

9) La criolite (esafluoroalluminato di trisodio) è preparata facendo reagire dell'allumina (triossido di dialluminio) con idrossido di sodio e fluoruro d'idrogeno. In un esperimento, 7,81 g di allumina e un eccesso di fluoruro d'idrogeno sono stati sciolti in 3,50 L di idrossido di sodio 0,141 M. Calcolare la resa percentuale nel caso in cui si ottengano 28,2 g di criolite.



Non è una ossido-riduzione

Bilancio dell'alluminio (da sx a dx)



Bilancio del sodio (da dx a sx)



Bilancio del fluoro (da dx a sx)



Bilancio dell'idrogeno



Bilancio dell'ossigeno soddisfatto



1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

$$M_1 = 2 \times 26,98 + 3 \times 16,00 = 101,96 \text{ g mol}^{-1}$$

$$n_{0,1} = \frac{m_{0,1}}{M_1} = \frac{7,81}{101,96} = 0,0765(99) \text{ mol}$$

$$n_{0,2} = c_{0,2} V_{0,2} = 0,141 \times 3,50 = 0,493(50) \text{ mol}$$

Calcolo del reagente limitante

$$\zeta_{max} = \min \left\{ \frac{n_{0,1}}{-\nu_1}, \frac{n_{0,2}}{-\nu_2} \right\} = \min \left\{ \frac{0,0765(99)}{1}, \frac{0,493(50)}{6} \right\}$$

$$\zeta_{max} = \min\{0,0765(99) ; 0,0822(50)\} = 0,0765(99) \text{ mol}$$

Il reagente limitante è l'allumina



1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

$$n_{4,T}^g = v_4 \zeta_{max} = 2 \times 0,0765(99) = 0,153(20) \text{ mol}$$

$$M_4 = 3 \times 22,99 + 26,98 + 6 \times 19,00 = 209,95 \text{ g mol}^{-1}$$

$$n_4^g = \frac{m_4^g}{M_4} = \frac{28,2}{209,95} = 0,134(31) \text{ mol}$$

Calcolo della resa relativa

$$\eta = \frac{n_4^g}{n_{4,T}^g} = \frac{0,134(31)}{0,153(20)} = 0,876(71) \quad 100 \eta = 87,7\%$$

10) Quanti grammi di acido acetico commerciale (**purezza 97,0 % in massa**) bisogna far reagire con un eccesso di cloruro fosforoso (tricloruro di fosforo) per preparare 75,0 g di cloruro di acetile (cloruro di etanoile) se la reazione a una resa del **78,2 %**. La reazione produce anche acido fosforoso (acido triossosforico (III)).



Bilancio del cloro (da sx a dx)



Bilancio del carbonio (da dx a sx)



Bilancio dell'idrogeno soddisfatto

$$H: 3 \times (3 + 1) = 3 \times 3 + 3$$

Bilancio dell'ossigeno soddisfatto

$$O: 3 \times 2 = 3 + 3$$



1	2	3	4
---	---	---	---

$$M_3 = 2 \times 12,01 + 3 \times 1,01 + 16,00 + 35,45 = 78,5 \text{ g mol}^{-1}$$

$$n_3^g = \frac{m_3^g}{M_3} = \frac{75,0}{78,5} = 0,955(41) \text{ mol}$$

$$n_3^g = \nu_3 \zeta = \nu_3 \eta \zeta_{max}$$

$$\zeta = \frac{n_3^g}{\nu_3} = \frac{0,955(41)}{3} = 0,318(47) \text{ mol}$$

$$\zeta_{max} = \frac{n_3^g}{\eta \nu_3} = \frac{\zeta}{\eta} = \frac{0,318(47)}{0,782} = 0,407(25) \text{ mol}$$

$$K^0 = \prod_i a_i^{\nu_i}$$

$$a_i = \frac{P_i}{p_0} \quad i \text{ gas ideale}$$

$$a_i = \frac{c_i}{c_0} \quad i \text{ soluto in soluzione diluita}$$

$$a_i \cong 1 \quad i \text{ solvente di una soluzione diluita}$$

$$a_i = 1 \quad i \text{ solido puro}$$

$$K_z = \prod_i z_i^{\nu_i} \quad K_c = \prod_i c_i^{\nu_i} \quad K_n = \prod_i n_i^{\nu_i} \quad K_p = \prod_i P_i^{\nu_i}$$

