

Perda de calor corporal

Por que razão a perda de calor corporal é importante?

Praticamente todo o metabolismo origina forte produção de calor, porque pouquíssima energia é, em geral, utilizada em trabalho mecânico útil

Se todo o BMR originasse a produção de calor seria

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m_b c} \left(\frac{dQ}{dt} \right) = \frac{\text{BMR}}{m_b c}$$

usando $c=0.83\text{kcal/kg-}^\circ\text{C}$ e a BMR de um homem de 70kg ($1680\text{kcal/dia}=70\text{kcal/h}$)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{70 \text{ kcal/h}}{58 \text{ kcal/}^\circ\text{C}} = 1.2^\circ\text{C/h}$$

A temperatura corporal aumentaria muito rapidamente se não existirem modos efetivos de perda de calor

mesmo com alguma produção de trabalho mecânico pois

$$0,8 \text{ MR} < dQ/dt < \text{MR}$$

O valor normalmente usado de $c=0.83\text{kcal/kg-}^{\circ}\text{C}$ ou 0.83kcal/kg-K é um pouco maior do que o calculado usando o calor específico para cada componente do corpo.

Os valores calculados são:

- $0,798\text{ kcal/kg-K}$ para um homem sem gordura (contendo 72% de água, 22% de proteína e 6% de minerais);
- $0,765\text{ kcal/kg-K}$ para um homem magro (contendo 12% de gordura corporal) e
- $0,652\text{ kcal/kg-K}$ para um homem obeso (contendo 50% de gordura corporal)

Table 6.36. Thermophysical characteristics of body tissues and organs and ot materials. (Using data from [308])

organ or tissue	thermal conductivity K (W/m-K)	specific heat c_v (MJ/m ³ -K)	density (approximate) ρ (kg/m ³)
skin – very warm	2.80	3.77	1,000
skin – normal hand	0.960	3.77	1,000
skin – cold	0.335	3.77	1,000
subcutaneous pure fat	0.190	1.96	850
muscle – living	0.642	3.94	1,050
muscle – excised, fresh	0.545	3.64	1,050
bone – average	1.16	2.39	1,500
bone – compact	2.28	2.70	1,790
bone – trabecular	0.582	2.07	1,250
blood – water at 310 K	0.623	4.19	993
blood – plasma (Hct = 0%) at 310 K	0.599	4.05	1,025
blood – whole (Hct = 40%)	0.549	3.82	1,050
heart – excised, near fresh	0.586	3.94	1,060
liver – excised, near fresh	0.565	3.78	1,050
kidney – excised, near fresh	0.544	4.08	1,050
abdomen core	0.544	3.89	1,050
brain – excised, near fresh	0.528	3.86	1,050
brain – living	0.805	–	–
lung – excised, bovine	0.282	2.24	603
whole body (average)	–	4.12	1,156

Note that $1\text{ MJ/m}^3\text{-K} = 239\text{ kcal/m}^3\text{-K}$ and $1,000\text{ kg/m}^3 = 1\text{ g/cm}^3$.

Mecanismos de perda de calor

Existem quatro mecanismos de perda de calor:

1. A perda por radiação, também conhecida como radiação do corpo negro, corresponde à radiação térmica emitida por um objeto em equilíbrio térmico com o meio.

