

APOSTILA DE EXERCÍCIOS MECÂNICA DOS SOLOS UFPR

PROGRAMA DE MONITORIA TC-035
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELABORAÇÃO:

JOÃO GABRIEL CHIAMULERA BÖHLER
MATEUS MIRANDA COSTA PINTO

REVISÃO:

ALEXANDRE AUGUSTO BRESSAN BORA
ANDRESSA SAMISTRARO NOGUEIRA

ORIENTAÇÃO:

Profª LIAMARA PAGLIA SESTREM
Profª ROBERTA BOMFIM BOZSCZOWSKI

Sumário

Introdução	5
Símbolos	6
Tensões 01.01	8
Tensões 01.02	9
Tensões 01.03	10
Tensões 01.04	12
Tensões 01.05	15
Tensões 01.06	18
Tensões 01.07	21
Tensões 01.08	23
Tensões 01.09	24
Tensões 01.10	29
Tensões 01.11	30
Tensões 01.12	33
Tensões 01.13	36
Tensões 01.14	38
Permeabilidade 02.01	43
Permeabilidade 02.02	44
Permeabilidade 02.03	45
Permeabilidade 02.04	45
Permeabilidade 02.05	47
Permeabilidade 02.06	47
Permeabilidade 02.07	49
Permeabilidade 02.08	50
Permeabilidade 02.09	51
Permeabilidade 02.10	52
Permeabilidade 02.11	53
Permeabilidade 02.12	54

Permeabilidade 02.13	56
Permeabilidade 02.14	57
Permeabilidade 02.15	58
Permeabilidade 02.16	60
Permeabilidade 02.17	61
Permeabilidade 02.18	62
Permeabilidade 02.19	63
Permeabilidade 02.20	64
Permeabilidade 02.21	66
Permeabilidade 02.22	68
Permeabilidade 02.23	69
Permeabilidade 02.24	71
Permeabilidade 02.25	73
Permeabilidade 02.26	74
Permeabilidade 02.27	77
Resistência 03.01	80
Resistência 03.02	86
Resistência 03.03	89
Resistência 03.04	90
Resistência 03.05	92
Resistência 03.06	94
Resistência 03.07	96
Resistência 03.08	98
Resistência 03.09	100
Resistência 03.10	102
Resistência 03.11	128
Resistência 03.12	133
Resistência 03.13	134
Resistência 03.14	135

Resistência 03.15	137
Resistência 03.16	139
Resistência 03.17	142
Adensamento 04.01	144
Adensamento 04.02	148
Adensamento 04.03	154
Adensamento 04.04	155
Adensamento 04.05	156
Adensamento 04.06	157
Adensamento 04.07	159
Adensamento 04.08	160
Adensamento 04.09	162
Adensamento 04.10	163
Adensamento 04.11	165
Adensamento 04.12	166
Adensamento 04.13	169
Adensamento 04.14	171
Adensamento 04.15	173
Adensamento 04.16	174
Adensamento 04.17	175
Adensamento 04.18	178
Adensamento 04.19	181
Adensamento 04.20	185
Adensamento 04.21	189
Conclusão	193
Referências	194

Introdução

A partir do anseio de ter um material de fácil acesso e compreensão para auxiliar o aprendizado da Mecânica dos Solos, foi produzida a Apostila de Exercícios de Mecânica dos Solos UFPR. A iniciativa partiu de diálogo conjunto entre professoras e alunos da disciplina de Mecânica dos Solos (TC-035), da Universidade Federal do Paraná, e foi desenvolvida durante atividades remotas ao longo do ano de 2021. Fator motivante para a elaboração deste documento foi também a tentativa de aproximação entre os discentes durante tempos de pandemia, com o objetivo de aumentar a interação da comunidade acadêmica.

A apostila contém exercícios e resoluções dos seguintes temas: *Tensões*, *Permeabilidade*, *Resistência* e *Adensamento*. Possui caráter universal e independe de outros materiais para consulta direta. Reitera-se, no entanto, que seu uso deve ser complementar ao estudo de literaturas específicas, algumas das quais referenciadas ao final do documento, para o pleno aprendizado da profunda Mecânica dos Solos.

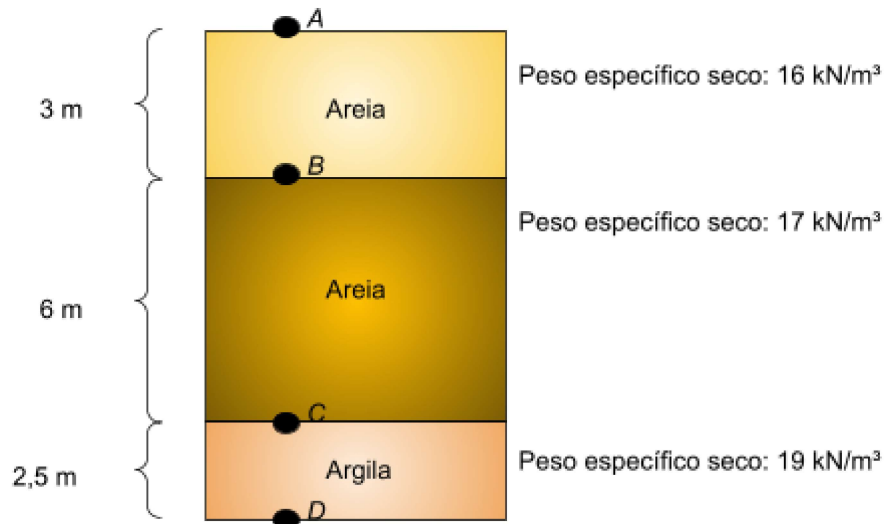
Símbolos

Símbolo	Leitura	Descrição
γ	<i>Gamma</i>	Peso Específico
γ_d	-	Peso Específico Seco
γ_s	-	Peso Específico Saturado
γ_w	-	Peso Específico da Água
γ_{sub}	-	Peso Específico Submerso
w	-	Teor de Umidade
G_s	-	Densidade Relativa dos Grãos
σ	<i>Sigma</i>	Tensão
σ'	-	Tensão Efetiva
σ_v	-	Tensão Vertical
σ_h	-	Tensão Horizontal
u	-	Poropressão
K_0	-	Coefficiente de Empuxo no Repouso
RSA/OCR	-	Razão de Sobreadensamento/ <i>Over Consolidation Ratio</i>
φ	<i>Phi</i>	Ângulo de Atrito
φ'	-	Ângulo de Atrito Efetivo
i	-	Gradiente Hidráulico
Δ	<i>Delta</i>	Variação
k	-	Condutividade Hidráulica/ Coeficiente de Permeabilidade
K	-	Permeabilidade
n	-	Porosidade
Q	-	Vazão
e	-	Índice de Vazios

S	-	Grau de Saturação
N_F	-	Canais de Fluxo
N_D	-	Canais Equipotenciais
α	<i>Alpha</i>	Ângulo de Ruptura
c	-	Coesão
c'	-	Coesão Efetiva
σ_1	-	Tensão Principal Maior
σ_3	-	Tensão Principal Menor
σ_d	-	Tensão Desviadora
τ	<i>Tau</i>	Tensão Cisalhante
τ'	-	Tensão Cisalhante Efetiva
E	-	Módulo de Elasticidade
ρ	<i>Rho</i>	Recalque
C_c	-	Índice de Compressão
C_R	-	Índice de Recompressão
U	-	Grau de Consolidação
T	-	Fator Tempo
H_d	-	Altura de Drenagem
m_v	-	Coeficiente de Deformação Volumétrica
C_v	-	Coeficiente de Adensamento

Tensões 01.01

Com base no perfil de solo seco a seguir, determine as tensões totais verticais nos pontos B, C e D.



Resolução 01.01

$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

Ponto B:

$$\sigma_{v_B} = \gamma_{d_1} \cdot H_1 = 16 \cdot 3$$

$$\sigma_{v_B} = 48 \text{ kN/m}^2 = 48 \text{ kPa}$$

Ponto C:

$$\sigma_{v_C} = \gamma_{d_1} \cdot H_1 + \gamma_{d_2} \cdot H_2 = 16 \cdot 3 + 17 \cdot 6$$

$$\sigma_{v_C} = 150 \text{ kN/m}^2 = 150 \text{ kPa}$$

Ponto D:

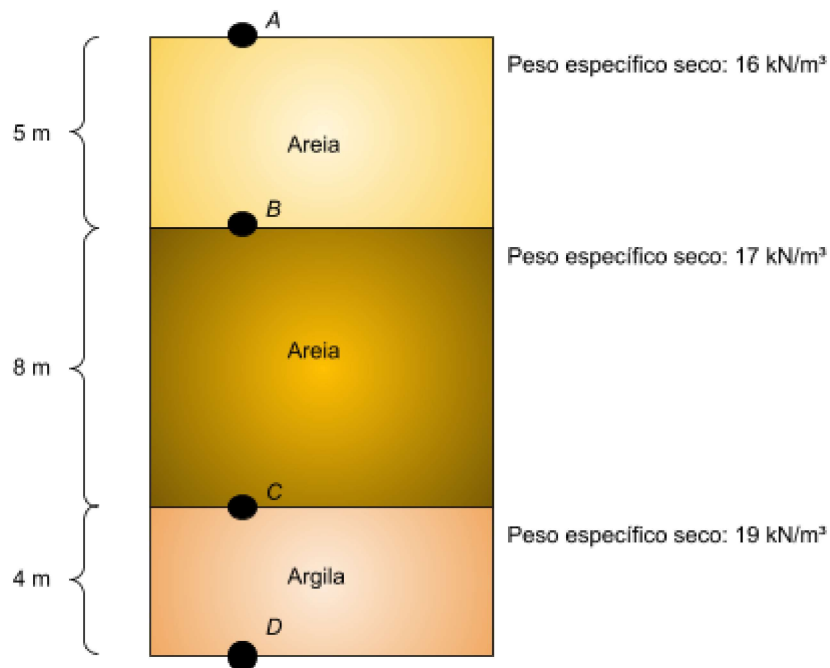
$$\sigma_{v_D} = \gamma_{d_1} \cdot H_1 + \gamma_{d_2} \cdot H_2 + \gamma_{d_3} \cdot H_3$$

$$\sigma_{v_D} = 16 \cdot 3 + 17 \cdot 6 + 19 \cdot 2,5$$

$$\sigma_{v_D} = 197,5 \text{ kPa}$$

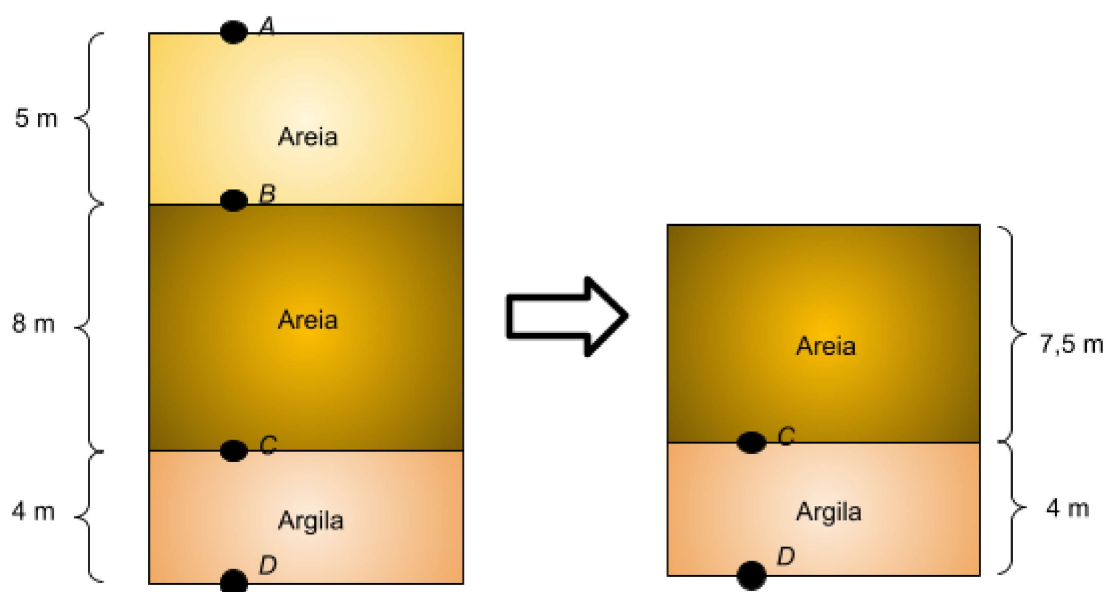
Tensões 01.02

Com base no perfil de solo seco a seguir, determine as tensões totais verticais nos pontos C e D, considerando que houve uma escavação de 5,5 m a partir do ponto A.



Resolução 01.02

Escavou-se toda a primeira camada e 0,5 m da segunda.



$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

Ponto C:

$$\sigma_{v_C} = \gamma_{d2} \cdot 7,5 = 17 \cdot 7,5$$

$$\sigma_{v_C} = 127,5 \text{ kN/m}^2 = 127,5 \text{ kPa}$$

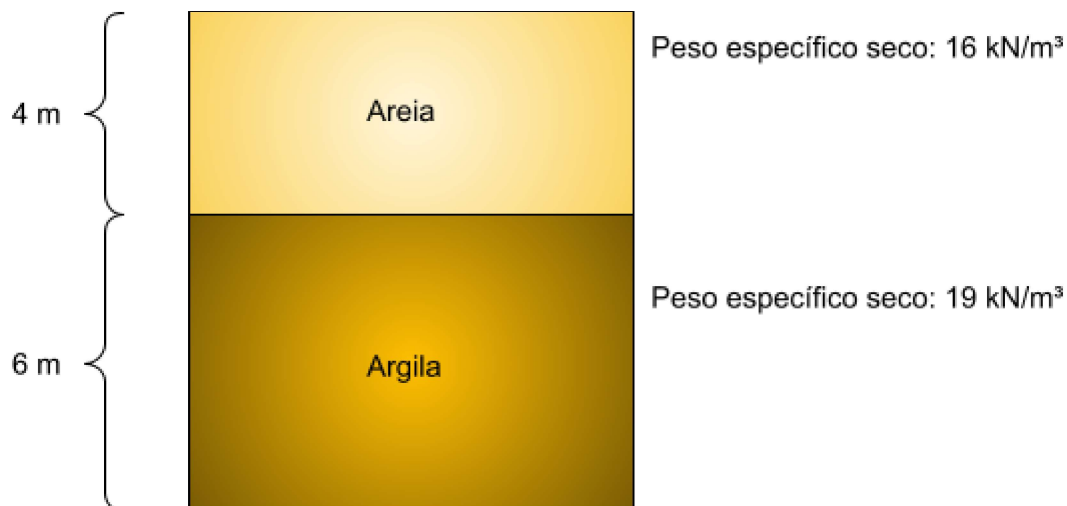
Ponto D:

$$\sigma_{v_D} = \gamma_{d2} \cdot 7,5 + \gamma_{d3} \cdot 4$$

$$\sigma_{v_D} = 17 \cdot 7,5 + 19 \cdot 4 = 203,5 \text{ kPa}$$

Tensões 01.03

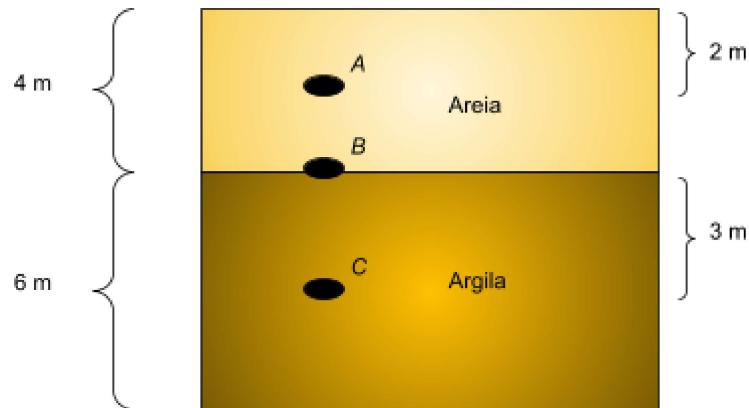
Com base no perfil de solo seco a seguir, determine:



- A tensão total vertical no centro da camada de areia, na interface entre a areia e a argila e no centro da camada de argila.
- A tensão total vertical na interface entre as camadas de areia e argila após a construção de um aterro de 2 metros de espessura com peso específico igual a 22 kN/m³.
- A tensão total vertical no centro da camada de argila após a construção de um aterro de 4 metros de espessura com peso específico igual a 22 kN/m³.

Resolução 01.03

a)



$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

Ponto A:

$$\sigma_{v_A} = \gamma_{d1} \cdot 2 = 16 \cdot 2 = 32 \text{ kPa}$$

Ponto B:

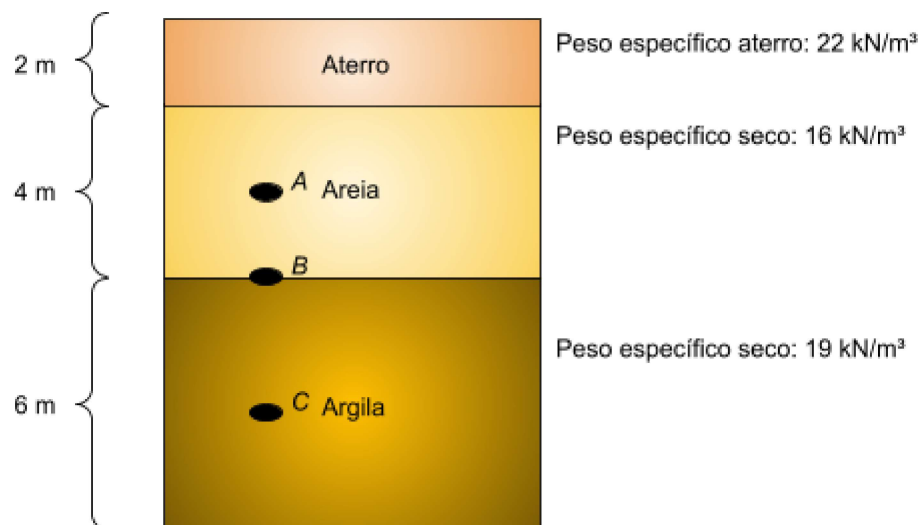
$$\sigma_{v_B} = \gamma_{d1} \cdot H_1 = 16 \cdot 4 = 64 \text{ kPa}$$

Ponto C:

$$\sigma_{v_C} = \gamma_{d1} \cdot H_1 + \gamma_{d2} \cdot 3$$

$$\sigma_{v_C} = 16 \cdot 4 + 19 \cdot 3 = 121 \text{ kPa}$$

b)



$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

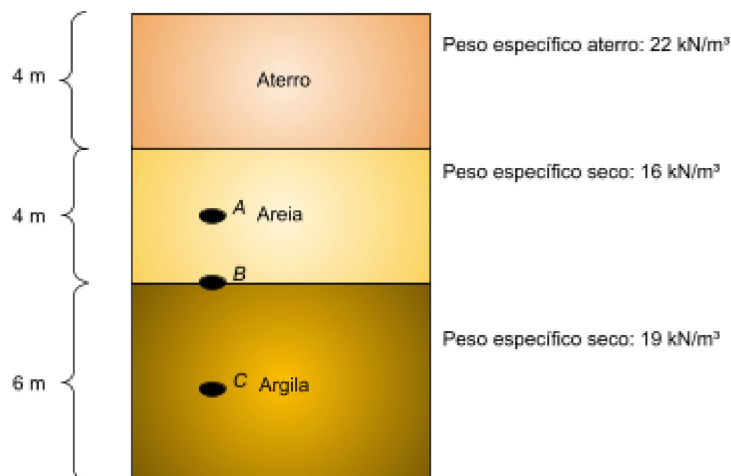
Ponto B:

$$\sigma_{vB} = \gamma_{aterro} \cdot H_{aterro} + \gamma_{d1} \cdot H_{1B}$$

$$\sigma_{vB} = 22 \cdot 2 + 16 \cdot 4$$

$$\sigma_{vB} = 108 \text{ kPa}$$

c)



$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

Ponto C:

$$\sigma_{vC} = \gamma_{aterro} \cdot H_{aterro} + \gamma_{d1} \cdot H_1 + \gamma_{d2} \cdot H_{2C}$$

$$\sigma_{vC} = 22 \cdot 4 + 16 \cdot 4 + 19 \cdot 3$$

$$\sigma_{vC} = 209 \text{ kPa}$$

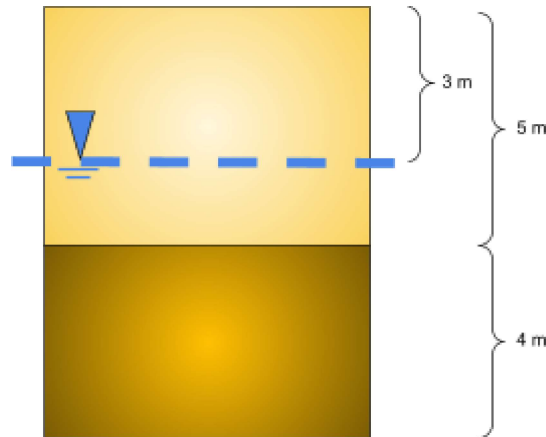
Tensões 01.04

Uma camada de argila saturada com 4 m de espessura está abaixo de 5 m de areia, enquanto o lençol freático está 3 m abaixo da superfície. Os pesos específicos saturados da argila e da areia são de 19 e 20 kN/m³, respectivamente. O peso específico seco da areia é de 17 kN/m³ e o da argila é de 16 kN/m³. Determine:

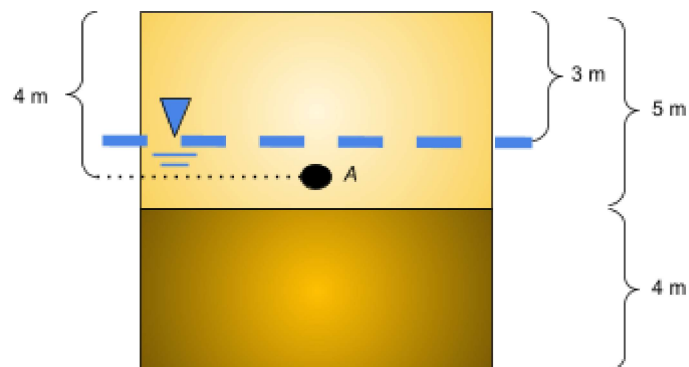
- O valor da tensão efetiva vertical em 4 m de profundidade.
- O valor da tensão efetiva vertical em 7,5 m de profundidade.
- A variação da tensão efetiva vertical atuante em 5 m de profundidade caso o lençol freático suba até a superfície.

Resolução 01.04

Representação:



a)



$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

$$\text{Poropressão: } u = \gamma_w \cdot H_w$$

$$\text{Tensão efetiva: } \sigma'_v = \sigma_v - u$$

Ponto A:

$$\sigma_{vA} = \gamma_{\text{areia seca}} \cdot H_1 + \gamma_{\text{areia saturada}} \cdot H_2$$

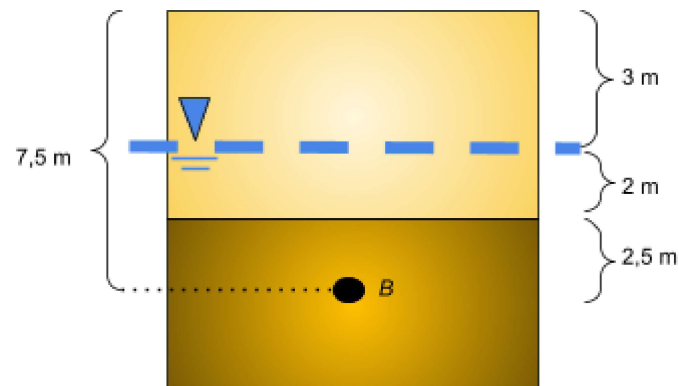
$$\sigma_{vA} = 17 \cdot 3 + 20 \cdot 1 = 71 \text{ kPa}$$

$$u_A = 10 \cdot 1 = 10 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vA} = \sigma_{vA} - u_A$$

$$\sigma'_{vA} = 71 - 10 = 61 \text{ kPa}$$

b)



$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

$$\text{Poropressão: } u = \gamma_w \cdot H_w$$

$$\text{Tensão efetiva: } \sigma'_v = \sigma_v - u$$

Ponto B:

$$\sigma_{vB} = \gamma_{\text{areia sec}} \cdot H_1 + \gamma_{\text{areia sat}} \cdot H_2 + \gamma_{\text{argila sat}} \cdot H_3$$

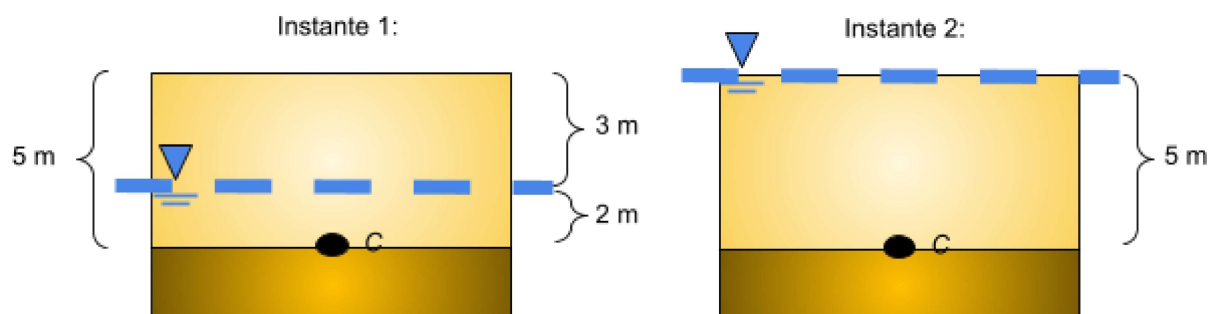
$$\sigma_{vB} = 17 \cdot 3 + 20 \cdot 2 + 19 \cdot 2,5 = 138,5 \text{ kPa}$$

$$u_B = 10 \cdot 4,5 = 45 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vB} = \sigma_{vB} - u_B$$

$$\sigma'_{vB} = 138,5 - 45 = 93,5 \text{ kPa}$$

c)



$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

$$\text{Poropressão: } u = \gamma_w \cdot H_w$$

$$\text{Tensão efetiva: } \sigma'_v = \sigma_v - u$$

Instante 1:

$$\sigma_{vc1} = 17 \cdot 3 + 20 \cdot 2 = 91 \text{ kPa}$$

$$u_{c1} = 10 \cdot 2 = 20 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vc1} = \sigma_{vc1} - u_{c1} = 71 \text{ kPa}$$

Instante 2:

$$\sigma_{vc2} = 20 \cdot 5 = 100 \text{ kPa}$$

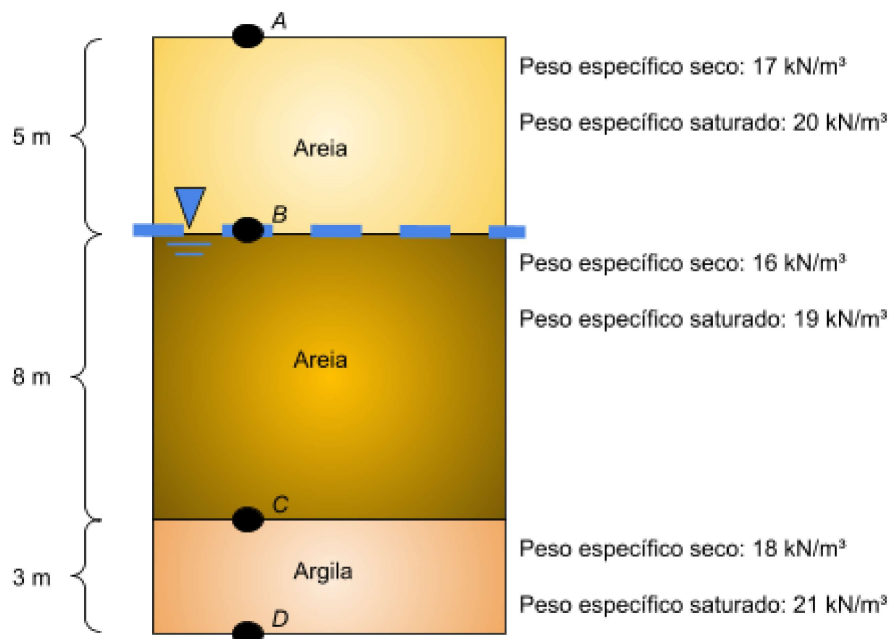
$$u_{c2} = 10 \cdot 5 = 50 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vc2} = \sigma_{vc2} - u_{c2} = 50 \text{ kPa}$$

Quanto mais água acima do solo, maior é a pressão do líquido sob os grãos, o que diminui o contato efetivo entre as partículas sólidas. Portanto, a **tensão efetiva**, que governa a resistência do solo, é **reduzida com a elevação do lençol freático**.

Tensões 01.05

Com base no perfil de solo apresentado a seguir, determine:



- O valor da tensão efetiva vertical no ponto C.
- A variação da tensão efetiva vertical no ponto C caso o lençol freático esteja em 2 m de profundidade.
- A variação da tensão efetiva vertical no ponto C caso o lençol freático suba até a superfície.
- A variação da tensão efetiva vertical no ponto C caso o lençol freático esteja 3 m acima da superfície.

Resolução 01.05

a)

$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

$$\text{Poropressão: } u = \gamma_w \cdot H_w$$

$$\text{Tensão efetiva: } \sigma'_v = \sigma_v - u$$

Ponto C:

$$\sigma_{vC} = \gamma_{are_1 \text{ seca}} \cdot H_1 + \gamma_{are_2 \text{ sat}} \cdot H_2$$

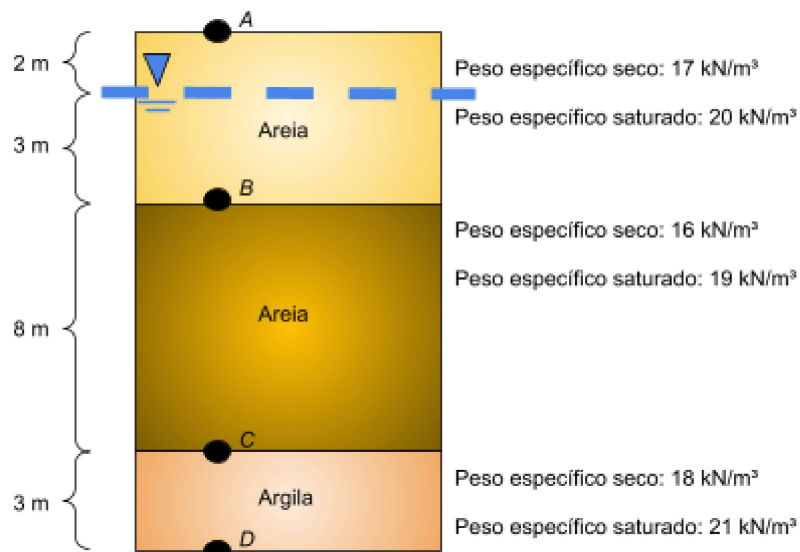
$$\sigma_{vC} = 17 \cdot 5 + 19 \cdot 8 = 237 \text{ kPa}$$

$$u_C = 10 \cdot 8 = 80 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vC} = \sigma_{vC} - u_C$$

$$\sigma'_{vC} = 237 - 80 = 157 \text{ kPa}$$

b)



Ponto C:

$$\sigma_{vC} = \gamma_{are_1 \text{ seca}} \cdot H_1 + \gamma_{are_1 \text{ sat}} \cdot H'_1 + \gamma_{are_2 \text{ sat}} \cdot H_2$$

$$\sigma_{vC} = 17 \cdot 2 + 20 \cdot 3 + 19 \cdot 8 = 246 \text{ kPa}$$

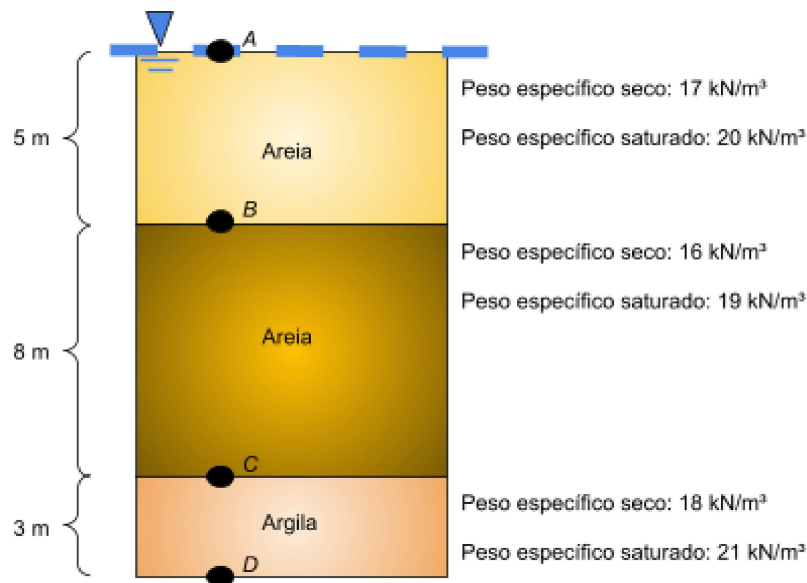
$$u_C = 10 \cdot 11 = 110 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vC} = \sigma_{vC} - u_C$$

$$\sigma'_{vC} = 246 - 110 = 136 \text{ kPa}$$

$$\text{Variação da tensão efetiva} = 136 - 157 = -21 \text{ kPa}$$

c)



Ponto C:

$$\sigma_{vC} = \gamma_{are_1sat} \cdot H_1 + \gamma_{are_2sat} \cdot H_2$$

$$\sigma_{vC} = 20 \cdot 5 + 19 \cdot 8 = 252 \text{ kPa}$$

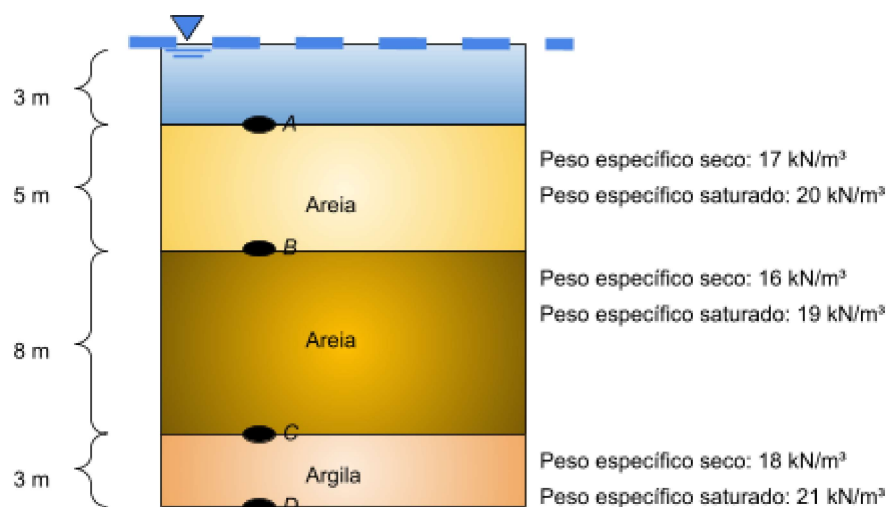
$$u_C = 10 \cdot 13 = 130 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vC} = \sigma_{vC} - u_C$$

$$\sigma'_{vC} = 252 - 130 = 122 \text{ kPa}$$

$$\text{Variação da tensão efetiva} = 122 - 157 = -35 \text{ kPa}$$

d)



Ponto C:

$$\sigma_{vC} = \gamma_w \cdot H_w + \gamma_{are_1sat} \cdot H_1 + \gamma_{are_2sat} \cdot H_2$$

$$\sigma_{vC} = 10 \cdot 3 + 20 \cdot 5 + 19 \cdot 8 = 282 \text{ kPa}$$

$$u_C = 10 \cdot 16 = 160 \text{ kPa}$$

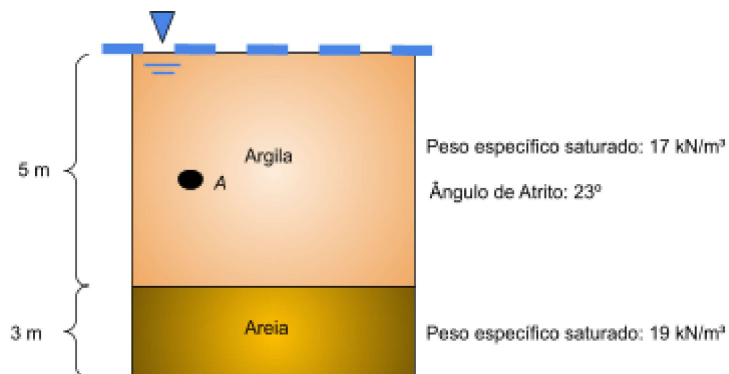
$$\sigma'_{vC} = \sigma_{vC} - u_C = 282 - 160 = 122 \text{ kPa}$$

$$\text{Variação da tensão efetiva} = 122 - 157 = -35 \text{ kPa}$$

Acima da superfície, a variação do nível d'água **não influencia a tensão efetiva** do solo.

Tensões 01.06

Com base no perfil de solo normalmente adensado apresentado a seguir, determine:



- O valor da tensão efetiva horizontal no centro da camada de argila.
- O valor da tensão efetiva horizontal no centro da camada de argila após a construção e posterior remoção de um aterro provisório no local para a aceleração do processo de adensamento. O aterro em questão possuía 2 metros de altura e peso específico natural de 18 kN/m³.
- O valor da tensão efetiva horizontal nesta mesma profundidade após uma escavação de 1,5 m, sendo que o nível do lençol freático foi rebaixado até a nova superfície do terreno.

Resolução 01.06

a)

$$\text{Tensão total: } \sigma_v = \gamma \cdot H$$

$$\text{Poropressão: } u = \gamma_w \cdot H_w$$

$$\text{Tensão efetiva: } \sigma'_v = \sigma_v - u$$

Solo normalmente adensado:

$$\text{Utiliza-se Jaky: } K_0 = 1 - \sin(\varphi)$$

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

Ponto A:

$$\sigma_{vA} = \gamma_{argila} \cdot H_1$$

$$\sigma_{vA} = 17 \cdot 2,5$$

$$\sigma_{vA} = 42,5 \text{ kPa}$$

$$u_A = \gamma_{\text{água}} \cdot H_1 = 10 \cdot 2,5 = 25 \text{ kPa}$$

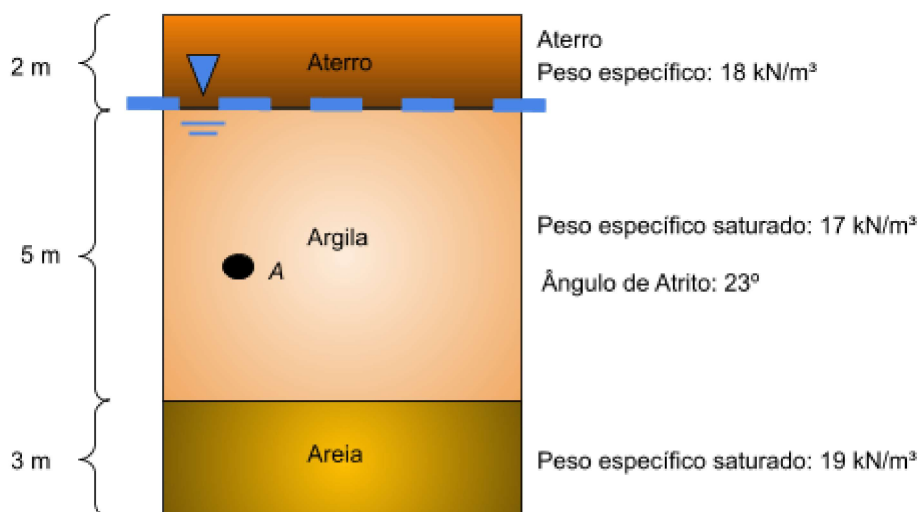
$$\sigma'_{vA} = \sigma_{vA} - u_A = 42,5 - 25 = 17,5 \text{ kPa}$$

$$K_0 = 1 - \sin 23^\circ = 0,61$$

$$0,61 = \frac{\sigma'_h}{17,5} \rightarrow \sigma'_h = 0,61 \cdot 17,5$$

$$\sigma'_h = 10,675 \text{ kPa}$$

b)



Após a remoção do aterro, o solo tornou-se pré-adensado.

Utiliza-se a extensão de Jaky:

$$K_0 = [1 - \sin(\varphi)] \cdot (OCR)^{\sin \varphi}$$

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} \frac{(tensão\ efetiva\ vertical\ máxima)}{(tensão\ efetiva\ vertical\ atual)}$$

$$\sigma'_{vm} = [\gamma_{argila} \cdot H_1 - \gamma_{água} \cdot H_1] + \gamma_{aterro} \cdot H_2$$

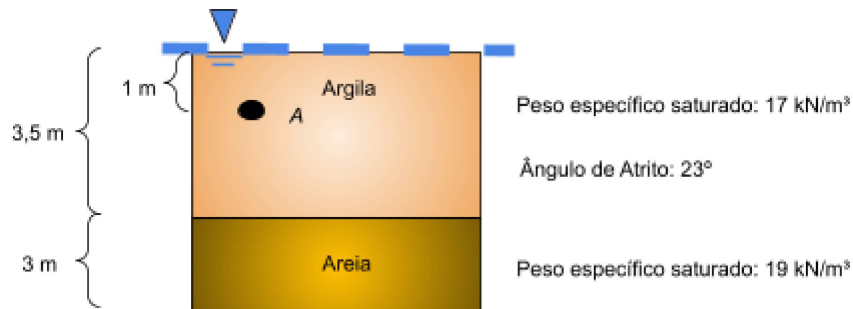
$$\sigma'_{vm} = [17 \cdot 2,5 - 10 \cdot 2,5] + 18 \cdot 2 \rightarrow \sigma'_{vm} = 53,5\ kPa$$

$$\sigma'_{vo} = \sigma'_{vA} = 17,5 \rightarrow OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} \rightarrow OCR = 3,05$$

$$K_0 = 0,94 \Rightarrow K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \rightarrow 0,94 = \frac{\sigma'_h}{17,5} \rightarrow \sigma'_h = 16,45\ kPa$$

Houve **aumento** na tensão horizontal do solo.

c)



Após a retirada do aterro e de uma parcela da camada de argila, o solo continua em regime de pré adensamento.

Tensão efetiva vertical atual:

$$\sigma'_o = 1 \cdot 17 - 1 \cdot 10 \rightarrow \sigma'_o = 7\ kPa$$

$$\text{Tem-se: } OCR = \frac{\sigma'_m}{\sigma'_o} \rightarrow OCR = \frac{53,5}{7} \rightarrow OCR = 7,64$$

$$K_0 = [1 - \sin(\varphi)] \cdot (OCR)^{\sin \varphi} \rightarrow K_0 = 1,35$$

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \rightarrow \sigma'_h = 9,45\ kPa$$

Quanto **maior a tensão máxima** suportada no histórico de tensões, **maior a razão de pré-adensamento (OCR)**. Portanto, **maior o coeficiente de empuxo no repouso (K_0)**.

Tensões 01.07

Analise as informações obtidas sobre o solo com o ensaio SPT (Standard Penetration Test) e determine:

COTA REL. RH	REVESTIMENTO	AVANÇO	AMOSTRA	ATRITO LATERAL	Número de Golpes		PROFUN.	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
					60x30	15x45		
	TH		1		2	3		$\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$
	CA		2		4	4		Areia fina marrom fofa a pouco compacta
NA = 2,6 m			3		5	8		
			4		12	20	-3,60	Obs1: A amostra nº4 não foi recuperada Argila siltosa com pedregulhos variegada (amarela) compacta
			5		22	35		$\phi = 26^\circ$ $\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$
			6		14	24		
			7		14	22	-7,00	
			8		11	21		$\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$
			9		14	26		Areia fina cinza claro (amarela) compacta
			10		18	32		Obs2: A amostra nº10 não foi recuperada
			11		4	3	-11,00	
			12		2	2		
			13		3	4		Areia fina argilosa cinza escuro fofa
			14		2	3		$\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$

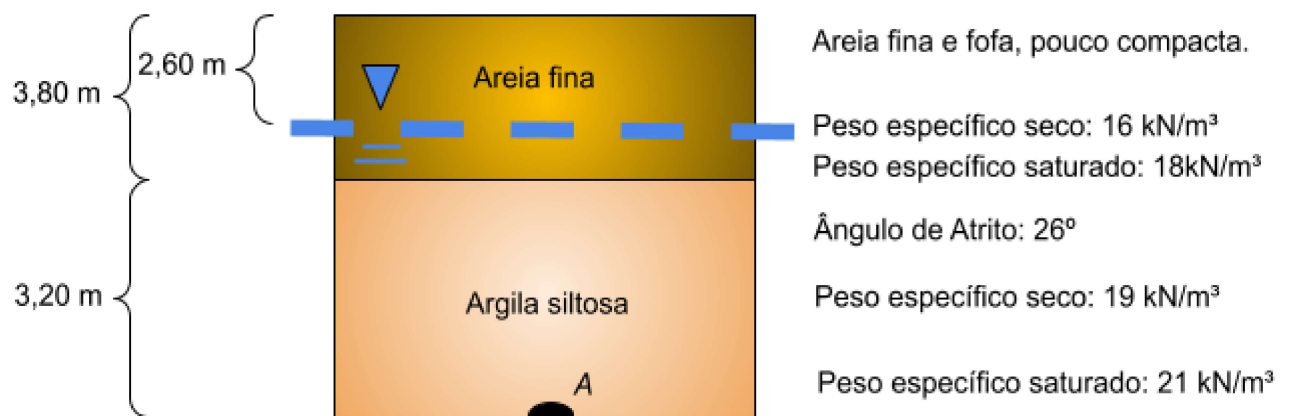
a) A tensão efetiva horizontal em 7 metros de profundidade.

b) A tensão efetiva horizontal em 7 metros de profundidade após a escavação do primeiro 1,5 metro.

c) A tensão efetiva vertical e horizontal em 7 metros de profundidade após a escavação dos primeiros 1,5 metro e construção de um aterro de 4 metros com peso específico natural de $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$.