Miscela di gas ideali

$$PV = nRT \quad P_i V = n_i RT \quad c_i = \frac{n_i}{V} = \frac{P_i}{RT} \quad P_i = c_i RT$$

$$K^0 = \frac{K_p}{p_0^{\Delta\nu_g}} = K_c \left(\frac{RT}{p_0} \right)^{\Delta\nu_g} = K_n \left(\frac{RT}{Vp_0} \right)^{\Delta\nu_g}$$

1) Nel processo di ossidazione dell'ammoniaca è possibile la formazione dei seguenti prodotti: azoto, protossido di azoto, monossido di azoto e diossido di azoto.

Due possibili reazioni (non bilanciate) sono

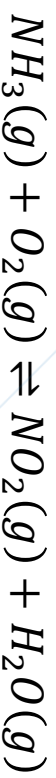


a) Scrivere e bilanciare una reazione chimica per l'ossidazione dell'ammoniaca a diossido d'azoto.

b) Calcolare la costante di equilibrio standard della reazione scritta.

Reazione 1

$$-3 \quad 0 \quad +4 \quad -2 \quad +1 \quad -2$$



L'azoto si ossida e l'ossigeno si riduce

$$-3 \quad +4$$



$$0 \quad -2$$



Bilancio degli elettroni formalmente trasferiti

$$n_{\text{Eox}} \times \Delta_{\text{ox}} + n_{\text{Ered}} \times \Delta_{\text{red}} = 0 \quad n_{\text{Eox}} = \nu_{\text{NH}_3} \quad n_{\text{Ered}} = 2 \nu_{\text{O}_2}$$

$$\nu_{\text{NH}_3} \times 7 + 2 \nu_{\text{O}_2} \times (-2) = 0 \quad \Rightarrow \quad 7 \nu_{\text{NH}_3} = 4 \nu_{\text{O}_2} \quad 7 \times 4 = 4 \times 7$$

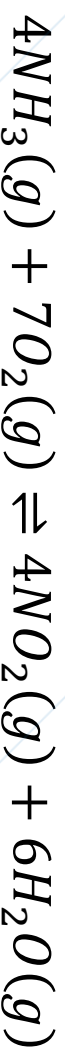




Bilancio dell'azoto (da sx a dx)



Bilancio dell'idrogeno (da sx a dx)



Bilancio dell'ossigeno soddisfatto



Reazione 2

$$-3 \quad 0 \quad +2 - 2 \quad +1 - 2$$



L'azoto si ossida e l'ossigeno si riduce

$$-3 \quad +2$$



$$0 \quad -2$$



Bilancio degli elettroni formalmente trasferiti

$$n_{Eox} \times \Delta_{ox} + n_{Ered} \times \Delta_{red} = 0 \quad n_{Eox} = \nu_{NH_3} \quad n_{Ered} = 2 \nu_{O_2}$$

$$\nu_{NH_3} \times 5 + 2 \nu_{O_2} \times (-2) = 0 \quad \Rightarrow \quad 5 \nu_{NH_3} = 4 \nu_{O_2}$$





Bilancio dell'azoto (da sx a dx)



Bilancio dell'idrogeno (da sx a dx)