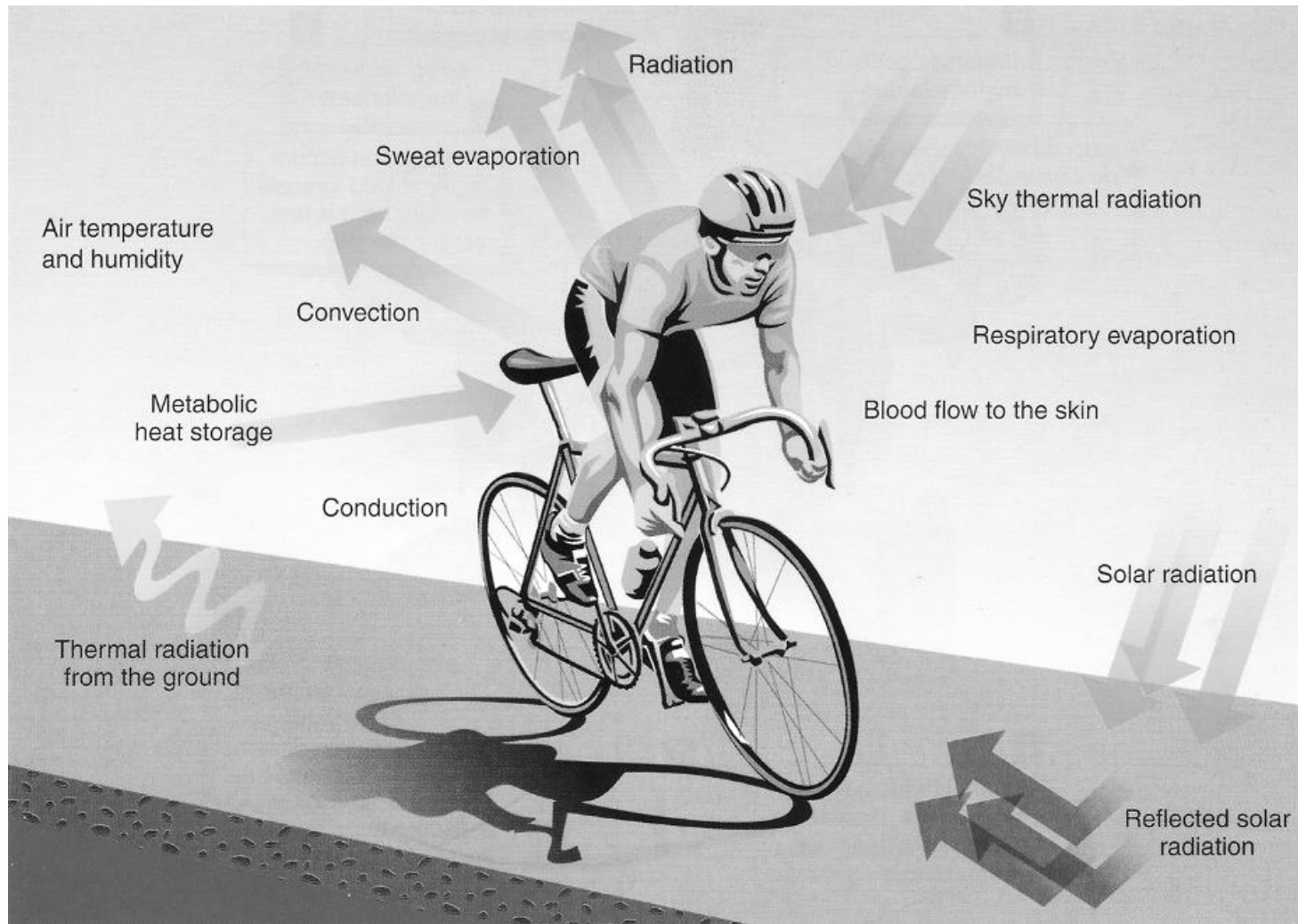
Em repouso, cerca de 54 a 60% da perda de energia ocorre normalmente por radiação térmica.

2. Convecção e condução através do ar e a partir do corpo são responsáveis por 25% da perda de calor.

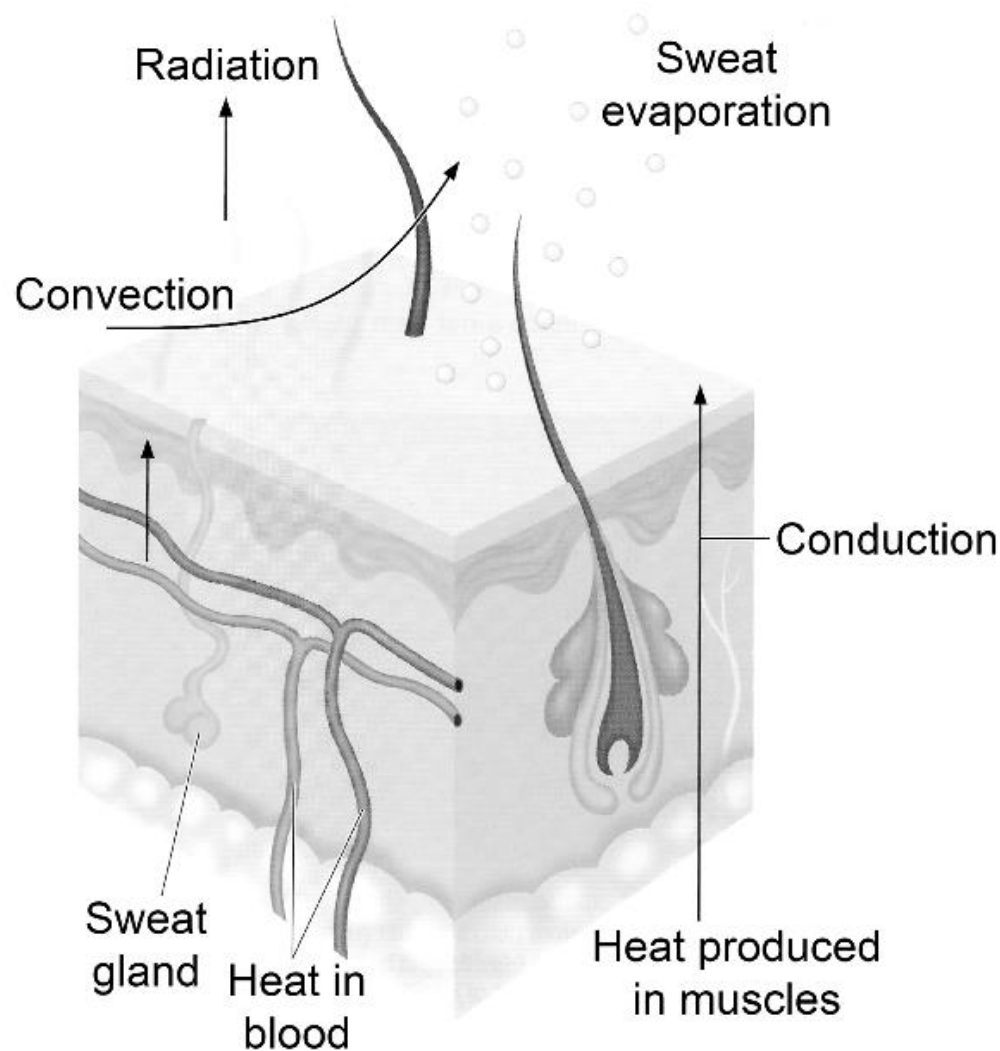
3. A evaporação do suor é responsável por $\pm 7\%$ da perda de calor

