


EPUSP – Engenharia Ambiental

# Mineralogia



PEF-3304 Poluição de Solo

- 
- Solos são meios porosos criados na superfície terrestre por processos de intemperismo derivados de fenômenos biológicos, geológicos e hidrológicos.
  - Do ponto de vista químico, são sistemas biogeoquímicos abertos, formados por diversos componentes, contendo sólidos, líquidos e gases.
  - Sistemas abertos: solos trocam matéria e energia com a atmosfera, biosfera e hidrosfera (água, ar, biomassa, energia).



# Intemperismo

- Intemperismo físico e químico (desagregação e decomposição)
- Intemperismo é o responsável pelo desenvolvimento morfológico dos horizontes do solo e pela mineralogia da fração argila do solo.

Elemento	Solo (µg/g)	Crosta (µg/g)	FE	Elemento	Solo (µg/g)	Crosta (µg/g)	FE
<b>O</b>	<b>490000</b>	<b>474000</b>	<b>1.0</b>	F	950	430	2.2
<b>Si</b>	<b>310000</b>	<b>277000</b>	<b>1.1</b>	Sr	240	370	0.65
<b>Al</b>	<b>72000</b>	<b>82000</b>	<b>0.88</b>	<b>S</b>	<b>1600</b>	<b>260</b>	<b>6.2</b>
<b>Fe</b>	<b>26000</b>	<b>41000</b>	<b>0.63</b>	Zr	230	190	1.2
<b>Ca</b>	<b>24000</b>	<b>41000</b>	<b>0.59</b>	V	80	160	0.50
<b>Na</b>	<b>12000</b>	<b>23000</b>	<b>0.52</b>	Cl	100	130	0.77
<b>Mg</b>	<b>9000</b>	<b>23000</b>	<b>0.39</b>	Cr	54	100	0.54
<b>K</b>	<b>15000</b>	<b>21000</b>	<b>0.71</b>	Rb	67	90	0.74
Ti	2900	5600	0.52	Ni	19	80	0.24
P	430	1000	0.43	Zn	60	75	0.80
Mn	550	950	0.58	Cu	23	50	0.50
Ba	580	500	1.2	Nd	46	38	1.2
<b>C</b>	<b>25000</b>	<b>480</b>	<b>52</b>	La	37	32	1.2

Elemento	Solo (µg/g)	Crosta (µg/g)	FE	Elemento	Solo (µg/g)	Crosta (µg/g)	FE
Y	25	30	0.83	U	2.7	2.4	1.1
<b>N</b>	<b>2000</b>	<b>25</b>	<b>80</b>	Sn	1.3	2.2	0.59
Li	24	20	1.2	Ge	1.2	1.8	0.67
Nb	11	20	0.55	Mo	0.97	1.5	0.65
Co	9.1	20	0.46	As	7.2	1.5	4.8
Ga	17	18	0.94	Br	0.85	0.37	2.3
Sc	8.9	16	0.56	Sb	0.66	0.20	3.3
Pb	19	14	1.4	I	1.2	0.14	8.6
Th	9.4	12	0.78	Cd	0.35	0.11	3.2
B	33	10	3.3	Ag	0.05	0.07	0.71
Cs	4.0	3.0	1.3	Se	0.39	0.05	7.8
Be	0.92	2.6	0.35	Hg	0.09	0.05	1.8



