



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

PMI-1841 ENGENHARIA DE PERFURAÇÃO

AULA 14 – PRESSÃO DE FORMAÇÃO DOS POROS

Wilson Siguemasa Iramina

Santos, outubro de 2016

1

AULA 14

IMPORTÂNCIA DE DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE POROS E DE FRATURAMENTO

Com a perfuração de poços cada vez mais profundos, as formações são penetradas e fluem naturalmente a uma taxa significativa. Durante esta perfuração, o bom senso (e a segurança) indica que a pressão no poço (em qualquer profundidade) seja mantida entre a pressão de ocorrência natural dos fluidos de formação e a pressão máxima do poço que a formação pode agüentar sem fraturar. Na aula de hidráulica de perfuração nos preocupamos na determinação de pressões do poço durante os vários tipos de operação de perfuração. Nesta aula será discutida a determinação da pressão de formação do fluido e a pressão de fraturamento.

Conhecer como estes dois parâmetros variam com a profundidade é de extrema importância no planejamento e perfuração de um poço profundo.

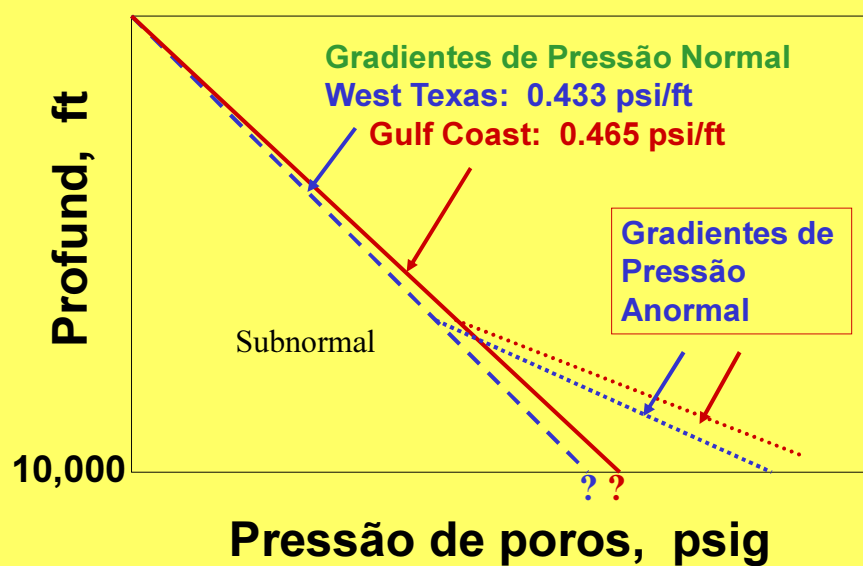
2

1. Pressão de poros - conteúdo

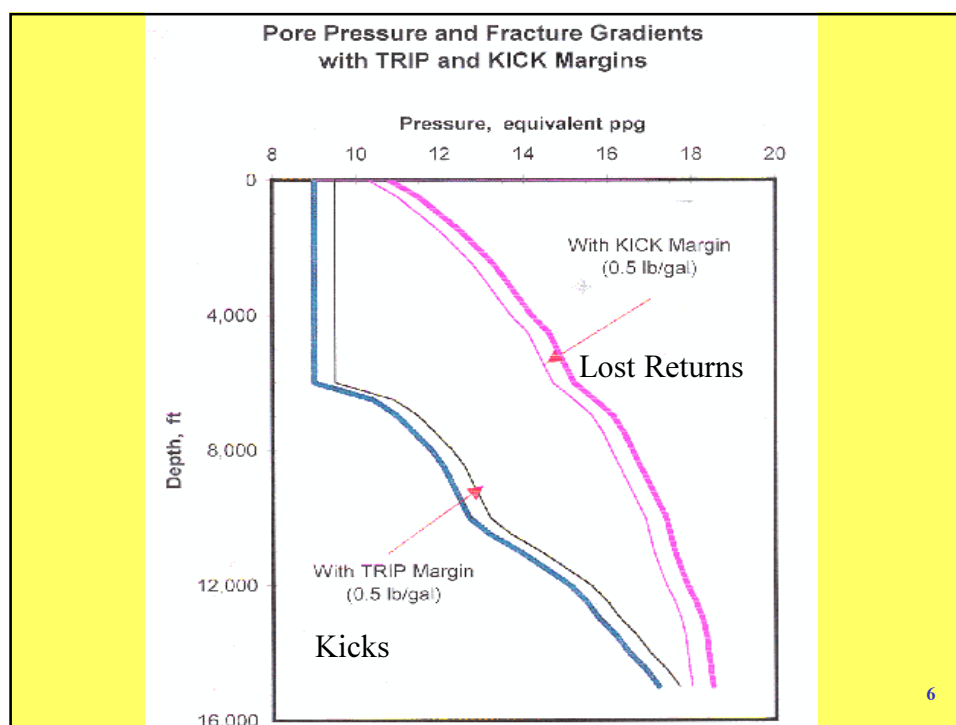
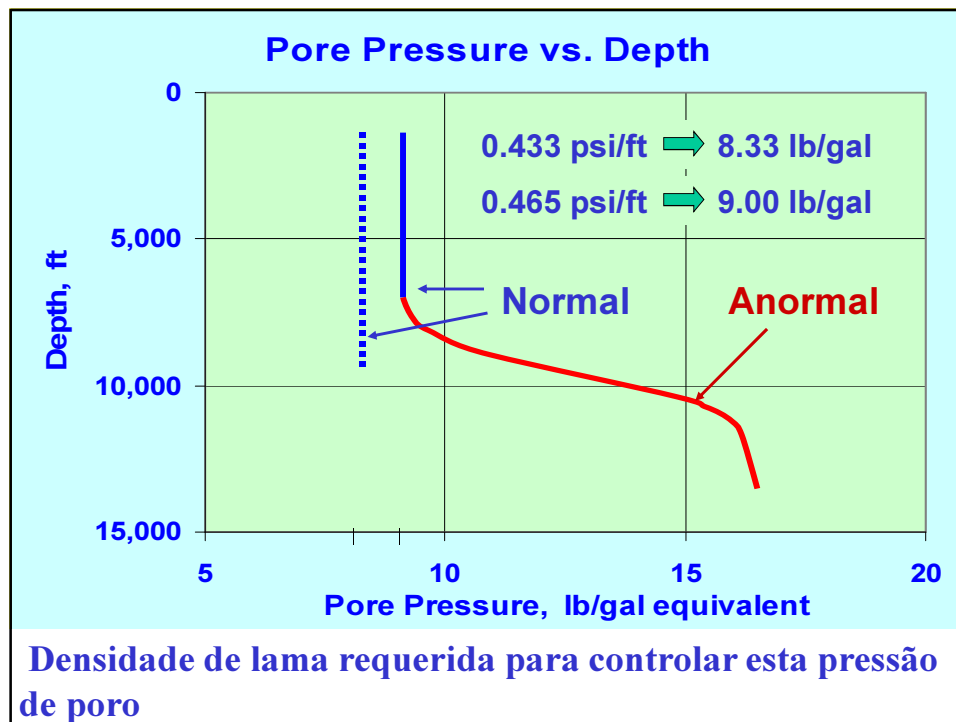
- ❖ Pressão normal de poros
- ❖ Pressão subnormal de poros
- ❖ Pressão anormal de poros
- ❖ Origem da pressão de poros
- ❖ Origem da pressão anormal de poros
- ❖ Densidade e porosidade vs. profundidade