4. A evaporação da água pela respiração é responsável por cerca de 14% da perda de calor.

A magnitude absoluta e importância relativa dos 4 mecanismos de perda de calor dependem das roupas usadas, do ambiente, da envolvente, etc.



Modos corporais gerais de perda de calor e ganho não metabólico de energia



Visão microscópica dos modos de perda de calor através da pele.

Quando a temperatura da pele excede a temperatura ambiente, o calor é removido por evaporação do suor.

A pele é aquecida pelo sangue arterial e por condução térmica através do tecido subcutâneo (abaixo da pele).

Durante atividades muito intensas, a perda de calor aumenta do valor de repouso de $\sim 1,5$ para ~ 15 kcal/min:

- a quantidade devido à radiação permanece aproximadamente a mesma, 0,8kcal/min, mas diminui para cerca de 5% do total.
- a perda de condução e convecção aumenta de $\sim 0,3$ para $\sim 2,2$ kcal/min passando a representar cerca de 15% da perda total.
- as perdas devido à evaporação do suor aumentam de $\sim 0,3$ para 12,0 mL /min e constituem cerca de 80% da perda de calor.

Os funcionamentos destes mecanismos de perda de calor são totalmente determinados pela leis da física;

As magnitudes absolutas das perdas de calor podem ser modificadas por processos biológicos.

Ao modelizar as perdas de calor, as pessoas são geralmente consideradas como cilindros verticais, enquanto os animais de quatro patas são aproximados por cilindros horizontais.

Um homem típico é então representado como um cilindro com

1,65 m de altura

0,234 m de diâmetro

Considerar-se-á principalmente **perdas de calor em uma dimensão.**

1-Perda de calor por radiação

Os corpos em equilíbrio térmico emitem um fluxo específico de energia por unidade de área de superfície e tempo, dependendo da sua temperatura.

Os corpos também recebem um fluxo de radiação térmica do mundo exterior através da sua área superficial e que depende da temperatura ambiente.

$$I(\lambda, T) d\lambda = \frac{2hc^2\epsilon/\lambda^5}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1} d\lambda \quad \text{(distribuição de corpo negro obtida por Plank)}$$

em que ϵ é a emissividade

$I(\lambda, T)d\lambda$ é a intensidade da radiação, por unidade de comprimento de onda, cobrindo a gama de λ a $\lambda + d\lambda$

a intensidade é medida em energia/(área×tempo) - fluxo de energia

$$\lambda_{\text{peak}}(\text{in } \mu\text{m}) = \frac{2,898}{T(\text{in K})} \quad \text{localização do máximo do pico, lei de Wein}$$

↓

- a radiação térmica de uma pessoa ou a parede interna de uma casa atinge um pico de 10 μm (luz infravermelha média) porque $T \approx 300 \text{ K}$

- a radiação térmica do sol atinge um pico próximo de 0,6 μm (600 nm, luz visível) porque a temperatura do sol é de $\sim 5000 \text{ K}$.

O fluxo total de energia por unidade de área e tempo (o fluxo de energia) é determinado pela integração da distribuição de Plank, chegando-se á lei de Stefan:

$$R = \epsilon \sigma T^4 \quad \sigma \text{ é a constante de Stefan–Boltzmann } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

À temperatura da pele (34 °C), a emissão térmica é de 505W/m² para $\epsilon = 1$

A radiação incidente num objeto pode ser
refletida
absorvida
ou transmitida por ele

A emissividade, ϵ , é a fração de energia incidente no objeto que é absorvida.

Para um corpo preto perfeito, é $\epsilon=1$. A maioria dos objetos tem uma emissividade um pouco menor por causa da reflexão e transmissão, e uma emissividade que na realidade varia com o comprimento de onda (e às vezes com a temperatura)

Tabela 6.38 Emissividades no infravermelho	
fresh snow	0.89
ice	0.96
dry or wet sand	0.89
concrete	0.95
moist soil	0.97
grass surface	0.96
red brick	0.92
wood	0.90
white paint	0.93
aluminized paint	0.55
galvanized iron	0.28
aluminum foil	0.08
human skin	0.95–0.99

A emissividade no infravermelho da roupa e da pele humana é geralmente considerada como 0,95

A perda de energia por unidade de tempo devido à radiação térmica do corpo é

(dQ / dt < 0 significa que o corpo perde energia e fica mais frio)

