

# OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

## AULA 2: ESTIMAR PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE ALIMENTOS.

Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

<http://www.crcnetbase.com/isbn/978-1-56676-929-7>

- DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO (h)

$$h = f(D, \mu, \rho, c_p, k, \delta, V, g, \Delta T)$$

## PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS ALIMENTOS

### ONDE ENCONTRAR?

- Apostila de operações unitárias
- Equações correlação empírica
- Tabela nutricional (composição centesimal)
- Bibliografia em livros e periódicos
- Pesquisa em universidades e em laboratórios



$$q = \frac{k \cdot A}{L} \cdot \Delta T$$

## CONDUTIVIDADE DE TÉRMICA ( $k$ )

Em alimentos  $k < 1$  w/m.k

Resistência térmica

### Thermal Conductivity of Some Foods

Product	Water Content (%)	Temperature (°C)	Thermal Conductivity (J/s·m·°C)
Oil			
Olive		15	0.189
	—	100	0.163
Soybean	13.2	7–10	0.069
Vegetable and animal	—	4–187	0.169
Sugars	—	29–62	0.087–0.22
Cod	83	2.8	0.544
Meats			
Pork			
Perpendicular to the fibers	75.1	6	0.488
		60	0.54
Parallel to the fibers	75.9	4	0.443
		61	0.489
Fatty meat	—	25	0.152
Lamb			
Perpendicular to the fibers	71.8	5	0.45
		61	0.478
Parallel to the fibers	71.0	5	0.415
		61	0.422
Veal			
Perpendicular to the fibers	75	6	0.476
		62	0.489
Parallel to the fibers	75	5	0.441
		60	0.452
Beef			
Freeze-dried			
1000 mm Hg	—	0	0.065
0.001 mm Hg	—	0	0.035
Lean			
Perpendicular to the fibers	78.9	7	0.476
	78.9	62	0.485
Parallel to the fibers	78.7	8	0.431
	78.7	61	0.447
Fatty	—	24–38	0.19
Strawberries	—	–14–25	0.675
Peas	—	3–17	0.312

## CALOR ESPECÍFICO $C_P$

- Quantidade de calor requerido para aumentar a temperatura de uma unidade de massa por 1°C ou K.

### Specific Heat for Some Foods

Product	Water (%)	Specific heat (kJ/kg.K)
<b>Meats</b>		
Bacon	49.9	2.01
<b>Beef</b>		
Lean beef	71.7	3.433
Roast beef	60.0	3.056
Hamburger	68.3	3.520
Veal	68.0	3.223
Prawns	66.2	3.014
<b>Eggs</b>		
Yolk	49.0	2.810
<b>Milk</b>		
Pasteurized, whole	87.0	3.852
Skim	90.5	3.977–4.019
Butter	15.5	2.051–2.135
Apples (raw)	84.4	3.726–4.019
Cucumbers	96.1	4.103
Potatoes	79.8	3.517
	75.0	3.517
<b>Fish</b>		
Fresh	80.0	3.600
	76.0	3.600
Cheese (fresh)	65.0	3.265
Sardines	57.4	3.014
Carrots (fresh)	88.2	3.810–3.935

Source: Reidy, G.A., M.S. thesis, Michigan State University, 1968.

## DENSIDADE ( $\rho=m/V$ )

- Para sucos é função do índice de refração: °Brix
- Composição do produto (equações)
- Determinação por picnometria
- Alimentos particulados
  - Densidade do leite (conjunto total)
  - Densidade do sólido
  - Densidade das partículas
- Ex: grãos, pós, etc..



# DIFUSIVIDADE TÉRMICA

- A difusividade térmica ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) de um material é a razão da sua capacidade de conduzir calor pela sua capacidade de armazená-lo. Proporcional à velocidade com que o material responde a variações de temperatura.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

Thermal Diffusivity for Some Foods

Product	Water (%)	Temperature <sup>a</sup> (°C)	Thermal Diffusivity $\times 10^5$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
<b>Fruits, Vegetables</b>			
Avocado (pulp)	—	24 (0)	1.24
Seed	—	24 (0)	1.29
Whole	—	41 (0)	1.54
Sweet potato	—	35	1.06
	—	55	1.39
	—	70	1.91
Cherries (pulp)	—	30 (0)	1.32
Squash	—	47 (0)	1.71
Strawberries (pulp)	92	5	1.27
Beans (purée)	—	26–122	1.80
Peas (purée)	—	26–128	1.82
String beans (cooked)	—	4–122	1.68
Limes	—	40 (0)	1.07
Apples	85	0–30	1.37
Applesauce	37	5	1.05
	37	65	1.12
	80	5	1.22
	80	65	1.40
	—	26–129	1.67

