



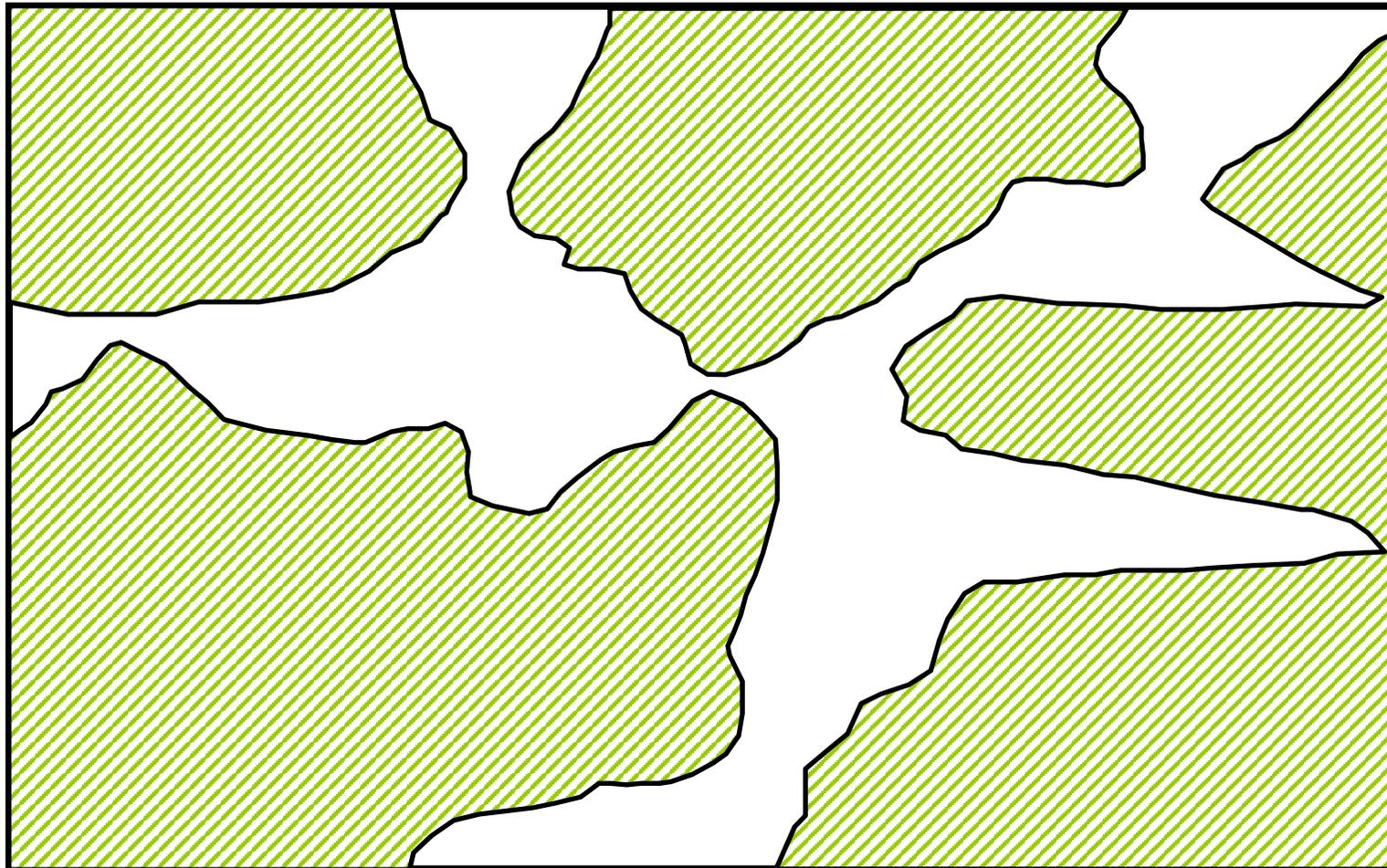
**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**

“POROSIDADE DAS ROCHAS”

PMI 1673 - Mecânica de Fluidos Aplicada a Reservatórios

Prof. Eduardo César Sansone

MATRIZ ROCHOSA E OS ESPAÇOS DOS POROS

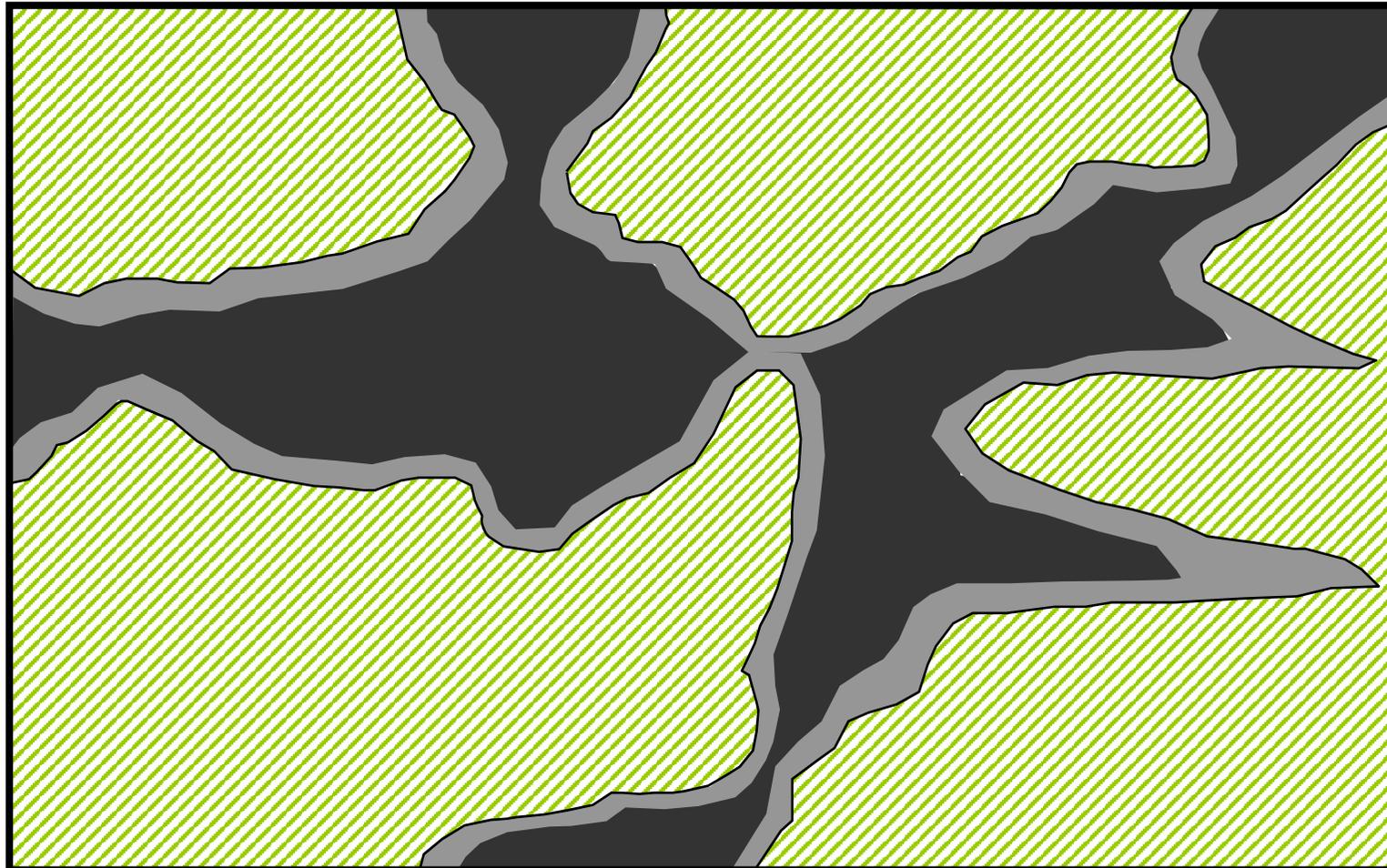


Matriz da Rocha



Espaço dos Poros

MATRIZ ROCHOSA E OS ESPAÇOS DOS POROS



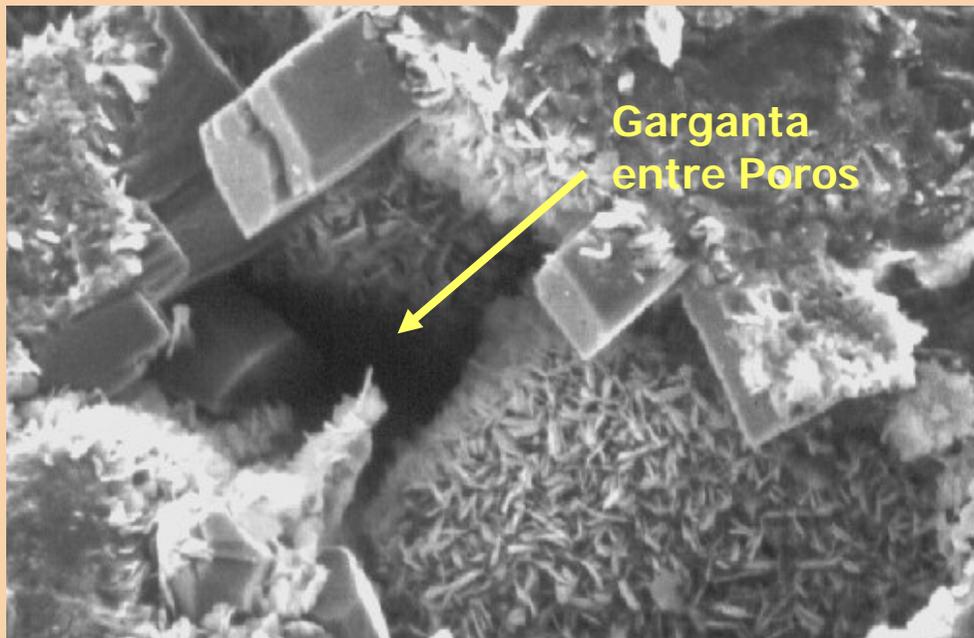
Matriz da Rocha



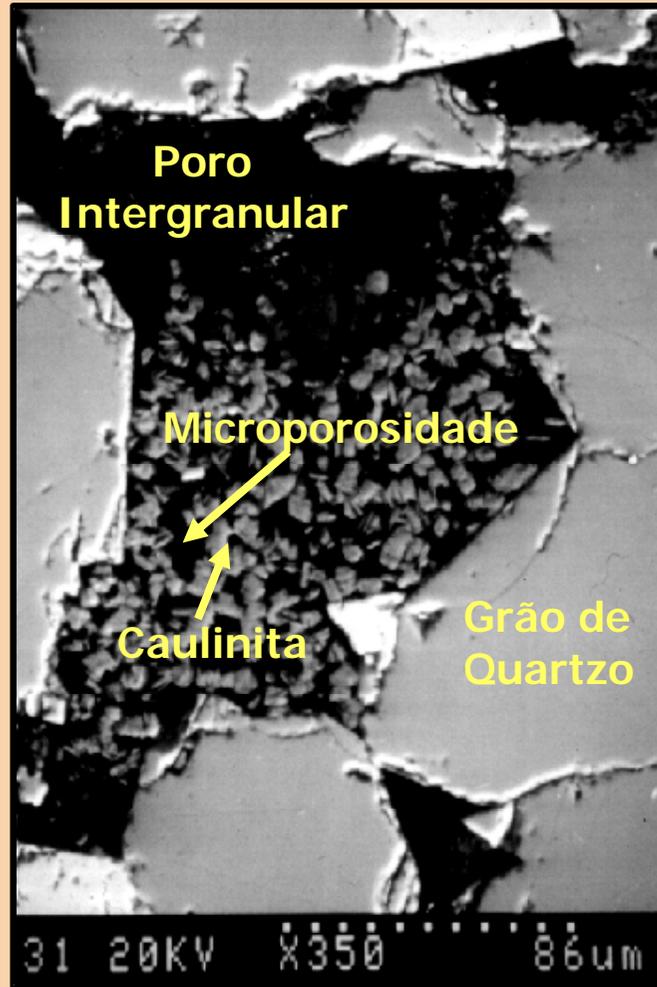
Água



Óleo e/ou Gás



- ⇒ Os poros fornecem o volume para o armazenamento dos Hidrocarbonetos.
- ⇒ As gargantas restringem o fluxo através dos poros.



⇒ Poros intergranulares contêm hidrocarbonetos.

⇒ Microporos contêm água com baixa mobilidade.

CAULINITA

Silicato de alumínio hidratado, componente do caulim (argila refratária).

