



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
HIDRÁULICA E AMBIENTAL

---

PHA 3360 – POLUIÇÃO E  
QUALIDADE DA ÁGUA

Prof. Sidney Seckler Ferreira Filho





# POLUIÇÃO E QUALIDADE DA ÁGUA

---

- **Introdução**
- **Sistemas Ácido Base**
- **Sistema Ácido Carbônico**
- **Conceito de Alcalinidade e Acidez**
- **Exemplos de Cálculo**
- **Comentários Finais**





## Relevância das variáveis acidez e alcalinidade na área ambiental

---

- Vários processos naturais dependem de reações químicas;
- Estas reações químicas, por sua vez dependem da acidez ou alcalinidade da água para ocorrer de forma adequada;
- Processos unitários também tem a sua cinética dependente destas variáveis.





# Exemplos da influência da acidez e alcalinidade

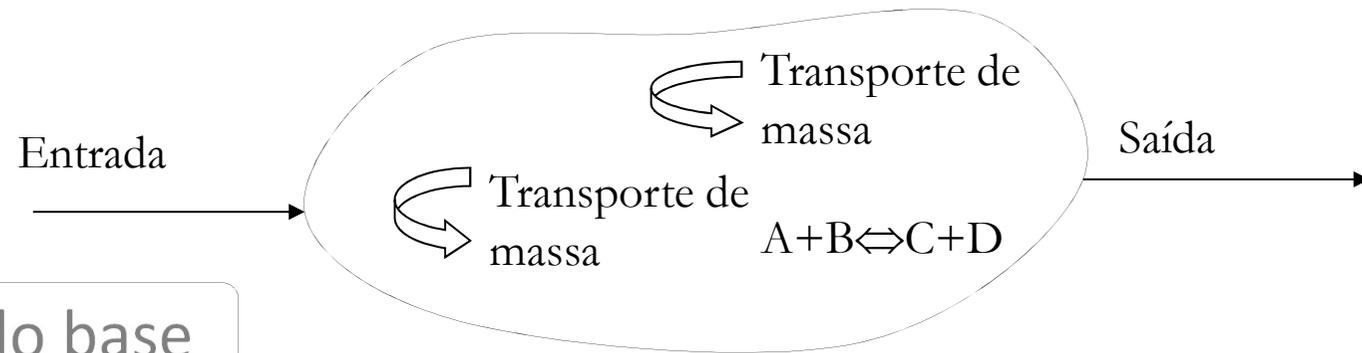
---

- Solubilidade de metais e nutrientes e compostos orgânicos;
- Influência na cinética de reações químicas:
  - Precipitação;
  - Oxidação e redução;
  - Complexação;
- Processos biológicos;
- Equilíbrio químico.





# PROCESSOS DE TRANSPORTE E TRANSFORMAÇÃO EM SISTEMAS NATURAIS E DE ENGENHARIA

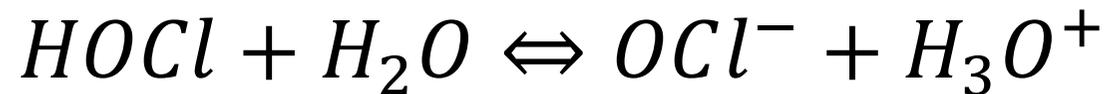
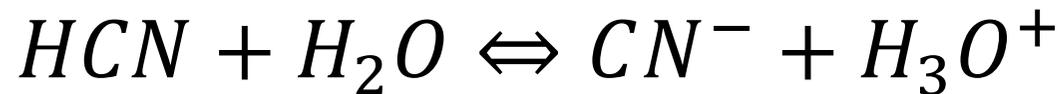
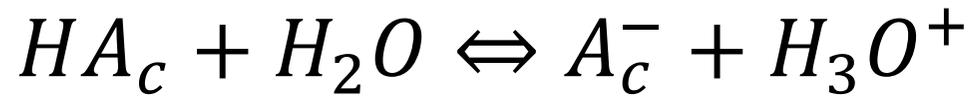


- Reações ácido base
- Reações de hidrólise
- Reações de precipitação
- Reações de oxidação e redução
- Reações de complexação
- Reações de adsorção

# FUNDAMENTOS DE QUÍMICA AQUÁTICA

## REAÇÕES ÁCIDO BASE

---



# FUNDAMENTOS DE QUÍMICA AQUÁTICA

## REAÇÕES ÁCIDO BASE

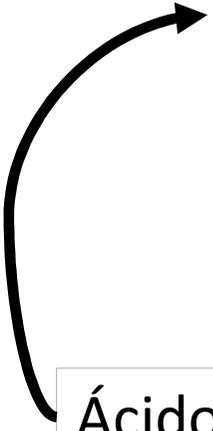
---



Ácido monoprótico: liberação de um único íon  $H^+$



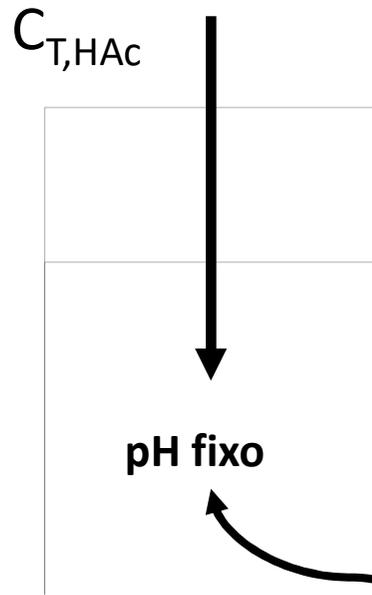
Ácido diprótico: liberação de dois íons  $H^+$





# CONCEITO DE FRAÇÕES IONIZÁVEIS – ÁCIDOS MONOPRÓTICOS FRACOS

---



$$K_a = \frac{[A_c^-] \cdot [H^+]}{[HA_c]}$$

$$\alpha_0 = \frac{[HA_c]}{C_{T,HA_c}} = \frac{[H^+]}{[H^+] + K_a}$$

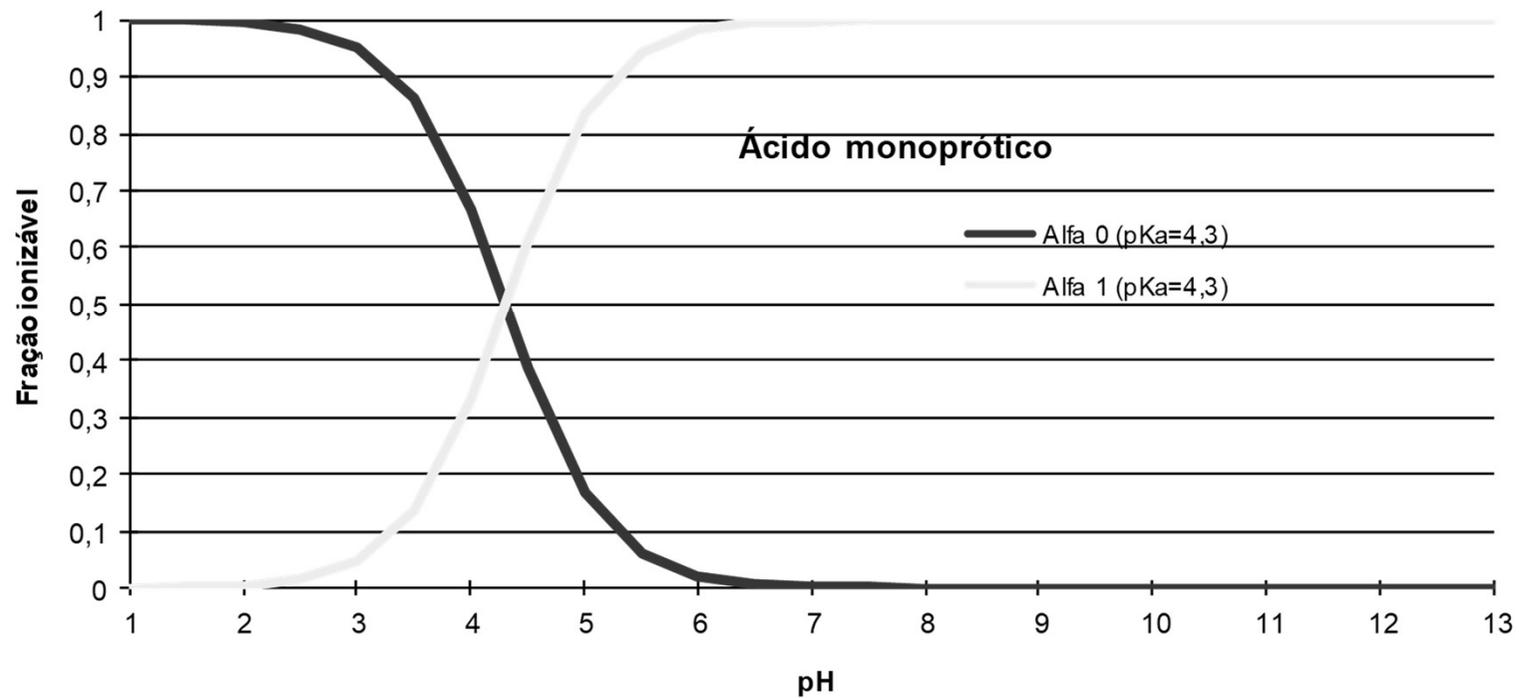
$$\alpha_1 = \frac{[A_c^-]}{C_{T,HA_c}} = \frac{K_a}{[H^+] + K_a}$$