Resolução 01.07

a)



Cálculo da tensão efetiva horizontal em A:

$$\sigma'_v = 2,6 \cdot 16 + 1,2 \cdot 18 + 3,2 \cdot 21 - 4,4 \cdot 10 \rightarrow \sigma'_v = 86,4 \text{ kPa}$$

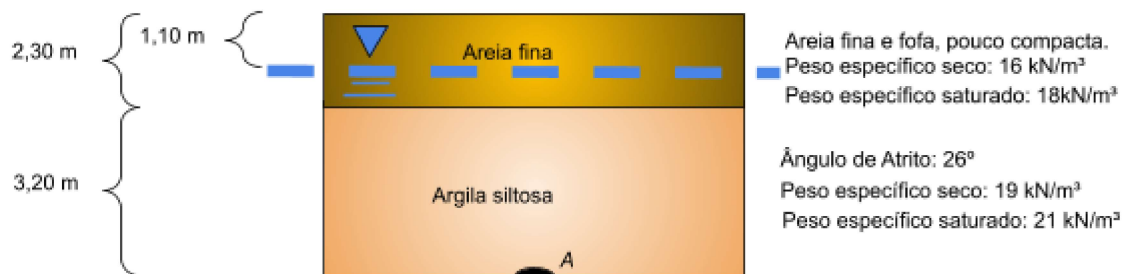
Cálculo de coeficiente de empuxo no repouso:

Para solos normalmente adensados, utiliza-se Jaky: $K_0 = 1 - \sin(\varphi)$

$$K_0 = 0,56 \mid K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

$$0,56 = \frac{\sigma'_h}{86,4} \rightarrow \sigma'_h = 48,38 \text{ kPa}$$

b)



Cálculo da tensão efetiva vertical em A:

$$\sigma'_v = 1,1 \cdot 16 + 1,2 \cdot 18 + 3,2 \cdot 21 - 4,4 \cdot 10$$

$$\sigma'_v = 62,4 \text{ kPa}$$

Cálculo de coeficiente de empuxo no repouso:

Para solos pré-adensados, utiliza-se a Extensão de Jaky:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \mid K_0 = (1 - \sin(\varphi)) \cdot (OCR)^{\sin \varphi}$$

$$OCR = \frac{\sigma'_m}{\sigma'_o} \left(\frac{\text{Tensão máxima no solo}}{\text{Tensão atual no solo}} \right)$$

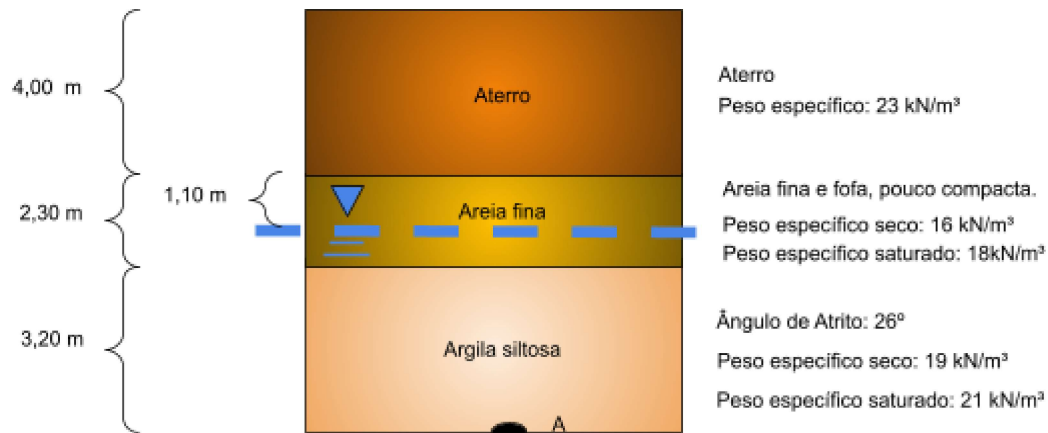
Tensão efetiva máxima do solo: $\sigma'_m = 86,4 \text{ kPa}$

Tensão efetiva atual do solo: $\sigma'_o = 62,4 \text{ kPa}$

$$OCR = \frac{86,4}{62,4} \rightarrow OCR = 1,38$$

$$\text{Logo, } K_0 = 0,64 \Rightarrow \sigma'_h = 39,93 \text{ kPa}$$

c)



Tensão efetiva vertical em A: $\sigma'_v = 154,40 \text{ kPa}$

O aterro é uma carga inédita para o solo, portanto o solo é normalmente adensado.

Utiliza-se Jaky: $K_0 = 1 - \sin(\varphi)$

Logo, $K_0 = 0,56 \mid K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$

$$0,56 = \frac{\sigma'_h}{154,40} \rightarrow \sigma'_h = 86,46 \text{ kPa}$$

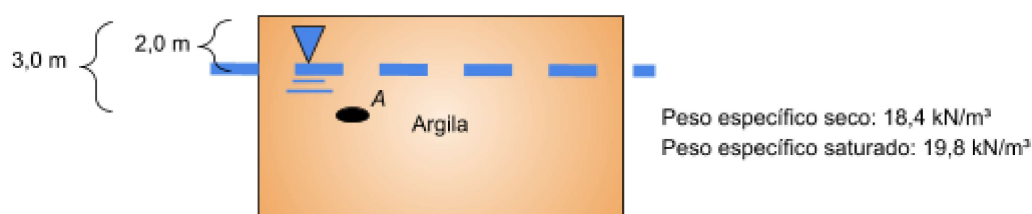
Tensões 01.08

Em um perfil de solo homogêneo e argiloso, sabe-se que em 3 m e em 9 m de profundidade, as tensões totais horizontais são de 68 kPa e de 165 kPa, respectivamente. O lençol freático foi medido em uma sondagem SPT e encontra-se 2,0 m abaixo do nível do terreno. O peso específico natural desse material é de 18,4 kN/m³ e o saturado é de 19,8 kN/m³. Determine os seguintes itens:

- O coeficiente de empuxo no repouso em 3 metros de profundidade.
- O coeficiente de empuxo no repouso em 9 metros de profundidade.

Resolução 01.08

a)



Tensão efetiva horizontal em A: $\sigma'_h = 68 - 1 \cdot 10 \rightarrow \sigma'_h = 58 \text{ kPa}$

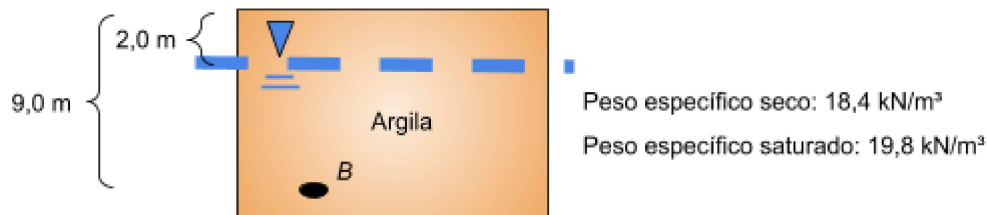
Tensão efetiva vertical em A:

$$\sigma'_v = 2 \cdot 18,4 + 1 \cdot 19,8 - 1 \cdot 10 \rightarrow \sigma'_v = 46,6 \text{ kPa}$$

Coefficiente de empuxo no repouso: $K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$

$$K_0 = 1,24$$

b)



Tensão efetiva horizontal em B: $\sigma'_h = 165 - 7 \cdot 10 \rightarrow \sigma'_h = 95 \text{ kPa}$

Tensão efetiva vertical em B:

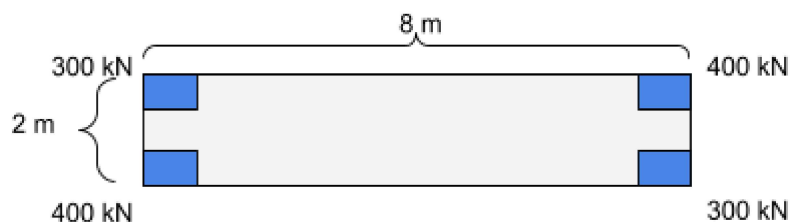
$$\sigma'_v = 2 \cdot 18,4 + 7 \cdot 19,8 - 7 \cdot 10 \rightarrow \sigma'_v = 105,4 \text{ kPa}$$

Coefficiente de empuxo no repouso: $K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$

$$K_0 = 0,90$$

Tensões 01.09

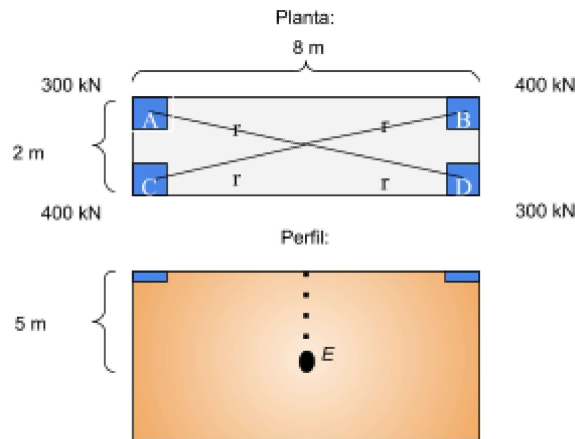
Quatro pilares com fundações superficiais e cargas indicadas são locados nos vértices de um retângulo de dimensões 8 x 2 m:



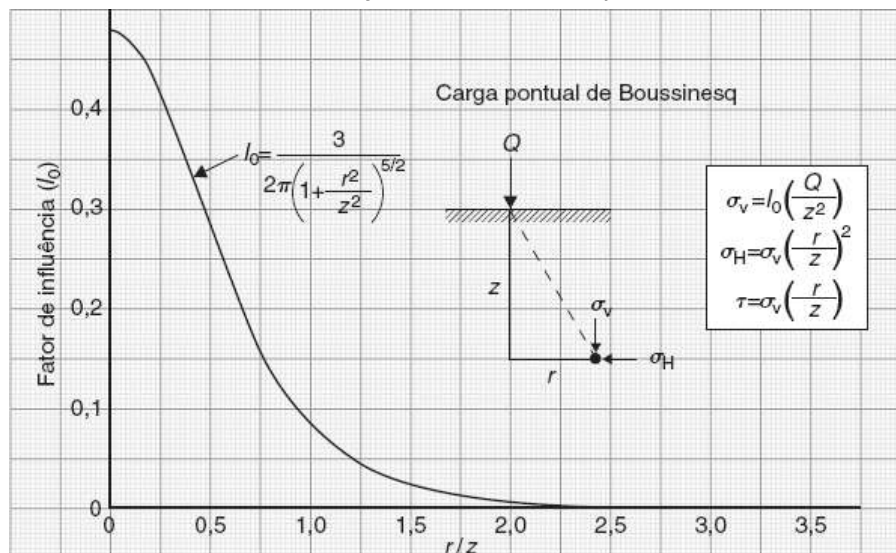
- Calcule por Boussinesq o acréscimo de pressão devido a este carregamento em um ponto 5 m abaixo do centro da estrutura.
- Calcule por Newmark o acréscimo de pressão devido a este carregamento em um ponto 5 m abaixo do centro da estrutura.

Resolução 01.09

a)



Solução de Boussinesq:



BODÓ et JONES (2017)

Pilar A:

$$r = \sqrt{1^2 + 4^2} = 4,12 \text{ m}; \quad z = 5 \text{ m}; \quad Q = 300 \text{ kN}$$

$$\sigma_{zA} = \frac{3 \cdot 5^3}{2\pi(4,12^2 + 5^2)^{5/2}} \cdot 300 = 1,57 \text{ kN/m}^2$$

Pelo ábaco:

$$\frac{r}{z} = \frac{4,12}{5} = 0,824$$

$$I \approx 0,13$$

$$\Delta\sigma = \frac{P}{z^2} \cdot I = \frac{300}{5^2} \cdot 0,13 = 1,56 \text{ kN/m}^2$$

Pilar B:

$$r = \sqrt{1^2 + 4^2} = 4,12 \text{ m}; \quad z = 5 \text{ m}; \quad Q = 400 \text{ kN}$$

$$\sigma_{zB} = \frac{3 \cdot 5^3}{2\pi(4,12^2 + 5^2)^{5/2}} \cdot 400 = 2,09 \text{ kN/m}^2$$

Pelo ábaco:

$$\frac{r}{z} = \frac{4,12}{5} = 0,824$$

$$I \approx 0,13$$

$$\Delta\sigma = \frac{P}{z^2} I = \frac{400}{5^2} \cdot 0,13 = 2,08 \text{ kN/m}^2$$

Pilar C:

$$r = \sqrt{1^2 + 4^2} = 4,12 \text{ m}; \quad z = 5 \text{ m}; \quad Q = 400 \text{ kN}$$

$$\sigma_{zC} = \frac{3 \cdot 5^3}{2\pi(4,12^2 + 5^2)^{5/2}} \cdot 400 = 2,09 \text{ kN/m}^2$$

Pelo ábaco:

$$\frac{r}{z} = \frac{4,12}{5} = 0,824$$

$$I \approx 0,13$$

$$\Delta\sigma = \frac{P}{z^2} I = \frac{400}{5^2} \cdot 0,13 = 2,08 \text{ kN/m}^2$$

Pilar D:

$$r = \sqrt{1^2 + 4^2} = 4,12 \text{ m}; \quad z = 5 \text{ m}; \quad Q = 300 \text{ kN}$$

$$\sigma_{zD} = \frac{3 \cdot 5^3}{2\pi(4,12^2 + 5^2)^{5/2}} \cdot 300 = 1,57 \text{ kN/m}^2$$

Pelo ábaco:

$$\frac{r}{z} = \frac{4,12}{5} = 0,824$$

$$I \approx 0,13$$

$$\Delta\sigma = \frac{P}{z^2} I = \frac{300}{5^2} \cdot 0,13 = 1,56 \text{ kN/m}^2$$

Acréscimo total de tensão:

$$\sigma_z = \sigma_{zA} + \sigma_{zB} + \sigma_{zC} + \sigma_{zD}$$

$$\sigma_z = 1,57 + 2,09 + 2,09 + 1,57$$

$$\sigma_z = 7,32 \text{ kN/m}^2$$

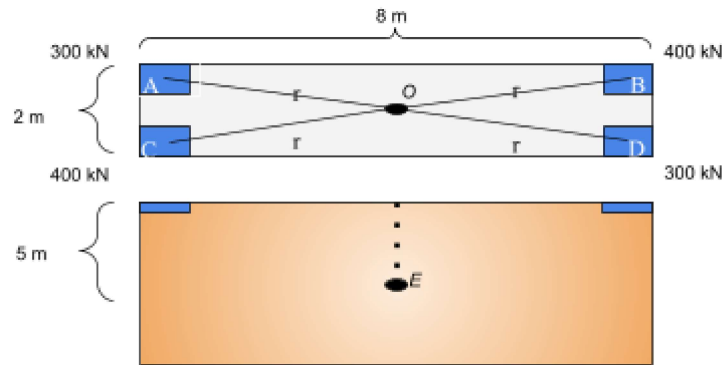
Pelo ábaco:

$$\sigma_z = \sigma_{zA} + \sigma_{zB} + \sigma_{zC} + \sigma_{zD}$$

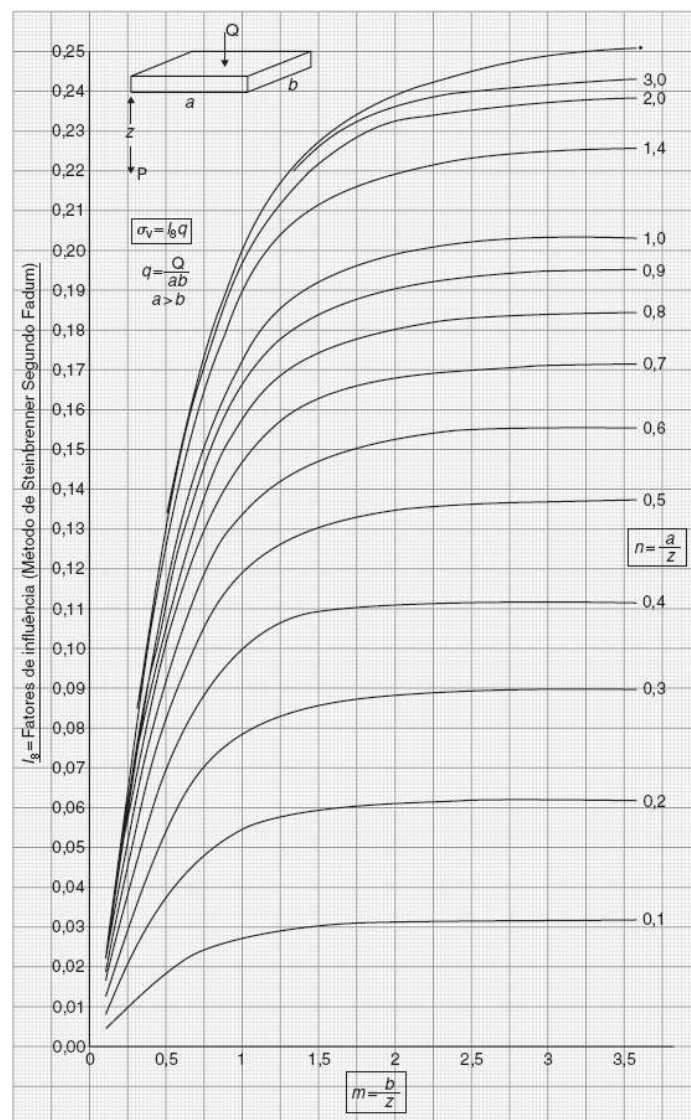
$$\sigma_z = 1,56 + 2,08 + 2,08 + 1,56$$

$$\sigma_z = 7,28 \text{ kN/m}^2$$

b)

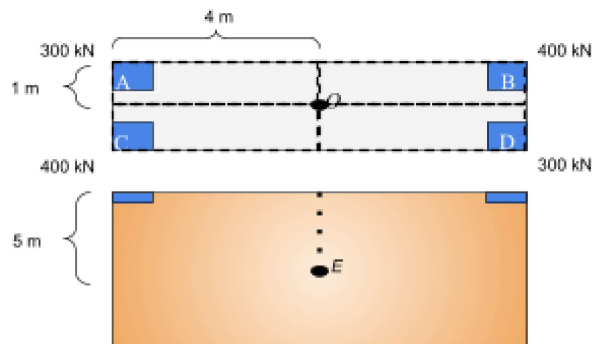


Solução de Newmark/Steinbrenner:



BODÓ et JONES (2017)

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I$$



Acréscimo de tensão de A no ponto E:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a = 1; n = a/z \rightarrow n = 0,2$$

$$b = 4; m = b/z \rightarrow m = 0,8$$

De acordo com o ábaco: $I \approx 0,050$

$$\sigma_{0A} = \frac{300}{(1 \cdot 4)} = 75 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{zA} = \sigma_{0A} \cdot I_A = 75 \cdot 0,050$$

$$\sigma_{zA} = 3,75 \text{ kN/m}^2$$

Acréscimo de tensão de C no ponto E:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a = 1; n = a \cdot z \rightarrow n = 0,2$$

$$b = 4; m = b \cdot z \rightarrow m = 0,8$$

De acordo com o ábaco: $I \approx 0,050$

$$\sigma_{0C} = \frac{400}{(1 \cdot 4)} = 100 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{zC} = \sigma_{0C} \cdot I_C = 100 \cdot 0,050$$

$$\sigma_{zC} = 5 \text{ kN/m}^2$$

Acréscimo de tensão de B no ponto E:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a = 1; n = a/z \rightarrow n = 0,2$$

$$b = 4; m = b \cdot z \rightarrow m = 0,8$$

De acordo com o ábaco: $I \approx 0,050$

$$\sigma_{0B} = \frac{400}{(1 \cdot 4)} = 100 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{zB} = \sigma_{0B} \cdot I_B = 100 \cdot 0,050$$

$$\sigma_{zB} = 5 \text{ kN/m}^2$$

Acréscimo de tensão de D no ponto E:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a = 1; n = a \cdot z \rightarrow n = 0,2$$

$$b = 4; m = b \cdot z \rightarrow m = 0,8$$

De acordo com o ábaco: $I \approx 0,050$

$$\sigma_{0D} = \frac{300}{(1 \cdot 4)} = 75 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{zD} = \sigma_{0D} \cdot I_D = 75 \cdot 0,050$$

$$\sigma_{zD} = 3,75 \text{ kN/m}^2$$

Acréscimo total de tensão:

$$\sigma_z = \sigma_{zA} + \sigma_{zB} + \sigma_{zC} + \sigma_{zD}$$

$$\sigma_z = 3,75 + 5 + 5 + 3,75$$

$$\sigma_z = 17,5 \text{ kN/m}^2$$

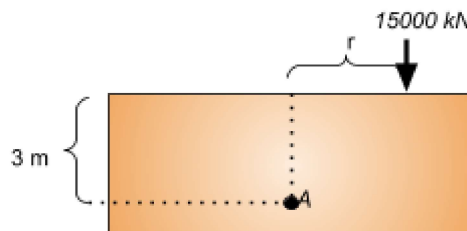
Tensões 01.10

Calcule o acréscimo de tensões sobre planos horizontais a 3 m de profundidade causado pela sobrecarga concentrada de 15000 kN na superfície do terreno, com:

- a) 0,5 metros de afastamento lateral.
- b) 3 metros de afastamento lateral.
- c) 5 metros de afastamento lateral.

Resolução 01.10

Representação:



Solução de Boussinesq:

$$\sigma_v = \frac{3z^3}{2\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} Q$$

a)

Acréscimo de tensão em A:

$$r = 0,5 \text{ m}; \quad z = 3 \text{ m}; \quad Q = 15000 \text{ kN}$$

$$\sigma_{zA} = \frac{3 \cdot 3^3}{2\pi(0,5^2 + 3^2)^{5/2}} \cdot 15000 = 743,09 \text{ kN/m}^2$$

b)

Acréscimo de tensão em A:

$$r = 3 \text{ m}; \quad z = 3 \text{ m}; \quad Q = 15000 \text{ kN}$$

$$\sigma_{zA} = \frac{3 \cdot 3^3}{2\pi(3^2 + 3^2)^{5/2}} \cdot 15000 = 140,67 \text{ kN/m}^2$$

c)

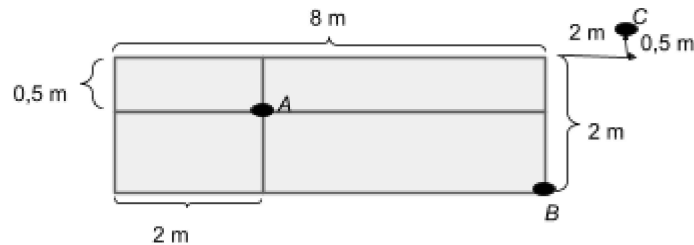
Acréscimo de tensão em A:

$$r = 5 \text{ m}; \quad z = 3 \text{ m}; \quad Q = 15000 \text{ kN}$$

$$\sigma_{zA} = \frac{3 \cdot 3^3}{2\pi(5^2 + 3^2)^{5/2}} \cdot 15000 = 28,69 \text{ kN/m}^2$$

Tensões 01.11

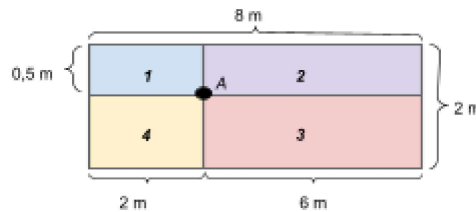
Uma carga de 3800 kN/m^2 é aplicada por meio de uma construção cujas dimensões são apresentadas na figura a seguir. Determine:



- O acréscimo de tensão no ponto A em 5 m de profundidade.
- O acréscimo de tensão no ponto B em 5 m de profundidade.
- O acréscimo de tensão no ponto C em 5 m de profundidade.

Resolução 01.11

- Identificando as áreas:



$$\sigma_0 = 3800 \text{ kN/m}^2$$

Por Newmark:

Área 1:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a_1 = 0,5; n = a/z \rightarrow n_1 = 0,1$$

$$b_1 = 2; m = b/z \rightarrow m_1 = 0,4$$

$$I_1 = 0,017$$

$$\text{Acréscimo de tensão: } \sigma_{z1} = \sigma_0 \cdot I_1$$

$$\sigma_{z1} = 3800 \cdot 0,017$$

$$\sigma_{z1} = 64,6 \text{ kN/m}^2$$

Área 2:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a_2 = 0,5; n = a/z \rightarrow n_2 = 0,1$$

$$b_2 = 6; m = b/z \rightarrow m_2 = 1,2$$

$$I_2 = 0,029$$

$$\text{Acréscimo de tensão: } \sigma_{z2} = \sigma_0 \cdot I_2$$

$$\sigma_{z2} = 3800 \cdot 0,029$$

$$\sigma_{z2} = 110,2 \text{ kN/m}^2$$

Área 3:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a_3 = 1,5; n = a/z \rightarrow n_3 = 0,3$$

$$b_3 = 6; m = b/z \rightarrow m_3 = 1,2$$

$$I_3 = 0,083$$

$$\text{Acréscimo de tensão: } \sigma_{z3} = \sigma_0 \cdot I_3$$

$$\sigma_{z3} = 3800 \cdot 0,083$$

$$\sigma_{z3} = 315,4 \text{ kN/m}^2$$

Área 4:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a_4 = 1,5; n = a/z \rightarrow n_4 = 0,3$$

$$b_4 = 2; m = b/z \rightarrow m_4 = 0,4$$

$$I_4 = 0,047$$

$$\text{Acréscimo de tensão: } \sigma_{z4} = \sigma_0 \cdot I_4$$

$$\sigma_{z4} = 3800 \cdot 0,047$$

$$\sigma_{z4} = 178,6 \text{ kN/m}^2$$

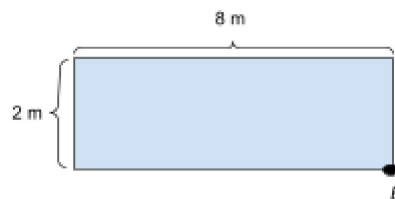
Acréscimo total de tensão:

$$\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{z3} + \sigma_{z4}$$

$$\sigma_z = 64,6 + 110,2 + 315,4 + 178,6$$

$$\sigma_z = 668,8 \text{ kN/m}^2$$

b) Identificando as áreas:



$$\sigma_0 = 3800 \text{ kN/m}^2$$

Por Newmark:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a = 2; n = a/z \rightarrow n = 0,4$$

$$b = 8; m = b/z \rightarrow m = 1,6$$

$$I \approx 0,111$$

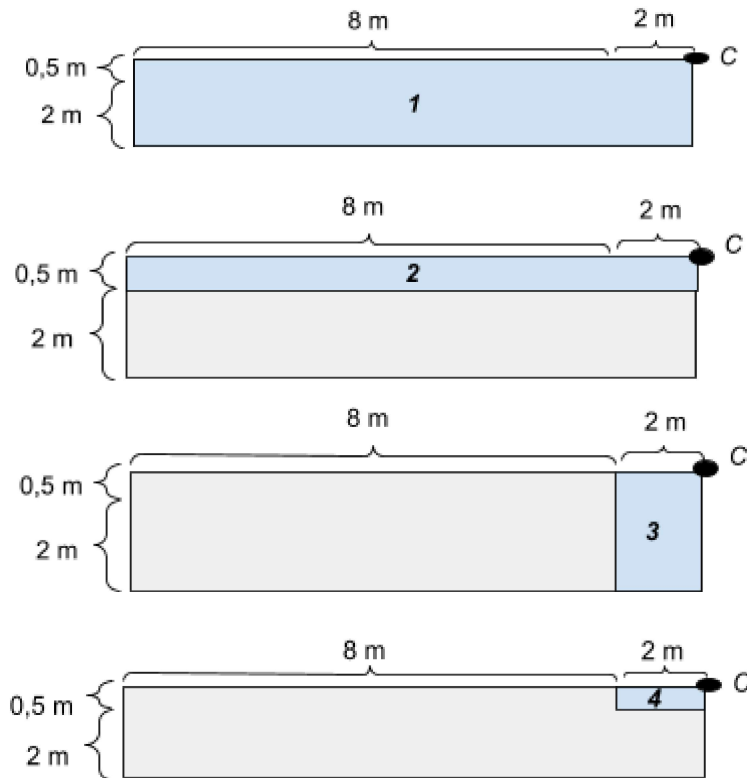
Acréscimo de tensão:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I$$

$$\sigma_z = 3800 \cdot 0,111$$

$$\sigma_z = 421,8 \text{ kN/m}^2$$

c) Identificando as áreas:



$$\sigma_0 = 3800 \text{ kN/m}^2$$

Por Newmark:

Área 1:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a_1 = 2,5; n = a/z \rightarrow n_1 = 0,5$$

$$b_1 = 10; m = b/z \rightarrow m_1 = 2$$

$$I_1 = 0,135$$

$$\text{Acréscimo de tensão: } \sigma_{z1} = \sigma_0 \cdot I_1$$

$$\sigma_{z1} = 3800 \cdot 0,135$$

$$\sigma_{z1} = 513 \text{ kN/m}^2$$

Área 2:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a_2 = 0,5; n = a/z \rightarrow n_2 = 0,1$$

$$b_2 = 10; m = b/z \rightarrow m_2 = 2$$

$$I_2 = 0,031$$

$$\text{Acréscimo de tensão: } \sigma_{z2} = \sigma_0 \cdot I_2$$

$$\sigma_{z2} = 3800 \cdot 0,031$$

$$\sigma_{z2} = 117,8 \text{ kN/m}^2$$

Área 3:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a_3 = 2; n = a/z \rightarrow n_3 = 0,4$$

$$b_3 = 2,5; m = b/z \rightarrow m_3 = 0,5$$

$$I_3 = 0,071$$

$$\text{Acréscimo de tensão: } \sigma_{z3} = \sigma_0 \cdot I_3$$

$$\sigma_{z3} = 3800 \cdot 0,071$$

$$\sigma_{z3} = 269,8 \text{ kN/m}^2$$

Área 4:

$$z = 5 \text{ m}$$

$$a_4 = 0,5; n = a/z \rightarrow n_4 = 0,1$$

$$b_4 = 2; m = b/z \rightarrow m_4 = 0,4$$

$$I_4 = 0,017$$

$$\text{Acréscimo de tensão: } \sigma_{z4} = \sigma_0 \cdot I_4$$

$$\sigma_4 = 3800 \cdot 0,017$$

$$\sigma_{z4} = 64,6 \text{ kN/m}^2$$

Acréscimo total de tensão:

$$\sigma_z = \sigma_{z1} - \sigma_{z2} - \sigma_{z3} + \sigma_{z4}$$

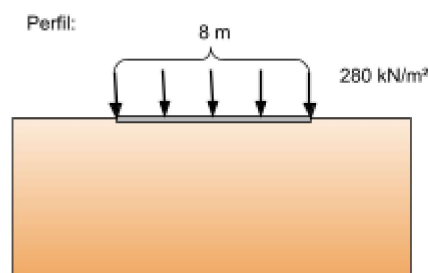
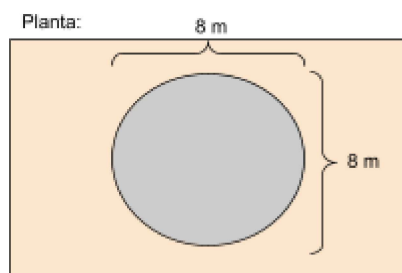
$$\sigma_z = 513 - 117,8 - 269,8 + 64,6$$

$$\sigma_z = 190 \text{ kN/m}^2$$

Como teve-se de projetar o retângulo até se obter um vértice no ponto de interesse, subtraem-se os espaços gerados em excesso (**áreas indicadas como 2 e 3**). Como estes retângulos também devem ter um vértice no **ponto C**, o mesmo retângulo é subtraído duas vezes (**área 4**). Portanto, para resolver esta duplicidade, soma-se esta área.

Tensões 01.12

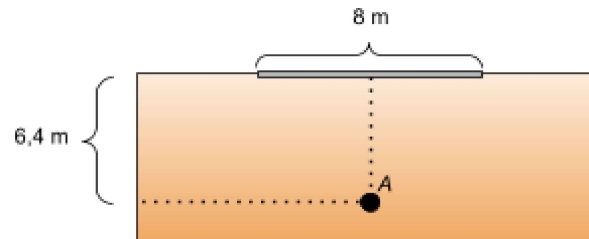
Uma placa circular de 4,0 metros de raio apoiada sobre a superfície de um terreno representa um carregamento uniformemente distribuído de 280 kN/m².



- Calcule o acréscimo de tensão gerado no centro da placa em 6,4 metros de profundidade.
- Calcule o acréscimo de tensão gerado na borda da placa em 6,4 metros de profundidade.
- Calcule o acréscimo de tensão gerado em um ponto a 8 metros de distância do centro da placa em 6,4 metros de profundidade.

Resolução 01.12

a)

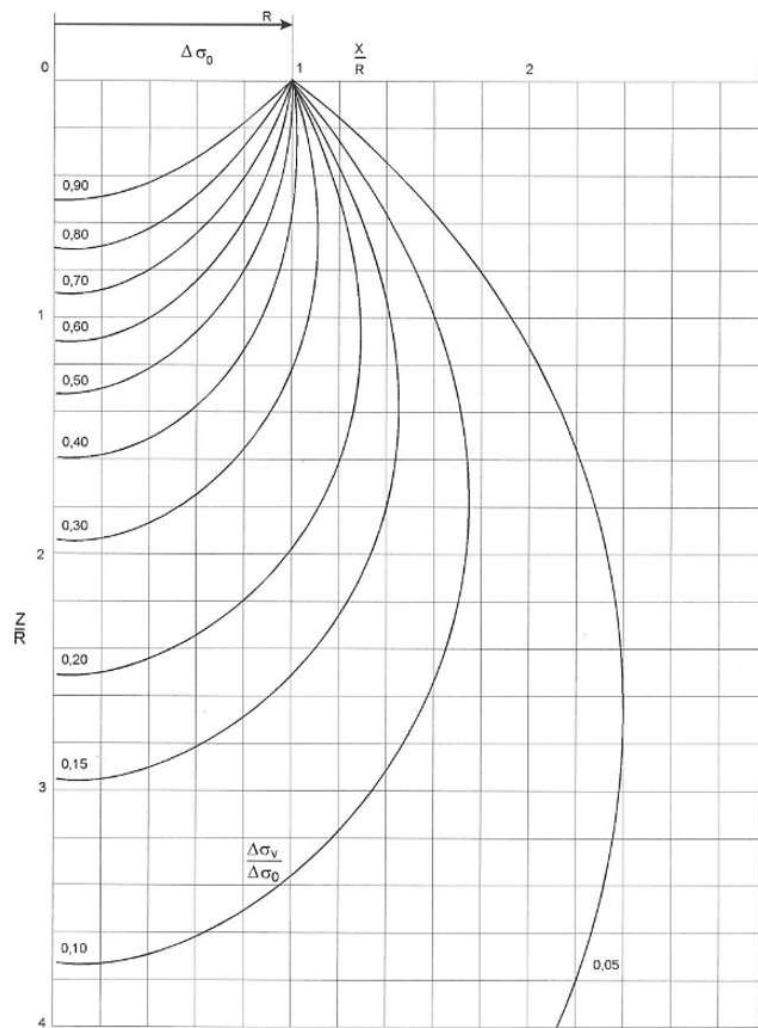


$$\sigma_0 = 280 \text{ kN/m}^2$$

Por Love:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I$$

índice "I" varia de acordo com z/r e x/r :



SOUZA PINTO (2006)

$$\sigma_0 = 280 \text{ kN/m}^2; r = 4 \text{ m}; z = 6,4 \text{ m}; x = 0 \text{ m}$$

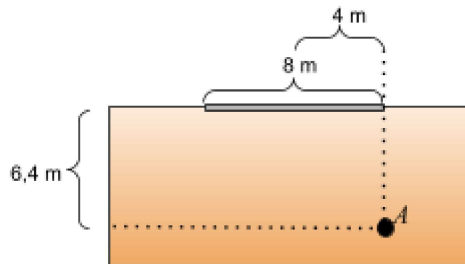
$$z/r = 1,6; x/r = 0$$

$$I \approx 0,400$$

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I \approx 280 \cdot 0,400$$

$$\sigma_z \approx 112 \text{ kN/m}^2$$

b)



$$\sigma_0 = 280 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_0 = 280 \text{ kN/m}^2; r = 4 \text{ m}; z = 6,4 \text{ m}; x = 4 \text{ m}$$

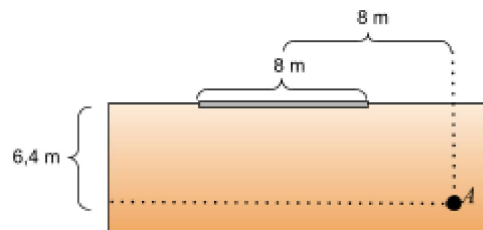
$$z/r = 1,6; x/r = 1$$

$$I \approx 0,250$$

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I \approx 280 \cdot 0,250$$

$$\sigma_z \approx 70 \text{ kN/m}^2$$

c)



$$\sigma_0 = 280 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_0 = 280 \text{ kN/m}^2; r = 4 \text{ m}; z = 6,4 \text{ m}; x = 8 \text{ m}$$

$$z/r = 1,6; x/r = 2$$

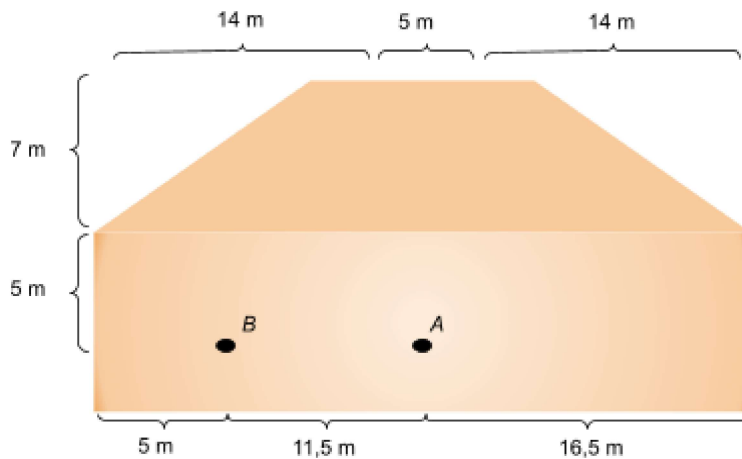
$$I \approx 0,065$$

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I \approx 280 \cdot 0,065$$

$$\sigma_z \approx 18,2 \text{ kN/m}^2$$

Tensões 01.13

Considere a implantação de um aterro com peso específico de 21 kN/m^3 , conforme a imagem:

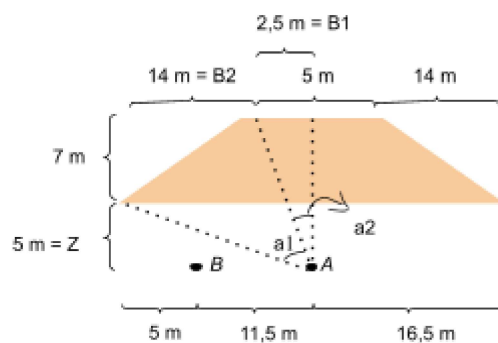
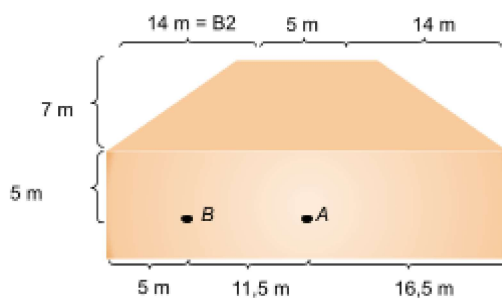


- Calcule o acréscimo de tensão gerado pelo aterro no ponto A.
- Calcule o acréscimo de tensão gerado pelo aterro no ponto B.

Resolução 01.13

a)

Acréscimo de tensão no ponto A:



Calculando os ângulos (em radianos), tem-se: $\alpha_1 = 0,81$ e $\alpha_2 = 0,46$

$$q_0 = \gamma \cdot H \rightarrow q_0 = 21 \cdot 7 \rightarrow q_0 = 147 \text{ kPa}$$

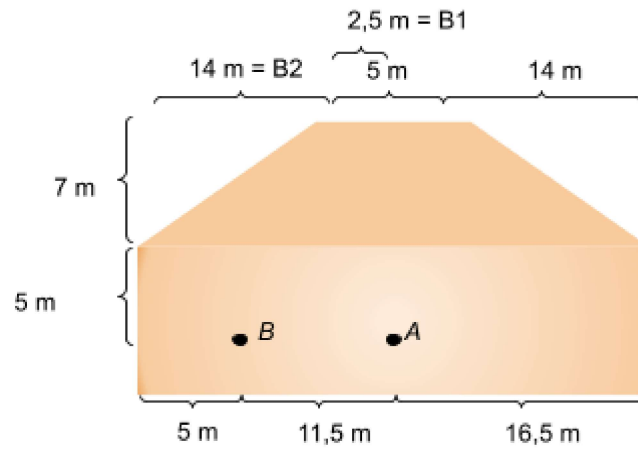
$$\Delta\sigma_z = \frac{q_0}{\pi} \cdot \left[\frac{(B_1 + B_2)}{B_2} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} \cdot (\alpha_2) \right] \Rightarrow \Delta\sigma_z = 66,19 \text{ kPa}$$

$\Delta\sigma_z = 66,19 \text{ kPa}$ para somente metade do trapézio. Portanto:

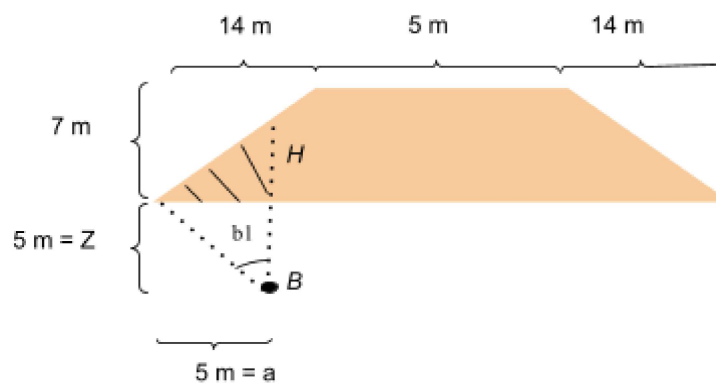
$$\Delta\sigma_{ztotal} = 66,19 \cdot 2 \Rightarrow \Delta\sigma_{ztotal} = 132,38 \text{ kPa}$$

b)

Neste item, tem-se a sobreposição de áreas.