POROSIDADE TOTAL E EFETIVA

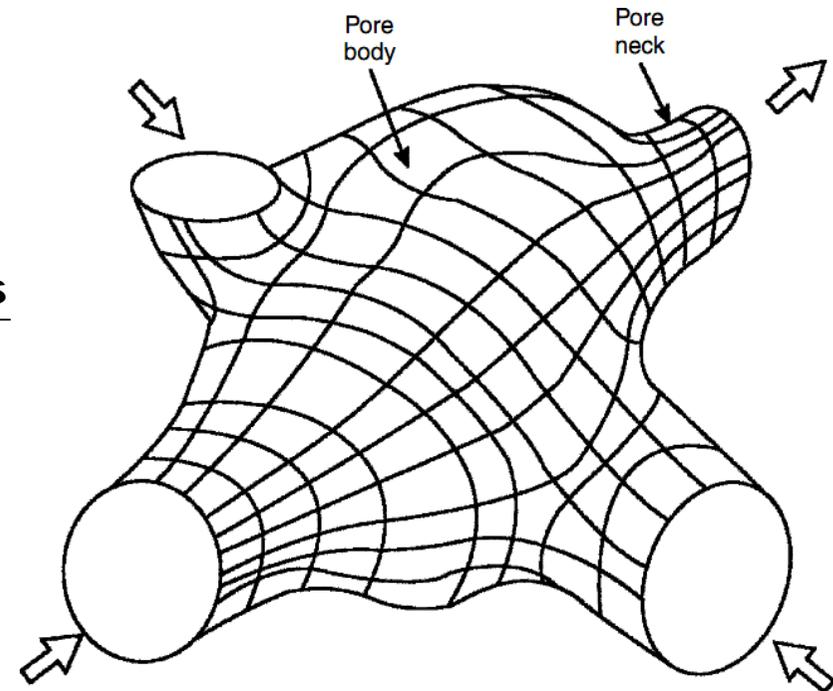


Porosidade é a fração relativa do volume da rocha que é ocupada pelos poros e está relacionada à capacidade da rocha de armazenar fluidos.

$$\phi_{\text{Total}} = \frac{\text{Volume dos Poros}}{\text{Volume Total}}$$

$$\phi_{\text{Efetiva}} = \frac{\text{Volume dos Poros Interconectados}}{\text{Volume Total}}$$

A Porosidade Efetiva é de grande importância pois caracteriza a quantidade de fluido que possui mobilidade.





ORIGEM DA POROSIDADE





CLASSIFICAÇÃO

- Porosidade Primária (original).
- Porosidade Secundária (induzida).



CARACTERÍSTICAS

- Desenvolvimento no processo de deposição.
- Exemplos:
 - Poros intergranulares em rochas clásticas.
 - Poros intercristalinos em rochas carbonáticas.
- Normalmente mais uniforme que a porosidade secundária (induzida).



CARACTERÍSTICAS

- Desenvolvimento por processos geológicos químicos ou mecânicos posteriores à deposição (processos diagenéticos).
- Exemplos:
 - Compactação.
 - Precipitação de cimentos.
 - Dissolução de grãos em arenitos e carbonatos.
 - Cavidades de dissolução em carbonatos.
 - Desenvolvimento de fraturas.
- Podem aumentar ou diminuir a porosidade.



POROSIDADE NOS ARENITOS





CONSTITUINTES DA ROCHA ARENÍTICA (NOMENCLATURA)

ESTRUTURA

Grãos com granulometria de areia.

MATRIZ

Material com granulometria de silte e argila.

CIMENTO

Material precipitado após o soterramento. O cimento preenche os poros e pode substituir grãos da estrutura.

POROS

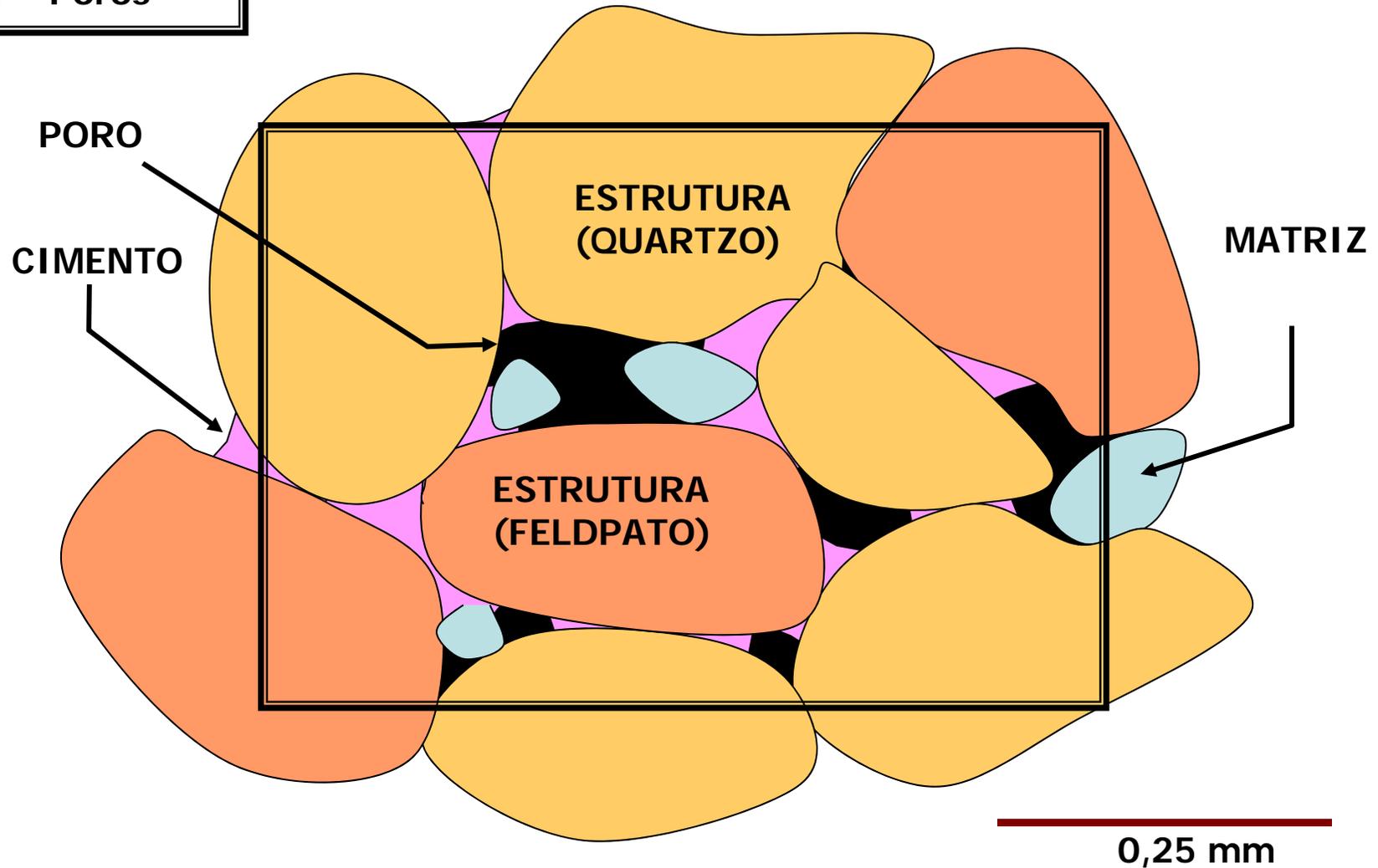
Espaços entre os componentes acima.

POROSIDADE NOS ARENITOS

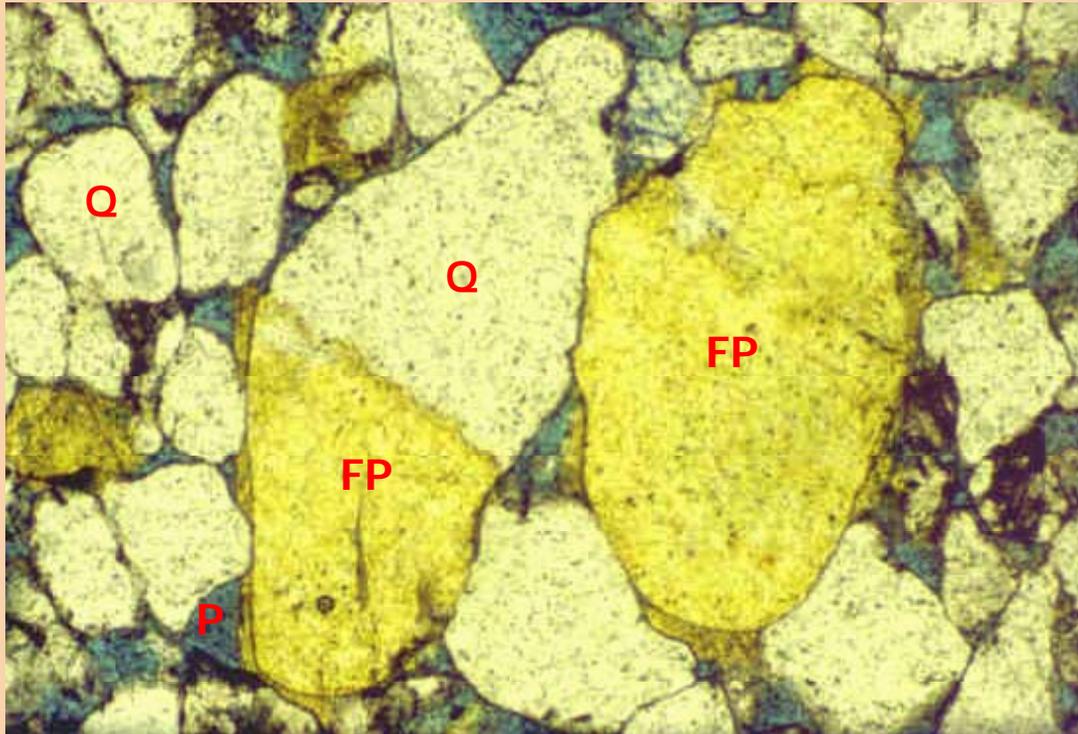


1. Estrutura
2. Matriz
3. Cimento
4. Poros

Para a Engenharia
"Matriz"



COMPOSIÇÃO DO ARENITO



FP = Feldspato de Potássio

Q = Quartzo

P = Poro

O feldspato de potássio aparece colorido por um corante químico amarelo.

Os poros estão impregnados com corante epóxi azul.



CLASSIFICAÇÃO

INTERGRANULAR

Espaços intersticiais entre os grãos da estrutura.

MICROPOROS

Pequenos poros principalmente entre grãos da estrutura e no cimento.

DISSOLUÇÃO

Dissolução parcial ou completa de grãos.

FRATURAS

Fissuras devidas a tensões no maciço rochoso.



POROSIDADE PRIMÁRIA

- Esfericidade das partículas.
- Empacotamento.
- Distribuição do tamanho dos grãos.