# FRAÇÕES IONIZÁVEIS ÁCIDOS MONOPRÓTICOS FRACOS

$$\alpha_0 = \frac{[HA_c]}{C_{T,HA_c}} = \frac{[H^+]}{[H^+] + K_a}$$

$$\alpha_1 = \frac{[A_c^-]}{C_{T,HA_c}} = \frac{K_a}{[H^+] + K_a}$$

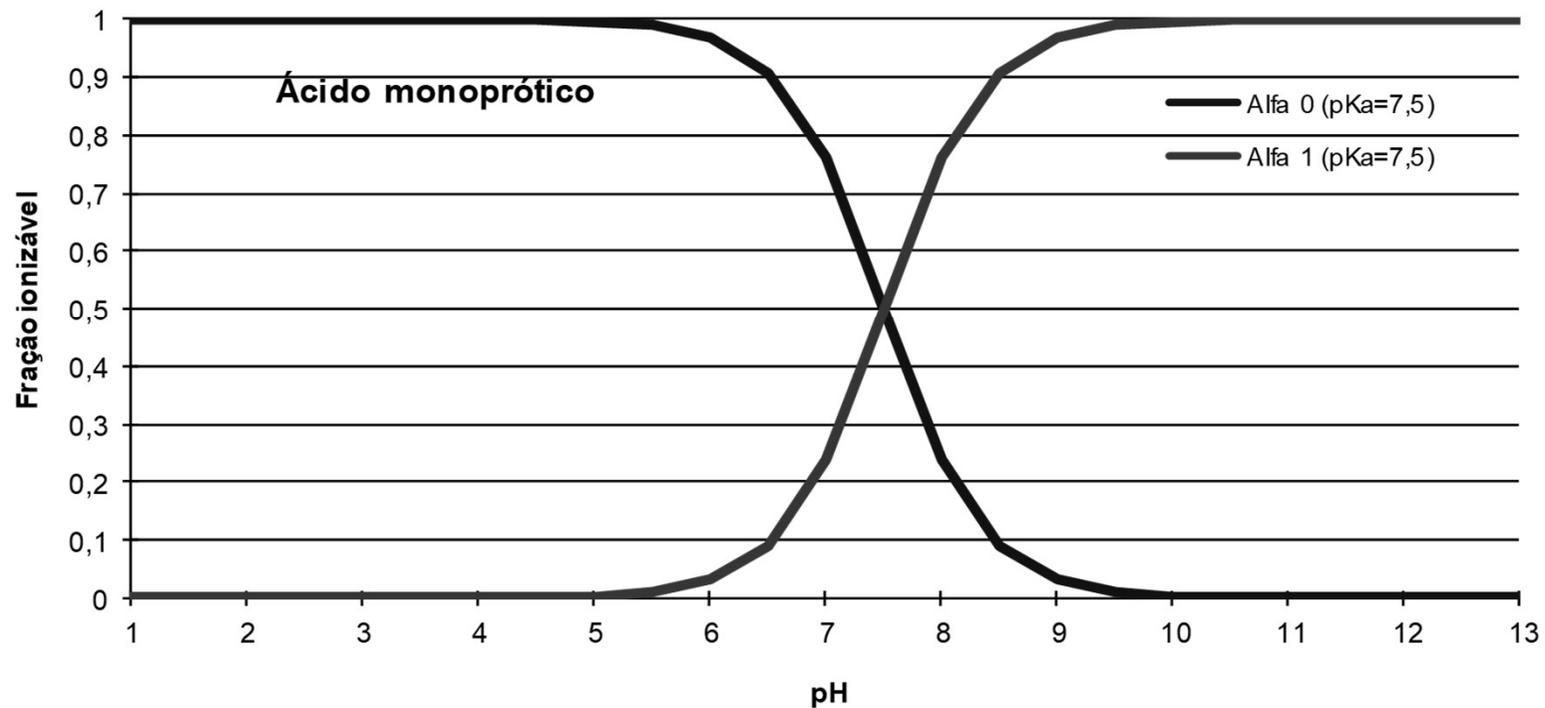




# FRAÇÕES IONIZÁVEIS ÁCIDOS MONOPRÓTICOS

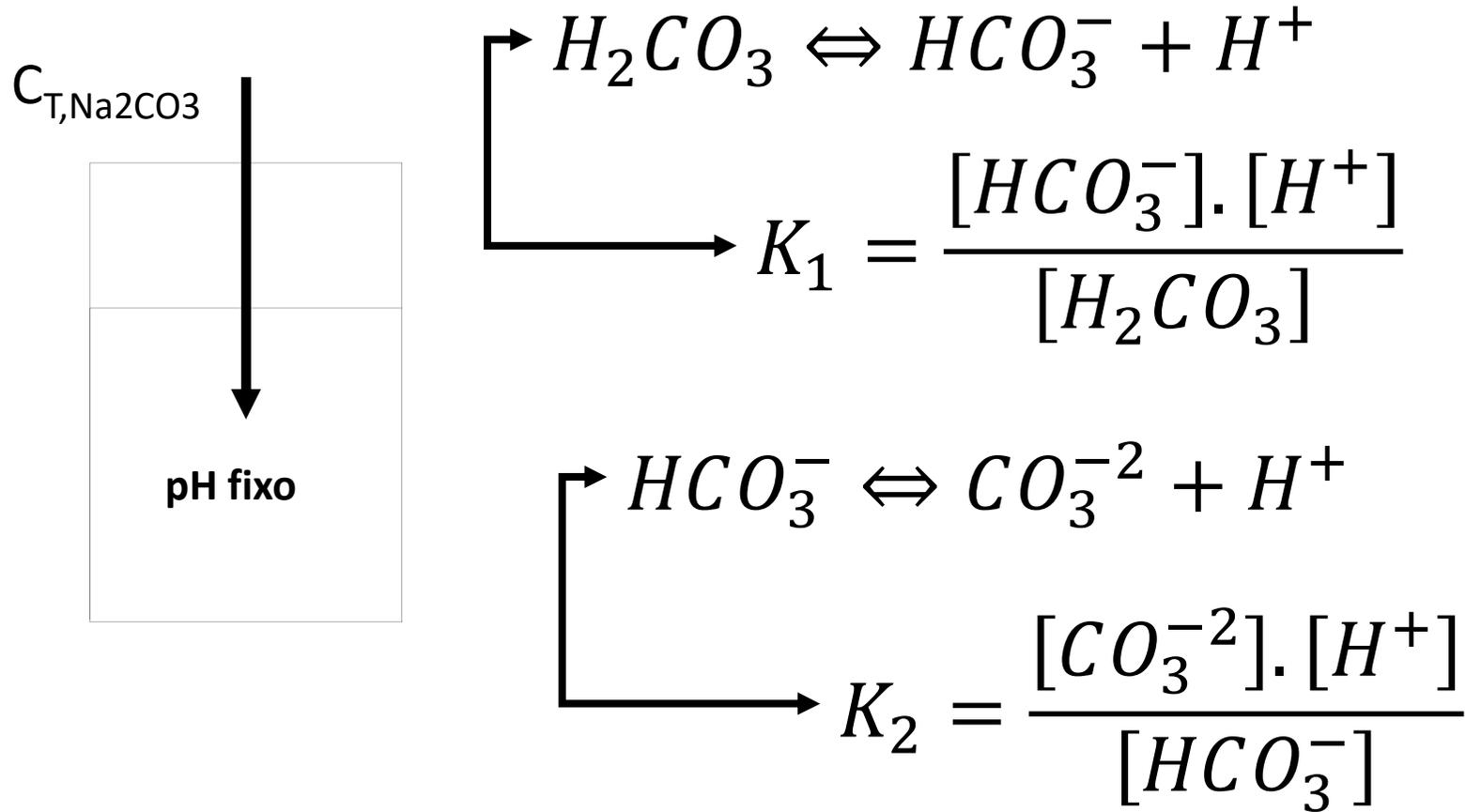
$$\alpha_0 = \frac{[HOCl]}{C_{T,HOCl}} = \frac{[H^+]}{[H^+] + K_a}$$

$$\alpha_1 = \frac{[OCl^-]}{C_{T,HOCl}} = \frac{K_a}{[H^+] + K_a}$$





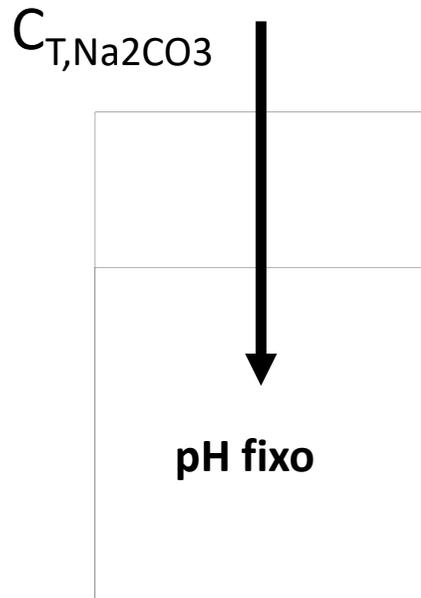
# CONCEITO DE FRAÇÕES IONIZÁVEIS – ÁCIDOS DIPRÓTICOS





# CONCEITO DE FRAÇÕES IONIZÁVEIS – ÁCIDOS DIPRÓTICOS FRACOS

---



$$\alpha_0 = \frac{[H_2CO_3]}{C_T} = \frac{[H^+]^2}{([H^+]^2 + K_1 \cdot [H^+] + K_1 \cdot K_2)}$$

$$\alpha_1 = \frac{[HCO_3^-]}{C_T} = \frac{K_1 \cdot [H^+]}{([H^+]^2 + K_1 \cdot [H^+] + K_1 \cdot K_2)}$$

$$\alpha_2 = \frac{[CO_3^{2-}]}{C_T} = \frac{K_1 \cdot K_2}{([H^+]^2 + K_1 \cdot [H^+] + K_1 \cdot K_2)}$$

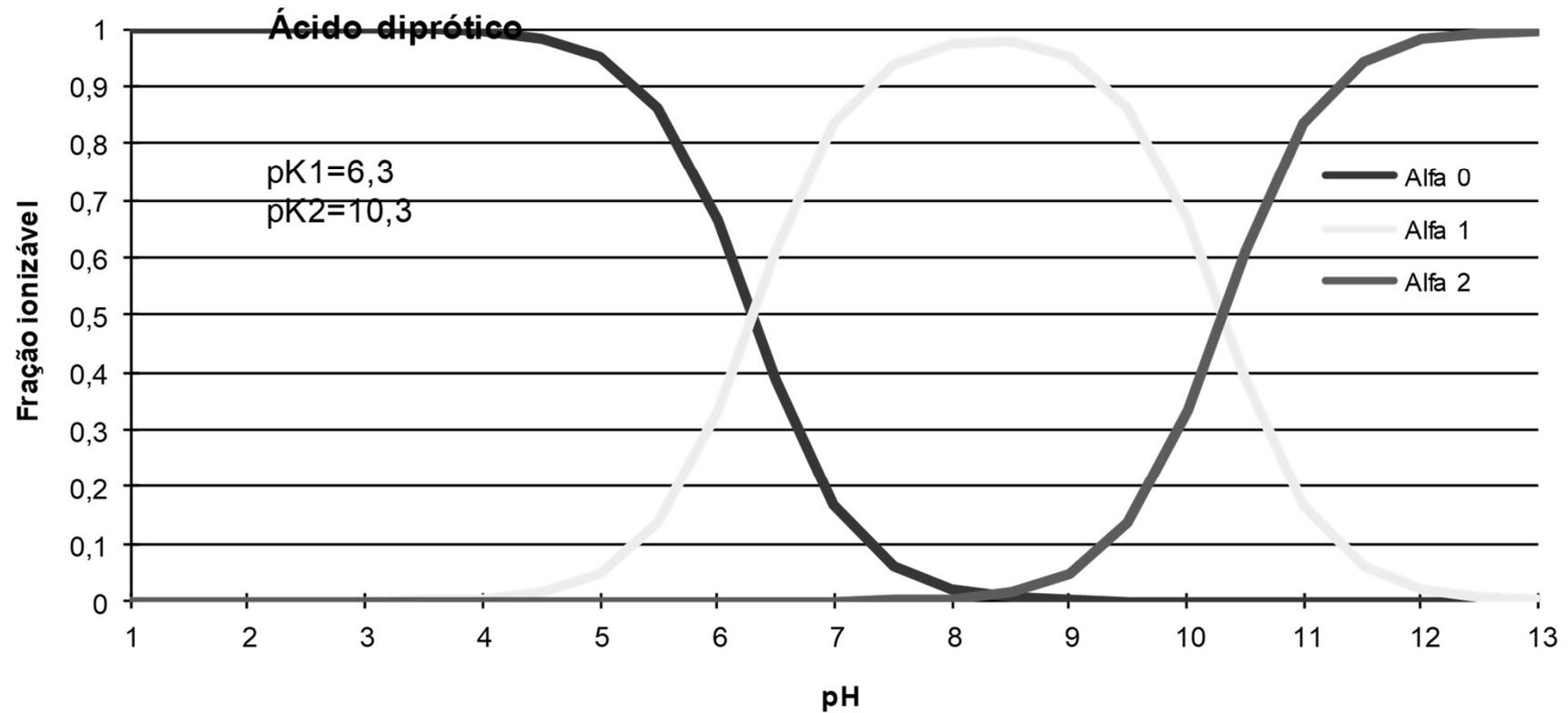


# FRAÇÕES IONIZÁVEIS ÁCIDOS DIPRÓTICOS

$$\alpha_0 = \frac{[H^+]^2}{([H^+]^2 + K_1 \cdot [H^+] + K_1 \cdot K_2)}$$

$$\alpha_1 = \frac{K_1 \cdot [H^+]}{([H^+]^2 + K_1 \cdot [H^+] + K_1 \cdot K_2)}$$

