail: canciam@utfpr.edu.br

RESUMO

O coeficiente de expansão volumétrica é uma propriedade termodinâmica que fornece uma medida da variação da massa específica em resposta à variação da temperatura, mantendo a pressão constante. Com o coeficiente de expansão volumétrica é possível avaliar o impacto da dilatação térmica sobre a medição volumétrica. O objetivo deste trabalho foi estimar o coeficiente de expansão volumétrica da água de coco. Para tanto, realizou uma análise de regressão linear de dados experimentais da massa específica da água de coco em função da temperatura. O valor encontrado para o coeficiente de expansão volumétrica foi de $3,39 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, em um intervalo de temperatura de 5 a 80°C e pressão de 1 atm. Na literatura não foram encontrados valores experimentais para o coeficiente de expansão volumétrica da água de coco. Observou-se que o coeficiente de expansão volumétrica da água de coco é próximo do coeficiente de expansão volumétrica do suco de abacaxi com 11°Brix .

Palavras-chave: Dilatação. Estimativa. Água de coco. Regressão linear.

ABSTRACT

The volumetric expansion coefficient is a thermodynamic property, which provides a measure of variation of density in response to temperature variation, keeping the pressure constant. With the volumetric expansion coefficient, it is possible to evaluate the impact of thermal expansion of the volumetric measurement. The objective of this work was to estimate the volumetric expansion coefficient of coconut water. Therefore, it realized a linear regression analysis of experimental data of density of coconut water as a function of temperature. The value found for the volumetric expansion coefficient was $3.39 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, in a temperature range of 5 to 80°C and 1 atm. In the literature, there are no experimental values for the volumetric expansion coefficient of coconut water. It was observed that the volumetric expansion coefficient of coconut water is near the volumetric expansion coefficient of the pineapple juice with 11°Brix .

Keywords: Dilatation. Estimate. Coconut water. Linear Regression.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema termodinâmico pode ser descrito por três coordenadas mensuráveis: pressão (P), volume (V) e temperatura (T). Dados experimentais demonstram que essas três coordenadas não são totalmente independentes, uma vez que ao fixar duas delas quaisquer, determina-se a terceira. Dessa forma, existe uma Equação de Estado (EDE) que relaciona essas três coordenadas para estados de equilíbrio. A equação (1) expressa esta equação na forma funcional (Smith *et al.*, 2007).

$$f(P, V, T) = 0 \quad (1)$$

Uma EDE pode ser escrita com qualquer uma das três coordenadas expressa em função das outras duas. Assim, a equação (2) fornece o volume em função da pressão e da temperatura (Smith *et al.*, 2007).

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \cdot dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \cdot dP \quad (2)$$

O coeficiente de expansão volumétrica (β) corresponde à variação de volume provocada pela variação de temperatura, enquanto a pressão permanece constante. A equação (3) fornece a definição do coeficiente de expansão volumétrica (Van Wylen *et al.*, 2003).

$$\beta = \left(\frac{1}{V} \right) \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (3)$$

Já a compressibilidade isotérmica (κ) é definida como sendo a variação do volume provocada pela variação de pressão, com a temperatura constante. A equação (4) fornece a definição da compressibilidade isotérmica (Van Wylen *et al.*, 2003).

$$\kappa = - \left(\frac{1}{V} \right) \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (4)$$

A combinação das equações (2), (3) e (4) resulta na equação (5) (Smith *et al.*, 2007).

$$\frac{dV}{V} = \beta \cdot dT - \kappa \cdot dP \quad (5)$$

Schmidt e colaboradores (2013) comentam que o coeficiente de expansão volumétrica e a compressibilidade isotérmica são propriedades muito úteis quando se trabalha com substâncias nas fases sólida e líquida.

No caso de líquidos reais, o coeficiente de expansão volumétrica e a compressibilidade isotérmica são grandezas pouco sensíveis com a temperatura e a pressão. Assim sendo, pequenas variações de temperatura e pressão, introduz-se um pequeno erro se forem tomadas como constantes. Dessa maneira, a equação (5) pode ser reescrita na equação (6) (Smith *et al.*, 2007).

$$\ln \left(\frac{V}{V_0} \right) = \beta \cdot (T - T_0) - \kappa \cdot (P - P_0) \quad (6)$$

O índice 0 representa a condição inicial.