Para a área 1:



$$\beta = \arctan\left(\frac{-a}{Z}\right) \rightarrow \beta = \arctan\left(\frac{-5}{5}\right) \Rightarrow \beta = -0,78$$

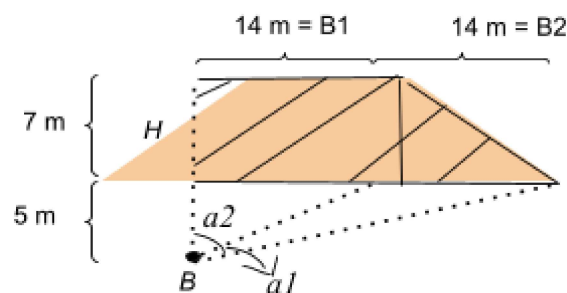
Lembrete: cálculo do ângulo em radianos.

$$I = -\left(\frac{\beta}{\pi}\right) \Rightarrow I = 0,24 \quad \left| \quad \frac{B_1}{Z} = 0 \quad \left| \quad \frac{B_2}{Z} = 1 \right. \right.$$

Pelo ábaco, tem-se:

$$I_z = 0,245 \rightarrow \Delta\sigma_z = q_0 \cdot I_z \rightarrow \Delta\sigma_{z1} = 21 \cdot 2,5 \cdot 0,245 \Rightarrow \Delta\sigma_{z1} = 12,86 \text{ kPa}$$

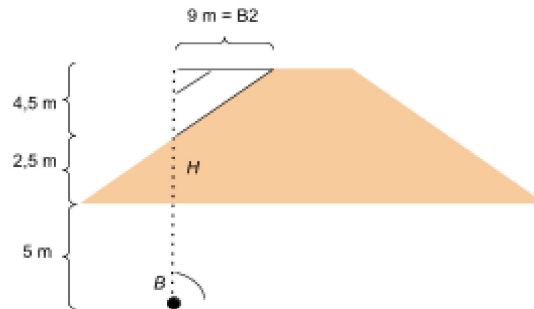
Para a área 2:



$$|\alpha_1 = 0,17 | \alpha_2 = 1,22 | q_0 = \gamma \cdot H \rightarrow q_0 = 21 \cdot 7 \rightarrow q_0 = 147 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{q_0}{\pi} \cdot \left[\frac{(B_1+B_2)}{B_2} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} \cdot (\alpha_2) \right] \Rightarrow \Delta\sigma_{z2} = 72,99 \text{ kPa}$$

Para a área 3:



$$B_1 = 0\text{m} | B_2 = 9\text{m} | Z = 5\text{m} | \frac{B_1}{Z} = 0 | \frac{B_2}{Z} = 1,8$$

Pelo ábaco: $I_z = 0,335$

$$\Delta\sigma_{z3} = q_0 \cdot I_z \Rightarrow \Delta\sigma_{z3} = 21 \cdot 4,5 \cdot 0,335 \Rightarrow \Delta\sigma_{z3} = 31,65 \text{ kPa}$$

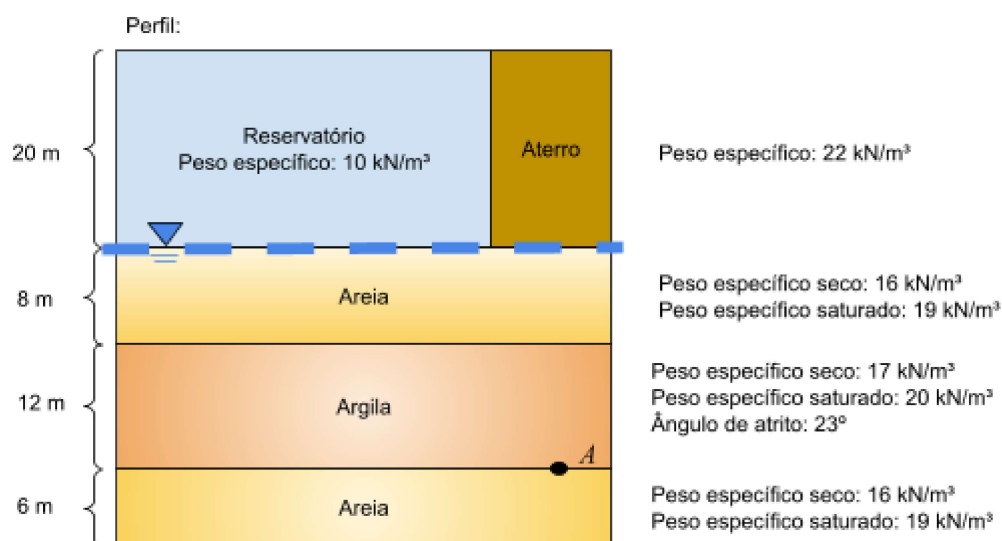
Portanto:

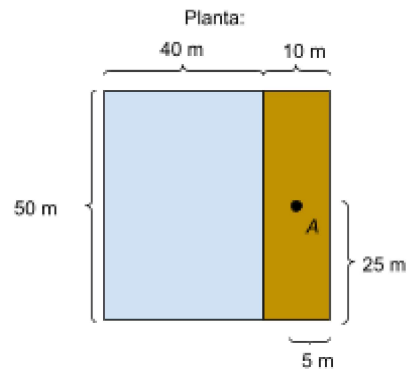
$$\Delta\sigma_{Ztotal} = \Delta\sigma_{z1} + \Delta\sigma_{z2} - \Delta\sigma_{z3} \Rightarrow \Delta\sigma_{Ztotal} = 12,86 + 72,99 - 31,65$$

$$\Delta\sigma_{Ztotal} = 54,20 \text{ kPa}$$

Tensões 01.14

Serão construídos acima de um terreno de areia e argila um aterro e um reservatório de água, conforme as figuras a seguir:





- Calcule a tensão vertical efetiva no ponto A antes da construção do aterro e do reservatório.
- Calcule a tensão horizontal efetiva no ponto A antes da construção do aterro e do reservatório.
- Calcule a tensão vertical efetiva no ponto A após a construção do aterro e do reservatório.
- Calcule a tensão horizontal efetiva no ponto A após a construção do aterro e do reservatório.

Resolução 01.14

a)

$$\sigma'_v = \sigma_v - u$$

$$\sigma_v = 19 \cdot 8 + 20 \cdot 12 = 392 \text{ kPa}$$

$$u = 10 \cdot 20 = 200 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = 392 - 200 = 192 \text{ kPa}$$

b)

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

Solo normalmente adensado:

$$K_0 = 1 - \sin(\Phi')$$

$$K_0 = 1 - \sin(23^\circ) = 0,609$$

$$0,609 = \frac{\sigma'_h}{192} \Rightarrow \sigma'_h = 116,98 \text{ kPa}$$

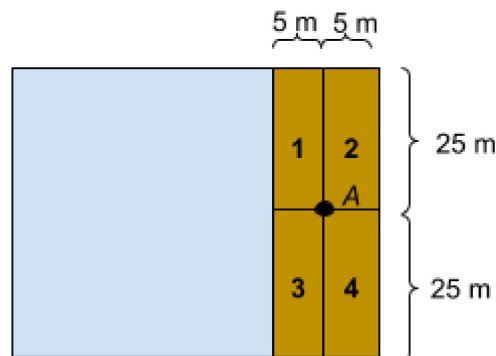
Se o solo fosse **sobreadensado**:

$$K_0 = [1 - \sin(\Phi')] \cdot OCR^{\sin(\Phi')}$$

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}}$$

c)

Áreas do aterro:



$$\text{Newmark: } \sigma_z = \sigma_0 \cdot I$$

Acréscimo de tensão devido ao aterro:

$$\sigma_0 = \gamma \cdot h = 22 \cdot 20 = 440 \text{ kPa}$$

$$z = 20 \text{ m}$$

$$a_1 = 5; n = a/z \rightarrow n_1 = 0,25$$

$$b_1 = 25; m = b/z \rightarrow m_1 = 1,25$$

$$I_1 \approx 0,071$$

Acréscimo de tensão:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I$$

$$\sigma_{z1} = 440 \cdot 0,071$$

$$\sigma_{z1} = 31,24 \text{ kPa}$$

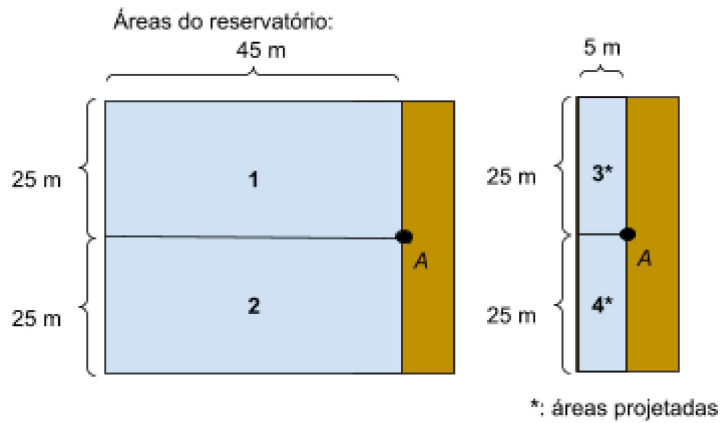
Como as áreas 1, 2, 3 e 4 são iguais:

$$\sigma_{z1} = \sigma_{z2} = \sigma_{z3} = \sigma_{z4} = 31,24 \text{ kPa}$$

Acréscimo de tensão devido ao aterro:

$$\sigma_{za} = 31,24 + 31,24 + 31,24 + 31,24 = 124,96 \text{ kPa}$$

Acréscimo de tensão devido ao reservatório:



$$\sigma_0 = \gamma \cdot h = 10 \cdot 20 = 200 \text{ kPa}$$

$$z = 20 \text{ m}$$

$$a_1 = 25; n = a/z \rightarrow n_1 = 1,25$$

$$b_1 = 45; m = b/z \rightarrow m_1 = 2,25$$

$$I_1 \approx 0,217$$

Acréscimo de tensão:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I$$

$$\sigma_{z1} = 200 \cdot 0,217$$

$$\sigma_{z1} = 43,4 \text{ kPa}$$

Como as áreas 1 e 2 são exatamente iguais:

$$\sigma_{z1} = \sigma_{z2} = 43,4 \text{ kPa}$$

Descontando as áreas projetadas:

$$z = 20 \text{ m}$$

$$a_3 = 5; n = a/z \rightarrow n_3 = 0,25$$

$$b_3 = 25; m = b/z \rightarrow m_3 = 1,25$$

$$I_3 \approx 0,071$$

Acréscimo de tensão:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot I$$

$$\sigma_{z3} = 200 \cdot 0,071$$

$$\sigma_{z3} = 14,2 \text{ kPa}$$

Como as áreas 3 e 4 são exatamente iguais:

$$\sigma_{z3} = \sigma_{z4} = 14,2 \text{ kPa}$$

Acréscimo de tensão devido ao reservatório:

$$\sigma_{zr} = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4$$

$$\sigma_{zr} = 43,4 + 43,4 - 14,2 - 14,2$$

$$\sigma_{zr} = 58,4 \text{ kPa}$$

Acréscimo de tensão total:

acréscimo devido ao aterro + acréscimo devido ao reservatório

$$\sigma_z = \sigma_{za} + \sigma_{zr} = 124,96 + 58,4$$

$$\sigma_z = 183,36 \text{ kPa}$$

Tensão efetiva vertical em A:

$$\sigma'_{vA} = 192 + 183,36$$

$$\sigma'_{vA} = 375,36 \text{ kPa}$$

d)

Tensão efetiva horizontal em A:

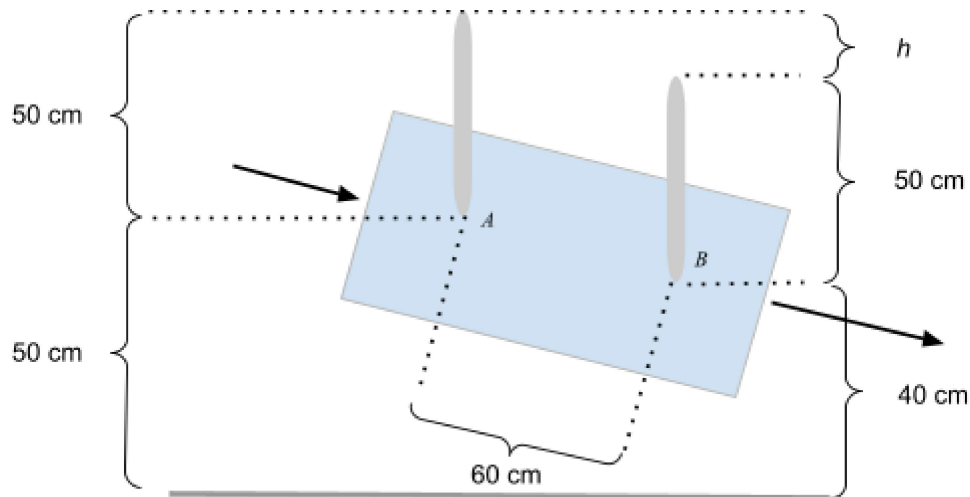
$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

$$0,609 = \frac{\sigma'_h}{375,36}$$

$$\sigma'_h = 228,59 \text{ kPa}$$

Permeabilidade 02.01

Considere a figura a seguir e determine o gradiente hidráulico.



Resolução 02.01

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

$$L = 60 \text{ cm}$$

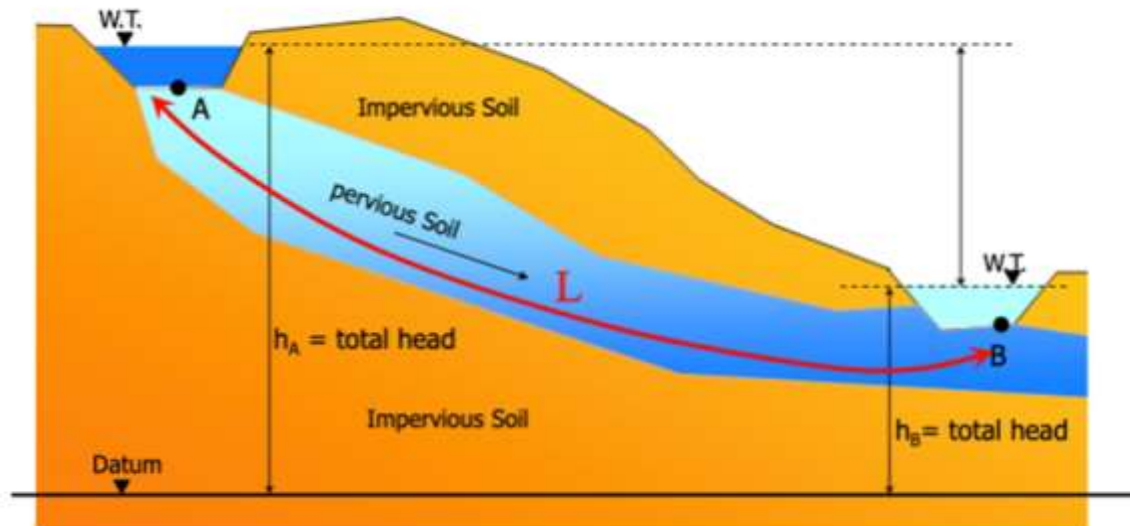
$$\Delta h = h_A - h_B$$

$$\Delta h = 50 - 40 = 10 \text{ cm}$$

$$i = \frac{10}{60} = 0,167$$

Permeabilidade 02.02

Com relação à figura a seguir, considere a carga total em A de 80 m, a carga total em B de 30 m e a distância entre os pontos de 2 km.



SOUZA PINTO (2006)

- Determine o valor do gradiente hidráulico.
- Considere a área transversal do canal igual a 10 m^2 e o coeficiente de permeabilidade $5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. Determine a vazão.

Resolução 02.02

a)

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

$$L = 2 \text{ km} = 2000 \text{ m}$$

$$\Delta h = h_A - h_B$$

$$\Delta h = 80 - 30 = 50 \text{ m}$$

$$i = \frac{50}{2000} = 0,025$$

b)

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

$$Q = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,025 \cdot 10$$

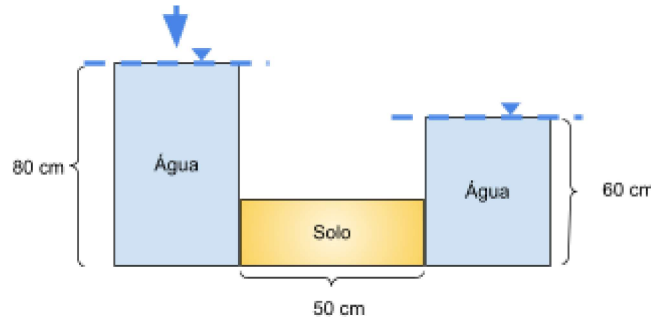
$$Q = 0,00125 \text{ m}^3/\text{s}$$

Permeabilidade 02.03

Dado o experimento de Darcy na figura a seguir, determine a vazão.

Dados:

- Área da amostra: 10 cm^2 ; Coeficiente de permeabilidade: $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.



Resolução 02.03

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

$$k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

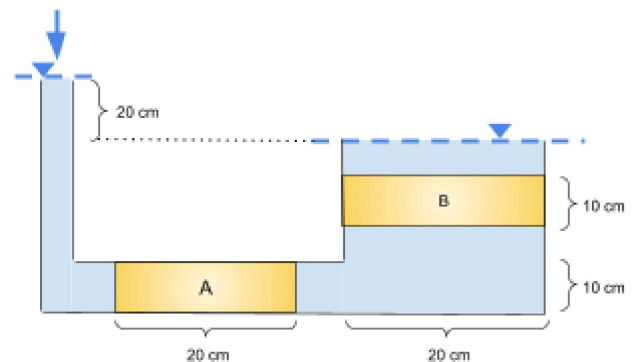
$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{80-60}{50} = 0,4$$

$$A = 10 \text{ cm}^2$$

$$Q = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,4 \cdot 10 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$$

Permeabilidade 02.04

No permeâmetro mostrado na figura a seguir, a amostra de Areia A tem área de 100 cm^2 e coeficiente de permeabilidade $4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, enquanto a amostra de Areia B tem área de 400 cm^2 e coeficiente de permeabilidade $2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$. A porosidade do solo é 2.



- Determine o gradiente hidráulico das duas areias.
- Determine a velocidade média de percolação no solo B.
- Determine a velocidade real no solo B.

Resolução 02.04

a)

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

$$\Delta h = 20 \text{ cm}$$

$$k_A = 4 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}; k_B = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$A_A = 100 \text{ cm}^2; A_B = 400 \text{ cm}^2$$

$$L_A = 20 \text{ cm}; L_B = 10 \text{ cm}$$

Como a amostra está interligada no mesmo recipiente, o fluxo é **contínuo** e a vazão é a **mesma** em todos os pontos:

$$Q_A = Q_B$$

$$k_A \cdot i_A \cdot A_A = k_B \cdot i_B \cdot A_B$$

$$4 \cdot 10^{-3} \cdot i_A \cdot 100 = 2 \cdot 10^{-3} \cdot i_B \cdot 400$$

$$i_A = 2i_B$$

As perdas de carga geradas por cada solo (o quanto cada amostra participa na perda de carga total) se relacionam:

$$i_A = \frac{\Delta h_A}{L_A} = 2i_B$$

$$\frac{\Delta h_A}{L_A} = 2 \frac{\Delta h_B}{L_B} \Rightarrow \frac{\Delta h_A}{20} = 2 \frac{\Delta h_B}{10}$$

$$\Delta h_A = 4\Delta h_B$$

$$\text{Como } \Delta h_A + \Delta h_B = 20$$

$$4\Delta h_B + \Delta h_B = 20 \Rightarrow \Delta h_B = 4 \text{ m}; \Delta h_A = 16 \text{ m}$$

$$i_A = \frac{\Delta h_A}{L_A} = \frac{16}{20} = 0,8 \Rightarrow i_B = 0,4$$

b)

Velocidade média de percolação:

$$v_B = k_B \cdot i_B = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \Rightarrow v_B = 8 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

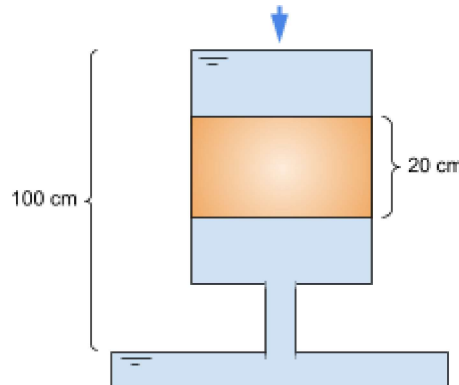
c)

Velocidade real de percolação:

$$v_{rB} = \frac{v_B}{K} = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

Permeabilidade 02.05

Considere o experimento de Darcy representado na figura a seguir, com a área do corpo de prova igual a 25 cm^2 e coeficiente de permeabilidade $4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$. Determine a vazão.



Resolução 02.05

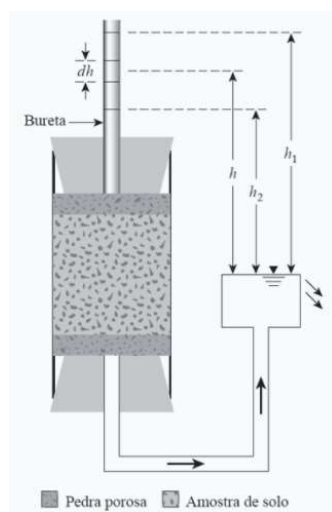
$$h = 100 \text{ cm}; L = 20 \text{ cm}; A = 25 \text{ cm}^2; k = 4 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$Q = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A$$

$$Q = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{20} \cdot 25 = 0,5 \text{ cm}^3/\text{s} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Permeabilidade 02.06

Em uma ensaio de permeabilidade de carga variável, quando a carga h era de 65 cm ($h_1 = 65 \text{ cm}$), acionou-se o cronômetro. Trinta segundos após, a carga h era de 35 cm ($h_2 = 35 \text{ cm}$). O comprimento e a área do corpo de prova são de 20 cm e 77 cm^2 , respectivamente, e a área da bureta é de $1,2 \text{ cm}^2$.



SOUZA PINTO (2006)

- Determine o coeficiente de permeabilidade do solo.
- Estime o coeficiente de permeabilidade aplicando diretamente a Lei de Darcy para uma carga média durante o ensaio.
- Determine o tempo necessário para a carga hidráulica cair de 65 cm para 50 cm.

Resolução 02.06

a)

Dados: $a = 1,2 \text{ cm}^2$ | $A = 77 \text{ cm}^2$ | $L = 20 \text{ cm}$ | $h_1 = 65 \text{ cm}$ | $h_2 = 35 \text{ cm}$ | $\Delta t = 30 \text{ s}$

Para o ensaio de carga variável:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \rightarrow k = \frac{1,2 \cdot 20}{77 \cdot 30} \cdot \ln\left(\frac{65}{35}\right) \Rightarrow k = 6,43 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

b)

Para uma carga média, utiliza-se a Lei de **Darcy** para permeâmetros de carga constante:

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A$$

Carga média:

$$\Delta h = \frac{65+35}{2} = 50 \text{ cm}$$

Cálculo da vazão:

$$Q = \frac{h \cdot A}{\Delta t} \Rightarrow Q = \frac{(65-35) \cdot 1,2}{30} \Rightarrow Q = 1,2 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Cálculo do coeficiente de condutividade hidráulica por **Darcy**:

$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta h \cdot A} \Rightarrow k = 6,23 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

c)

Com $k = 6,43 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$,

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \Rightarrow 6,43 \cdot 10^{-3} = \frac{1,2 \cdot 20}{77 \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{65}{50}\right) \Rightarrow \Delta t = 12,72 \text{ s}$$

O coeficiente de condutividade hidráulica é uma característica que depende do **solo** e do **líquido percolante**.

Permeabilidade 02.07

Os dados apresentados a seguir foram obtidos durante um ensaio de carga variável (decrecente) feito em uma amostra de silte argiloso.

Dados:

Diâmetro da amostra: 100 mm

Extensão da amostra: 100 mm

Diâmetro da bureta: 3 mm

Tempo após o início (s)	0	15	30	49	70	96
Nível de água na bureta (mm)	1000	900	800	700	600	500

Determine o valor médio do coeficiente de permeabilidade k .

Resolução 02.07

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \mid A = \frac{10^2 \cdot \pi}{4} \Rightarrow A = 78,54 \text{ cm}^2$$

$$a = \frac{0,3^2 \cdot \pi}{4} \Rightarrow a = 0,071 \text{ cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$k = \frac{0,071 \cdot 10}{78,54 \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

$$\text{Para } \Delta t_1 = 15: k = 6,32 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$\text{Para } \Delta t_2 = 15: k = 7,06 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$\text{Para } \Delta t_3 = 19: k = 6,33 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$\text{Para } \Delta t_4 = 21: k = 6,61 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$\text{Para } \Delta t_5 = 26: k = 6,31 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$k_{\text{médio}} = \frac{10^{-5} \cdot (6,32 + 7,06 + 6,33 + 6,61 + 6,31)}{5} = 6,53 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

Permeabilidade 02.08

Um permeâmetro de carga constante foi preparado com areia fina com tamanho efetivo $D_{10} = 0,12 \text{ mm}$. Os tempos necessários para coletar 250 ml de água foram registrados nas leituras do manômetro apresentadas a seguir. Determine o valor médio de k e compare esse valor com a relação empírica de Hazen.

Dados:

- Diâmetro da amostra: 100 mm
- Distância entre os manômetros: 100 mm

Tempos para coletar	2 min 25 s	3 min 15 s	4 min 55 s
Leitura do manômetro A (mm)	157	191	262
Leitura do manômetro B (mm)	24	89	195

Resolução 02.08

Por **Darcy**:

$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta h \cdot A}$$

$$A = 78,53 \text{ cm}^2 \mid L = 10 \text{ cm}$$

No primeiro experimento:

Cálculo da vazão:

$$Q = \frac{\text{cm}^3}{s} \Rightarrow Q = \frac{250}{145} \Rightarrow Q = 1,72 \text{ cm}^3/s$$

$$\Delta h = (15,7 - 2,4) \Rightarrow \Delta h = 13,3 \text{ cm} \Rightarrow k = \frac{1,73 \cdot 10}{13,3 \cdot 78,53} \Rightarrow k = 0,0166 \text{ cm/s}$$

No segundo experimento:

Cálculo da vazão:

$$Q = \frac{\text{cm}^3}{s} \Rightarrow Q = \frac{250}{195} \Rightarrow Q = 1,28 \text{ cm}^3/s$$

$$\Delta h = (19,1 - 8,9) \Rightarrow \Delta h = 10,2 \text{ cm} \Rightarrow k = \frac{1,28 \cdot 10}{10,2 \cdot 78,53} \Rightarrow k = 0,0159 \text{ cm/s}$$

No terceiro experimento:

Cálculo da vazão:

$$Q = \frac{cm^3}{s} \Rightarrow Q = \frac{250}{295} \Rightarrow Q = 0,85 \text{ cm}^3/s$$

$$\Delta h = (26,2 - 19,5) \Rightarrow \Delta h = 6,7 \text{ cm}$$

$$k = \frac{0,85 \cdot 10}{6,7 \cdot 78,53} \Rightarrow k = 0,0161 \text{ cm/s}$$

Coefficiente de condutividade hidráulica médio:

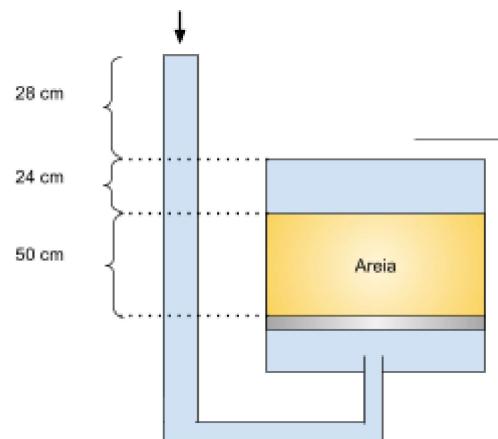
$$k_{méd} = \frac{0,0166 + 0,0159 + 0,0161}{3} \Rightarrow k_{méd} = 0,0162 \text{ cm/s}$$

Por Hazen:

$$k = 100 \cdot D_{10}^2 \Rightarrow k = 100 \cdot (0,012)^2 \Rightarrow k = 0,0144 \text{ cm/s}$$

Permeabilidade 02.09

No permeâmetro mostrado na figura ao lado, a seção transversal do permeâmetro é de 530 cm^2 . O peso específico saturado da areia é de 18 kN/m^3 . Mantida a carga hidráulica, mediu-se um volume de 100 cm^3 escoando em 18 segundos. Determine o coeficiente de permeabilidade do material.



Peso específico da areia: 18 kN/m^3

Resolução 02.09

Permeâmetro de carga constante, tem-se **Darcy**:

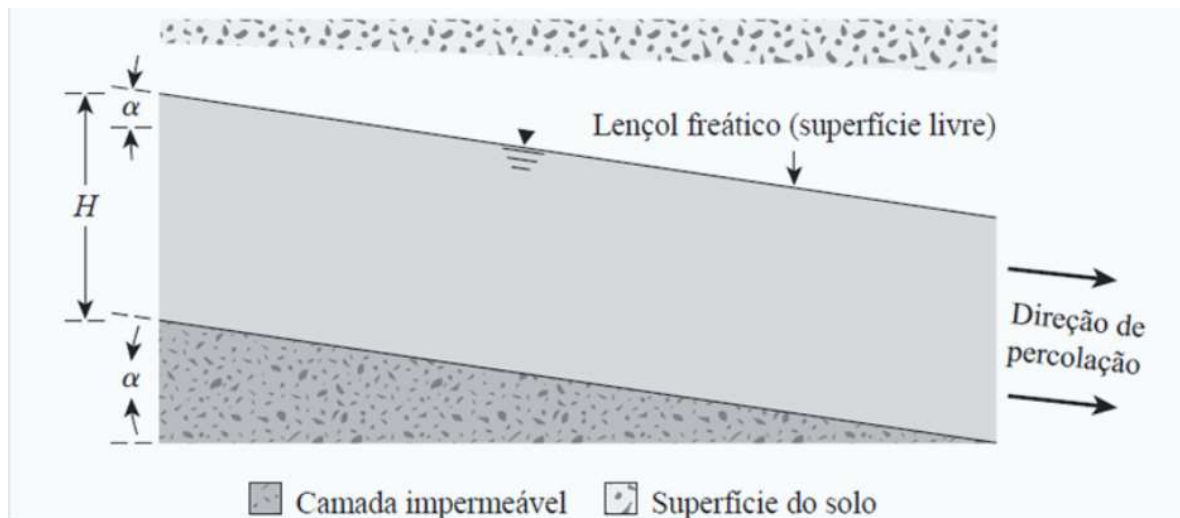
$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta h \cdot A} \mid L = 50 \text{ cm} \mid \Delta h = 28 \text{ cm}$$

$$Q = \frac{100}{18} \Rightarrow Q = 5,56 \text{ cm}^3 \mid A = 530 \text{ cm}^2$$

$$k = \frac{5,56 \cdot 50}{28 \cdot 530} \Rightarrow k = 0,0187 \text{ cm/s}$$

Permeabilidade 02.10

Uma camada de solo permeável é sustentada por uma camada impermeável, conforme indica a figura. Calcule a taxa de percolação através desta camada em vazão por unidade de largura.



SOUZA PINTO (2006)

Dados da camada permeável:

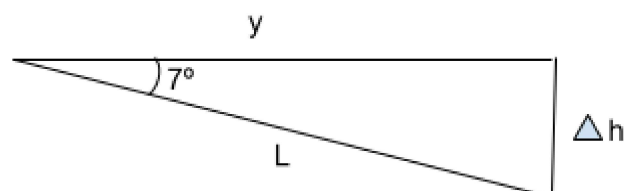
$$k = 6 \times 10^{-3} \text{ cm/s.}$$

$$H = 5,4 \text{ m}$$

$$\alpha = 7^\circ$$

Resolução 02.10

Extraindo informações do enunciado:



$$\tan(7^\circ) = \frac{\Delta h}{y} \Rightarrow \Delta h = \tan(7^\circ) \cdot y \mid \cos(7^\circ) = \frac{y}{L} \Rightarrow L = \frac{y}{\cos(7^\circ)} \mid k = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow i = \frac{\tan(7^\circ) \cdot y}{\frac{y}{\cos(7^\circ)}} \Rightarrow i = \frac{y \cdot \tan(7^\circ) \cdot \cos(7^\circ)}{y} \Rightarrow i = 0,122$$

Decompondo o valor de H na direção da percolação, tem-se:

$$A = 5,4 \cdot \cos(7^\circ) \Rightarrow A = 5,36 \text{ m}^2/\text{m} \rightarrow \text{área por unidade de largura}$$

$$Q = 6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,122 \cdot 5,36 \Rightarrow Q = 3,92 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s \cdot m}$$

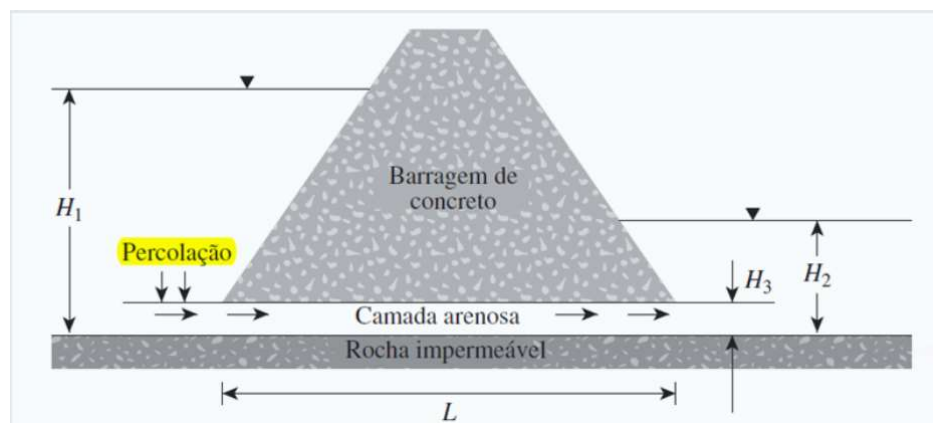
Por fim, tem-se:

$$Q_{por\ hora} = 3,92 \cdot 10^{-5} \cdot 60 \cdot 60 \Rightarrow Q = 14,11 \cdot 10^{-2} \frac{m^3}{h \cdot m}$$

Permeabilidade 02.11

Ocorre percolação através de uma camada arenosa embaixo de uma barragem de concreto, como mostrado na figura. Com os dados a seguir, calcule:

- A taxa de percolação por unidade de comprimento da barragem em $m^3/h/m$.
- O total de percolação por dia, se a barragem possui 350 m de comprimento.
- A velocidade de percolação.



SOUZA PINTO (2006)

Dados:

- Nível de água superior: $H_1 = 16$ m;
- Nível de água inferior: $H_2 = 2,3$ m;
- Espessura da camada arenosa: $H_3 = 0,75$ m;
- Condutividade hidráulica da camada arenosa: $k = 0,009$ cm/s;
- Índice de vazios da areia: $e = 0,8$;
- Comprimento: $L = 45$ m.

Resolução 02.11

a)

Considera-se que o nível em H_1 e H_2 sejam constantes.

Assim, tem-se um permeâmetro de carga constante.

Logo, para permeâmetros de carga constante, utiliza-se **Darcy**:

$$Q = \frac{k \cdot \Delta h \cdot A}{L}$$

Antes de aplicar a fórmula, verificam-se as unidades:

$$k = 0,009 \frac{cm}{s} = 0,324 \frac{m}{hora}$$

$$q = \frac{0,324 \cdot (16-2,3) \cdot 0,75}{45 \cdot m} = 0,07398 \frac{m^3}{hora \cdot metro}$$

b)

Total de percolação por dia para $B = 350 \text{ m}$

$$Q = 0,07398 \cdot 350 \cdot 24 \Rightarrow Q = 621,43 \frac{m^3}{dia}$$

c)

Velocidade real de percolação:

$$v_p = \frac{k \cdot i}{n}$$

Tem-se:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{13,7}{45} = 0,304$$

Para o cálculo da porosidade do solo através do índice de vazios, tem-se:

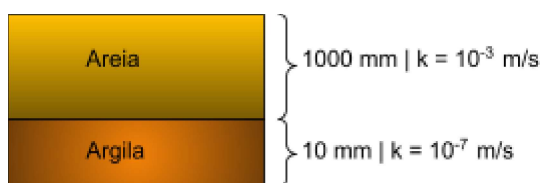
$$n = \frac{e}{1+e} \Rightarrow n = 0,44$$

$$v_p = 0,00622 \frac{m}{seg}$$

Permeabilidade 02.12

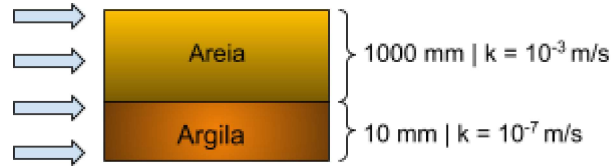
Um depósito de areia contém camadas horizontais finas (10 mm) de argila a 1,0 m umas das outras.

- Determine o coeficiente de permeabilidade equivalente na direção horizontal.
- Determine o coeficiente de permeabilidade equivalente na direção vertical.



Resolução 02.12

a)



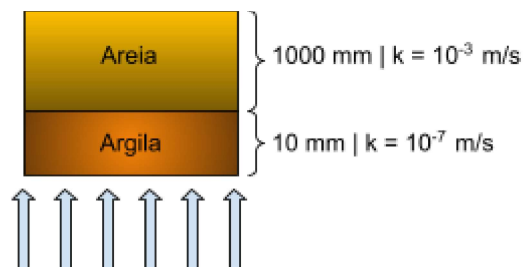
Para a direção horizontal, com as **camadas de solo** dispostas **paralelamente ao fluxo**, a vazão total **Q** é a **soma** da parcela de vazão que passa em cada camada.

Portanto:

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H} (k_{H_1} \cdot H_1 + k_{H_2} \cdot H_2 + k_{H_3} \cdot H_3 + \dots + k_{H_n} \cdot H_n)$$

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{1,01} (10^{-3} \cdot 1 + 10^{-7} \cdot 0,01) \Rightarrow k_{H(eq)} = 9,901 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

b)



Para a direção vertical, com as **camadas** dispostas **perpendicularmente ao fluxo**, a **vazão Q** é a **mesma** em todas elas.

Portanto:

$$k_{v(eq)} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_{v_1}} + \frac{H_2}{k_{v_2}} + \frac{H_3}{k_{v_3}} + \dots + \frac{H_n}{k_{v_n}}}$$

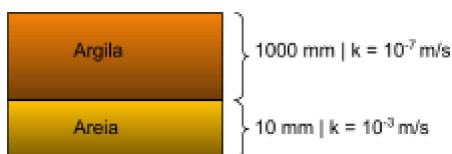
$$k_{v(eq)} = \frac{1,01}{\frac{1,0}{10^{-3}} + \frac{0,01}{10^{-7}}} \Rightarrow k_{v(eq)} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Permeabilidade 02.13

Um depósito de argila contém camadas horizontais finas (10 mm) de areia a 1,0 m umas das outras. Determine:

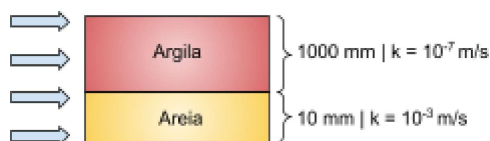
- O coeficiente de permeabilidade equivalente na direção horizontal.
- O coeficiente de permeabilidade equivalente na direção vertical.

Dados:



Resolução 02.13

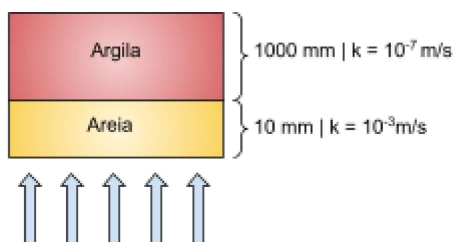
a)



$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H} (k_{H_1} \cdot H_1 + k_{H_2} \cdot H_2 + k_{H_3} \cdot H_3 + \dots + k_{H_n} \cdot H_n)$$

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{1,01} (10^{-7} \cdot 1 + 10^{-3} \cdot 0,01) \Rightarrow k_{H(eq)} = 10^{-5} \text{ m/s}$$

b)

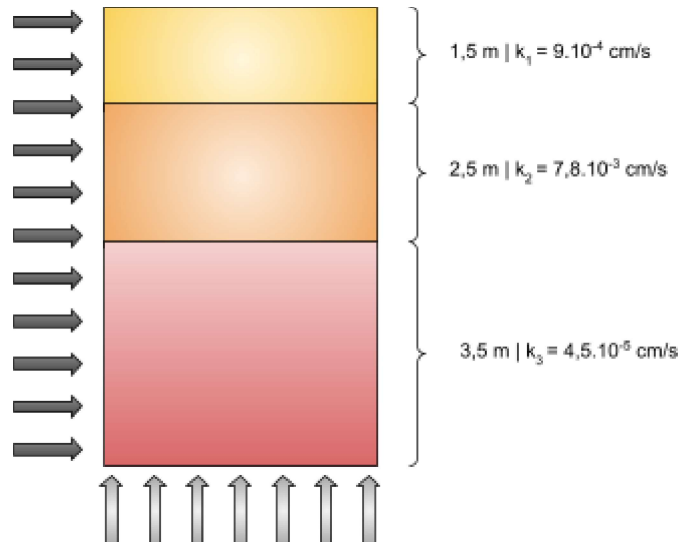


$$k_{v(eq)} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_{v_1}} + \frac{H_2}{k_{v_2}} + \frac{H_3}{k_{v_3}} + \dots + \frac{H_n}{k_{v_n}}}$$

$$k_{v(eq)} = \frac{1,01}{\frac{1,0}{10^{-7}} + \frac{0,01}{10^{-3}}} \Rightarrow k_{v(eq)} = 10^{-7} \text{ m/s}$$

Permeabilidade 02.14

Estime a relação de permeabilidade equivalente $\frac{k_H}{k_V}$ para o seguinte solo:



Resolução 02.14

Cálculo do coeficiente equivalente para o fluxo na horizontal:

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H} (k_{H_1} \cdot H_1 + k_{H_2} \cdot H_2 + k_{H_3} \cdot H_3 + \dots + k_{H_n} \cdot H_n)$$

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{750} (9 \cdot 10^{-4} \cdot 150 + 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot 250 + 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 350)$$

$$k_{H(eq)} = 2,801 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

Cálculo do coeficiente equivalente para o fluxo na vertical:

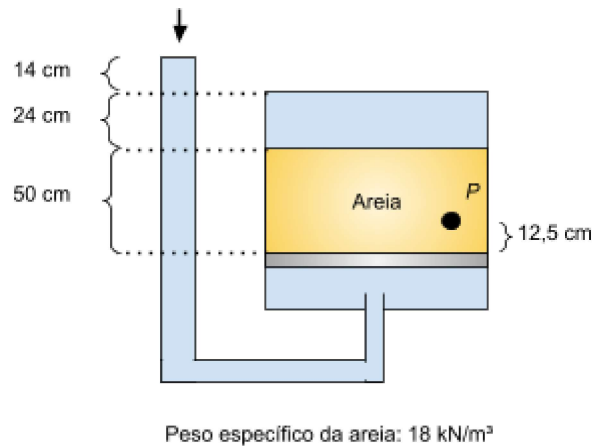
$$k_{v(eq)} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_{v_1}} + \frac{H_2}{k_{v_2}} + \frac{H_3}{k_{v_3}} + \dots + \frac{H_n}{k_{v_n}}}$$

$$k_{v(eq)} = \frac{750}{\frac{150}{9 \cdot 10^{-4}} + \frac{250}{7,8 \cdot 10^{-3}} + \frac{350}{4,5 \cdot 10^{-5}}} \Rightarrow k_{v(eq)} = 9,40 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

Logo, a razão $\frac{k_H}{k_V} = \frac{2,801}{9,40 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow \frac{k_H}{k_V} = 29,80$

Permeabilidade 02.15

Analise o permeâmetro a seguir, com amostra de areia disposta acima de uma peneira com área igual a 530 cm^2 .



Com base nestas informações:

- Determine o esforço que a areia exerce na peneira.
- Para o ponto P, determine a carga altimétrica, a tensão total, a pressão neutra e a tensão efetiva.
- O que aconteceria se a carga e 14 cm fosse elevada até 40 cm?

Resolução 02.15

a)

$$F = \sigma' \cdot A$$

Quando o fluxo no solo é ascendente:

$$\sigma' = L \cdot (\gamma_{sub} - i \cdot \gamma_w)$$

$$\sigma' = L \cdot (\gamma_{solo} - \gamma_w - \frac{\Delta h}{L} \cdot \gamma_w)$$

$$\sigma' = 0,50 \cdot (18000 - 10000 - \frac{0,14}{0,50} \cdot 10000)$$

$$\sigma' = 2600 \text{ N/m}^2$$

$$F = 2600 \cdot (530 \cdot 10^{-4}) = 137,8 \text{ N}$$

b)

Carga altimétrica:

Distância vertical da referência ao ponto:

12,5 cm

Tensão total:

$$\sigma = \gamma_{\text{areia}} \cdot h_{\text{areia}} + \gamma_w \cdot h_w$$

$$\sigma = 18 \cdot (0,5 - 0,125) + 10 \cdot 0,24 = 9,15 \text{ kN/m}^2$$

Pressão neutra para fluxo ascendente

$$u = [(\text{altura da coluna d'água}) + i \cdot (\text{o quanto falta percolar})] \cdot \gamma_w$$

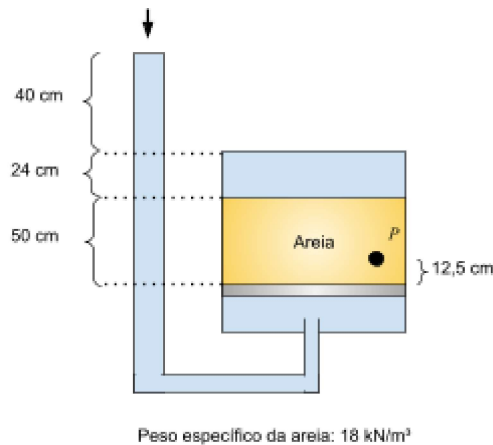
$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{0,14}{0,50} = 0,28$$

$$u = [(0,5 - 0,125 + 0,24) + 0,28 \cdot (0,5 - 0,125)] \cdot \gamma_w = 7,2 \text{ kN/m}^2$$

Tensão efetiva:

$$\sigma' = \sigma - u = 9,15 - 7,2 = 1,95 \text{ kN/m}^2$$

c)



Novo gradiente hidráulico:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{0,40}{0,50} = 0,80$$

Gradiente hidráulico crítico:

$$i_{\text{crit}} = \frac{\gamma_{\text{sub}}}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{\text{solo}} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{18000 - 10000}{10000} = 0,80$$

Como o gradiente hidráulico atingiu o patamar crítico, a tensão efetiva se **anula**, desprendendo o solo e permitindo-o se mover para cima. Este fenômeno é conhecido como **areia movediça**.

Verifica-se a tensão efetiva na base do solo:

$$\sigma' = L \cdot (\gamma_{\text{sub}} - i \cdot \gamma_w)$$

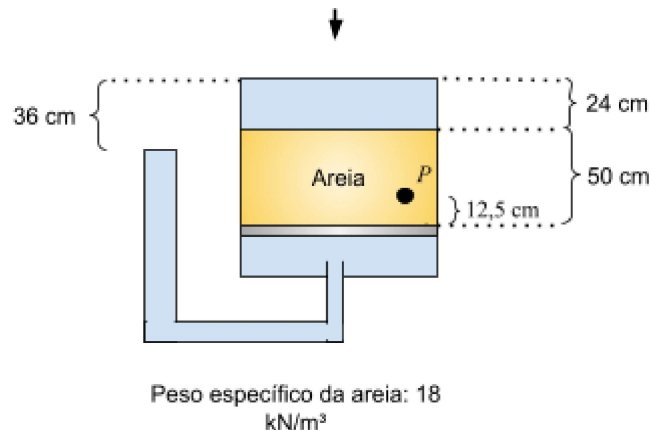
$$\sigma' = L \cdot (\gamma_{\text{solo}} - \gamma_w - \frac{\Delta h}{L} \cdot \gamma_w)$$

$$\sigma' = 0,50 \cdot (18000 - 10000 - \frac{0,40}{0,50} \cdot 10000)$$

$$\sigma' = 0,50 \cdot (8000 - 0,8 \cdot 10000) = 0 \text{ N/m}^2$$

Permeabilidade 02.16

Analise o permeômetro a seguir, com amostra de areia disposta acima de uma peneira com área igual a 530 cm^2 .