Bilancio dell'ossigeno soddisfatto

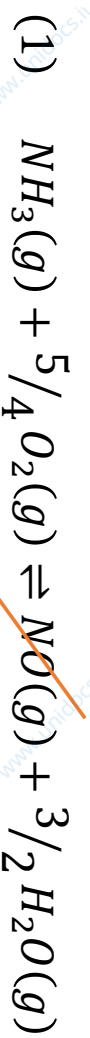




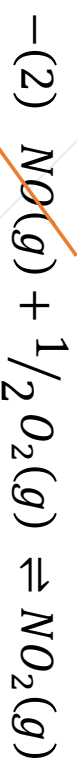
$$K^0 = 2,11 \times 10^{19} \quad a \ 700 \text{ K con } |\nu_{\text{NH}_3}| = 1$$



$$K^0 = 0,524 \quad a \ 700 \text{ K con } |\nu_{\text{NO}_2}| = 1$$



$$K^0 = 2,11 \times 10^{19} \quad a \ 700 \text{ K con } |\nu_{\text{NH}_3}| = 1$$



$$K^0 = 1/0,524 \quad a \ 700 \text{ K con } |\nu_{\text{NO}_2}| = 1$$



$$(3) = (1) - (2) \Rightarrow K^0_3 = \frac{K^0_1}{K^0_2} = \frac{2,11 \times 10^{19}}{0,524} = 4,03 \times 10^{19}$$

2) Il cloruro di antimonio (V) si dissocia in cloruro di antimonio (III) e cloruro gassoso ($K^0 = 0,108$ a $248,0^\circ\text{C}$). Partendo con $0,280$ mol di cloruro di antimonio (III) e $0,160$ mol di cloro si raggiunge l'equilibrio a $248,0^\circ\text{C}$ in un reattore da $2,50$ L. Calcolare le quantità molari delle specie reagenti all'equilibrio.



1 2 3

$$\Delta\nu = \sum_i \nu_i = 1 + 1 - 1 = 1$$

$$K^0 = \frac{K_p}{(P_0)^{\Delta\nu}} = K_c \left(\frac{RT}{P_0} \right)^{\Delta\nu} = K_n \left(\frac{RT}{P_0V} \right)^{\Delta\nu} \Rightarrow K_n = K^0 \left(\frac{P_0V}{RT} \right)^{\Delta\nu}$$

$$\frac{P_0V}{RT} = \frac{10^5 \times 2,50 \times 10^{-3}}{8,314463 \times 521,15} = 0,0576(96) \text{ mol}$$

$$K_n = K^0 \left(\frac{P_0V}{RT} \right)^{\Delta\nu} = 1,08 \times 0,0576(96) = 0,00623(11) \text{ mol}$$

$$\zeta^2 + 0,502(31)\zeta + 0,0448 = 0$$

$$\Delta = 0,502(31)^2 - 4 \times 0,0448 = 0,252(32) - 0,179 = 0,073(12) \text{ mol}^2$$

$$\sqrt{\Delta} = 0,27(04) \text{ mol}$$

$$\zeta_a = \frac{-0,502(31) + 0,27(04)}{2} = -0,11(60) \text{ mol}$$

$$\zeta_b = \frac{-0,502(31) - 0,27(04)}{2} = -0,38(64) \text{ mol}$$

Verifica delle radici

$$-(\zeta_a + \zeta_b) = 0,50(24) \text{ mol}$$

$$\zeta_a \zeta_b = 0,044(82) \text{ mol}^2$$



1

2

3

$$n_1 = -\zeta_a = 0,12 \text{ mol}$$

$$n_2 = 0,280 + \zeta_a = 0,16 \text{ mol}$$

$$n_3 = 0,160 + \zeta_a = 0,044 \text{ mol}$$

$$n_1 = -\zeta_b = 0,39 \text{ mol}$$

$$n_2 = 0,280 + \zeta_b = -0,11 \text{ mol} < 0 \text{ non accettabile}$$

$$n_3 = 0,160 + \zeta_b = -0,23 \text{ mol} < 0 \text{ non accettabile}$$

ζ_b non è una soluzione accettabile

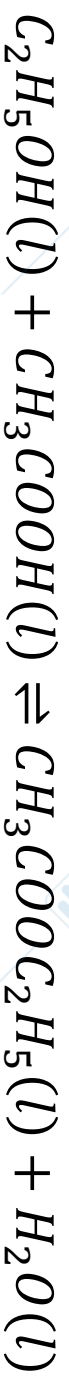
3) L'alcol etilico (etanolo) reagisce con l'acido acetico (acido etanoico) formando acetato di etile (etanoato di etile). La costante di equilibrio standard della reazione a 25,0 °C è $K_c = 4,0$ (coefficiente stechiometrico della acetato unitario).

