

## Condução térmica

### MEDIÇÃO DA CONDUÇÃO TÉRMICA EM HASTES DE METAL.

- Medição do decurso da temperatura ao longo de hastes metálicas aquecidas unilateralmente e esfriadas unilateralmente em estado não estacionário e estacionário.
- Medição do fluxo de calor no estado estacionário..
- Determinação da condutibilidade térmica do material da haste.

UE2020100

11/15 UD

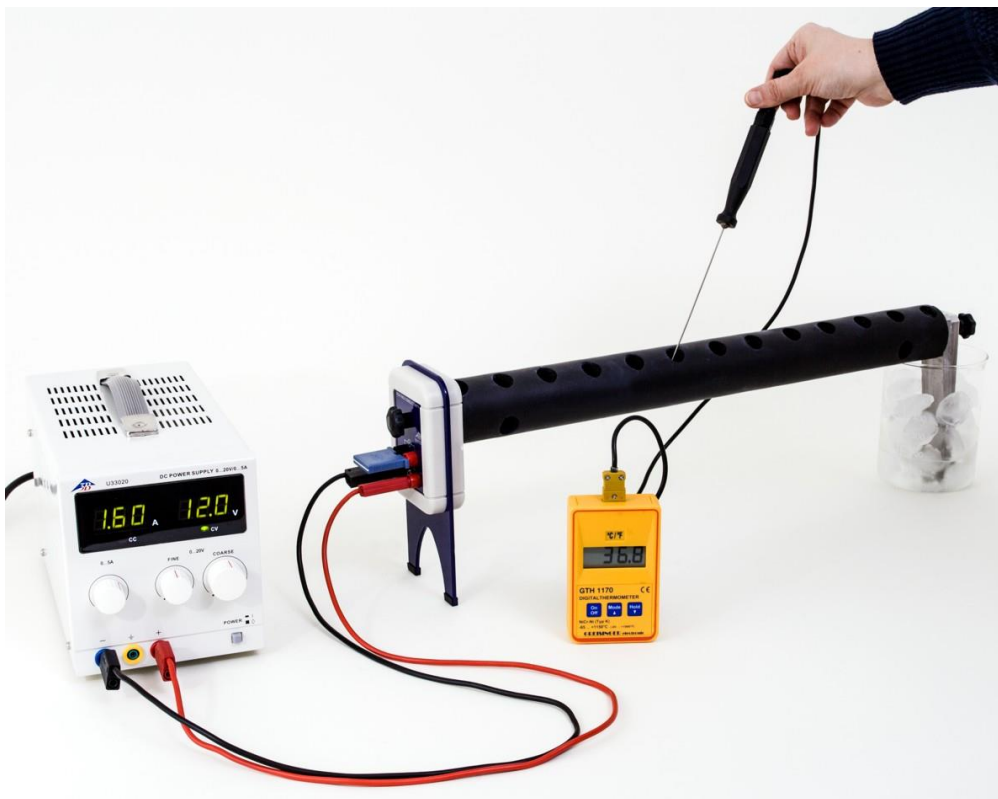


Fig. 1: Disposição de medição.

### FUNDAMENTOS GERAIS

O calor pode ser transmitido por condução térmica, irradiação térmica e convecção de uma área mais quente para uma mais fria. Na condução térmica, este transporte de energia ocorre pela interação entre átomos ou moléculas avizinados, sem que estes sejam, eles mesmos, transportados. No aquecimento, por exemplo, de uma haste metálica, os átomos oscilam mais

fortemente na extremidade quente, ou seja, com uma energia maior que na extremidade fria. A energia é passada aos átomos avizinados por choques e, assim, conduzida pela haste. Os metais são condutores de calor especialmente bons, pois ainda são adicionados choques entre elétrons e átomos livres.