Thermal Diffusivity for Some Foods

Product	Water (%)	Temperature <sup>a</sup> (°C)	Thermal Diffusivity $\times 10^5$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
Peach	—	27 (4)	1.39
Turnip	—	48 (0)	1.34
Potato			
Pulp	—	25	1.70
Mashed (cooked)	78	5	1.23
Banana (pulp)	76	5	1.18
	76	65	1.42
Grapefruit			
(pulp)	88.8	—	1.27
(albedo)	72.2	—	1.09
Beet	—	14 (60)	1.26
Tomato (pulp)	—	4.26	1.48
<b>Fishes and Meats</b>			
Cod	81	5	1.22
	81	65	1.42
Hipogloso	76	40–65	1.47
Salted meat	65	5	1.32
	65	65	1.18
Ham (smoked)	64	5	1.18
	64	40–65	1.38
Beef			
Loin <sup>b</sup>	66	40–65	1.23
Round	71	40–65	1.33
Tongue	68	40–65	1.32
Water	—	30	1.48
	—	65	1.60
Ice	—	0	11.82

# EQUAÇÕES PARA PREDIÇÃO



## Equations for Calculating Thermal Properties

Thermal Property	Component	Equation as a Function of Temperature
$k$ (W/m·°C)	Carbohydrate	$k = 0.20141 + 1.3874 \times 10^{-3} T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2$
	Ash	$k = 0.32962 + 1.4011 \times 10^{-3} T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2$
	Fiber	$k = 0.18331 + 1.2497 \times 10^{-3} T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2$
	Fat	$k = 0.18071 + 2.7604 \times 10^{-3} T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2$
	Protein	$k = 0.17881 + 1.1958 \times 10^{-3} T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2$
$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Carbohydrate	$\alpha = 8.0842 \times 10^{-2} + 5.3052 \times 10^{-4} T - 2.3218 \times 10^{-6} T^2$
	Ash	$\alpha = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4} T - 1.2244 \times 10^{-6} T^2$
	Fiber	$\alpha = 7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4} T - 2.2202 \times 10^{-6} T^2$
	Fat	$\alpha = 9.8777 \times 10^{-2} + 1.2569 \times 10^{-4} T - 3.8286 \times 10^{-8} T^2$
	Protein	$\alpha = 6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4} T - 1.4646 \times 10^{-6} T^2$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Carbohydrate	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 0.31046 T$
	Ash	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 0.28063 T$
	Fiber	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 0.36589 T$
	Fat	$\rho = 9.2559 \times 10^2 - 0.41757 T$
	Protein	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 0.51840 T$
$\hat{C}_p$ (kJ/kg·°C)	Carbohydrate	$\hat{C}_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3} T - 5.9399 \times 10^{-6} T^2$
	Ash	$\hat{C}_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3} T - 3.6817 \times 10^{-6} T^2$
	Fiber	$\hat{C}_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3} T - 4.6509 \times 10^{-6} T^2$
	Fat	$\hat{C}_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3} T - 4.8008 \times 10^{-6} T^2$
	Protein	$\hat{C}_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3} T - 1.3129 \times 10^{-6} T^2$

Source: Choi and Okos (1986b).

## Equations to Calculate Thermal Properties of Water and Ice

### Temperature Functions<sup>a</sup>

Water	$k_A = 0.57109 + 1.7625 \times 10^{-3} T - 6.7036 \times 10^{-6} T^2$	(W/m·°C)
	$\alpha_A = [0.13168 + 6.2477 \times 10^{-4} T - 2.4022 \times 10^{-6} T^2] \cdot 10^{-6}$	(m <sup>2</sup> /s)
	$\rho_A = 997.18 + 3.1439 \times 10^{-3} T - 3.7574 \times 10^{-3} T^2$	(kg/m <sup>3</sup> )
	$\hat{C}_{PA1} = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3} T + 9.9516 \times 10^{-4} T^2$	(kJ/kg·°C)
	$\hat{C}_{PA2} = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5} T + 5.4731 \times 10^{-6} T^2$	(kJ/kg·°C)
Ice	$k_H = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3} T + 1.0154 \times 10^{-4} T^2$	(W/m·°C)
	$\alpha_H = [1.1756 - 6.0833 \times 10^{-3} T + 9.5037 \times 10^{-5} T^2] \times 10^{-6}$	(m <sup>2</sup> /s)
	$\rho_H = 916.89 - 0.13071 T$	(kg/m <sup>3</sup> )
	$\hat{C}_{PH} = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3} T$	(kJ/kg·°C)

<sup>a</sup>  $\hat{C}_{PA1}$  = For a temperature range between -40 and 0°C.