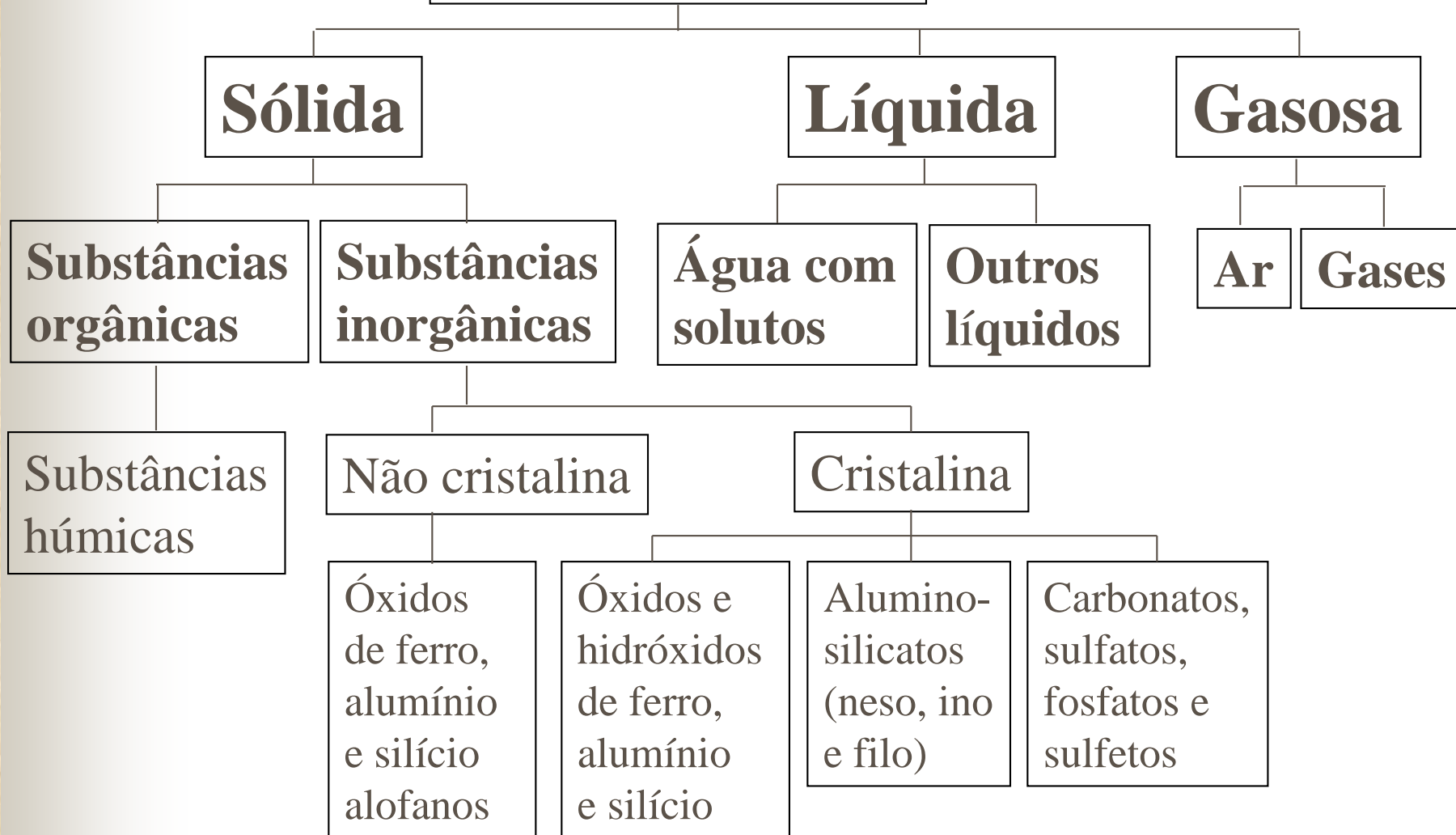
# Elementos-traço

- qualquer elemento químico cuja concentração na fase sólida é menor ou igual a 100 mg/kg
- minerais do solo são reservatórios para esses elementos, liberando-os na água do solo lentamente por ação do intemperismo
- Nos minerais primários: B, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Pb

como constituintes dos minerais (B na turmalina, Ti no rutilo) ou por substituição isomórfica (Ni substituindo Fe em olivinas, piroxênio, anfibólios e micas).



# Fases do solo



(Yong et al., 1992)



# Substâncias húmicas

- Materiais orgânicos escuros, transformados por ação microbiana, que persistem ao longo do desenvolvimento do perfil
- Ácido húmico:  $C_{187}H_{186}O_{89}N_9S$
- Ácido fúlvico:  $C_{135}H_{182}O_{95}N_5S_2$
- relativamente a organismos vivos e biomoléculas: enriquecimento de C e empobrecimento de N





# Mineral

- Mineral é um elemento ou composto químico que ocorre na natureza formado por um processo geológico.
- Os minerais são classificados pela natureza e pelo arranjo dos átomos.



# Minerais mais comuns

- Primários: herdados da rocha-matriz  
quartzo, feldspato, mica, anfibólio, piroxênio, olivina
- Índices: altamente resistentes ao intemperismo  
epídoto, turmalina, zircão, rutílio
- Secundários: transformação dos minerais primários pelo intemperismo  
caulinita  
esmectita, vermiculita, clorita  
gibbsita, goethita, hematita, limonita  
calcita, gipsita



# Mineral

Classificação por natureza:

- carbonatos
- fosfatos
- silicatos
- óxidos

Os silicatos representam 90% dos minerais.




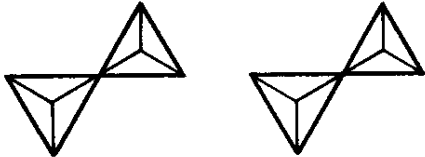
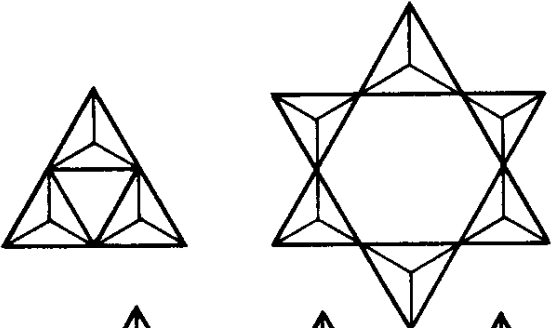
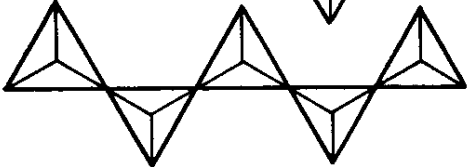
# Mineral

Classificação por arranjo dos silicatos:

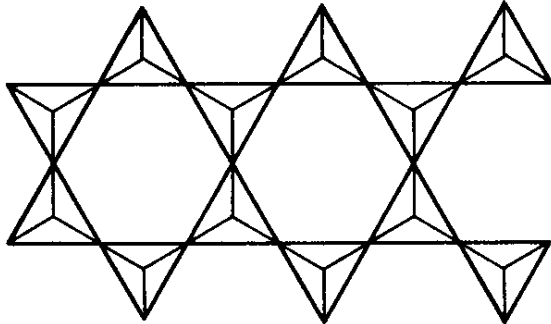
- Tetraedros independentes (zircônio)
- Tetraedros duplos
- Anéis (berilo)
- Cadeias simples
- Cadeias duplas
- Folhas (argilo-minerais)
- “Frameworks” (quartzo).

Há relação entre o arranjo atômico e as propriedades físicas, químicas e óticas do mineral.

**Table 4.2 The Silicate Structures**

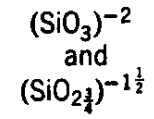
Structural Group	Diagrammatic Representation	No. Shared Oxygens per Silicon	Oxygen to Silicon Ratio	Si-O Unit and Charge	
Independent tetrahedrons		0	4:1	$(\text{SiO}_4)^{-4}$	Zircon
Double tetrahedrons		1	7:2	$(\text{SiO}_{3\frac{1}{2}})^{-3}$	Akermanite
Rings		2	3:1	$(\text{SiO}_3)^{-2}$	Beryl
Chains Single		2	3:1	$(\text{SiO}_3)^{-2}$	Enstatite