Com base nestas informações:

- Determine o esforço que a areia exerce na peneira.
- Para o ponto P, determine a carga altimétrica, a tensão total, a pressão neutra e a tensão efetiva.

Resolução 02.16

a)

$$F = \sigma' \cdot A$$

Quando o fluxo no solo é descendente:

$$\sigma' = L \cdot (\gamma_{sub} + i \cdot \gamma_w)$$

$$\sigma' = L \cdot (\gamma_{solo} - \gamma_w + \frac{\Delta h}{L} \cdot \gamma_w)$$

$$\sigma' = 0,50 \cdot (18000 - 10000 + \frac{0,36}{0,50} \cdot 10000) = 7600 \text{ N/m}^2$$

$$F = 7600 \cdot (530 \cdot 10^{-4}) = 402,8 \text{ N}$$

b)

Carga altimétrica:

12,5 cm

Tensão total:

$$\sigma = \gamma_{areia} \cdot h_{areia} + \gamma_w \cdot h_w$$

$$\sigma = 18 \cdot (0,5 - 0,125) + 10 \cdot 0,24 = 9,15 \text{ kN/m}^2$$

Pressão neutra para fluxo descendente

$$u = [(altura da coluna d'água) - i \cdot (o quanto falta percolar)] \cdot \gamma_w$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{0,36}{0,50} = 0,72$$

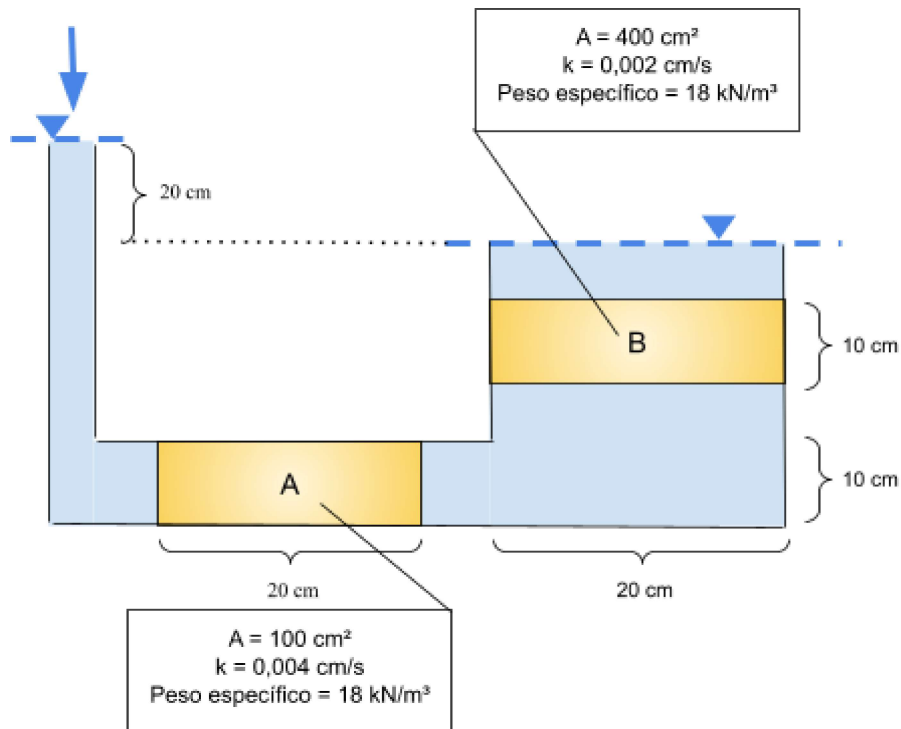
$$u = [(0,50 - 0,125 + 0,24) - 0,72 \cdot (0,50 - 0,125)] \cdot \gamma_w = 3,45 \text{ kN/m}^2$$

Tensão efetiva:

$$\sigma' = \sigma - u = 9,15 - 3,45 = 5,7 \text{ kN/m}^2$$

Permeabilidade 02.17

A partir do permeâmetro a seguir, determine a tensão efetiva no ponto central da areia B.



Resolução 02.17

$$\Delta h = 20 \text{ cm} \Rightarrow \Delta h_A + \Delta h_B = 20$$

$$Q_A = Q_B = k_A \cdot \frac{\Delta h_A}{L_A} \cdot A_A = k_B \cdot \frac{\Delta h_B}{L_B} \cdot A_B$$

$$0,004 \cdot \frac{\Delta h_A}{20} \cdot 100 = 0,002 \cdot \frac{20 - \Delta h_A}{10} \cdot 400$$

$$\Delta h_A = 4 \cdot (20 - \Delta h_A)$$

$$\Delta h_A = 16 \text{ cm} = 0,16 \text{ m} \rightarrow i_A = \frac{0,16}{0,20} = 0,80$$

$$\Delta h_B = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m} \rightarrow i_B = \frac{0,04}{0,10} = 0,40$$

Quando o fluxo no solo é ascendente:

$$\sigma' = L \cdot (\gamma_{sub} - i \cdot \gamma_w)$$

Comprimento percorrido em A:

$$l_A = 0,20 \text{ m}$$

Comprimento percorrido em B:

$$l_B = 0,05 \text{ m}$$

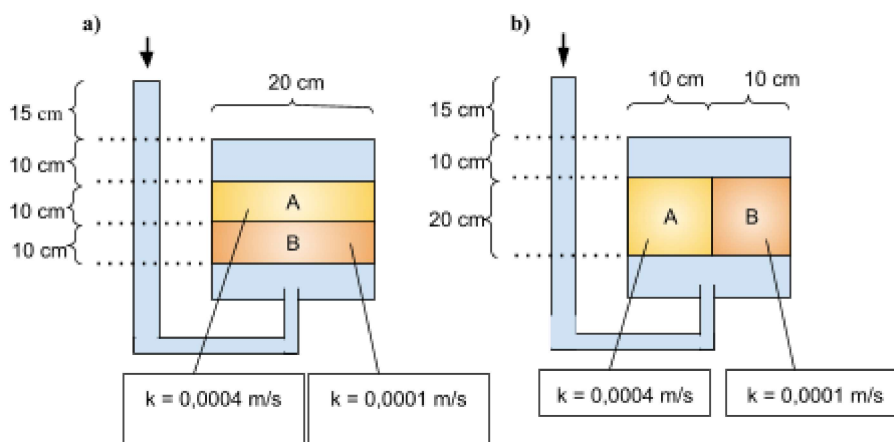
$$\sigma'_B = 0,05 \cdot \gamma_{sub} - (\Delta h - i_A \cdot l_A - i_B \cdot l_B) \cdot \gamma_w$$

$$\sigma'_B = 0,05 \cdot (18000 - 10000) - (0,20 - 0,8 \cdot 0,20 - 0,4 \cdot 0,05) \cdot 10000$$

$$\sigma'_B = 200 \text{ N/m}^2 = 0,2 \text{ kPa}$$

Permeabilidade 02.18

As areias A e B foram ensaiadas em um permeômetro de seção quadrada, de duas maneiras diferentes, conforme as figuras a seguir. Determine a vazão em ambos os casos.



Resolução 02.18

a)

Camadas dispostas perpendicularmente ao fluxo:

$$Q = Q_A = Q_B$$

$$\Delta h_T = 0,15 \text{ m}; L_T = 0,20 \text{ m}; i_T = \frac{0,15}{0,20} = 0,75$$

$$k_{eq} = \frac{H_1 + H_2}{H_1/k_1 + H_2/k_2}$$

$$k_{eq} = \frac{0,20}{0,10/0,0004 + 0,10/0,0001} = 0,00016 \text{ m/s}$$

$$Q = k \cdot i \cdot A = 0,00016 \cdot 0,75 \cdot (0,20 \cdot 0,20)$$

$$Q = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

b)

Camadas dispostas paralelamente ao fluxo:

$$Q = Q_A + Q_B$$

$$\Delta h = 0,15 \text{ m}; L = 0,20 \text{ m}; i = \frac{0,15}{0,20} = 0,75$$

$$k_{eq} = \frac{k_1 \cdot H_1 + k_2 \cdot H_2}{H_1 + H_2}$$

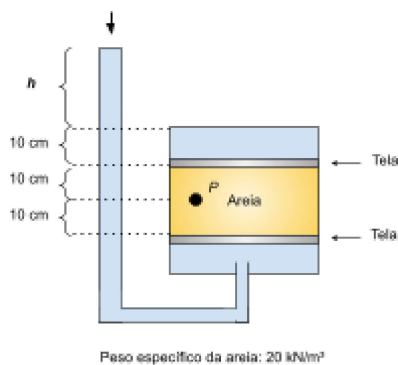
$$k_{eq} = \frac{0,0004 \cdot 0,20 + 0,0001 \cdot 0,20}{0,4} = 0,00025 \text{ m/s}$$

$$Q = k \cdot i \cdot A = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,75 \cdot (0,20 \cdot 0,20)$$

$$Q = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Permeabilidade 02.19

No permeâmetro a seguir, determine:



- A tensão efetiva no ponto P com h igual a 10 cm.
- A tensão efetiva no ponto P com h igual a 20 cm.
- A tensão efetiva no ponto P com h igual a 30 cm.

Resolução 02.19

a)

$$h = 0,10 \text{ m}; L = 0,20 \text{ m} \rightarrow i = 0,50$$

$$\sigma' = (0,1 \cdot 20000 + 0,1 \cdot 10000) - (0,2 + i \cdot 0,1) \cdot 10000$$

$$\sigma' = 500 \text{ N/m}^2 = 0,5 \text{ kPa}$$

b)

$$h = 0,20 \text{ m}; L = 0,20 \text{ m} \rightarrow i = 1,00$$

$$\sigma' = (0,1 \cdot 20000 + 0,1 \cdot 10000) - (0,2 + i \cdot 0,1) \cdot 10000$$

$$\sigma' = 0 \text{ N/m}^2 = 0 \text{ kPa}$$

c)

$$h = 0,30 \text{ m}; L = 0,20 \text{ m} \rightarrow i = 1,50$$

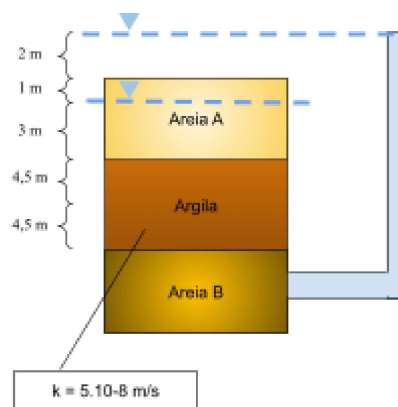
$$\sigma' = (0,1 \cdot 20000 + 0,1 \cdot 10000) - (0,2 + i \cdot 0,1) \cdot 10000$$

$$\sigma' = -500 \text{ N/m}^2 = -0,5 \text{ kPa}$$

A tensão efetiva negativa simboliza que o atrito das partículas é direcionado no sentido ascendente (pressionando a tela superior).

Permeabilidade 02.20

Uma camada de areia (areia A) com 4 metros de espessura cobre uma camada de argila com 9 metros de espessura que, por sua vez, cobre uma outra camada de areia (areia B). O lençol freático na areia A fica 1 metro abaixo do nível do solo, e o lençol freático da areia B fica a 2 metros acima da superfície do terreno.



- Determine a pressão da água intersticial na parte superior, intermediária e inferior da camada de argila.
- Determine o gradiente hidráulico e a percolação na camada de argila em litros/dia/m².

Resolução 02.20

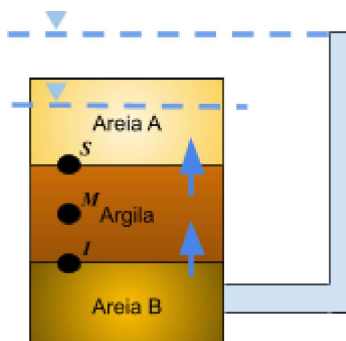
a)

$$\Delta h = 3 \text{ m}; L = 9 \text{ m} \rightarrow i = 0,33$$

$$\text{Carga influente no topo da camada de argila: } h_w = 3 \text{ m}$$

Carga influente no topo da camada de argila: $h_w = 15 \text{ m}$

Sentido do fluxo:



Estudo de cargas em cada ponto:

Ponto	Altura (a partir da base)	Carga	Total
S	9 m	3 m	12 m
M	4,5 m	X	Y
I	0 m	15 m	15 m

O fluxo se inicia com pressão máxima, que se dissipa ao longo da percolação.

$$Y = h_M = h_I - i \cdot l_{\text{percorrido}}$$

$$h_M = 15 - 0,33 \cdot 4,5 = 13,5 \text{ m}$$

$$X = h_{wM} = h_M - z_M = 13,5 - 4,5 = 9 \text{ m}$$

Pressão intersticial:

$$p = h_w \cdot \gamma_w; p = h_w \cdot 10$$

Ponto	Carga	Pressão intersticial
S	3 m	30 kPa
M	9 m	90 kPa
I	15 m	150 kPa

b)

$$\Delta h = 3 \text{ m}; L = 9 \text{ m} \rightarrow i = 0,33$$

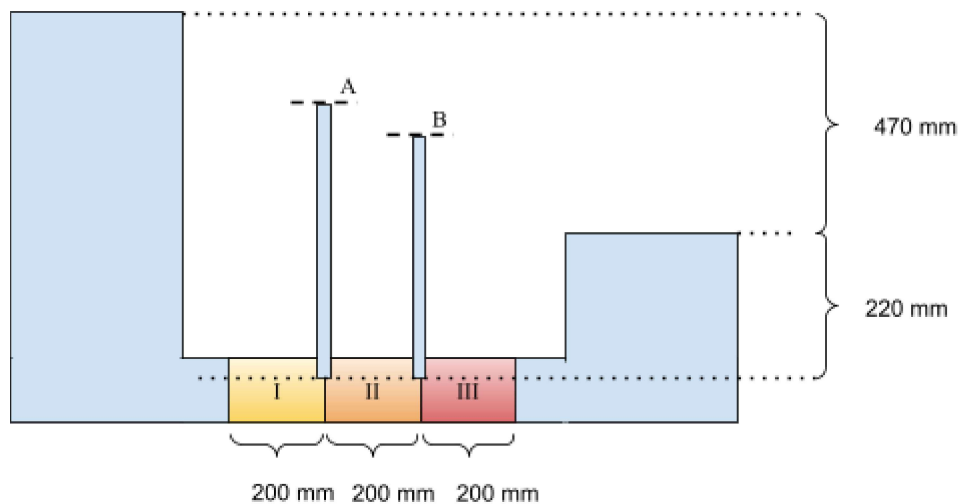
$$\frac{Q}{A} = v = k \cdot i = 5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,33 = 1,67 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

$$\frac{Q/\text{dia}}{A} = 1,67 \cdot 10^{-8} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 1,44 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3/\text{dia}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{Q/\text{dia}}{A} = 1,44 \frac{\text{l}/\text{dia}}{\text{m}^2}$$

Permeabilidade 02.21

Considere a configuração indicada na figura, nas quais três camadas diferentes de solo estão localizadas em um tubo cilíndrico de 150 mm de diâmetro. O coeficiente de permeabilidade do solo I é igual a $5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, o do solo II é igual a $4,2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ e do solo III é igual a $3,9 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$.



- Determine a quantidade de água que flui através da amostra por hora.
- Determine a altura das colunas verticais da água dentro dos piezômetros A e B.

Resolução 02.21

a)

Camadas dispostas perpendicularmente ao fluxo:

$$Q = Q_I = Q_{II} = Q_{III}$$

$$k_{eq} = \frac{H_I + H_{II} + H_{III}}{H_I/k_I + H_{II}/k_{II} + H_{III}/k_{III}}$$

$$k_{eq} = \frac{0,2 + 0,2 + 0,2}{0,2/5 \cdot 10^{-3} + 0,2/4,2 \cdot 10^{-2} + 0,2/3,9 \cdot 10^{-4}}$$

$$k_{eq} = 1,076 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s} = 1,076 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$Q = k \cdot i \cdot A = 1,07 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,470}{0,60} \cdot \frac{\pi \cdot 0,15^2}{4}$$

$$Q = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 3600 = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$$

b)

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

$$1,5 \cdot 10^{-7} = 5 \cdot 10^{-5} \left(\frac{0,22 + 0,47 - h_A}{0,2} \right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,15^2}{4} \right)$$

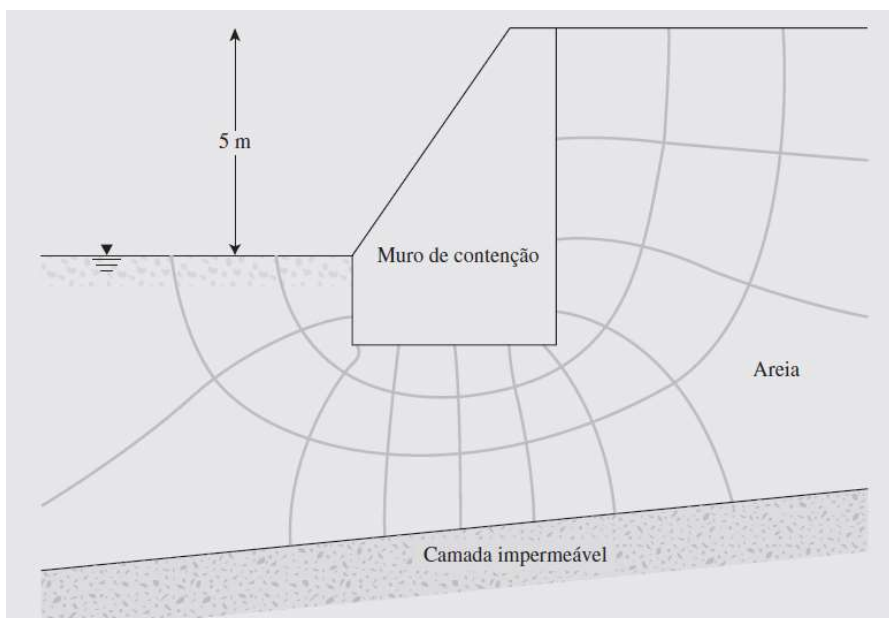
$$h_A = 0,656 \text{ m}$$

$$1,5 \cdot 10^{-7} = 4 \cdot 10^{-4} \left(\frac{h_A - h_B}{0,2} \right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,15^2}{4} \right)$$

$$h_B = 0,652 \text{ m}$$

Permeabilidade 02.22

Ocorre percolação em torno do muro de contenção apresentado a seguir. A condutividade hidráulica da areia é $1,5 \times 10^{-3}$ cm/s. O muro de contenção tem 50 m de comprimento.



SOUZA PINTO (2006)

Com base nessas informações, determine a quantidade de água percolada por dia em todo o muro de contenção.

Resolução 02.22

N_F : número de canais de fluxo;

N_D : número de camadas equipotenciais;

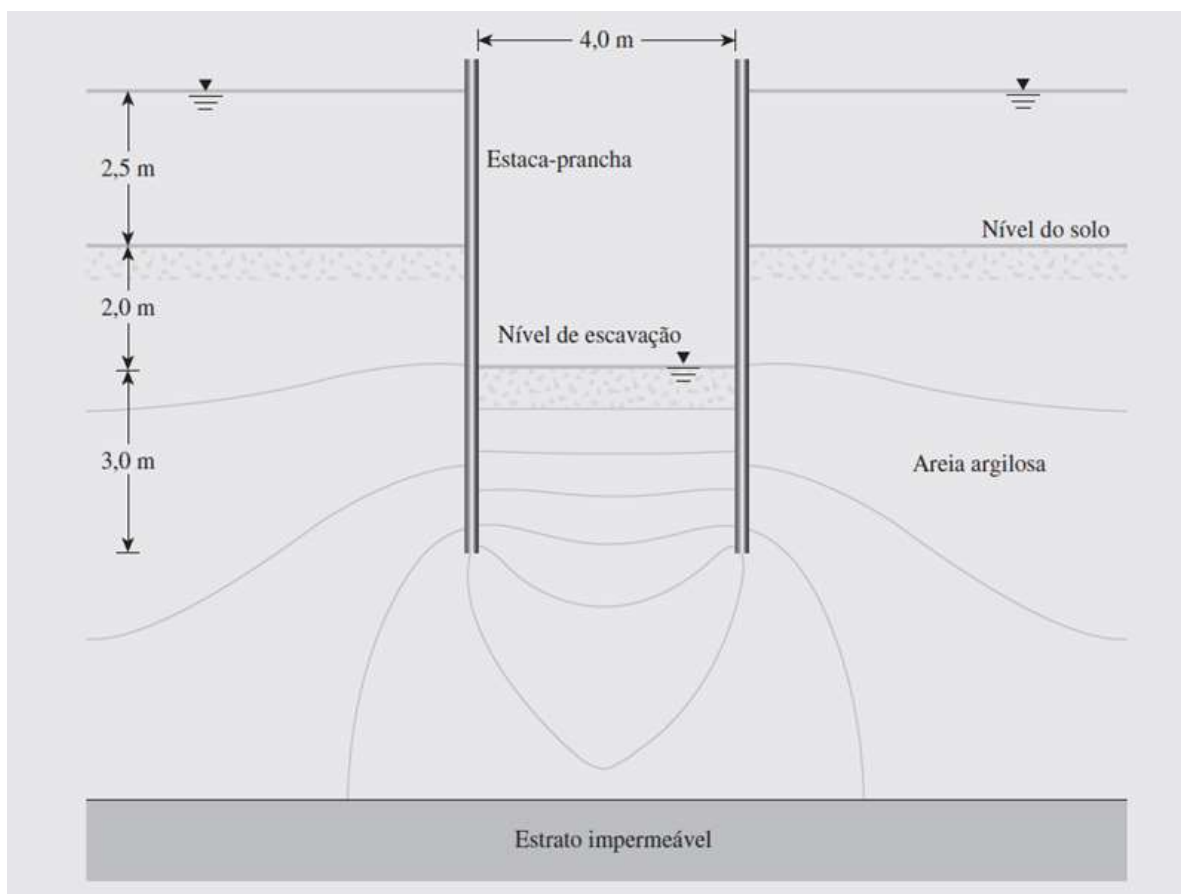
$$Q = k \cdot h \cdot \frac{N_F}{N_D} \cdot B$$

$$Q = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot \frac{3}{10} \cdot 50 = 1,125 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 1,125 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 = 97,2 \text{ m}^3/\text{dia}$$

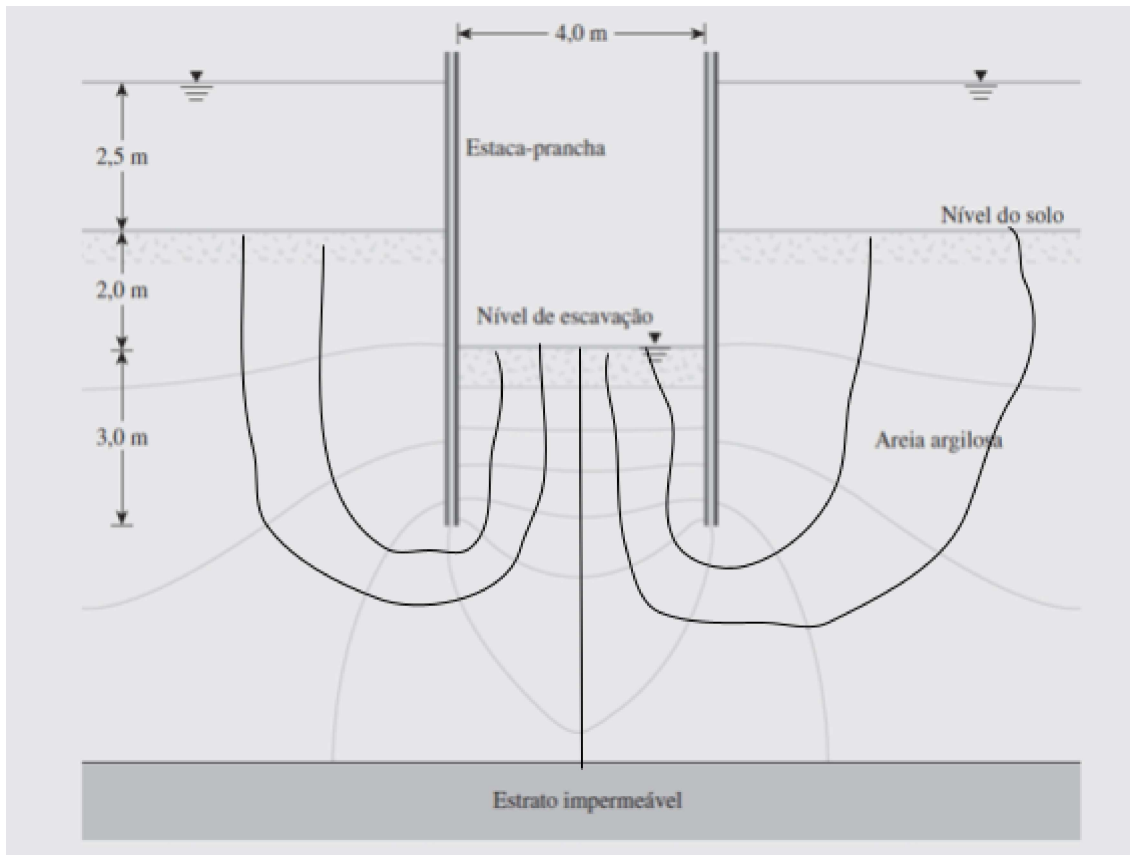
Permeabilidade 02.23

Duas estacas-prancha foram cravadas a uma distância de 4 m em areia argilosa, como mostrado na figura, e 2 m de profundidade de solo que havia entre as duas estacas-prancha foram removidos. Para facilitar a execução da obra proposta, o nível de água na região entre as estacas-prancha foi rebaixado até o nível da escavação através de um bombeamento contínuo. Algumas linhas exponenciais foram traçadas. Complete a rede de fluxo. Presumindo que a condutividade hidráulica da areia argilosa seja 2×10^{-4} cm/s, estime a quantidade de água que deve ser bombeada diariamente por metro de comprimento.



SOUZA PINTO (2006)

Resolução 02.23



Canais de fluxo:

$$N_F = 6;$$

Camadas equipotenciais:

$$N_D = 10$$

Diferença de carga:

$$h = 2 + 2,5 = 4,5 \text{ m}$$

Vazão por metro de comprimento por dia:

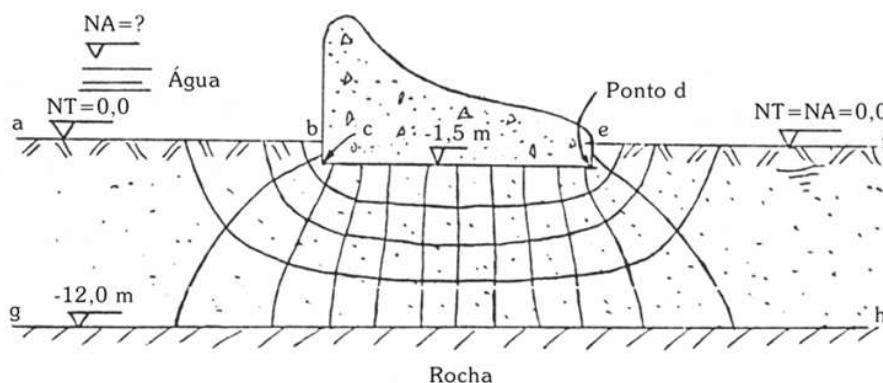
$$Q = k \cdot h \cdot \frac{N_F}{N_D} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60$$

$$Q = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 4,5 \cdot \frac{6}{10} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 0,467 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Utiliza-se $N_F = 6$ pois são três canais para cada lado.

Permeabilidade 02.24

Para a barragem de concreto esquematizada abaixo, com vazão de percolação $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ por metro de barragem e coeficiente de permeabilidade do solo $k = 3 \text{ cm/minuto}$, determine:



SOUZA PINTO (2006)

- A diferença de carga h .
- A subpressão na base da barragem, no ponto d indicado, tomando como referência o N.A. de jusante.

Resolução 02.24

a)

Canais de fluxo: $N_F = 4$; Camadas equipotenciais: $N_D = 12$

Diferença de carga: $h = ?$

$$k = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m/min} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$\text{Vazão: } Q = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = k \cdot h \cdot \frac{N_F}{N_D}$$

$$10^{-3} = 5 \cdot 10^{-4} \cdot h \cdot \frac{4}{12}$$

$$h = 6 \text{ m}$$

b)

$$\text{Subpressão: } p_i = h_w \cdot \gamma_w$$

Perda de carga por camada equipotencial:

$$h_D = \frac{\Delta h}{N_D} = \frac{6}{12} = 0,5$$

O ponto d está aproximadamente na metade da 10ª camada, portanto:

$$h_d = 6 - 10,5 \cdot 0,5 = 0,75$$

Ponto	Carga altimétrica	Carga de pressão	Carga total
d	-1,5 m	h_w	0,75 m

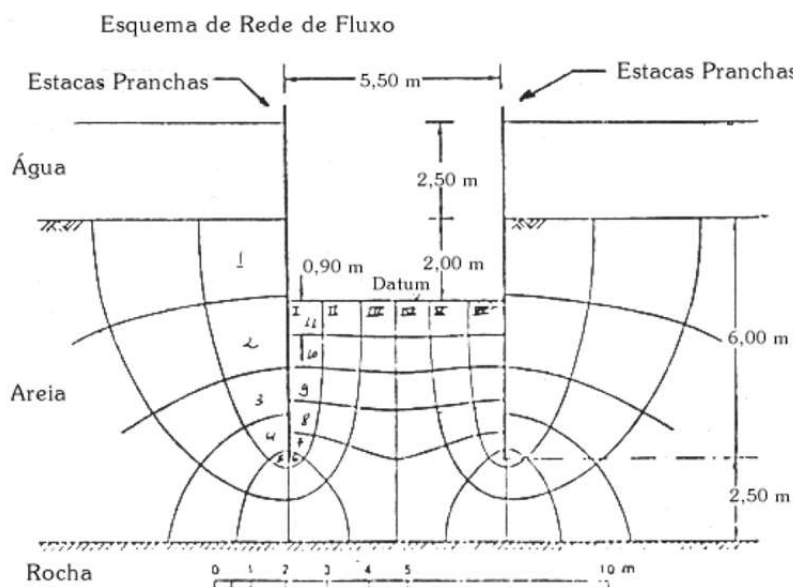
$$h = z + h_w$$

$$h_w = 0,75 - (-1,5) = 2,25$$

$$p_i = 2,25 \cdot 10 = 22,5 \text{ kN/m}^2 = 2,25 \text{ tf/m}^2$$

Permeabilidade 02.25

O fundo de um rio compõe-se de uma camada de areia com 8,25 m de espessura apoiada em rocha impermeável. A espessura da lâmina d'água é 2,50 m. Uma ensecadeira contínua com 5,50 m de largura é construída pela cravação de duas linhas de estacas pranchas até uma profundidade de 6,00 m abaixo do nível do fundo do rio, e uma escavação de 2,00 m abaixo desse mesmo nível é executada no interior da ensecadeira. O nível d'água no interior da ensecadeira é mantido no nível da escavação por bombeamento. Se a descarga na ensecadeira é de $0,25 \text{ m}^3/\text{hora}$ por unidade de comprimento, qual é o coeficiente de permeabilidade da areia?



SOUZA PINTO (2006)

Resolução 02.25

Vazão:

$$Q = 0,25 \frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{m}} = 6,94 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}}$$

Canais de fluxo:

$$N_F = 6;$$

Camadas equipotenciais:

$$N_D = 11$$

Diferença de carga: $h = 4,5 \text{ m}$

$$Q = k \cdot h \cdot \frac{N_F}{N_D} \cdot B$$

$$6,94 \cdot 10^{-5} = k \cdot 4,5 \cdot \frac{6}{11}$$

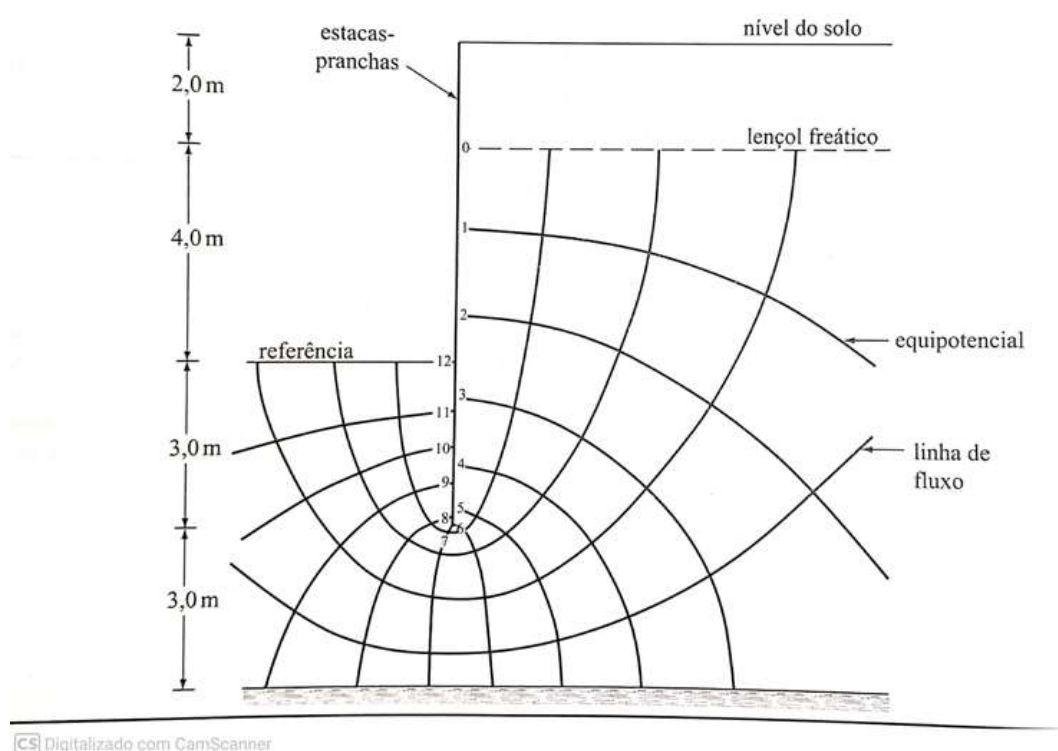
$$k = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Permeabilidade 02.26

Para a escavação com um muro de estacas-pranchas em um depósito de areia uniforme apresentado na figura, e os seguintes dados,

Areia: $k = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s, $G = 2,65$, $e = 0,60$

4,5 canais de fluxo.



SOUZA PINTO (2006)

- Determine o fluxo em litros/minutos/m.
- Determine a carga total, carga de elevação e carga de pressão para o ponto 4.
- Determine para o ponto 10 a pressão intersticial.

Resolução 02.26

a)

Canais de fluxo: $N_F = 4,5$; Camadas equipotenciais: $N_D = 12$

Diferença de carga:

$$h = 4 \text{ m}$$

$$k = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Vazão:

$$Q = k \cdot h \cdot \frac{N_F}{N_D} \cdot B$$

Vazão por metro:

$$\frac{Q}{B} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot \frac{4,5}{12} = 4,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}}$$

Vazão por minuto:

$$\frac{Q}{B} = 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 60 = 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3/\text{min}}{\text{m}}$$

b)

Perda de carga por camada equipotencial:

$$h_D = \frac{\Delta h}{N_D} = \frac{4}{12} = 0,33 \text{ m}$$

O ponto 4 está exatamente na 4ª linha equipotencial, portanto:

$$h_4 = 4 - 4 \cdot 0,33 = 2,68 \text{ m}$$

Ponto	Carga altimétrica	Carga de pressão	Carga total
4	- 2 m	h_w	2,68 m

$$h = z + h_w$$

$$h_{w4} = 2,68 - (- 2) = 4,68 \text{ m}$$

c)

Pressão intersticial:

$$p_i = h_w \cdot \gamma_w$$

O ponto 10 está exatamente na 10ª linha equipotencial, portanto:

$$h_{10} = 4 - 10 \cdot 0,33 = 0,67 \text{ m}$$

Ponto	Carga altimétrica	Carga de pressão	Carga total
10	-1,5 m	h_w	0,67 m

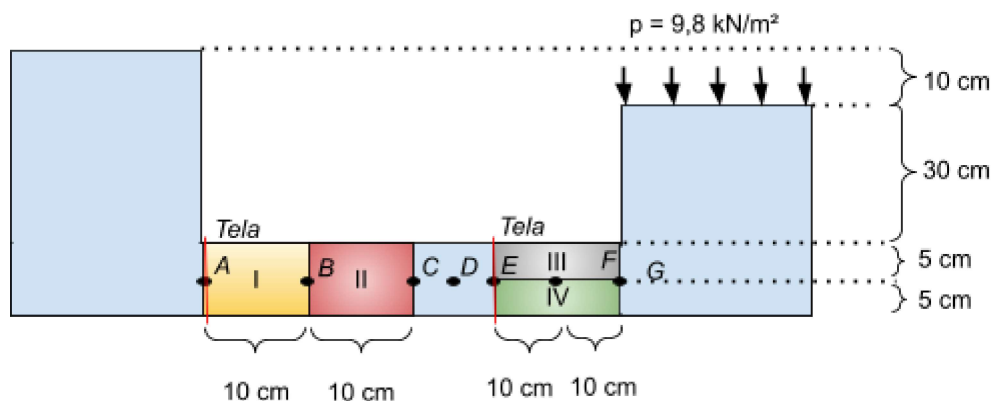
$$h = z + h_w$$

$$h_{w10} = 0,67 - (-1,5) = 2,17 \text{ m}$$

$$p_i = 2,17 \cdot 10 = 21,7 \text{ kN/m}^2$$

Permeabilidade 02.27

Considere o esquema mostrado na figura:



- Determine o coeficiente de permeabilidade do solo 2, sabendo-se que no ponto B a poropressão é igual a $8,5 \text{ kN/m}^2$.
- Qual a força que as telas aplicam sobre os conjuntos (solo 1 + solo 2 e solo 3 + solo 4)

Dados:

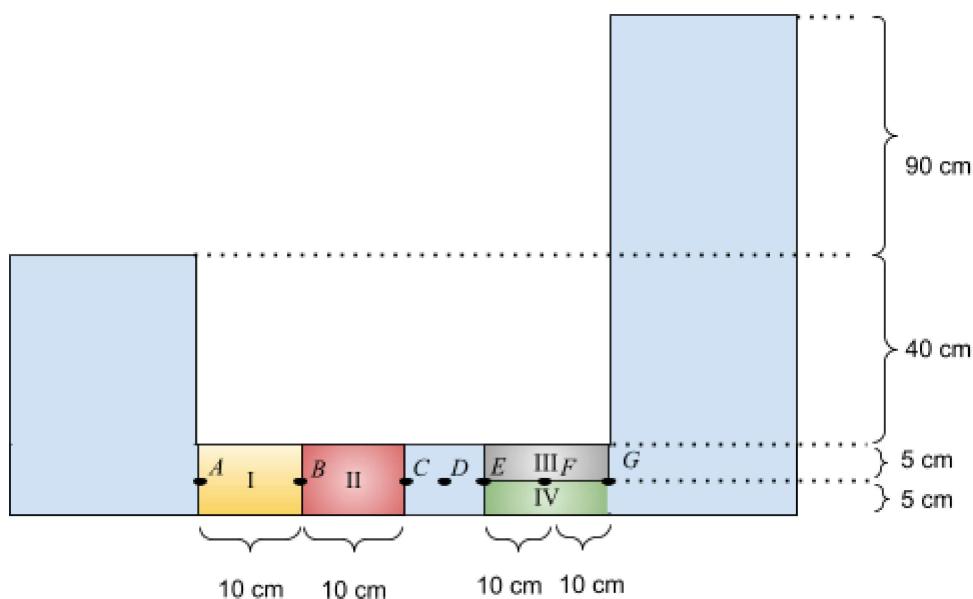
Solo 1:	Solo 2:	Solo 3:	Solo 4:
$A = 100 \text{ cm}^2$	$A = 100 \text{ cm}^2$	$A = 50 \text{ cm}^2$	$A = 50 \text{ cm}^2$
$e = 0,70$	$\gamma_{sub} = 8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	$\gamma_{sub} = 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	$h = 24\%$
$G = 2,72$	$G = 2,65$	$G = 2,60$	$G = 2,75$
$k = 10^{-4} \text{ cm/s}$	$k = ?$	$k = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$	$k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$

Resolução 02.27

a)

Transformando a pressão em coluna da água:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} = \frac{9,8}{9,8} = 1,00 \text{ m}$$



Posicionando a linha de referência 5 cm acima do fundo do solo, tem-se as seguintes informações:

	Ponto A	Ponto B	Ponto E	Ponto G
Carga de pressão	45 cm	$\Delta h \cdot \gamma_w = 8,5 \text{ kPa}$ $\Delta h = 86,64 \text{ cm}$	?	135 cm

Portanto, aplica-se **Darcy** para o trecho I:

$$Q = k \cdot \left(\frac{\Delta h}{L} \right) \cdot A$$

$$Q_I = 10^{-4} \cdot \frac{(86,64 - 45)}{10} \cdot 100 \Rightarrow Q_I = 0,042 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Para camadas dispostas paralelamente ao fluxo, tem-se:

$$Q_I = Q_{III} + Q_{IV}$$

$$0,042 = 6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(h_G - h_E)}{20} \cdot 50 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(h_G - h_E)}{20} \cdot 50$$

$$h_G - h_E = 21 \text{ cm} \Rightarrow 135 - h_E = 21 \text{ cm} \Rightarrow h_E = 114 \text{ cm}$$

$$h_E = h_D = h_C$$

Camadas dispostas perpendicularmente ao fluxo:

$$Q_I = Q_{II} = k_2 \cdot \frac{(h_C - h_B)}{L_2} \cdot A_2$$

$$0,042 = k_2 \cdot \frac{(114 - 86,64)}{10} \cdot 100$$

$$k_2 = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

b)

Cálculo da força nas telas no solo 1 e 2.

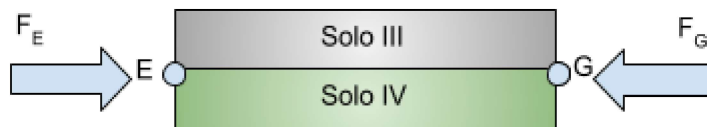


$$F_T = F_C - F_A \Rightarrow F_T = (\Delta h_C \cdot \gamma_W - \Delta h_A \cdot \gamma_W) \cdot A$$

$$F_T = (1,14 \cdot 9810 - 0,45 \cdot 9810) \cdot 0,01$$

$$F_T = 67,689 \text{ N}$$

Cálculo da força nas telas no solo 3 e 4.



$$F_T = F_G - F_E \Rightarrow F_T = (\Delta h_G \cdot \gamma_W - \Delta h_E \cdot \gamma_W) \cdot A$$

Utiliza-se $A = 0,01 \text{ cm}^2$ pois a peneira comprime ambos os solos.

$$F_T = (1,35 \cdot 9810 - 1,14 \cdot 9810) \cdot 0,01$$

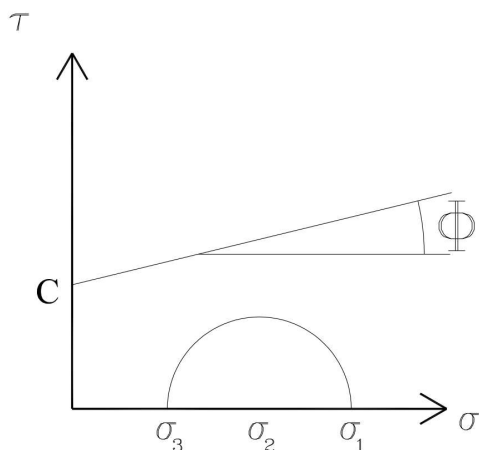
$$F_T = 20,60 \text{ N}$$

Resistência 03.01

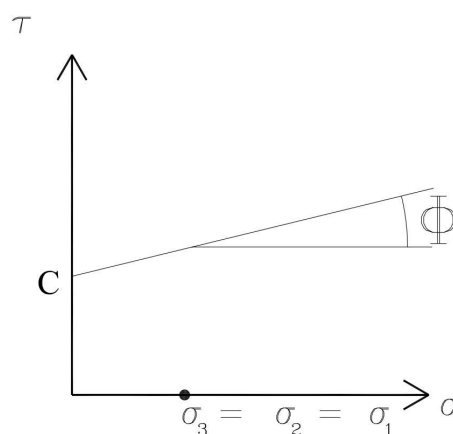
Para a avaliação da resistência ao cisalhamento dos solos emprega-se, comumente, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que consiste na utilização do círculo de Mohr (representando as solicitações - tensões normais e cisalhantes) e de uma envoltória (representando os limites de resistência ao cisalhamento do solo para o plano analisado).