Em uma haste com área de perfil  $A$ , cujas extremidades são mantidas em temperaturas diferentes, instala-se, depois de algum tempo, um gradiente de temperatura ao longo da haste, de forma que a temperatura  $T$  diminui por igual na direção da extremidade mais fria. Nisto, em um tempo  $dt$ , uma quantidade de calor  $dQ$  flui pelo perfil da haste, e um fluxo constante de calor  $P_Q$  se constitui:

$$(1) P_Q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$P_Q$ : Fluxo de calor (medido em Watt)

$A$ : Área do perfil da haste

$\lambda$ : Condutibilidade térmica do material da haste

$T$ : Temperatura

$x$ : Coordenada local ao longo da haste

Antes que o gradiente constante de temperatura seja alcançado, a haste tem, no tempo  $t$ , uma distribuição de temperatura  $T(x,t)$ , que se aproxima gradativamente do estado estacionário. Vale a equação diferencial

$$(2) \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0,$$

$c$ : Calor específico

$\rho$ : Densidade do material da haste

No caso estacionário, vale, em conformidade com a equação (1)

$$(3) \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \text{ e } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}.$$

Na experiência, a haste é aquecida eletricamente em uma extremidade. Uma fonte de calor regulada eletronicamente alimenta a haste condutora térmica com um fluxo de calor, que pode ser determinado como potência elétrica

$$(4) P_{el} = U \cdot I$$

através da medição da tensão de aquecimento  $U$  e da corrente de aquecimento  $I$ . A regulação eletrônica da corrente faz com que a extremidade da haste alcance muito rapidamente uma temperatura de cerca de 90°C, que, então, é mantida constante.

Através das lamelas de esfriamento, o calor é dissipado, na outra extremidade da haste, para água gelada ou simplesmente água em temperatura ambiente. A potência térmica dissipada pode, assim, ser determinada calorimetricamente.

Uma bucha de isolamento reduz a perda de calor da haste condutora térmica para o ambiente e melhora a linearidade do perfil de temperatura no estado estacionário. Com um termômetro eletrônico com velocidade de segundos, as temperaturas são medidas nos locais de medição previstos ao longo da haste. Uma haste de cobre e uma haste de alumínio estão à disposição.

## LISTA DE APARELHOS

1 Conjunto de aparelhos condução térmica	U8498290	1017329
1 Haste condutora térmica de Al	U8498292	1017331
1 Haste condutora térmica de Cu	U8498291	1017330
1 Fonte de alimentação DC 0 – 20 V, 0 – 5 A	U33020	1003311/2

1 Termômetro de bolso digital de segundos	U11853	1002803
1 Sensor de imersão NiCr-Ni tipo K, -65–550°C	U11854	1002804
1 Par de cabos de segurança para experiências, 75cm, vermelho/azul	U13816	1017718
1 Conjunto de 10 copos, forma baixa, Recomendação suplementar:	U14210	1002872
2 Multímetros digitais P1035	U11806	1002781
Água gelada		

## MONTAGEM E EXECUÇÃO

### Orientação:

A experiência é realizada, a título de exemplo, com a haste condutora térmica de alumínio.

- Limpar a haste condutora térmica nas áreas de contato e aplicar fina camada de pasta condutora térmica.
- Fixar o módulo de aquecimento, por meio do parafuso de fixação, na haste condutora térmica, posicionar a haste de forma que as perfurações (pontos de medição de temperatura) apontem para cima.
- Colocar a bucha de isolamento sobre a haste condutora térmica e posicionar as fendas da espuma sobre os pontos de medição de temperatura.
- Colocar o par de lamelas na extremidade da haste de forma solta com o parafuso de fixação, posicionar no recipiente de resfriamento (bêquer) e então apertar.
- Encher o bêquer com água gelada e, se necessário, trocar a água no decorrer da experiência.
- Para o fornecimento de energia elétrica, conectar a fonte de alimentação DC através dos conectores. Atentar sempre para a polaridade: vermelho = polo positivo. Contornar o segundo par de conectores por meio do plugue de curto circuito.
- Para a medição da corrente de aquecimento, conectar, ao invés do plugue de curto circuito, um aparelho de medição de corrente no par superior de conectores.
- Para a determinação mais precisa possível da potência elétrica absorvida (produto de tensão e corrente de aquecimento), medir a tensão de aquecimento diretamente no módulo de aquecimento através do par inferior de conectores e não na fonte de alimentação.
- Medir a temperatura com um termômetro eletrônico (sensor com velocidade de segundos com elemento térmico) em intervalos de tempo iguais nos pontos de medição 1 até 13 na haste condutora térmica (Tab. 1). Para tanto, aplicar uma pequena quantidade de pasta condutora térmica nos pontos de medição.
- Realizar várias séries de medição, por exemplo, com um intervalo de tempo de 150 s até atingir o estado estacionário (Tab. 1).