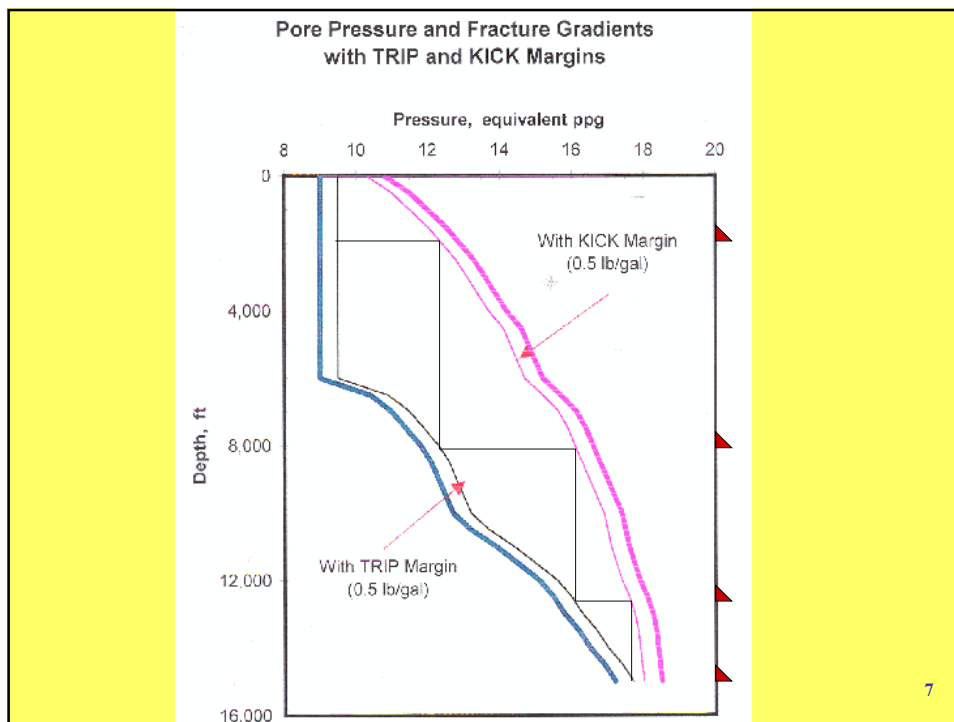
3

Pressões de poros normais e anormais



4





Pressão de poros

- ❖ = Pressão da formação
- ❖ = Pressão do fluido da formação
- ❖ = Pressão no fluido contido nos espaços porosos da rocha

Pressão de poros

- ❖ Gradiente normal de pressão correspondente ao gradiente hidrostático de uma coluna de água doce ou salgada
- ❖ **Exemplo:** Determine a pressão de poros de uma formação normalmente pressurizada no Golfo do México a uma profundidade de 9000 pés.

9

Pressão de poros

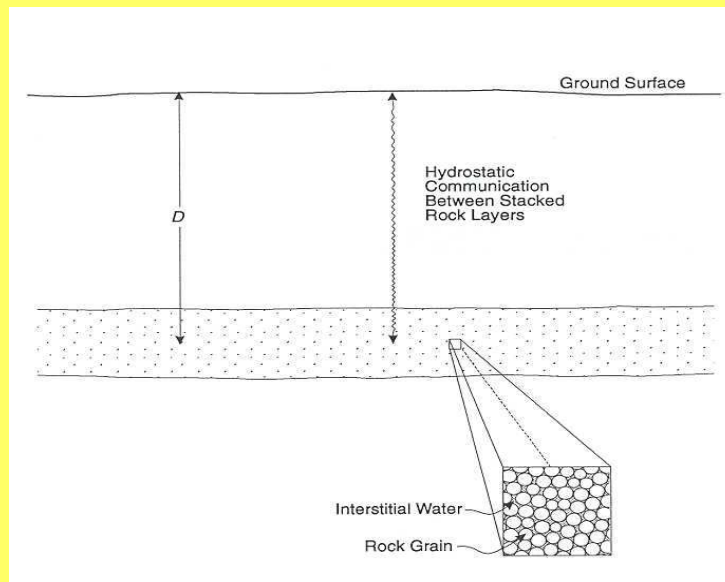
TABLE 2.1 - NORMAL PORE PRESSURE GRADIENTS IN SPECIFIC GEOGRAPHIC AREAS¹

Region	Pore Pressure Gradient	
	psi/ft	kPa/m
Anadarko Basin	0.433	9.64
California	0.439	9.77
Gulf of Mexico	0.465	10.35
Mackenzie Delta	0.442	9.84
Malaysia	0.442	9.84
North Sea	0.452	10.06
Rocky Mountains	0.436	9.71
Santa Barbara Channel	0.452	10.06
West Africa	0.442	9.84
West Texas	0.433	9.64

RESPOSTA $p_n = g_n D = 0.465 \text{ psi/ft} * 9,000 \text{ ft}$
 $p_n = 4,185 \text{ psig}$

10

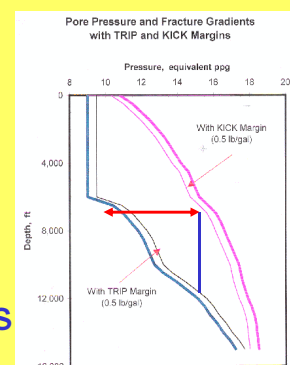
Pressão Normal



11

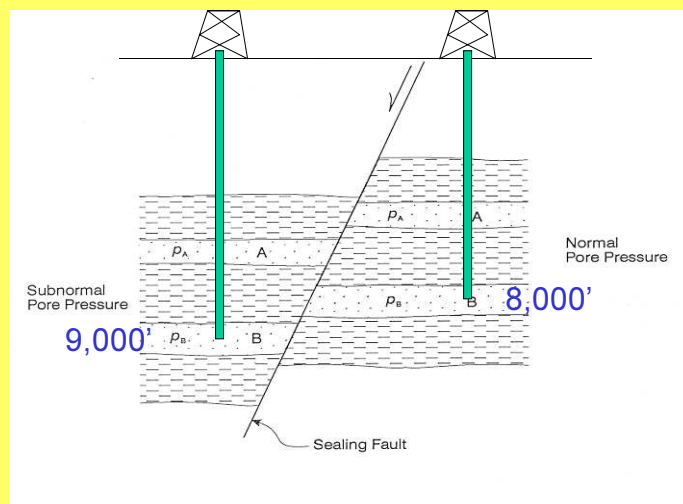
Pressões subnormais

- ❖ Gradientes de pressão de formação menores do que os gradientes normais para a uma determinada área.
- ❖ Problemas de perda de circulação e de aderência (sticking) diferencial são problemas comuns nestas áreas