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\text{loss}} = RA = \epsilon_{\text{skin}} \sigma T_{\text{skin}}^4 A_{\text{skin}}$$

Supondo

$$\epsilon_{\text{skin}} = 1$$

$$T_{\text{skin}} = 307\text{K} (34^\circ\text{C})$$

A área superfície corporal média é $A_{\text{skin}} \approx 1.85\text{m}^2$

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_{\text{skin}} = 1 \\ T_{\text{skin}} = 307\text{K} (34^\circ\text{C}) \\ A_{\text{skin}} \approx 1.85\text{m}^2 \end{array} \right\} -\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\text{loss}} = 932\text{ W}$$

somente esse arrefecimento radiativo poderia esfriar o corpo a uma taxa de 14°C/h

$$\left(\frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{m_b c} = (932\text{ J s}^{-1}) / (58\text{ kcal } ^\circ\text{C}^{-1}) = 802\text{ kcal h}^{-1} / 58\text{ kcal } ^\circ\text{C}^{-1} ; m_b = 70\text{kg } c = 0,83\text{ cal g}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1} \right)$$

Felizmente, essa perda de calor é compensada por ganhos de calor:

o corpo recebe radiação térmica do exterior

i) Recebendo radiação térmica dentro de casa

Em geral, a perda resultante de calor radiativo é

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right)_r = \epsilon_{\text{skin}} \sigma T_{\text{skin}}^4 A_{\text{skin}} - \epsilon_{\text{room}} \sigma T_{\text{room}}^4 A_{\text{room}}$$

No entanto, apenas parte da radiação emitida pelo compartimento da sala atinge a pessoa - a maioria atinge outras partes do compartimento e isso diminui o ganho térmico do corpo. Pode chegar-se a que

$$(\epsilon_{\text{room}} A_{\text{room}})_{\text{effective}} = \frac{\epsilon_{\text{skin}} A_{\text{skin}}}{1 + (A_{\text{skin}}/A_{\text{room}})(\epsilon_{\text{skin}}/\epsilon_{\text{room}} - 1)}$$

quando $A_{\text{room}} \gg A_{\text{skin}}$ a expressão aproxima-se de $\epsilon_{\text{skin}} A_{\text{skin}}$

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right)_r = \epsilon_{\text{skin}} \sigma (T_{\text{skin}}^4 - T_{\text{room}}^4) A_{\text{skin}} = 932\text{W} - 816\text{W} = 116\text{W se } T_{\text{room}} = 297\text{K} (24^\circ\text{C})$$

consistente com a taxa metabólica usual do corpo, 82W

a linearização desta expressão permite chegar a

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right)_r = h_r A_{\text{skin}} (T_{\text{skin}} - T_{\text{room}})$$

$$h_r = \sigma \epsilon_{\text{skin}} (T_{\text{skin}}^3 + T_{\text{skin}}^2 T_{\text{room}} + T_{\text{skin}} T_{\text{room}}^2 + T_{\text{room}}^3)$$

$$|T_{\text{skin}} - T_{\text{room}}| \ll T_{\text{skin}} \Rightarrow h_r \cong 4\epsilon_{\text{skin}} \sigma T_{\text{skin}}^3 = 5.6\epsilon_{\text{skin}} \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} (T_{\text{skin}} = 34^\circ\text{C})$$

Perda de calor por convecção e condução

Convecção é o transporte de calor através do fluxo de massa do meio.

Condução é o transporte de calor através de um meio sem fluxo de massa (envolvendo eléctrons, vibrações, movimento molecular local, etc.).

Em gases e líquidos, ambos os mecanismos podem contribuir.

A convecção é a maior das duas e nem sempre é fácil diferenciar as duas.

Nos sólidos, apenas a condução contribui.

ii) Convecção

O fluxo de calor por convecção consiste

- na convecção forçada (correntes de ar)

- na convecção natural ou livre

(devido ao movimento próximo ao corpo induzido pela expansão térmica causada por gradientes de temperatura).

Na forma mais geral, o coeficiente de transferência de calor por unidade de área (em W/m²°C) é:

$$h_{\text{c-forced convection}} = \frac{akw^n}{v^n L^{1-n}}$$

w é a velocidade do vento em m/s,

L é a dimensão característica do objeto em m (diâmetro do cilindro em alguns modelos)

u é a viscosidade cinemática do ar em m²/s

a, k, e n são parâmetros.