Assumendo che una miscela inizialmente costituita da 17,2 g di alcol etilico, 23,8 g di acido acetico, 48,6 g di acetato e **71,2 g di acqua** abbia raggiunto l'equilibrio determinare:

- in che direzione è decorsa la reazione;
- le quantità in grammi delle specie chimiche all'equilibrio.



Il sistema non è diluito, è necessario considerare la concentrazione dell'acqua nell'equilibrio.



1

2

3

4

Assumiamo un comportamento ideale

$$K_c = \frac{c_3 c_4}{c_1 c_2} = \frac{(n_3/V)(n_4/V)}{(n_1/V)(n_2/V)} = \frac{n_3 n_4}{n_1 n_2} = K_n$$

$$K_c = K_n$$



1

2

3

4

Calcolo del quoziente di reazione iniziale

$$Q_0 = \frac{n_{3,0}n_{4,0}}{n_{1,0}n_{2,0}} = \frac{0,551(52) \times 3,95(12)}{0,373(26) \times 0,396(27)} = 14,7$$

$$K_c = K_n = 4,0$$

$$14,7 > 4,0$$

$Q_0 > K_c$ la reazione avviene spostandosi a sinistra (dai prodotti ai reagenti)

Il grado di avanzamento sarà negativo



1

2

3

4

Calcolo delle condizioni di equilibrio

$$n_1 = n_{1,0} - \zeta = 0,373(26) - \zeta$$

$$n_2 = n_{2,0} - \zeta = 0,396(27) - \zeta$$

$$n_3 = n_{3,0} + \zeta = 0,551(52) + \zeta$$

$$n_4 = n_{4,0} + \zeta = 3,95(12) + \zeta$$

$$K_n = \frac{n_3 n_4}{n_1 n_2} = \frac{(0,551(52) - \zeta)(3,95(12) - \zeta)}{(0,373(26) - \zeta)(0,396(27) - \zeta)}$$

$$K_n = \frac{n_3 n_4}{n_1 n_2} = \frac{(0,551(52) - \zeta)(3,95(12) - \zeta)}{(0,373(26) - \zeta)(0,396(27) - \zeta)}$$

$$K_n(0,373(26) - \zeta)(0,396(27) - \zeta) = (0,551(52) + \zeta)(3,95(12) + \zeta)$$

$$\begin{aligned} K_n[\zeta^2 - (0,373(26) + 0,396(27))\zeta + 0,373(26) \times 0,396(27)] &= \\ &= \zeta^2 + (0,551(52) + 3,95(12))\zeta + 0,551(52) \times 3,95(12) \end{aligned}$$

$$4,0 \times [\zeta^2 - 0,769(53)\zeta + 0,147(91)] = \zeta^2 + 4,50(27)\zeta + 2,17(91)$$

$$4,0\zeta^2 - 3,0(78)\zeta + 0,59(17) = \zeta^2 + 4,50(27)\zeta + 2,17(91)$$

$$3,0\zeta^2 - 7,58(08)\zeta - 1,58(75) = 0$$

$$\zeta^2 - 2,5(27)\zeta - 0,52(92) = 0$$

$$\zeta^2 - 2,5(27)\zeta - 0,52(92) = 0$$

$$\Delta = (-2,5(27))^2 + 4 \times 0,52(92) = 6,3(85) + 2,1(17) = 8,5(02) \text{ mol}^2$$