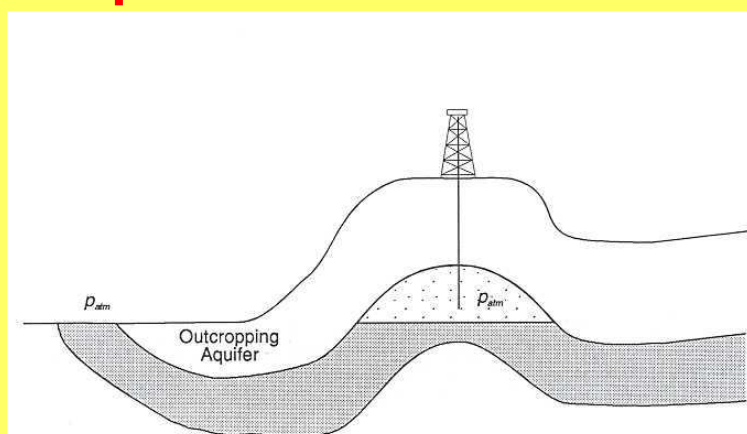
12

Pressões subnormais devido à falhas



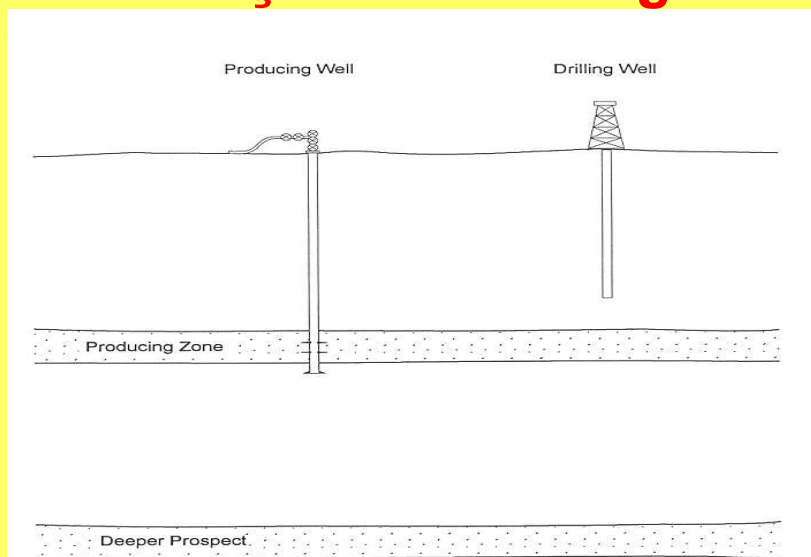
13

Aquífero abaixo da sonda



14

Produção de óleo e gás



15

Pressões anormais

- ❖ Pressões anormais são pressões de formação maiores do que pressões normais.
- ❖ Podem causar sérios problemas para a perfuração.
- ❖ Há várias causas para a pressão anormal.

16

Pressões anormais

- ❖ Todas as pressões normais exigem algum meio para selar ou prender (trap) a pressão dentro do corpo rochoso.
- ❖ De outro modo a volta para um equilíbrio hidrostático seria eventualmente restaurado.

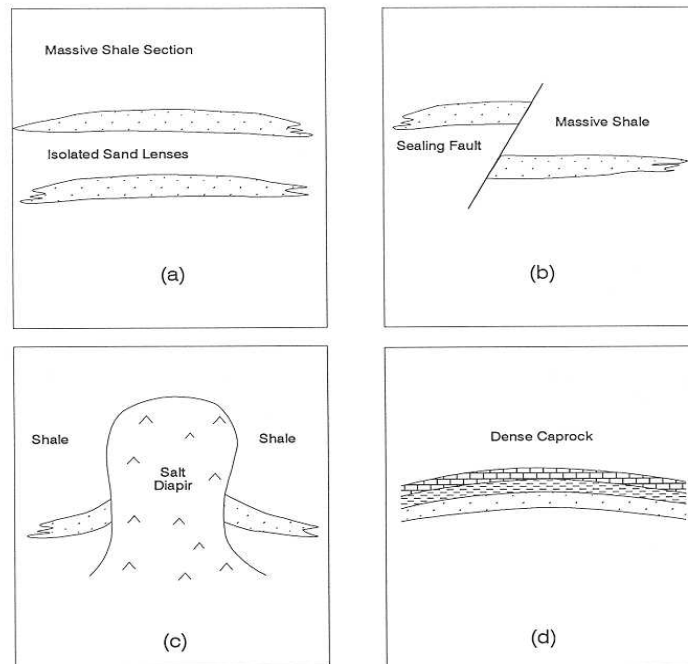
17

Pressões anormais

- ❖ Xistos maciços proporcionam bom isolamento da pressão, mas os xistos têm alguma permeabilidade. Assim se houver tempo suficiente, a pressão normal será eventualmente reestabelecida.
- ❖ Pode levar 10 milhões de anos para que uma pressão normal se reestabeleça.

18

Selantes de Pressão



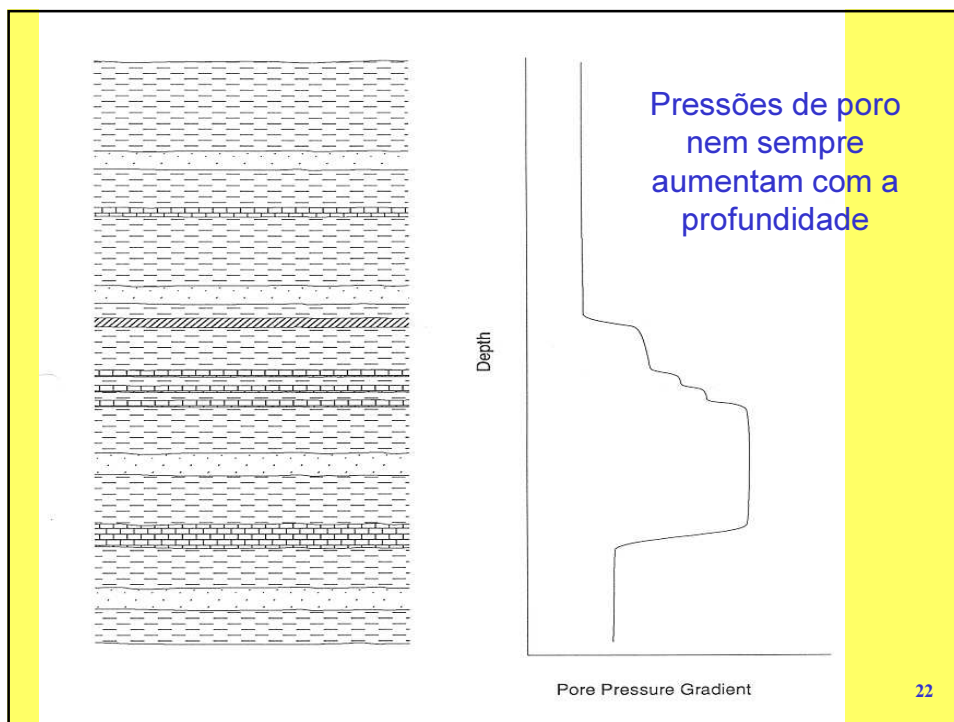
Pressões anormais

- ❖ Rochas densas devem ser sempre um alerta para o engenheiro de que a pressão de poros pode estar mudando.
- ❖ Muitos processos de pressão anormal são simplesmente o reverso daqueles de efeito subnormal.

