
EXPERIMENTO 3

RESISTIVIDADE VS. TEMPERATURA



CONDUTIVIDADE (σ) E RESISTIVIDADE (ρ) ELÉTRICA

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu$$

- n – densidade de portadores
- q – carga dos portadores
- μ – mobilidade dos portadores

CONDUTIVIDADE, RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Condutividade

$$\sigma = n \cdot |q| \cdot \mu$$

Resistividade

$$\rho = \frac{1}{n \cdot |q| \cdot \mu}$$

n – densidade de portadores

q – carga dos portadores

μ – mobilidade

Em metais $n_e \sim$ constante

A dependência de ρ com T advém da mobilidade μ_e .

Em semicondutores n_e varia com a temperatura.

$$\mu_{\text{semic}} > \mu_e$$

mas

$$n_e \gg \gg n_{\text{semic}}$$

METAIS

Contribuições

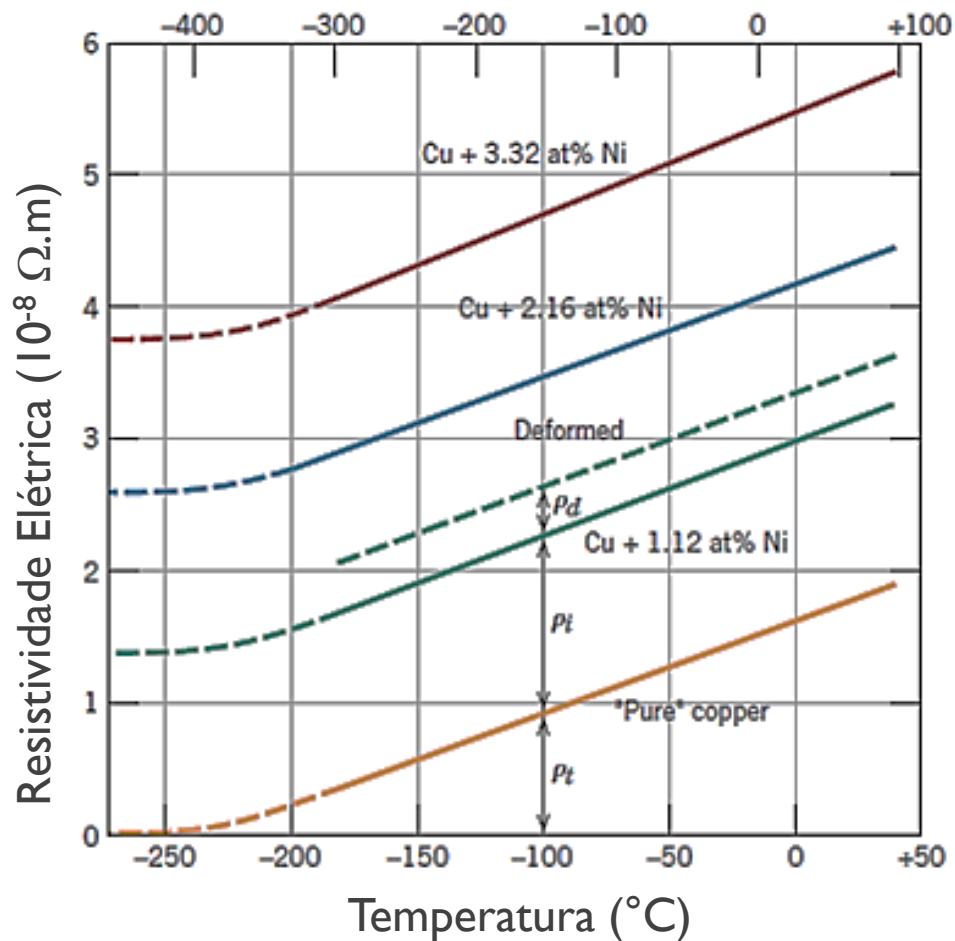
ρ_T – térmica (fônons)

ρ_i – impurezas (ligas e intersticiais)

ρ_d – deformação (discordâncias)

$$\rho_{total} = \rho_i + \rho_d + \rho_T$$

METAIS



$$\rho_{total} = \rho_i + \rho_d + \rho_T$$

ρ_i – efeito devido a presença de defeitos, podendo ser a introdução de elementos de ligas ao metal puro, vacâncias, elementos intersticiais.

ρ_d - efeito devido à deformação – presença de discordância.

ρ_i e ρ_d causam perturbação na periodicidade da rede cristalina.

$$\rho_T = \rho_0(1 + aT) \rightarrow \text{efeito da temperatura } T \text{ em } ^{\circ}C$$

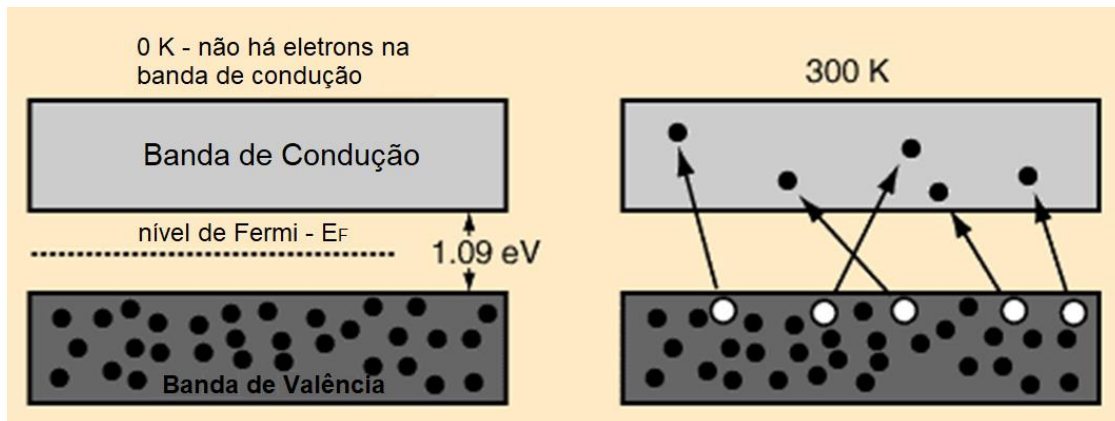
TIPOS DE SEMICONDUCTORES

- Intrínsecos (Si, Ge e compostos estequiométricos 1:1)
- Extrínsecos (intrínsecos dopados)