$$\alpha_2 = \frac{K_1 \cdot K_2}{([H^+]^2 + K_1 \cdot [H^+] + K_1 \cdot K_2)}$$



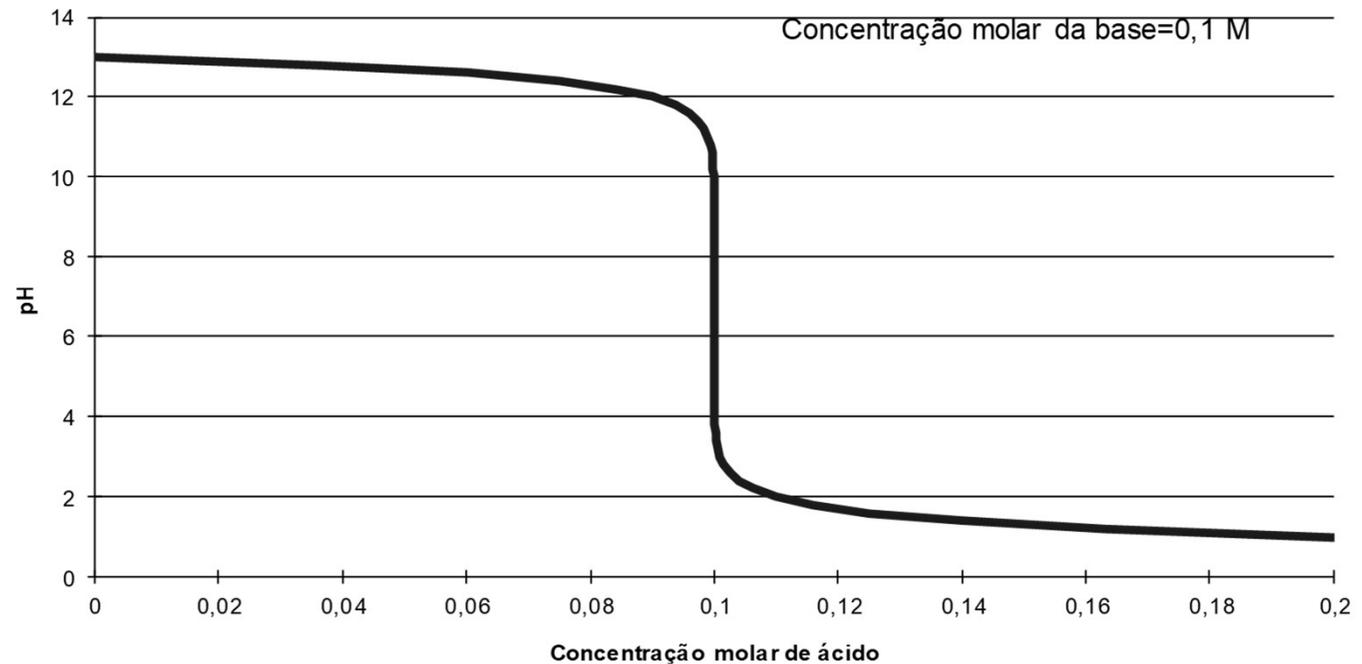
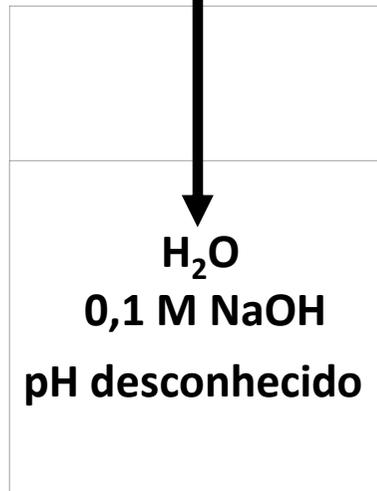


# EQUILÍBRIO QUÍMICO DE SOLUÇÕES

## CURVA DE TITULAÇÃO

Curva de Titulação - Base Forte versus Ácido Forte

$C_{T,HCl}$

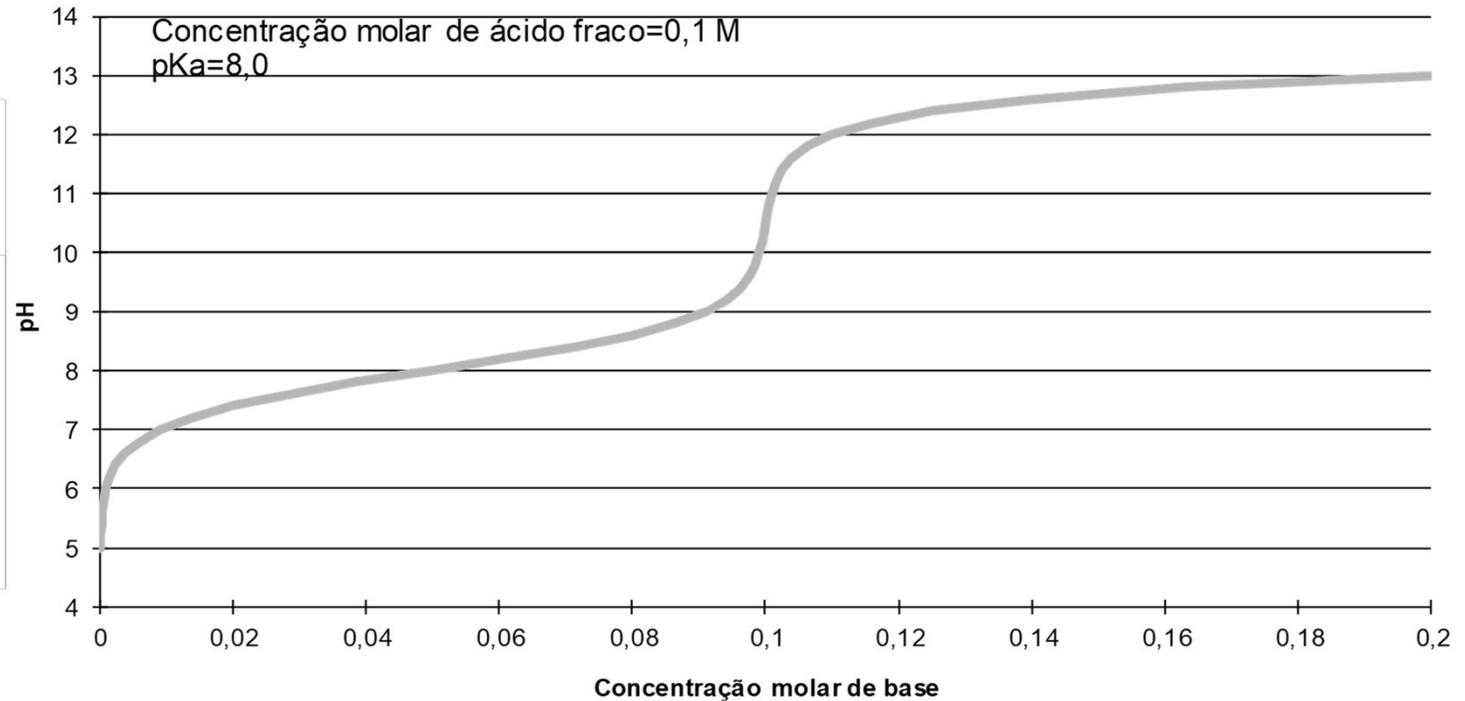
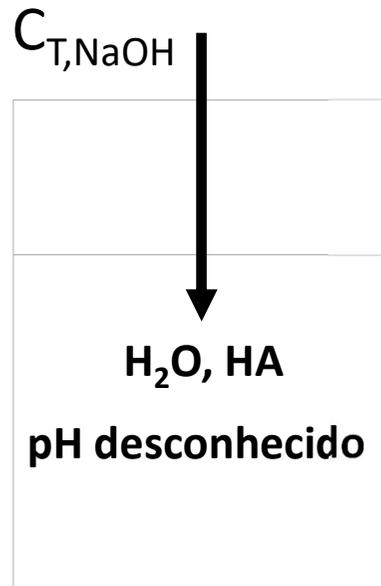


$$0,1 + [H^+] = \frac{K_w}{[H^+]} + [Cl^-]$$



# EQUILÍBRIO QUÍMICO DE SOLUÇÕES CURVA DE TITULAÇÃO

Curva de Titulação - Ácido Monoprótico Fraco versus Base Forte



$$[Na^+] + [H^+] = \frac{K_w}{[H^+]} + \frac{K_1}{(K_1 + [H^+])} \cdot C_{T,HA}$$



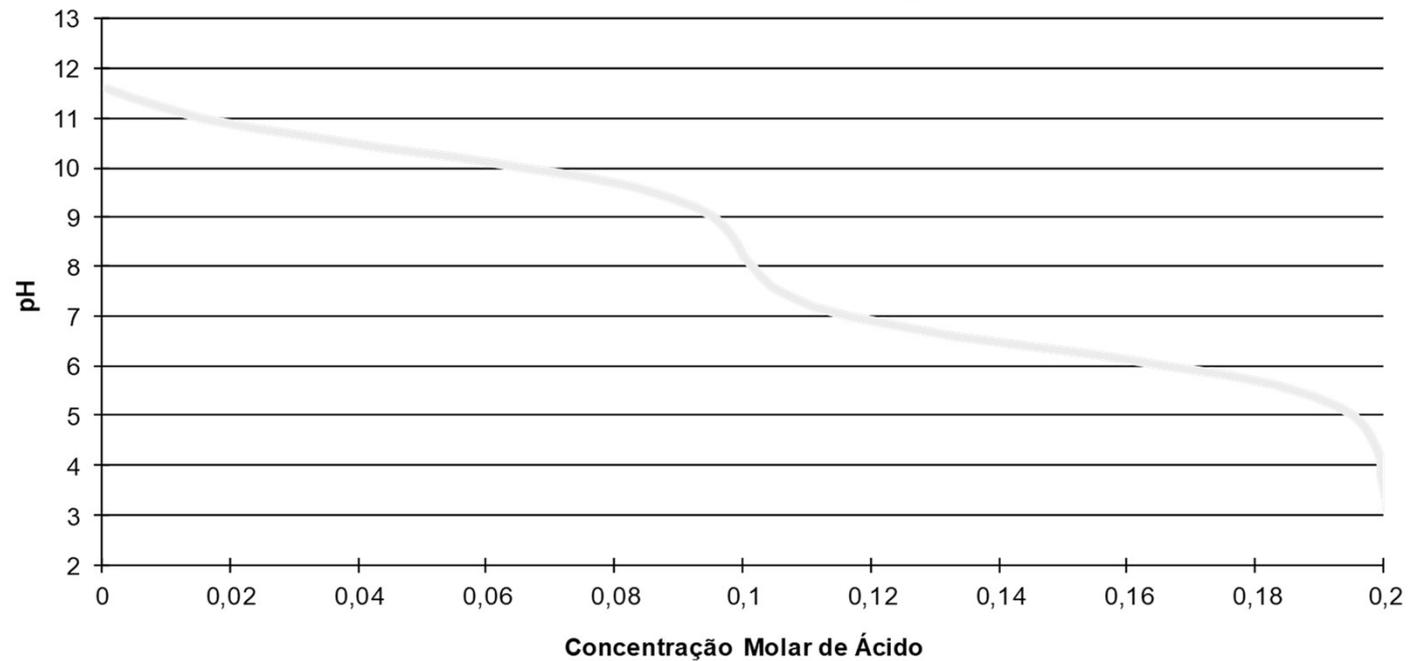
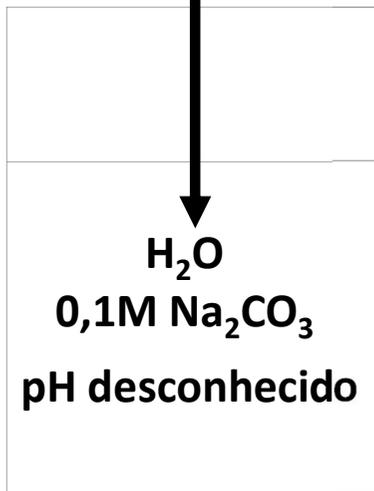