Pressões anormais

- ❖ Por exemplo, a conversão para um nível piezométrico baixo de água é a pressão anormal de um poço artesiano.
- ❖ Um camada espessa de areia gasosa que é normalmente pressurizada no fundo da areia será pressurizada anormalmente no topo da areia.

21



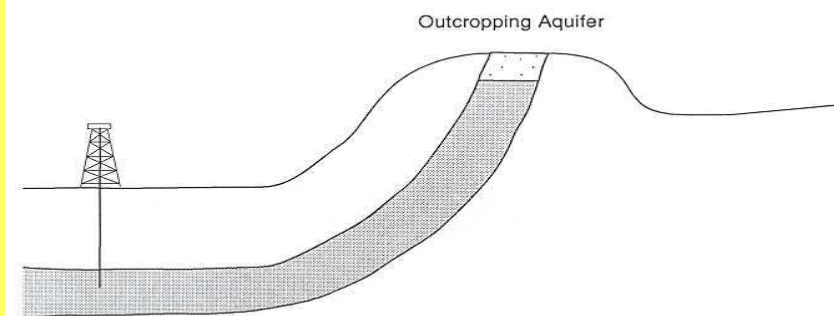
22

Causas da pressão anormal

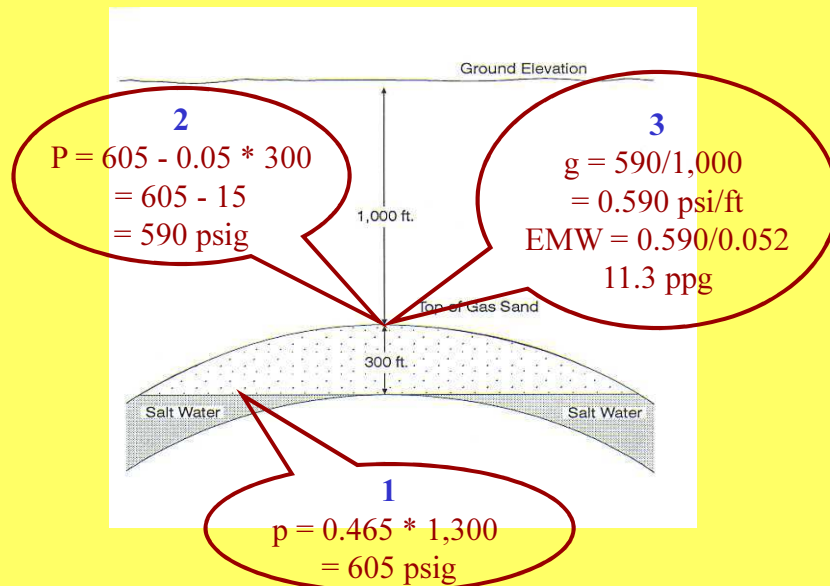
TABLE 2.2 - POTENTIAL REASONS FOR ABNORMAL PORE PRESSURE GRADIENTS

- Artesian systems
- Structural reasons
- Tectonics
 - Faults
 - Salt or shale diapirs
 - Other
- Surface erosion
- Rock diagenesis
 - Sulfates
 - Precipitation
 - Clays
- Thermal effects
- Osmosis through shale
- Biochemical effects
- External pressure sources
 - Natural
 - Man-made
- Undercompacted shale