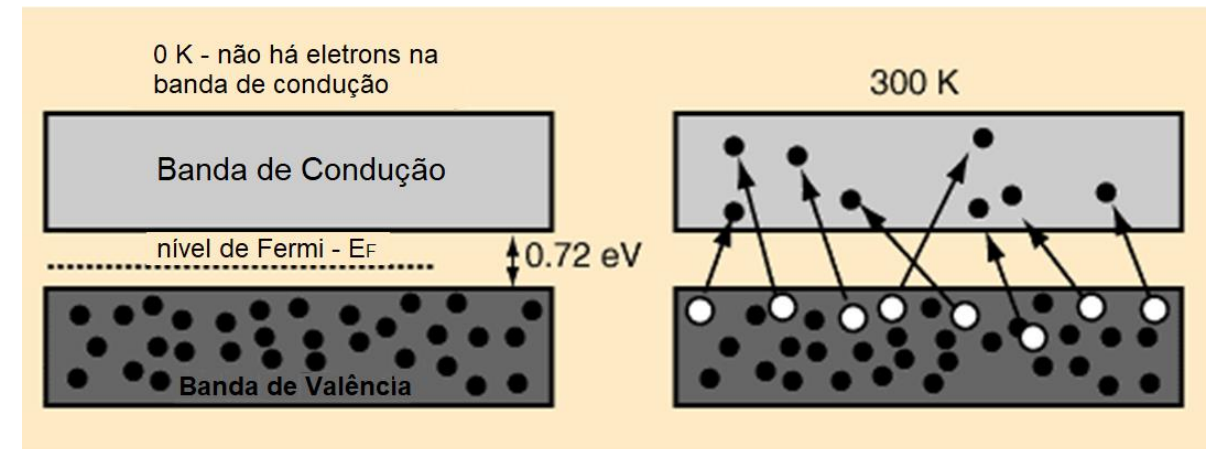
SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

Estruturas de banda

Silício



Germânio



E_F = nível de Fermi; Definição: é o nível de energia que fica no meio entre estado de maior ocupação de elétrons e o estado de nenhuma ocupação de elétrons em 0 K.

CONDUTIVIDADE EM SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS

$$\sigma = n \cdot |q| \cdot \mu \rightarrow \sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = (n_n \cdot |e| \cdot \mu_n) + (n_p \cdot |e| \cdot \mu_p)$$

n - negativos

p - positivos

A condutividade e resistividade em semicondutores é determinada pelo número (densidade) dos portadores de carga.

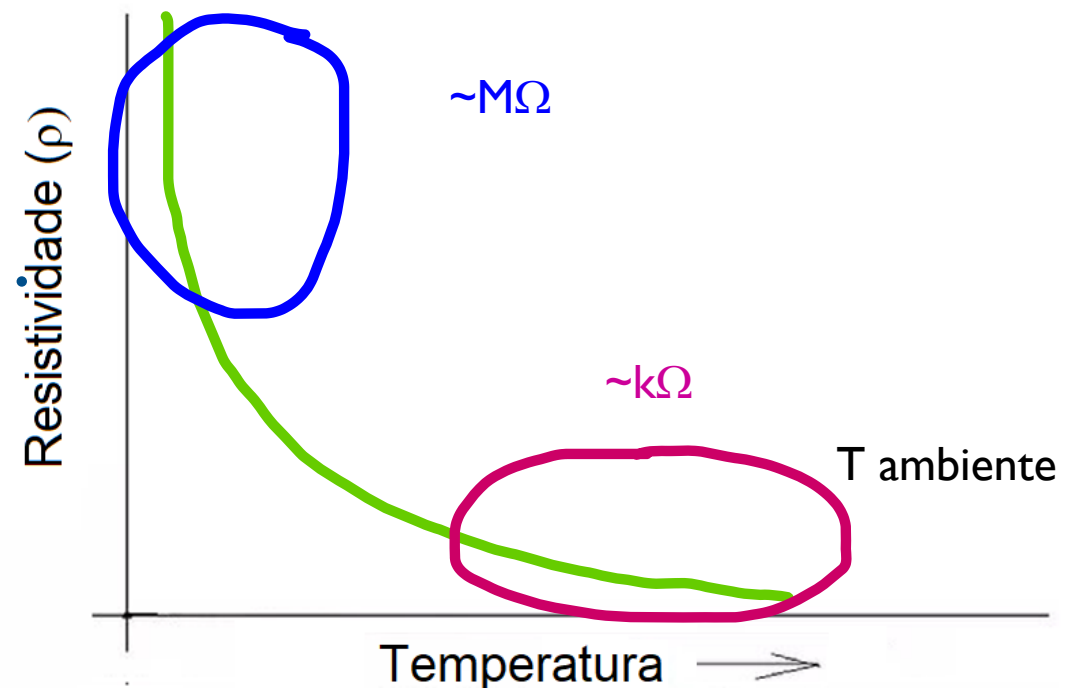
A mobilidade $\mu \sim$ constante com a temperatura.

RESISTIVIDADE EM SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS

Em baixas temperaturas, praticamente não há elétrons na banda de condução e a condutividade é baixa, ou seja a resistividade é muito alta.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \rho_0 \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right)$$

Em temperaturas perto da temperatura ambiente a quantidade de portadores é pequena.



SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

- São semicondutores intrínsecos , Si e Ge dopados com elementos das:

- Colunas 5A (P,As, Sb) - **Tipo-n** – excesso de elétrons

nível extra de doadores (E_d)

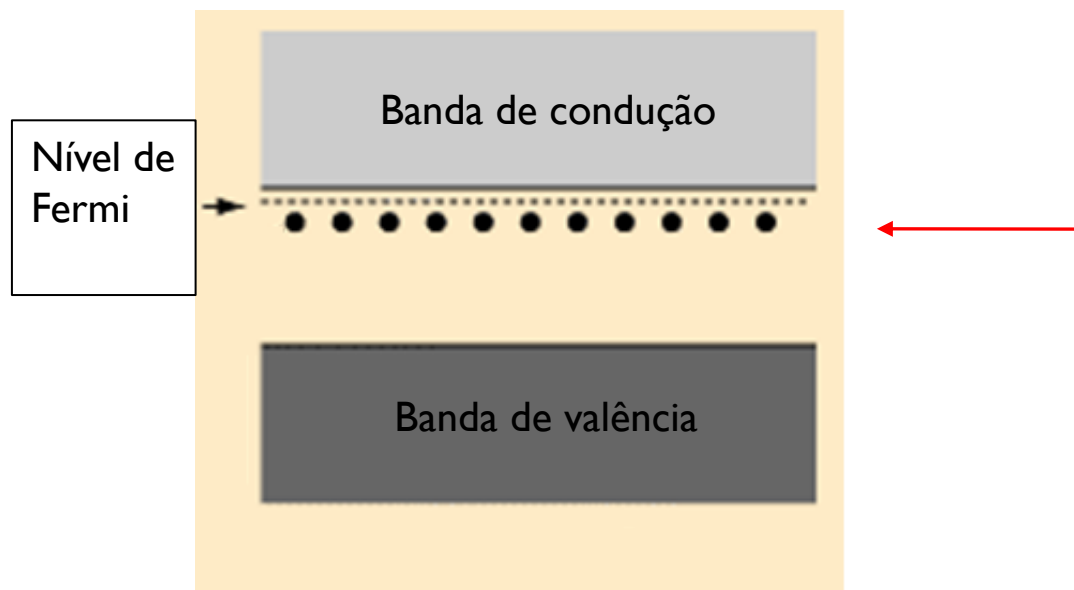
- Colunas 3A (Al,Ga,In) - **Tipo-p** – excesso de buracos

nível extra de aceitadores (E_a)

	2B	3A	4A	5A	6A
		B 10,811	C 12,011	N 14,007	O 15,999
		Al 26,981	Si 28,086	P 30,974	S 32,06
Zn		Ga 69,723	Ge 72,63	As 74,922	Se 78,96
Cd		In 114,818	Sn 118,710	Sb 121,760	Te 127,6
Hg		Tl 204,383	Pb 207,2	Bi 208,980	Po

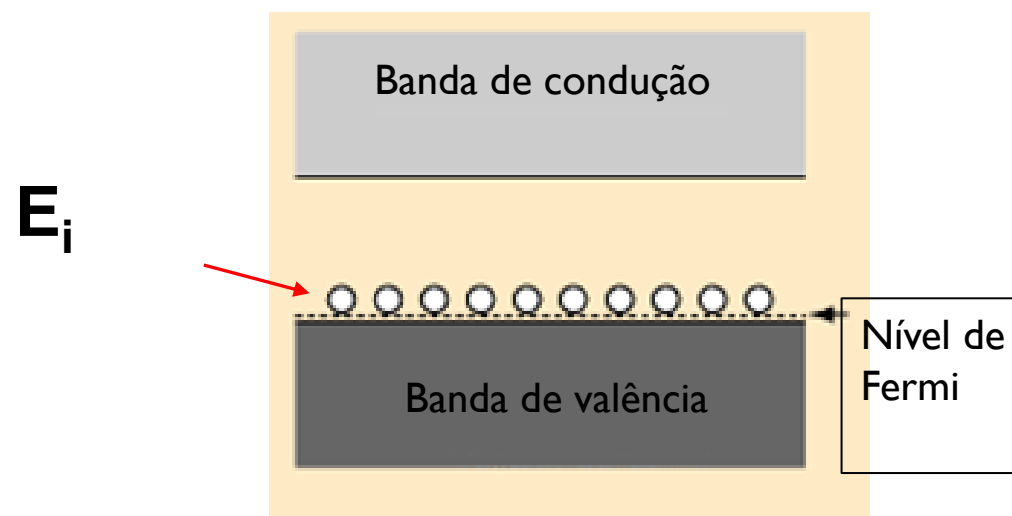
SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

TIPO-N – EXCESSO DE ELÉTRONS



- Nível extra de energia
- Nível de Fermi deslocado para cima

TIPO-P – EXCESSO DE BURACOS



E_i - energia do nível de impureza

CONDUTIVIDADE EM SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS

$$\sigma = n_p \cdot q_p \cdot \mu_p \rightarrow \sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$$

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = n_n |e| \mu_n + n_p |e| \mu_p$$

A condutividade e resistividade em semicondutores extrínsecos é determinada pelo número (densidade) dos portadores de carga advindos das impurezas (dopagem).

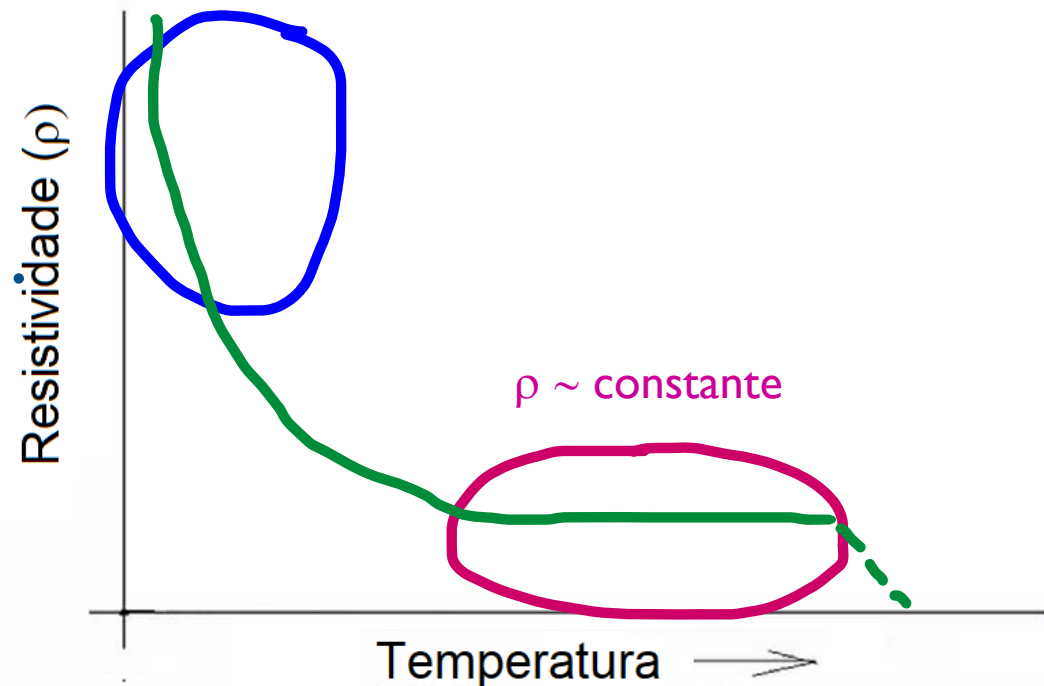
RESISTIVIDADE EM SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS

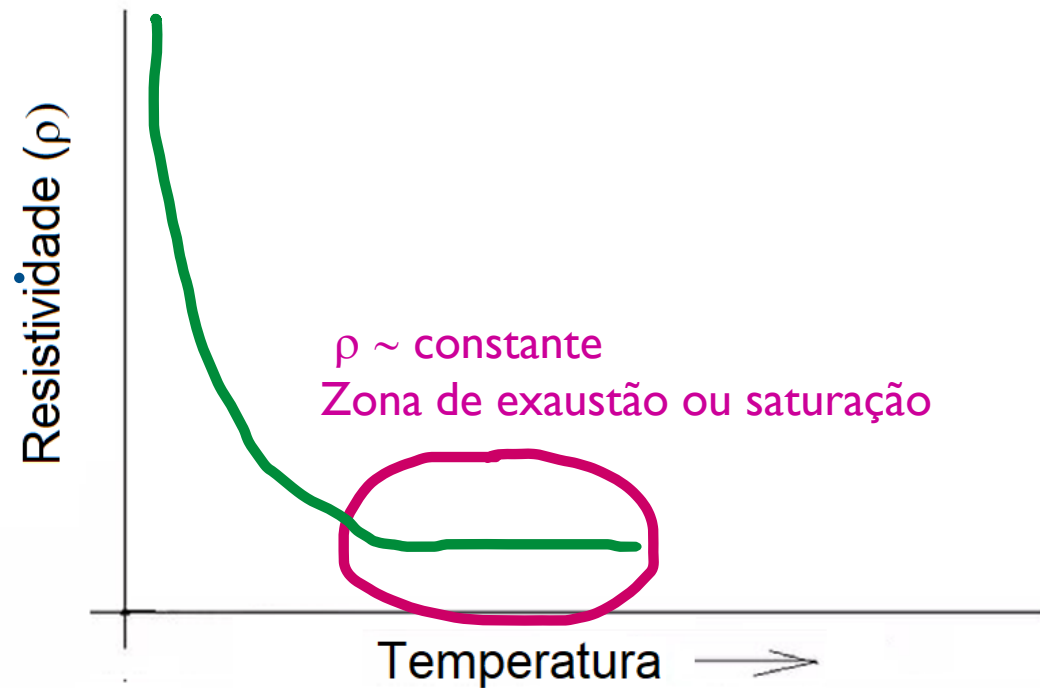
Em baixas temperaturas, a condutividade é baixa, ou seja a resistividade é muito alta.

A medida que a temperatura aumenta, os portadores advindos dos níveis de impurezas passam para a banda de condução/ ou esvaziam a banda de valência e a resistividade diminui.

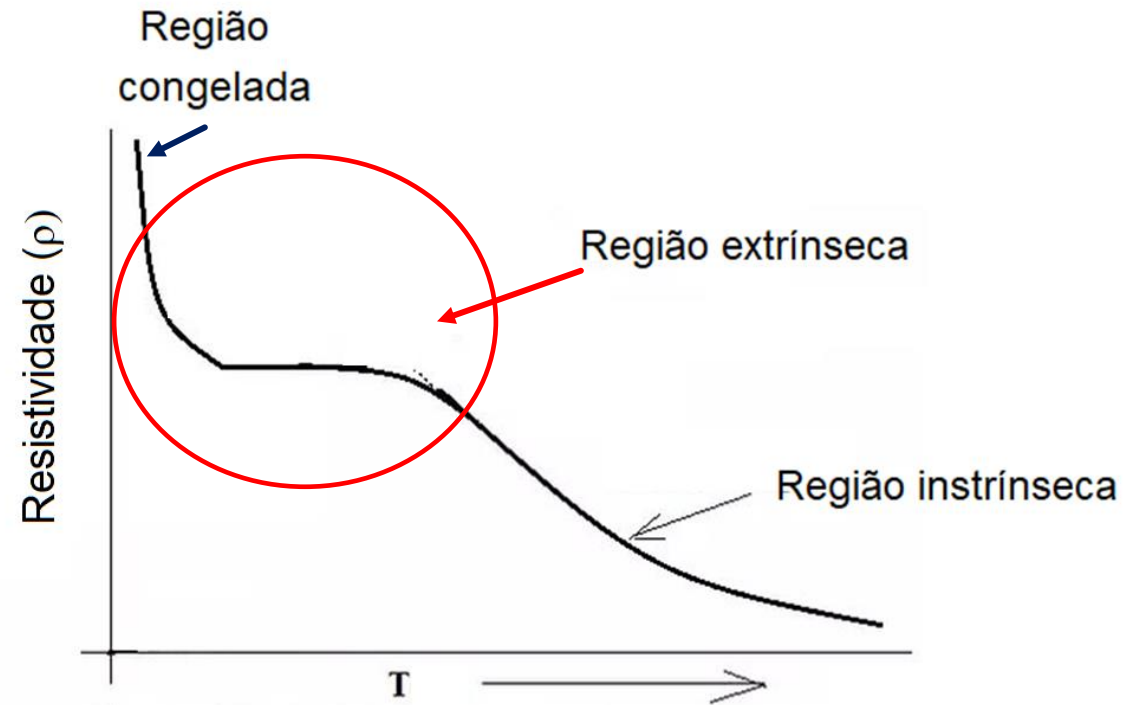
Quando todas as cargas de impurezas se esgotam a resistividade fica aproximadamente constante para um intervalo de temperatura.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \rho_0 \exp\left(\frac{E_i}{kT}\right)$$