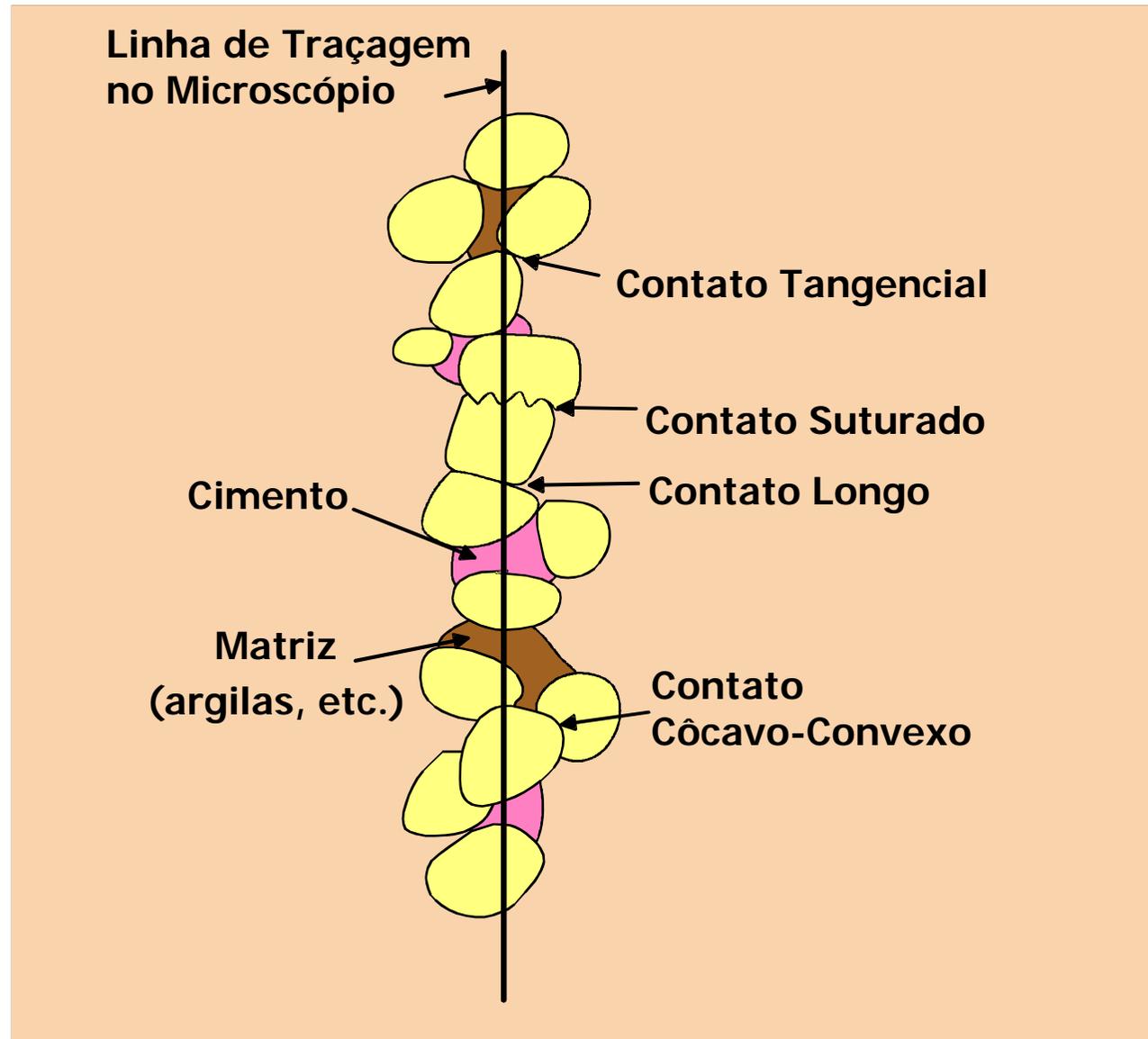
POROSIDADE SECUNDÁRIA

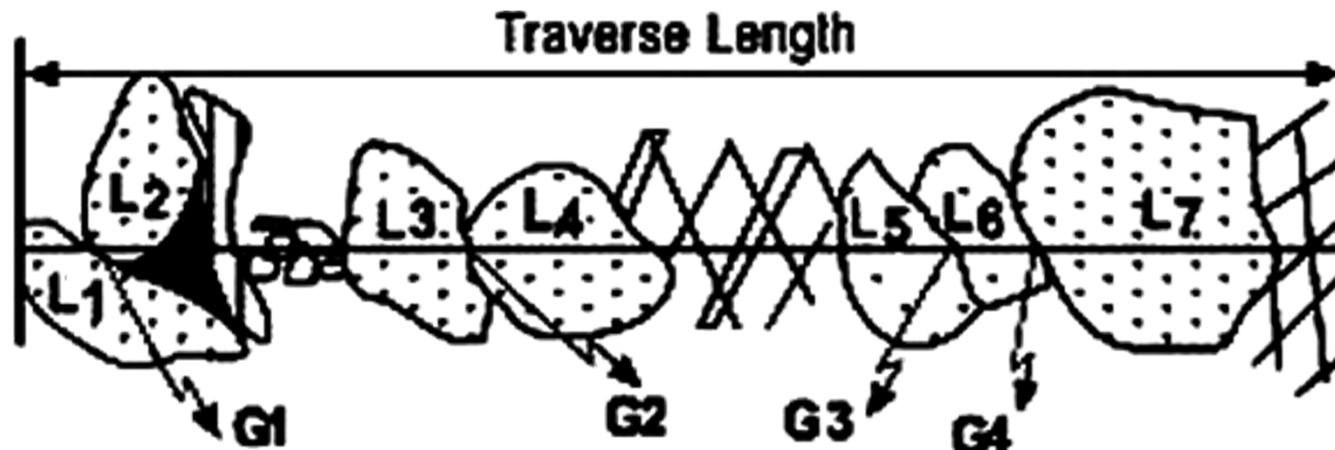
- Material de cimentação.
- Peso do capeamento (compactação).
- Dissolução e fraturas.
- Minerais argilosos.

ARREDONDAMENTO DOS GRÃOS



EMPACOTAMENTO DOS GRÃOS NO ARENITO



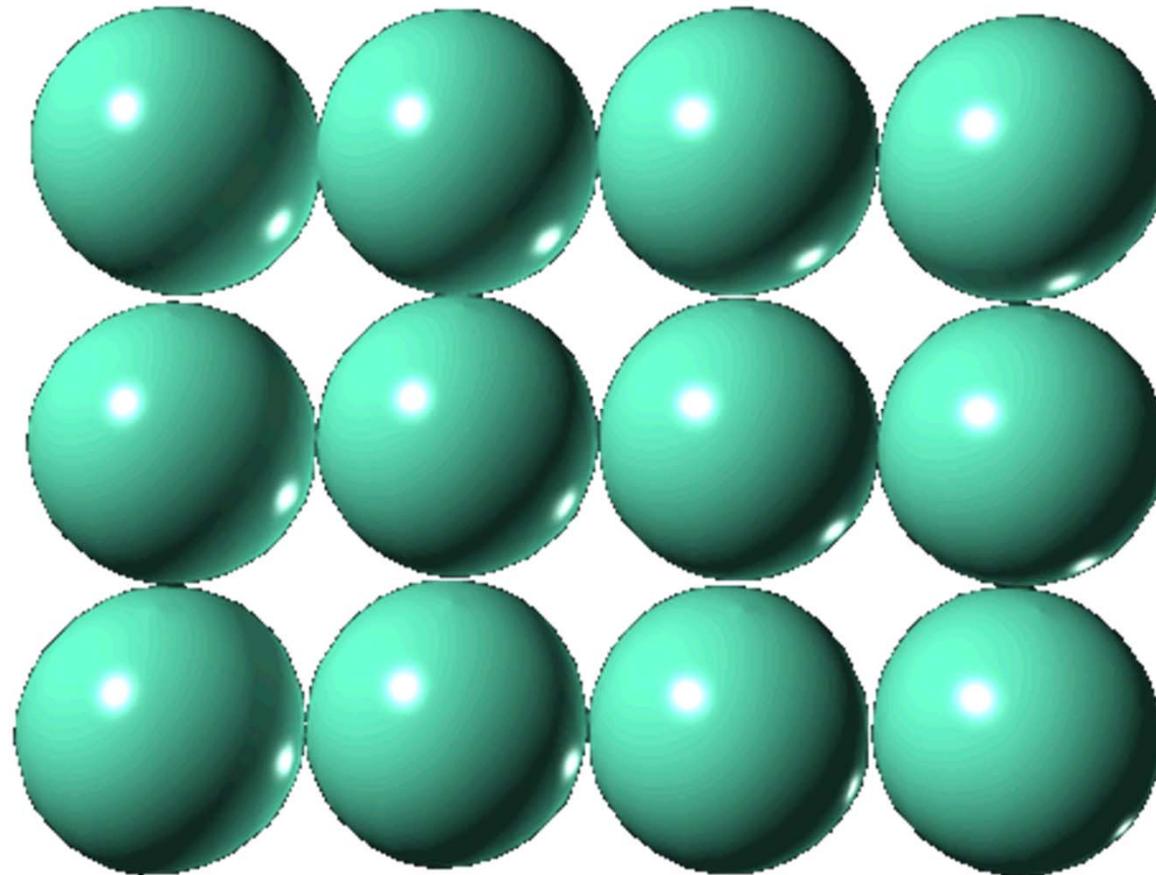


$$\text{Packing Density, } P_d = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7}{\text{Traverse Length}} \times 100 (\%)$$

$$\text{Packing Proximity, } P_p = \frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}{\text{Number of grains in the Traverse}} \times 100 (\%)$$

Densidade e Proximidade do Empacotamento

EMPACOTAMENTO CÚBICO DOS GRÃOS





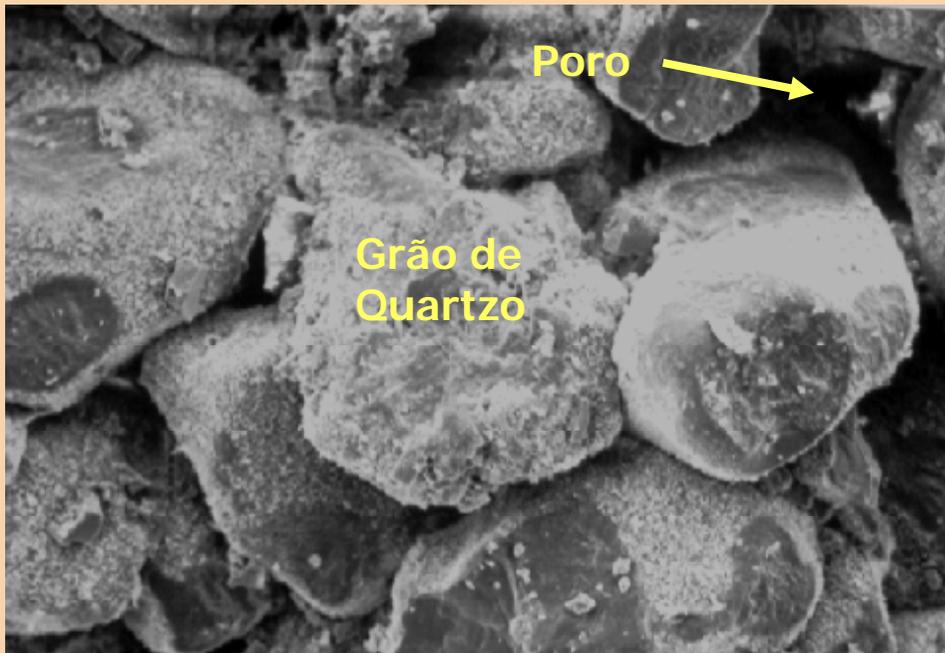
ANÁLISE DE UMA CÉLULA UNITÁRIA

$$\text{Volume Total} = (2r)^3 = 8r^3$$

$$\text{Volume da Matriz} = \frac{4 \pi r^3}{3}$$

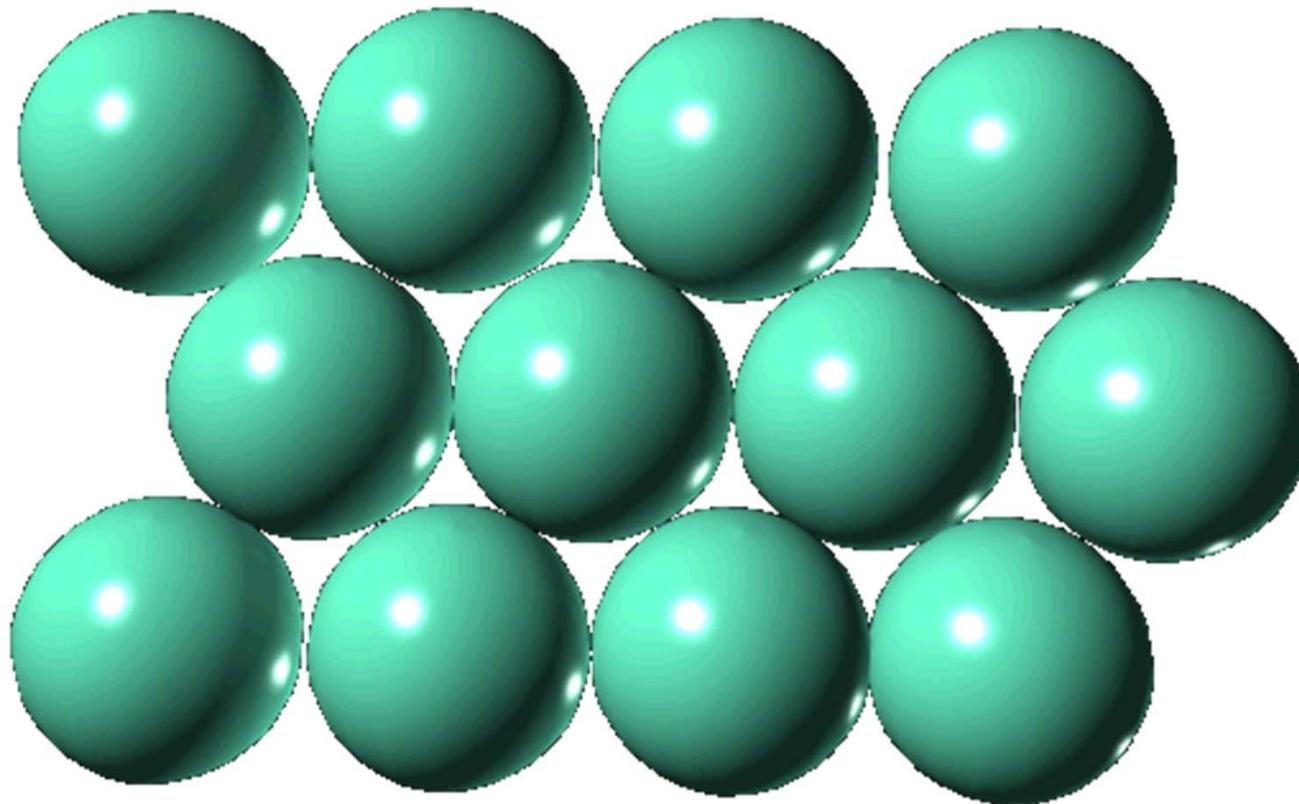
$$\text{Volume dos Poros} = \text{Volume Total} - \text{Volume da Matriz}$$

$$\begin{aligned} \text{Porosidade} &= \frac{\text{Volume dos Poros}}{\text{Volume Total}} \\ &= \frac{\text{Volume Total} - \text{Volume da Matriz}}{\text{Volume Total}} \\ &= \frac{8 r^3 - 4/3 \pi r^3}{8 r^3} = 47,6\% \end{aligned}$$