Os esquemas de 1 a 4 ilustram os círculos de Mohr e as envoltórias para quatro diferentes estados de tensão em um ponto de uma massa de solo. Nos esquemas, C representa a coesão do solo, ϕ é o ângulo de atrito, σ representa as tensões normais (sendo σ_1 a tensão principal maior, σ_2 a tensão principal intermediária e σ_3 a tensão principal menor) e τ representa as tensões cisalhantes.

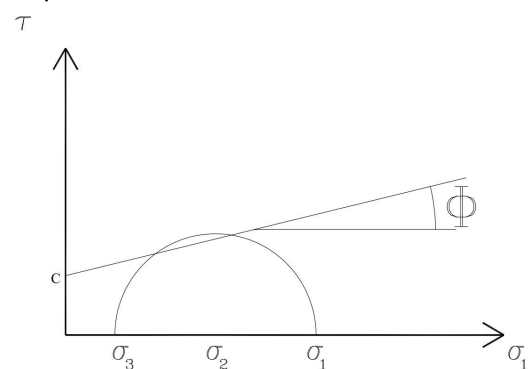
Esquema 1:



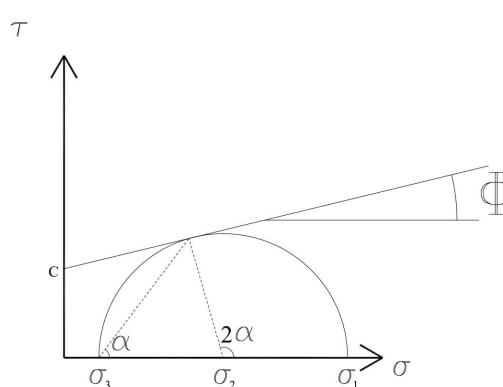
Esquema 3:



Esquema 2:



Esquema 4:

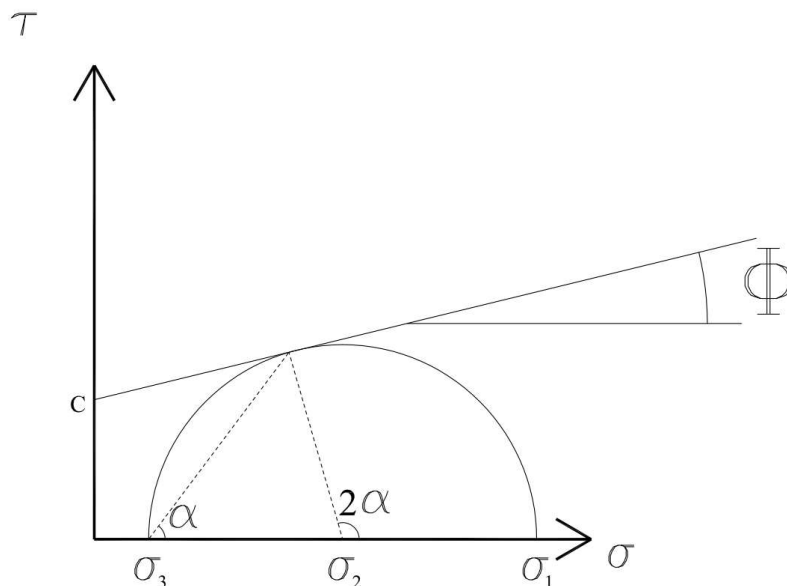


A respeito dos esquemas, avalie as afirmações a seguir:

- I. O esquema 4 corresponde a uma amostra de solo que se encontra submetida somente a uma pressão hidrostática e, nesse estado, a tensão de cisalhamento é nula.
- II. O esquema 2 corresponde a um estado de tensões impossível de acontecer pois antes de atingir-se este estado de tensões o solo romperia em vários planos, isto é, existiriam planos onde as tensões cisalhantes seriam superiores à resistência ao cisalhamento do solo.
- III. O esquema 3 corresponde a uma amostra de solo que se encontra submetida a uma tensão cisalhante inferior a sua resistência ao cisalhamento.
- IV. O esquema 4 corresponde a uma amostra de solo que atingiu a resistência ao cisalhamento em um plano que forma um ângulo α com o plano de tensão principal maior e, por essa razão, ocorreu a ruptura.

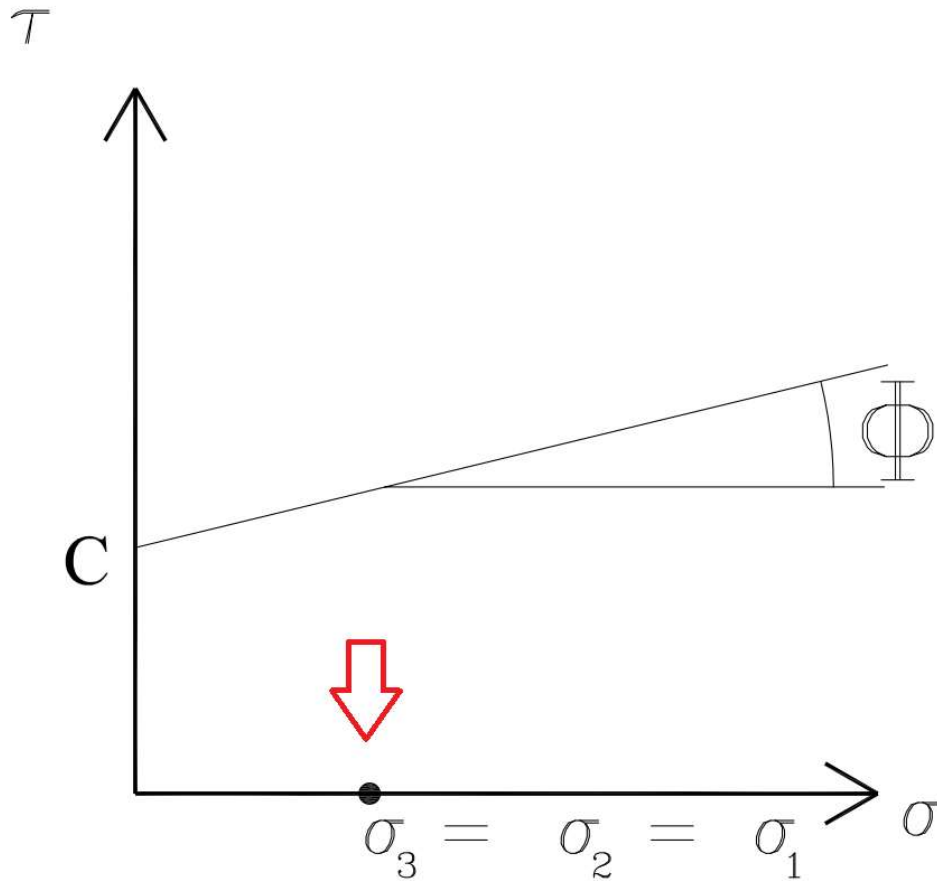
Resolução 03.01

- I. “O esquema 4 corresponde a uma amostra de solo que se encontra submetida somente a uma pressão hidrostática e, nesse estado, a tensão de cisalhamento é nula.”



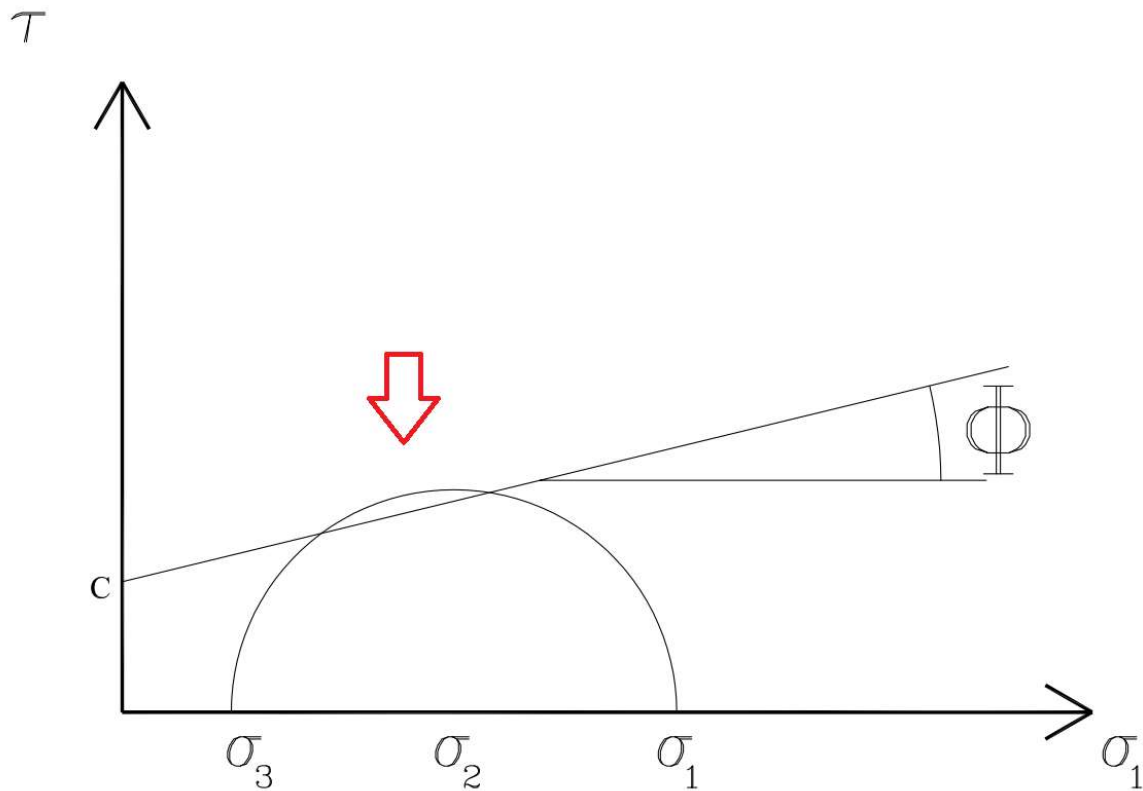
O círculo representa a composição das tensões normais e cisalhantes durante o ensaio. Basta verificar que há pontos do círculo em que a tensão cisalhante τ difere de 0 para concluir que a amostra de solo é submetida sim a tensões de cisalhamento.

Quando houver apenas a pressão hidrostática, o círculo de Mohr será composto apenas pela tensão principal menor σ_3 . Assim, o círculo se reduziria a um ponto único, como no caso do Esquema 3:



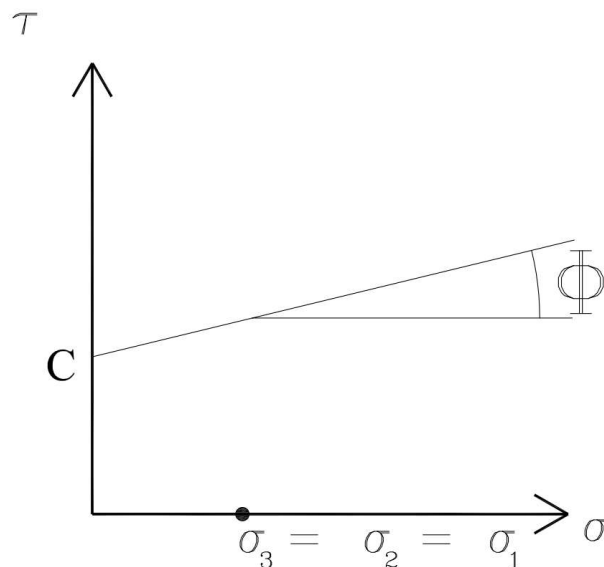
Portanto, a alternativa I está **incorreta**.

II. “O esquema 2 corresponde a um estado de tensões impossível de acontecer pois antes de atingir-se este estado de tensões o solo romperia em vários planos, isto é, existiriam planos onde as tensões cisalhantes seriam superiores à resistência ao cisalhamento do solo.”



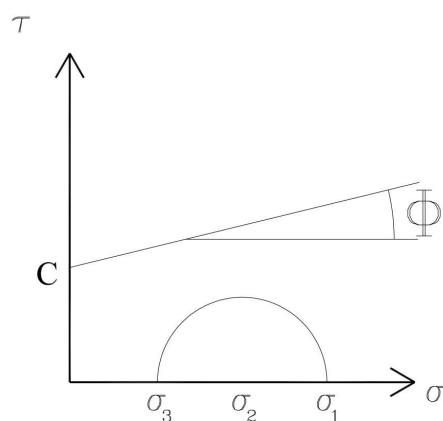
Percebe-se que o círculo foi desenhado com trechos que superam a reta. É impossível o solo ser solicitado a tensões (representadas pelo círculo) maiores que sua resistência ao cisalhamento (representada pela reta), portanto a **afirmativa II está correta**.

III. “O esquema 3 corresponde a uma amostra de solo que se encontra submetida a uma tensão cisalhante inferior a sua resistência ao cisalhamento.”



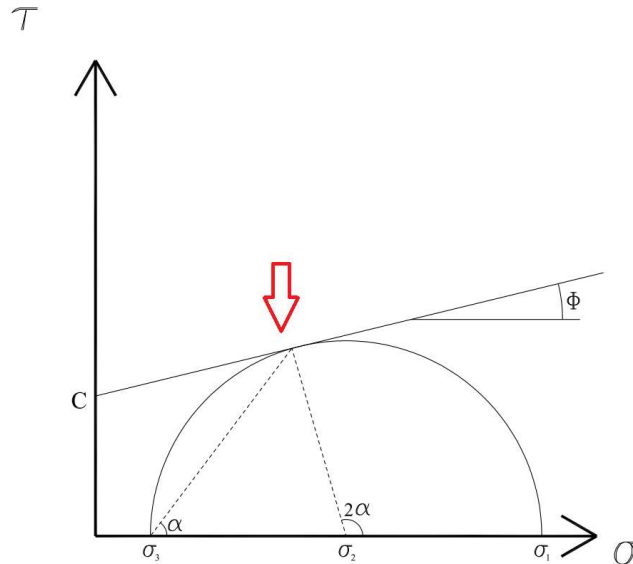
A amostra de solo não está submetida a quaisquer tensões cisalhantes ($\tau = 0 \forall \sigma$ - tensão cisalhante nula para todo valor de tensão normal). Verifica-se que a tensão desviadora σ_d é nula, resultando na tensão principal maior σ_1 igual à tensão principal menor σ_3 .

O Esquema 1 apresenta um caso em que ocorre o afirmado, com o círculo inteiramente abaixo da linha de resistência ao cisalhamento:



Deste modo, a **alternativa III está incorreta.**

IV. “O esquema 4 corresponde a uma amostra de solo que atingiu a resistência ao cisalhamento em um plano que forma um ângulo com o plano de tensão principal maior e, por essa razão, ocorreu a ruptura.”



Como a envoltória de ruptura tangencia o círculo de Mohr, a ruptura em si ocorre no ponto de encontro, indicado na figura.

Assim, a **alternativa IV está correta.**

Resistência 03.02

Sabendo que as tensões principais atuantes em um elemento de solo são 65 e 300 kPa:

- a) Determine as tensões que atuam em um plano que determina um ângulo de 30° com a inclinação do plano principal maior.
- b) Determine a inclinação e a tensão cisalhante atuante em um plano em que a tensão normal é de 280 kPa.
- c) Determine o(s) plano(s) em que ocorre uma tensão cisalhante de 35 kPa e a(s) tensão(ões) normal(is) nesse plano.

Resolução 03.02

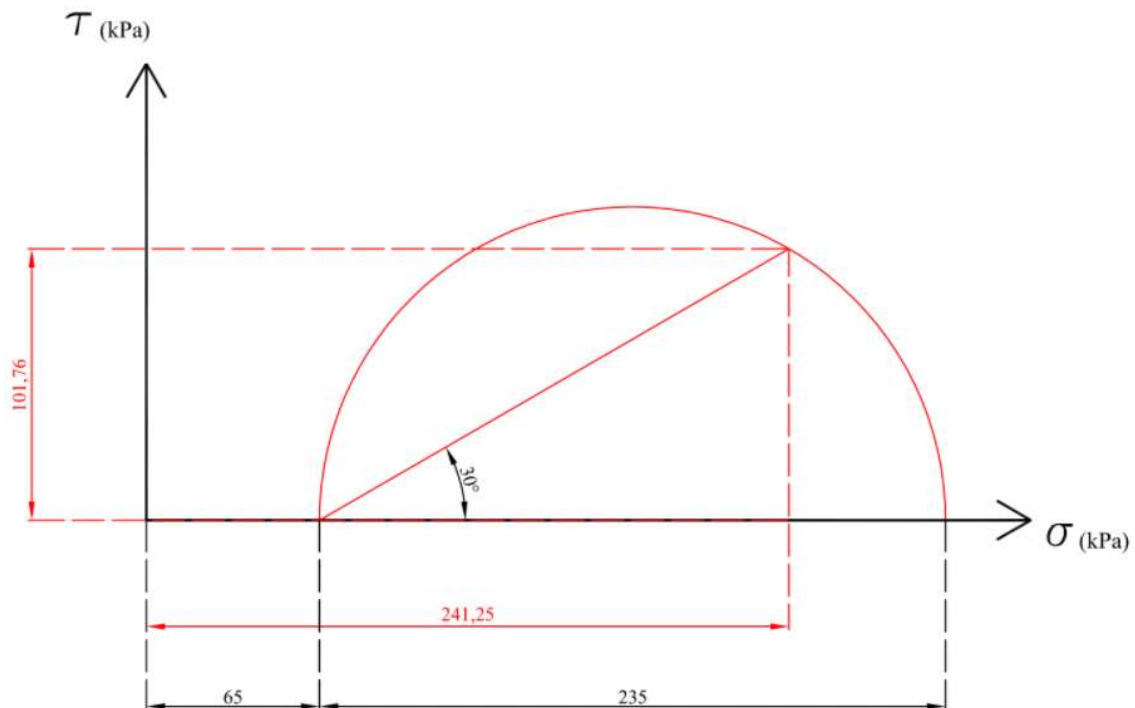
a)

- 1) Traçam-se as tensões principais no eixo horizontal:

$$\sigma_3 = 65 \text{ kPa} \text{ e } \sigma_1 = 300 \text{ kPa} \quad (65 + 235)$$

- 2) Traça-se a semicircunferência com centro em $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$.

- 3) Traça-se o plano cuja inclinação em relação ao plano principal maior é 30° (não confundir com o ângulo de atrito!).



4) A componente **vertical** do ponto de interseção entre o plano e a circunferência representa a **tensão cisalhante** e a componente **horizontal** representa a **tensão normal**.

5) Portanto, as tensões atuantes no plano para $\theta = 30^\circ$ são:

$$\sigma = 241,25 \text{ kPa} \text{ e } \tau = 101,76 \text{ kPa}$$

b)

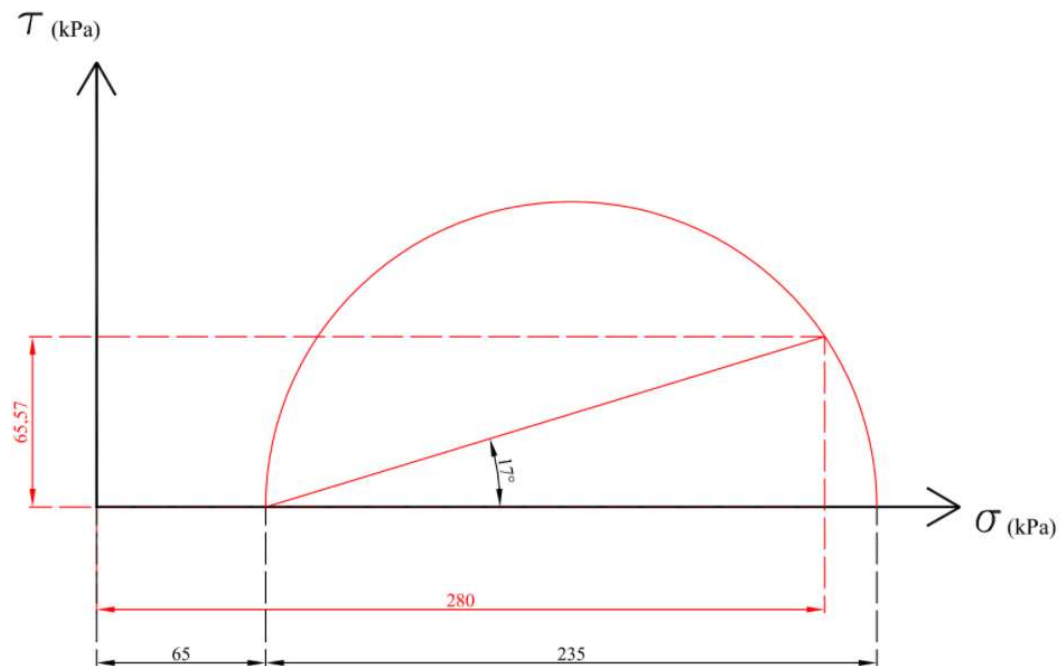
1) Traçam-se as tensões principais no eixo horizontal:

$$\sigma_3 = 65 \text{ kPa} \text{ e } \sigma_1 = 300 \text{ kPa}$$

2) Traça-se a semicircunferência com centro em $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$.

3) Traça-se 280 kPa no eixo horizontal (tensão normal).

4) Liga-se o começo da circunferência até o local que coincide com a tensão normal de 280 kPa e descobre-se a inclinação do plano de ruptura com a horizontal.



5) Projeta-se este traço no eixo vertical e determina-se a tensão de cisalhamento para aquele plano específico.

6) A tensão cisalhante é $\tau \approx 65,5$ kPa e o ângulo de ruptura é $\alpha \approx 17^\circ$.

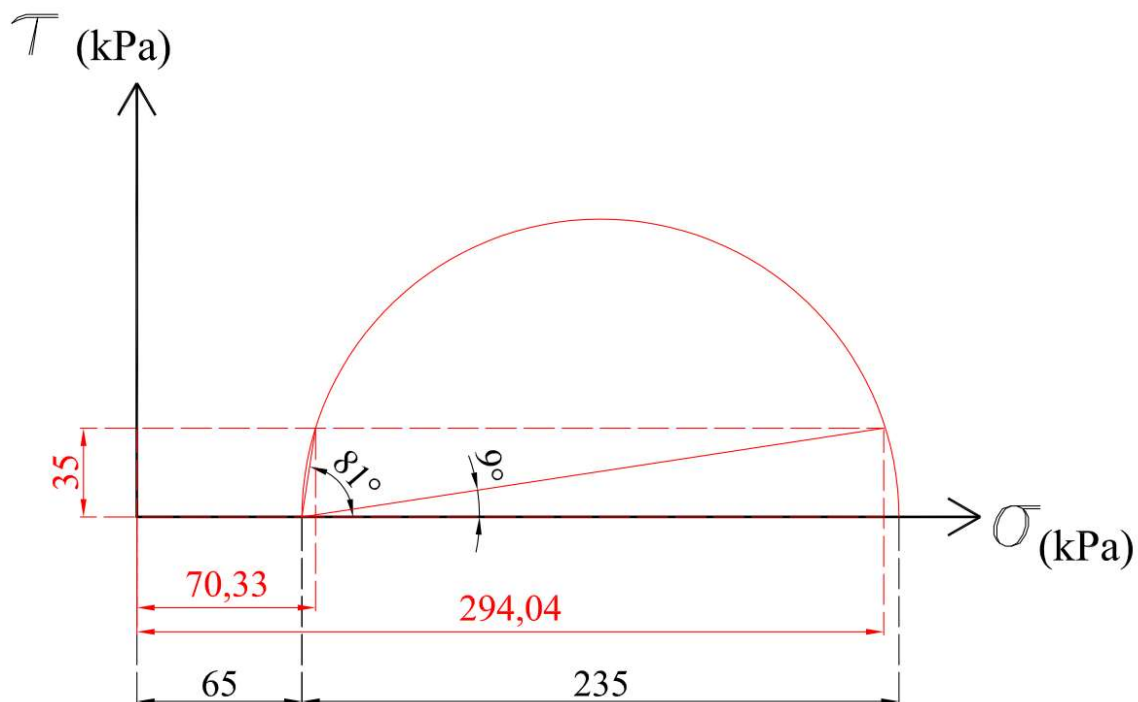
c)

1) Traçam-se as tensões principais no eixo horizontal:

$$\sigma_3 = 65 \text{ kPa} \text{ e } \sigma_1 = 280 \text{ kPa}$$

2) Traça-se a semicircunferência com centro em $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$;

3) Traça-se $\tau = 35$ kPa no eixo vertical e prolonga-se este valor para a semicircunferência.



- 4) Projetam-se estas distâncias no eixo horizontal e tem-se os valores de tensão normal $\sigma_a = 70 \text{ kPa}$ e $\sigma_b = 295 \text{ kPa}$ para a tensão cisalhante $\tau = 35 \text{ kPa}$.
- 5) Liga-se o ponto σ_b ao ponto de interseção entre a circunferência e a projeção vertical e determina-se o valor do ângulo $\theta_a = 81^\circ$ e do $\theta_b = 9^\circ$.

Resistência 03.03

Em um plano dentro de uma massa de solo, a tensão normal total atuante é igual a 120 kPa. Considerando que a coesão efetiva é 20 kPa, que o ângulo de atrito interno efetivo é 30° , e que a máxima tensão cisalhante admissível nesse plano é, aproximadamente, 49 kPa, determine o valor da poropressão atuante nesse plano.

Resolução 03.03

Dados do exercício:

$$\tau = 49 \text{ kPa} \mid c = 20 \text{ kPa} \mid \Phi = 30^\circ \mid \sigma = 120 \text{ kPa}$$

Equação de Coulomb (parâmetros efetivos):

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\Phi') \Rightarrow 49 = 20 + \sigma' \cdot \tan(30^\circ)$$

$$\sigma' = 50 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \sigma' + u$$

$$120 = 50 + u$$

$$u = 70 \text{ kPa}$$

Resistência 03.04

Sabe-se que a resistência ao cisalhamento de um maciço de argila é definida por $\tau = 150$ kPa, obtida por meio de um ensaio de compressão simples em um corpo de prova indeformado desta argila.

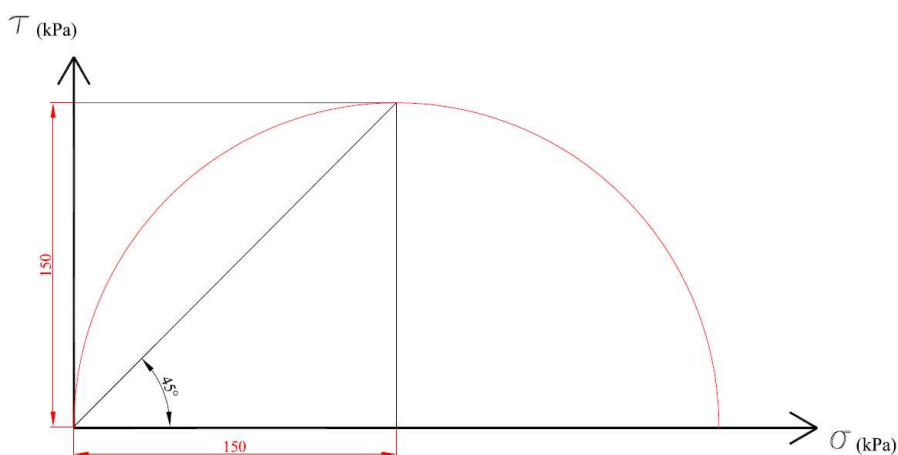
Com base nesses dados, avalie as afirmações a seguir.

- I. As direções dos planos de ruptura (ângulo entre a horizontal e os planos de ruptura) são $+45^\circ$ e -45° .
- II. As tensões atuantes em um plano que forma um ângulo de 18° com a horizontal são $\sigma \approx 270$ kPa e $\tau \approx 90$ kgf/cm².
- III. As tensões atuantes em um plano que forma um ângulo de 45° com a horizontal são $\sigma \approx 210$ kPa e $\tau \approx 140$ kgf/cm².
- IV. A equação de resistência definida por esse ensaio representa o plano de maior fraqueza do solo.
- V. As tensões atuantes num plano que forma um ângulo de 18° com a horizontal são $\sigma \approx 300$ kPa e $\tau \approx 0$ kgf/cm².

Resolução 03.04

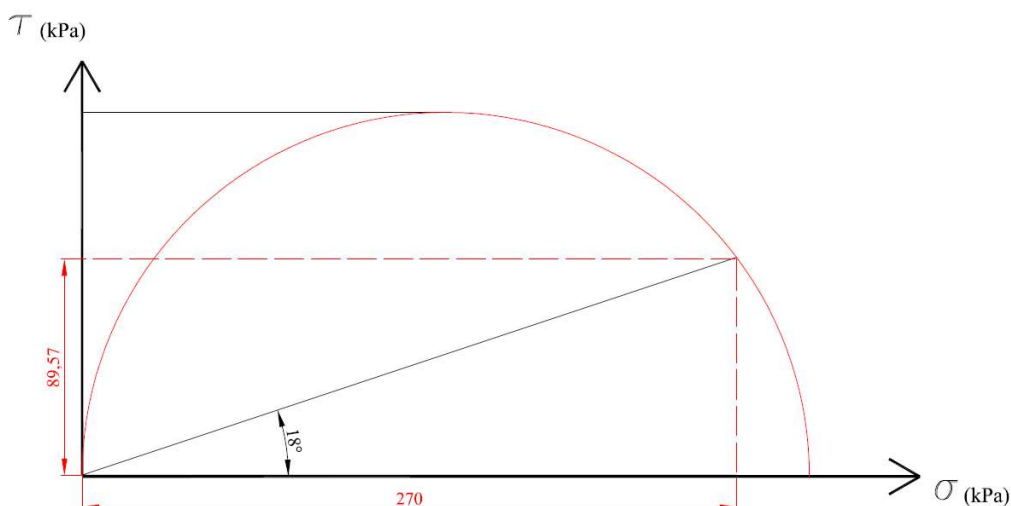
- 1) “As direções dos planos de ruptura (ângulo entre a horizontal e os planos de ruptura) são $+45^\circ$ e -45° .”

Para o ensaio de compressão simples, não há tensão de confinamento. O ângulo formado entre o plano de ruptura e o plano horizontal é obtido traçando uma reta entre a tensão principal menor σ_3 e o ponto de ruptura $\tau = 150$ kPa.



O ângulo pode ser rebatido para baixo, juntamente com a semicircunferência, devido à simetria do ensaio. Portanto, a **alternativa I está correta.**

- 2) “As tensões atuantes em um plano que forma um ângulo de 18° com a horizontal são $\sigma \approx 270$ kPa e $\tau \approx 90$ kgf/cm².”



A alternativa II está **correta.**

3) “As tensões atuantes em um plano que forma um ângulo de 45° com a horizontal são $\sigma \approx 210$ kPa e $\tau \approx 140$ kgf/cm².”

Para o ângulo de 45° , tem-se $\sigma = 150$ kPa e $\tau = 150$ kPa, portanto a alternativa III está incorreta.

4) “A equação de resistência definida por esse ensaio representa o plano de maior fraqueza do solo.”

O ensaio de compressão simples traz resultados inconclusivos, pois a consideração da tensão confinante nula ($\sigma_3 = 0$) não é observada em campo (o solo sempre terá confinamento horizontal). Portanto, a alternativa IV está incorreta.

5) “As tensões atuantes num plano que forma um ângulo de 18° com a horizontal são $\sigma \approx 300$ kPa e $\tau \approx 0$ kgf/cm².”

Para $\alpha = 18^\circ$, tem-se $\sigma = 270$ kPa e $\tau = 90$ kPa, portanto a alternativa V está **incorreta**.

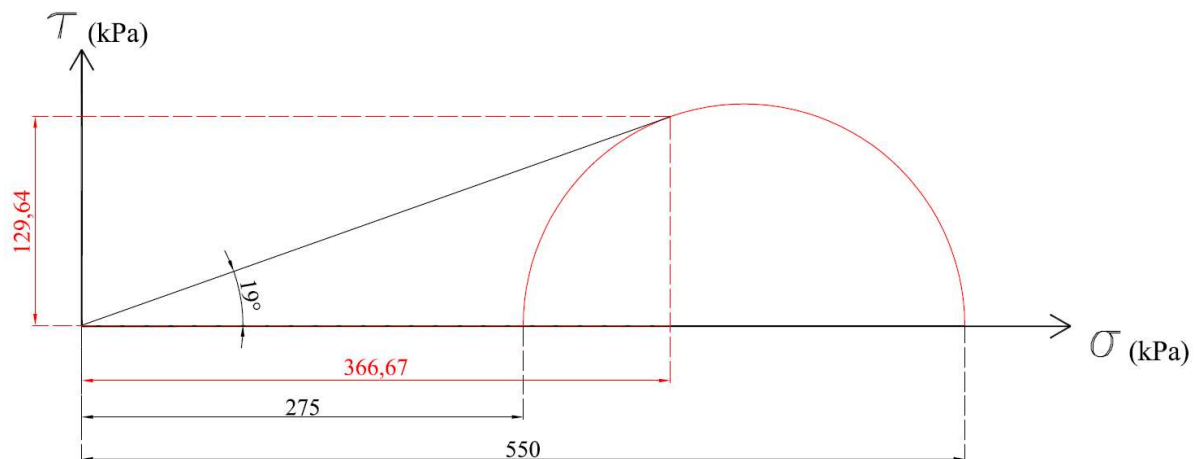
Resistência 03.05

Um ensaio triaxial drenado foi realizado em uma amostra de solo que rompeu com tensões efetivas principais maior e menor de 550 kPa e 275 kPa, respectivamente. O ensaio permitiu definir que o ângulo de atrito do material era de $19,5^\circ$ e a coesão era nula (argila normalmente adensada).

- a) Calcule a tensão normal efetiva e a tensão de cisalhamento no plano de ruptura.
- b) Calcule a tensão normal efetiva no plano de tensão de cisalhamento máximo.

Resolução 03.05

- 1) Traçam-se as tensões principais no eixo horizontal $\sigma_3 = 275$ kPa e $\sigma_1 = 550$ kPa.
- 2) Traça-se a semicircunferência com centro em $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$.
- 3) Traça-se o envoltório de ruptura com base na informação dada (coesão nula e ângulo de atrito do solo de $19,5^\circ$)



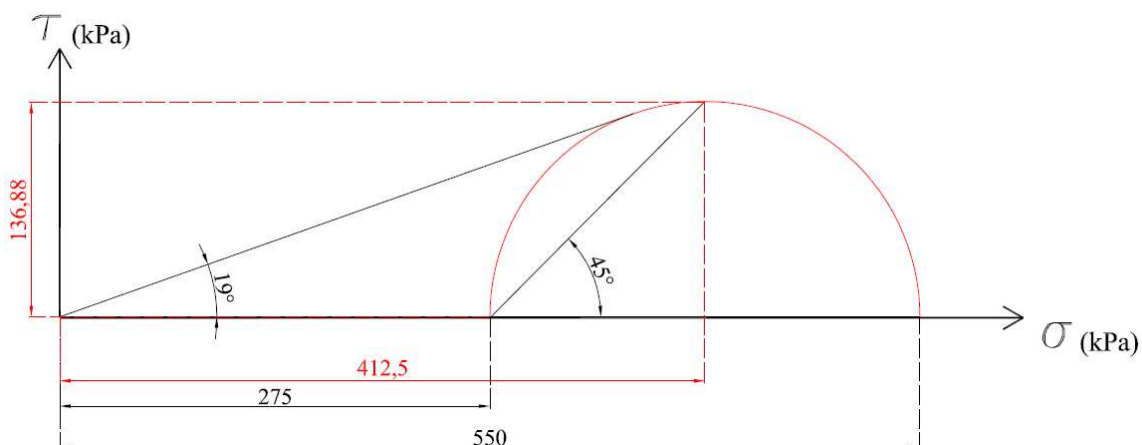
4) Onde o envoltório de ruptura intercepta o círculo de Mohr, projeta-se a distância no eixo vertical e horizontal e obtém-se que $\tau = 129,6$ kPa e $\sigma = 366,7$ kPa. Estes são os valores de tensão normal e de cisalhamento para a ruptura do solo.

b)

1) Traçam-se as tensões principais no eixo horizontal $\sigma_3 = 275$ kPa e $\sigma_1 = 550$ kPa.

2) Traça-se a semicircunferência com centro em $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$.

3) Traça-se a envoltória de ruptura com base na informação dada (coesão nula e ângulo de atrito do solo de $19,5^\circ$)



4) Traça-se a linha que define a tensão de cisalhamento máxima, partindo da tensão principal menor com ângulo $\alpha = 45^\circ$.

5) Projeta-se esta linha no eixo vertical e determina-se a tensão cisalhante $\tau = 136,9$ kPa e a tensão normal $\sigma = 412,5$ kPa.

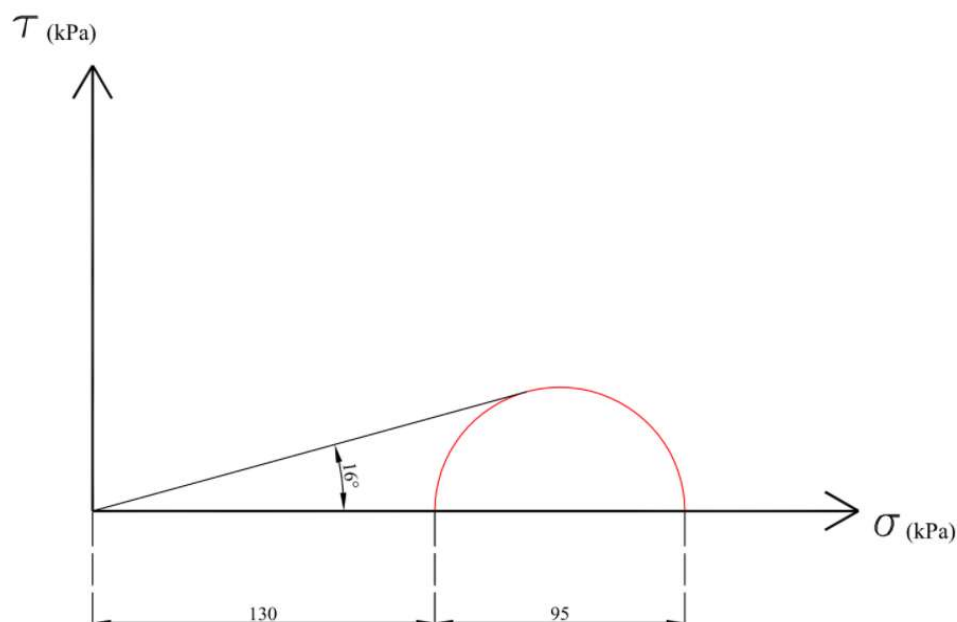
Resistência 03.06

Um corpo de prova de areia saturada foi adensado sob uma pressão de confinamento de 130 kPa. A tensão axial foi então aumentada e a drenagem impedida. O corpo de prova rompeu-se com uma tensão desviadora axial de 95 kPa. A poropressão no momento da ruptura foi de 80 kPa.

- a) Determine o ângulo de atrito não drenado de resistência ao cisalhamento.
- b) Determine o ângulo de atrito drenado.

Resolução 03.06

- a)
 - 1) Traça-se a tensão principal menor $\sigma_3 = 130$ kPa.
 - 2) A partir deste ponto, traça-se a tensão desviadora de 95 kPa.
 - 3) Traça-se a semicircunferência com centro em $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$.
 - 4) Se trata de uma areia, portanto a coesão é praticamente nula.
 - 5) Traça-se, partindo da origem, o envoltório de ruptura do solo, tangente ao círculo de Mohr.



- 6) Tem-se que o ângulo de atrito do solo é de 16° .

b)

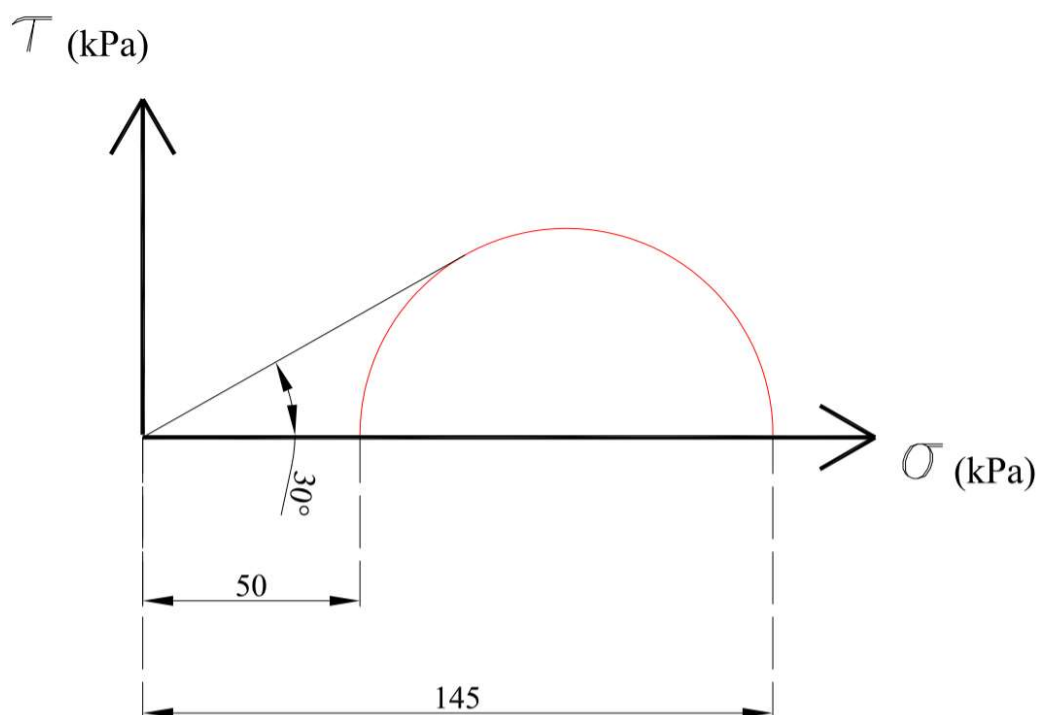
- 1) A partir da tensão principal maior ($\sigma_1 = 130 + 95 = 225$ kPa), subtrai-se 80 kPa (poropressão no momento de ruptura):

$$\sigma'_1 = 225 - 80 = 145 \text{ kPa}$$

- 2) Subtrai-se deste valor a tensão desviador:

$$\sigma'_3 = 145 - 95 = 50 \text{ kPa}$$

- 3) Se trata de uma areia, portanto a coesão é praticamente nula.
- 4) Traça-se, partindo da origem, o envoltório de ruptura do solo, tangente ao círculo de Mohr.



- 5) Tem-se que o ângulo de atrito para o solo drenado é 30°.

Resistência 03.07

Dois ensaios de cisalhamento direto foram realizados com uma areia, obtendo-se os seguintes resultados:

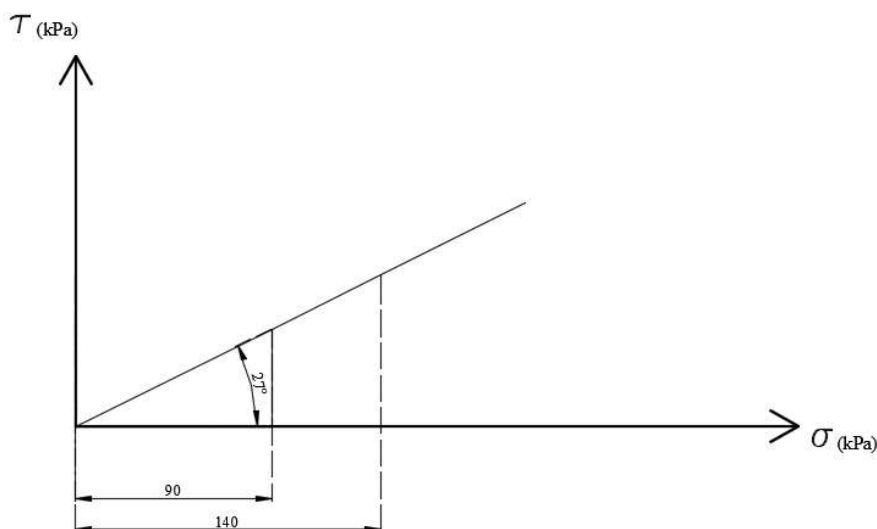
Ensaio 1: Tensão Normal igual a 90 kPa e Tensão Cisalhante na ruptura igual a 45 kPa;

Ensaio 2: Tensão Normal igual a 140 kPa e Tensão Cisalhante na ruptura igual a 70 kPa.

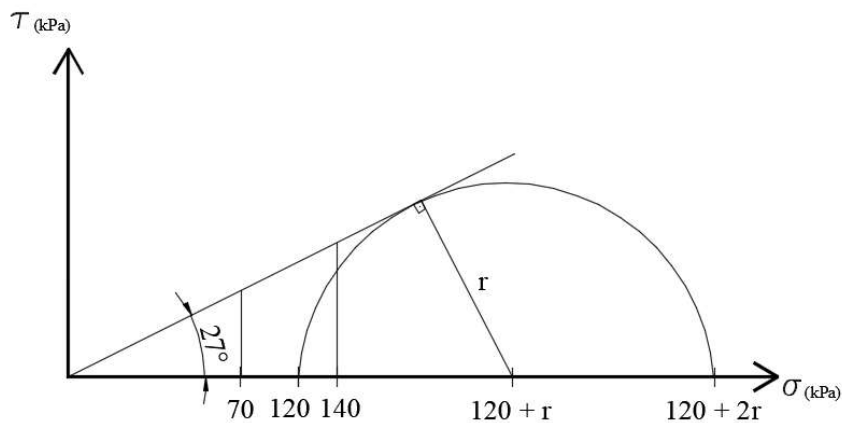
Em um ensaio de compressão triaxial drenado com essa areia com mesma compacidade e com tensão confinante de 120 kPa, com que tensão desviadora deverá ocorrer a ruptura?