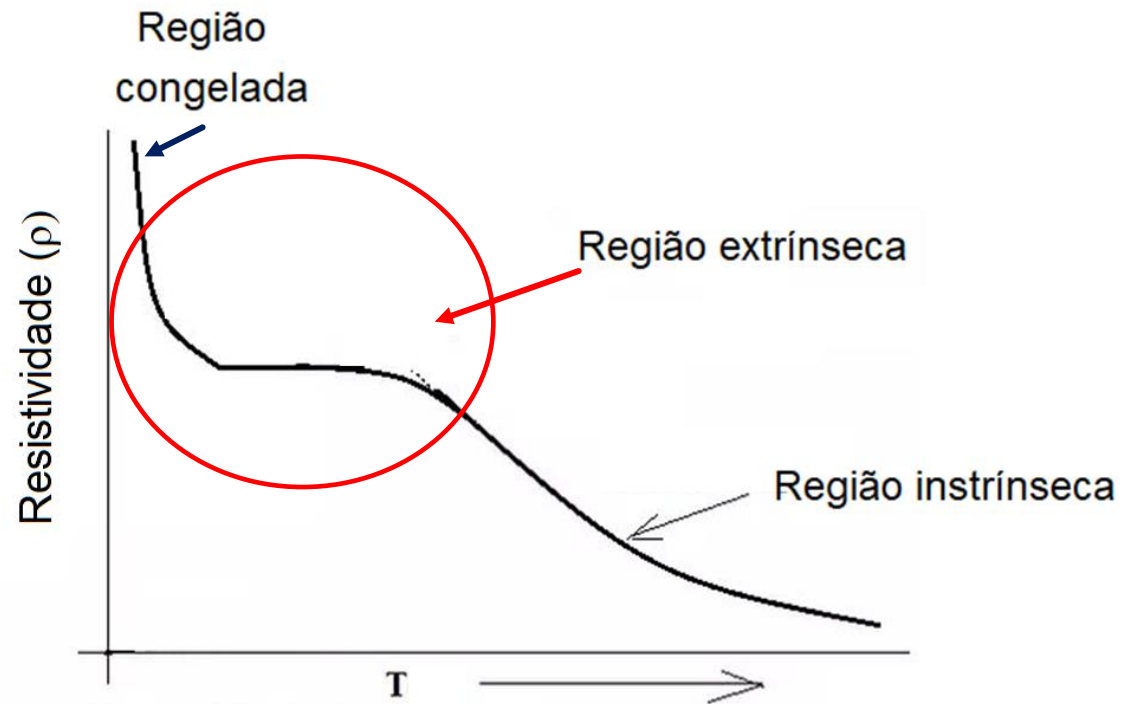
Quando todas as cargas de impurezas se esgotam a resistividade fica aproximadamente constante para um intervalo de temperatura.



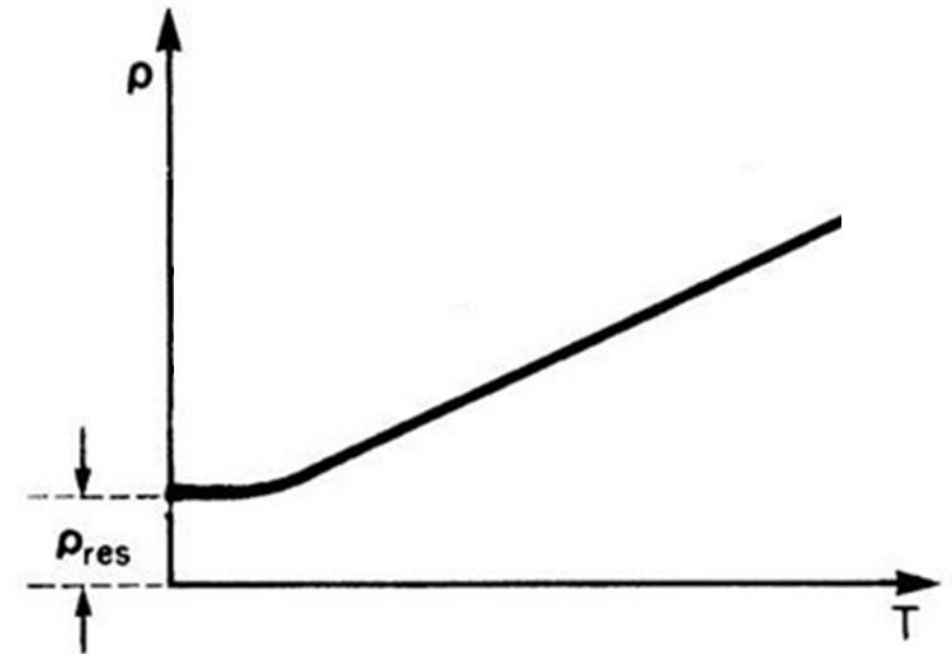
É se continuar aumentando a temperatura, ocorre a mudança para o comportamento intrínseco

COMPORTAMENTO COMPARATIVO

Semicondutores



Metais



ρ_{res} = resistividade residual



APARATO EXPERIMENTAL

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Termistor PT1000 (Sensor) (resistência conhecida a 0° C => 1000 Ω)