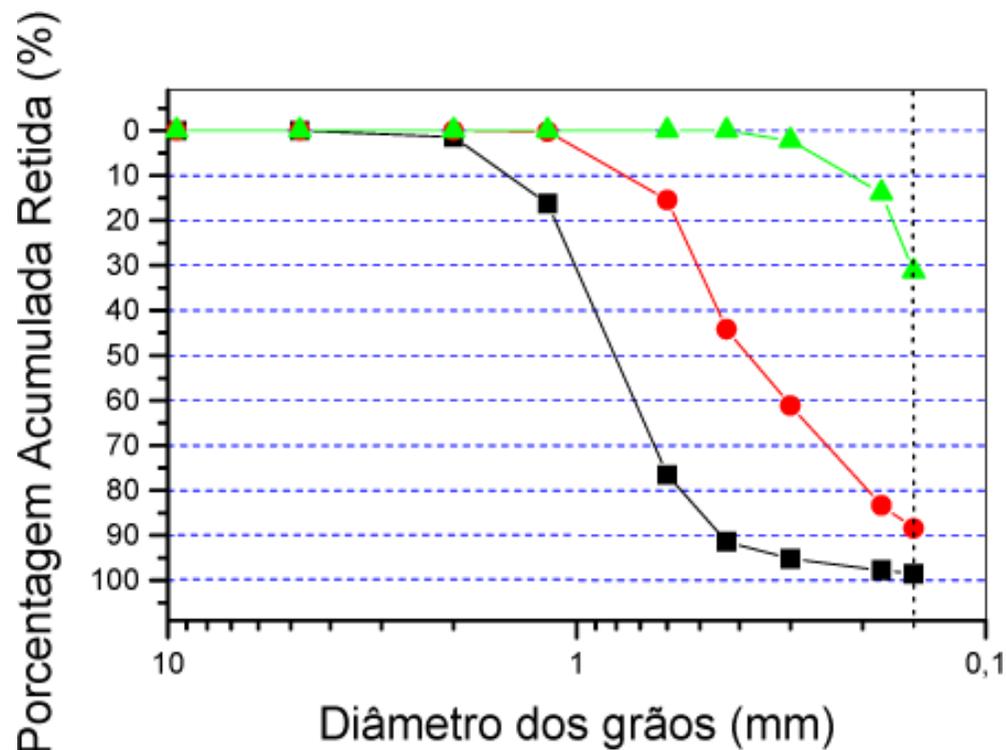
A porosidade em arenitos normalmente é menor do que aquela idealizada no empacotamento de esferas em razão de:

- ⇒ Variação no tamanho dos grãos.
- ⇒ Variação no formato dos grãos.
- ⇒ Cimentação.
- ⇒ Compactação mecânica ou química.



Porosidade = 27 %

DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS GRÃOS NO ARENITO

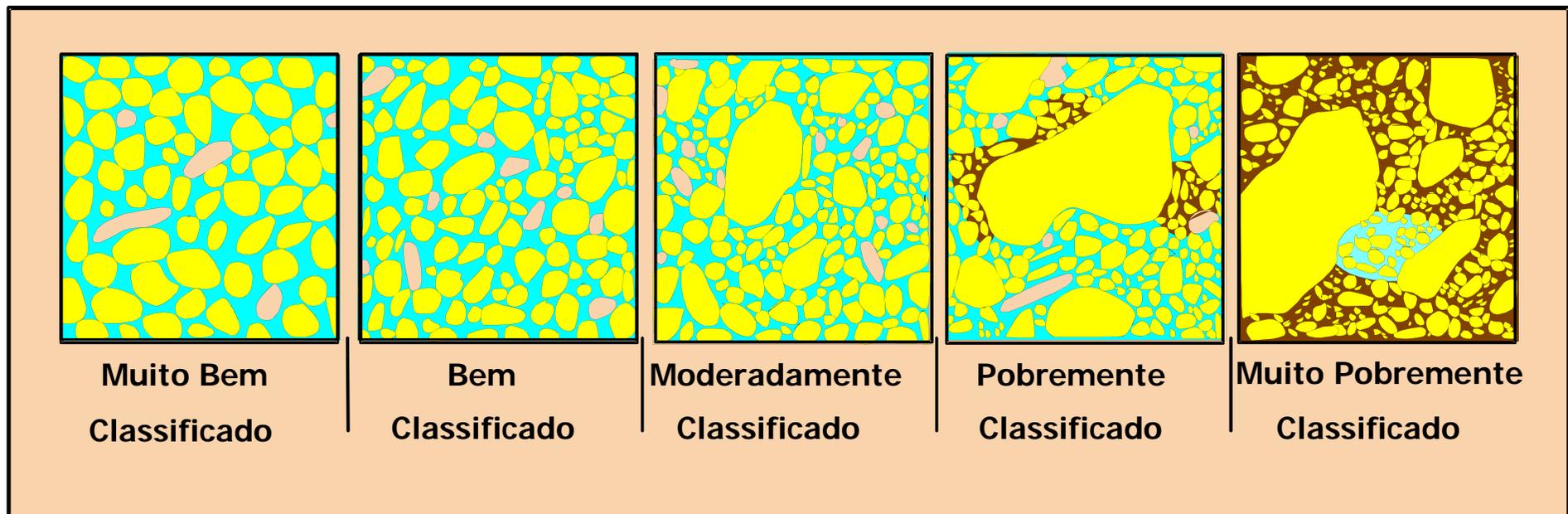


Determinação da distribuição do tamanho de grãos

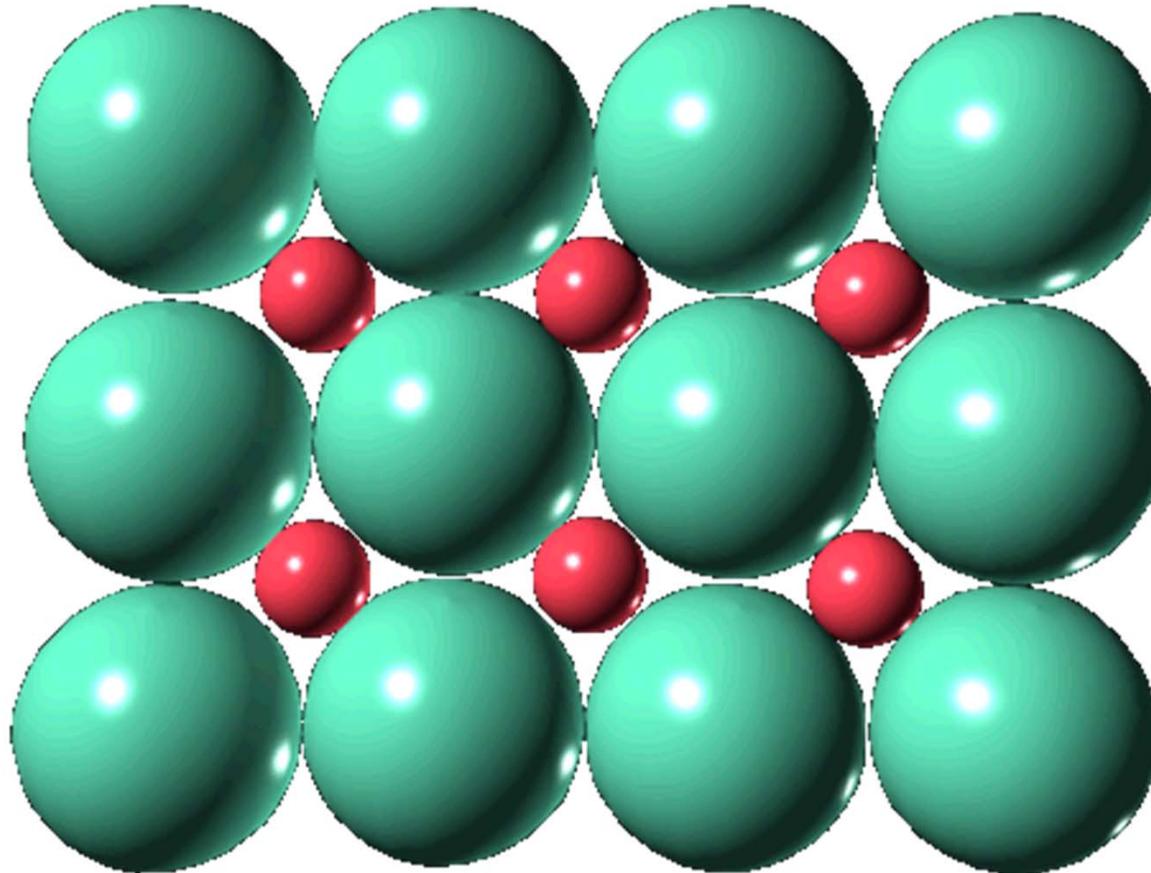
DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS GRÃOS NO ARENITO