Double



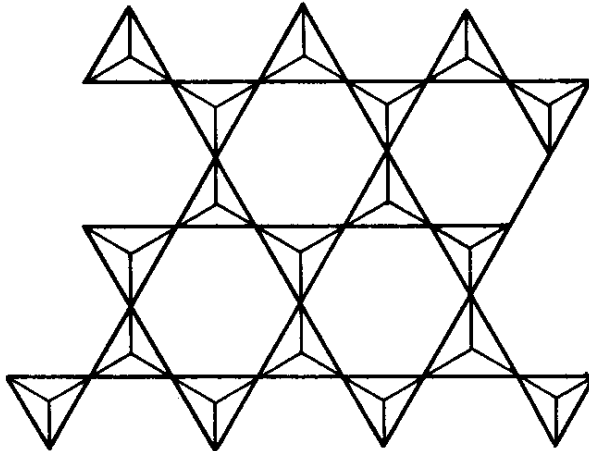
$2\frac{1}{2}$

11:4



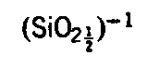
Tremolite

Sheets



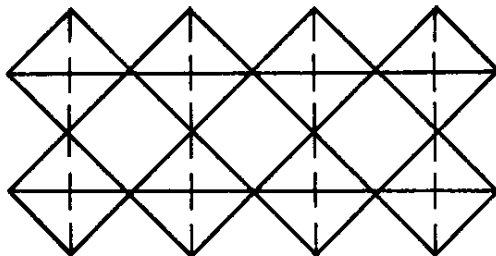
3

5:2



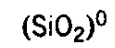
Pyrophyllite

Frameworks



4

2:1



Quartz





Fig. 1. Galena (010). cubic



Fig. 2. Fluorite (111). octahedral

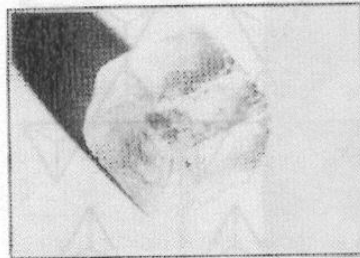


Fig. 3. Sphalerite (011).

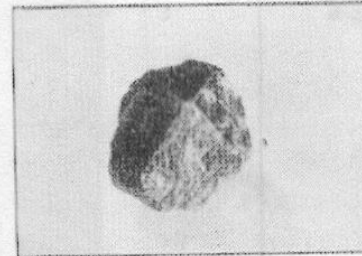


Fig. 4. Calcite (1011). rhombohedral

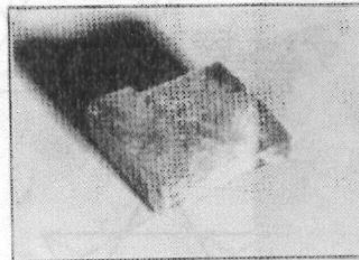


Fig. 5. Barite (001), (110).  
pinacoidal prismatic

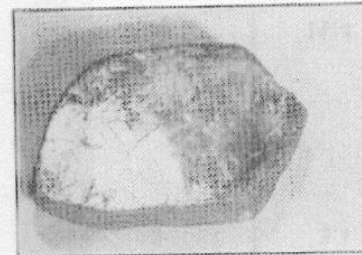


Fig. 6. Topaz (001).  
pinacoidal

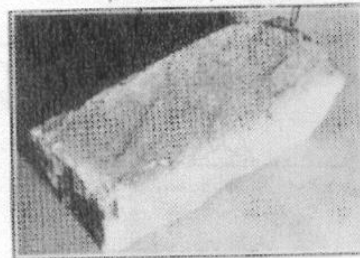


Fig. 7. Feldspar (001), (010).  
pinacoidal cubic

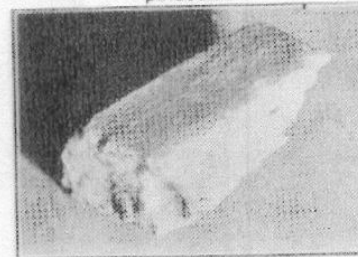
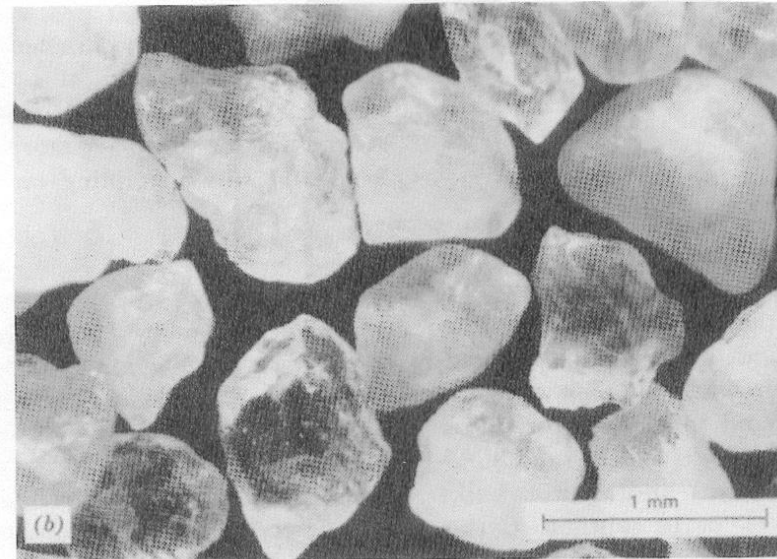
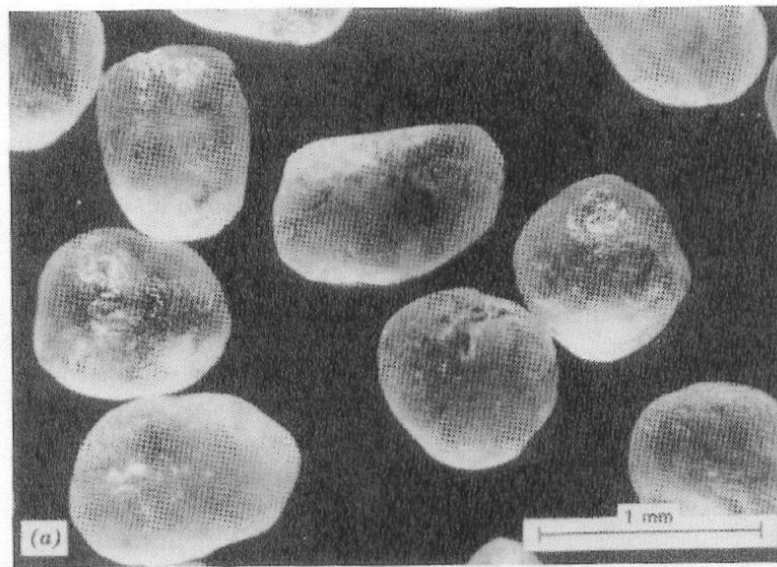