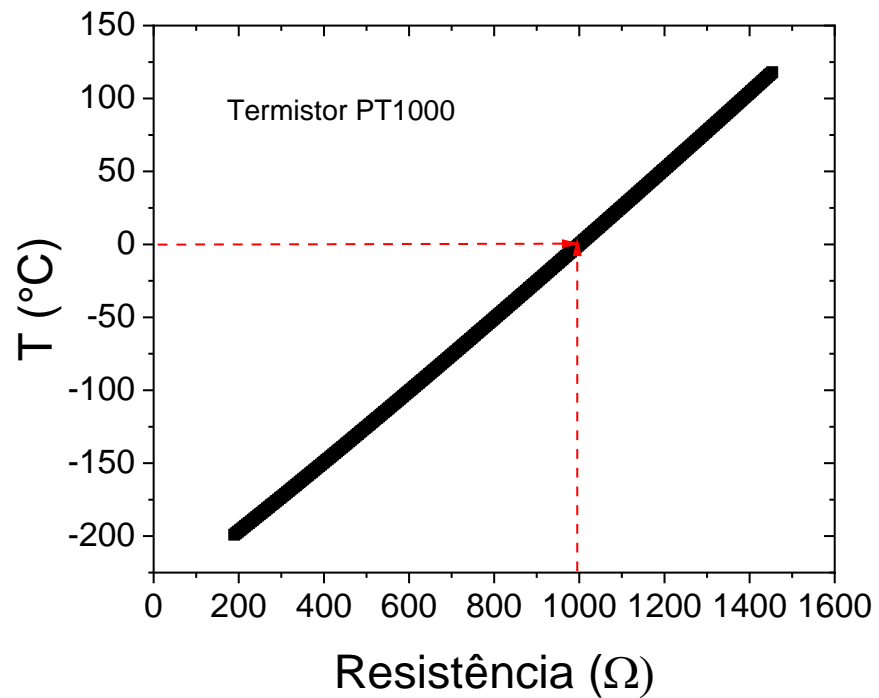
Posicionado muito perto da amostra

- Resistência do material do sensor (fio de platina) varia com T. Método das 4 pontas.
- Passa uma corrente baixa no sensor (100 μA). ($R = V/I$)
- O termistor (sensor de temperatura) é ligado a um multímetro de bancada e mede V
- Quando $\Delta T \rightarrow \Delta R (\Delta V)$
- Computador aquisita R (ou V) e salva os dados
- Tabela de calibração R vs T permite converter R (ou V) em T.

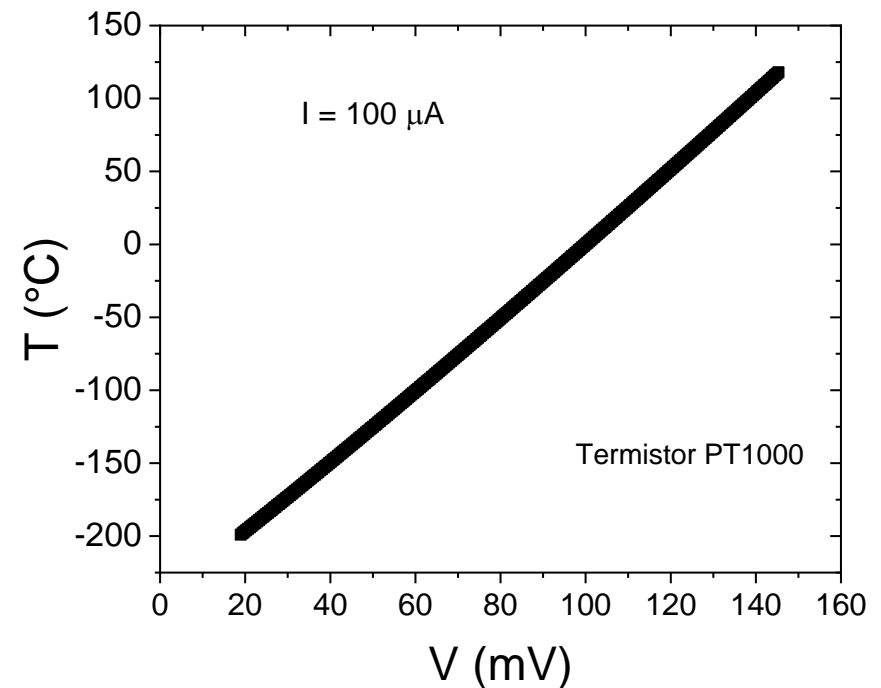


TERMISTOR PT1000 (SENSOR)

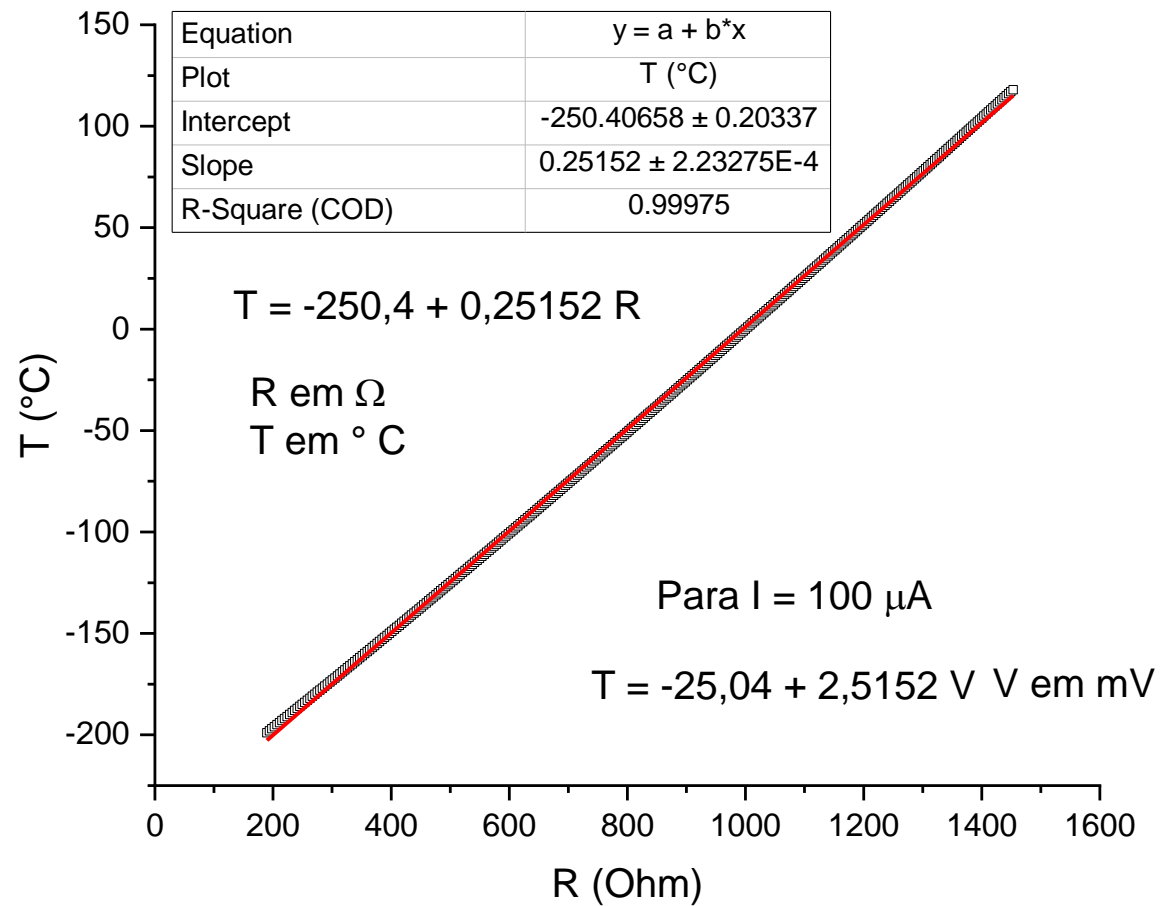
Tabela de Calibração



Para a medida, passa uma corrente e mede a voltagem.