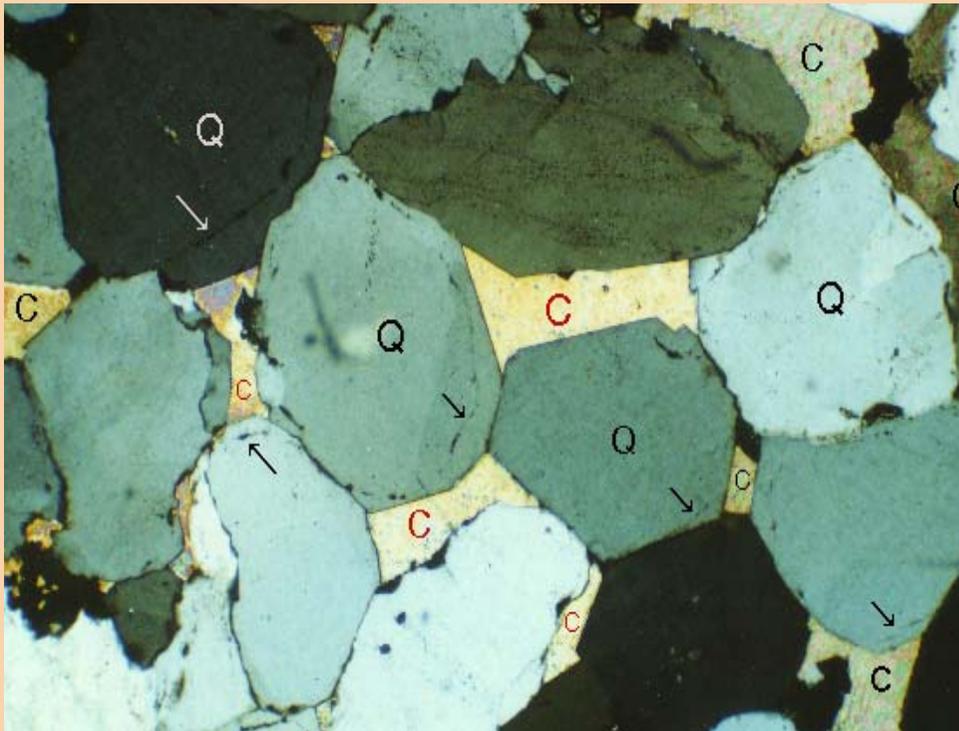
← POROSIDADE



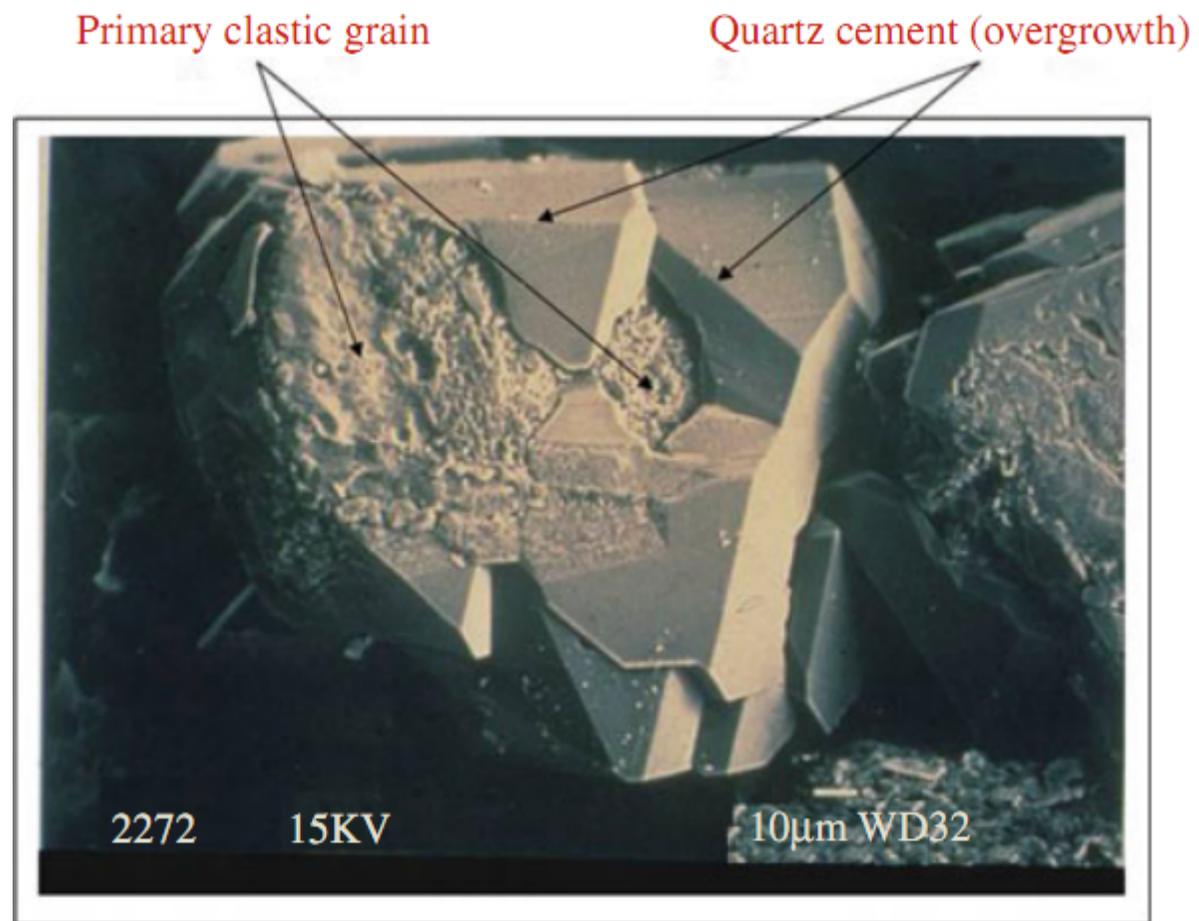
← CLASSIFICAÇÃO →



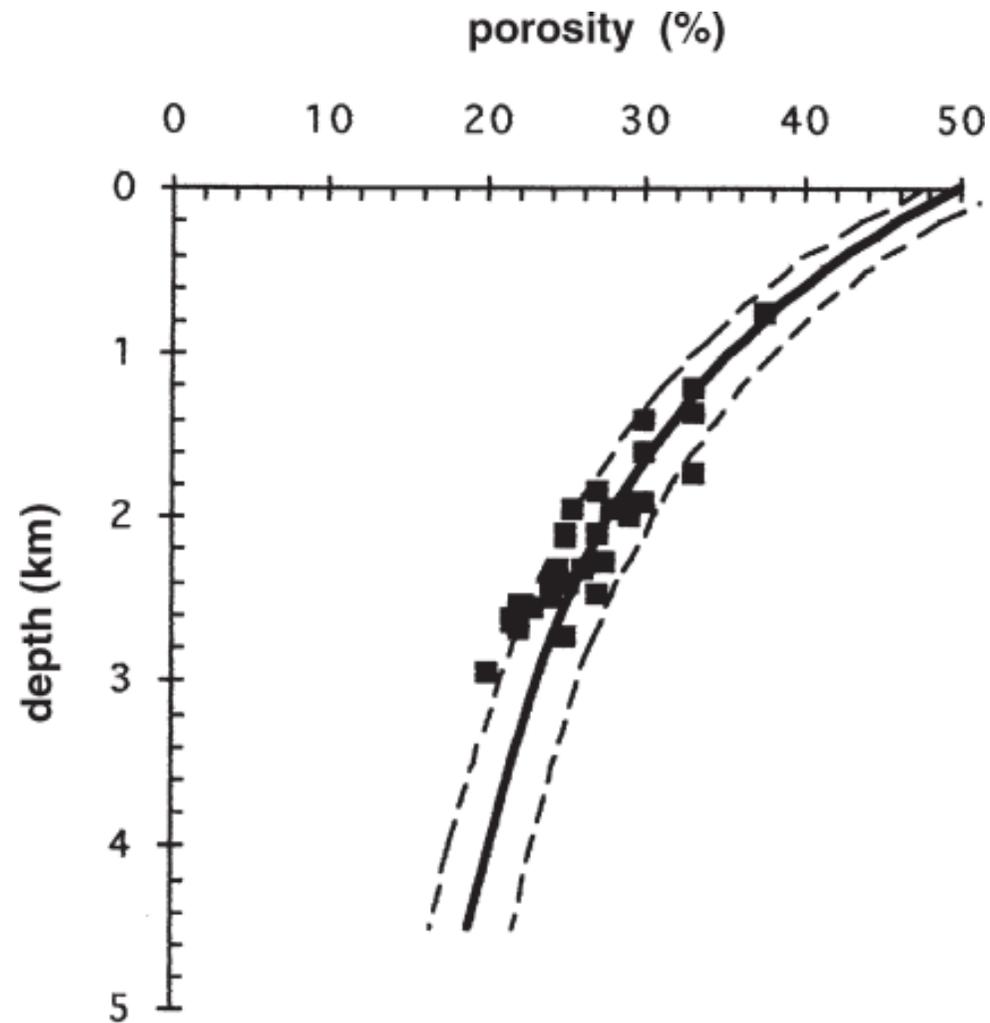
Porosidade = 14%



As gargantas dos poros em um arenito podem ser preenchidas com uma variedade de tipos de cimentos que afetam suas propriedades petrofísicas.

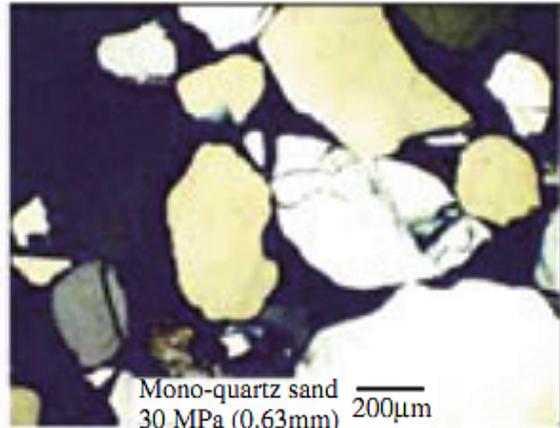


Crescimento de cimento quartzoso sobre partícula detrítica

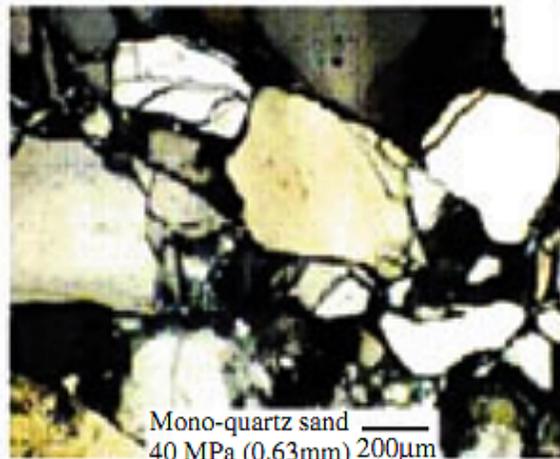


Varição da porosidade com a profundidade para arenitos

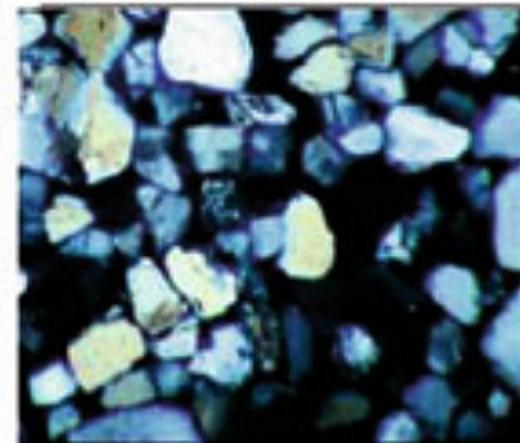
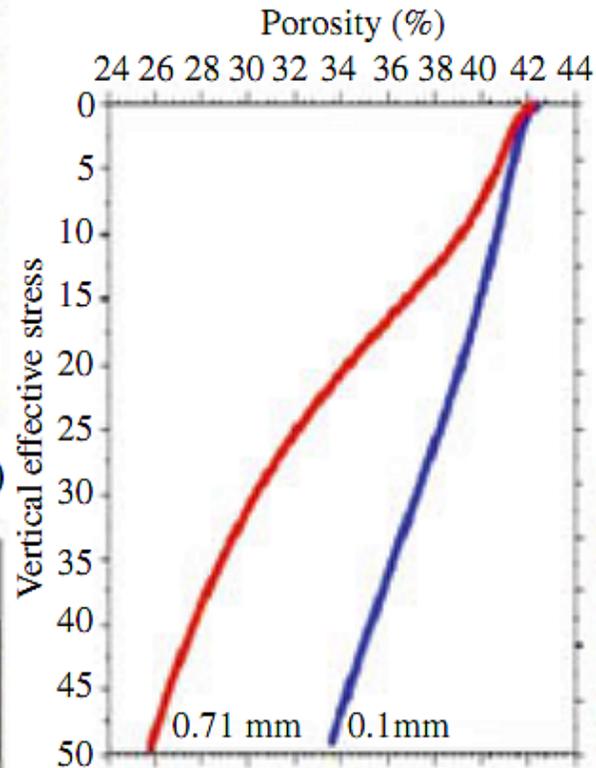
PESO DO CAPEAMENTO (COMPACTAÇÃO)



Coarse-graind sand (30 MPa)



Coarse-graind sand (40 MPa)



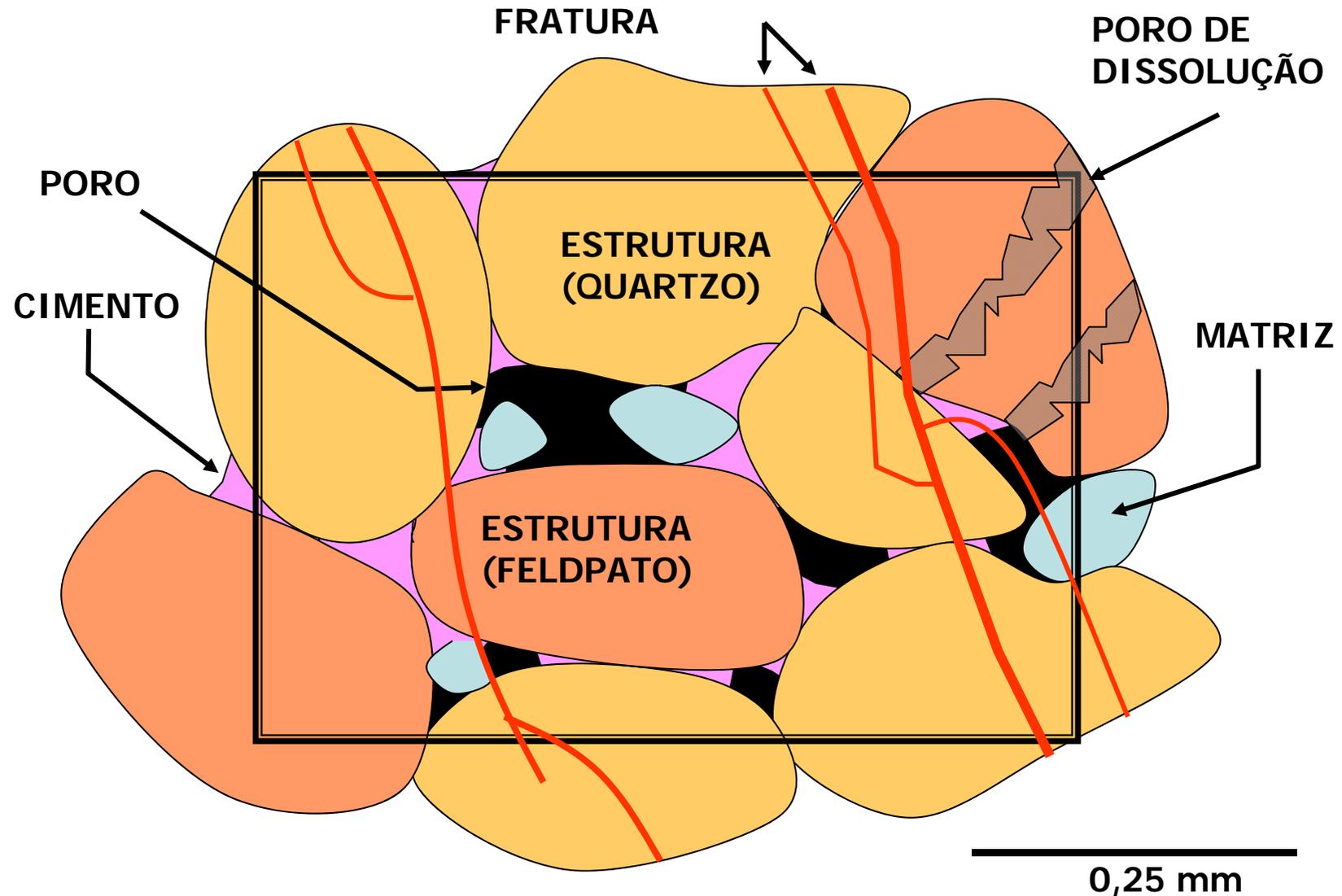
Fine-graind sand (30 MPa)

Variação da porosidade com a pressão para arenitos com diferentes tamanhos de grão