$$\sqrt{\Delta} = 2,9(16) \text{ mol}$$

$$\zeta_a = \frac{2,5(27) + 2,9(16)}{2} = 2,7(21) \text{ mol}$$

$$\zeta_b = \frac{2,5(27) - 2,9(16)}{2} = -0,19(44) \text{ mol}$$

Verifica delle radici

$$-(\zeta_a + \zeta_b) = -2,5(27) \text{ mol} \quad \zeta_a \zeta_b = 0,52(92) \text{ mol}^2$$

$$Q_0 > K^0 \Rightarrow \zeta < 0 \Rightarrow \zeta_a > 0 \text{ NON ACCETTABILE}$$

$$\zeta = \zeta_b = -0,19(44) \text{ mol}$$

$$\zeta = -0,19(44) \text{ mol}$$

$$n_1 = n_{1,0} - \zeta = 0,373(26) + 0,19(44) = 0,56(77) \text{ mol}$$

$$n_2 = n_{2,0} - \zeta = 0,396(27) + 0,19(44) = 0,59(07) \text{ mol}$$

$$n_3 = n_{3,0} + \zeta = 0,551(52) - 0,19(44) = 0,35(71) \text{ mol}$$

$$n_4 = n_{4,0} + \zeta = 3,95(12) - 0,19(44) = 3,75(67) \text{ mol}$$

$$m_1 = n_1 M_1 = 0,56(77) \times 46,08 = 26 \text{ g}$$

$$m_2 = n_2 M_2 = 0,59(07) \times 60,06 = 35 \text{ g}$$

$$m_3 = n_3 M_3 = 0,35(71) \times 88,12 = 31 \text{ g}$$

$$m_4 = n_4 M_4 = 3,75(67) \times 18,02 = 68 \text{ g}$$

4) A 250,0°C una miscela in equilibrio in un reattore da 2,50 L contiene 0,105 g cloruro fosforico, 0,220 g di cloruro fosforoso e 2,12 g di cloro. Calcolare la costante di equilibrio standard K^0 ($\nu_{PCL_5} = 1$), la costante di equilibrio basata sulla concentrazione K_c e quella sulla pressione K_p .



1 2 3

Tutte le specie chimiche sono in fase gassosa

$$K_c = \prod_i c_i^{\nu_i} = \prod_i \left(\frac{P_i}{RT} \right)^{\nu_i} = \frac{\prod_i P_i^{\nu_i}}{(RT)^{\Delta\nu}} = \frac{K_p}{(RT)^{\Delta\nu}} \quad K_p = K_c (RT)^{\Delta\nu}$$

$$K^0 = \prod_i \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{\nu_i} = \frac{\prod_i P_i^{\nu_i}}{(P_0)^{\Delta\nu}} = \frac{K_p}{(P_0)^{\Delta\nu}}$$

$$T = 273,15 + 250,0 = 523,1(5) \text{ K}$$

Calcolo delle concentrazioni delle specie chimiche

$$m_1 = 0,220 \text{ g} \quad M_1 = 30,97 + 3 \times 35,45 = 137,32 \text{ g mol}^{-1}$$

$$n_1 = \frac{m_1}{M_1} = \frac{0,220}{137,32} = 0,00160(2) \text{ mol} \quad c_1 = \frac{n_1}{V} = \frac{0,00160(2)}{2,50} = 6,40(84) \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$$

$$m_2 = 2,12 \text{ g} \quad M_2 = 2 \times 35,45 = 70,90 \text{ g mol}^{-1}$$

$$n_2 = \frac{m_2}{M_2} = \frac{2,12}{70,90} = 0,0299(01) \text{ mol} \quad c_2 = \frac{n_2}{V} = \frac{0,0299(01)}{2,50} = 1,11(96) \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$$

$$m_3 = 0,105 \text{ g} \quad M_3 = 30,97 + 5 \times 35,45 = 208,22 \text{ g mol}^{-1}$$

$$n_3 = \frac{m_3}{M_3} = \frac{0,105}{208,22} = 0,000504 \text{ mol} \quad c_3 = \frac{n_3}{V} = \frac{0,000504}{2,50} = 2,01(71) \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$$