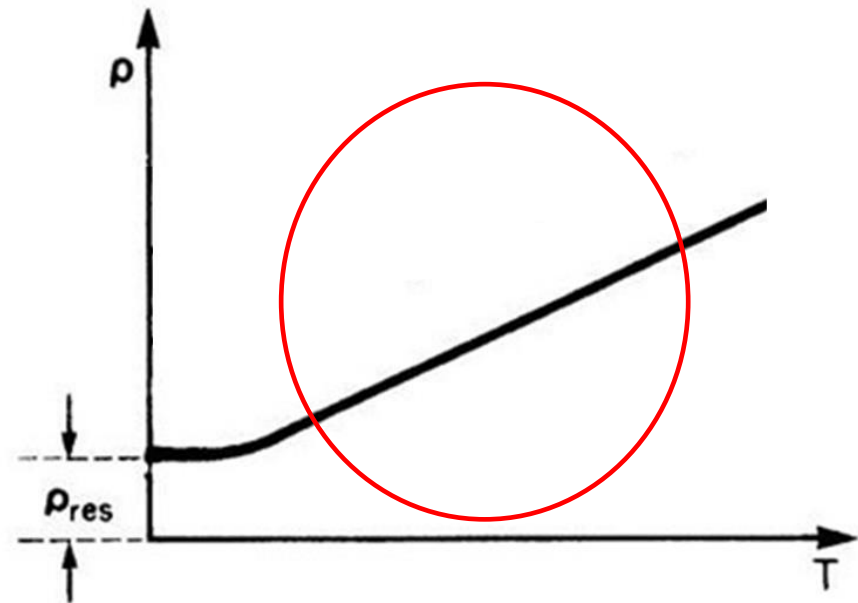
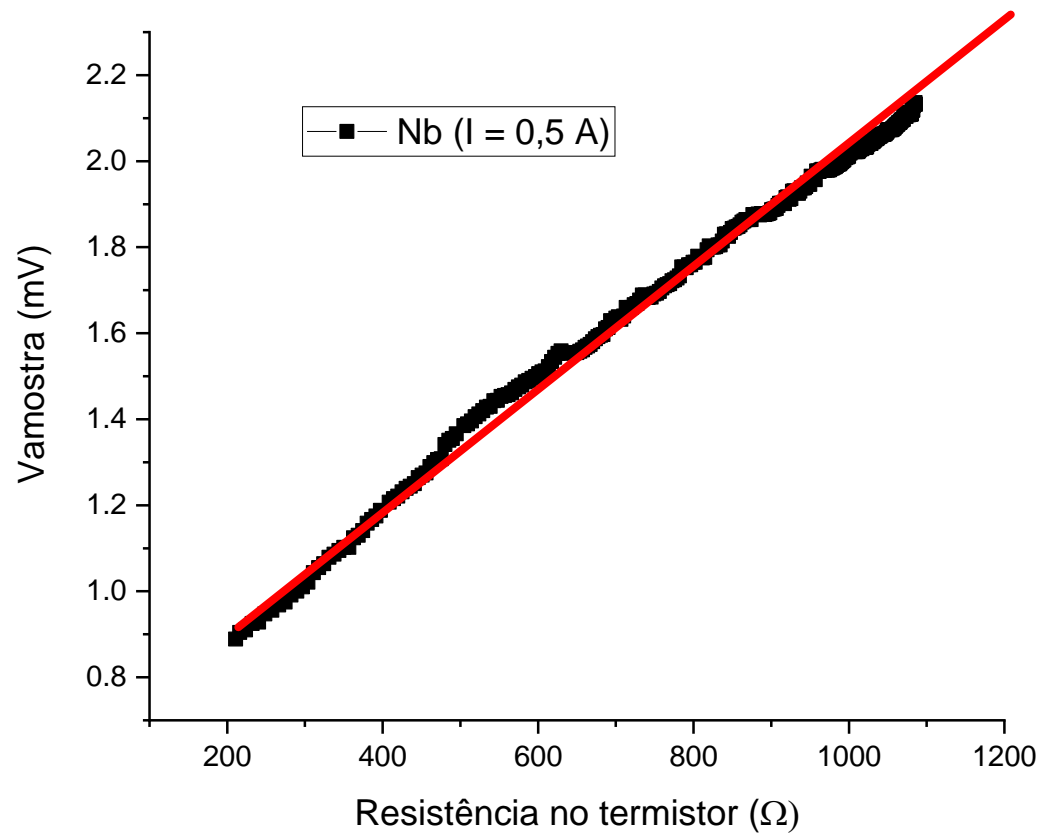
AJUSTE LINEAR



Resistência dos Fios Metálicos (amostra)

- Resistência do material varia com T. Método das 4 pontas.
- Passa uma corrente fixa no material – 0,5 A (por exemplo)
- Mede-se a voltagem que vai variar com a temperatura: $V = R I$

EXEMPLO: MEDIDA PARA O NIÓBIO



MATERIAIS A SEREM ESTUDADOS

Cada grupo fará a aquisição de dados de **um** material.

Serão 5 materiais:

- Nb puro
- Liga de Nb-Ti
- Liga de Nb-W
- Cu puro
- Liga de Cu-Ni

O dado de ρ vs T para o Si será entregue.

RESISTÊNCIA NO SEMICONDUTOR

Semicondutor

- Usa-se o multímetro na função R (Ω)
- O multímetro aplica uma ddp na amostra, uma corrente muito pequena se desenvolve e ele fornece R diretamente.