Aqüífero

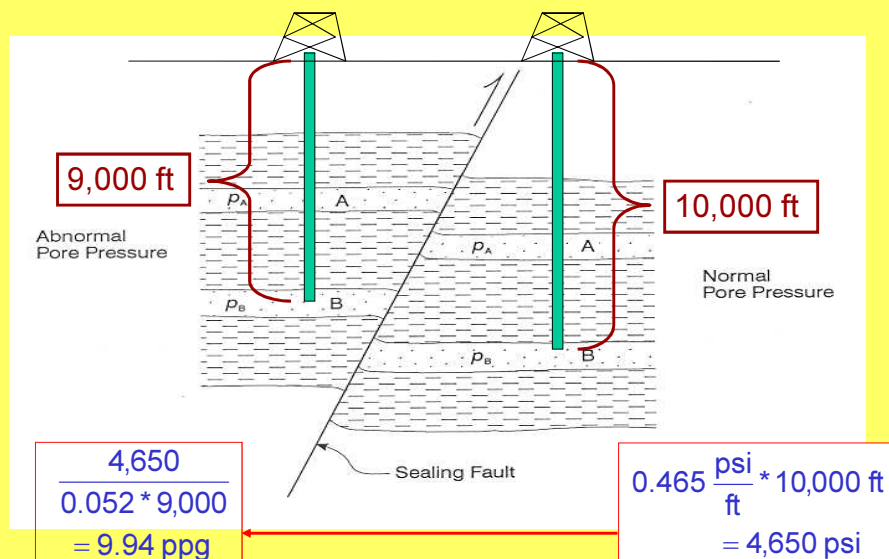


Areia gasosa espessa

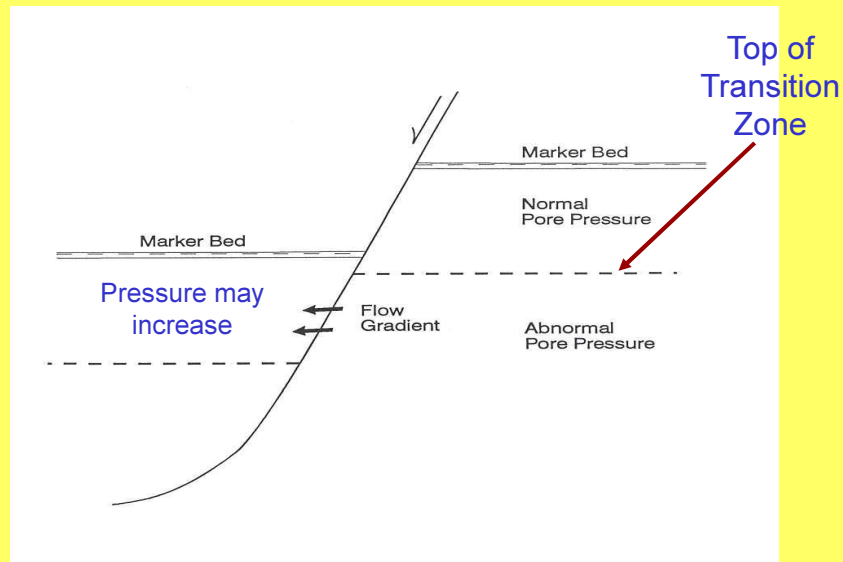


25

Falha Normal

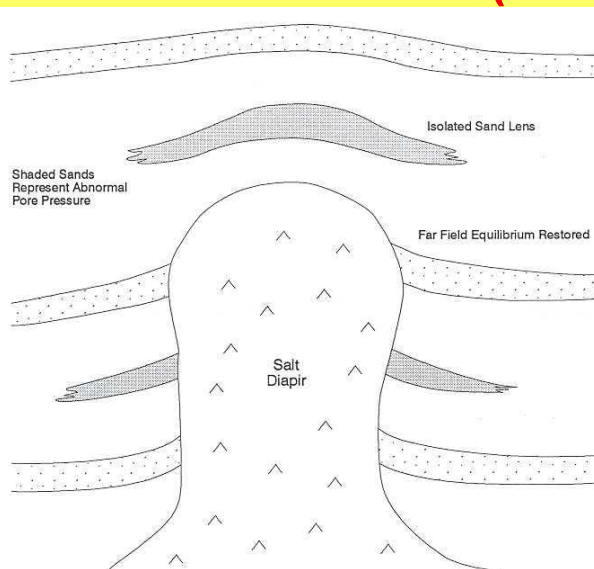


Falha descendente



27

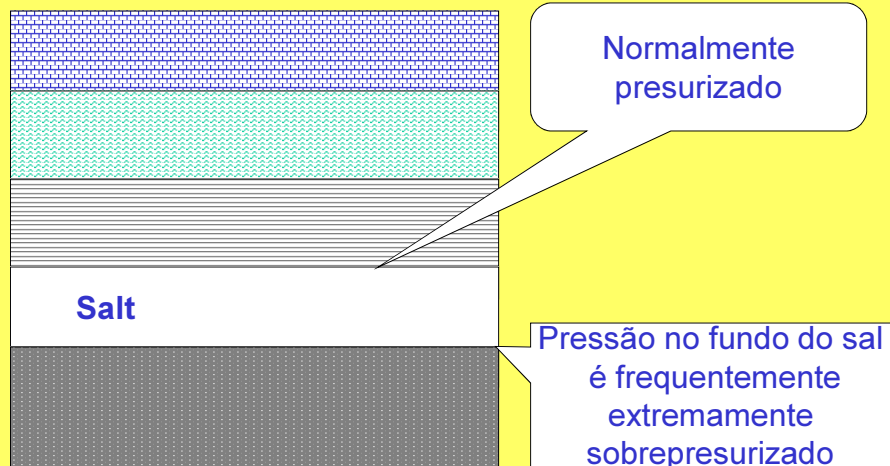
Domo salino (salt diapir)



Os domos salinos “fluem” plasticamente ou extrudam para camadas sedimentadas previamente. A compressão resultante pode resultar em sobrepressão.

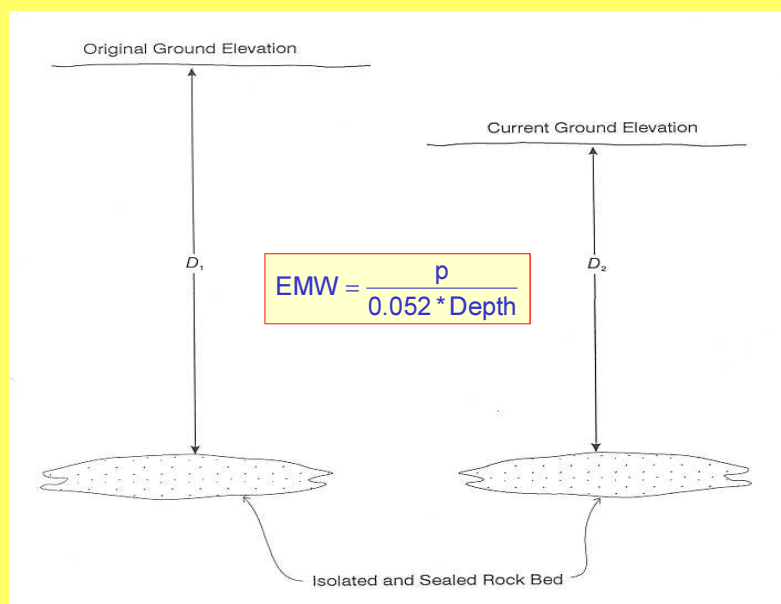
28

Formações salinas



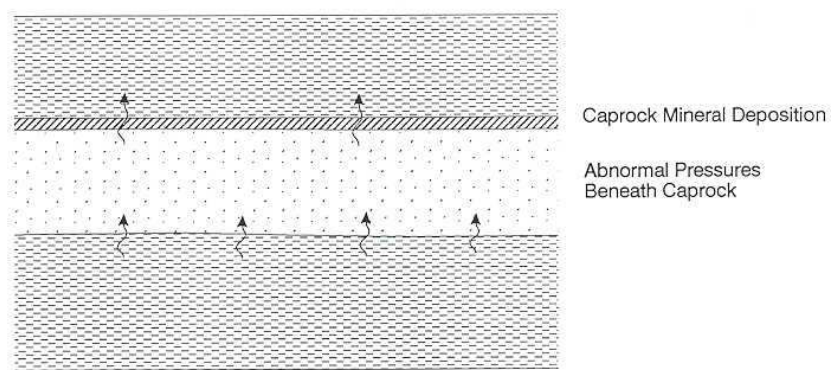
29

Erosão



30

Deposição mineral no capeamento da rocha



Possible precipitation of carbonate and silica minerals

31

Pressões anormais artificiais (homem)

Blowout
subterrâneo

Vazamento no
revestimento

Falha na
cimentação

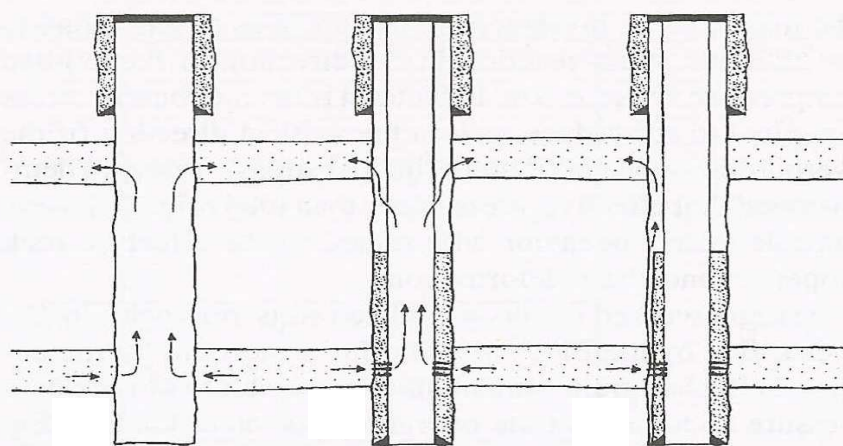


Fig. 2.15—Three examples of shallow formations being charged with deeper gas.