Com a pressão constante, a equação (6) é simplificada, dando origem a equação (7) (Smith *et al.*, 2007).

$$\ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = \beta \cdot (T - T_0) \quad (7)$$

Canciam (2005) reescreve a equação (7) em função da massa específica (ρ). A equação (8) fornece a massa específica como uma função do coeficiente de expansão volumétrica e da temperatura.

$$\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) = \beta \cdot (T - T_0) \quad (8)$$

Uma função afim é apresentada, tradicionalmente, conforme a equação (9) (Lopes, 2004):

$$y = a \cdot x + b \quad (9)$$

Em que o coeficiente a representa a variação de y (variável dependente) quando x (variável independente) varia de uma unidade.

Comparando as equações (8) e (9), pode-se observar que o coeficiente de expansão volumétrica representa a variação de $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$ quando $(T - T_0)$ varia de uma unidade (Canciam, 2010).

Quando o termo b é igual a zero, a função afim torna-se um caso particular de uma função linear (Lopes, 2004).

Dessa forma, o gráfico de $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$ versus $(T - T_0)$ fornece uma reta, em que o coeficiente angular dessa reta corresponde, numericamente, ao coeficiente de expansão volumétrica (Canciam, 2010).

Santos e Vieira (2010) comentam que a partir do conhecimento do coeficiente de expansão volumétrica é possível estimar outras propriedades físico-químicas (entre elas, a entalpia de vaporização) e avaliar os impactos nos sistemas de medição volumétrica devidos à mudança de temperatura.

Canciam (2012 a) comenta que o coeficiente de expansão volumétrica é empregado no estudo da convecção natural de um fluido em escoamento através do grupo adimensional de Rayleigh e no cálculo da tensão volumétrica provocada por um aumento da temperatura.

À vista disso, o objetivo desse trabalho foi estimar o coeficiente de expansão volumétrica da água de coco, a partir da análise de regressão linear de dados experimentais da massa específica em função da temperatura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A Tabela 1 relaciona os dados experimentais da massa específica da água de coco em função da temperatura. Esses dados foram obtidos do trabalho de Prades e colaboradores (2011).

Tabela 1: Efeito da temperatura sobre a massa específica da água de coco

Temperatura (°C)	Massa específica (kg.m ⁻³)
5	1021,72
20	1016,75
35	1011,33
50	1007,12
65	1000,03
80	996,72

Na análise de regressão linear foram utilizadas as equações (10) e (11). Essas equações foram obtidas do trabalho de Cancian (2012 b). A equação (10) determina o coeficiente de expansão volumétrica (β), enquanto que a equação (11), o coeficiente de determinação (R^2).

$$\beta = \frac{\left\{ n \cdot \left[\sum_{i=1}^n \left((T_i - T_0) \cdot \ln \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right) \right) \right] - \left[\sum_{i=1}^n (T_i - T_0) \right] \cdot \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right) \right\}}{\left\{ n \cdot \left[\sum_{i=1}^n (T_i - T_0)^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^n (T_i - T_0) \right]^2 \right\}} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{\left\{ n \cdot \sum_{i=1}^n \left[(T_i - T_0) \cdot \ln \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right) \right] \right\} - \left[\sum_{i=1}^n (T_i - T_0) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right) \right]}{\sqrt{\left\{ n \cdot \left[\sum_{i=1}^n (T_i - T_0)^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^n (T_i - T_0) \right]^2 \right\}} \cdot \sqrt{\left\{ n \cdot \left[\sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right) \right]^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right) \right]^2 \right\}}} \quad (11)$$

A estimativa do coeficiente de expansão volumétrica da água de coco consistiu na aplicação dos dados indicados na Tabela 1 nas equações (10) e (11).

Nos cálculos, a temperatura inicial (T_0) foi de 5°C e a massa específica inicial (ρ_0) correspondeu ao valor de 1021,72 kg/m³.

Nas equações (10) e (11), n corresponde ao número de dados emparelhados da massa específica em função da temperatura. Isto é, n equivale a 6, com base na Tabela 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor encontrado para o coeficiente de expansão volumétrica da água de coco (β) foi de $3,39 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$. Enquanto que o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,993.

Triola (2008) sugere comparar o valor encontrado do coeficiente de determinação com o valor crítico do coeficiente de correlação de Pearson. Se o módulo do valor encontrado for maior que o valor crítico, pode-se concluir que existe uma correlação linear significativa. Em caso contrário, não há evidência suficiente para apoiar a existência de uma correlação linear significativa.