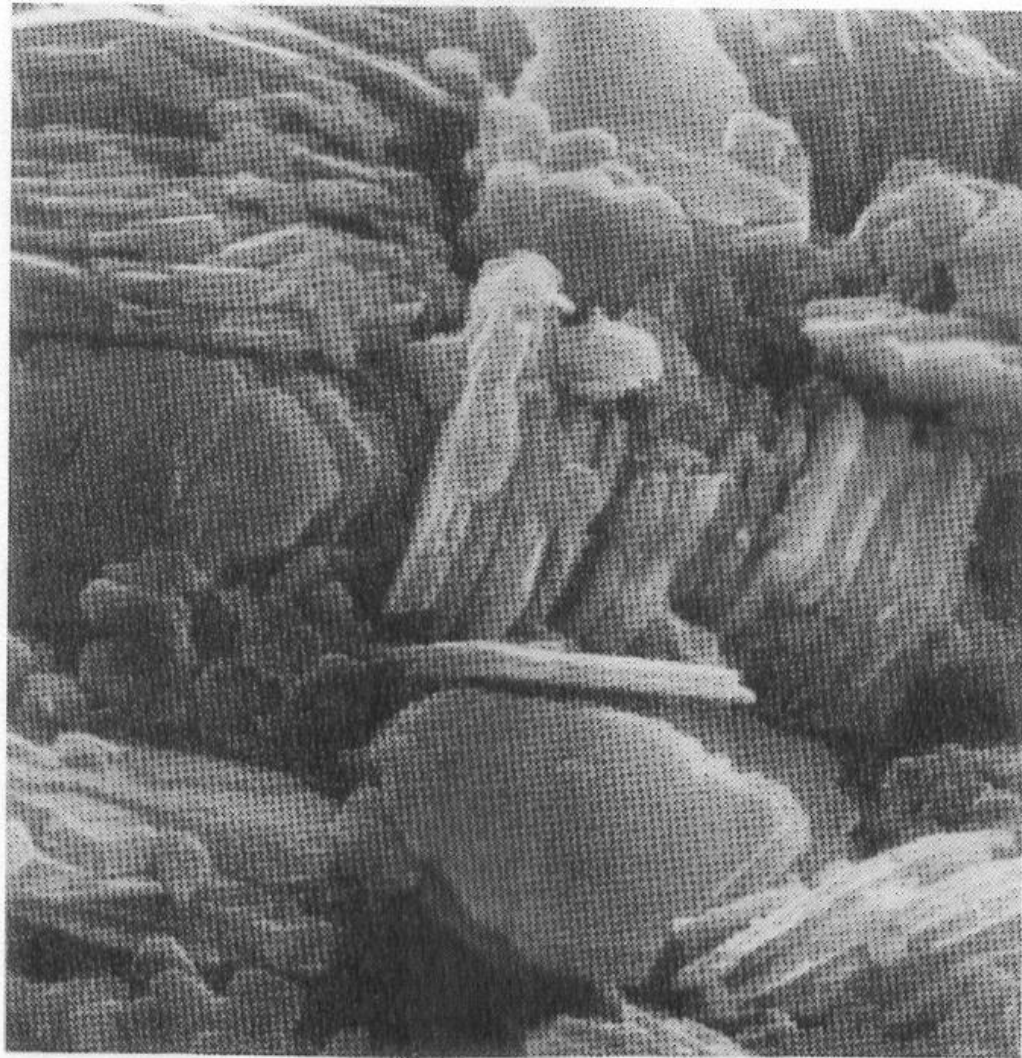
Fig. 8. Scapolite (110) and minor (010).  
prismatic cubic

Figure 2.3 Examples of some common crystals. {hkl} are cleavage plane indices. From *Dana's Manual of Mineralogy*, by C. S. Hurlbut, 16th Edition. Copyright © 1957 by John Wiley & Sons. Reprinted with permission from John Wiley & Sons.