A perda de calor por **convecção forçada** por unidade de área A (em W/m²) é então:

$$-\frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_c = h_{\text{c-forced convection}} (T_{\text{skin}} - T_{\text{air}})$$

A perda de calor por **convecção natural** por unidade de área A (em W/m²) de um homem de altura L (em m) é dado por

$$-\frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_{\text{c-natural convection}} = \frac{1.69}{L^{0.25}} (T_{\text{skin}} - T_{\text{air}})^{1.25}$$

Geralmente, apenas a maior de entre a convecção forçada ou natural é considerada na análise e é modelizada na forma

$$-\frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_c = h_c (T_{\text{skin}} - T_{\text{air}})$$

h_c é o coeficiente de transferência de calor através da convecção, por unidade de área

T_{air} é a temperatura do ar na proximidade da pessoa e, usualmente, é a mesma que T_{room}

Com $T_{\text{room}} = T_{\text{air}}$ o fluxo total de calor devido à radiação e à convecção é dado por:

$$-\frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_{\text{total}} = -\frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_r - \frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_c = (h_r + h_c)(T_{\text{skin}} - T_{\text{room}})$$

Com ar parado e roupas normais, $h_c \sim 2,3 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$,

é menor que h_r

(o coeficiente de transferência de calor por radiação; $5,6 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$)

O coeficiente h_c diminui com roupa mais pesada

aumenta com menos roupa e mais leve

(quando se está nu, fica-se frio mais rápido por causa do aumento de h_c)

O coeficiente h_c aumenta com a velocidade do ar

Table 6.42. The convective heat transfer coefficient (h_c) and air insulation [$1/(h_c + h_r)$] of the skin–air interface for a naked man. (Using data from [298])

wind speed (m/s)	convective heat transfer coefficient (W/m ² -°C)	air insulation (m ² -°C/W)
0.1	2.6	0.123
0.2	3.7	0.109
0.4	5.2	0.093
0.6	6.4	0.084
0.8	7.4	0.077
1.0	8.3	0.072
2.0	11.7	0.058
3.0	14.4	0.50
4.0	16.6	0.045
5.0	18.6	0.041

The radiant heat transfer coefficient h_r is 5.5 W/m²-°C.

O corpo “sente” uma temperatura mais fria devido ao vento:

$$T_{wc} = 13.12 + 0.6215T - 11.37w^{0.16} + 0.3965Tw^{0.16}$$

onde w é a velocidade do vento em km/h e T a temperatura em °C

Table 6.43. Wind chill factor temperature, in °C, as a function of wind speed and temperature; the temperature is given in the first row for the 0 km/hr wind speed. (Using the scale revised in 2001 by the US National Weather Service)

wind speed (km/hr)		wind chill factor temperature (°C)				
0	10	0	−10	−20	−30	−40
20	7.4	−5.2	−17.9	−30.5	−43.1	−55.7
40	6.0	−7.4	−20.8	−34.1	−47.5	−60.9
60	5.1	−8.8	−22.6	−36.5	−50.3	−64.2
80	4.4	−9.8	−24.0	−38.2	−52.4	−66.6
100	3.9	−10.6	−25.1	−39.6	−54.1	−68.6

Convecção dentro do corpo

Até aqui tratou-se da convecção de calor do lado de fora do corpo para o ar através da convecção.

Também existe convecção dentro do corpo através do fluxo de sangue.

A temperatura média do corpo mantém-se inalterada

mas a distribuição de temperatura dentro do corpo pode variar

Se o sangue fluir para uma parte do corpo a uma taxa de F_m (massa por unidade de tempo) com uma temperatura T_{blood} e sair (na mesma taxa) com $T_{\text{blood}} + \Delta T_{\text{blood}}$, ele retira calor dessa parte do corpo a uma taxa de:

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\text{blood flow}} = F_m c (\Delta T_{\text{blood}})$$

Portanto, o calor é deixado nessa parte do corpo pelo sangue quando $dQ/dt > 0$ e o sangue fica mais frio, $\Delta T_{\text{blood}} < 0$.

A transferência de calor entre o sangue e os tecidos locais ocorre por condução térmica.

Para determinar

$$(dQ/dt)_{\text{blood}} \text{ e } \Delta T_{\text{blood}}$$

teremos de considerar

as taxas de condução térmica entre o sangue nas artérias, capilares e veias
e o tecido circundante

as taxas reais de fluxo de sangue em cada um desses vasos

Se o fluxo sanguíneo for muito rápido, pode não haver tempo suficiente para que ocorra o fluxo de calor

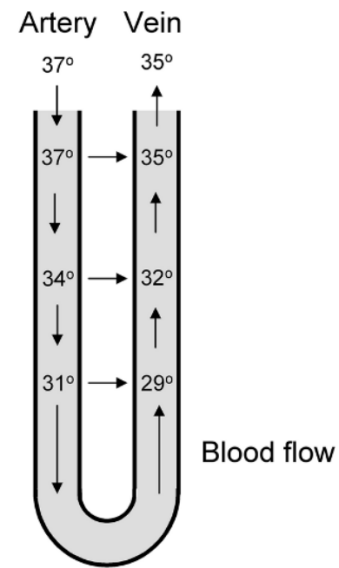
Se as artérias que fluem para uma parte do corpo, como mãos ou pés, são fisicamente afastadas das veias que devolvem o sangue ao coração, há uma transferência mínima de calor das artérias para as veias.

Se as artérias e as veias estiverem muito próximas, pode ocorrer transferência substancial de calor :

- do sangue mais quente que flui nas artérias
- para o sangue mais frio que flui nas veias.

(O sangue venoso é mais frio devido à perda de calor nos tecidos locais, que pode ser muito mais frio que no centro do corpo.)