Considerando uma amostra composta por 6 pares de dados emparelhados e um grau de confiança de 99%, o valor crítico do coeficiente de correlação de Pearson equivale a 0,917 (Triola, 2008).

Como o valor do coeficiente de determinação foi de 0,993, pode-se concluir que existe uma correlação linear significativa.

Com relação ao coeficiente de determinação, Pinheiro e colaboradores (2009) comentam que esse parâmetro mede a interdependência linear entre as variáveis e avalia a qualidade do ajuste, ou seja, quanto mais próximo o coeficiente de determinação for da unidade, melhor o ajuste da reta em relação aos pontos da dispersão.

Lira (2004) argumenta que a correlação linear é classificada como muito forte quando os valores do módulo do coeficiente de determinação são maiores ou iguais a 0,90 e menores que 1,0. Dessa forma, para a água de coco, a correlação linear é classificada como muito forte.

A Figura 1 mostra o gráfico de $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$ versus $(T - T_0)$ para os dados experimentais da água de coco, indicados na Tabela 1. Nesta figura, Y corresponde à razão $\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$.

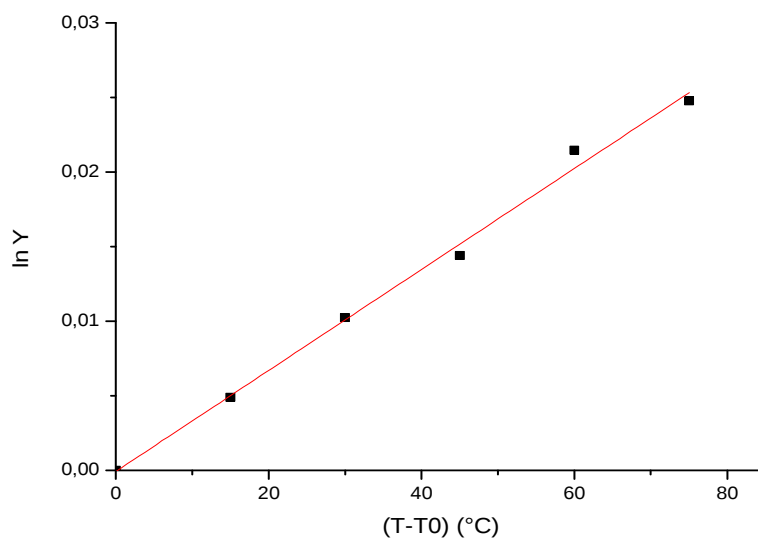


Figura 1: Gráfico de $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$ versus $(T - T_0)$ para os dados experimentais da água de coco

A Tabela 2 fornece a análise de variância (ANOVA) da análise de regressão linear realizada para a água de coco. Nessa tabela, GL corresponde aos graus de liberdade; SQM, à soma dos quadrados médios; QM, ao quadrado médio e Fcal, ao valor de F calculado. Foi incluído nessa tabela, os valores de p.

Tabela 2 – ANOVA e valor de p para a análise de regressão linear da água de coco

Fonte de variação	GL	SQM	QM	Fcal	Valor de p
Regressão	1	$4,515 \times 10^{-4}$	$4,515 \times 10^{-4}$	748,772	$1,061 \times 10^{-5}$
Resíduos	4	$2,412 \times 10^{-6}$	$6,030 \times 10^{-7}$		
Total	5	$4,539 \times 10^{-4}$			

Triola (2008) comenta que no modelo de regressão linear simples a função do teste F é a de testar a significância do efeito de X sobre Y, ou seja, testar a significância de $(T - T_0)$ sobre $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$.

Para um nível de significância de 5%, o valor de Ftab (F tabelado) equivale a 7,71. Como na Tabela 2, o valor de F calculado é maior que o valor de F tabelado, os resultados da ANOVA sugerem que a regressão linear, como um todo, faz sentido, ou seja, a variável explicativa $(T - T_0)$ influencia globalmente a variável explicada $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$.

Ara e colaboradores (2003) relatam que o valor de p varia entre 0 e 1. Admite-se como um valor crítico de p, valores menores ou iguais a 0,05. Dessa forma, assume-se como margem de segurança, 5% de chance de erro, ou, 95% de chance de estar certo. Na Tabela 2, pode-se observar que o valor de p é pequeno, sugerindo que a margem de segurança de erro também é pequena.

Buscando na literatura trabalhos associados ao coeficiente de expansão volumétrica da água de coco, constatou-se a ausência desse estudo, o que dificultou a análise dos resultados obtidos.