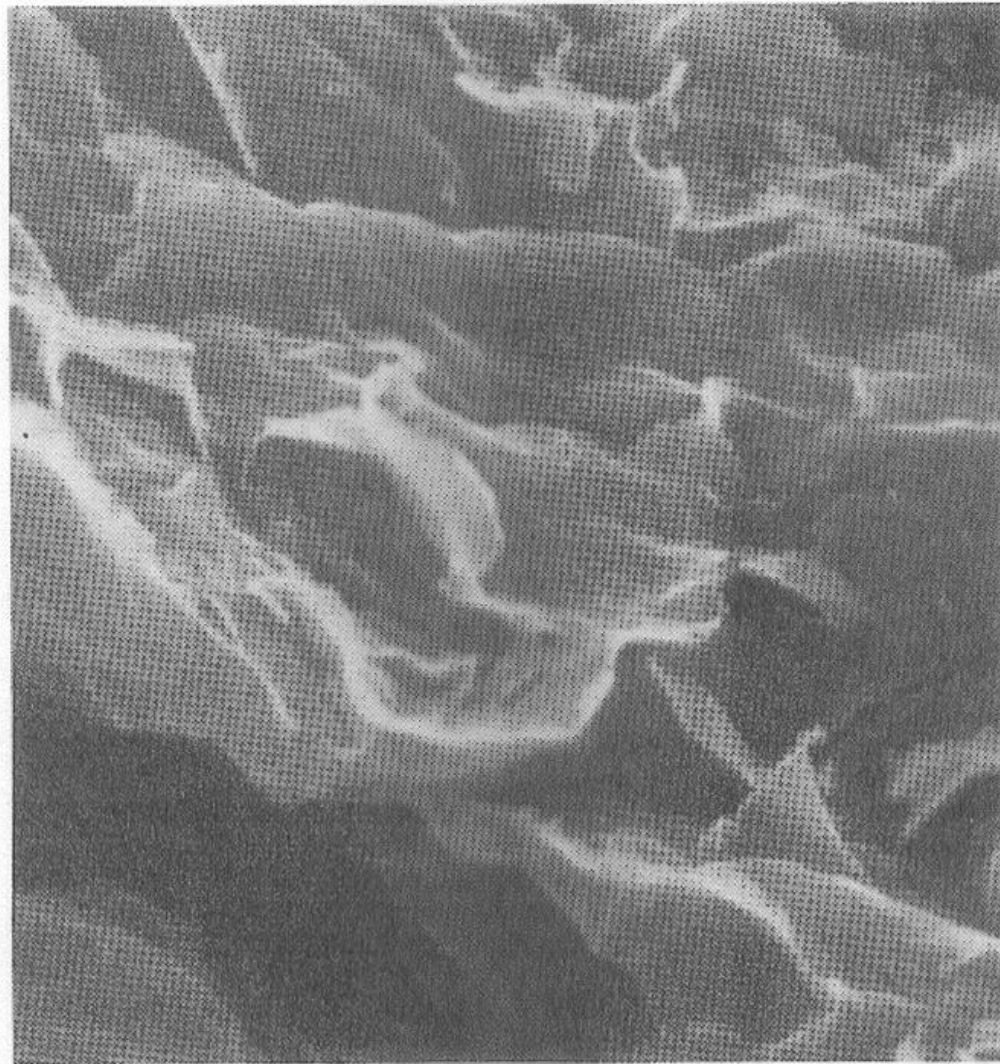
**Figure 3.3** Photomicrographs of sand and silt particles from several soils (a) Ottawa standard sand (courtesy of K. L. Lee). (b) Monterey sand (courtesy of K. L. Lee). (c) Sacramento River sand. (d) Eliot sand (courtesy of K. L. Lee). (e) Lunar soil mineral grains (photo courtesy Johnson Space Center). Squares in background area are  $1 \times 1$  mm. (f) Recrystallized breccia particles from lunar soil (photo courtesy of Johnson Space Center). Squares in background grid are  $1 \times 1$  mm.





**Figure 3.13** Electron photomicrograph of well-crystallized kaolinite from St. Austell, Cornwall, England. Picture width is  $17\ \mu\text{m}$  (Tovey, 1971).





**Figure 3.18** Electron photomicrograph of montmorillonite (bentonite) from Clay Spur, Wyoming. Picture width is  $7.5 \mu\text{m}$  (Tovey, 1971).





**Figure 3.14** Electron photomicrograph of halloysite from Bedford, Indiana. Picture width is 2  $\mu\text{m}$  (Tovey, 1971).



# Argilo-minerais

- Estruturas de folhas
- Unidades básicas: tetraedro de silício, octaedro de alumínio, octaedro de magnésio



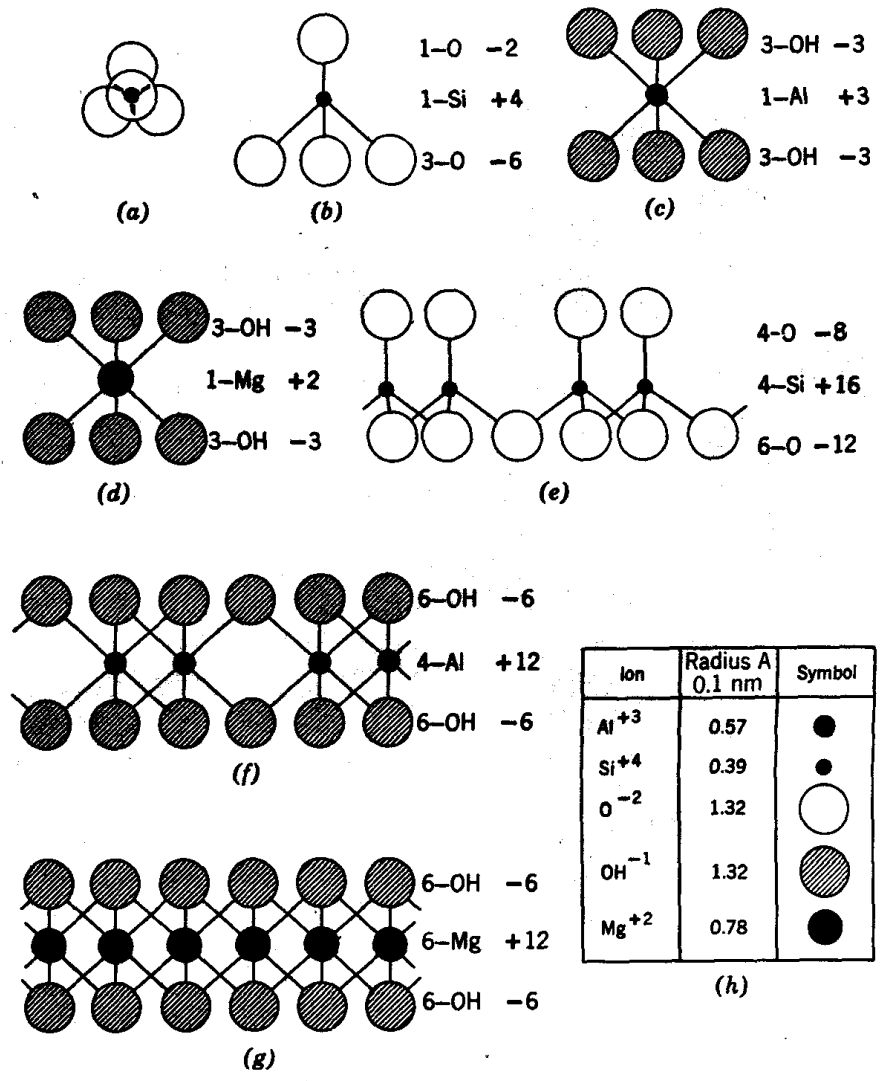
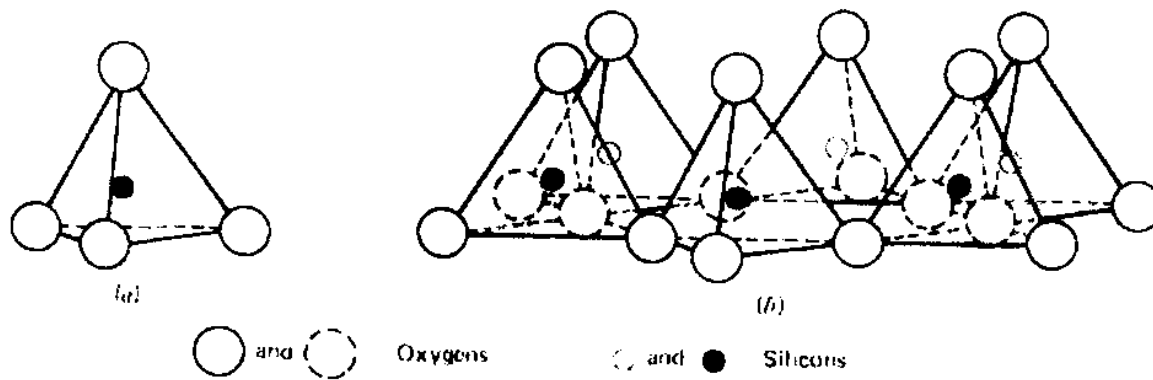