DISSOLUÇÃO E FRATURAS



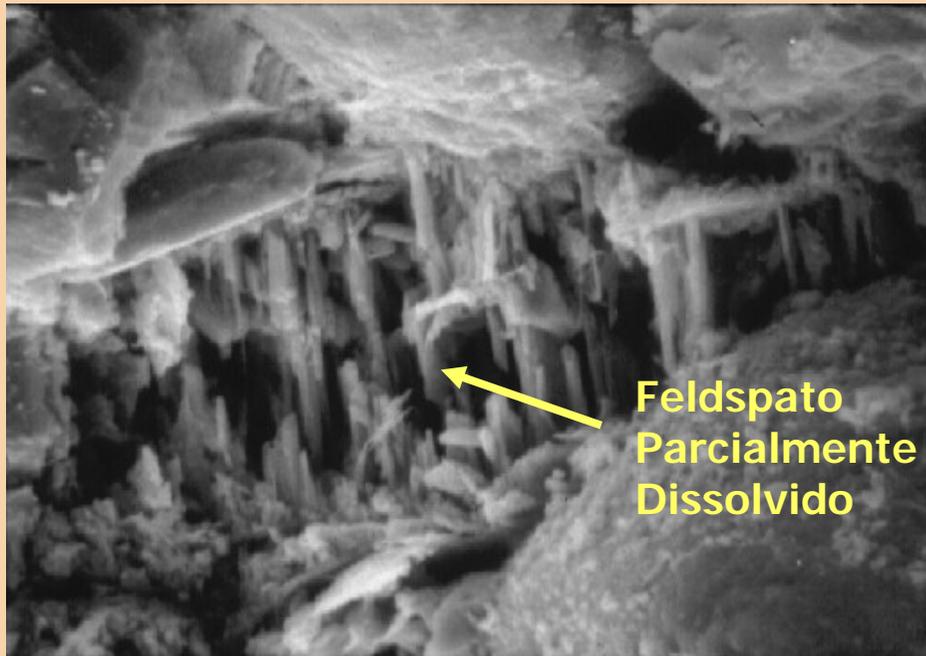
- Sistema primário de porosidade baseado na matriz.
- Sistema secundário de porosidade baseado em fraturas e dissolução.





A dissolução de grãos da estrutura (feldspato por exemplo) e do cimento pode melhorar o sistema de poros interconectados.

Esta é a Porosidade Secundária.



A dissolução de poros pode ser localizada, não contribuindo para o sistema efetivo de poros.

MINERAIS ARGILOSOS EM RESERVATÓRIOS DE ARENITO - CAULINITA



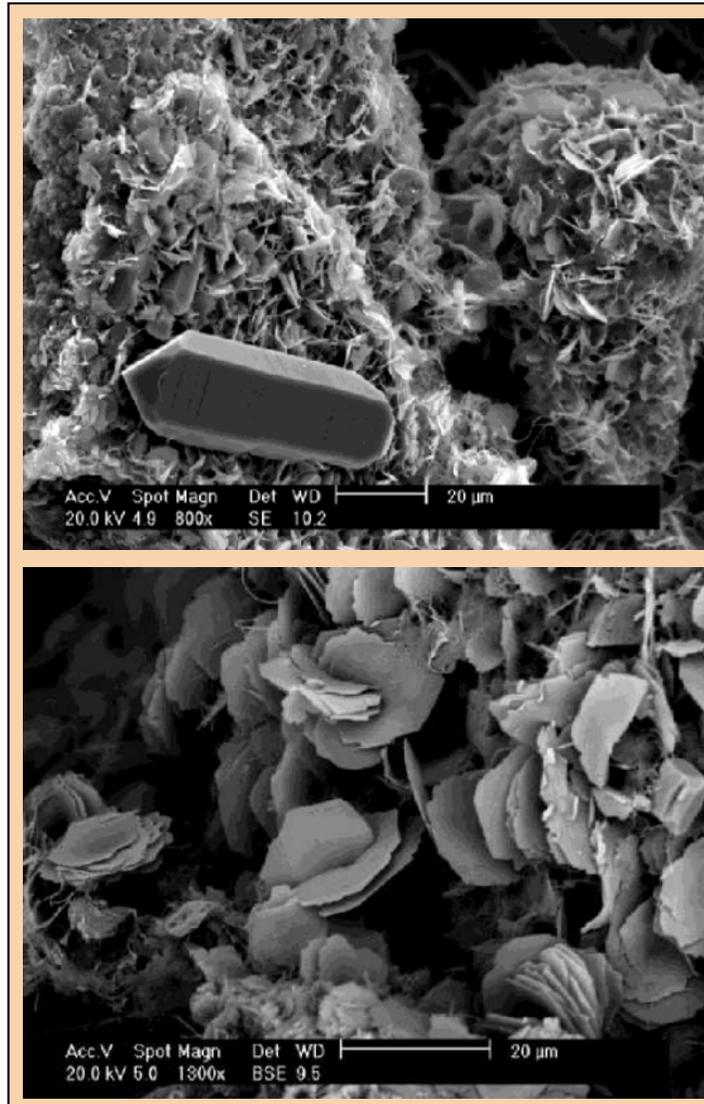
⇒ Redução significativa da permeabilidade.

⇒ Grande saturação de água irreduzível.

CAULINITA

Silicato de alumínio hidratado, componente do caulim (argila refratária).

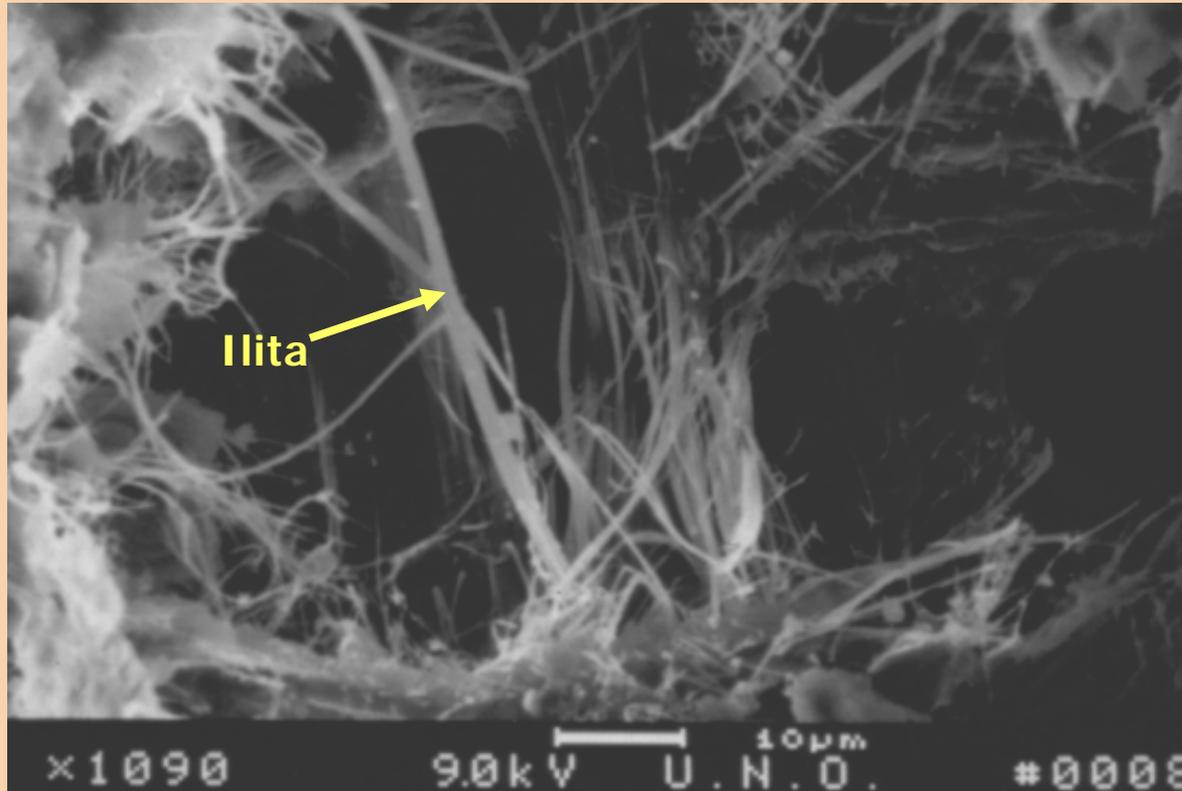
MINERAIS ARGILOSOS EM RESERVATÓRIOS DE ARENITO - CLORITA



- ⇒ Grande área superficial resultando em abundante microporosidade
- ⇒ Grande saturação de água irreduzível.

CLORITA

Silicato magnésico alumínico hidratado de hábito lamelar.

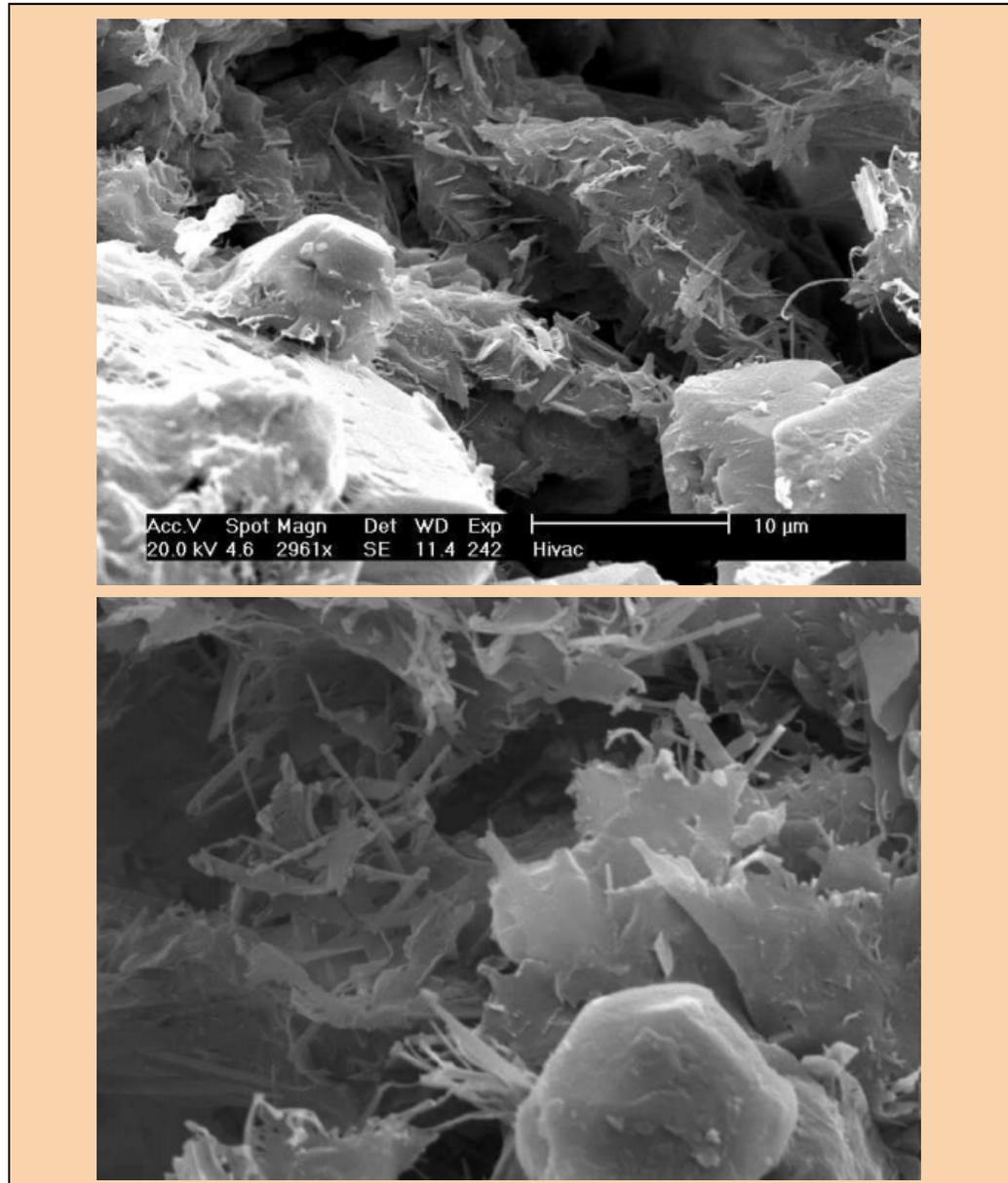


- ⇒ Redução significativa da permeabilidade.
- ⇒ Pequena redução da porosidade.
- ⇒ Grande presença de água de saturação.
- ⇒ Problema com migração de finos.

ILITA

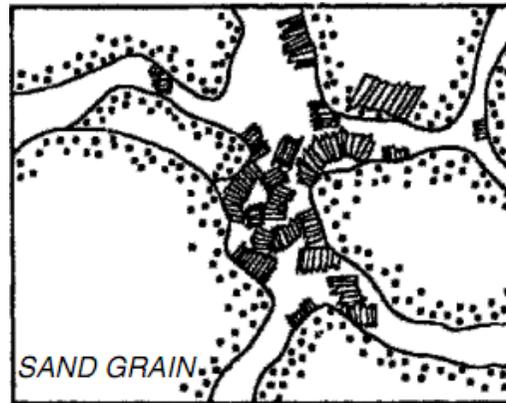
Aluminossilicato básico hidratado de potássio com ferro e magnésio, do grupo dos minerais argilosos, com ocorrência na forma de fibras de diâmetro de ordem submicrométrica.