Cancian (2012 a) estudou a correlação entre o coeficiente de expansão volumétrica e o teor de sólidos totais para o suco de abacaxi da variedade Smooth Cayenne, entre 17,4 e 85,8°C. Com o teor de sólidos totais de 11°Brix, o coeficiente de expansão volumétrica foi de $3,3930 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$. Valor próximo ao encontrado para a água de coco.

O coeficiente de expansão volumétrica mede a variação relativa do volume devido à alteração da temperatura, mantendo-se a pressão constante. Dessa forma, se o coeficiente de expansão volumétrica de um material é igual a $1,0 \times 10^{-2} \text{C}^{-1}$ significa que o acréscimo de 1 grau tem como resultado o aumento do volume em 1%, comentam Netz e Ortega (2008).

Seguindo a mesma linha de raciocínio, para cada 1 grau de acréscimo na temperatura, o aumento do volume da água de coco é de 0,0339%. Esse valor pode parecer pequeno, mas se comparado com a água ($\beta = 2,07 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$) (Netz; Ortega, 2008); o aumento do volume da água de coco equivale a 1,638 vezes mais que o aumento do volume de água.

De acordo com Santos e Vieira (2010), a partir do conhecimento do coeficiente de expansão volumétrica é possível avaliar os impactos no sistema de medição volumétrico. Dessa forma, considerando um volume de 1000 litros de água com uma variação de temperatura de 10°C, o volume de água aumenta em torno de 2,10 litros. Com este mesmo raciocínio, o volume de 1000 litros de água

de coco, com a mesma variação de temperatura de 10°C, o volume da água de coco aumenta em torno de 3,39 litros.

Frade (2010) explica que a dilatação de um material em decorrência da elevação da temperatura é uma consequência do aumento da sua energia interna, que determina uma maior amplitude das vibrações moleculares e, portanto, uma maior distância média entre os constituintes moleculares.

A expansão volumétrica é variável e tende a manter uma relação direta com a composição química dos diferentes materiais líquidos (Jerônimo *et al.*, 2012).

O valor do coeficiente de expansão volumétrica está relacionada com a energia de ligação química entre as espécies químicas. Materiais em que as ligações químicas são fortes apresentam baixos coeficientes de expansão volumétrica. Isto porque a dilatação térmica está associada à variação assimétrica da energia de ligação com a distância entre as espécies químicas. Ou seja, durante o aquecimento as espécies químicas do material aumentam a frequência e a amplitude de vibração (estado excitado) e como as forças de repulsão são sempre maiores que as forças de atração, a distância entre as espécies químicas também aumenta (Santos; Vieira, 2010).

A molécula de água é uma molécula polar e a interação entre suas moléculas é do tipo ligação de hidrogênio (Brown; Holme, 2009).

A água de coco apresenta 93% de água, 5% de açúcares (glicose, frutose e sacarose) e o restante em minerais, vitaminas e proteínas. Dos minerais encontrados destacam-se: ferro, cálcio, potássio, magnésio, sódio e fósforo. E em termos de vitaminas, destaca-se a vitamina C (Carvalho *et al.*, 2006).

Peruzzo e Canto (2010) comentam que moléculas de glicose, frutose e sacarose apresentam em sua estrutura grupamentos hidroxila. Na água, são estabelecidas ligações de hidrogênio entre os grupamentos hidroxila das moléculas de glicose, frutose e sacarose e as moléculas de água, o que garante a dissolução desses açúcares na água. Entretanto, também são formadas forças intermoleculares do tipo dipolo-dipolo entre as moléculas desses açúcares e da água.

As forças intermoleculares do tipo dipolo-dipolo são características de moléculas polares. As moléculas, embora eletricamente neutras, podem possuir um dipolo elétrico permanente. Devido a alguma distorção na distribuição das cargas elétricas, um lado da molécula é ligeiramente mais “positivo” e outro ligeiramente mais “negativo”. A tendência dessas moléculas é de se alinharem e interagirem umas com as outras por atração eletrostática entre os dipolos opostos (Brown; Holme, 2009).

As ligações de hidrogênio, quando comparadas com as forças intermoleculares do tipo dipolo-dipolo, são mais fortes (Brown; Holme, 2009). Talvez por esse motivo, o coeficiente de expansão volumétrica da água é menor que o coeficiente de dilatação volumétrica da água de coco.