MULTÍMETRO MINIPA

MODELO: MDM-8145A

Display LCD/Contagem: 4 3/4 Dígitos (Tripla)/40000

True RMS: True RMS AC/AC+DC

Tensão DC: 400 m/4/40/400/1000 V

Corrente DC: 400 μ /4000 μ /40 m/400 m/10 A

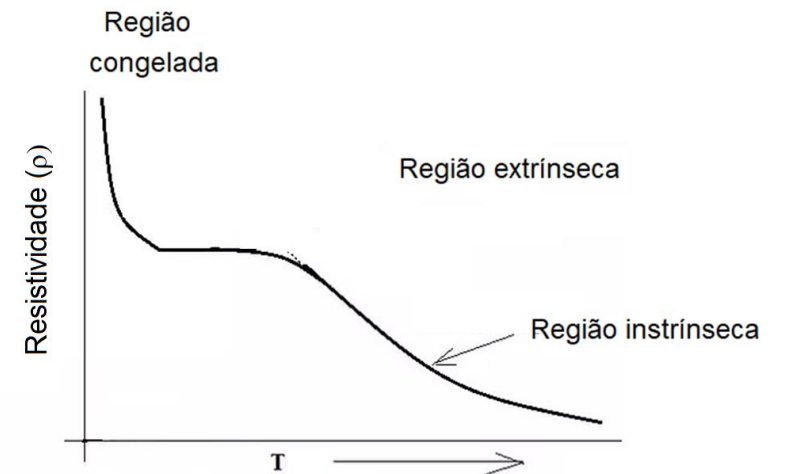
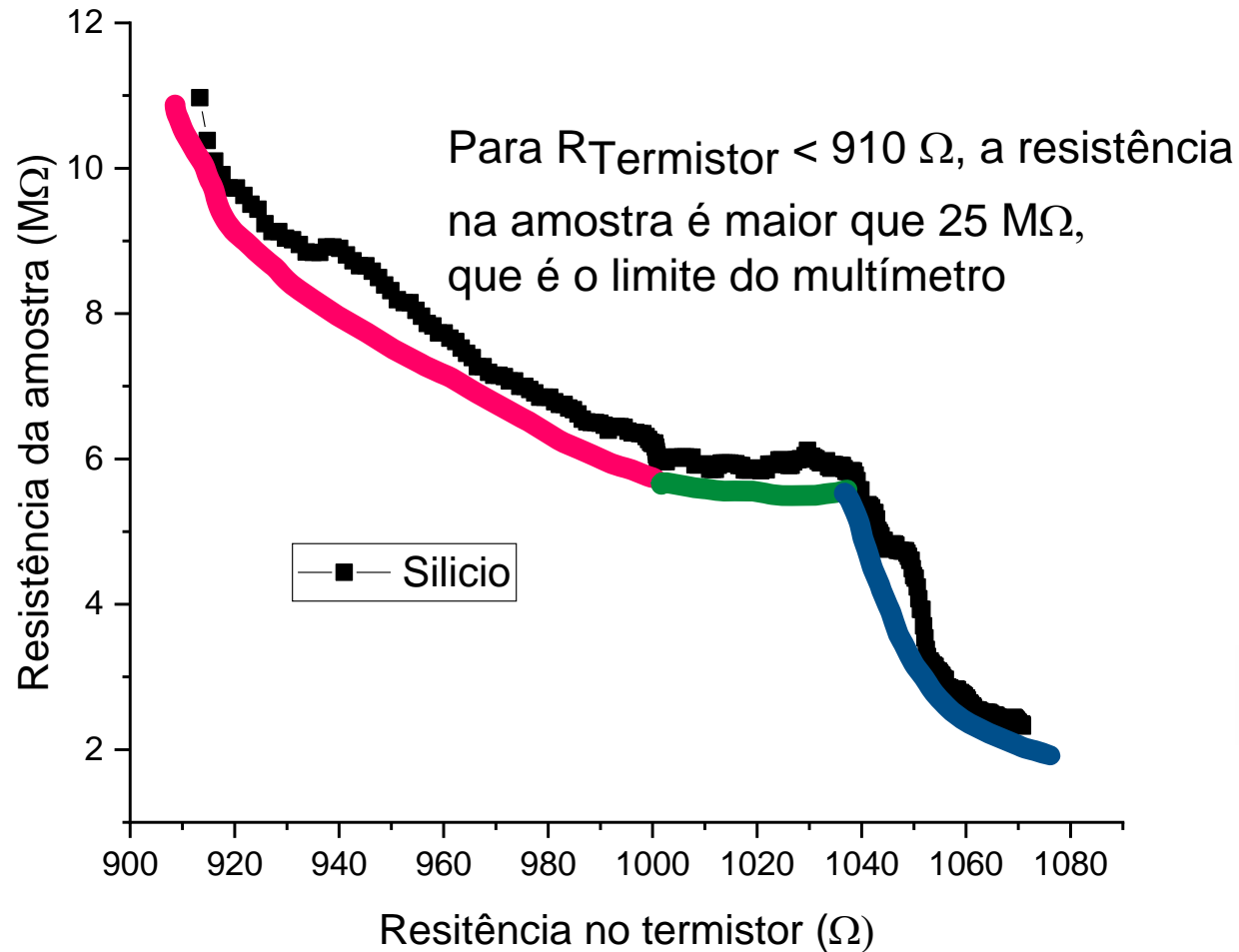
Resistência 2 Fios: 400/4 k/40 k/400 k/4 M/40 MO

Valor máximo de resistência:

$$R = V/I < 1000 / 400 \times 10^{-6}$$

$$R < 2,5 \times 10^6 \Omega = 2,5 \text{ M}\Omega$$

MEDIDAS PARA O SILÍCIO



AQUISIÇÃO DOS DADOS

- Será realizada filmando-se a variação das voltagens no dois voltímetros:
- Voltímetro da amostra – dará a resistividade ($R = V/I$); $\rho = R A/l$
- Voltímetro do sensor – dará a temperatura. ($T = -25,04 + 2,5152 V$) sendo V em V

TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS

Cada grupo irá elaborar uma tabela com os dados coletados e deverão enviar para a Professora até a próxima sexta feira (05/04), já convertido em ρ vs T. Variação de 20 em 20 K. (Ver tabela de conversão de R em T do sensor)

A Professora irá compartilhar com os grupos os dados obtidos por outros grupos de mesmo metal base, ou seja Nb e ligas de Nb e Cu e ligas de Cu.

COMPARAÇÕES

- Comparar e discutir os resultados do metal puro com as ligas do mesmo elemento.
- Comparar e discutir o resultado do metal puro com o resultado do Si **que será fornecido**.
- Comparar e discutir os resultados **dos metais puros** com a literatura.