Teoria da compactação da pressão anormal

- ❖ Melhor explicação para a maioria das ocorrências naturais de pressões anormais
- ❖ Em novas áreas, interpretações geológicas e geofísicas juntamente com analogias de áreas conhecidas são sempre importantes

33

Teoria da compactação

- ❖ Durante a deposição, os sedimentos são compactados pela carga da cobertura e são sujeitos a altas temperaturas com o incremento da profundidade enterrada.
- ❖ A porosidade é reduzida à medida que a água é forçada a sair.



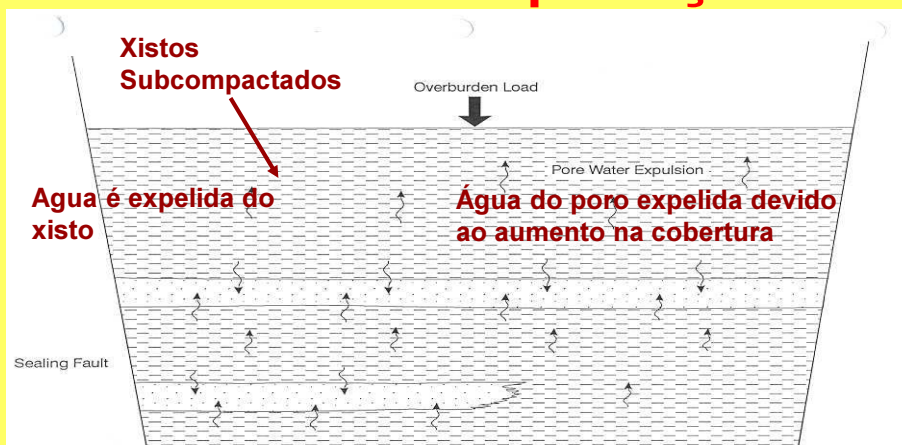
34

Teoria da compactação

- ❖ O equilíbrio hidrostático dentro das camadas compactadas é retido à medida que a água expelida fica livre para escapar.
- ❖ Se a água não pode escapar, ocorre a pressão anormal

35

Teoria da compactação



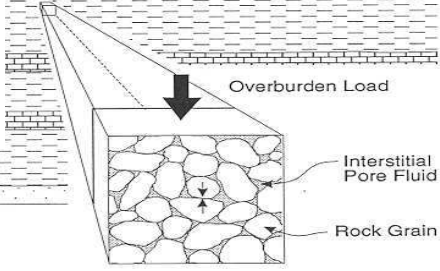
Se a água expelida não for livre para escapar, pressões anormais podem resultar. A compactação suficiente não pode ocorrer por isso os fluidos do poro carregam mais da cobertura

36

Carga do capeamento suportada pela tensão vertical no arranjo de grãos e pela pressão de fluido do poro

$$\sigma_{ob} = \sigma_{ev} + p_p$$

σ_{ob} = overburden stress
 σ_{ev} = matrix stress
 p_p = pore pressure



37

Teoria da compactação

- ❖ A porosidade média em sedimentos, geralmente decresce com a aumento da profundidade devido ao aumento da carga do capeamento.
- ❖ Isto resulta em um aumento da densidade do material com a aumento da profundidade, e o aumento da resistência da rocha.

38

Teoria da compactação

- ❖ De um log de porosidade, podemos construir um gráfico da densidade vs. profundidade.
- ❖ A partir disto (ou diretamente do log da densidade), podemos calcular a tensão do capeamento em função da profundidade.

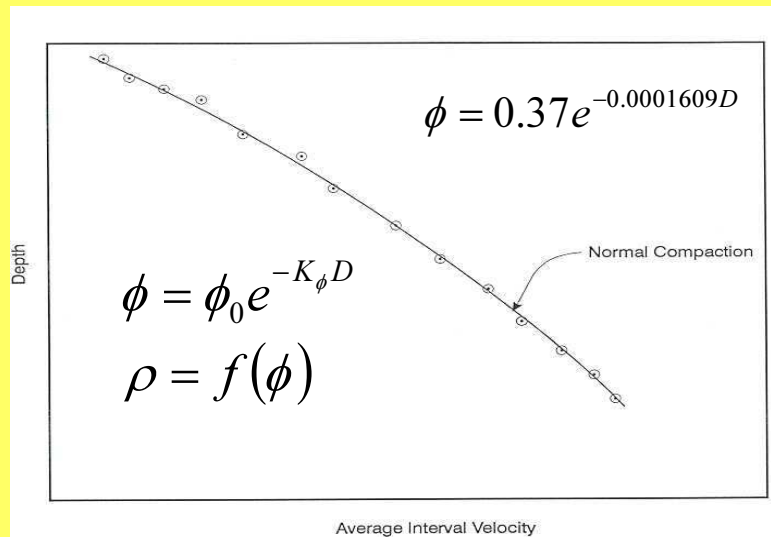
39

Teoria da compactação

TABLE 2.4 - AVERAGE SEDIMENT POROSITY FOR THE SANTA BARBARA CHANNEL

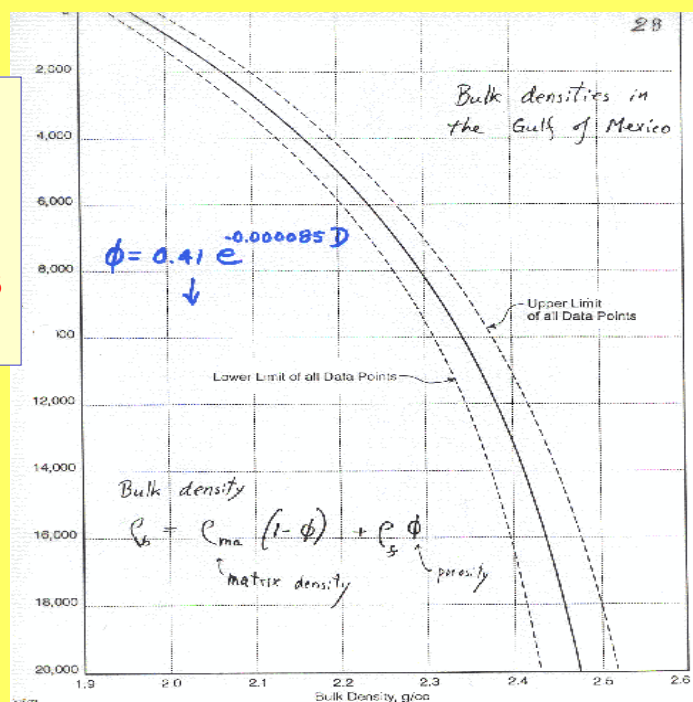
Depth, ft	Bulk Density, g/cc	Average Porosity, fraction
0	2.050	0.374
500	2.100	0.342
1,000	2.140	0.318
1,500	2.180	0.293
2,000	2.210	0.274
2,500	2.260	0.243
3,000	2.290	0.224
3,500	2.320	0.205
4,000	2.340	0.193
4,500	2.370	0.174
5,000	2.400	0.156
5,500	2.420	0.143
6,000	2.440	0.131
6,500	2.460	0.118
7,000	2.470	0.112
7,500	2.480	0.106
8,000	2.490	0.100
8,500	2.495	0.097
9,000	2.500	0.093
9,500	2.505	0.090
10,000	2.510	0.087