$\hat{C}_{PA2}$  = For a temperature range between 0 and 150°C.

Source: Choi and Okos (1986b).



# CHOI E OKOS (1986)

Condutividade

$$k = \sum (k_i X_i^v) \quad \text{Em que:}$$

$$X_i^v = \frac{X_i^m}{\rho_i} \cdot \rho$$

Densidade

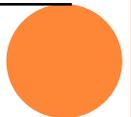
$$\rho = \frac{1}{\sum_i \left( \frac{X_i^m}{\rho_i} \right)}$$

Calor específico

$$\hat{C}_p = \sum_i \left( \hat{C}_{pi} X_i^m \right)$$

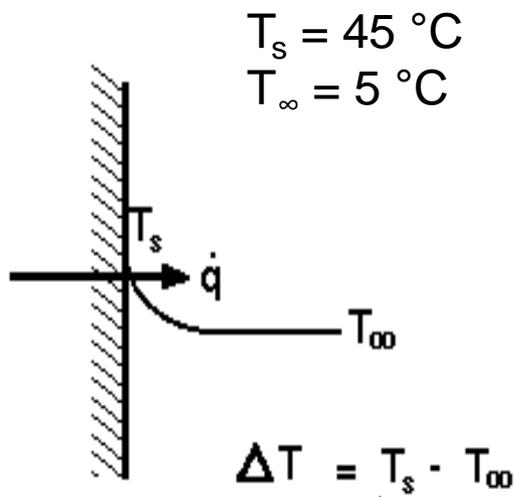
Difusividade térmica

$$\alpha = \sum_i \left( \alpha_i X_i^v \right) \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{k}{\rho \hat{C}_p}$$



# EXEMPLO 1

- Determinar a densidade, condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica para um caldo fermentativo sob aquecimento.



Composição centesimal:  
(Fração mássica)

Água: 77%  
Carboidratos: 19%  
Proteínas: 3%  
Gordura: 0,2%  
Cinzas: 0,8%



# EXEMPLO 1

Component	$\rho_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k_i$ (W/m·°C)	$\hat{C}_{Pi}$ (kJ/kg·°C)	$\alpha_i \times 10^7$ (m <sup>2</sup> /s)
Water	994.91	0.6110	4.1773	1.458
Carbohydrate	1591.34	0.2334	1.5942	0.927
Protein	1316.94	0.2070	2.0376	0.797
Fat	915.15	0.2496	2.0180	1.019
Ash	2416.78	0.3628	1.1375	1.332

Component	$X_i^m$	$X_i^y$
Water	0.77	0.8398
Carbohydrate	0.19	0.1296
Protein	0.03	0.0247
Fat	0.002	0.0024
Ash	0.008	0.0036



## PROBLEMA - RESULTADOS

---

$$k = \sum (k_i X_i^v) = 0.55 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) = 5.5 \times 10^{-4} \text{ kJ}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

---

$$\rho = \frac{1}{\sum_i \left( \frac{X_i^m}{\rho_i} \right)} = 1085 \text{ kg}/\text{m}^3$$

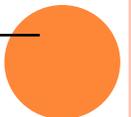
---

$$\hat{C}_p = \sum_i (\hat{C}_{pi} X_i^m) = 3.594 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

---

$$\alpha = \sum_i (\alpha_i X_i^v) = 1.37 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad \longrightarrow \quad \alpha = \frac{k}{\rho \hat{C}_p} = 1.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

---



# TRABALHO: PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

## ENTREGA: MOODLE ATÉ 23H

- Tabela nutricional TACO
- <http://www.unicamp.br/nepa/taco/>
- Escolher um **alimento** e estimar as propriedades termofísicas
- Temperaturas: -50 a 150 °C, a cada 5 °C
- Utilizar EXCEL (considerar ponto congelamento: -5 °C)
- (gráficos: propriedade x temperatura)



# TRABALHO: PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

**ENTREGA: MOODLE ATÉ 14/03 - 8H**

- Escolher um alimento
- Verificar composição centesimal

Ex: Tabela nutricional TACO

<http://www.unicamp.br/nepa/taco/>

- Estimar as propriedades termofísicas
- Temperaturas: -50 a 150 °C, a cada 5 °C
- Utilizar EXCEL (considerar ponto congelamento: -5 °C)

Apresentar gráficos: propriedade x temperatura

- Trabalho extraclasse: até 2 pessoas