Resolução 03.07

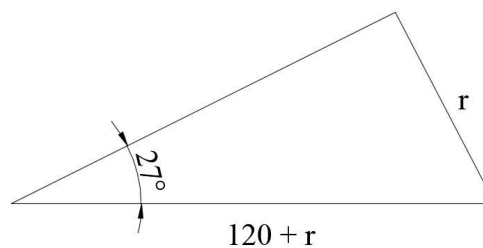
Com os dados de ensaios de cisalhamento direto traça-se a envoltória de ruptura e determina-se o ângulo de atrito:



Com o valor da tensão confinante, determina-se o início do traçado do círculo de Mohr (trata-se da tensão principal menor σ_3). Não se tem o raio da circunferência, então esboça-se um desenho e indica-se o que se sabe (a circunferência deve tangenciar a reta traçada).



Por trigonometria, determina-se o raio r :



$$\sin 27^\circ = \frac{r}{120+r}$$

$$0,45 \approx \frac{r}{120+r}$$

$$r = (120 + r) \cdot 0,45 \approx 54 + 0,45 r$$

$$r - 0,45 r \approx 54$$

$$r \approx 98$$

A tensão desviadora σ_d é o diâmetro do círculo de Mohr (igual à diferença entre as tensões principais maior σ_1 e menor σ_3), sendo portanto igual a $2r$:

$$\sigma_d = 2r = 2 \cdot 98$$

$$\sigma_d \approx 196 \text{ kPa}$$

Resistência 03.08

Dois ensaios de compressão triaxial foram realizados com uma areia obtendo-se os seguintes resultados:

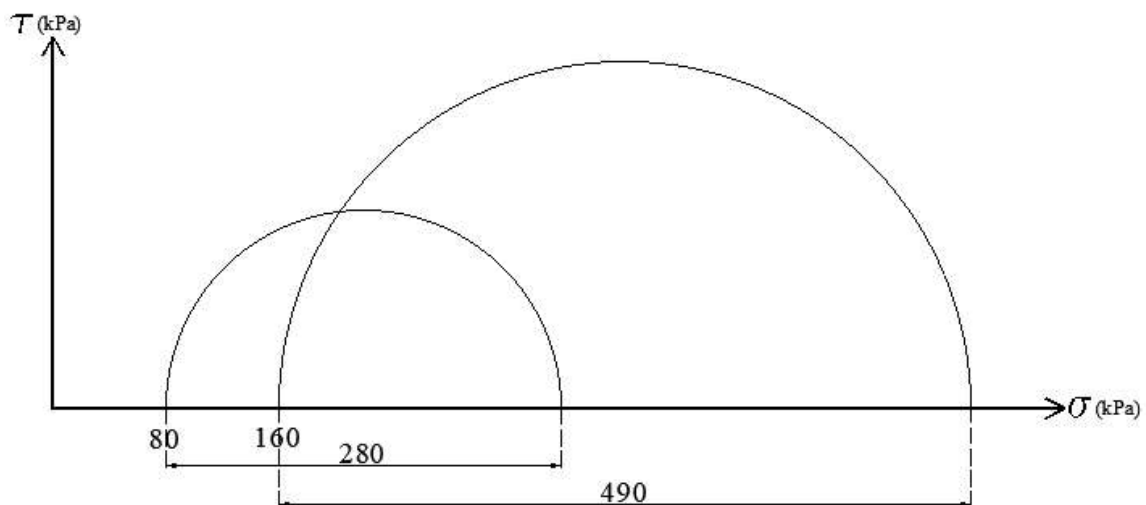
Ensaio 1: tensão confinante = 80 kPa; tensão desviadora na ruptura = 280 kPa

Ensaio 2: tensão confinante = 160 kPa; tensão desviadora na ruptura = 490 kPa

Com que tensão de cisalhamento deve ocorrer a ruptura em um ensaio de cisalhamento direto nessa mesma areia, com a mesma compacidade, ao se aplicar uma tensão normal de 250 kPa?

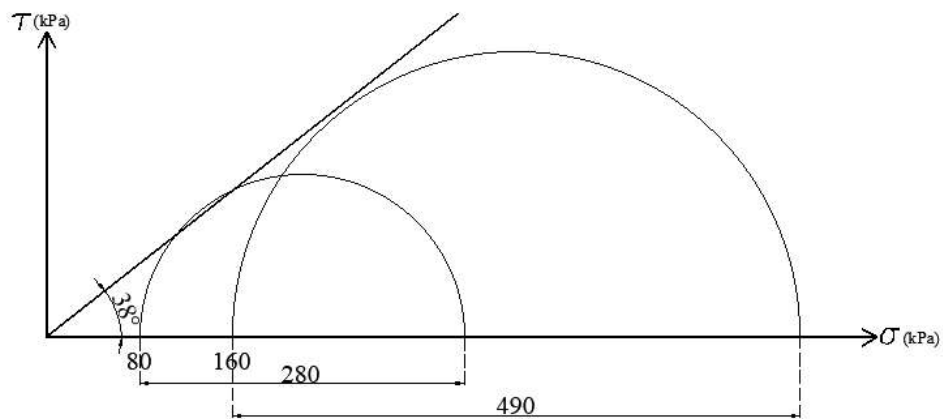
Resolução 03.08

Inicialmente, traçam-se os círculos de Mohr para os dois ensaios:



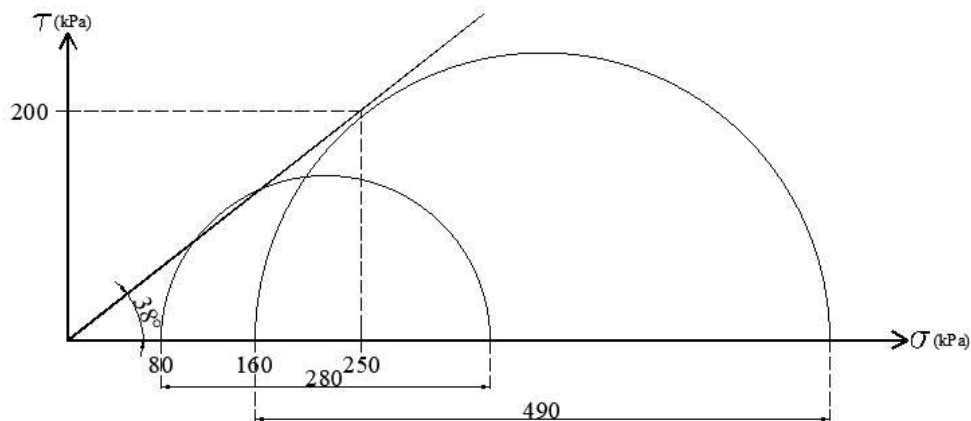
Ao se tratar de uma areia, considera-se a coesão como nula, portanto a envoltória de ruptura deverá passar pela origem dos eixos.

Traça-se a envoltória com a reta aproximadamente tangente aos dois círculos de Mohr, verificando-se o ângulo de atrito:



Há duas possibilidades de determinar a tensão cisalhante requisitada:

- 1) Traçar no gráfico a tensão normal 250 kPa e verificar no eixo vertical o valor da cisalhante:



$$\tau \approx 200 \text{ kPa}$$

- 2) Formular a Lei de Coulomb e aplicar a equação que relaciona as tensões normal e cisalhante:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi)$$

$$\tau = 0 + 250 \cdot \tan(38^\circ)$$

$$\tau \approx 195 \text{ kPa}$$

Resistência 03.09

Quatro ensaios de cisalhamento direto foram realizados em um solo seco e arenoso a partir de amostras de 50 mm x 50 mm x 19 mm. Os resultados obtidos foram:

Ensaio 1: força normal 90 N e cisalhamento na ruptura 45 N;

Ensaio 2: força normal 140 N e cisalhamento na ruptura 80 N;

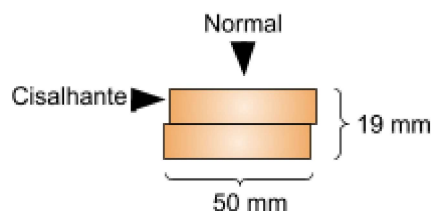
Ensaio 3: força normal 320 N e cisalhamento na ruptura 180 N;

Ensaio 4: força normal 450 N e cisalhamento na ruptura 260 N.

- Qual o valor da coesão efetiva do solo?
- Qual o valor do ângulo de atrito efetivo do solo?

Resolução 03.09

- e
- Esquema do ensaio:



Obtêm-se as tensões a partir dos esforços (N→ σ , τ):

$$\sigma = \frac{F}{A}; \tau = \frac{F}{A}$$

$$\text{Ensaio 1: } \sigma_1 = \frac{90}{0,05 \cdot 0,05} = 36.000 \text{ Pa} = 36 \text{ kPa}$$

$$\tau_1 = \frac{45}{0,05 \cdot 0,05} = 18.000 \text{ Pa} = 18 \text{ kPa}$$

$$\text{Ensaio 2: } \sigma_2 = \frac{140}{0,05 \cdot 0,05} = 56.000 \text{ Pa} = 56 \text{ kPa}$$

$$\tau_2 = \frac{80}{0,05 \cdot 0,05} = 32.000 \text{ Pa} = 32 \text{ kPa}$$

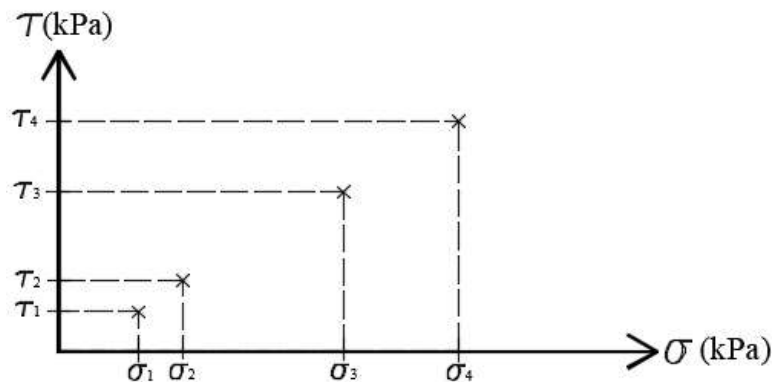
$$\text{Ensaio 3: } \sigma_3 = \frac{320}{0,05 \cdot 0,05} = 128.000 \text{ Pa} = 128 \text{ kPa}$$

$$\tau_3 = \frac{180}{0,05 \cdot 0,05} = 72.000 \text{ Pa} = 72 \text{ kPa}$$

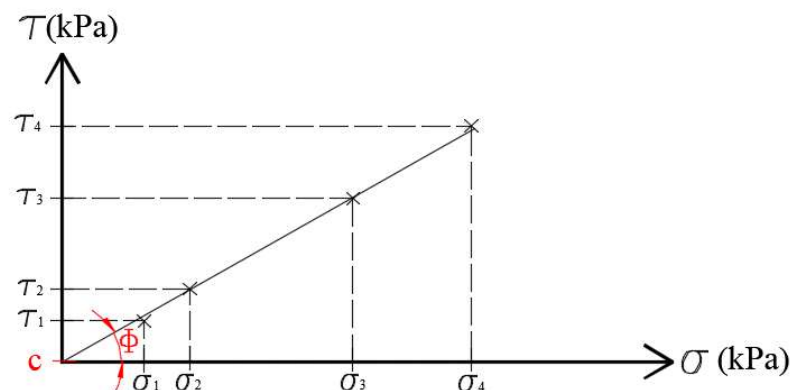
$$\text{Ensaio 4: } \sigma_4 = \frac{450}{0,05 \cdot 0,05} = 180.000 \text{ Pa} = 180 \text{ kPa}$$

$$\tau_4 = \frac{260}{0,05 \cdot 0,05} = 104.000 \text{ Pa} = 104 \text{ kPa}$$

Com os valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto, traçam-se os pontos de tensão normal e tensão cisalhante:



Traça-se uma reta que se ajuste da melhor forma a todos os pontos, determinando os valores do ângulo de atrito (Φ) de coesão (c):



De acordo com o gráfico:

$$c \approx 0 \text{ e } \Phi \approx 30^\circ$$

Resistência 03.10

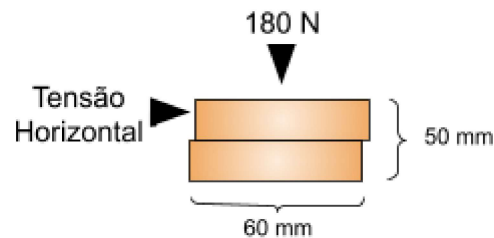
Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em um solo arenoso e são apresentados os valores de deslocamento horizontal, vertical, e carga horizontal a cada instante do ensaio. Com base nas informações desses ensaios, trace as curvas tensão x deformação e envoltórias de ruptura das 6 amostras avaliadas (3 no estado fofo e 3 no estado denso). Além disso, determine os ângulos de atrito de pico e de estado crítico para a areia no estado denso e no estado fofo.

CONDIÇÕES DAS AMOSTRAS	
Altura inicial	60 mm
Largura inicial	50 mm

CONDIÇÕES INICIAIS DOS ENSAIOS		
ENSAIO	ESTADO DA AMOSTRA	CARGA NORMAL
1	Fofa	180 N
2	Fofa	360 N
3	Fofa	650 N
4	Densa	180 N
5	Densa	360 N
6	Densa	650 N

Resolução 03.10

ENSAIO 1:



Tem-se que a área transversal, utilizada para fins de cálculo tanto da tensão normal quanto da tensão cisalhante, é:

$$A = 0,60 \cdot 0,60 = 0,0036 \text{ m}^2$$

A tensão normal aplicada, portanto, é:

$$\sigma = \frac{180}{0,0036} = 50.000 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 50 \text{ kPa}$$

A amostra encontra-se no estado fofo.

DADOS DO ENSAIO 1:

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
1	0.000	0.000	0.000	48	1.274	-0.162	86.221
2	-0.012	0.012	1.198	49	1.298	-0.175	87.897
3	-0.012	0.012	2.635	50	1.335	-0.162	89.574
4	0.000	0.000	11.017	51	1.372	-0.175	90.292
5	0.024	-0.012	17.723	52	1.396	-0.175	91.490
6	0.037	-0.012	22.034	53	1.433	-0.175	92.208
7	0.049	0.000	20.358	54	1.458	-0.175	92.927
8	0.073	-0.012	27.782	55	1.494	-0.175	93.885
9	0.086	-0.012	32.093	56	1.519	-0.162	94.843
10	0.122	-0.025	36.165	57	1.556	-0.187	96.280
11	0.147	-0.025	39.997	58	1.580	-0.175	96.280
12	0.159	-0.025	42.871	59	1.617	-0.175	97.477
13	0.196	-0.037	45.266	60	1.641	-0.187	98.196
14	0.233	-0.037	48.140	61	1.666	-0.175	99.154
15	0.257	-0.050	50.774	62	1.690	-0.175	99.633
16	0.294	-0.050	53.169	63	1.751	-0.187	99.872
17	0.331	-0.062	55.564	64	1.764	-0.187	100.112
18	0.367	-0.062	56.043	65	1.788	-0.187	99.154
19	0.392	-0.062	58.438	66	1.825	-0.187	99.154
20	0.404	-0.075	60.354	67	1.849	-0.187	100.112
21	0.453	-0.075	61.313	68	1.886	-0.200	101.070
22	0.478	-0.087	62.989	69	1.923	-0.187	102.028
23	0.514	-0.100	64.905	70	1.960	-0.200	102.746
24	0.563	-0.087	66.103	71	1.972	-0.187	102.746
25	0.563	-0.100	68.019	72	2.009	-0.200	102.507
26	0.600	-0.100	69.695	73	2.033	-0.187	102.507
27	0.637	-0.100	70.653	74	2.058	-0.200	102.507
28	0.674	-0.112	72.569	75	2.082	-0.200	102.986
29	0.698	-0.112	74.006	76	2.131	-0.200	102.507
30	0.747	-0.112	73.288	77	2.143	-0.187	102.507
31	0.772	-0.125	72.330	78	2.192	-0.187	102.986
32	0.784	-0.137	74.964	79	2.217	-0.200	103.225
33	0.808	-0.112	75.922	80	2.229	-0.187	103.944
34	0.845	-0.137	76.880	81	2.266	-0.200	103.465
35	0.882	-0.137	78.317	82	2.303	-0.200	103.944
36	0.919	-0.137	79.036	83	2.339	-0.187	103.944
37	0.955	-0.137	79.515	84	2.339	-0.200	104.423
38	0.968	-0.150	80.952	85	2.388	-0.187	104.662
39	1.004	-0.150	81.431	86	2.401	-0.200	104.183
40	1.029	-0.137	82.149	87	2.437	-0.212	103.225
41	1.053	-0.150	82.389	88	2.462	-0.187	103.944
42	1.090	-0.150	84.305	89	2.499	-0.212	103.704
43	1.139	-0.150	84.065	90	2.523	-0.200	103.944
44	1.164	-0.150	84.305	91	2.548	-0.200	103.944
45	1.176	-0.162	84.305	92	2.609	-0.212	104.183
46	1.225	-0.162	84.065	93	2.621	-0.200	104.662
47	1.249	-0.162	84.065	94	2.646	-0.200	105.620

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
95	2.670	-0.212	106.578	142	4.005	-0.225	109.452
96	2.707	-0.200	106.099	143	4.042	-0.212	109.452
97	2.731	-0.200	106.578	144	4.091	-0.212	110.410
98	2.768	-0.212	107.057	145	4.103	-0.212	110.171
99	2.805	-0.212	107.297	146	4.128	-0.212	109.931
100	2.829	-0.212	108.015	147	4.164	-0.225	109.452
101	2.829	-0.212	107.536	148	4.164	-0.225	110.171
102	2.866	-0.212	107.536	149	4.201	-0.212	110.889
103	2.915	-0.212	107.057	150	4.238	-0.212	110.889
104	2.952	-0.200	107.057	151	4.262	-0.225	111.129
105	2.989	-0.212	108.734	152	4.299	-0.225	110.889
106	3.001	-0.200	108.255	153	4.324	-0.212	110.650
107	3.013	-0.212	108.494	154	4.360	-0.225	110.410
108	3.062	-0.225	108.734	155	4.373	-0.225	110.650
109	3.087	-0.212	108.734	156	4.397	-0.212	110.889
110	3.099	-0.212	108.734	157	4.434	-0.212	111.129
111	3.160	-0.212	109.213	158	4.471	-0.225	110.889
112	3.172	-0.212	109.692	159	4.483	-0.225	110.410
113	3.209	-0.225	108.973	160	4.520	-0.212	109.692
114	3.209	-0.225	108.494	161	4.544	-0.212	110.410
115	3.258	-0.212	108.734	162	4.569	-0.212	109.692
116	3.282	-0.212	108.734	163	4.593	-0.225	109.692
117	3.319	-0.225	108.734	164	4.630	-0.237	110.171
118	3.331	-0.212	108.973	165	4.667	-0.225	111.129
119	3.368	-0.225	108.734	166	4.691	-0.225	110.889
120	3.393	-0.225	108.255	167	4.715	-0.225	110.171
121	3.442	-0.225	108.015	168	4.740	-0.225	110.171
122	3.442	-0.212	108.015	169	4.764	-0.225	110.410
123	3.491	-0.212	108.255	170	4.801	-0.225	111.368
124	3.503	-0.212	108.494	171	4.826	-0.225	111.608
125	3.552	-0.212	108.734	172	4.850	-0.212	111.129
126	3.576	-0.212	108.015	173	4.887	-0.225	109.931
127	3.589	-0.212	108.494	174	4.911	-0.212	110.171
128	3.613	-0.225	108.734	175	4.936	-0.225	110.171
129	3.650	-0.212	108.255	176	4.973	-0.225	109.213
130	3.674	-0.212	108.734	177	4.997	-0.212	109.931
131	3.699	-0.212	108.734	178	5.034	-0.225	110.410
132	3.723	-0.225	109.692				
133	3.772	-0.212	109.452				
134	3.809	-0.212	109.213				
135	3.809	-0.225	109.452				
136	3.858	-0.225	108.255				
137	3.883	-0.212	108.494				
138	3.919	-0.212	109.692				
139	3.932	-0.225	110.171				
140	3.956	-0.212	110.171				
141	3.981	-0.212	110.171				

Os valores de tensão cisalhante e deslocamento de cisalhamento podem ser obtidos conforme as seguintes relações:

$$\tau = \frac{\text{carga horizontal}}{\text{área da seção transversal}}$$

$$\gamma = \frac{\text{deslocamento horizontal}}{\text{altura inicial}}$$

Tensão cisalhante e deslocamento de cisalhamento do ENSAIO 1:

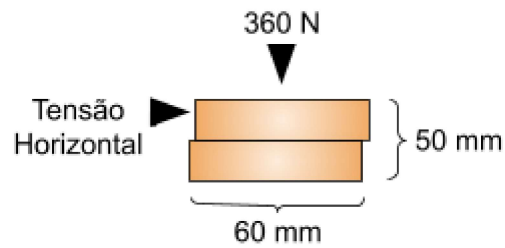
Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ
1	0.00	0.000	48	23.950	0.025	95	29.61	0.053	142	30.40	0.080
2	0.33	0.000	49	24.416	0.026	96	29.47	0.054	143	30.40	0.081
3	0.73	0.000	50	24.88	0.027	97	29.61	0.055	144	30.67	0.082
4	3.06	0.000	51	25.08	0.027	98	29.74	0.055	145	30.60	0.082
5	4.92	0.000	52	25.41	0.028	99	29.80	0.056	146	30.54	0.083
6	6.12	0.001	53	25.61	0.029	100	30.00	0.057	147	30.40	0.083
7	5.65	0.001	54	25.81	0.029	101	29.87	0.057	148	30.60	0.083
8	7.72	0.001	55	26.08	0.030	102	29.87	0.057	149	30.80	0.084
9	8.91	0.002	56	26.35	0.030	103	29.74	0.058	150	30.80	0.085
10	10.05	0.002	57	26.74	0.031	104	29.74	0.059	151	30.87	0.085
11	11.11	0.003	58	26.74	0.032	105	30.20	0.060	152	30.80	0.086
12	11.91	0.003	59	27.08	0.032	106	30.07	0.060	153	30.74	0.086
13	12.57	0.004	60	27.28	0.033	107	30.14	0.060	154	30.67	0.087
14	13.37	0.005	61	27.54	0.033	108	30.20	0.061	155	30.74	0.087
15	14.10	0.005	62	27.68	0.034	109	30.20	0.062	156	30.80	0.088
16	14.77	0.006	63	27.74	0.035	110	30.20	0.062	157	30.87	0.089
17	15.43	0.007	64	27.81	0.035	111	30.34	0.063	158	30.80	0.089
18	15.57	0.007	65	27.54	0.036	112	30.47	0.063	159	30.67	0.090
19	16.23	0.008	66	27.54	0.036	113	30.27	0.064	160	30.47	0.090
20	16.77	0.008	67	27.81	0.037	114	30.14	0.064	161	30.67	0.091
21	17.03	0.009	68	28.07	0.038	115	30.20	0.065	162	30.47	0.091
22	17.50	0.010	69	28.34	0.038	116	30.20	0.066	163	30.47	0.092
23	18.03	0.010	70	28.54	0.039	117	30.20	0.066	164	30.60	0.093
24	18.36	0.011	71	28.54	0.039	118	30.27	0.067	165	30.87	0.093
25	18.89	0.011	72	28.47	0.040	119	30.20	0.067	166	30.80	0.094
26	19.36	0.012	73	28.47	0.041	120	30.07	0.068	167	30.60	0.094
27	19.63	0.013	74	28.47	0.041	121	30.00	0.069	168	30.60	0.095
28	20.16	0.013	75	28.61	0.042	122	30.00	0.069	169	30.67	0.095
29	20.56	0.014	76	28.47	0.043	123	30.07	0.070	170	30.94	0.096
30	20.36	0.015	77	28.47	0.043	124	30.14	0.070	171	31.00	0.097
31	20.09	0.015	78	28.61	0.044	125	30.20	0.071	172	30.87	0.097
32	20.82	0.016	79	28.67	0.044	126	30.00	0.072	173	30.54	0.098
33	21.09	0.016	80	28.87	0.045	127	30.14	0.072	174	30.60	0.098
34	21.36	0.017	81	28.74	0.045	128	30.20	0.072	175	30.60	0.099
35	21.75	0.018	82	28.87	0.046	129	30.07	0.073	176	30.34	0.099
36	21.95	0.018	83	28.87	0.047	130	30.20	0.073	177	30.54	0.100
37	22.09	0.019	84	29.01	0.047	131	30.20	0.074	178	30.67	0.101
38	22.49	0.019	85	29.07	0.048	132	30.47	0.074			
39	22.62	0.020	86	28.94	0.048	133	30.40	0.075			
40	22.82	0.021	87	28.67	0.049	134	30.34	0.076			
41	22.89	0.021	88	28.87	0.049	135	30.40	0.076			
42	23.42	0.022	89	28.81	0.050	136	30.07	0.077			
43	23.35	0.023	90	28.87	0.050	137	30.14	0.078			
44	23.42	0.023	91	28.87	0.051	138	30.47	0.078			
45	23.42	0.024	92	28.94	0.052	139	30.60	0.079			
46	23.35	0.024	93	29.07	0.052	140	30.60	0.079			
47	23.35	0.025	94	29.34	0.053	141	30.60	0.080			

O maior valor de tensão cisalhante é o pico, e o último é o valor crítico.

$$\tau_{p1} = 31,00 \text{ kPa (Leitura 171)}$$

$$\tau_{cr1} = 30,67 \text{ kPa (Leitura 178)}$$

ENSAIO 2:



Tem-se que a área transversal, utilizada para fins de cálculo tanto da tensão normal quanto da tensão cisalhante, é:

$$A = 0,60 \cdot 0,60 = 0,0036 \text{ m}^2$$

A tensão normal aplicada, portanto, é:

$$\sigma = \frac{360}{0,0036} = 100.000 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 100 \text{ kPa}$$

A amostra encontra-se no estado fofo.

DADOS DO ENSAIO 2:

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
1	0.000	0.000	0.000	48	1.262	-0.137	159.987
2	0.006	0.000	5.030	49	1.286	-0.150	162.382
3	0.012	0.012	12.694	50	1.323	-0.137	163.580
4	0.024	0.000	17.723	51	1.335	-0.137	165.256
5	0.035	0.000	21.555	52	1.372	-0.150	165.735
6	0.037	0.000	25.866	53	1.409	-0.125	165.975
7	0.049	-0.012	22.513	54	1.421	-0.150	166.693
8	0.061	0.012	30.896	55	1.458	-0.150	168.130
9	0.073	0.000	45.505	56	1.494	-0.137	170.046
10	0.110	-0.012	57.959	57	1.531	-0.137	172.202
11	0.135	0.012	67.061	58	1.556	-0.175	172.920
12	0.147	-0.012	74.485	59	1.580	-0.150	172.202
13	0.184	-0.012	83.586	60	1.617	-0.162	173.399
14	0.208	-0.012	89.813	61	1.653	-0.175	174.357
15	0.245	-0.012	96.759	62	1.678	-0.162	174.357
16	0.269	-0.025	101.070	63	1.702	-0.175	175.076
17	0.294	-0.025	103.704	64	1.727	-0.162	176.992
18	0.318	-0.025	105.141	65	1.764	-0.162	178.189
19	0.355	-0.037	108.015	66	1.788	-0.187	178.189
20	0.392	-0.050	111.608	67	1.825	-0.162	180.105
21	0.429	-0.062	113.524	68	1.849	-0.175	180.105
22	0.441	-0.050	117.835	69	1.898	-0.175	181.542
23	0.490	-0.050	120.948	70	1.923	-0.175	182.021
24	0.502	-0.062	122.625	71	1.960	-0.162	183.219
25	0.527	-0.075	124.781	72	1.984	-0.162	184.417
26	0.563	-0.050	126.218	73	2.009	-0.187	185.135
27	0.600	-0.075	129.092	74	2.045	-0.187	185.375
28	0.637	-0.087	132.924	75	2.070	-0.175	186.333
29	0.674	-0.075	132.924	76	2.094	-0.162	188.009
30	0.698	-0.087	133.642	77	2.131	-0.175	187.770
31	0.723	-0.075	135.079	78	2.143	-0.175	188.249
32	0.759	-0.100	137.474	79	2.192	-0.175	188.009
33	0.784	-0.075	139.630	80	2.205	-0.187	188.488
34	0.808	-0.100	141.785	81	2.241	-0.175	188.488
35	0.845	-0.100	142.983	82	2.278	-0.187	189.207
36	0.882	-0.112	144.420	83	2.315	-0.187	191.123
37	0.906	-0.125	145.378	84	2.352	-0.175	192.081
38	0.943	-0.112	147.533	85	2.364	-0.187	193.518
39	0.968	-0.125	149.449	86	2.401	-0.187	195.913
40	0.992	-0.112	150.886	87	2.425	-0.200	199.505
41	1.041	-0.125	152.802	88	2.462	-0.200	201.182
42	1.078	-0.125	155.197	89	2.474	-0.200	201.900
43	1.115	-0.125	154.000	90	2.523	-0.200	201.900
44	1.139	-0.137	155.437	91	2.548	-0.200	202.858
45	1.151	-0.150	156.395	92	2.560	-0.187	204.056
46	1.200	-0.137	158.550	93	2.597	-0.187	204.774
47	1.225	-0.125	159.269	94	2.633	-0.187	205.014

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
95	2.670	-0.200	204.774	142	4.005	-0.237	215.552
96	2.707	-0.200	204.774	143	4.042	-0.212	215.312
97	2.719	-0.200	204.056	144	4.079	-0.237	215.552
98	2.744	-0.187	205.253	145	4.091	-0.225	215.073
99	2.780	-0.200	206.690	146	4.115	-0.225	214.354
100	2.793	-0.200	206.211	147	4.140	-0.237	214.354
101	2.829	-0.200	205.732	148	4.177	-0.212	214.115
102	2.866	-0.212	204.535	149	4.213	-0.225	213.875
103	2.891	-0.187	205.253	150	4.226	-0.212	214.115
104	2.927	-0.200	204.774	151	4.275	-0.212	214.354
105	2.940	-0.200	206.211	152	4.276	-0.225	213.636
106	2.976	-0.200	205.493	153	4.299	-0.212	214.833
107	2.989	-0.200	204.774	154	4.324	-0.225	214.594
108	3.038	-0.212	205.493	155	4.373	-0.237	213.636
109	3.062	-0.200	205.732	156	4.409	-0.237	214.115
110	3.099	-0.200	206.211	157	4.422	-0.212	212.917
111	3.136	-0.200	206.451	158	4.458	-0.225	213.396
112	3.160	-0.187	207.169	159	4.471	-0.225	213.636
113	3.172	-0.200	207.648	160	4.507	-0.237	213.396
114	3.197	-0.200	208.127	161	4.544	-0.212	213.157
115	3.233	-0.200	208.367	162	4.569	-0.237	213.396
116	3.270	-0.212	208.127	163	4.605	-0.237	213.636
117	3.307	-0.200	210.522	164	4.630	-0.225	212.678
118	3.331	-0.200	211.001	165	4.654	-0.237	213.396
119	3.344	-0.212	211.241	166	4.679	-0.225	213.875
120	3.380	-0.212	211.241	167	4.703	-0.212	214.594
121	3.405	-0.200	212.199	168	4.740	-0.225	214.354
122	3.442	-0.212	212.678	169	4.764	-0.237	213.875
123	3.478	-0.225	213.875	170	4.801	-0.225	213.396
124	3.491	-0.212	214.594	171	4.813	-0.225	212.678
125	3.527	-0.212	215.073	172	4.838	-0.212	212.678
126	3.552	-0.212	217.228	173	4.887	-0.225	212.678
127	3.576	-0.212	216.510	174	4.888	-0.225	212.917
128	3.613	-0.212	216.031	175	4.924	-0.225	212.917
129	3.638	-0.225	216.270	176	4.973	-0.212	212.678
130	3.674	-0.225	216.989	177	4.985	-0.225	212.917
131	3.699	-0.225	216.270	178	5.034	-0.225	212.199
132	3.736	-0.225	216.749	179	5.058	-0.237	211.241
133	3.748	-0.212	216.989				
134	3.772	-0.225	217.468				
135	3.809	-0.225	217.228				
136	3.834	-0.212	216.989				
137	3.858	-0.225	215.552				
138	3.907	-0.237	216.031				
139	3.919	-0.225	216.749				
140	3.932	-0.225	216.989				
141	3.981	-0.212	216.510				

$$\tau = \frac{\text{carga horizontal}}{\text{área da seção transversal}}$$

$$\gamma = \frac{\text{deslocamento horizontal}}{\text{altura inicial}}$$

Tensão cisalhante e deslocamento de cisalhamento do ENSAIO 2:

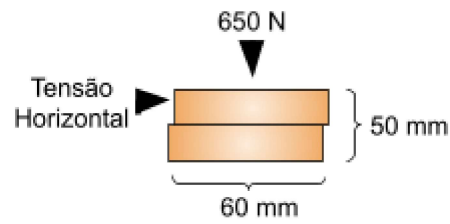
Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ
1	0.00	0.000	48	44.441	0.025	95	56.88	0.053	142	59.88	0.080
2	1.40	0.000	49	45.106	0.026	96	56.88	0.054	143	59.81	0.081
3	3.53	0.000	50	45.44	0.026	97	56.68	0.054	144	59.88	0.082
4	4.92	0.000	51	45.90	0.027	98	57.01	0.055	145	59.74	0.082
5	5.99	0.001	52	46.04	0.027	99	57.41	0.056	146	59.54	0.082
6	7.19	0.001	53	46.10	0.028	100	57.28	0.056	147	59.54	0.083
7	6.25	0.001	54	46.30	0.028	101	57.15	0.057	148	59.48	0.084
8	8.58	0.001	55	46.70	0.029	102	56.82	0.057	149	59.41	0.084
9	12.64	0.001	56	47.24	0.030	103	57.01	0.058	150	59.48	0.085
10	16.10	0.002	57	47.83	0.031	104	56.88	0.059	151	59.54	0.085
11	18.63	0.003	58	48.03	0.031	105	57.28	0.059	152	59.34	0.086
12	20.69	0.003	59	47.83	0.032	106	57.08	0.060	153	59.68	0.086
13	23.22	0.004	60	48.17	0.032	107	56.88	0.060	154	59.61	0.086
14	24.95	0.004	61	48.43	0.033	108	57.08	0.061	155	59.34	0.087
15	26.88	0.005	62	48.43	0.034	109	57.15	0.061	156	59.48	0.088
16	28.07	0.005	63	48.63	0.034	110	57.28	0.062	157	59.14	0.088
17	28.81	0.006	64	49.16	0.035	111	57.35	0.063	158	59.28	0.089
18	29.21	0.006	65	49.50	0.035	112	57.55	0.063	159	59.34	0.089
19	30.00	0.007	66	49.50	0.036	113	57.68	0.063	160	59.28	0.090
20	31.00	0.008	67	50.03	0.036	114	57.81	0.064	161	59.21	0.091
21	31.53	0.009	68	50.03	0.037	115	57.88	0.065	162	59.28	0.091
22	32.73	0.009	69	50.43	0.038	116	57.81	0.065	163	59.34	0.092
23	33.60	0.010	70	50.56	0.038	117	58.48	0.066	164	59.08	0.093
24	34.06	0.010	71	50.89	0.039	118	58.61	0.067	165	59.28	0.093
25	34.66	0.011	72	51.23	0.040	119	58.68	0.067	166	59.41	0.094
26	35.06	0.011	73	51.43	0.040	120	58.68	0.068	167	59.61	0.094
27	35.86	0.012	74	51.49	0.041	121	58.94	0.068	168	59.54	0.095
28	36.92	0.013	75	51.76	0.041	122	59.08	0.069	169	59.41	0.095
29	36.92	0.013	76	52.22	0.042	123	59.41	0.070	170	59.28	0.096
30	37.12	0.014	77	52.16	0.043	124	59.61	0.070	171	59.08	0.096
31	37.52	0.014	78	52.29	0.043	125	59.74	0.071	172	59.08	0.097
32	38.19	0.015	79	52.22	0.044	126	60.34	0.071	173	59.08	0.098
33	38.79	0.016	80	52.36	0.044	127	60.14	0.072	174	59.14	0.098
34	39.38	0.016	81	52.36	0.045	128	60.01	0.072	175	59.14	0.098
35	39.72	0.017	82	52.56	0.046	129	60.08	0.073	176	59.08	0.099
36	40.12	0.018	83	53.09	0.046	130	60.27	0.073	177	59.14	0.100
37	40.38	0.018	84	53.36	0.047	131	60.08	0.074	178	58.94	0.101
38	40.98	0.019	85	53.75	0.047	132	60.21	0.075	179	58.68	0.101
39	41.51	0.019	86	54.42	0.048	133	60.27	0.075			
40	41.91	0.020	87	55.42	0.049	134	60.41	0.075			
41	42.45	0.021	88	55.88	0.049	135	60.34	0.076			
42	43.11	0.022	89	56.08	0.049	136	60.27	0.077			
43	42.78	0.022	90	56.08	0.050	137	59.88	0.077			
44	43.18	0.023	91	56.35	0.051	138	60.01	0.078			
45	43.44	0.023	92	56.68	0.051	139	60.21	0.078			
46	44.04	0.024	93	56.88	0.052	140	60.27	0.079			
47	44.24	0.024	94	56.95	0.053	141	60.14	0.080			

O maior valor de tensão cisalhante é o pico, e o último é o valor crítico.

$$\tau_{p2} = 60,41 \text{ kPa (Leitura 134)}$$

$$\tau_{cr2} = 58,68 \text{ kPa (Leitura 179)}$$

ENSAIO 3:



Tem-se que a área transversal, utilizada para fins de cálculo tanto da tensão normal quanto da tensão cisalhante, é:

$$A = 0,60 \cdot 0,60 = 0,0036 \text{ m}^2$$

A tensão normal aplicada, portanto, é:

$$\sigma = \frac{650}{0,0036} = 180.556 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 180,6 \text{ kPa}$$

A amostra encontra-se no estado fofo.

DADOS DO ENSAIO 3:

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
1	0.000	0.000	0.000	48	0.772	-0.087	276.864
2	0.000	0.000	0.958	49	0.796	-0.087	279.978
3	0.000	0.000	1.916	50	0.833	-0.087	283.091
4	0.000	0.000	1.677	51	0.857	-0.087	287.402
5	0.000	0.012	1.677	52	0.882	-0.100	290.037
6	0.012	0.000	1.677	53	0.906	-0.087	294.587
7	0.012	0.000	1.437	54	0.943	-0.087	297.461
8	0.012	0.000	1.437	55	0.980	-0.100	300.575
9	0.012	0.000	1.437	56	1.017	-0.087	302.491
10	0.000	-0.012	1.437	57	1.041	-0.112	304.886
11	0.000	0.000	1.198	58	1.066	-0.100	307.521
12	0.000	0.000	1.198	59	1.115	-0.100	309.437
13	0.000	0.000	6.227	60	1.139	-0.100	311.592
14	0.000	0.000	10.299	61	1.164	-0.100	313.987
15	0.000	0.000	11.496	62	1.188	-0.100	318.777
16	0.012	0.000	25.627	63	1.225	-0.112	320.933
17	0.012	0.000	37.602	64	1.249	-0.112	323.328
18	0.000	0.012	45.266	65	1.286	-0.100	325.483
19	0.037	-0.012	54.846	66	1.311	-0.112	329.076
20	0.049	0.000	70.414	67	1.347	-0.112	332.668
21	0.086	0.000	87.897	68	1.384	-0.112	335.542
22	0.098	0.000	103.225	69	1.396	-0.112	337.698
23	0.122	0.000	117.595	70	1.433	-0.112	339.853
24	0.159	0.000	127.655	71	1.470	-0.125	340.811
25	0.171	0.000	138.193	72	1.494	-0.125	343.685
26	0.196	-0.012	150.407	73	1.531	-0.137	344.883
27	0.220	0.000	163.819	74	1.568	-0.125	345.841
28	0.245	-0.012	175.315	75	1.592	-0.125	349.673
29	0.282	-0.012	184.656	76	1.629	-0.137	350.870
30	0.294	-0.012	192.081	77	1.666	-0.112	352.786
31	0.318	0.000	197.350	78	1.678	-0.112	355.421
32	0.331	-0.025	202.858	79	1.715	-0.125	356.379
33	0.355	-0.025	209.564	80	1.739	-0.125	358.774
34	0.380	-0.037	215.791	81	1.776	-0.125	360.929
35	0.404	-0.037	221.539	82	1.813	-0.137	362.366
36	0.429	-0.037	228.245	83	1.837	-0.125	364.043
37	0.453	-0.037	233.993	84	1.862	-0.125	365.719
38	0.478	-0.050	237.346	85	1.898	-0.125	369.073
39	0.490	-0.050	243.094	86	1.935	-0.125	370.749
40	0.527	-0.050	247.406	87	1.960	-0.137	374.102
41	0.563	-0.050	250.280	88	1.996	-0.137	376.497
42	0.600	-0.062	255.788	89	2.021	-0.137	377.216
43	0.637	-0.062	258.662	90	2.058	-0.125	378.892
44	0.649	-0.062	261.297	91	2.082	-0.125	377.216
45	0.674	-0.075	264.171	92	2.107	-0.137	379.850
46	0.698	-0.075	270.158	93	2.119	-0.137	382.724
47	0.723	-0.062	274.230	94	2.168	-0.150	386.317

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
95	2.192	-0.137	387.514	142	3.601	-0.150	425.595
96	2.217	-0.137	387.514	143	3.638	-0.150	427.750
97	2.266	-0.137	388.472	144	3.674	-0.137	428.708
98	2.290	-0.137	389.191	145	3.699	-0.150	428.469
99	2.315	-0.137	390.388	146	3.711	-0.150	429.906
100	2.339	-0.137	390.628	147	3.736	-0.150	429.427
101	2.376	-0.137	391.825	148	3.772	-0.150	431.343
102	2.401	-0.137	392.065	149	3.797	-0.137	431.583
103	2.450	-0.137	393.023	150	3.834	-0.150	430.864
104	2.474	-0.137	394.460	151	3.858	-0.150	432.062
105	2.499	-0.125	395.418	152	3.883	-0.162	431.822
106	2.523	-0.125	395.657	153	3.919	-0.150	432.780
107	2.548	-0.150	396.855	154	3.944	-0.150	431.343
108	2.572	-0.137	397.334	155	3.968	-0.150	431.104
109	2.609	-0.125	396.855	156	4.005	-0.137	430.625
110	2.658	-0.137	397.334	157	4.030	-0.150	428.948
111	2.682	-0.137	399.729	158	4.066	-0.150	428.708
112	2.695	-0.125	400.687	159	4.091	-0.150	428.229
113	2.731	-0.137	402.842	160	4.115	-0.162	427.990
114	2.756	-0.137	405.716	161	4.128	-0.150	427.032
115	2.793	-0.150	407.393	162	4.164	-0.150	426.074
116	2.829	-0.150	409.069	163	4.201	-0.137	426.074
117	2.854	-0.137	411.704	164	4.238	-0.162	426.313
118	2.878	-0.150	412.901	165	4.250	-0.150	425.595
119	2.915	-0.137	414.338	166	4.287	-0.150	425.116
120	2.940	-0.150	415.536	167	4.299	-0.137	424.637
121	2.964	-0.150	415.536	168	4.336	-0.150	422.960
122	2.989	-0.137	414.578	169	4.360	-0.150	423.200
123	3.025	-0.125	416.254	170	4.385	-0.150	423.200
124	3.062	-0.150	415.296	171	4.422	-0.137	422.002
125	3.099	-0.137	415.057	172	4.471	-0.162	421.763
126	3.111	-0.150	414.578	173	4.471	-0.162	422.960
127	3.136	-0.137	416.015	174	4.495	-0.150	423.679
128	3.172	-0.150	415.775	175	4.532	-0.137	423.200
129	3.197	-0.150	416.254	176	4.556	-0.150	422.242
130	3.233	-0.137	416.494	177	4.605	-0.150	422.242
131	3.258	-0.137	416.254	178	4.630	-0.150	423.439
132	3.295	-0.137	417.452	179	4.642	-0.150	422.960
133	3.319	-0.137	418.410	180	4.667	-0.162	422.960
134	3.344	-0.150	418.889	181	4.703	-0.150	425.116
135	3.356	-0.150	419.368	182	4.728	-0.150	425.116
136	3.405	-0.150	417.691	183	4.752	-0.150	425.595
137	3.442	-0.137	418.170	184	4.789	-0.162	426.553
138	3.466	-0.137	419.368	185	4.813	-0.137	427.990
139	3.491	-0.137	420.326	186	4.838	-0.150	427.271
140	3.503	-0.137	422.242	187	4.862	-0.150	427.750
141	3.540	-0.150	422.721	188	4.887	-0.150	427.271

$$\tau = \frac{\text{carga horizontal}}{\text{área da seção transversal}}$$

$$\gamma = \frac{\text{deslocamento horizontal}}{\text{altura inicial}}$$

Tensão cisalhante e deslocamento de cisalhamento do ENSAIO 3:

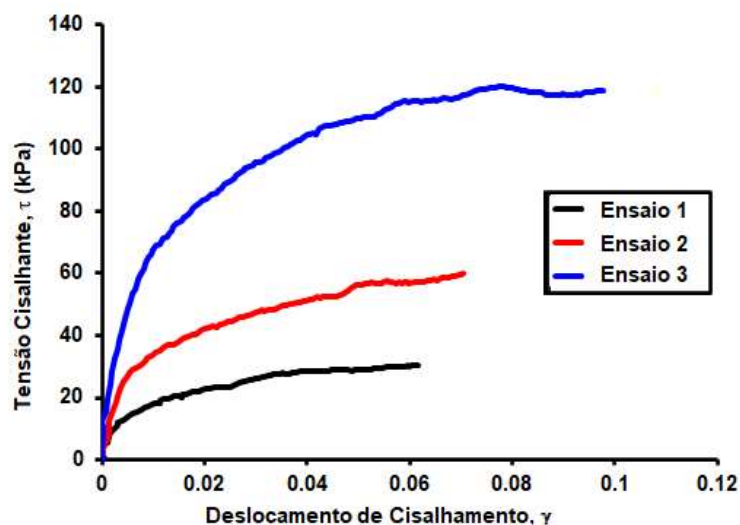
Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ
1	0.00	0.000	48	76.91	0.015	95	107.64	0.044	142	118.22	0.072
2	0.27	0.000	49	77.77	0.016	96	107.64	0.044	143	118.82	0.073
3	0.53	0.000	50	78.64	0.017	97	107.91	0.045	144	119.09	0.073
4	0.47	0.000	51	79.83	0.017	98	108.11	0.046	145	119.02	0.074
5	0.47	0.000	52	80.57	0.018	99	108.44	0.046	146	119.42	0.074
6	0.47	0.000	53	81.83	0.018	100	108.51	0.047	147	119.29	0.075
7	0.40	0.000	54	82.63	0.019	101	108.84	0.048	148	119.82	0.075
8	0.40	0.000	55	83.49	0.020	102	108.91	0.048	149	119.88	0.076
9	0.40	0.000	56	84.03	0.020	103	109.17	0.049	150	119.68	0.077
10	0.40	0.000	57	84.69	0.021	104	109.57	0.049	151	120.02	0.077
11	0.33	0.000	58	85.42	0.021	105	109.84	0.050	152	119.95	0.078
12	0.33	0.000	59	85.95	0.022	106	109.90	0.050	153	120.22	0.078
13	1.73	0.000	60	86.55	0.023	107	110.24	0.051	154	119.82	0.079
14	2.86	0.000	61	87.22	0.023	108	110.37	0.051	155	119.75	0.079
15	3.19	0.000	62	88.55	0.024	109	110.24	0.052	156	119.62	0.080
16	7.12	0.000	63	89.15	0.024	110	110.37	0.053	157	119.15	0.081
17	10.44	0.000	64	89.81	0.025	111	111.04	0.054	158	119.09	0.081
18	12.57	0.000	65	90.41	0.026	112	111.30	0.054	159	118.95	0.082
19	15.23	0.001	66	91.41	0.026	113	111.90	0.055	160	118.89	0.082
20	19.56	0.001	67	92.41	0.027	114	112.70	0.055	161	118.62	0.083
21	24.42	0.002	68	93.21	0.028	115	113.16	0.056	162	118.35	0.083
22	28.67	0.002	69	93.80	0.028	116	113.63	0.057	163	118.35	0.084
23	32.67	0.002	70	94.40	0.029	117	114.36	0.057	164	118.42	0.085
24	35.46	0.003	71	94.67	0.029	118	114.69	0.058	165	118.22	0.085
25	38.39	0.003	72	95.47	0.030	119	115.09	0.058	166	118.09	0.086
26	41.78	0.004	73	95.80	0.031	120	115.43	0.059	167	117.95	0.086
27	45.51	0.004	74	96.07	0.031	121	115.43	0.059	168	117.49	0.087
28	48.70	0.005	75	97.13	0.032	122	115.16	0.060	169	117.56	0.087
29	51.29	0.006	76	97.46	0.033	123	115.63	0.061	170	117.56	0.088
30	53.36	0.006	77	98.00	0.033	124	115.36	0.061	171	117.22	0.088
31	54.82	0.006	78	98.73	0.034	125	115.29	0.062	172	117.16	0.089
32	56.35	0.007	79	98.99	0.034	126	115.16	0.062	173	117.49	0.089
33	58.21	0.007	80	99.66	0.035	127	115.56	0.063	174	117.69	0.090
34	59.94	0.008	81	100.26	0.036	128	115.49	0.063	175	117.56	0.091
35	61.54	0.008	82	100.66	0.036	129	115.63	0.064	176	117.29	0.091
36	63.40	0.009	83	101.12	0.037	130	115.69	0.065	177	117.29	0.092
37	65.00	0.009	84	101.59	0.037	131	115.63	0.065	178	117.62	0.093
38	65.93	0.010	85	102.52	0.038	132	115.96	0.066	179	117.49	0.093
39	67.53	0.010	86	102.99	0.039	133	116.22	0.066	180	117.49	0.093
40	68.72	0.011	87	103.92	0.039	134	116.36	0.067	181	118.09	0.094
41	69.52	0.011	88	104.58	0.040	135	116.49	0.067	182	118.09	0.095
42	71.05	0.012	89	104.78	0.040	136	116.03	0.068	183	118.22	0.095
43	71.85	0.013	90	105.25	0.041	137	116.16	0.069	184	118.49	0.096
44	72.58	0.013	91	104.78	0.042	138	116.49	0.069	185	118.89	0.096
45	73.38	0.013	92	105.51	0.042	139	116.76	0.070	186	118.69	0.097
46	75.04	0.014	93	106.31	0.042	140	117.29	0.070	187	118.82	0.097
47	76.17	0.014	94	107.31	0.043	141	117.42	0.071	188	118.69	0.098

O maior valor de tensão cisalhante é o pico, e o último é o valor crítico.