Este fenómeno chama-se de **troca de calor em contracorrente**

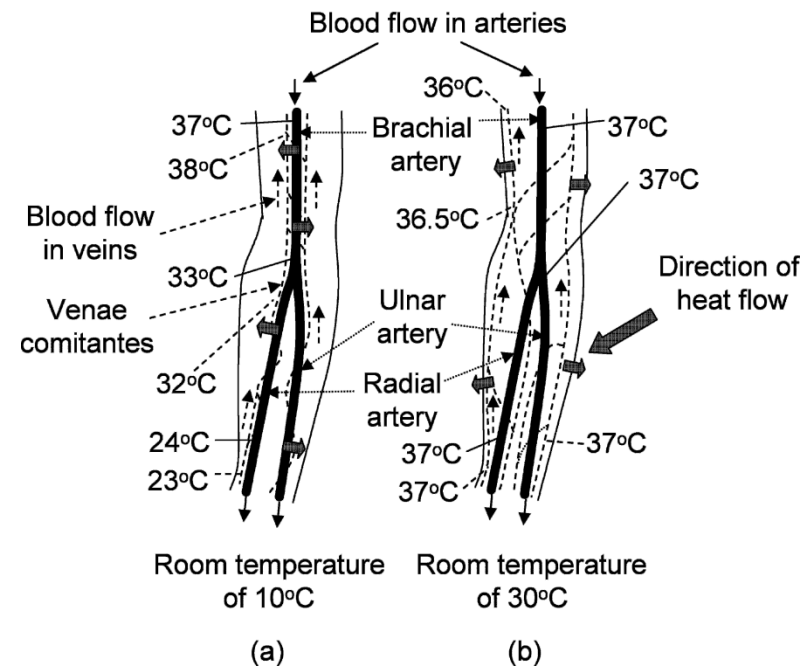


O corpo pode decidir se deve minimizar a perda de calor:

- utilizando veias profundas e/ou
- usando o fluxo de calor em contracorrente

ou maximizar a perda de calor:

- utilizando veias mais superficiais e/ou
- minimizando o fluxo de calor em contracorrente



Se estiver frio na superfície do corpo, o sangue retornará ao coração através de veias muito próximas das artérias; portanto, a perda de calor é minimizada pela troca de calor em contracorrente.

Como isso minimiza o aquecimento das mãos, pode-se senti-las como excessivamente frias.

Se estiver quente, o fluxo sanguíneo ocorre próximo à superfície sendo a transferência de calor e o arrefecimento maximizados.

O sangue é direccionado para essas veias "internas" ou "externas" através dos músculos vasodilatadores e vasoconstritores que circundam as veias apropriadas (para dilatá-las e contraí-las, respectivamente), conforme determinado pelo sistema de detecção e controlo de temperatura existente no organismo.

Condução de calor

$$-\frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right) = K \frac{dT}{dx} \sim K \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$-\frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right) = h_t \Delta T \quad h_t = K / d$$

Quanto calor uma pessoa perde quando coloca a mão e o antebraço em água muito fria (4 °C) por 2 minutos ?

-A mão e antebraço podem ser modelizados como um cilindro com um comprimento de $L = 30$ cm e um raio médio de 3 cm

-Suponhamos que o corpo tenha uma camada de gordura $\Delta r = 3$ mm de espessura com condutividade térmica $K = 0,2$ W/m°C que separa o núcleo cilíndrico (de raio $r=2,7$ cm, a 37°C) da água fria.

-A área de contato entre o braço e a água é $A = 2\pi rL$ e a taxa de calor que deixa o braço é $(2\pi rL) (K \Delta T) / (r \ln (1 + \Delta r / r)) \sim (2\pi rLK \Delta T) / (\Delta r)$.

(para cilindros basta substituir Δx por $r \ln (1 + \Delta r / r)$)

- A expressão exata fornece 118 W, enquanto a aproximação fornece 112 W.

- Em 2 minutos, o corpo perde $(118 \text{ W}) (120 \text{ s}) = 14.200 \text{ J}$ ou 3,4 kcal

O isolamento I pode ser formalmente definido como $I = 1 / h_t = d / K$

Os valores típicos de isolamento são apresentados na Tabela 6.44

Table 6.44. The insulation from animal coats, fabrics, body componer materials, in units of $\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}/\text{W}$ per cm of insulation. (Using data fro also see [302])

material	insulation per cm
cattle coat	0.07–0.10
sheep coat	0.13–0.24
husky dog coat	0.24
pig coat	0.04
wool	0.29
goose down	0.38
human clothing (average)	0.25
air	0.36/0.39
muscle, bone	0.01/0.024
body fat	0.01/0.05
water	0.01/0.017
ice	0.01/0.004
typical wood ^a	0.01/0.062

$h_t = 1/(\text{insulation per cm} \times \text{the thickness in cm})$.

$K = 1/(\text{insulation per cm})$ (multiplicado por 0.01 quando expresso em $\text{W}/\text{m-}^\circ\text{C}$).