Fig. 4.6 Basic silicate units. (a) and (b) Silicon tetrahedron. (c) Aluminum octahedron. (d) Magnesium octahedron. (e) Silica. (f) Gibbsite. (g) Brucite.

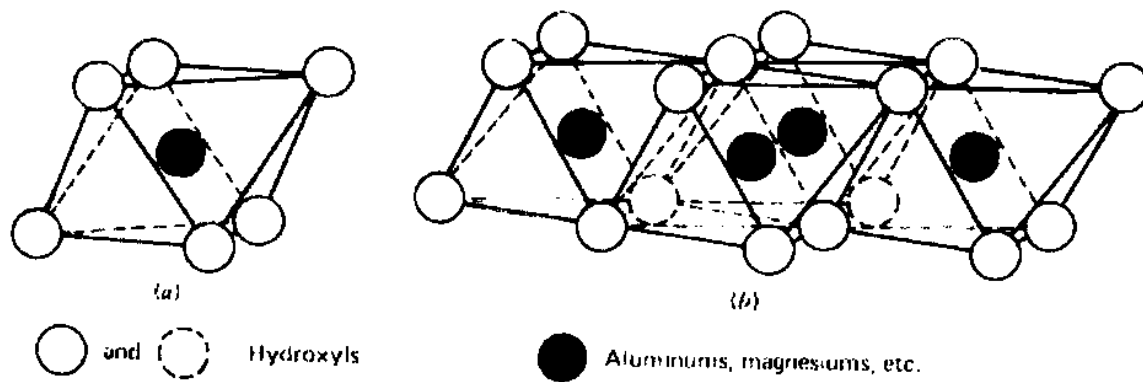


# Argilo-minerais

- Unidades básicas de silicatos que formam os argilo-minerais: tetraedro de sílica, octaedros de alumínio e magnésio. Esses poliedros não são eletricamente neutros e não existem isolados.
- A combinação de tetraedros de sílica forma uma camada de sílica. Os octaedros de alumínio e magnésio formam, respectivamente, camadas de gibbsita e brucita.



**Figure 3.5** Silicon tetrahedron and silica tetrahedra arranged in a hexagonal network.



**Figure 3.6** Octahedral unit and sheet structure of octahedral units.



# Argilo-minerais

- Os argilo-minerais são formados por folhas, compostas de 2 ou 3 camadas.
- Um conjunto de folhas forma uma partícula de argilo-mineral.
- Exemplos:
  - A caulinita é formada por 115 folhas, sendo cada folha formada por 2 camadas (sílica e gibbsita).
  - A serpentina é formada por folhas de 2 camadas (brucita e sílica).
  - A montmorilonita é formada por folhas com 3 camadas (sílica, gibbsita e sílica).

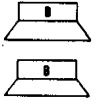
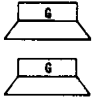
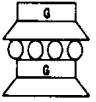
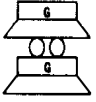
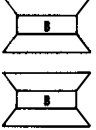
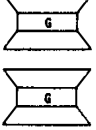
Mineral	Structure Symbol	Isomorphous Substitution (nature and amount)	Linkage between Sheets (type and strength)	Specific Surface (m <sup>2</sup> /g)	$\frac{1}{\text{Charge Density}} (\text{\AA}^2/\text{ion})$	Potential Exchange Capacity (me/100 g)	Actual Exchange Capacity (me/100 g)	Particle Shape	Particle Size
Serpentine		none	H-bonding + secondary valence			1	1	Platy or fibrous	
Kaolinite		Al for Si 1 in 400	H-bonding + secondary valence	10-20	83	3	3	Platy	$d = 0.3 \text{ to } 3 \mu\text{m}$ thickness $= \frac{1}{3} \text{ to } \frac{1}{10} d$
Halloysite (4H <sub>2</sub> O)		Al for Si 1 in 100	Secondary valence	40	55	12	12	Hollow rod	OD = 0.07 $\mu\text{m}$ ID = 0.04 $\mu\text{m}$ $L = 0.5 \mu\text{m}$
Halloysite (2H <sub>2</sub> O)		Al for Si 1 in 100	Secondary valence	40	55	12	12	Hollow rod	OD = 0.07 $\mu\text{m}$ ID = 0.04 $\mu\text{m}$ $L = 0.5 \mu\text{m}$
Talc		none	Secondary valence			1	1	Platy	
Pyrophyllite		none	Secondary valence			1	1	Platy	

Fig. 4.11 Sheet silicate minerals.