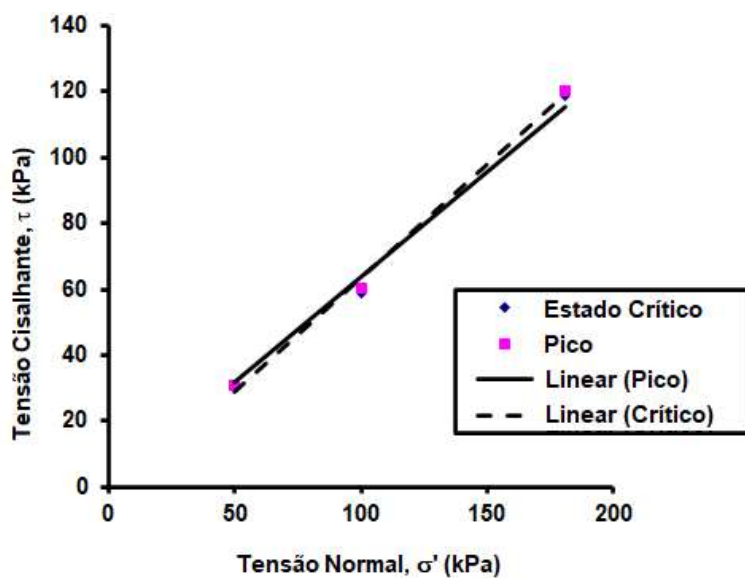
$$\tau_{p3} = 120,22 \text{ kPa (Leitura 153)}$$

$$\tau_{cr3} = 118,69 \text{ kPa (Leitura 188)}$$

Com os 03 ensaios, traça-se o gráfico $\tau \times \gamma$:



E também a representação de τ_p e τ_{cr} :

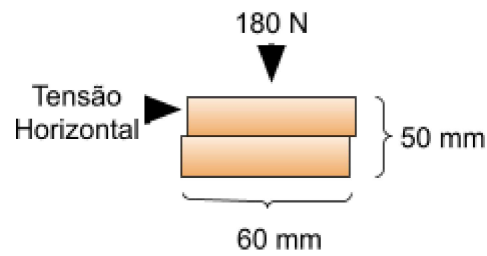


E assim, através de ferramentas gráficas, estima-se o ângulo de atrito no estado crítico para a areia fofa:

$$\Phi_{cr} \approx 32,3^\circ$$

Em areias fofas não se verifica considerável intertravamento entre os grãos, e portanto não é definido o ângulo de atrito de pico.

ENSAIO 4:



Tem-se que a área transversal, utilizada para fins de cálculo tanto da tensão normal quanto da tensão cisalhante, é:

$$A = 0,60 \cdot 0,60 = 0,0036 \text{ m}^2$$

A tensão normal aplicada, portanto, é:

$$\sigma = \frac{180}{0,0036} = 50.000 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 50 \text{ kPa}$$

A amostra encontra-se no estado denso.

DADOS DO ENSAIO 4:

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
1	0.000	0.000	0.000	33	0.747	0.075	183.458
2	0.000	0.000	3.832	34	0.772	0.075	184.896
3	0.024	0.012	10.538	35	0.821	0.087	186.333
4	0.037	0.000	17.963	36	0.857	0.112	187.291
5	0.061	0.000	21.076	37	0.906	0.112	188.249
6	0.073	-0.012	30.896	38	0.919	0.112	188.967
7	0.098	0.012	40.955	39	0.943	0.137	188.967
8	0.110	-0.012	52.211	40	0.955	0.125	189.925
9	0.135	-0.025	63.708	41	0.992	0.125	190.404
10	0.159	-0.012	75.683	42	1.017	0.137	190.644
11	0.184	-0.025	86.221	43	1.066	0.150	190.644
12	0.196	0.000	94.124	44	1.090	0.162	190.883
13	0.220	-0.025	101.070	45	1.127	0.175	190.404
14	0.245	-0.012	109.692	46	1.151	0.175	190.883
15	0.282	-0.012	118.314	47	1.176	0.187	191.602
16	0.306	-0.012	126.936	48	1.200	0.187	191.362
17	0.331	-0.012	134.600	49	1.237	0.200	190.883
18	0.355	0.012	140.588	50	1.286	0.225	189.686
19	0.392	-0.012	144.899	51	1.311	0.237	188.967
20	0.404	0.000	149.210	52	1.335	0.237	188.249
21	0.416	-0.012	154.958	53	1.360	0.250	187.530
22	0.465	0.000	159.269	54	1.396	0.250	187.291
23	0.478	0.012	162.861	55	1.433	0.274	186.093
24	0.514	0.000	166.454	56	1.458	0.274	184.656
25	0.551	0.012	168.849	57	1.494	0.287	182.979
26	0.551	0.037	170.765	58	1.543	0.299	181.542
27	0.576	0.012	172.920	59	1.556	0.299	180.105
28	0.600	0.037	175.315	60	1.580	0.324	178.668
29	0.637	0.037	177.710	61	1.617	0.324	176.513
30	0.686	0.050	179.866	62	1.641	0.337	174.118
31	0.698	0.062	181.063	63	1.678	0.349	171.244
32	0.723	0.062	182.261	64	1.727	0.362	168.609

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
65	1.739	0.362	165.735	97	2.719	0.387	125.978
66	1.776	0.349	164.059	98	2.756	0.374	125.978
67	1.813	0.349	161.424	99	2.780	0.374	125.260
68	1.825	0.362	158.311	100	2.817	0.387	125.260
69	1.874	0.374	154.958	101	2.842	0.387	125.499
70	1.923	0.387	150.886	102	2.854	0.387	125.739
71	1.935	0.374	148.491	103	2.903	0.387	125.499
72	1.972	0.374	145.857	104	2.940	0.387	125.739
73	1.996	0.387	143.462	105	2.964	0.387	125.739
74	2.009	0.387	141.306	106	2.989	0.387	125.260
75	2.045	0.399	138.432	107	3.013	0.387	125.739
76	2.082	0.387	135.798	108	3.038	0.374	125.978
77	2.119	0.399	134.121	109	3.074	0.399	126.697
78	2.143	0.399	132.445				
79	2.180	0.387	131.487				
80	2.217	0.387	130.768				
81	2.229	0.374	129.571				
82	2.266	0.387	128.852				
83	2.290	0.387	128.613				
84	2.339	0.387	128.134				
85	2.364	0.387	127.176				
86	2.401	0.374	126.697				
87	2.413	0.374	125.260				
88	2.450	0.387	126.457				
89	2.474	0.387	126.936				
90	2.511	0.399	125.978				
91	2.548	0.374	126.218				
92	2.572	0.374	125.739				
93	2.584	0.374	125.978				
94	2.633	0.374	125.978				
95	2.658	0.387	126.218				
96	2.695	0.374	126.218				

Tensão cisalhante e deslocamento de cisalhamento do ENSAIO 4:

Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ
1	0.00	0.000	33	50.96	0.015	65	46.04	0.035	97	34.99	0.054
2	1.06	0.000	34	51.36	0.015	66	45.57	0.036	98	34.99	0.055
3	2.93	0.000	35	51.76	0.016	67	44.84	0.036	99	34.79	0.056
4	4.99	0.001	36	52.03	0.017	68	43.98	0.036	100	34.79	0.056
5	5.85	0.001	37	52.29	0.018	69	43.04	0.037	101	34.86	0.057
6	8.58	0.001	38	52.49	0.018	70	41.91	0.038	102	34.93	0.057
7	11.38	0.002	39	52.49	0.019	71	41.25	0.039	103	34.86	0.058
8	14.50	0.002	40	52.76	0.019	72	40.52	0.039	104	34.93	0.059
9	17.70	0.003	41	52.89	0.020	73	39.85	0.040	105	34.93	0.059
10	21.02	0.003	42	52.96	0.020	74	39.25	0.040	106	34.79	0.060
11	23.95	0.004	43	52.96	0.021	75	38.45	0.041	107	34.93	0.060
12	26.15	0.004	44	53.02	0.022	76	37.72	0.042	108	34.99	0.061
13	28.07	0.004	45	52.89	0.023	77	37.26	0.042	109	35.19	0.061
14	30.47	0.005	46	53.02	0.023	78	36.79	0.043			
15	32.86	0.006	47	53.22	0.024	79	36.52	0.044			
16	35.26	0.006	48	53.16	0.024	80	36.32	0.044			
17	37.39	0.007	49	53.02	0.025	81	35.99	0.045			
18	39.05	0.007	50	52.69	0.026	82	35.79	0.045			
19	40.25	0.008	51	52.49	0.026	83	35.73	0.046			
20	41.45	0.008	52	52.29	0.027	84	35.59	0.047			
21	43.04	0.008	53	52.09	0.027	85	35.33	0.047			
22	44.24	0.009	54	52.03	0.028	86	35.19	0.048			
23	45.24	0.010	55	51.69	0.029	87	34.79	0.048			
24	46.24	0.010	56	51.29	0.029	88	35.13	0.049			
25	46.90	0.011	57	50.83	0.030	89	35.26	0.049			
26	47.43	0.011	58	50.43	0.031	90	34.99	0.050			
27	48.03	0.012	59	50.03	0.031	91	35.06	0.051			
28	48.70	0.012	60	49.63	0.032	92	34.93	0.051			
29	49.36	0.013	61	49.03	0.032	93	34.99	0.052			
30	49.96	0.014	62	48.37	0.033	94	34.99	0.053			
31	50.30	0.014	63	47.57	0.034	95	35.06	0.053			
32	50.63	0.014	64	46.84	0.035	96	35.06	0.054			

$$\tau = \frac{\text{carga horizontal}}{\text{área da seção transversal}}$$

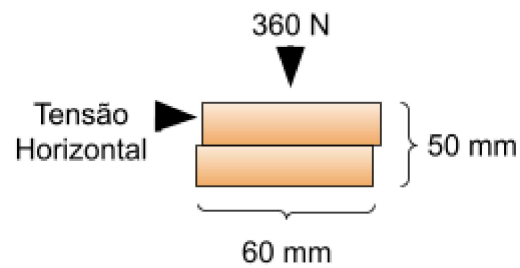
$$\gamma = \frac{\text{deslocamento horizontal}}{\text{altura inicial}}$$

O maior valor de tensão cisalhante é o pico, e o último é o valor crítico.

$$\tau_{p4} = 53,22 \text{ kPa (Leitura 47)}$$

$$\tau_{cr4} = 35,19 \text{ kPa (Leitura 109)}$$

ENSAIO 5:



Tem-se que a área transversal, utilizada para fins de cálculo tanto da tensão normal quanto da tensão cisalhante, é:

$$A = 0,60 \cdot 0,60 = 0,0036 \text{ m}^2$$

A tensão normal aplicada, portanto, é:

$$\sigma = \frac{360}{0,0036} = 100.000 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 100 \text{ kPa}$$

A amostra encontra-se no estado denso.

DADOS DO ENSAIO 5:

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
1	0.000	0.000	0.000	33	0.796	0.050	296.982
2	0.037	-0.012	14.849	34	0.857	0.062	303.449
3	0.049	0.000	25.148	35	0.894	0.075	308.718
4	0.086	0.000	30.896	36	0.931	0.087	312.311
5	0.098	0.037	35.686	37	0.955	0.087	313.508
6	0.135	0.037	42.871	38	0.968	0.100	315.903
7	0.171	0.000	51.732	39	0.980	0.100	319.975
8	0.184	-0.012	58.438	40	1.017	0.125	323.328
9	0.220	0.037	63.468	41	1.078	0.125	325.962
10	0.220	0.012	68.258	42	1.115	0.112	327.639
11	0.257	0.012	72.809	43	1.127	0.125	329.794
12	0.245	0.000	78.557	44	1.151	0.137	331.710
13	0.294	0.025	89.095	45	1.176	0.137	333.626
14	0.318	0.025	98.196	46	1.200	0.162	335.782
15	0.355	0.037	112.566	47	1.249	0.175	337.698
16	0.367	0.012	125.499	48	1.286	0.150	338.416
17	0.367	0.000	137.235	49	1.311	0.162	339.135
18	0.404	0.025	146.815	50	1.347	0.200	340.572
19	0.416	0.012	159.269	51	1.384	0.212	341.051
20	0.441	0.000	174.597	52	1.421	0.200	341.051
21	0.465	-0.012	189.446	53	1.433	0.212	342.488
22	0.490	0.025	202.619	54	1.470	0.212	343.446
23	0.539	0.037	216.031	55	1.507	0.262	344.404
24	0.551	-0.012	226.808	56	1.556	0.250	344.164
25	0.588	0.037	237.107	57	1.568	0.237	343.446
26	0.600	0.000	250.519	58	1.604	0.237	343.925
27	0.637	0.025	261.057	59	1.617	0.274	343.925
28	0.674	0.037	269.679	60	1.653	0.262	342.727
29	0.698	0.037	276.385	61	1.690	0.299	342.727
30	0.735	0.012	281.415	62	1.739	0.287	340.572
31	0.772	0.037	286.684	63	1.764	0.312	341.051
32	0.796	0.062	290.755	64	1.800	0.299	338.656

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
65	1.813	0.312	336.740	97	2.805	0.437	248.843
66	1.862	0.349	335.063	98	2.829	0.474	249.082
67	1.874	0.337	331.471	99	2.854	0.437	248.603
68	1.911	0.362	328.597	100	2.878	0.462	249.082
69	1.947	0.362	324.525	101	2.915	0.449	249.082
70	1.984	0.387	322.370	102	2.952	0.474	250.040
71	2.009	0.349	319.017	103	2.989	0.437	249.801
72	2.033	0.362	315.903	104	3.013	0.474	250.998
73	2.058	0.399	313.029	105	3.038	0.462	251.238
74	2.094	0.412	308.958	106	3.062	0.462	252.435
75	2.119	0.412	303.928	107	3.087	0.437	253.154
76	2.156	0.412	299.617	108	3.123	0.449	252.675
77	2.180	0.412	295.785	109	3.160	0.449	253.393
78	2.217	0.424	292.432	110	3.172	0.437	254.351
79	2.254	0.437	289.558	111	3.197	0.462	254.351
80	2.278	0.437	285.965	112	3.233	0.462	254.830
81	2.315	0.437	281.894	113	3.258	0.487	256.507
82	2.339	0.412	277.104	114	3.295	0.474	256.746
83	2.376	0.424	273.511	115	3.319	0.474	257.225
84	2.413	0.424	269.919	116	3.356	0.437	257.465
85	2.437	0.449	268.961	117	3.380	0.437	258.183
86	2.462	0.449	266.566	118	3.417	0.449	258.423
87	2.499	0.449	264.410				
88	2.523	0.437	262.015				
89	2.572	0.462	259.620				
90	2.597	0.437	256.746				
91	2.621	0.437	255.549				
92	2.646	0.449	253.872				
93	2.670	0.437	252.675				
94	2.707	0.437	251.956				
95	2.731	0.462	250.759				
96	2.780	0.462	249.561				

$$\tau = \frac{\text{carga horizontal}}{\text{área da seção transversal}}$$

$$\gamma = \frac{\text{deslocamento horizontal}}{\text{altura inicial}}$$

Tensão cisalhante e deslocamento de cisalhamento do ENSAIO 5:

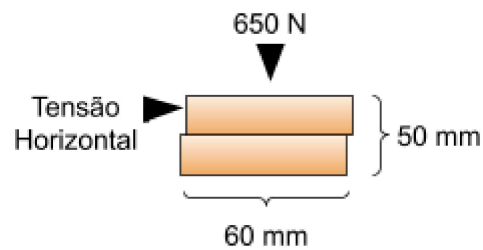
Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ
1	0.00	0.000	33	82.50	0.016	65	93.54	0.036	97	69.12	0.056
2	4.12	0.001	34	84.29	0.017	66	93.07	0.037	98	69.19	0.057
3	6.99	0.001	35	85.76	0.018	67	92.08	0.037	99	69.06	0.057
4	8.58	0.002	36	86.75	0.019	68	91.28	0.038	100	69.19	0.058
5	9.91	0.002	37	87.09	0.019	69	90.15	0.039	101	69.19	0.058
6	11.91	0.003	38	87.75	0.019	70	89.55	0.040	102	69.46	0.059
7	14.37	0.003	39	88.88	0.020	71	88.62	0.040	103	69.39	0.060
8	16.23	0.004	40	89.81	0.020	72	87.75	0.041	104	69.72	0.060
9	17.63	0.004	41	90.55	0.022	73	86.95	0.041	105	69.79	0.061
10	18.96	0.004	42	91.01	0.022	74	85.82	0.042	106	70.12	0.061
11	20.22	0.005	43	91.61	0.023	75	84.42	0.042	107	70.32	0.062
12	21.82	0.005	44	92.14	0.023	76	83.23	0.043	108	70.19	0.062
13	24.75	0.006	45	92.67	0.024	77	82.16	0.044	109	70.39	0.063
14	27.28	0.006	46	93.27	0.024	78	81.23	0.044	110	70.65	0.063
15	31.27	0.007	47	93.80	0.025	79	80.43	0.045	111	70.65	0.064
16	34.86	0.007	48	94.00	0.026	80	79.43	0.046	112	70.79	0.065
17	38.12	0.007	49	94.20	0.026	81	78.30	0.046	113	71.25	0.065
18	40.78	0.008	50	94.60	0.027	82	76.97	0.047	114	71.32	0.066
19	44.24	0.008	51	94.74	0.028	83	75.98	0.048	115	71.45	0.066
20	48.50	0.009	52	94.74	0.028	84	74.98	0.048	116	71.52	0.067
21	52.62	0.009	53	95.14	0.029	85	74.71	0.049	117	71.72	0.068
22	56.28	0.010	54	95.40	0.029	86	74.05	0.049	118	71.78	0.068
23	60.01	0.011	55	95.67	0.030	87	73.45	0.050			
24	63.00	0.011	56	95.60	0.031	88	72.78	0.050			
25	65.86	0.012	57	95.40	0.031	89	72.12	0.051			
26	69.59	0.012	58	95.53	0.032	90	71.32	0.052			
27	72.52	0.013	59	95.53	0.032	91	70.99	0.052			
28	74.91	0.013	60	95.20	0.033	92	70.52	0.053			
29	76.77	0.014	61	95.20	0.034	93	70.19	0.053			
30	78.17	0.015	62	94.60	0.035	94	69.99	0.054			
31	79.63	0.015	63	94.74	0.035	95	69.66	0.055			
32	80.77	0.016	64	94.07	0.036	96	69.32	0.056			

O maior valor de tensão cisalhante é o pico, e o último é o valor crítico.

$$\tau_{p5} = 95,67 \text{ kPa (Leitura 55)}$$

$$\tau_{cr5} = 71,78 \text{ kPa (Leitura 118)}$$

ENSAIO 6:



Tem-se que a área transversal, utilizada para fins de cálculo tanto da tensão normal quanto da tensão cisalhante, é:

$$A = 0,60 \cdot 0,60 = 0,0036 \text{ m}^2$$

A tensão normal aplicada, portanto, é:

$$\sigma = \frac{650}{0,0036} = 180.556 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 180,6 \text{ kPa}$$

A amostra encontra-se no estado denso.

DADOS DO ENSAIO 6:

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
1	0.000	0.000	0.000	54	1.556	0.200	552.771
2	0.024	0.012	35.925	55	1.580	0.187	554.208
3	0.061	0.025	61.313	56	1.629	0.200	556.603
4	0.098	0.000	73.288	57	1.641	0.212	557.561
5	0.098	0.012	78.078	58	1.690	0.225	558.998
6	0.122	0.012	80.473	59	1.715	0.212	559.956
7	0.147	0.012	88.616	60	1.739	0.250	560.914
8	0.196	0.000	99.633	61	1.764	0.237	560.435
9	0.220	0.000	105.860	62	1.800	0.262	559.956
10	0.245	0.000	115.440	63	1.837	0.262	559.477
11	0.282	0.000	131.247	64	1.874	0.262	557.561
12	0.306	-0.025	147.533	65	1.886	0.274	557.082
13	0.331	0.012	167.172	66	1.935	0.299	557.082
14	0.367	0.000	189.686	67	1.935	0.312	556.603
15	0.404	-0.012	213.157	68	1.984	0.287	553.250
16	0.441	-0.012	233.754	69	2.009	0.312	552.771
17	0.441	0.000	254.351	70	2.045	0.324	550.375
18	0.465	-0.025	269.679	71	2.094	0.337	549.417
19	0.502	-0.012	284.528	72	2.107	0.337	547.501
20	0.527	0.000	303.688	73	2.131	0.337	544.627
21	0.563	0.000	323.807	74	2.168	0.337	542.711
22	0.588	-0.012	342.488	75	2.205	0.337	540.316
23	0.625	-0.012	361.169	76	2.217	0.362	537.442
24	0.661	0.012	376.976	77	2.266	0.374	535.047
25	0.686	0.000	388.472	78	2.290	0.374	531.694
26	0.686	-0.012	400.926	79	2.327	0.399	530.736
27	0.735	0.000	414.338	80	2.339	0.387	528.341
28	0.772	0.000	429.667	81	2.376	0.399	526.425
29	0.784	0.012	444.516	82	2.413	0.412	523.551
30	0.821	0.012	456.012	83	2.437	0.399	520.198
31	0.845	0.025	467.029	84	2.474	0.399	518.282
32	0.882	0.025	474.214	85	2.499	0.437	516.845
33	0.894	0.037	483.315	86	2.535	0.437	514.450
34	0.931	0.050	492.416	87	2.560	0.449	513.013
35	0.968	0.062	499.601	88	2.572	0.449	511.576
36	1.004	0.037	505.828	89	2.621	0.449	508.702
37	1.029	0.062	511.576	90	2.633	0.437	505.349
38	1.053	0.062	515.408	91	2.682	0.449	503.433
39	1.090	0.062	519.719	92	2.707	0.462	501.517
40	1.127	0.087	524.030	93	2.731	0.462	500.559
41	1.164	0.087	526.904	94	2.756	0.462	498.164
42	1.188	0.100	530.257	95	2.793	0.449	495.769
43	1.225	0.087	532.173	96	2.829	0.474	493.374
44	1.249	0.112	534.568	97	2.842	0.474	491.937
45	1.274	0.100	536.005	98	2.891	0.487	490.021
46	1.311	0.112	537.442	99	2.903	0.474	487.626
47	1.323	0.137	539.358	100	2.940	0.487	486.668
48	1.372	0.137	538.879	101	2.964	0.499	485.231
49	1.421	0.150	540.316	102	2.989	0.512	482.357
50	1.433	0.162	540.795	103	3.025	0.487	479.004
51	1.482	0.162	539.837	104	3.062	0.499	476.130
52	1.494	0.162	540.316	105	3.087	0.487	473.256
53	1.531	0.162	547.980	106	3.099	0.487	470.861

Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)	Leitura	Deslocamento Horizontal (mm)	Deslocamento Vertical (mm)	Carga Horizontal (N)
107	3.136	0.499	470.382	160	4.654	0.537	415.296
108	3.172	0.512	468.945	161	4.642	0.524	415.775
109	3.197	0.512	467.029	162	4.679	0.524	416.254
110	3.209	0.512	463.676	163	4.703	0.537	415.775
111	3.270	0.499	461.281	164	4.715	0.549	414.338
112	3.270	0.487	458.886	165	4.777	0.549	416.254
113	3.319	0.512	457.449	166	4.777	0.537	415.775
114	3.319	0.512	456.491	167	4.838	0.524	415.775
115	3.368	0.512	454.096	168	4.850	0.537	415.775
116	3.417	0.512	451.222	169	4.862	0.524	415.775
117	3.429	0.512	448.827	170	4.911	0.524	414.817
118	3.454	0.499	446.432	171	4.899	0.524	414.817
119	3.491	0.499	445.474	172	4.936	0.524	413.859
120	3.515	0.524	445.953	173	5.009	0.537	414.338
121	3.527	0.512	444.516	174	5.034	0.537	414.817
122	3.540	0.512	443.558	175	5.058	0.537	415.296
123	3.601	0.537	442.121	176	5.058	0.537	415.296
124	3.613	0.537	440.205	177	5.071	0.524	413.859
125	3.650	0.537	439.247	178	5.144	0.549	414.338
126	3.674	0.537	438.289	179	5.181	0.537	414.817
127	3.711	0.524	435.894	180	5.193	0.549	415.296
128	3.736	0.524	434.457	181	5.181	0.537	414.817
129	3.748	0.524	432.541	182	5.205	0.537	415.775
130	3.785	0.537	432.062	183	5.254	0.537	414.817
131	3.809	0.549	430.625	184	5.267	0.537	413.859
132	3.846	0.537	430.146	185	5.328	0.549	414.817
133	3.895	0.524	428.229	186	5.352	0.549	413.859
134	3.907	0.512	426.313	187	5.340	0.524	415.296
135	3.932	0.524	426.313	188	5.414	0.524	413.380
136	3.944	0.524	424.876	189	5.414	0.537	414.817
137	3.981	0.537	424.397	190	5.475	0.524	413.380
138	4.017	0.537	422.960	191	5.487	0.512	413.380
139	4.042	0.537	422.481	192	5.512	0.524	412.901
140	4.054	0.537	422.481	193	5.561	0.512	413.380
141	4.079	0.549	422.481	194	5.573	0.512	412.901
142	4.115	0.549	422.002	195	5.610	0.512	413.380
143	4.152	0.537	420.565	196	5.646	0.524	415.296
144	4.177	0.537	420.086	197	5.646	0.524	413.380
145	4.238	0.524	419.607	198	5.671	0.537	414.338
146	4.262	0.524	417.691	199	5.720	0.537	413.859
147	4.299	0.549	418.649	200	5.744	0.537	415.296
148	4.287	0.524	418.170	201	5.793	0.524	414.817
149	4.299	0.512	417.212	202	5.781	0.537	414.338
150	4.336	0.512	416.733	203	5.818	0.537	415.296
151	4.385	0.524	416.733	204	5.855	0.537	414.817
152	4.397	0.524	416.254	205	5.891	0.537	415.775
153	4.446	0.524	416.733	206	5.928	0.524	414.817
154	4.458	0.524	417.212	207	5.953	0.537	414.817
155	4.471	0.524	417.212	208	6.002	0.524	414.817
156	4.532	0.524	416.254	209	5.977	0.512	413.859
157	4.520	0.524	414.817	210	6.014	0.524	414.338
158	4.593	0.524	414.817	211	6.063	0.537	415.775
159	4.593	0.537	415.296				

$$\tau = \frac{\text{carga horizontal}}{\text{área da seção transversal}}$$

$$\gamma = \frac{\text{deslocamento horizontal}}{\text{altura inicial}}$$

Tensão cisalhante e deslocamento de cisalhamento do ENSAIO 6:

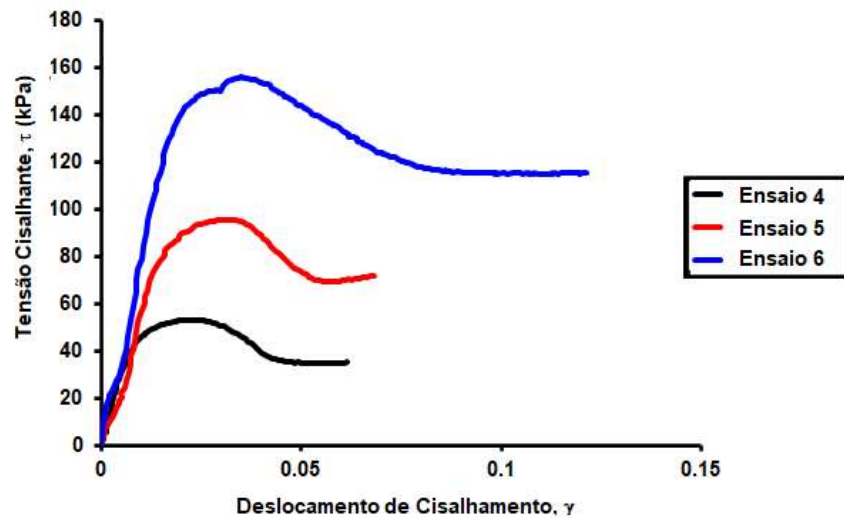
Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ	Leitura	τ (kPa)	γ
1	0.00	0.000	54	153.55	0.031	107	130.662	0.063	160	115.36	0.093
2	9.98	0.000	55	153.95	0.032	108	130.262	0.063	161	115.49	0.093
3	17.03	0.001	56	154.61	0.033	109	129.730	0.064	162	115.63	0.094
4	20.36	0.002	57	154.88	0.033	110	128.799	0.064	163	115.49	0.094
5	21.69	0.002	58	155.28	0.034	111	128.134	0.065	164	115.09	0.094
6	22.35	0.002	59	155.54	0.034	112	127.468	0.065	165	115.63	0.096
7	24.62	0.003	60	155.81	0.035	113	127.069	0.066	166	115.49	0.096
8	27.68	0.004	61	155.68	0.035	114	126.803	0.066	167	115.49	0.097
9	29.41	0.004	62	155.54	0.036	115	126.138	0.067	168	115.49	0.097
10	32.07	0.005	63	155.41	0.037	116	125.339	0.068	169	115.49	0.097
11	36.46	0.006	64	154.88	0.037	117	124.674	0.069	170	115.23	0.098
12	40.98	0.006	65	154.74	0.038	118	124.009	0.069	171	115.23	0.098
13	46.44	0.007	66	154.74	0.039	119	123.743	0.070	172	114.96	0.099
14	52.69	0.007	67	154.61	0.039	120	123.876	0.070	173	115.09	0.100
15	59.21	0.008	68	153.68	0.040	121	123.477	0.071	174	115.23	0.101
16	64.93	0.009	69	153.55	0.040	122	123.210	0.071	175	115.36	0.101
17	70.65	0.009	70	152.88	0.041	123	122.811	0.072	176	115.36	0.101
18	74.91	0.009	71	152.62	0.042	124	122.279	0.072	177	114.96	0.101
19	79.04	0.010	72	152.08	0.042	125	122.013	0.073	178	115.09	0.103
20	84.36	0.011	73	151.29	0.043	126	121.747	0.073	179	115.23	0.104
21	89.95	0.011	74	150.75	0.043	127	121.082	0.074	180	115.36	0.104
22	95.14	0.012	75	150.09	0.044	128	120.682	0.075	181	115.23	0.104
23	100.32	0.012	76	149.29	0.044	129	120.150	0.075	182	115.49	0.104
24	104.72	0.013	77	148.62	0.045	130	120.017	0.076	183	115.23	0.105
25	107.91	0.014	78	147.69	0.046	131	119.618	0.076	184	114.96	0.105
26	111.37	0.014	79	147.43	0.047	132	119.485	0.077	185	115.23	0.107
27	115.09	0.015	80	146.76	0.047	133	118.953	0.078	186	114.96	0.107
28	119.35	0.015	81	146.23	0.048	134	118.420	0.078	187	115.36	0.107
29	123.48	0.016	82	145.43	0.048	135	118.420	0.079	188	114.83	0.108
30	126.67	0.016	83	144.50	0.049	136	118.021	0.079	189	115.23	0.108
31	129.73	0.017	84	143.97	0.049	137	117.888	0.080	190	114.83	0.109
32	131.73	0.018	85	143.57	0.050	138	117.489	0.080	191	114.83	0.110
33	134.25	0.018	86	142.90	0.051	139	117.356	0.081	192	114.69	0.110
34	136.78	0.019	87	142.50	0.051	140	117.356	0.081	193	114.83	0.111
35	138.78	0.019	88	142.10	0.051	141	117.356	0.082	194	114.69	0.111
36	140.51	0.020	89	141.31	0.052	142	117.223	0.082	195	114.83	0.112
37	142.10	0.021	90	140.37	0.053	143	116.824	0.083	196	115.36	0.113
38	143.17	0.021	91	139.84	0.054	144	116.691	0.084	197	114.83	0.113
39	144.37	0.022	92	139.31	0.054	145	116.558	0.085	198	115.09	0.113
40	145.56	0.023	93	139.04	0.055	146	116.025	0.085	199	114.96	0.114
41	146.36	0.023	94	138.38	0.055	147	116.292	0.086	200	115.36	0.115
42	147.29	0.024	95	137.71	0.056	148	116.158	0.086	201	115.23	0.116
43	147.83	0.024	96	137.05	0.057	149	115.892	0.086	202	115.09	0.116
44	148.49	0.025	97	136.65	0.057	150	115.759	0.087	203	115.36	0.116
45	148.89	0.025	98	136.12	0.058	151	115.759	0.088	204	115.23	0.117
46	149.29	0.026	99	135.45	0.058	152	115.626	0.088	205	115.49	0.118
47	149.82	0.026	100	135.19	0.059	153	115.759	0.089	206	115.23	0.119
48	149.69	0.027	101	134.79	0.059	154	115.892	0.089	207	115.23	0.119
49	150.09	0.028	102	133.99	0.060	155	115.892	0.089	208	115.23	0.120
50	150.22	0.029	103	133.06	0.061	156	115.626	0.091	209	114.96	0.120
51	149.95	0.030	104	132.26	0.061	157	115.227	0.090	210	115.09	0.120
52	150.09	0.030	105	131.46	0.062	158	115.227	0.092	211	115.49	0.121
53	152.22	0.031	106	130.79	0.062	159	115.360	0.092			

O maior valor de tensão cisalhante é o pico, e o último é o valor crítico.

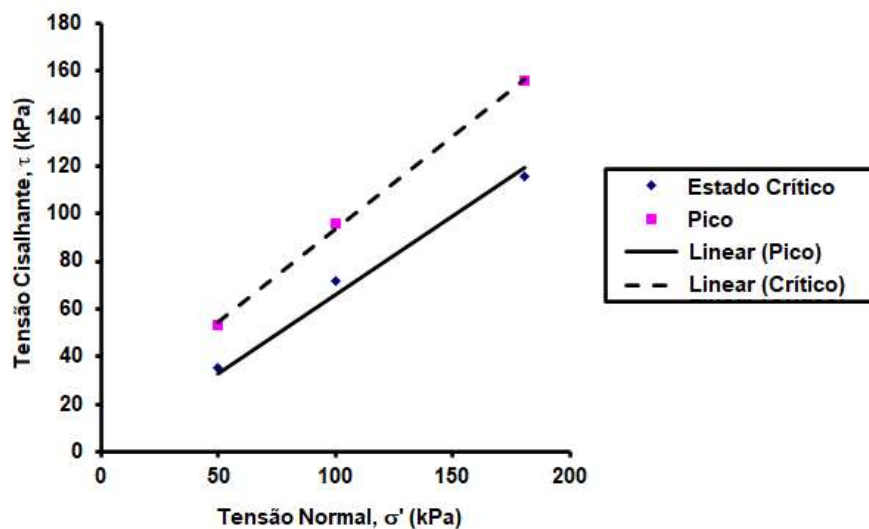
$$\tau_{p6} = 155,81 \text{ kPa (Leitura 60)}$$

$$\tau_{cr6} = 115,49 \text{ kPa (Leitura 211)}$$

Com os 03 ensaios, traça-se o gráfico $\tau \times \gamma$:



E também a representação de τ_p e τ_{cr} :



E assim, através de ferramentas gráficas, estima-se o ângulo de atrito de pico e no estado crítico para a areia densa:

$$\Phi_p \approx 38^\circ$$

$$\Phi_{cr} \approx 33^\circ$$

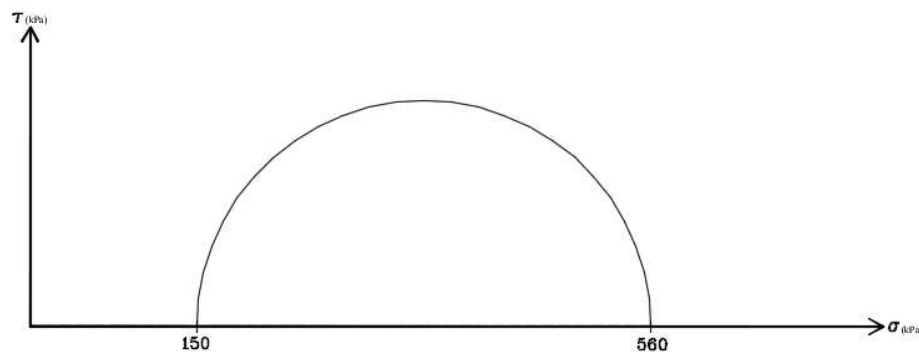
Resistência 03.11

Uma amostra de areia submetida a um ensaio de compressão triaxial rompeu quando as tensões principais eram 150 kPa e 560 kPa.

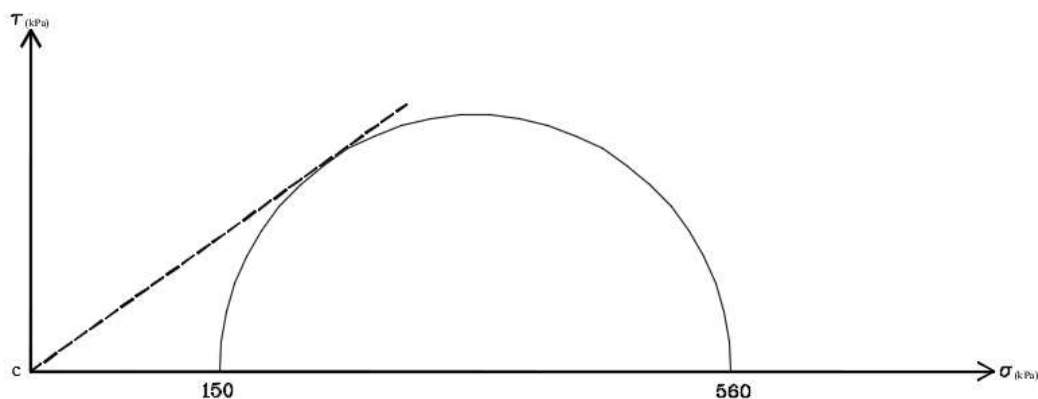
Utilizando o diagrama de Mohr, determine o ângulo de atrito interno do material, e o ângulo α do plano de ruptura com a direção da tensão principal menor.