4. CONCLUSÃO

O coeficiente de expansão volumétrica da água de coco foi de $3,39 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$. Na literatura consultada, não foram encontrados valores experimentais do coeficiente de expansão volumétrica para a água de coco, o que dificultou a análise dos resultados obtidos. Observou-se que o coeficiente de expansão volumétrica da água de coco é próximo ao coeficiente de expansão volumétrica do suco de abacaxi da variedade Smooth Cayenne, com 11°Brix.

Em comparação com a água, o aumento do volume da água de coco, em virtude do aumento da temperatura, equivale a 1,638 vezes mais que o aumento do volume de água. A possível justificativa

para esse comportamento pode estar associada à formação de ligações de hidrogênio na água, enquanto que na água de coco são formadas as ligações de hidrogênio e as forças intermoleculares do tipo dipolo-dipolo.

Com o valor encontrado para o coeficiente de determinação pode-se concluir que existe uma correlação linear significativa e que a correlação linear foi classificada como muito forte.

Os resultados da ANOVA sugerem que a regressão linear, como um todo, faz sentido, ou seja, a variável $(T - T_0)$ influencia globalmente a variável $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$.

5. REFERÊNCIAS

ARA, A.; MUSETTI, A. B.; SCHNEIDERMAN, B. *Introdução à Estatística*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003. 152p.

BROWN, L. S.; HOLME, T. A. *Química geral aplicada à Engenharia*, São Paulo: Cengage Learning, 2009. 656p.

CANCIAM, C.A. Predição do coeficiente de expansão térmica do óleo de algodão. *Publicatio UEPG Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias*, v. 11, n. 3, p.27-31, 2005.

CANCIAM, C.A. Predição do coeficiente de expansão térmica do óleo de gergelim (*Sesamum indicum* L.) através da aplicação de regressão linear. *E-xacta*, v. 3, n. 1, p.20-28, 2010.

CANCIAM, C. A. Correlação entre o coeficiente de expansão térmica e o teor de sólidos totais para o suco de abacaxi (*Ananas comusus* L. Merrill). *Revista RETEC*, v. 5, n. 2, p. 7-21, 2012 a.

CANCIAM, C. A. Predição do coeficiente de expansão térmica do óleo de girassol através da aplicação da análise de regressão linear. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 6, n. 2, p. 852-863, 2012 b.

CARVALHO, J. M.; MAIA, G. A.; SOUSA, P. H. M.; MAIA JÚNIOR, G. A. Água-de-coco: propriedades nutricionais, funcionais e processamento. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 27, n. 3, p. 437-452, 2006.

FRADE, J. M. C. B. C. *Conformação automática de formas complexas em vidro de mesa*. 2010. 327 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.

JERÔNIMO, C. E. M.; BALBINO, C. P.; FERNANDES, H. G. Coeficiente de dilatação volumétrica determinados pela curva ASTM em frações de petróleo. *Scientia Plena*, v. 8, n. 9, p. 1-8, 2012.

LIRA, S. A. *Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicação*. 2004. 196 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Mestrado em Ciências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LOPES, J. P. *Fragmentações e aproximações entre matemática e física no contexto escolar: problematizando o conceito de função afim*. 2004. 205 f. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica) – Programa de Mestrado em Educação Científica e Tecnológica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NETZ, P. A.; ORTEGA, G. G. *Fundamentos de físico-química: uma abordagem conceitual para as ciências farmacêuticas*. Porto Alegre: Artmed, 2008. 299p.

PERUZZO, F. M.; CANTO, E. L. *Química na abordagem do cotidiano – volume 1: Química Geral e Inorgânica*. São Paulo: Editora Moderna, 2010. 648p.

PINHEIRO, J. I. D.; CUNHA, S. B.; CARVAJAL, S. R.; GOMES, G. C. *Estatística básica: a arte de trabalhar com dados*. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2009. 288p.

PRADES, A.; DORNIERI, M.; DIOP, N.; PAIN, J. P. Coconut water preservation and processing: a review. *Fruits*, v. 67, n. 3, p. 157-171, 2011.

SANTOS, D. Q.; VIEIRA, D. F. Determinação de coeficiente de expansão térmica do biodiesel e seus impactos no sistema de medição volumétrico. *Eclética Química*, v. 35, n. 4, p. 107-112, 2010.

SCHMIDT, F. W.; HENDERSON, R. E.; WOLGEMUTH, C. H. *Introdução às Ciências Térmicas: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2013. 466p.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2007. 644p.

TRIOLA, M. F. *Introdução a Estatística*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008. 410p.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003. 589p;