# EQUILÍBRIO QUÍMICO DE SOLUÇÕES

## CURVA DE TITULAÇÃO

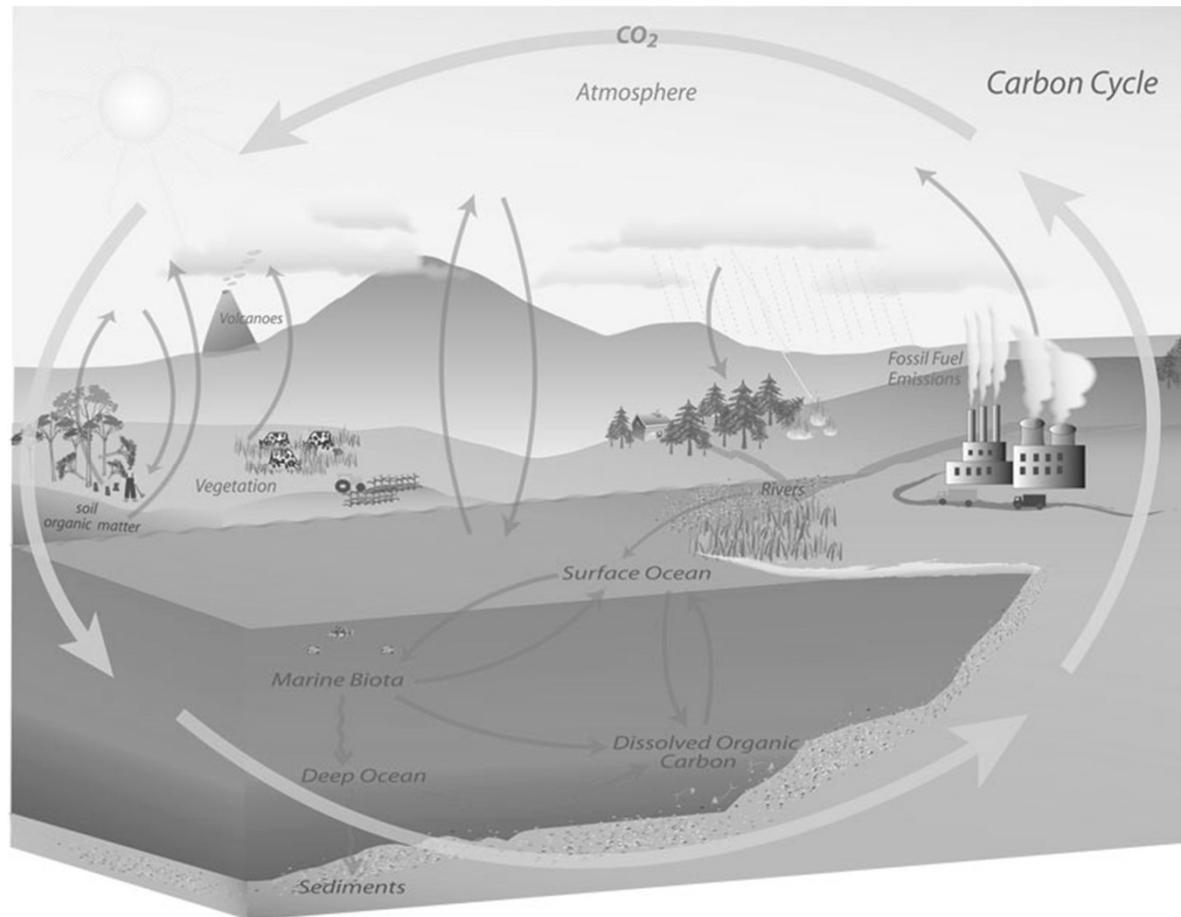
Curva de Titulação - Carbonato de Sódio  
versus Ácido Monoprótico Forte

$C_{T,HCl}$



$$0,2 + [H^+] = \frac{K_w}{[H^+]} + (\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2) \cdot 0,1 + [Cl^-]$$

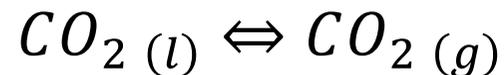
# CICLO BIOGEOQUÍMICO DO CARBONO NA NATUREZA



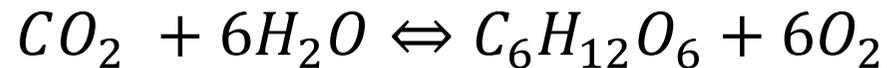
# CICLO BIOGEOQUÍMICO DO CARBONO NA NATUREZA

---

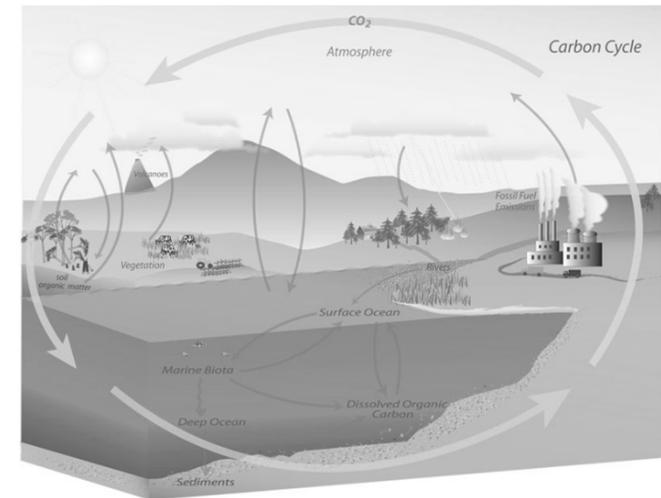
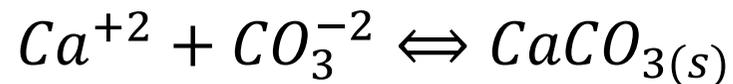
- Dissolução de  $CO_2$  da atmosfera para a fase líquida:



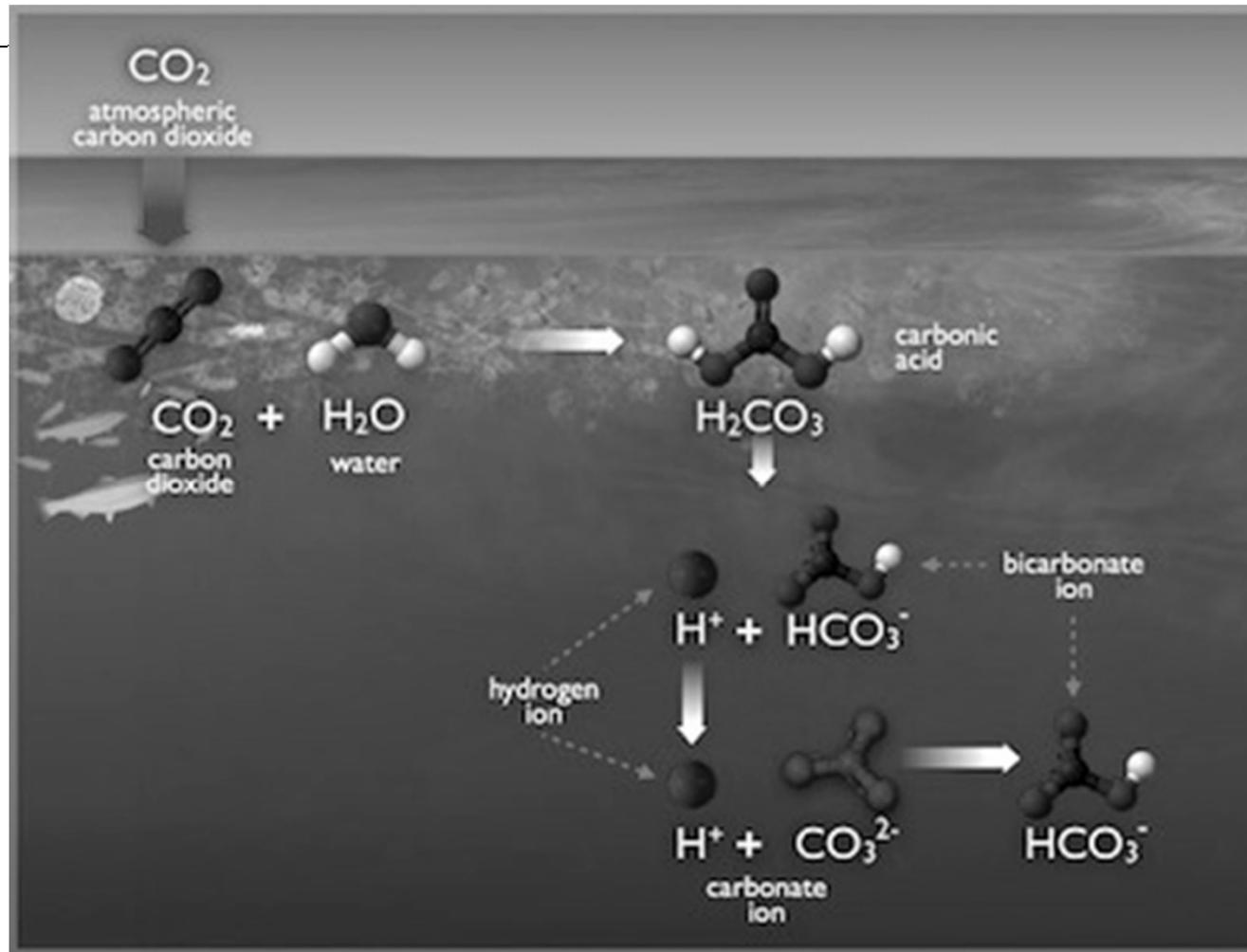
- Processos de fotossíntese e respiração



- Precipitação e dissolução de carbonatos



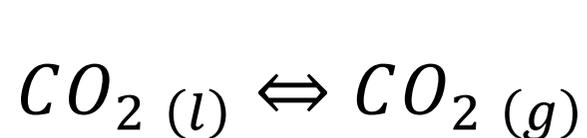
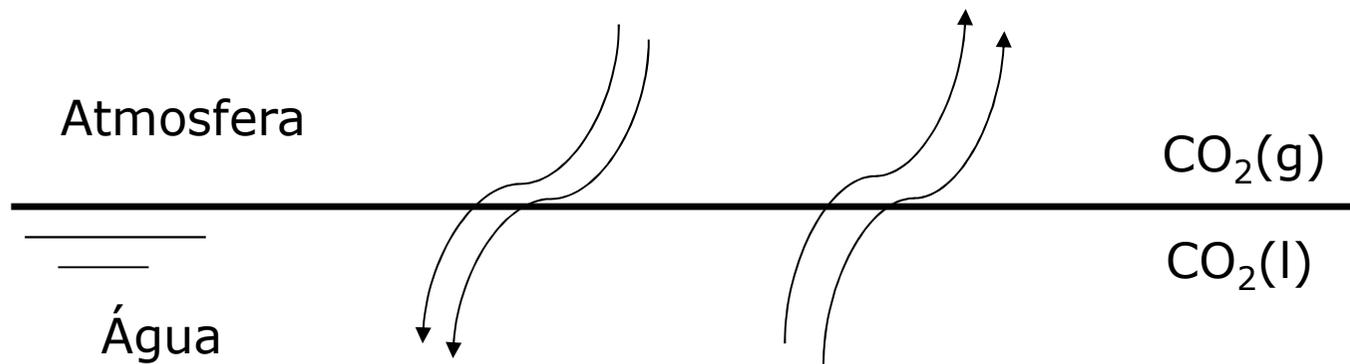
# SISTEMA ÁCIDO CARBÔNICO EM MEIO AQUOSO



# SISTEMA ÁCIDO CARBÔNICO EM MEIO AQUOSO

---

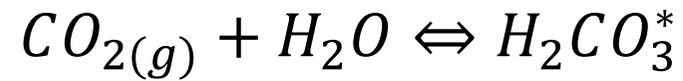
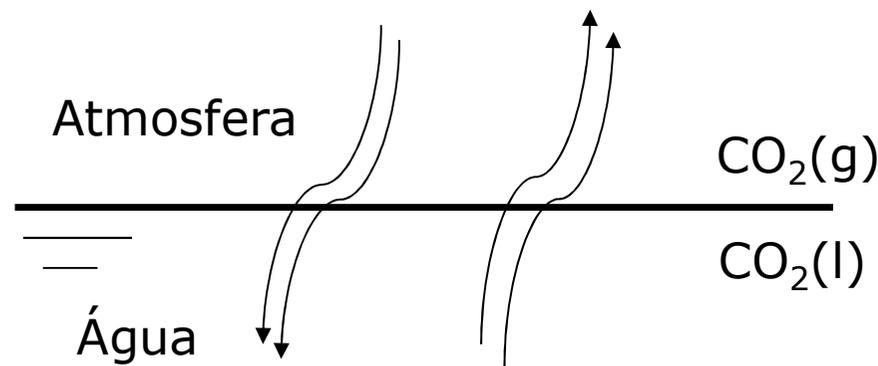
Gás carbônico Pressão parcial de CO<sub>2</sub> constante



$$K_H = \frac{[CO_2]_g}{[CO_2]_l}$$



# SISTEMA ÁCIDO CARBÔNICO EM MEIO AQUOSO



$$K_H = \frac{[H_2CO_3^*]}{[CO_{2(g)}]} = 10^{-1,5}$$



$$K_1 = \frac{[HCO_3^-] \cdot [H^+]}{[H_2CO_3^*]} = 10^{-6,3}$$



$$K_2 = \frac{[CO_3^{2-}] \cdot [H^+]}{[HCO_3^-]} = 10^{-10,3}$$

# SISTEMA ÁCIDO CARBÔNICO EM MEIO AQUOSO

| <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Log(K1)</b> | <b>Log(K2)</b> | <b>Log K<sub>H</sub> (M/atm)</b> |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| 0                           | -6,58          | -10,63         | -1,11                            |
| 5                           | -6,53          | -10,56         | -1,19                            |
| 10                          | -6,46          | -10,49         | -1,27                            |
| 15                          | -6,42          | -10,43         | -1,32                            |
| 20                          | -6,38          | -10,38         | -1,41                            |
| 25                          | -6,35          | -10,33         | -1,47                            |
| 30                          | -6,33          | -10,29         | -1,53                            |
| 40                          | -6,30          | -10,22         | -1,65                            |

# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

---

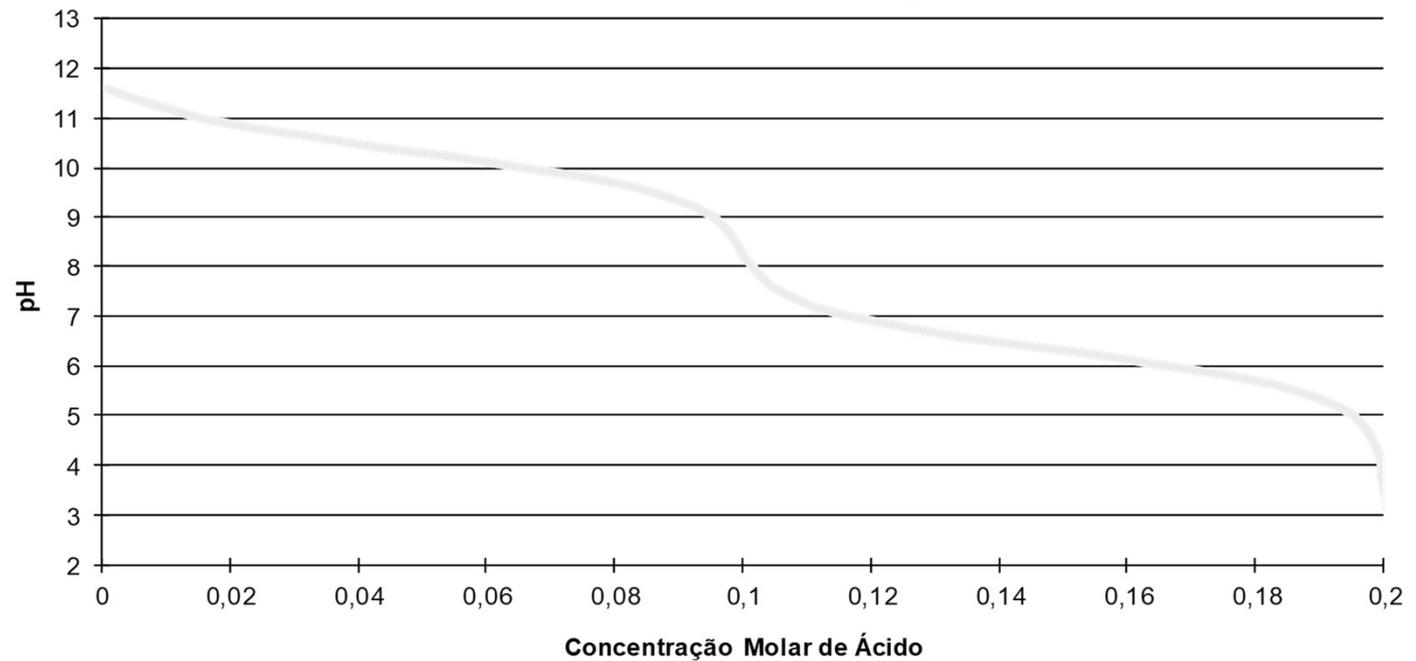
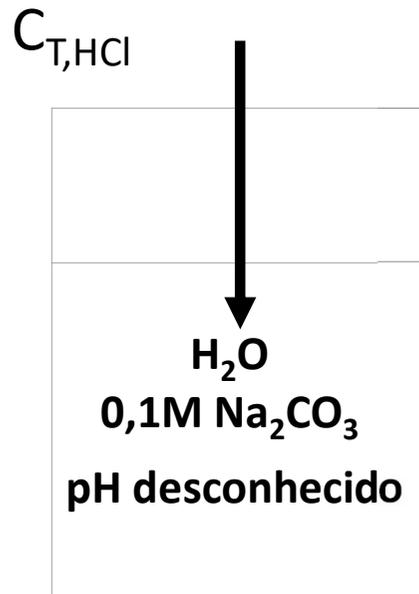
- A alcalinidade de uma amostra líquida é a sua capacidade de reagir com ácidos fortes.
- Origem:
  - Presença de carbono inorgânico total e demais bases conjugadas de ácidos fracos na fase líquida.





# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

Curva de Titulação - Carbonato de Sódio  
versus Ácido Monoprótico Forte



$$0,2 + [H^+] = \frac{K_w}{[H^+]} + (\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2) \cdot 0,1 + [Cl^-]$$



# Determinação da alcalinidade em amostras aquosas

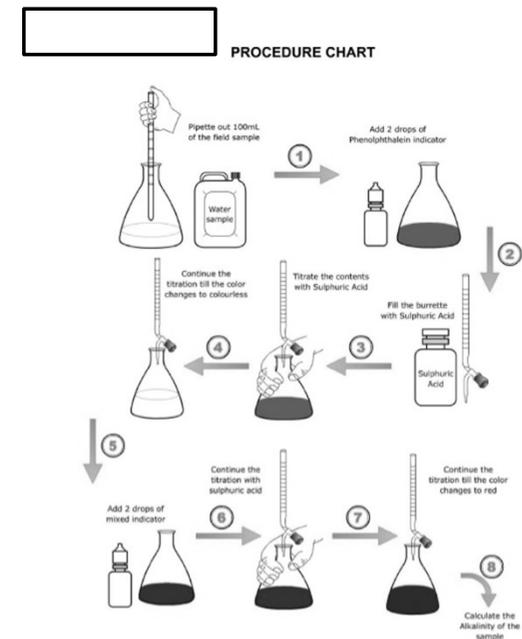
- Análise titulométrica com ácido forte;
- Método padronizado pelo Standard Methods
- Unidade: eq/L ou mg  $\text{CaCO}_3$ /L;





# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

- Análise titulométrica;
- Ácido sulfúrico 0,02 N;
- Uso de indicadores específicos:
  - Fenolftaleína e alaranjado de metila
- Alcalinidade a carbonatos: titulação até pH 8,3;
- Alcalinidade total: titulação até pH 4,3,



Picture (3): Procedure chart



# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

---

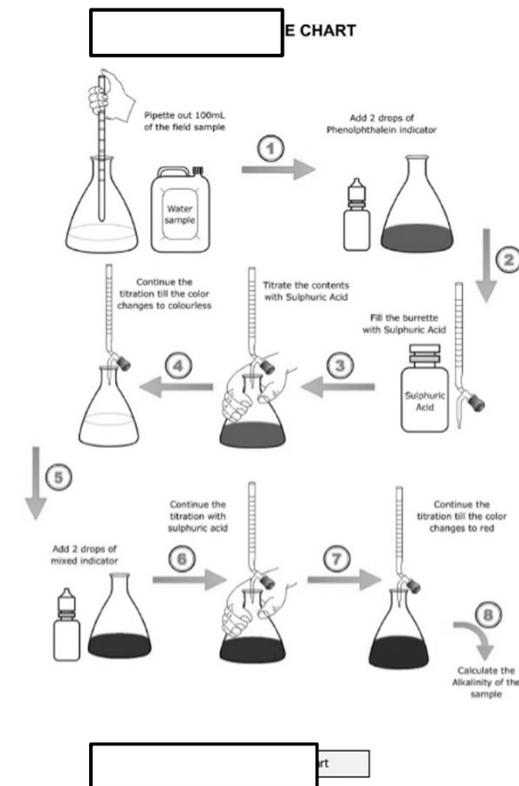
- **Vídeo 1 – Análise de Alcalinidade**





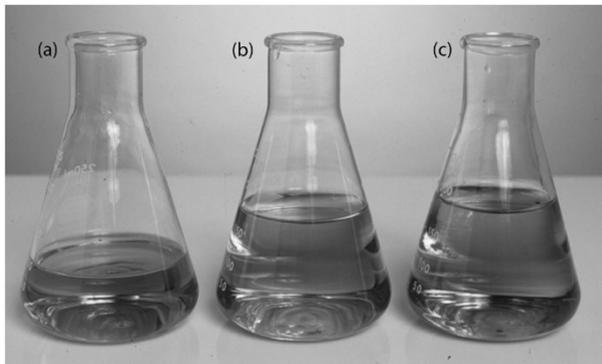
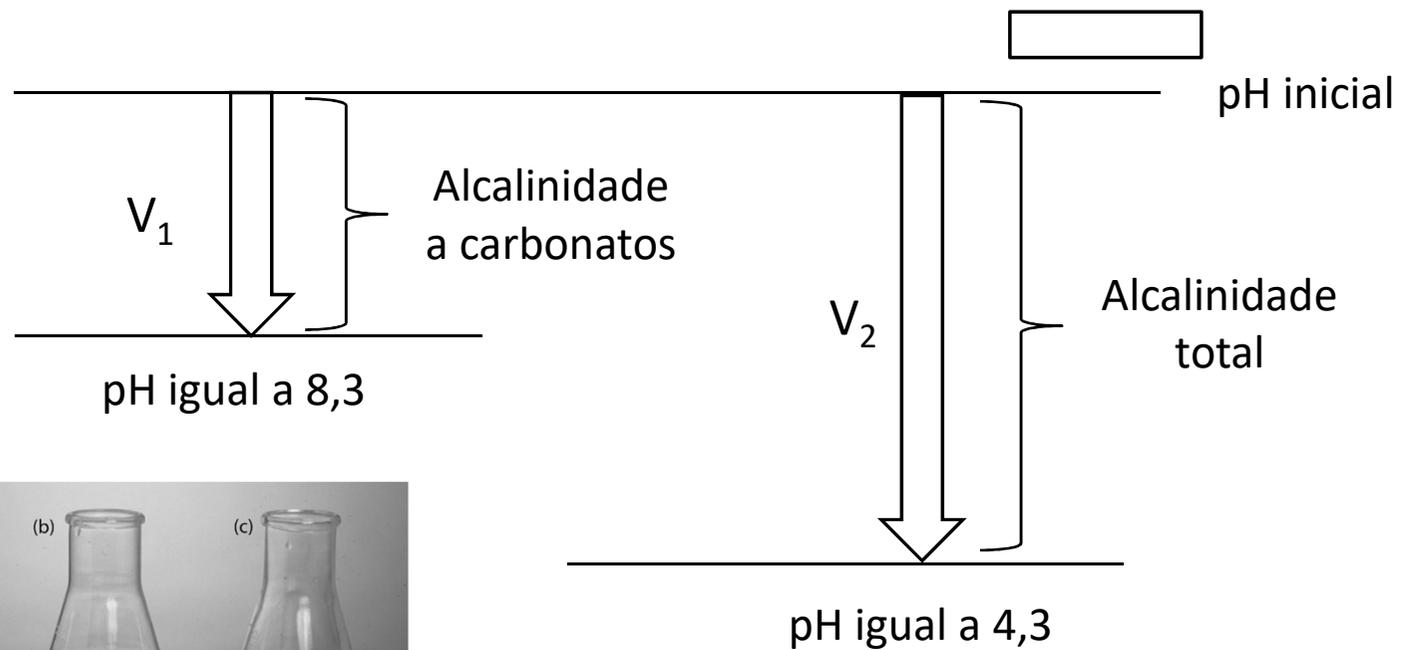
# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

- Determinações
- $V_1$  = volume total de ácido consumido para titulação até pH 8,3 (Uso de fenolftaleína)
- $V_2$  = volume total de ácido consumido para titulação até pH 4,3 (Uso de alaranjado de metila)





# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE



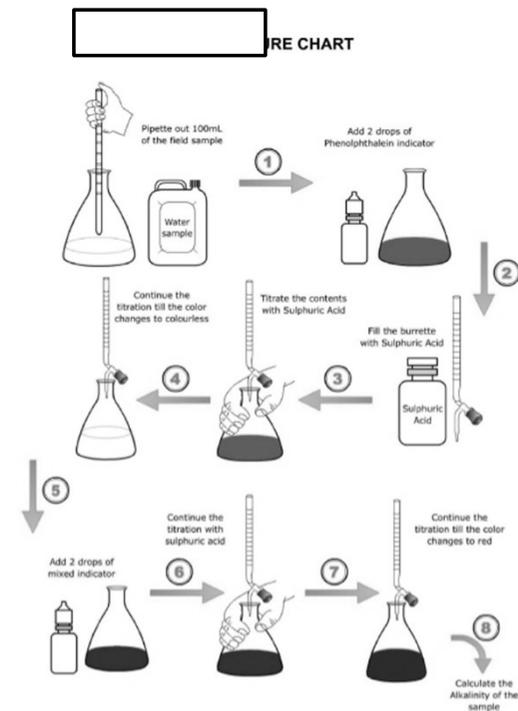


# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

## ■ Cálculos

$$Alk_{carb} = \frac{N_a \cdot V_1}{V_{amostra}} \text{ em } \frac{eq}{L}$$

$$Alk_{carb} = \frac{N_a \cdot V_1 \cdot 50 \cdot 10^3}{V_{amostra}} \text{ em } \frac{mg \text{ CaCO}_3}{L}$$



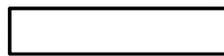
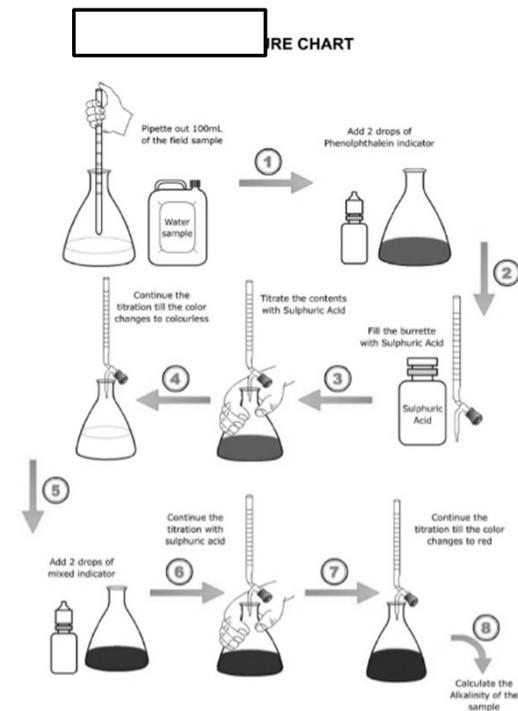


# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

## ■ Cálculos

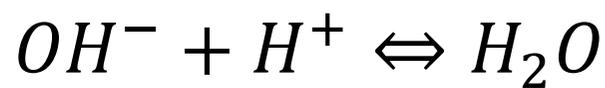
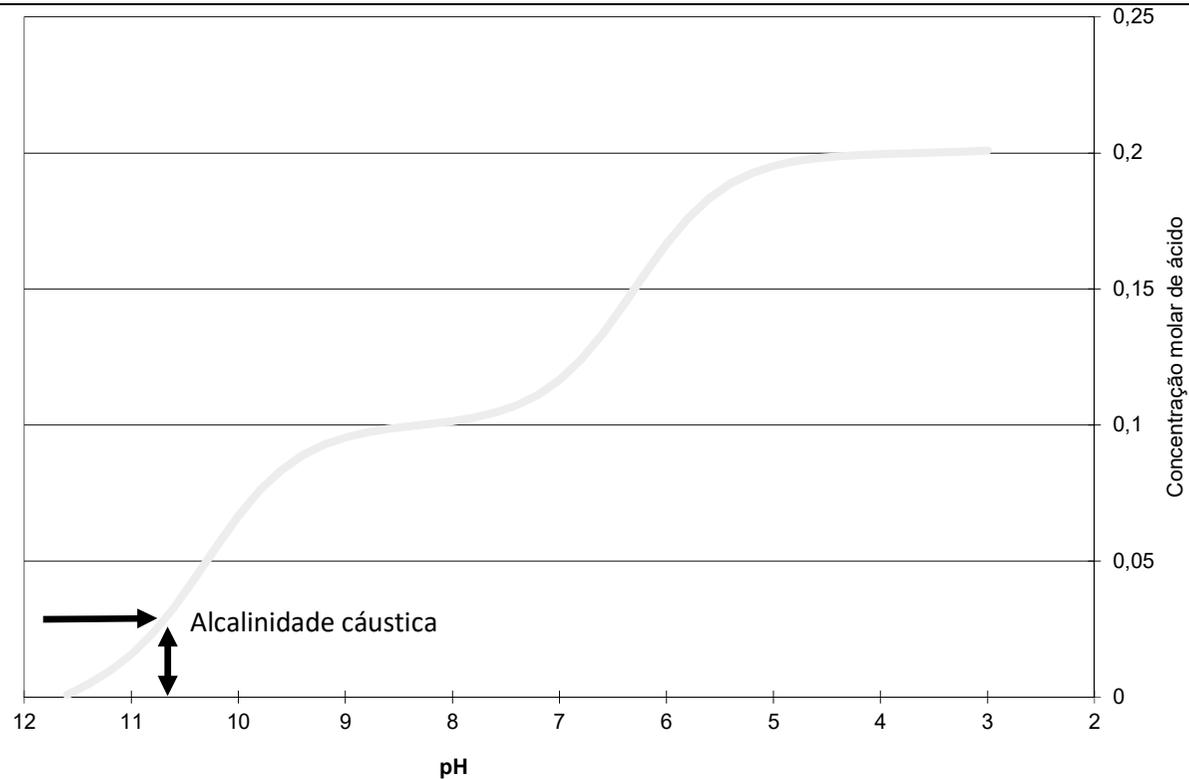
$$Alk_{total} = \frac{N_a \cdot V_2}{V_{amostra}} \text{ em } \frac{eq}{L}$$

$$Alk_{total} = \frac{N_a \cdot V_2 \cdot 50 \cdot 10^3}{V_{amostra}} \text{ em } \frac{mg \text{ CaCO}_3}{L}$$





# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE



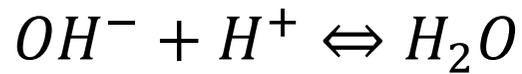
- Alcalinidade devido à hidróxidos



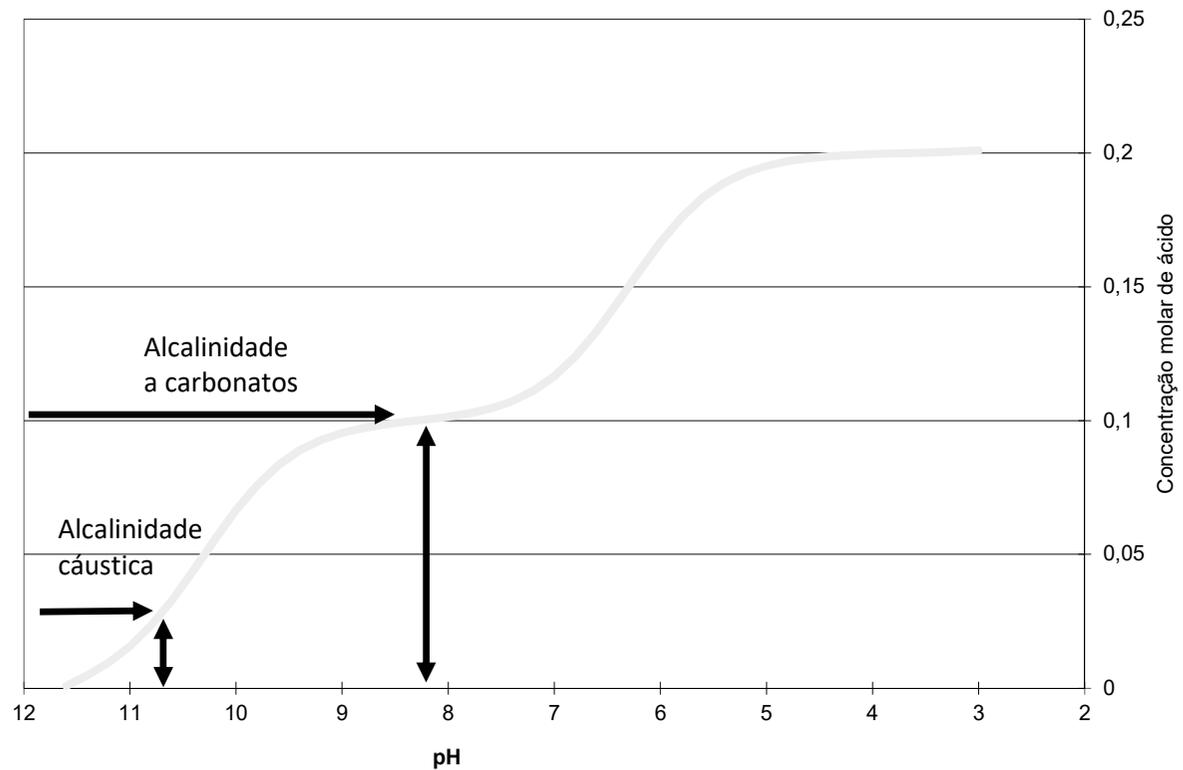
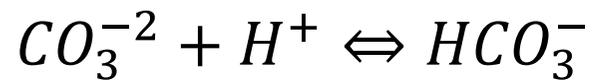


# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

- Alcalinidade a hidróxidos



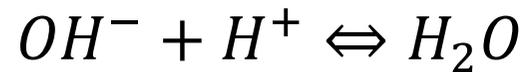
- Alcalinidade a carbonatos



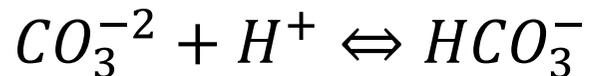


# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE

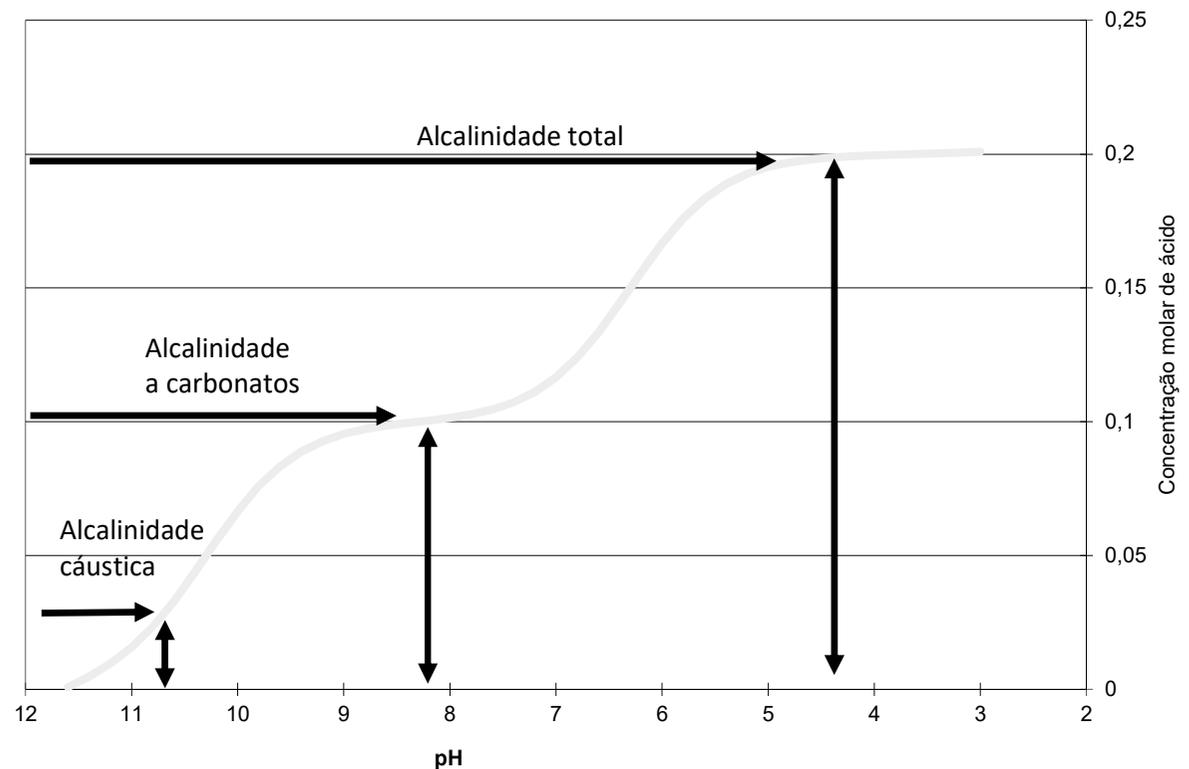
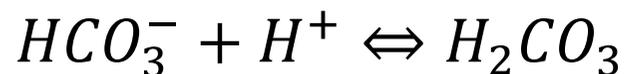
- Alcalinidade a hidróxidos