Calcolo di K_c

$$K_c = \frac{c_3}{c_1 c_2} = \frac{2,01(71) \times 10^{-4}}{6,40(84) \times 10^{-4} \times 1,11(96) \times 10^{-2}} = 26,3(17) \text{ mol}^{-1} \text{ L} = 26,3(17) \times 10^{-3} \text{ mol}^{-1} \text{ m}^3$$

$$K_c = 26,3 \text{ mol}^{-1} \text{ L}$$

Calcolo di K_p

$$K_p = K_c (RT)^{\Delta \nu_g} = \frac{26,3(17) \times 10^{-3}}{8,314463 \times 523,1(5)} = 6,05(18) \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1} = 0,605(18) \text{ bar}^{-1}$$

$$K_p = 0,605 \text{ bar}^{-1}$$

Calcolo della costante di equilibrio standard (termodinamica)

$$K^0 = \frac{K_p}{P_0^{\Delta \nu_g}} = K_c \left(\frac{RT}{P_0} \right)^{\Delta \nu_g} = 0,605$$

$$P^0 = 100000 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$$

5) Una miscela gassosa contenente 0,150 mol di iodio e 0,150 mol di idrogeno è introdotta in un reattore da 3,25 L e lasciata raggiungere l'equilibrio a 445°C ($K^{\circ} = 50,2$; $|\nu_{I_2}| = 1$). Calcolare le moli di idrogeno, iodio e ioduro d'idrogeno all'equilibrio.



$$P_i = \frac{n_i RT}{V} \quad c_i = \frac{n_i}{V} = \frac{P_i}{RT}$$

$$K^{\circ} = \prod_i \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{\nu_i} = \prod_i \left(\frac{n_i RT}{P_0 V} \right)^{\nu_i} = \prod_i n_i^{\nu_i} \left(\frac{RT}{P_0 V} \right)^{\Delta \nu} = K_n \left(\frac{RT}{P_0 V} \right)^{\Delta \nu}$$

$$K^{\circ} = \frac{K_p}{(P_0)^{\Delta \nu}} = K_c \left(\frac{RT}{P_0} \right)^{\Delta \nu} = K_n \left(\frac{RT}{P_0 V} \right)^{\Delta \nu}$$

$$\Delta \nu = \sum_i \nu_i = 2 - 1 - 1 = 0 \quad \Rightarrow \quad K^{\circ} = K_p = K_c = K_n$$



1	2	3
---	---	---

$$n_i = n_{i,0} + \nu_i \zeta$$

$$n_1 = 0,150 - \zeta \quad n_2 = 0,150 - \zeta$$

$$K^o = K_n = \prod_i (n_{i,0} + \nu_i \zeta)^{\nu_i} = \frac{(2\zeta)^2}{(0,150 - \zeta)^2} \Rightarrow \sqrt{K^o} = \frac{2\zeta}{0,150 - \zeta}$$

$$\sqrt{K^o} 0,150 - \sqrt{K^o} \zeta = 2\zeta$$

$$\sqrt{K^o} 0,150 = (2 + \sqrt{K^o}) \zeta$$

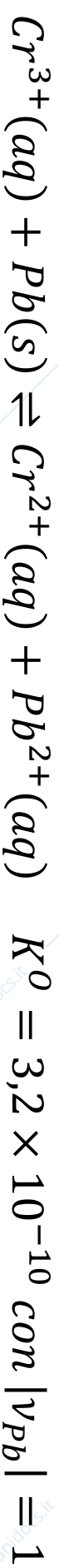
$$\zeta = 0,150 \frac{\sqrt{K^o}}{2 + \sqrt{K^o}} = 0,116(98) \text{ mol}$$

$$n_1 = n_{1,0} + \nu_1 \zeta = 0,150 - 0,116(98) = 0,033 \text{ mol}$$

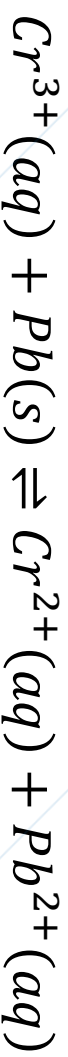
$$n_2 = n_{2,0} + \nu_2 \zeta = 0,150 - 0,116(98) = 0,033 \text{ mol}$$

$$n_3 = n_{3,0} + \nu_3 \zeta = 2 \times 0,116(98) = 0,234 \text{ mol}$$

6) A una soluzione acquosa 0,100 M di Cr^{3+} è stato aggiunto del piombo metallico in modo da realizzare il seguente equilibrio (reazione non bilanciata)



Calcolare le concentrazioni delle diverse specie ioniche all'equilibrio.