Perda de calor por evaporação da água: transpiração e respiração

A quantidade de calor necessária para evaporar 1 litro de água é de 540 kcal; este é o calor da vaporização..

Quando suamos, só há perda de calor se a água evaporar
(Limpar o suor elimina este processo de arrefecimento)

Este mecanismo normalmente representa uma perda de ± 7 kcal / h

Normalmente, respiramos um ar mais frio que a temperatura corporal. Esse ar aquece e depois é expelido: essa também é uma fonte de arrefecimento do corpo.

Adicionalmente, respiramos ar relativamente seco e expelimos ar saturado com vapor de água.

Como esse vapor de água é formado pela evaporação da água líquida, essa é mais uma fonte de arrefecimento.

A perda de calor nos pulmões através da respiração pode ser descrita por

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right)_1 = \rho_{\text{air}} c_{p, \text{air}} (T_{\text{exp}} - T_{\text{insp}}) \frac{dV_{\text{air}}}{dt}$$

$$+ \Delta H_{\text{evap, water}} (\rho_{\text{exp, water}} - \rho_{\text{insp, water}}) \frac{dV_{\text{air}}}{dt}$$

dV/dt é a taxa de inalação do ar e

$\Delta H_{\text{evap, água}}$ é o calor de evaporação da água (0,54 kcal / g)

O primeiro termo é responsável pelo arrefecimento do corpo através do aquecimento do ar inspirado antes da expiração

O segundo termo é responsável pelo arrefecimento do corpo através da evaporação da água nos pulmões, o que aumenta o teor de água do ar inspirado antes da expiração

Quando está quente, por que se sente ainda mais calor que a temperatura ambiente quando o ar está húmido?

A humidade diminui a taxa de perda de calor do corpo:

- diminuindo a evaporação do suor (porque diminui a diferença entre a pressão de vapor junto ao suor e no ar)
- diminuindo a taxa de perda respiratória de calor devido ao último termo da equação anterior

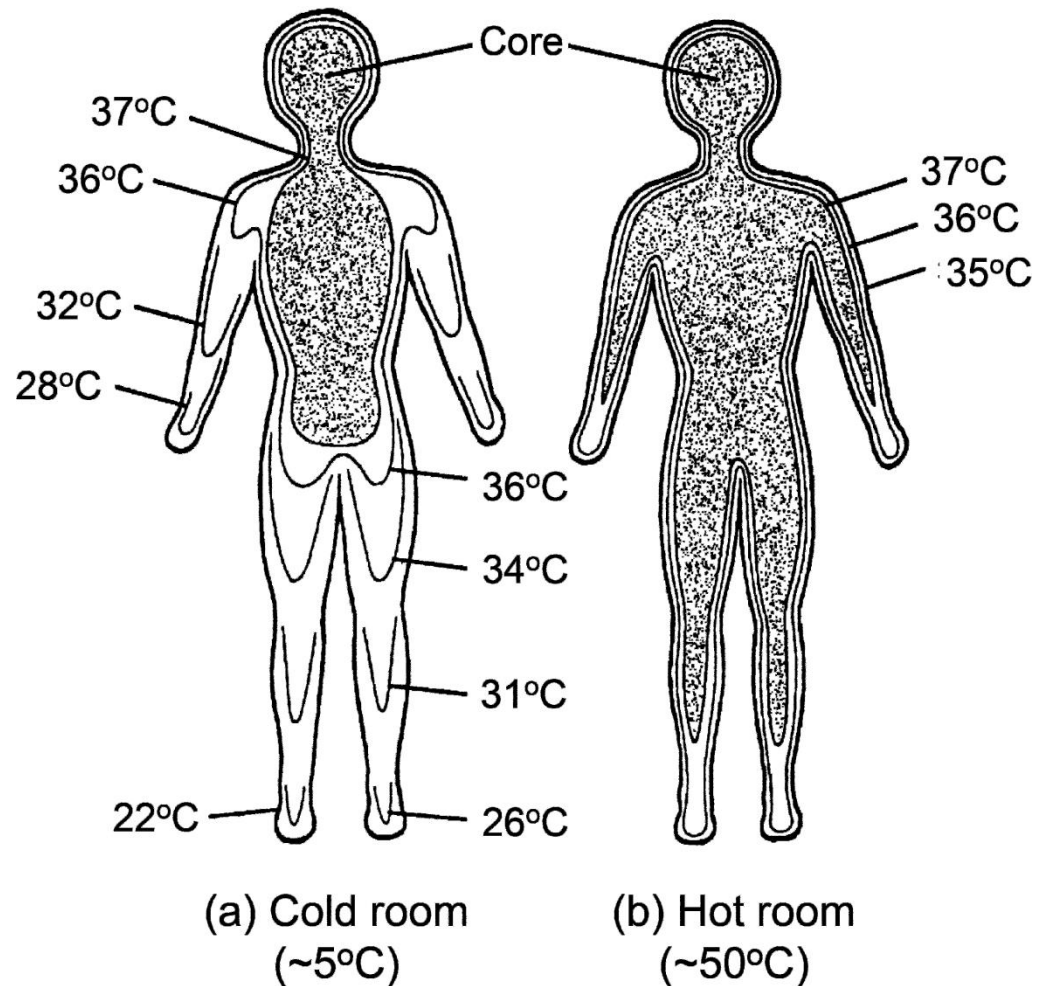
O índice de calor descreve o calor que realmente se sente a uma determinada temperatura e humidade

Por exemplo, quando a temperatura é de 32 °C, parece que é de 35 °C quando a humidade relativa é de 50%, 43 °C quando é de 75% e 56 °C quando é de 100%.