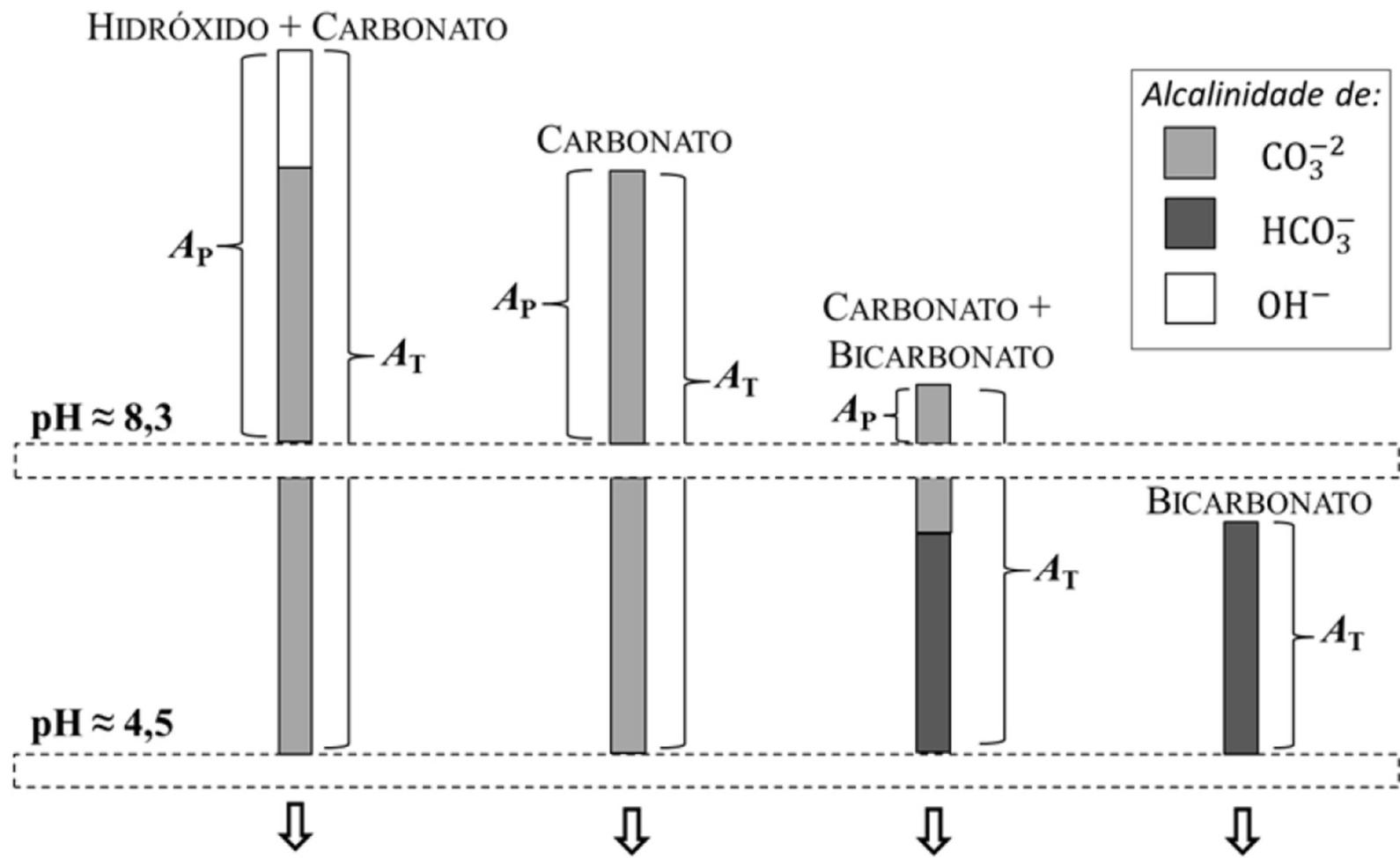


- Alcalinidade a carbonatos



- Alcalinidade total





$$A_T < 2A_P$$

Hidróxidos e carbonato:

$$AC = 2(AT - A_P)$$

$$AH = AT - AC$$

$$AH = 2A_P - AT$$

$$A_T = 2A_P$$

Carbonato:

$$AC = AT = 2A_P$$

$$A_T > 2A_P$$

Carbonato e bicarbonato:

$$AC = 2A_P$$

$$AB = AT - 2A_P$$

$$A_P = 0$$

Bicarbonato:

$$AB = AT$$



# IMPORTÂNCIA NA ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

---

- Controle de processos de coagulação e floculação;
- Operação de processos de abrandamento;
- Controle de corrosão;
- Definição da capacidade de tamponamento da fase líquida;
- Solubilidade química;





# IMPORTÂNCIA NA ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

---

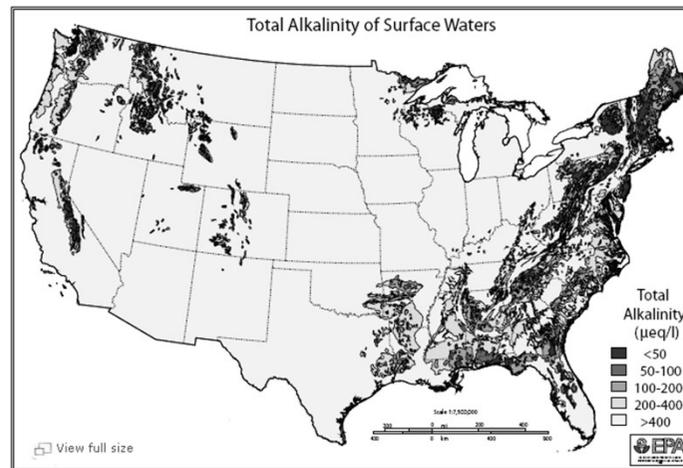
- Operação de processos biológicos de tratamento
- Variações de pH na fase líquida em razão de crescimento excessivo de algas





# IMPORTÂNCIA NA ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

- Águas superficiais: 20 a 100 mg CaCO<sub>3</sub>/L;
- Águas subterrâneas: 50 a 400 mg CaCO<sub>3</sub>/L ;
- Digestores anaeróbios: 2.000 a 5.000 mg CaCO<sub>3</sub>/L;



# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ACIDEZ

---

- A acidez de uma amostra líquida é a sua capacidade de neutralizar bases fortes;
- Origem: Presença de carbono inorgânico total e demais ácidos conjugadas de bases fracas na fase líquida;





# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ACIDEZ

---

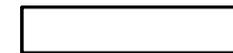
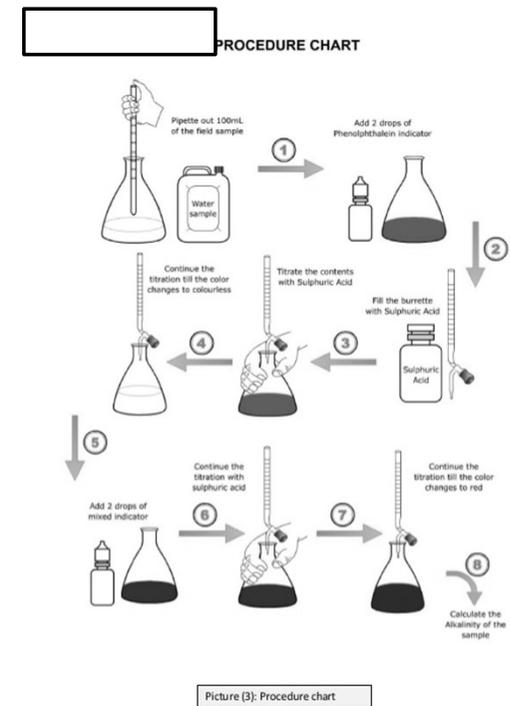
- Análise titulométrica com base forte;
- Unidade: eq/L ou mg CaCO<sub>3</sub>/L;





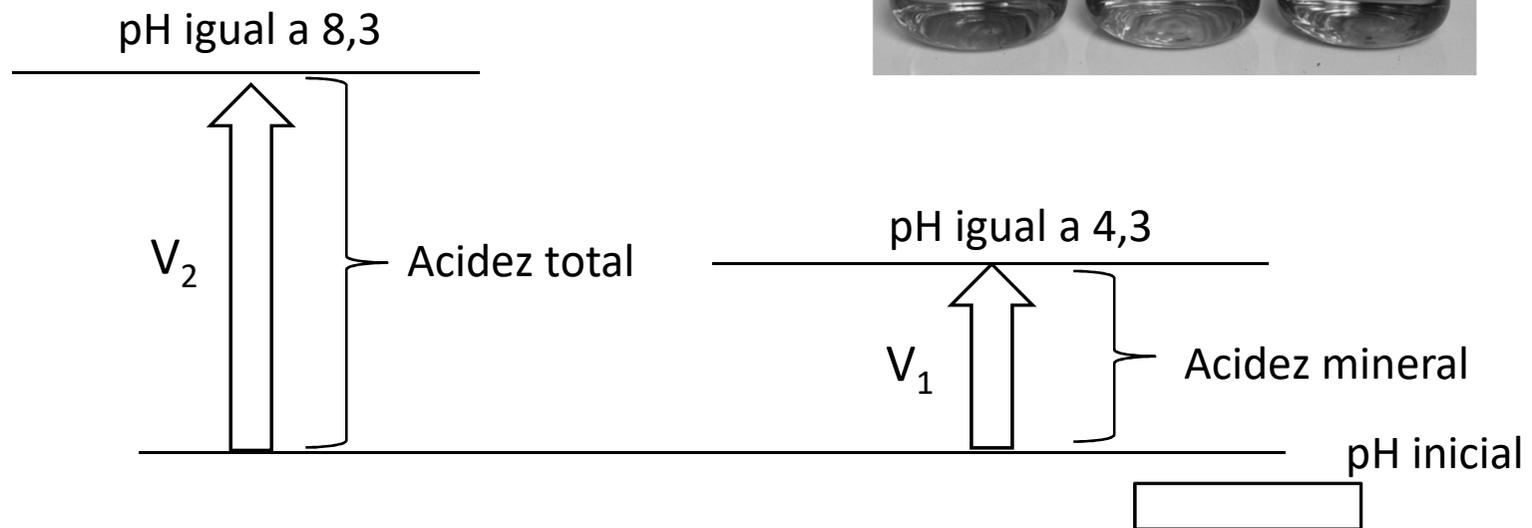
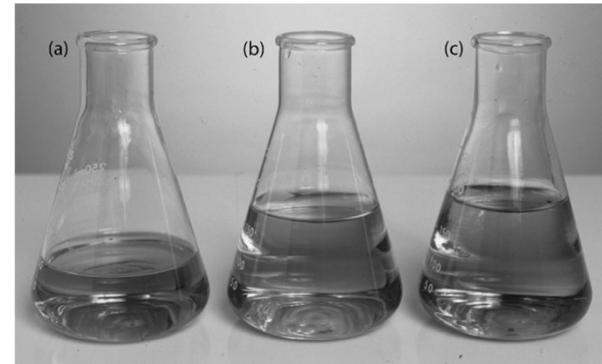
# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ACIDEZ

- Análise titulométrica;
- Hidróxido de sódio 0,02 N;
- Indicadores:
  - Alaranjado de metila e fenolftaleína.
- Acidez mineral: titulação até pH 4,3;
- Acidez total: titulação até pH 8,3.





# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ACIDEZ



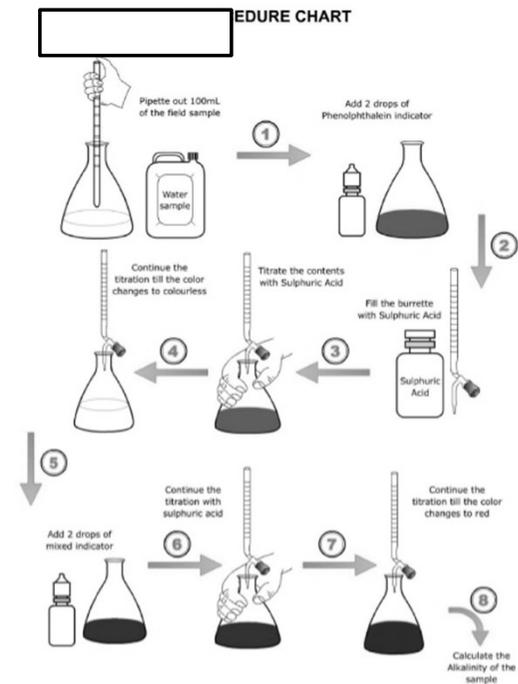


# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ACIDEZ

## ■ Cálculos

$$Acidez_{min} = \frac{N_b \cdot V_1}{V_{amostra}} \text{ em } \frac{eq}{L}$$

$$Acidez_{min} = \frac{N_b \cdot V_1 \cdot 50 \cdot 10^3}{V_{amostra}} \text{ em } \frac{mg \text{ CaCO}_3}{L}$$



Picture (3): Procedure chart

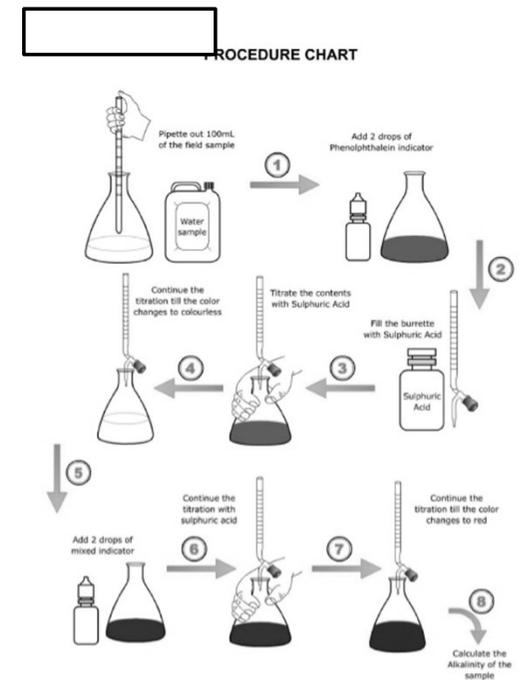


# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ACIDEZ

## ■ Cálculos

$$Acidez_{total} = \frac{N_b \cdot V_2}{V_{amostra}} \text{ em } \frac{eq}{L}$$

$$Acidez_{total} = \frac{N_b \cdot V_2 \cdot 50 \cdot 10^3}{V_{amostra}} \text{ em } \frac{mg \text{ CaCO}_3}{L}$$



Picture (3): Procedure chart



# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ACIDEZ

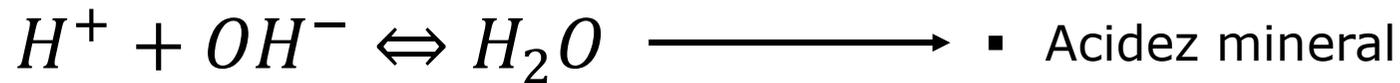
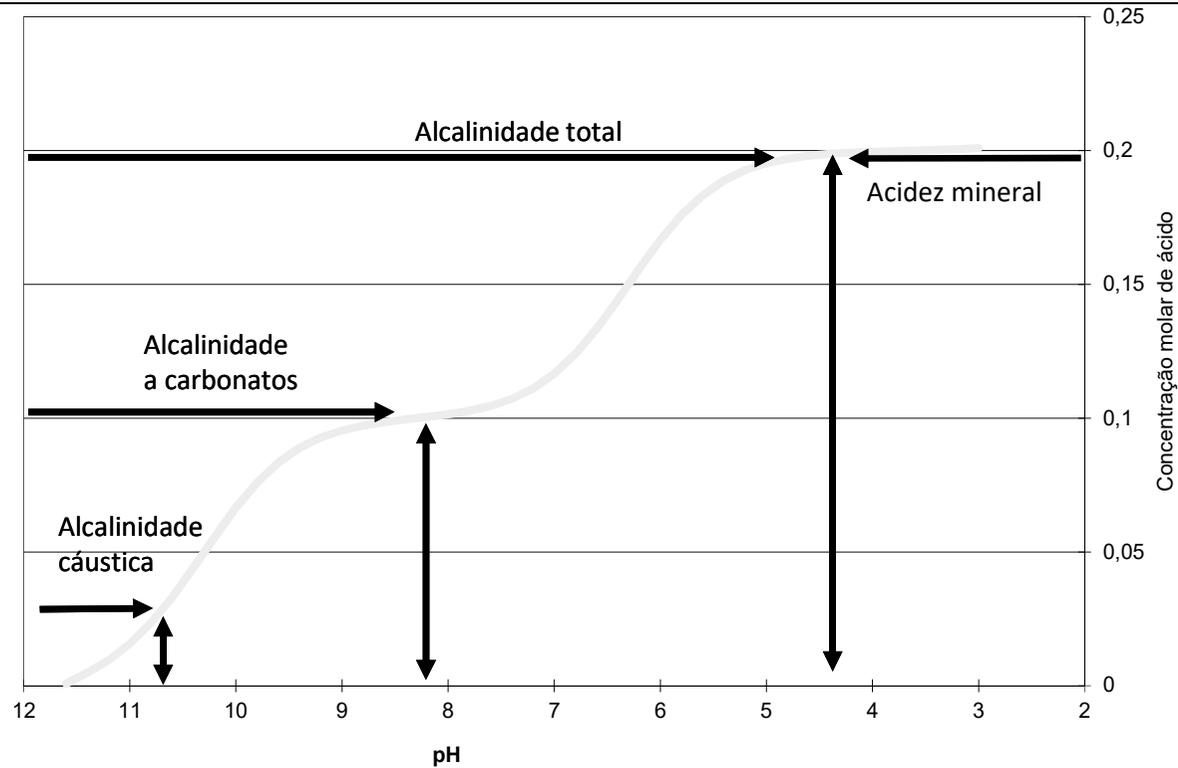
---

- Vídeo 2 – Análise de Acidez





# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE E ACIDEZ



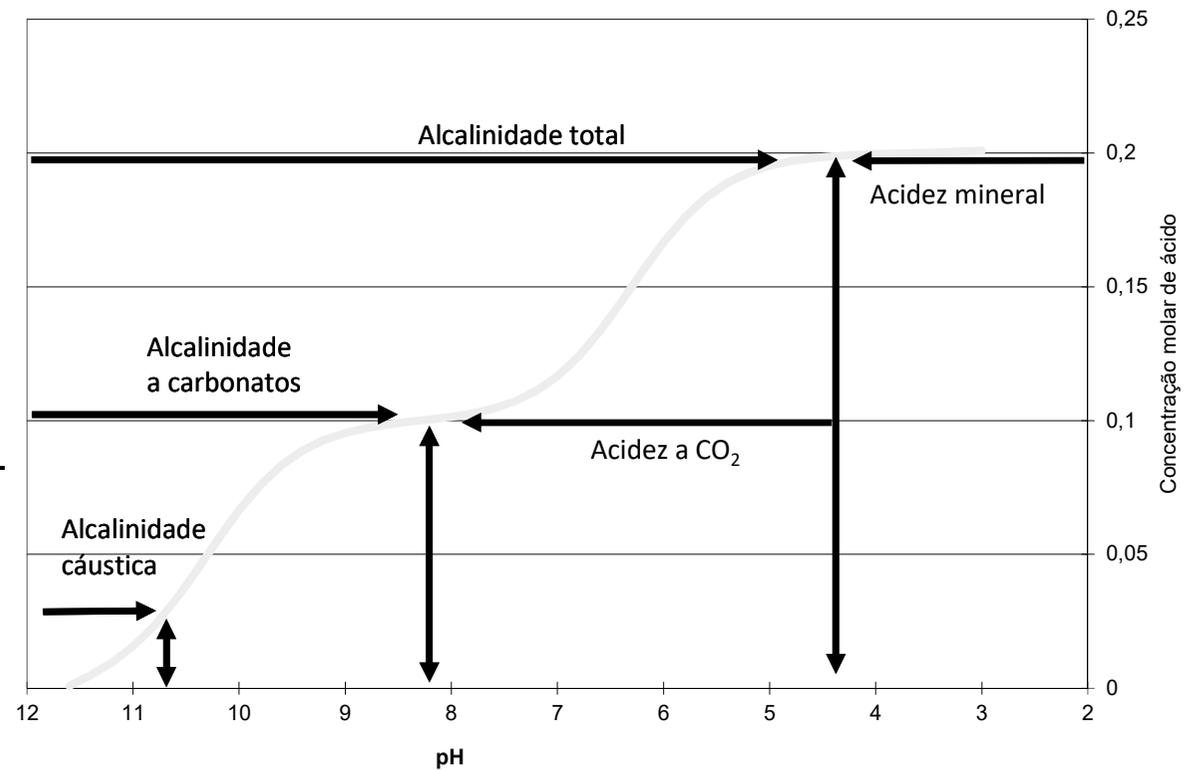


# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE E ACIDEZ

- Acidez mineral



- Acidez a  $CO_2$





# CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA: ALCALINIDADE E ACIDEZ

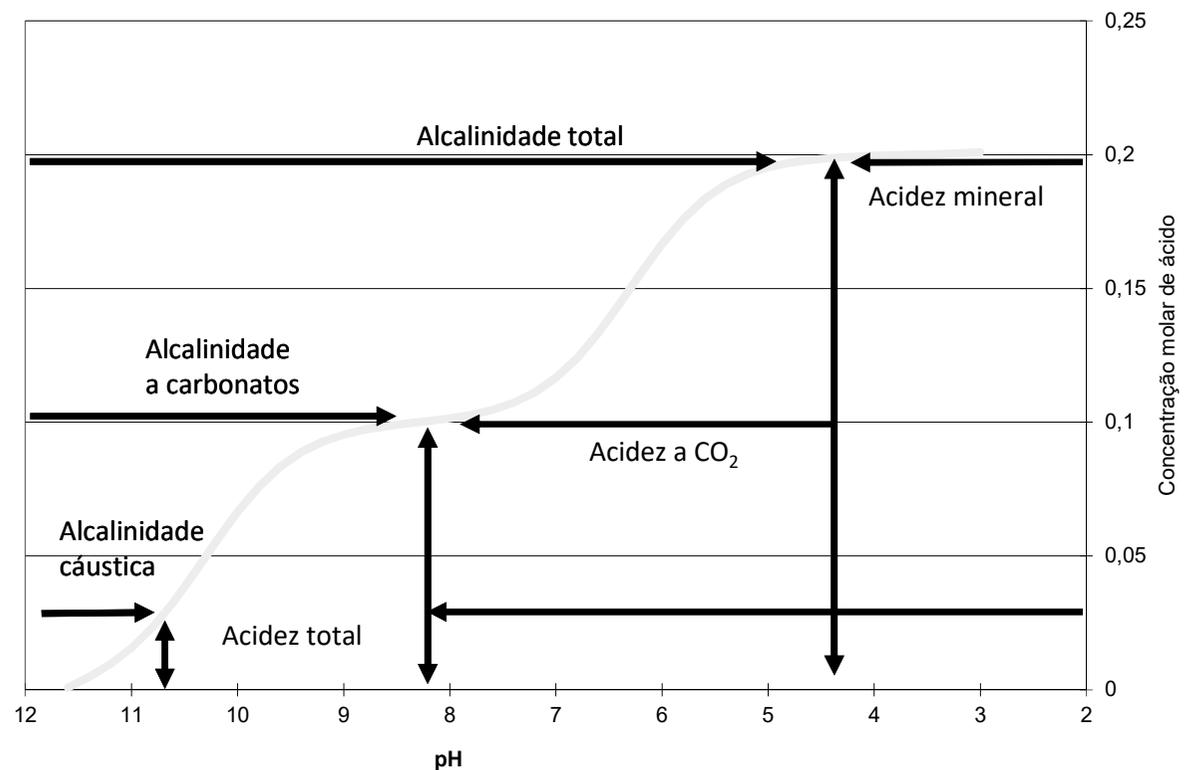
- Acidez mineral



- Acidez a  $CO_2$



- Acidez total





# IMPORTÂNCIA NA ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

---

- Definição da capacidade da fase líquida resistir a mudança do pH quando da adição de bases fortes;
- Não possui grande importância sanitária;
- A sua avaliação é efetuada juntamente com o parâmetro alcalinidade;



Muito  
Obrigado !!!

---