E' una ossido-riduzione, il piombo si ossida e il cromo si riduce.

Essendo in forma ionica, le cariche devono essere bilanciate





1 2 3 4

$$K^0 = \frac{a_3^2 a_4}{a_1^2 a_2}$$

Per i solidi l'attività è unitaria

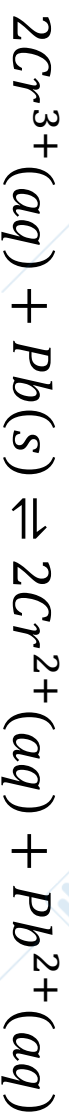
$$a_2 = 1 \text{ (Pb, solido)}$$

La soluzione è diluita, per i soluti

$$a_i = c_i / c_o \quad c_o = 1 \text{ M} = 1 \text{ mol L}^{-1}$$

$$K^0 = \frac{a_3^2 a_4}{a_1^2 a_2} = \frac{a_3^2 a_4}{a_1^2} = \frac{(c_3/c_o)^2 (c_4/c_o)}{(c_1/c_o)^2} = \frac{c_3^2 c_4}{c_1^2 c_o} = \frac{K_c}{c_o}$$

$$K_c = K^0 c_o$$



1	2	3	4
---	---	---	---

$$K_c = K^0 c_o = \frac{[Cr^{2+}]^2 [Cd^{2+}]}{[Cr^{3+}]^2} = 3,2 \times 10^{-10} \text{ mol L}^{-1}$$

Se si assume che il volume della soluzione non cambi durante la reazione

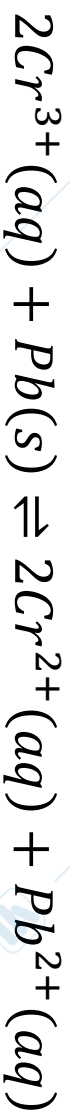
$$n_i = n_{i,0} + \nu_i \zeta \quad \Rightarrow \quad \frac{n_i}{V} = \frac{n_{i,0}}{V} + \nu_i \frac{\zeta}{V} \quad c_i = c_{i,0} + \nu_i x$$

$$c_1 = c_{1,0} - x = 0,100 - x$$

$$c_3 = 2x$$

$$c_4 = x$$

$$K_c = \frac{c_3^2 c_4}{c_1^2} = \frac{(2x)^2 x}{(0,100 - x)^2} = \frac{4x^3}{(0,100 - x)^2}$$



La reazione è fortemente spostata verso sinistra ($K^0 \ll 1$). La quantità di piombo che passa in soluzione è minima.

$$x \ll 0,100 \quad \Rightarrow \quad 0,100 - x \cong 0,100$$

$$K_c = \frac{4x^3}{(0,100 - x)^2} \cong \frac{4x^3}{(0,100)^2}$$

$$x = \sqrt[3]{\frac{1,00 \cdot 10^{-2} K_c}{4}} = \sqrt[3]{\frac{1,00 \cdot 10^{-2} \times 3,2 \cdot 10^{-10}}{4}} = 9,2(83) \cdot 10^{-5} M$$

$$c_1 = [Cr^{3+}] = 0,100 M$$

$$c_3 = [Cr^{2+}] = 2x = 2 \times 9,2(83) \cdot 10^{-5} = 1,9 \cdot 10^{-4} M$$

$$c_4 = [Pb^{2+}] = x = 9,3 \cdot 10^{-5} M$$