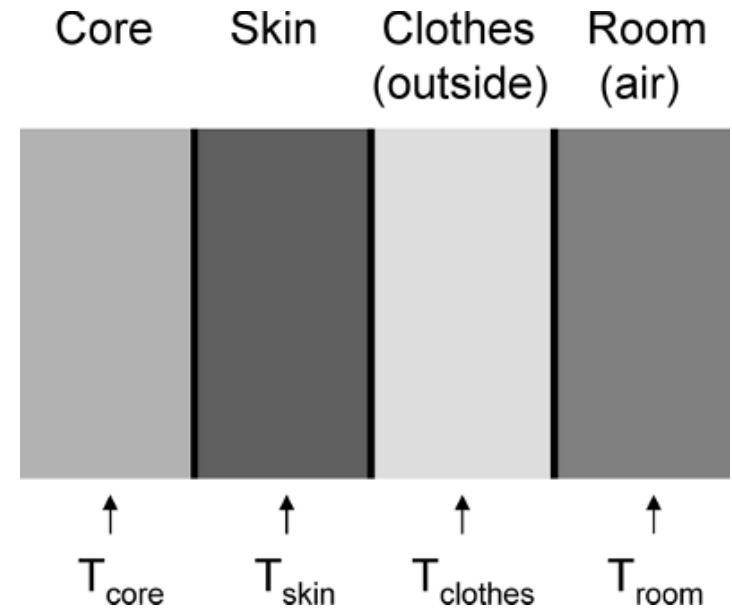
A temperatura ao longo do corpo varia com a temperatura ambiente.

Essas variações podem ser muito grandes em uma sala fria.

Essas distribuições internas podem ser modelizadas usando as propriedades térmicas do corpo (Tabela 6.36) e os modelos de transporte térmico apresentados atrás.



Vamos relacionar as temperaturas corporal central, T_{core} , na pele, T_{skin} , na parte externa de nossas roupas, T_{clothes} e no ar, T_{room} .



Modelo de fluxo de calor do centro do corpo para o ar (modelos mais refinados considerariam o corpo como um cilindro)

podemos modelizar o fluxo de calor entre duas dessas regiões adjacentes por

$$(T_1 - T_2) = -I_{12} \frac{1}{A} \left(\frac{dQ}{dt} \right) \qquad I_{12} = \frac{1}{\sum h_{x,12}}$$

dQ / dt é o fluxo de calor através de uma área de seção reta, A , entre as regiões 1 e 2;

I_{12} é o isolamento entre essas regiões;

$h_{x,12}$ são os coeficientes de transferência de calor relevantes entre as duas regiões, como os causados por radiação, convecção, condução e evaporação

Assim, a diferença entre a temperatura do centro do corpo e a da pele é determinada pelo fluxo de calor do centro para a pele e pelo isolamento do tecido.

$$T_{\text{core}} - T_{\text{skin}} = -\frac{I_t}{A} \left[\left(\frac{dQ}{dt} \right)_r + \left(\frac{dQ}{dt} \right)_c + \left(\frac{dQ}{dt} \right)_v \right]$$

$(dQ/dt)_r$ fluxo de perda de calor radiativa

$(dQ/dt)_c$ fluxo de perda de calor por convecção/condução

$(dQ/dt)_v$ fluxo de perda de calor por vaporização de humidade na superfície da pele

(A perda de calor a partir dos pulmões e das passagens respiratórias não está incluída)

O isolamento fornecido pelo tecido humano tem um valor máximo de $0,10^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ em adultos para temperaturas frias (abaixo da temperatura crítica) e um valor mínimo de $0,03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ para altas temperaturas.

Nos bebés, esses valores de isolamento são de $0,05^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ e $0,015^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$, respectivamente.

A diferença entre a temperatura na pele e na parte externa da roupa é

$$T_{\text{skin}} - T_{\text{clothes}} = -\frac{I_c}{A} \left[\left(\frac{dQ}{dt} \right)_r + \left(\frac{dQ}{dt} \right)_c \right]$$

onde I_c é o isolamento da roupa (ou do pêlo nos animais).

O isolamento por cm de espessura de roupa é em média de $0,25^\circ\text{Cm}^2/\text{Wcm}$ (Tabela 6.44).

A diferença entre temperatura da parte externa da roupa e a do ar é

$$T_{\text{clothes}} - T_{\text{room}} = -\frac{I_a}{A} \left[\left(\frac{dQ}{dt} \right)_r + \left(\frac{dQ}{dt} \right)_c \right]$$

onde I_a é o isolamento do ar (Tabela 6.42).