Densidades - Santa Barbara Channel



41

GOM Bulk Densities



Previsão da pressão de poro

- ❖ Pressão do capeamento vs. Profundidade
- ❖ Porosidade vs. Profundidade
- ❖ Previsão da pressão de poro
 - ❖ Por analogia
 - ❖ Por métodos sísmicos
 - ❖ Por mudanças na taxa de perfuração (MWD)
- ❖ Fatores que afetam a taxa de perfuração

43

Tensão no capeamento (Overburden Stress)

$$\sigma_{ob} = \int \rho_b g dD$$

$$\sigma_{ob} = 0.052 \int_0^D [\rho_{ma} (1 - \phi) + \rho_f \phi] dD$$

fazendo

$$\phi = \phi_0 e^{-k_\phi D}$$

E integrando-se

$$\sigma_{ob} = 0.052 \left[\rho_{ma} D - \frac{(\rho_{ma} - \rho_f) \phi_0}{k_\phi} (1 - e^{-k_\phi D}) \right]$$

44

Exemplo

❖ Calculate the overburden stress at a depth of 7,200 ft in the Santa Barbara Channel. Compare to Eaton's prediction.

❖ Assuma

$$\phi_o = 0.37$$

$$\rho_{ma} = 2.6 \text{ gm/cc}$$

$$k_\phi = 0.0001609 \text{ ft}^{-1}$$

$$\rho_f = 1.044 \text{ gm/cc}$$

45

Solution

$$\sigma_{ob} = 0.052 \left[\rho_{ma} D - \frac{(\rho_{ma} - \rho_f) \phi_o}{k_\phi} (1 - e^{-k_\phi D}) \right]$$

$$\sigma_{ob} = 0.052 \left[2.6 * 8.33 * 7,200 - \frac{(2.6 - 1.044) 8.33 * 0.37}{0.0001609} * (1 - e^{-0.0001609 * 7,200}) \right]$$

$$\sigma_{ob} = 7,032 \text{ psig}$$

Eaton's Fig. 2.21 shows a value of :

$$g_{ob} = 0.995 \text{ psi/ft}$$

So,

$$(\sigma_{ob})_{eaton} = 0.995 * 7,200 = 7,164 \text{ psig}$$

$$\{ \text{Difference} = 132 \text{ psi or } 1.9\% \}$$

46

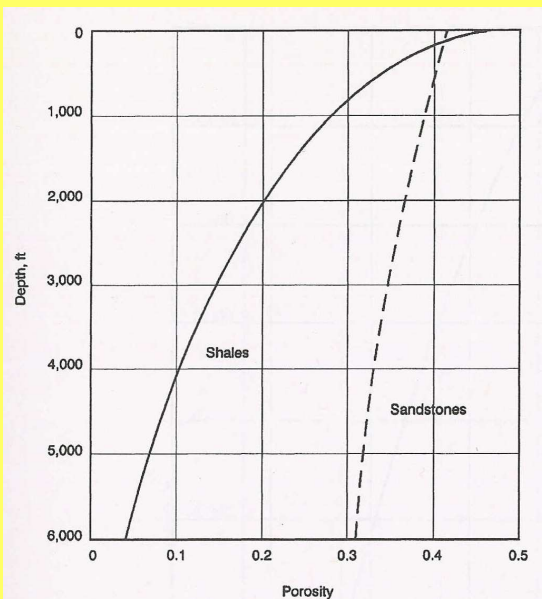


Fig. 2.19—The effect of compaction on shale and sandstone porosity.²¹

A tensão do capeamento depende da porosidade, e a porosidade depende da tensão de capeamento

Os xistos são mais compactáveis do que os arenitos.

Xistos jovens são mais compactáveis do que os mais velhos.

Calcários e dolomitos são apenas levemente compactáveis.