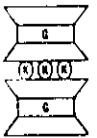

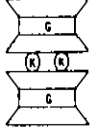
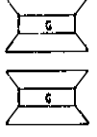
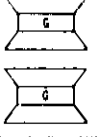
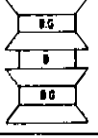
Muscovite		Al for Si 1 in 4	Secondary valence + K linkage			250	5-20	Platy	
Vermiculite		Al, Fe, for Mg Al for Si	Secondary valence + Mg linkage	5-400	45	150	150	Platy	$t = \frac{1}{10}d$ to $\frac{1}{30}d$
Illite		Al for Si, 1 in 7 Mg, Fe for Al Fe, Al for Mg	Secondary valence + K linkage	80-100	67	150	25	Platy	$d = 0.1$ to $2 \mu\text{m}$ $t = \frac{1}{10}d$
Montmorillonite		Mg for Al, 1 in 6	Secondary valence + exchangeable ion linkage	800	133	100	100	Platy	$d = 0.1$ to $1 \mu\text{m}$ $t = \frac{1}{100}d$
Nontronite		Al for Si, 1 in 6	Secondary valence + exchangeable ion linkage	800	133	100	100	Lath	$l = 0.4$ to $2 \mu\text{m}$ $t = \frac{1}{100}l$
Chlorite		Al for Si, Fe, Al for Mg	Secondary valence + brucite linkage	5-50	700	20	20	Platy	


Fig. 4.11 Sheet silicate minerals.





# Coordenação poliédrica (Linus Pauling)

<b>Poliedro</b>	<b>Número de coordenação</b>	<b><math>R_c/R_a</math></b>
<b>Tetraedro</b>	<b>4</b>	<b>0,224-0,414</b>
<b>Octaedro</b>	<b>6</b>	<b>0,414-0,732</b>
<b>Cubo</b>	<b>8</b>	<b>0,732-1</b>
<b>Dodecaedro</b>	<b>12</b>	<b>&gt;1</b>



<b>Ligação</b>	<b>Sílica</b>	<b>Gibbsita</b>	<b>Brucita</b>
<b>Composição</b>	<b>Si e O</b>	<b>Al e O</b>	<b>Mg e O</b>
<b>Relação entre raios atômicos</b>	<b>0,37</b>	<b>0,41</b>	<b>0,47</b>
<b>Número de coordenação</b>	<b>4</b>	<b>4 ou 6</b>	<b>6</b>
<b>Poliedro formado</b>	<b>Tetraedro</b>	<b>Tetraedro ou octaedro</b>	<b>Octaedro</b>



# Substituição isomórfica

- É a substituição de um cátion da estrutura cristalina de um mineral por outro com o mesmo número de coordenação em relação ao oxigênio (grosseiramente, por outro de tamanho similar).
- Por exemplo, na caulinita o silício da camada de sílica é substituído por alumínio na proporção 1:400; na montmorillonita o alumínio da camada de gibbsita é substituído por magnésio na proporção 1:6.



# Substituição isomórfica

A substituição isomórfica acarreta:

- Deficiência de carga elétrica
- Distorção do cristal (tamanho)



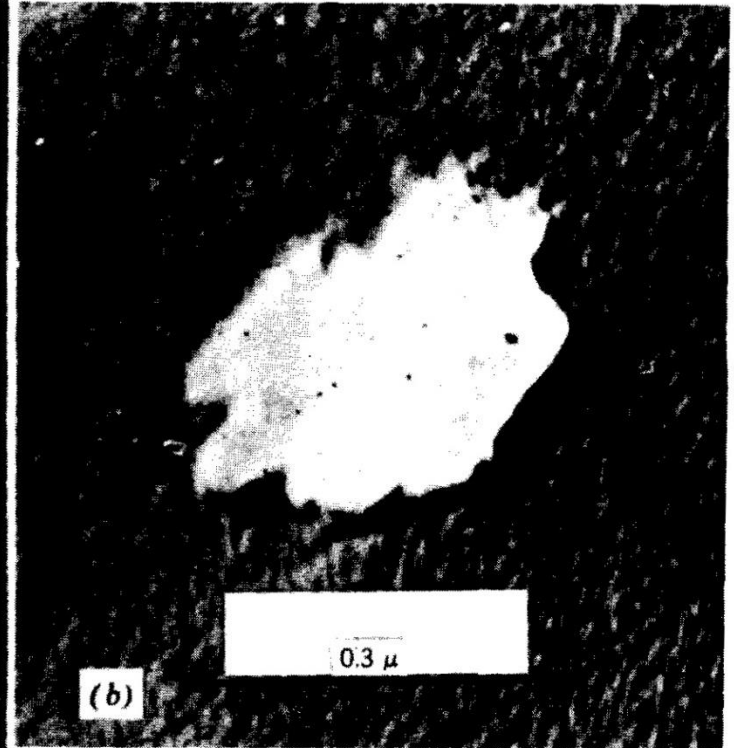
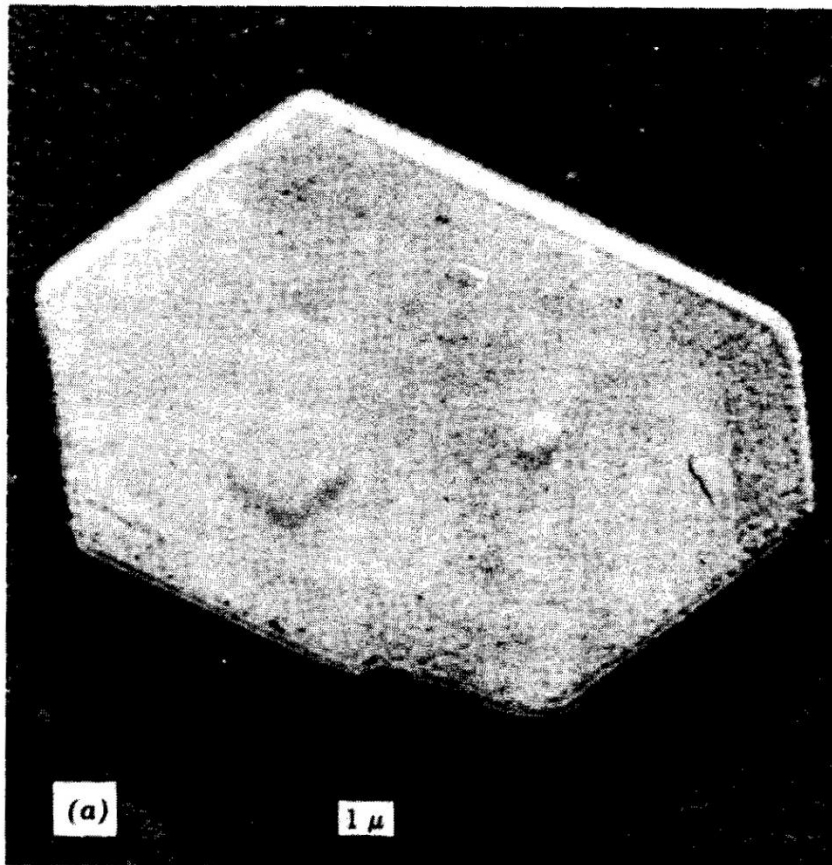