### EXEMPLO DE MEDIÇÃO

Tensão de aquecimento  $U$ : 12 V  
 Corrente de aquecimento  $I$ : 1,6 A

Tab. 1: Pontos de medição  $N$ , distância entre pontos de medição  $x$  e temperaturas  $T$  nos pontos de medição para cinco séries diferentes de medição com intervalo de tempo de 150 s.

$N$	$x / \text{cm}$	$T / ^\circ\text{C}$				
		$t = 0 \text{ s}$	$t = 150 \text{ s}$	$t = 300 \text{ s}$	$t = 350 \text{ s}$	$t = 400 \text{ s}$
1	1	88,7	88,8	90,0	90,0	90,6
2	5	74,0	78,3	81,0	82,0	84,5
3	9	63,6	68,9	72,0	75,0	78,4
4	13	55,3	61,1	64,1	68,0	72,0
5	17	48,8	54,6	57,8	62,0	66,6
6	21	43,9	49,1	52,2	55,9	61,3
7	25	39,6	44,0	46,8	51,0	56,1
8	29	36,2	39,9	42,3	46,5	50,9
9	33	33,5	36,6	38,9	41,9	46,3
10	37	31,5	34,4	36,0	38,0	41,7
11	41	29,6	32,1	33,6	35,2	37,4
12	45	28,8	30,3	31,8	32,0	32,9
13	49	27,6	28,8	29,8	28,3	29,1

### AVALIAÇÃO

- Representar graficamente os valores de medição da Tab. 1 em um diagrama  $T(N)$  (Fig. 2).

Os pontos de medição, com o tempo, aproximam-se de um decurso linear, que reflete a chegada ao estado estacionário.

- Converter as temperaturas da série de medição para  $t = 400 \text{ s}$  da Tab.1 conforme

$$(5) \quad K = ^\circ\text{C} + 273,15 = \frac{(^{\circ}\text{F} + 459,67)}{1,8}$$

para Kelvin, representar graficamente em dependência da distância  $x$  e adaptar uma reta aos pontos de medição (Fig. 3).

Para a inclinação  $k$  da reta, resulta:

$$(6) \quad k = -1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}}$$

A inclinação  $k$  da reta corresponde ao gradiente da temperatura na equação (1):

$$(7) \quad k = \frac{dT}{dx} = -\frac{P_Q}{\lambda \cdot A}$$

Inicialmente, sob a suposição simplificada de que o fluxo térmico  $P_Q$  corresponde à potência elétrica  $P_{el}$ , a condutibilidade térmica  $\lambda$  é determinada. De (7), resulta:

$$(8) \quad \lambda = -\frac{P_Q}{k \cdot A} \approx -\frac{P_{el}}{k \cdot A} = -\frac{12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A}}{-1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}} \cdot 490 \cdot \text{mm}^2} = 306 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

O valor determinado pela medição difere em cerca de 30% do valor de literatura  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