47

Rule of Thumb

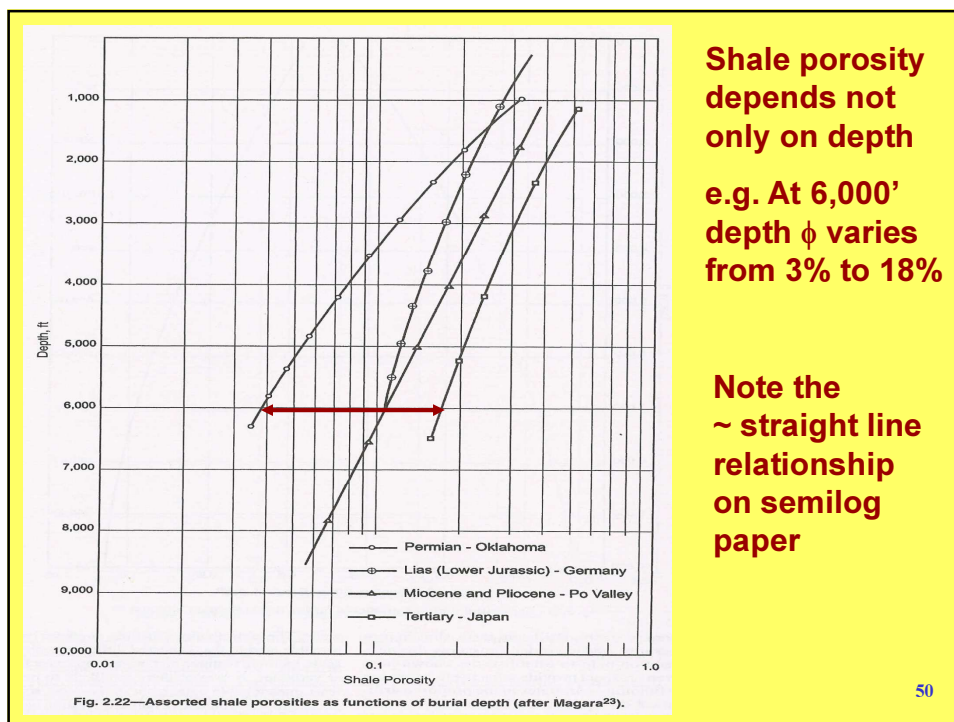
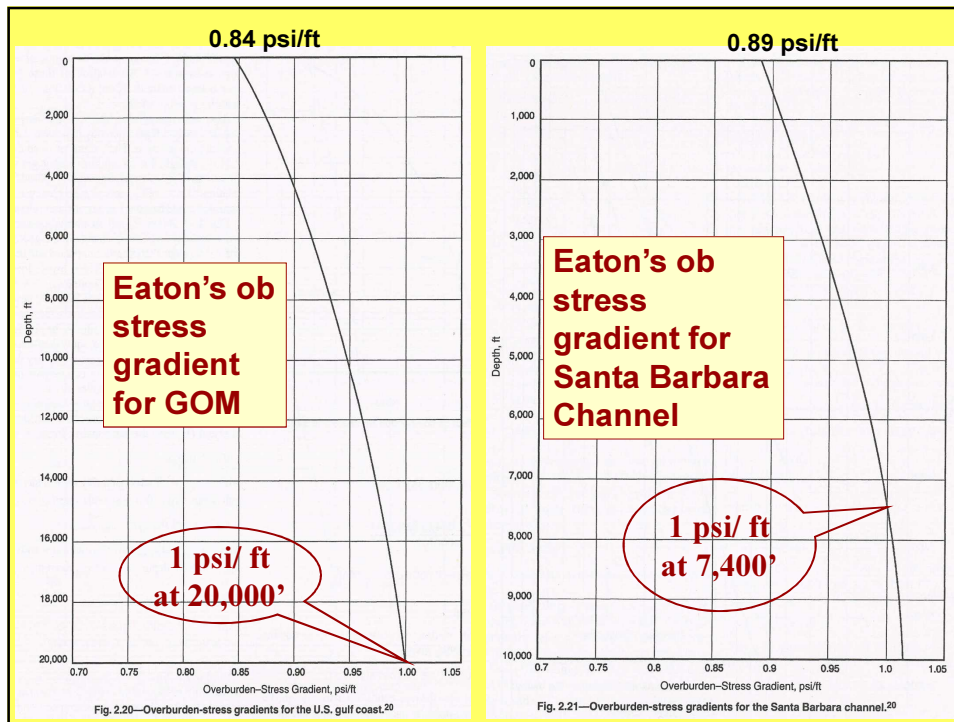
A common assumption for sedimentary deposits is $g_{ob} = 1.0$ psi/ft

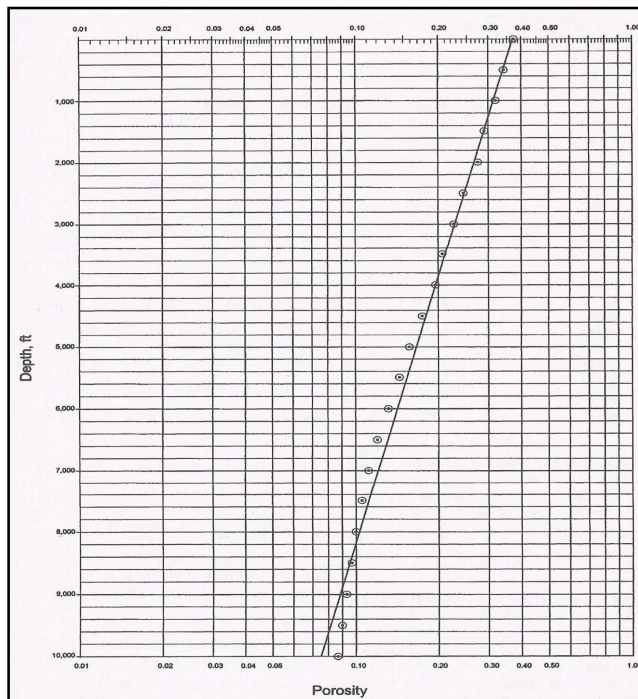
This is not a good assumption in young sediments

Eaton predicts that an overburden stress gradient of 1 psi/ft be achieved at a depth of 20,000 ft in the GOM

Eaton predicts that an overburden stress gradient of 1 psi/ft be achieved at a depth of 7,400 ft in the Santa Barbara Channel

48





Eaton's porosities
from the Santa
Barbara Channel.

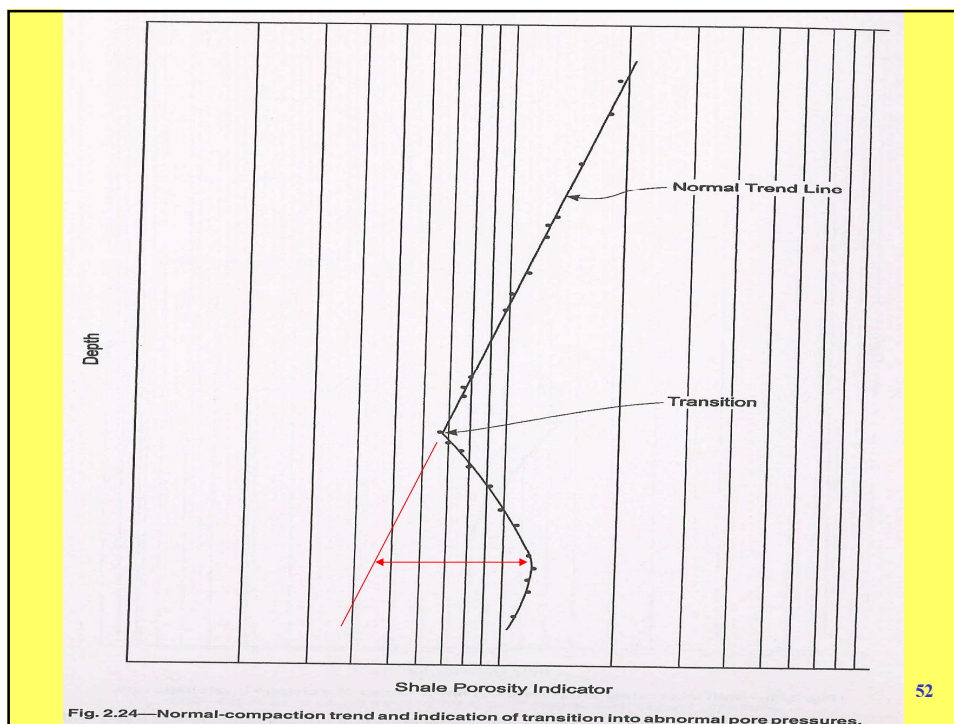
The straight line is
a plot of the
equation:

$$\phi = 0.37e^{-0.0001609D}$$

At $D = 0$, $\phi = 0.37$

At $D = 10,000$ ft
 $\phi = 0.074$

51



52