MINERAIS ARGILOSOS EM RESERVATÓRIOS DE ARENITO - ILITA

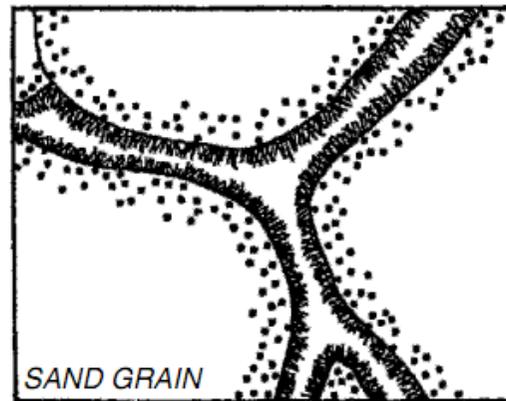


Ocorrência da Ilita

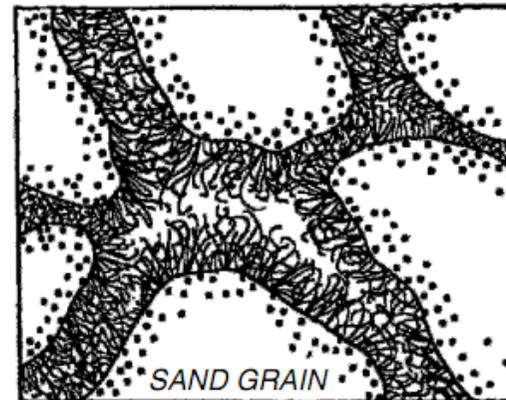
MINERAIS ARGILOSOS EM RESERVATÓRIOS DE ARENITO



Caulinita

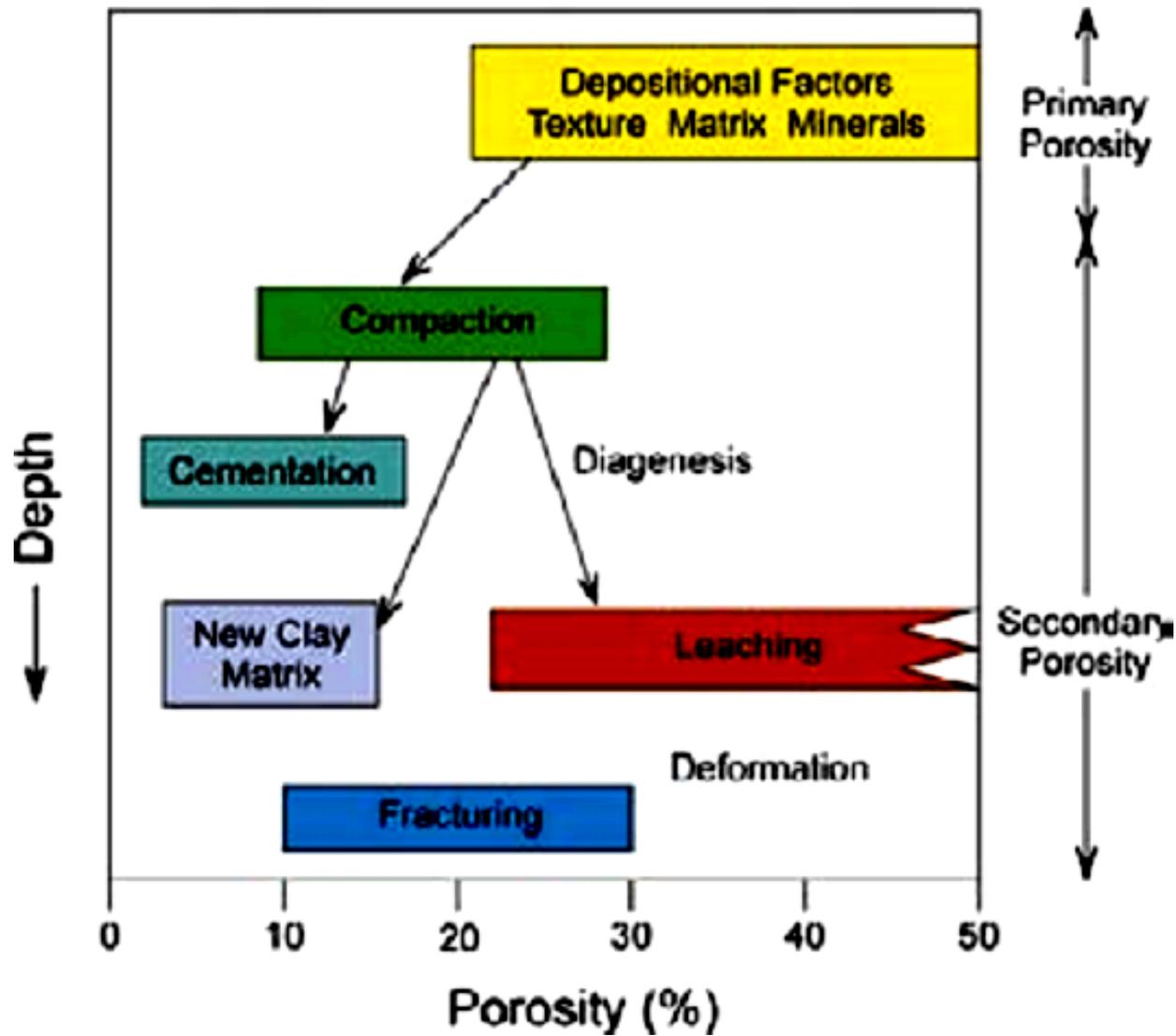


Clorita



Ilita

FATORES QUE AFETAM A POROSIDADE



Efeito dos diferentes fatores sobre a porosidade



POROSIDADE NOS CARBONATOS



CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS CARBONÁTICAS



Textura Depositional Reconhecível				Textura Depositional Não Reconhecível		
Componentes Não Ligados Durante a Deposição				Componentes Ligados Durante a Deposição		
Contém Lama (partículas do tamanho de silte e argila)		Não Contém Lama (Suportada pelos Grãos)		Carbonato Cristalino		
Suportada pela Lama		Suportada pelos Grãos				
<10 % Grãos	>10 % Grãos					
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone		



CLASSIFICAÇÃO

INTERPARTÍCULA

Poros entre partículas ou grãos.

INTRAPARTÍCULA

Poros interiores a partículas ou grãos.

INTERCRISTAL

Poros entre cristais.

MOLDES

Poros formado pela dissolução de um grão, onde a forma do grão é preservada.

JANELAS

Poros primários maiores que os interstícios entre grãos.

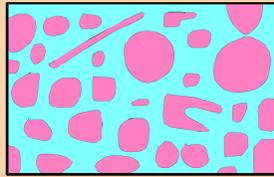
FRATURAS

Formadas pela ruptura ao longo de planos na rocha.

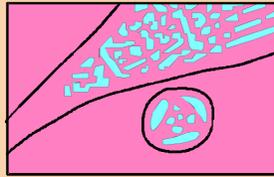
VESÍCULAS

Grandes poros formados pela dissolução de grãos e do cimento.