De fato, a corrente térmica  $P_Q$  corresponde à potência elétrica  $P_{el}$  menos uma potência de perda  $P_I$ :

$$(9) \quad P_Q = P_{el} - P_I$$

Então:

$$(10) \quad \lambda = -\frac{P_{el} - P_I}{k \cdot A} \Leftrightarrow P_I = P_{el} + k \cdot \lambda \cdot A$$

Para a potência de perda, resulta, com o valor de literatura  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ :

$$(11) \quad P_I = 12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A} - 1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}} \cdot 236 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 490 \text{ mm}^2 = 4,4 \text{ W}$$

### Orientação para a medição da corrente térmica no estado estacionário:

Se, ao invés de água gelada, for usada água em temperatura ambiente no béquer em recipiente suficientemente isolado termicamente, a corrente térmica  $P_Q$  pode ser determinada calorimetricamente pela quantidade de calor  $dQ$  transmitida para a água em um intervalo de tempo  $dt$ :

$$(12) \quad P_Q = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \{c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot dT\} = c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$c_{H_2O}$ : capacidade térmica específica da água

$m_{H_2O}$ : massa da água

$dT/dt$ : aumento da temperatura da água no tempo  $dt$

O aumento da temperatura da água por tempo determinado pode ser medido diretamente. A condutibilidade térmica  $\lambda$ , considerada a potência de perda, resulta diretamente da equação (7) com a inclinação  $k$  da reta de (6).

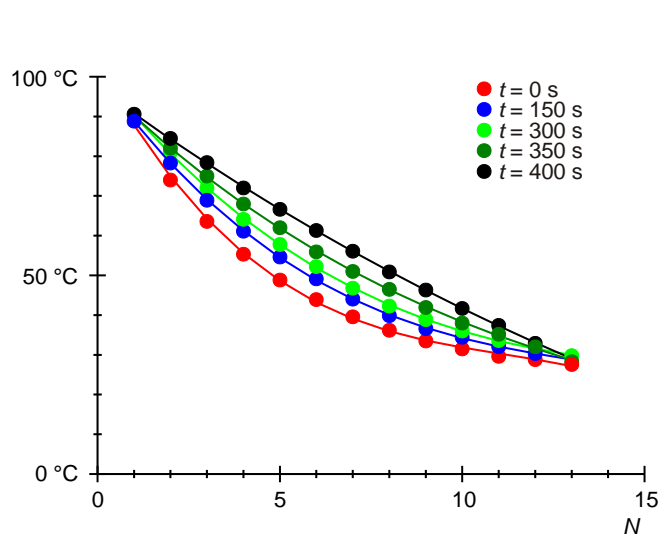


Fig. 2: Temperaturas ao longo da haste de alumínio em cinco seqüências de medição com intervalo de tempo de 150 s.

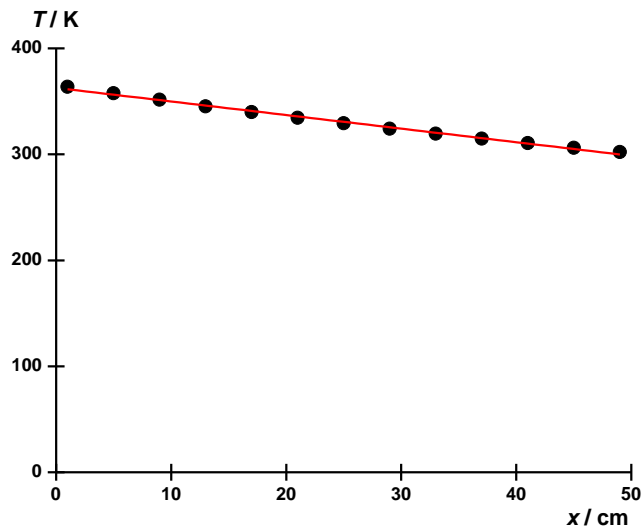


Fig. 3: Temperatura  $T$  em dependência da distância  $x$  dos pontos de medição no estado estacionário.