Fig. 4.4 Clay particles. (a) Kaolinite (From Lambe, 1951). (b) Illite (by R. T. Martin, M.I.T.).

(Lambe & Whitman, 1979)



# Superfície específica

- É a área superficial total existente por peso de argilo-mineral (por unidade de massa de solo).
- Indica a influência das forças de superfície sobre o comportamento da partícula em relação às forças de massa. A carga elétrica está relacionada à área da partícula, e as forças de massa, ao peso da partícula.
- Boa indicação da influência relativa das forças elétricas no comportamento das partículas.
- Quanto menor a partícula, maior a superfície específica.






Lado (cm)	Número de partículas	Volume total (cm <sup>3</sup> )	Área superficial (cm <sup>2</sup> )	Área / Volume (1/cm)
1	1	1	6	6
1x10 <sup>-4</sup>	10 <sup>12</sup>	1	60.000	60.000
1x10 <sup>-10</sup>	10 <sup>21</sup>	1	60.000.000	60.000.000



**Argilo-minerais**



**Superfície específica  
(m<sup>2</sup>/g)**

---

**Montmorillonita**

**Até 840**

**Ilita**


**65-200**

**Caulinita**

**10-20**

**Areia pura**

**≈ 2 x 10<sup>-4</sup>**



A montmorillonita tem uma deficiência de carga por unidade de peso em grau muito superior à caulinita, devido ao maior grau de substituição isomórfica. O Si é substituído por Al na proporção 1:400 na caulinita e o Al é substituído por Mg na proporção 1:6 na montmorillonita.

Por outro lado, a superfície específica da montmorillonita é muito maior do que a da caulinita.

A superfície específica é inversamente proporcional ao tamanho da partícula, e a caulinita é um dos maiores argilo-minerais.

# Montmorillonita



$$\text{Al: } 1,67 \times 26,97 = 45,0$$

$$\text{Mg: } 0,33 \times 24,32 = 8,0$$

$$\text{Na: } 0,33 \times 23,0 = 7,6$$

$$\text{Si: } 4 \times 28,06 = 112,4$$

$$\text{O: } 12 \times 16,00 = 192,0$$

$$\text{H: } 2 \times 1,00 = 2,0$$

$$\text{Total: } \underline{\underline{367,0}}$$





# Montmorillonita

- Mol = 367,0 g
- Deficiência de carga = 1/3 equivalentes elétricos por mol de massa igual a 367 g  
 $= (1/3)/367 = 0,091/100 = 91 \text{ me}/100\text{g}$
- Área superficial por unidade = 92,6 A
- Volume por unidade = 463 A<sup>3</sup>
- Massa específica = 2,76 g/cm<sup>3</sup>
- Massa por unidade = 1278x10<sup>-24</sup> g
- Área superficial por grama = 725 m<sup>2</sup>/g  
(Superfície específica)



# Capacidade de troca catiônica

- É a capacidade de dissociação e permuta de cátions ligados às superfícies e arestas das folhas dos argilo-minerais.

- É calculada por:

CTC = quantidade de cátions que podem ser trocados / peso

CTC = deficiência de carga em  $1 \text{ mol} \times N \times e /$   
peso de 1 mol

$N$  = número de Avogadro

$e$  = carga eletrônica



# Densidade de carga ( $\sigma$ )

- É a deficiência de carga por unidade de peso e por unidade de superfície (ou por unidade de superfície específica).
- Pode ser calculada por:

$$\sigma = CTC/S$$

CTC = capacidade de troca catiônica

S = superfície específica



<b>Propriedade da partícula</b>	<b>Caulinita</b>	<b>Ilita</b>	<b>Montmorillonita</b>
<b>Espessura d (Å)</b>	<b>1000</b>	<b>100</b>	<b>10</b>
<b>Espessura da camada dupla (Å)</b>	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>300</b>
<b>Largura L (Å)</b>	<b>10000</b>	<b>3000</b>	<b>1000</b>
<b>L/d</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>100</b>
<b>CTC (me/100g)</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>100</b>
<b>Superfície específica (m<sup>2</sup>/g )</b>	<b>10</b>	<b>80</b>	<b>700 a 800</b>
<b>1/σ (Å<sup>2</sup>/e)</b>	<b>50</b>	<b>65</b>	<b>120</b>





# Referências bibliográficas

- Soil Mechanics. T.W. Lambe & R.V. Whitman. 1979. John Wiley & Sons.
- The Chemistry of Soils. Garrison Sposito. 1989. Oxford University Press.
- Fundamentals of Soil Behavior. J.K. Mitchell. 1976. John Wiley & Sons.