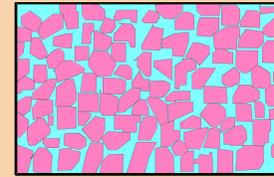
TIPOS DE POROSIDADE EM CARBONATOS



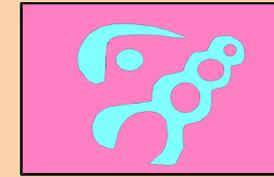
Interpartícula



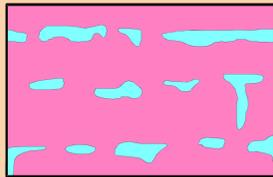
Intrapartícula



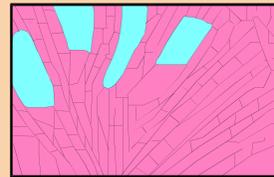
Intercristal



Moldes

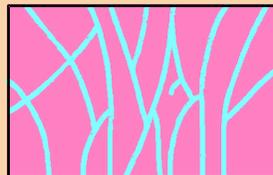


Janelas

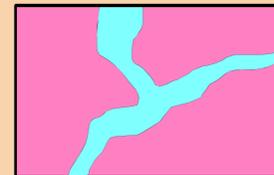


Crescimento na estrutura

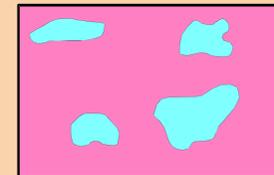
**SELETIVA À
ESTRUTURA**



Fraturas



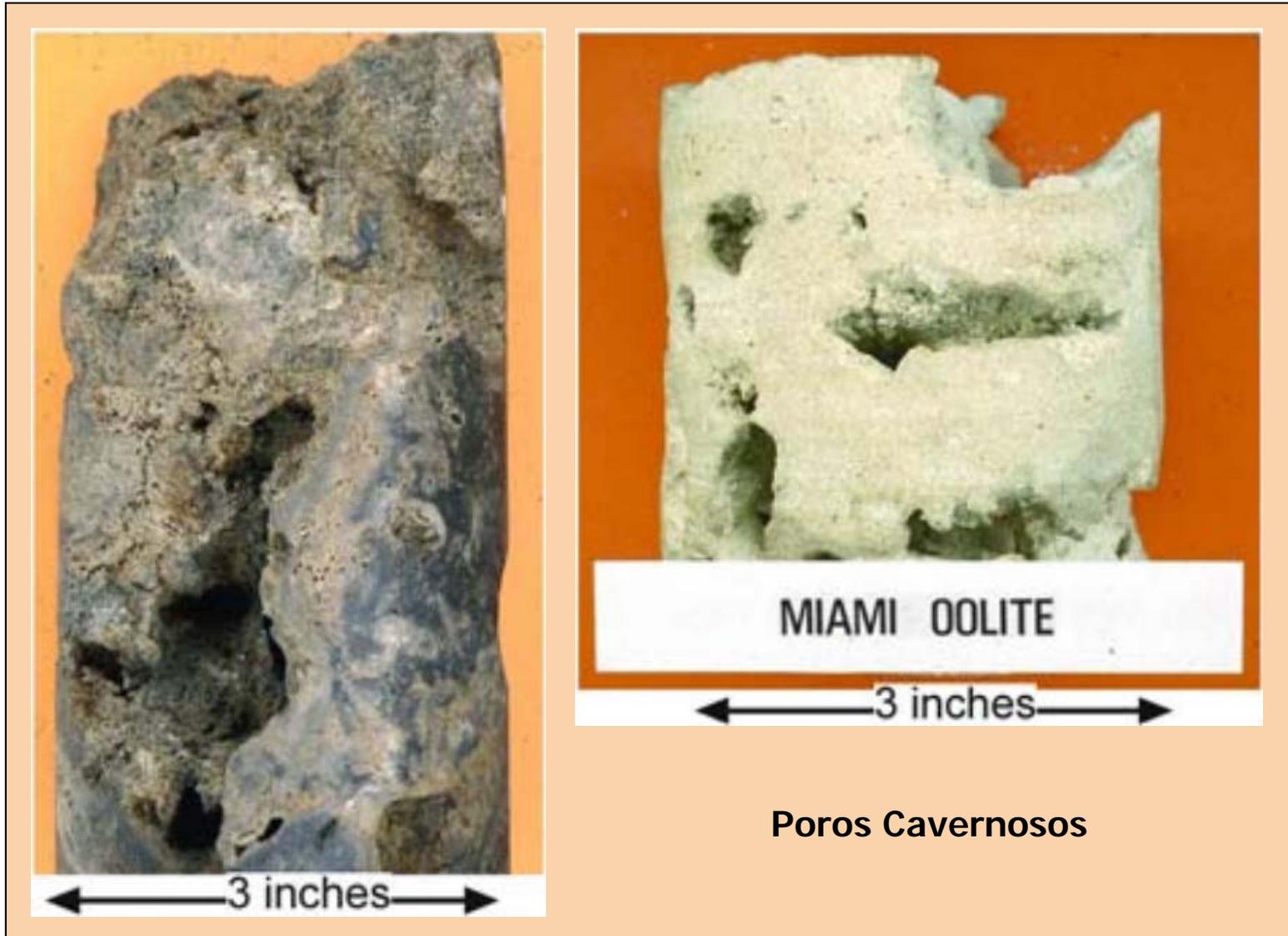
Canais

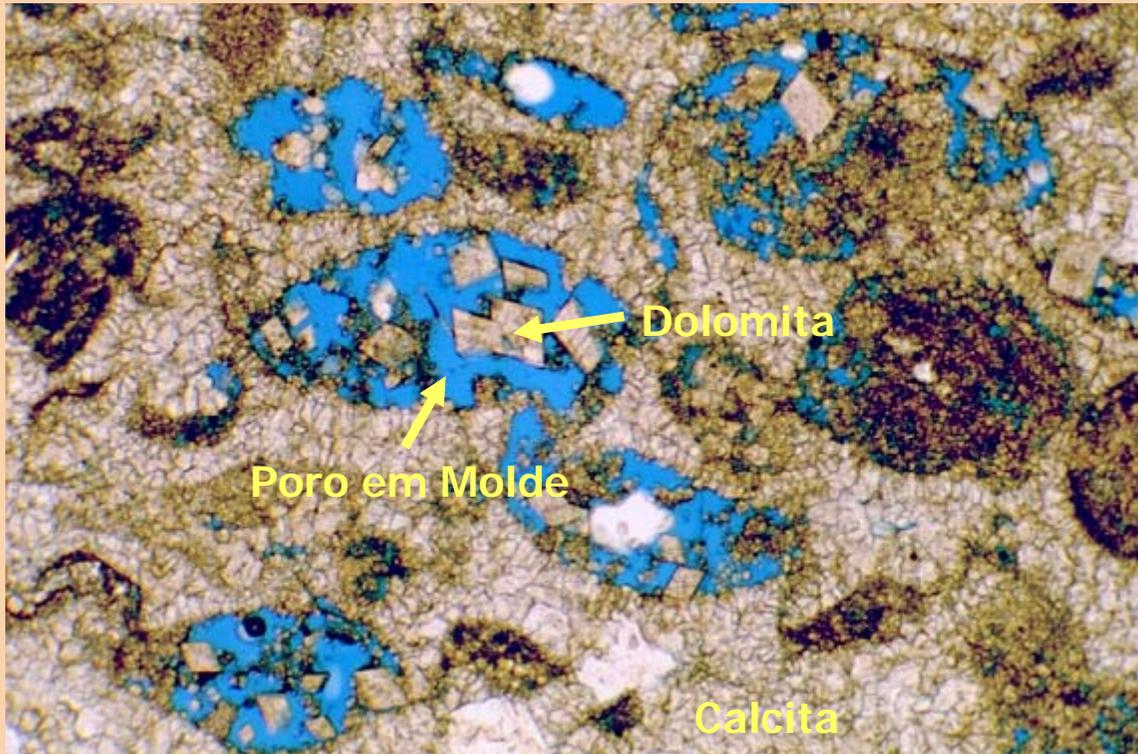


Vesículas

**NÃO SELETIVA
À ESTRUTURA**

POROSIDADE EM CARBONATOS - EXEMPLO

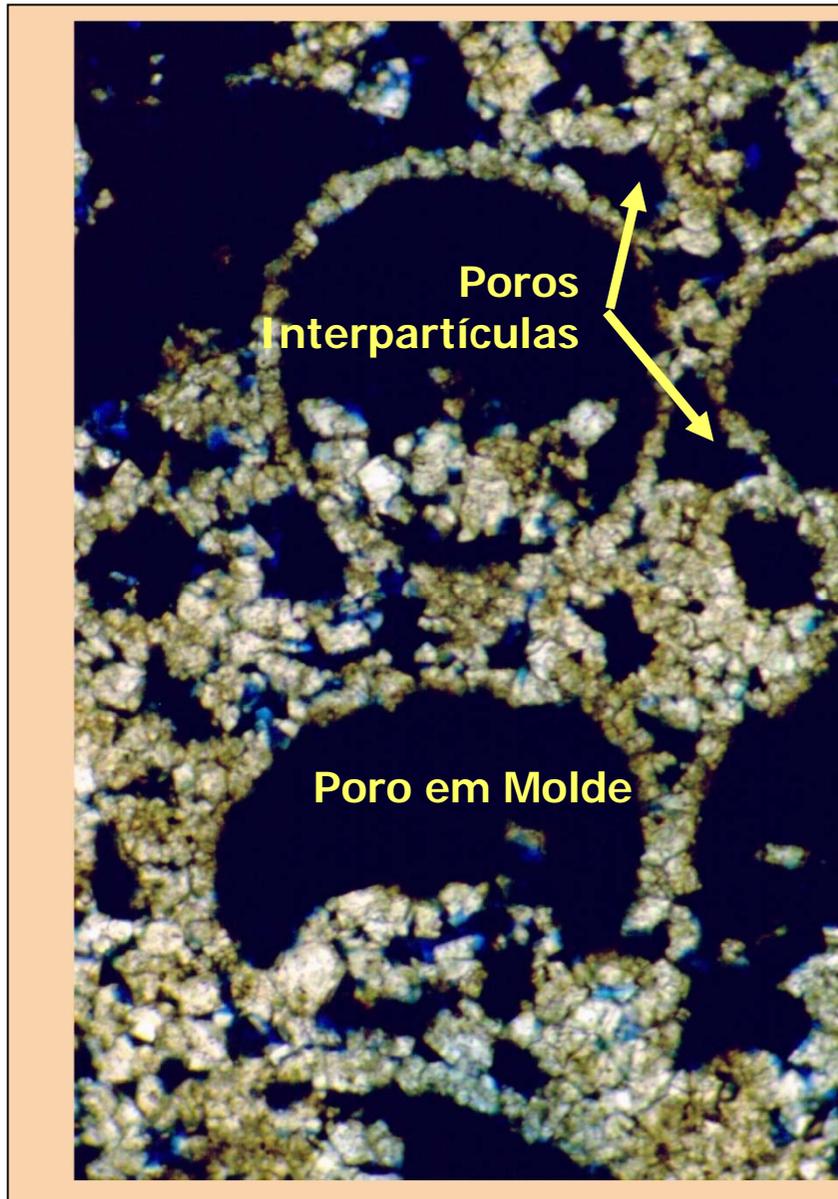




As áreas em azul são poros

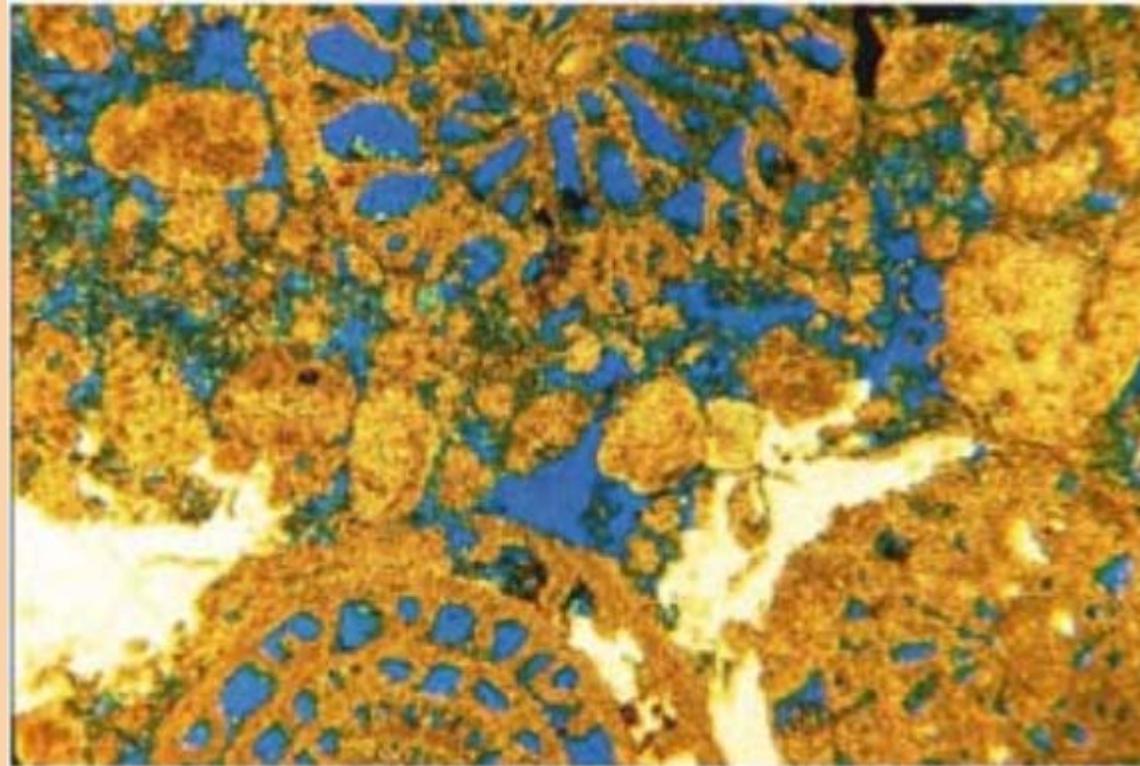
POROS EM MOLDES

- Devidos à dissolução e colapso de oóides. (grãos redondos formados por precipitação química inorgânica).
- Poros isolados.
- Baixa porosidade efetiva.
- Baixa permeabilidade.



POROS EM MOLDE E INTERPARTÍCULAS

- Sistema de poros combinado.
- Poros em moldes formados pela dissolução de oólitos.
- Poros conectados.
- Alta porosidade efetiva.
- Alta permeabilidade.

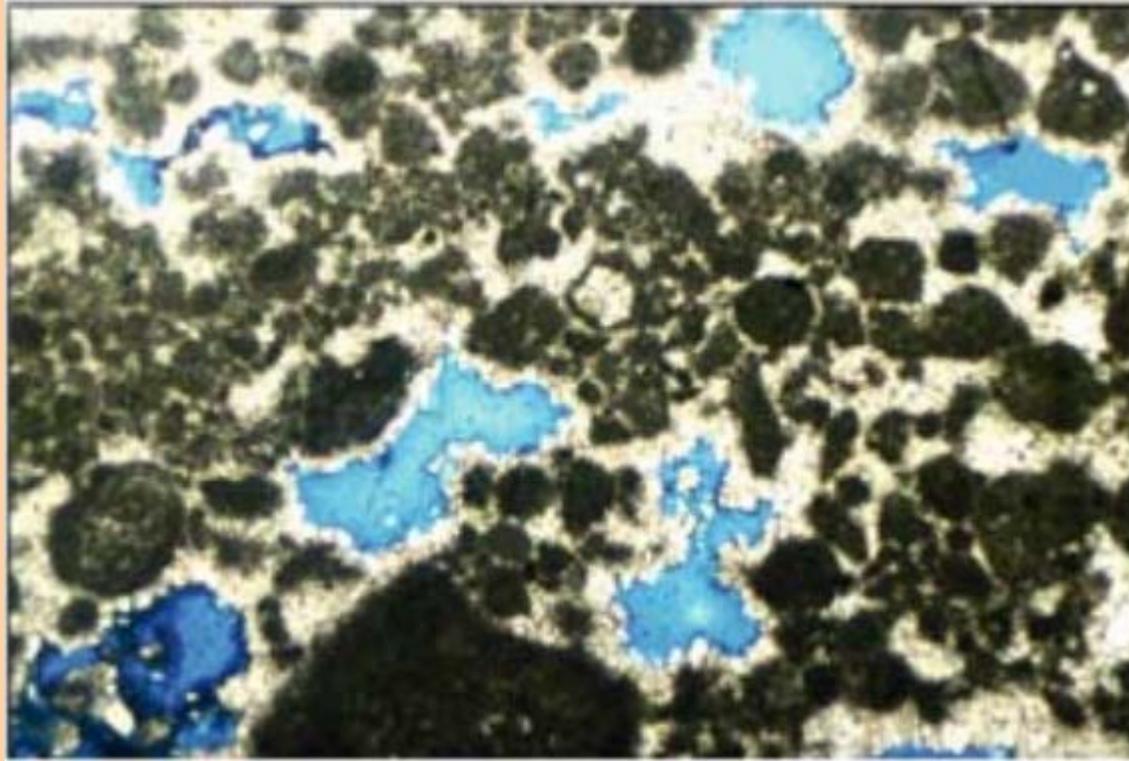


Poros intrapartículas

POROSIDADE EM CARBONATOS - EXEMPLO



**Faturas aumentadas por
ação de dissolução**



Poros em janelas



POROSIDADE NOS RESERVATÓRIOS BRASILEIROS





DEFINIÇÃO

POROSIDADE EM ARENITOS

- Constituintes da rocha arenítica: estrutura, matriz, cimento e poros.
- Classificação: porosidade primária (original) e porosidade secundária (induzida).
- Tipos: intergranular, microporos, dissolução e fraturas.
- Fatores intervenientes: esfericidade das partículas, empacotamento, distribuição do tamanho dos grãos, material de cimentação, peso do capeamento (compactação), dissolução e fraturas e minerais argilosos.

POROSIDADE EM CARBONATOS

- Tipos: Interpartícula, intrapartícula, intercristal, moldes, janelas, fraturas e vesículas.

POROSIDADE NOS RESERVATÓRIOS BRASILEIROS



BRADLEY, H. B. Petroleum engineering handbook. Society of Petroleum Engineers: Richardson, 2005.

MONICARD, R. P. Properties of reservoir rocks: core analysis. Éditions Technip: Paris, 1980.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. Engenharia de reservatórios de petróleo. Interciência: Rio de Janeiro, 2006.