Resolução 03.11

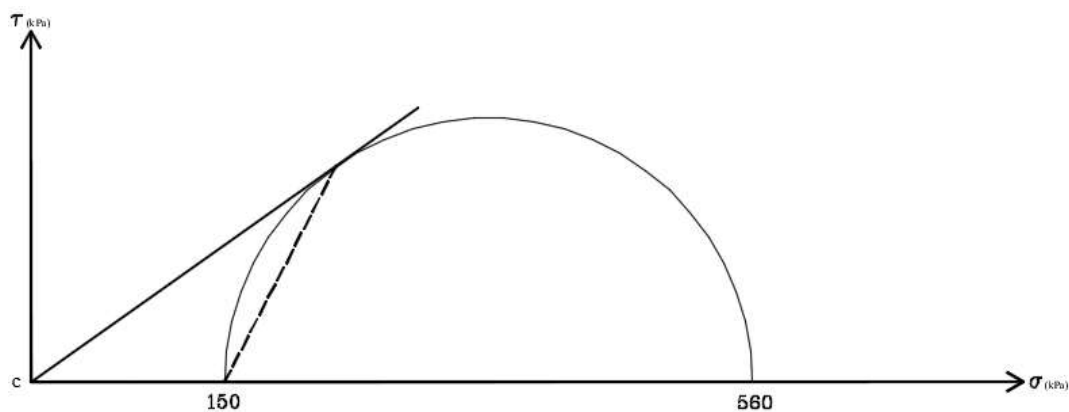
- 1) Traçam-se as tensões principais menor (σ_3) e maior (σ_1), construindo a semi-circunferência:



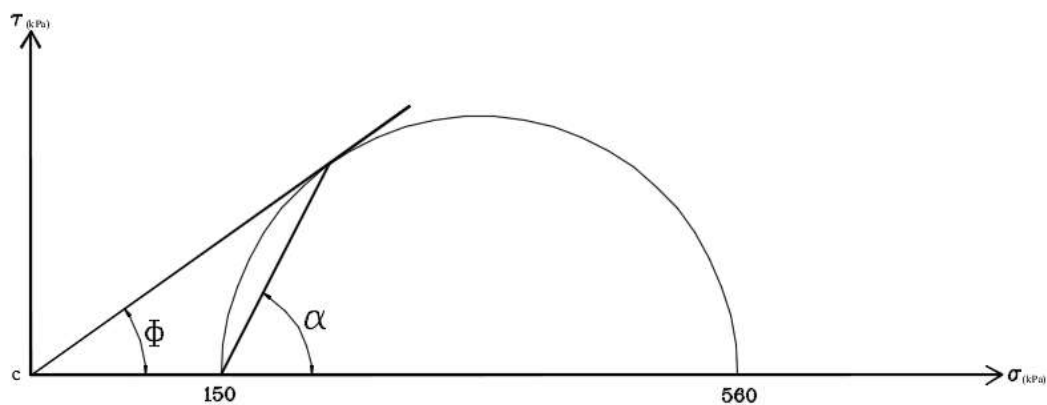
- 2) Sabendo-se que se trata de uma areia, a coesão é aproximadamente nula. Portanto a envoltória de ruptura deve partir da tensão cisalhante $\tau = 0$, sendo este o valor da coesão c . A envoltória de ruptura deve tangenciar o círculo de Mohr:



- 3) O ponto de interseção entre a envoltória de ruptura e o círculo de Mohr representa a combinação de tensões que rompe a amostra de solo. Neste ponto, traça-se a inclinação entre a direção da tensão principal menor e o plano de ruptura:



- 4) Determinam-se o ângulo de atrito (Φ) e o ângulo entre o plano de ruptura e a direção da tensão principal menor (α):

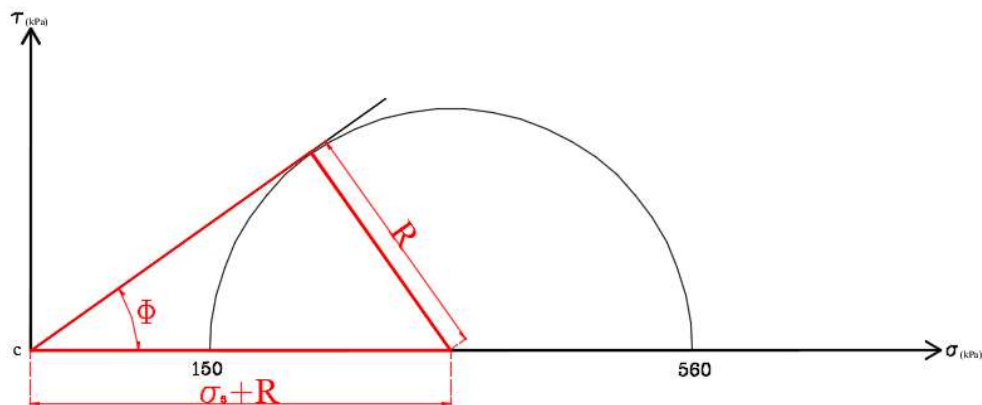


5)

a) Através de transferidor ou ferramentas gráficas, obtém-se:

$$\Phi = 35^\circ \text{ e } \alpha = 63^\circ.$$

b) Os ângulos podem ser obtidos também via geometria analítica:



$$\sin \Phi = \frac{R}{\sigma_3 + R}$$

Sabendo que R é igual à metade da tensão desviadora σ_d :

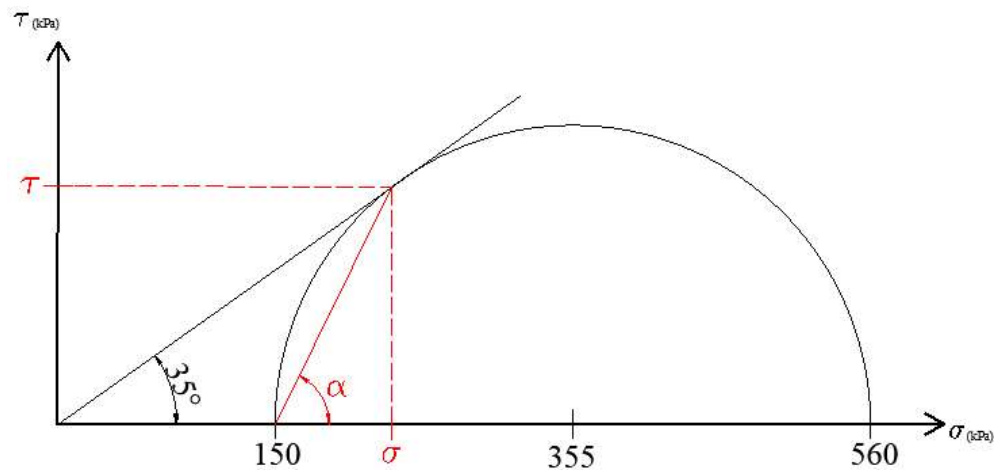
$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = 560 - 150 = 410$$

$$R = \frac{\sigma_d}{2} = \frac{410}{2} = 205$$

$$\Phi = \arcsin \left(\frac{205}{150 + 205} \right) \approx 35,27^\circ$$

i)

Inicialmente, deve-se determinar as coordenadas (τ e σ) do ponto de interseção entre a envoltória de ruptura e o círculo de Mohr:



Uma possibilidade para encontrar as coordenadas é comparar as equações da reta e da circunferência traçadas:

Reta: Lei de Coulomb

$$\tau = c + \tan(\Phi) \cdot \sigma$$

$$1. \tau = 0 + \tan(35,27^\circ) \cdot \sigma$$

Circunferência: Círculo de Mohr

$$(\tau - y)^2 + (\sigma - x)^2 = R^2$$

Sendo y e x os deslocamentos do centro da circunferência

$$(\tau - 0)^2 + (\sigma - 355)^2 = 205^2$$

$$\tau^2 + (\sigma - 355)^2 = 205^2$$

$$II. \tau = \sqrt{205^2 - (\sigma - 355)^2}$$

Para determinar o ponto de encontro, basta igualar as equações I e II (trata-se do ponto de interseção entre a reta e a circunferência):

$$\tan(35,27^\circ) \cdot \sigma = \sqrt{205^2 - (\sigma - 355)^2}$$

$$0,707 \cdot \sigma = \sqrt{42.025 - (\sigma^2 - 2 \cdot \sigma \cdot 355 + 355^2)}$$

$$(0,707 \cdot \sigma)^2 = 42.025 - \sigma^2 + 710 \cdot \sigma - 126.025$$

$$0,500 \cdot \sigma^2 = -84.000 - \sigma^2 + 710 \cdot \sigma \Rightarrow 1,5 \cdot \sigma^2 - 710 \cdot \sigma + 84.000 = 0$$

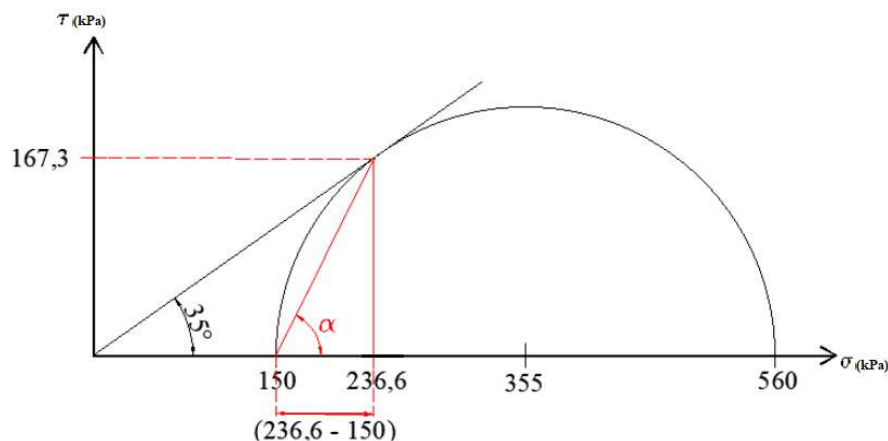
Resolvendo a equação de 2º grau (por Bhaskara, por exemplo), tem-se:

$$\sigma_1 = 233,3; \sigma_2 = 240 \Rightarrow \sigma \approx 236,6 \text{ kPa}$$

Substituindo σ em qualquer uma das equações (I ou II), encontra-se a tensão cisalhante:

$$\tau \approx 167,3 \text{ kPa}$$

Definidas as coordenadas do ponto de interseção, traça-se um triângulo que possibilite determinar o ângulo α :



$$\tan(\alpha) = \frac{167,3}{236,6 - 150}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{167,3}{236,6 - 150}\right)$$

$$\alpha \approx 62,6^\circ$$

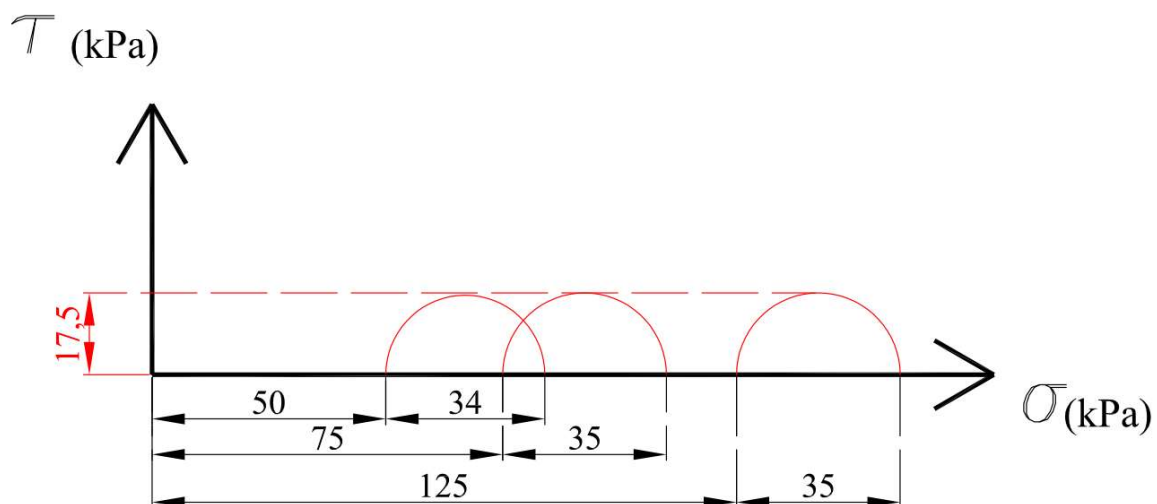
Resistência 03.12

Amostras de uma argila normalmente adensada saturada foram submetidas a ensaios de compressão triaxial do tipo UU (não adensado - não drenado), obtendo-se os seguintes resultados:

- 1) Ensaio 1:
 - Tensão confinante: 50 kPa.
 - Tensão axial no momento de ruptura: 84 kPa.
- 2) Ensaio 2:
 - Tensão confinante: 75 kPa.
 - Tensão axial no momento de ruptura: 110 kPa.
- 3) Ensaio 3:
 - Tensão confinante: 125 kPa.
 - Tensão axial no momento de ruptura: 160 kPa.

Com base nessas informações, quais os parâmetros de resistência em termos de tensão total desse solo?

Resolução 03.12



Visto que trata-se de um ensaio **não adensado** e **não drenado**, a única variação que ocorre é na **poropressão** do solo. O aumento na tensão de confinamento **não** gera um aumento na tensão desviadora.

Portanto, para qualquer valor de σ_3 , tem-se que $\tau = 17,5$ kPa e $\Phi = 0^\circ$.

Resistência 03.13

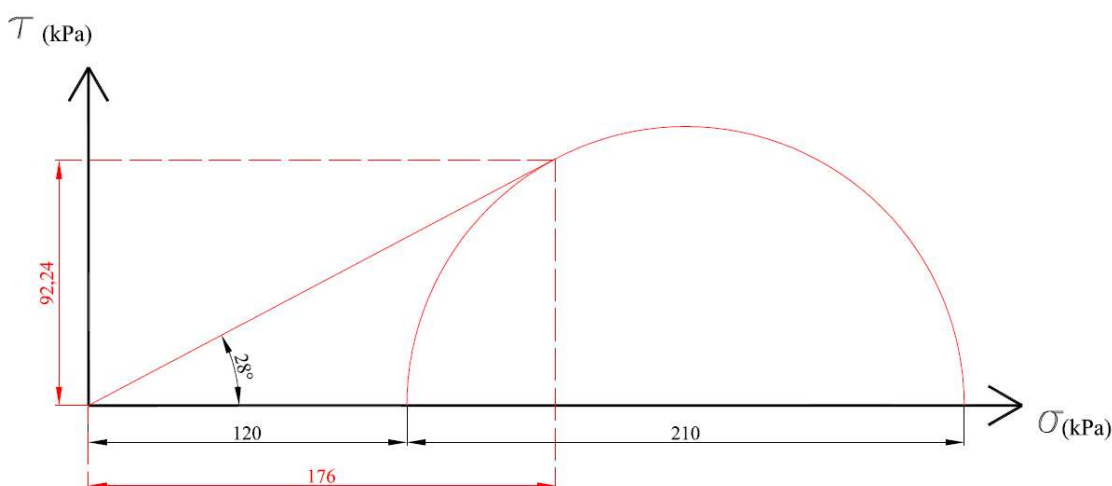
Um ensaio triaxial adensado drenado foi realizado em uma argila normalmente adensada aplicando-se uma tensão confinante de 120 kPa. A amostra rompeu quando a tensão desviadora era de 210 kPa. Com base nessas informações, determine:

- O ângulo de atrito deste material.
- O ângulo que o plano de ruptura forma com o plano principal maior.

Resolução 03.13

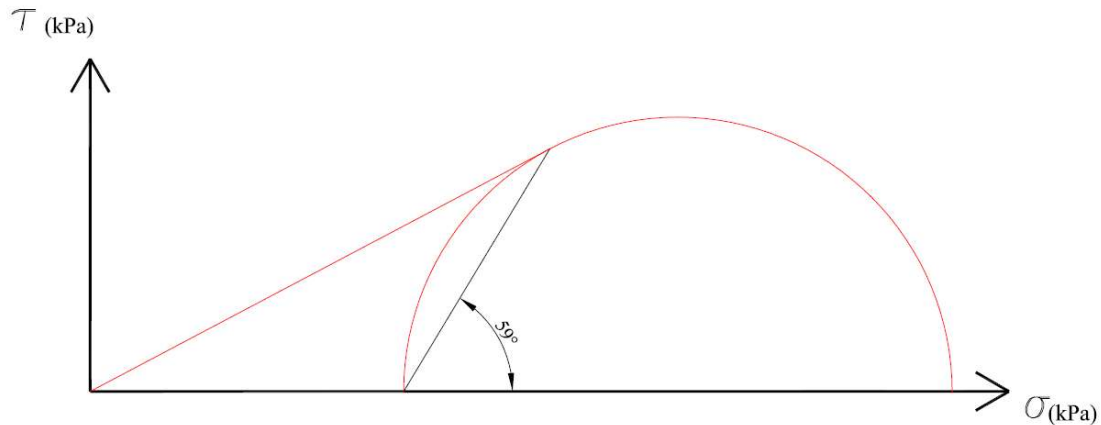
a)

Sabe-se que para argilas normalmente adensadas, a coesão é nula. Logo:



Marcadas a tensões $\sigma_3 = 120$ kPa e $\sigma_1 = 330$ kPa, traça-se a envoltória de ruptura partindo da origem e afere-se o ângulo de atrito $\Phi \approx 28^\circ$.

b)



Mede-se o ângulo entre a horizontal e verifica-se o ponto em que a envoltória de ruptura intercepta o círculo de Mohr. Tem-se que $\alpha \approx 59^\circ$.

Resistência 03.14

Dois ensaios triaxiais foram realizados em uma argila saturada, sendo obtidos os seguintes dados:

- **Ensaio 1:**

Tensão confinante: 70 kPa

Tensão desviadora no momento da ruptura: 130 kPa

- **Ensaio 2:**

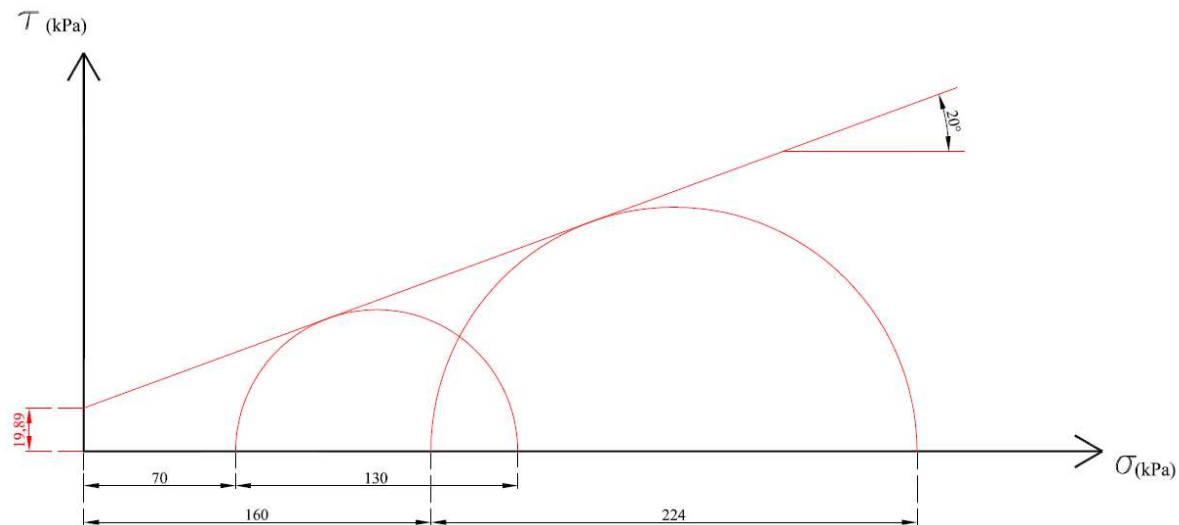
Tensão confinante: 160 kPa

Tensão desviadora no momento da ruptura: 224 kPa.

Com base nesses resultados, determine o ângulo de atrito e a coesão desse solo e analise as seguintes afirmativas:

- Os resultados não condizem com os parâmetros esperados para um solo argiloso.
- Trata-se de uma argila normalmente adensada.
- Os dados fornecidos são insuficientes para descrever o histórico de tensões do solo em questão.
- Trata-se de uma argila pré-adensada.

Resolução 03.14



Traçado o círculo de Mohr para o primeiro ensaio ($\sigma_3 = 70$ kPa e $\sigma_1 = 200$ kPa) e para o segundo ensaio ($\sigma_3 = 160$ kPa e $\sigma_1 = 284$ kPa), tem-se o valor do ângulo de atrito $\Phi \approx 20^\circ$ e o valor da coesão é $c \approx 20$ kPa.

a) Os resultados não condizem com os parâmetros esperados para um solo argiloso.

Falso! Os parâmetros são adequados para um solo argiloso pré-adensado, portanto a alternativa a está incorreta.

b) Trata-se de uma argila normalmente adensada.

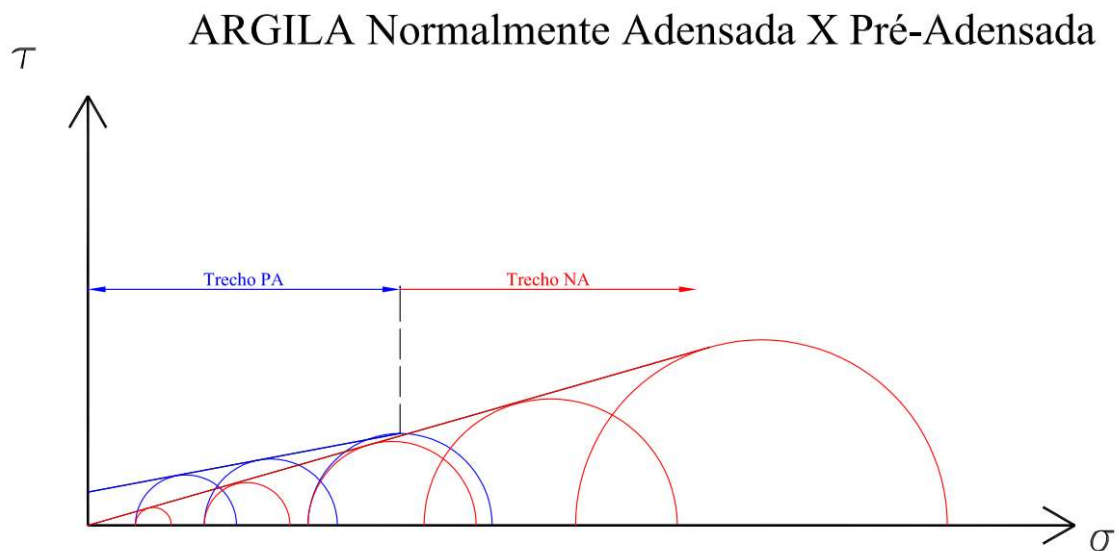
Falso! Argilas normalmente adensadas, em termos gráficos, apresentam coesão nula, portanto a alternativa b está incorreta.

c) Os dados fornecidos são insuficientes para descrever o histórico de tensões do solo em questão.

Falso! Com o círculo de Mohr e o envoltório de ruptura, pode-se estimar o histórico de tensões do solo, portanto a alternativa c está incorreta.

d) Trata-se de uma argila pré-adensada.

Verdadeiro! Sabe-se que, em termos gráficos, a argila pré-adensada apresenta um valor de coesão maior que zero, comportando-se de maneira semelhante a uma areia. Portanto, a alternativa *d* está correta.



Resistência 03.15

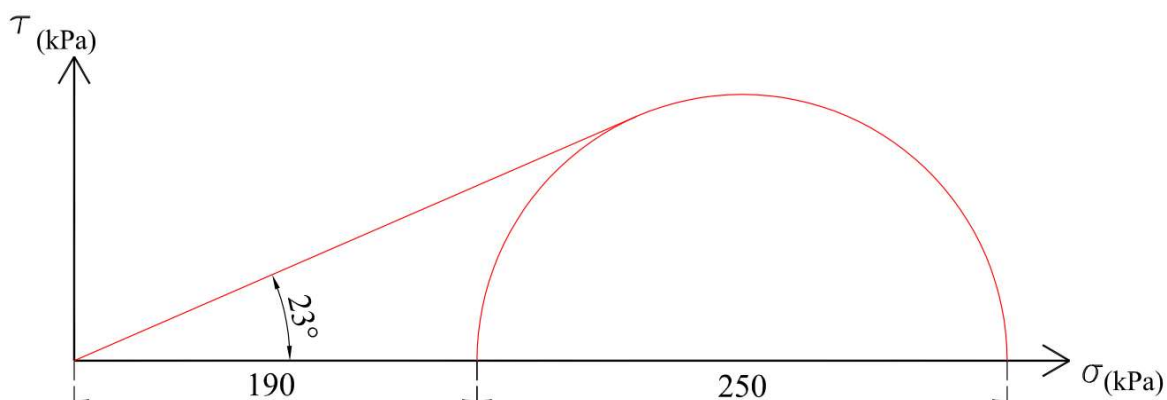
Um ensaio triaxial adensado drenado foi conduzido em uma argila normalmente adensada com uma tensão de 190 kPa. A tensão desviadora na ruptura foi de 250 kPa. Com base nesses dados, determine:

- O ângulo de atrito desse solo.
- O ângulo que o plano de ruptura forma com o plano principal maior.
- A tensão normal e a tensão cisalhante no plano de ruptura.

Resolução 03.15

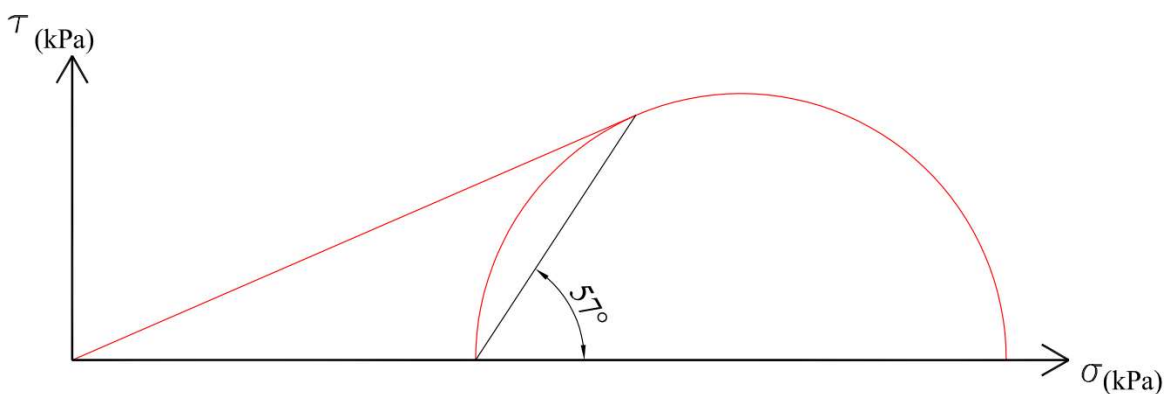
a)

Visto que se trata de uma argila normalmente adensada, tem-se que, em termos gráficos, a coesão é nula.



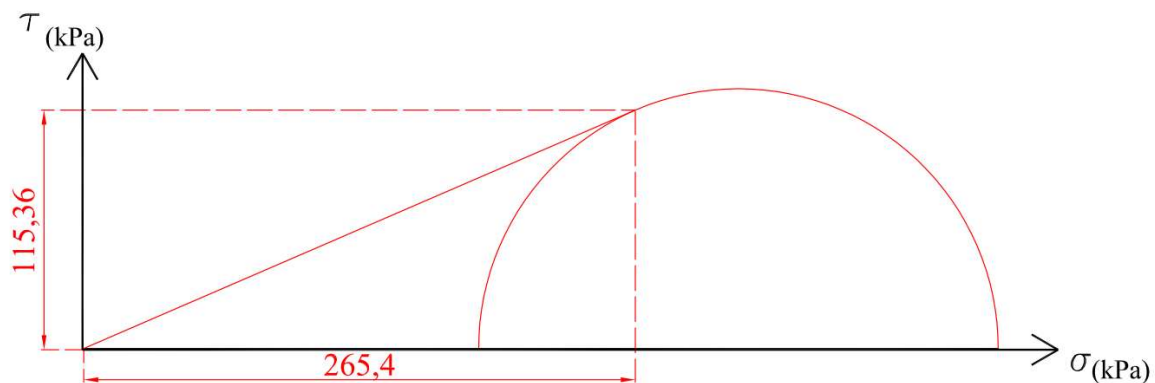
Portanto, determina-se o ângulo de atrito $\Phi = 23^\circ$.

b)



Verifica-se o ângulo entre a horizontal e o ponto onde o envoltório de ruptura intercepta o círculo de Mohr. Obtém-se que $\alpha = 57^\circ$.

c)



Verifica-se o valor da tensão de cisalhamento no ponto onde o envoltório de ruptura intercepta o círculo de Mohr. Tem-se que $\tau = 116 \text{ kPa}$ e $\sigma = 265 \text{ kPa}$.

Resistência 03.16

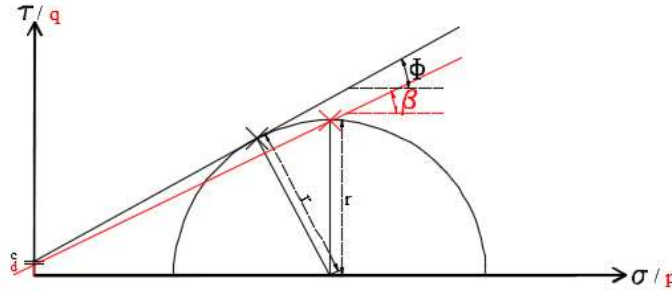
A realização de ensaios triaxiais permitiu definir a resistência ao cisalhamento de uma argila com ângulo de atrito efetivo de $28,9^\circ$ e coesão efetiva de 15 kPa .

- a) Determine os valores de β e d para que se possa realizar uma análise em termos de trajetória de tensões.
- b) Cinco carregamentos distintos no solo do exercício foram avaliados por meio das trajetórias de tensão apresentadas na tabela a seguir. Em qual (quais) desse(s) ensaio(s) o solo atingiria sua resistência ao cisalhamento?

Ensaio	Origem (O)		Ponto A		Ponto B	
	p	q	p	q	p	q
1	0	0	10	0	32	12
2	0	0	20	0	70	30
3	0	0	40	0	200	120
4	0	0	80	0	280	120
5	0	0	160	0	848	528

Resolução 03.16

A trajetória de tensões é dada pelas seguintes relações:



$$q = d + p \cdot \tan \beta$$

$$c = \frac{d}{\cos \Phi} \rightarrow d = c \cdot \cos \Phi$$

$$\frac{c}{d} = \frac{\tan \Phi}{\tan \beta} \rightarrow \tan \beta = \tan \Phi \cdot \frac{d}{c}$$

a)

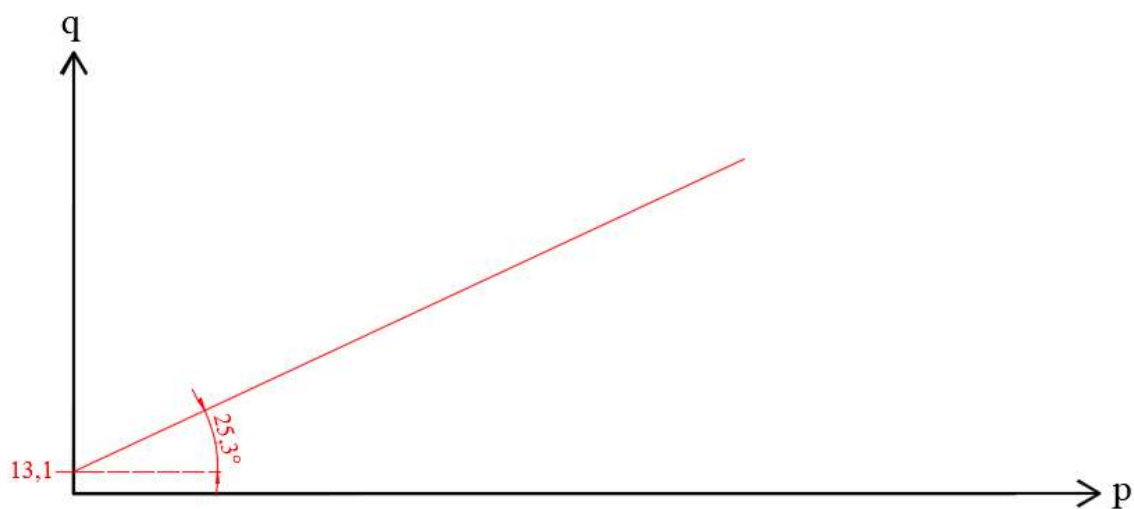
Aplicando os valores de $\Phi = 28,9^\circ$ e $c = 15 \text{ kPa}$:

$$d = 15 \cdot \cos 28,9^\circ = 13,1 \text{ kPa}$$

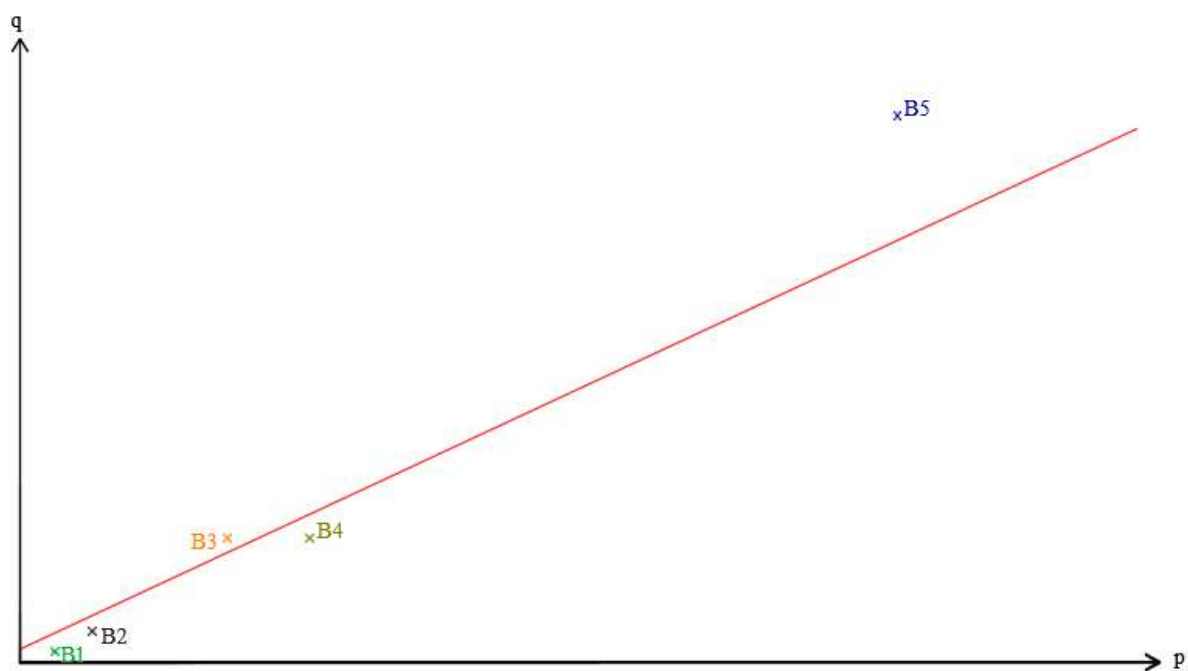
$$\tan \beta = \tan 28,9^\circ \cdot \frac{13,1}{15} = 0,473$$

$$\beta = \arctan (0,473) = 25,3^\circ$$

b) Com os coeficientes da equação $p \times q$ traça-se o gráfico correspondente:



Desenham-se no gráfico os pontos correspondentes aos 05 ensaios:



Conclui-se que os carregamentos 3 e 5 ultrapassariam a resistência do solo, pois estão acima da trajetória de tensões (em vermelho).

Resistência 03.17

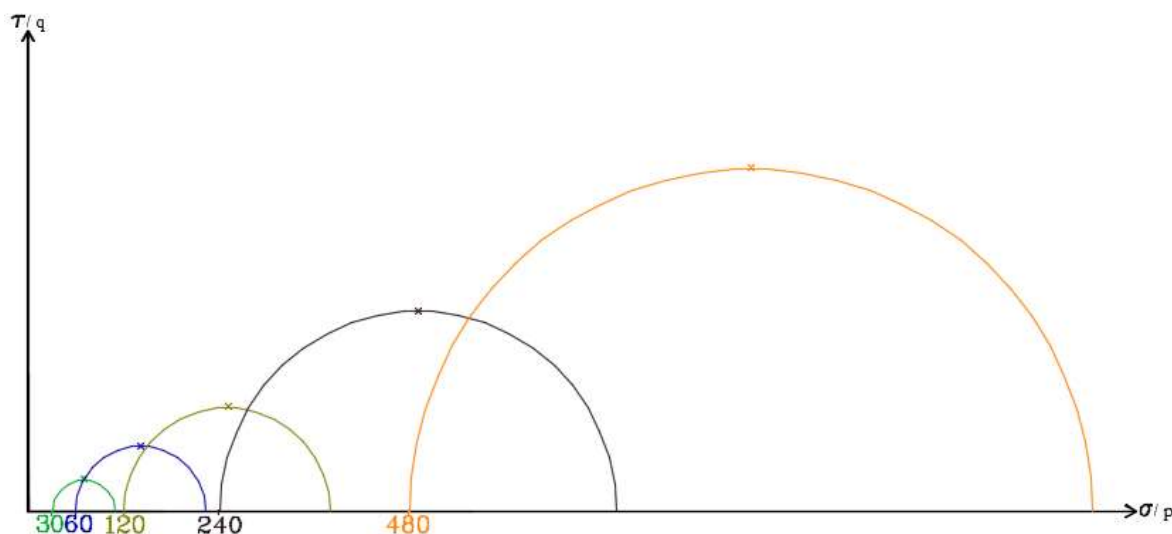
A tabela a seguir exibe resultados de uma série de ensaios triaxiais adensados-drenados em um solo granular. Desenhe os caminhos de tensão para cada ensaio no espaço p' - q e estabeleça a linha de ruptura que passa pela origem e conecta os pontos de ruptura.

Ensaio	$\sigma_3 (kPa)$	$\sigma_{drupt} (kPa)$
1	30	82,5
2	60	165
3	120	264
4	240	504
5	480	864

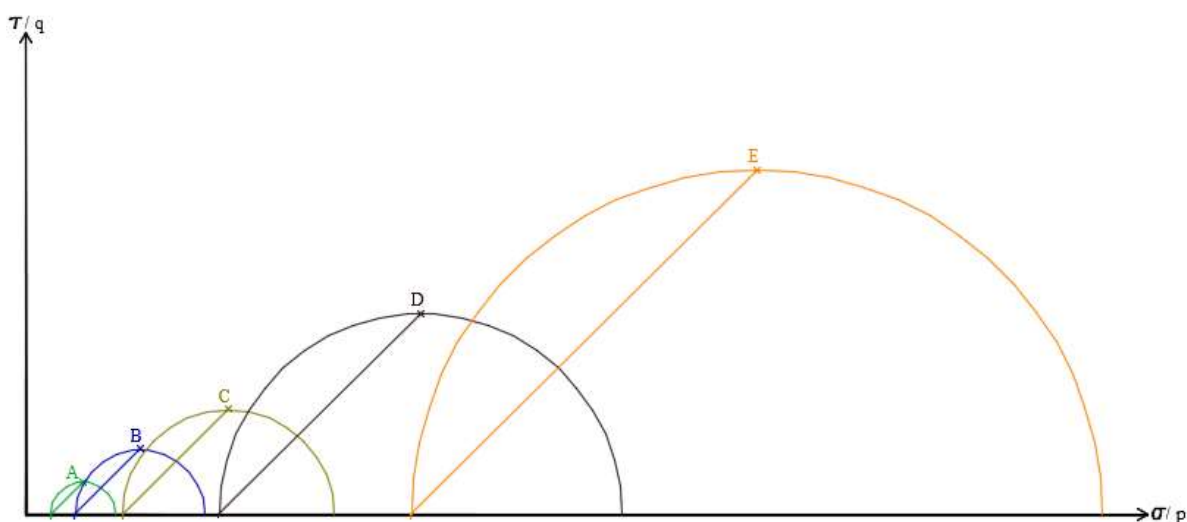
Com base nos resultados obtidos, qual é o ângulo β para esse material?

Resolução 03.17

Inicialmente, traçam-se os círculos de Mohr para os 05 ensaios, através da tensão principal menor σ_3 e da tensão desviadora σ_d :



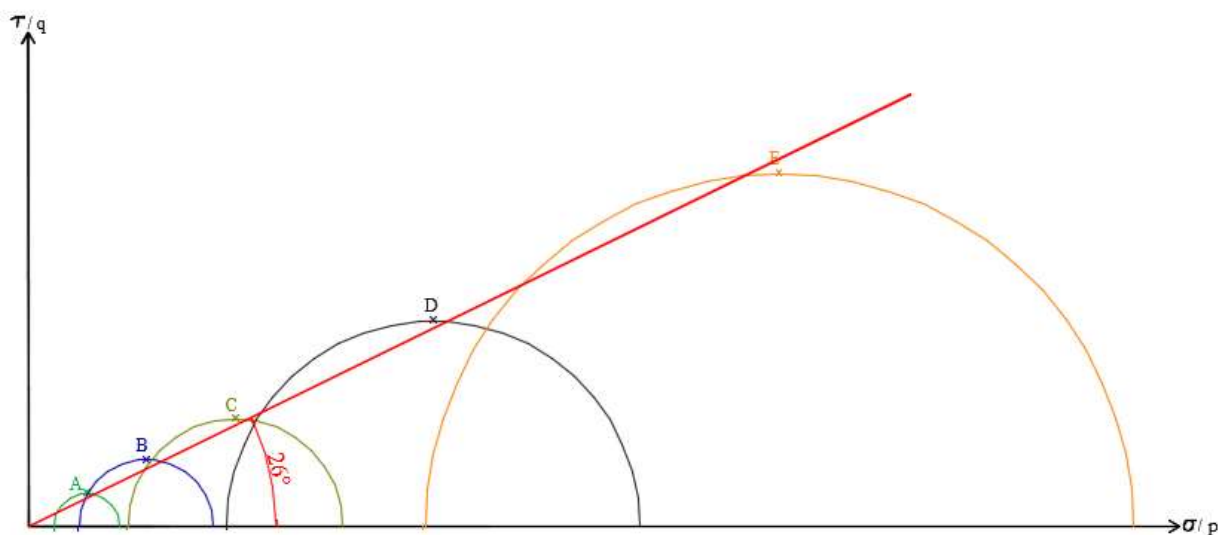
Então desenham-se as trajetórias de tensões de cada ensaio triaxial, conectando a tensão principal menor à tensão cisalhante máxima.



Os pontos A, B, C, D e E representam os seguintes valores:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ e } q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Como sugere o enunciado, se estabelece a linha de ruptura que passa pela origem do gráfico. Esta linha deve se aproximar aos pontos A, B, C, D e E:



Portanto, através de transferidor ou outra ferramenta gráfica, determina-se o ângulo $\varphi \approx 26^\circ$.

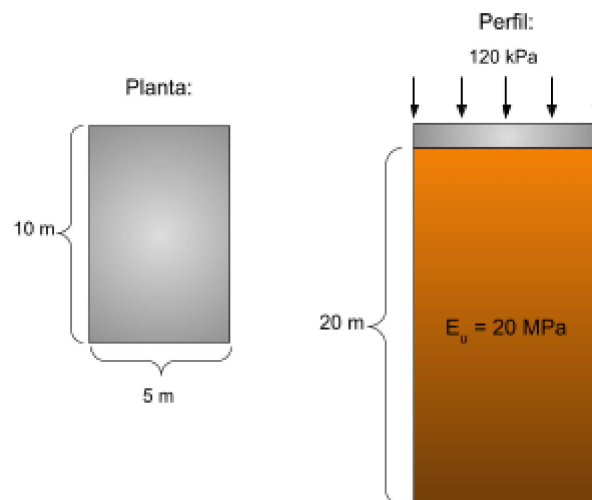
Adensamento 04.01

Uma fundação retangular flexível com 5 metros de largura e 10 metros de comprimento deve ser construída sobre a superfície de uma camada de argila, com 20 metros de espessura, com módulo não drenado de 20 MPa. A fundação suportará uma tensão de 120 kPa.

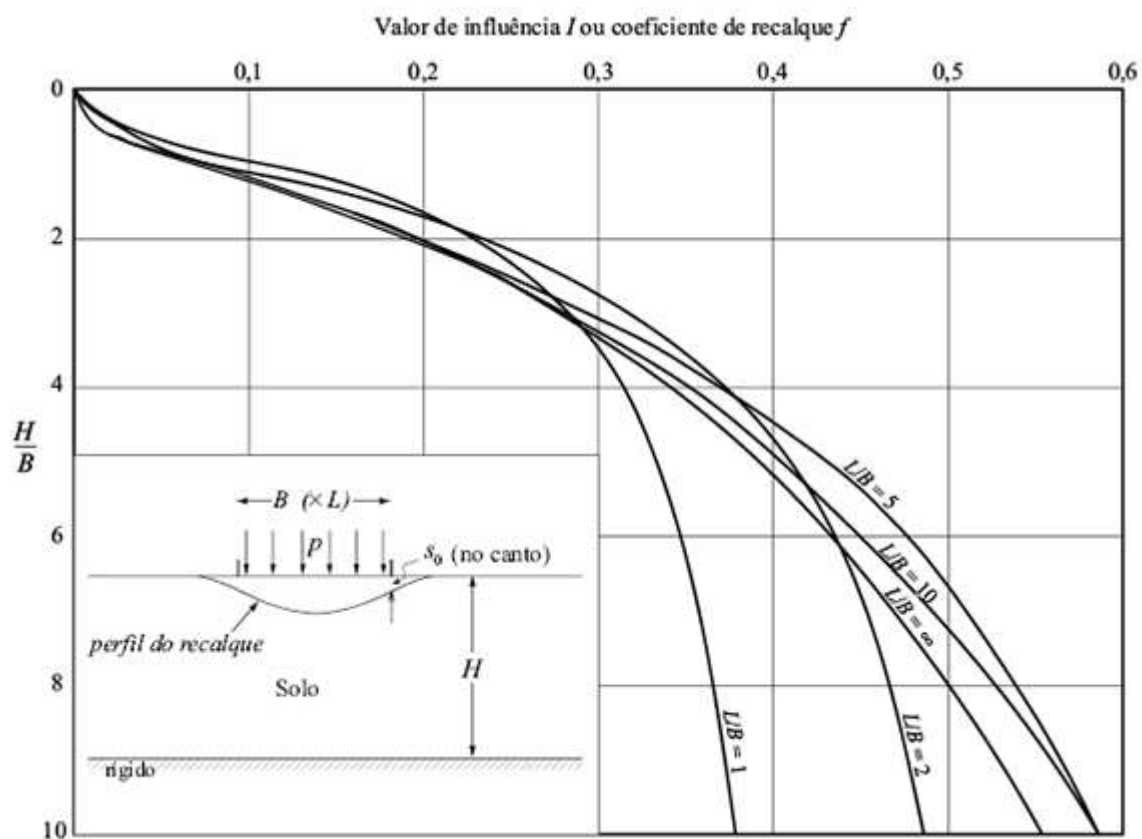
- a) Determine o recalque imediato no canto da fundação.
- b) Determine o recalque imediato no centro da fundação.

Resolução 04.01

Representação do caso:



Recalque imediato (solução de Ueshita e Meyerhof para estruturas flexíveis):

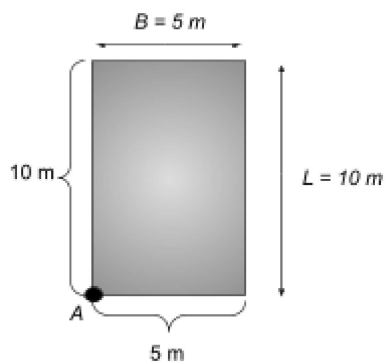


BARNES, 2016

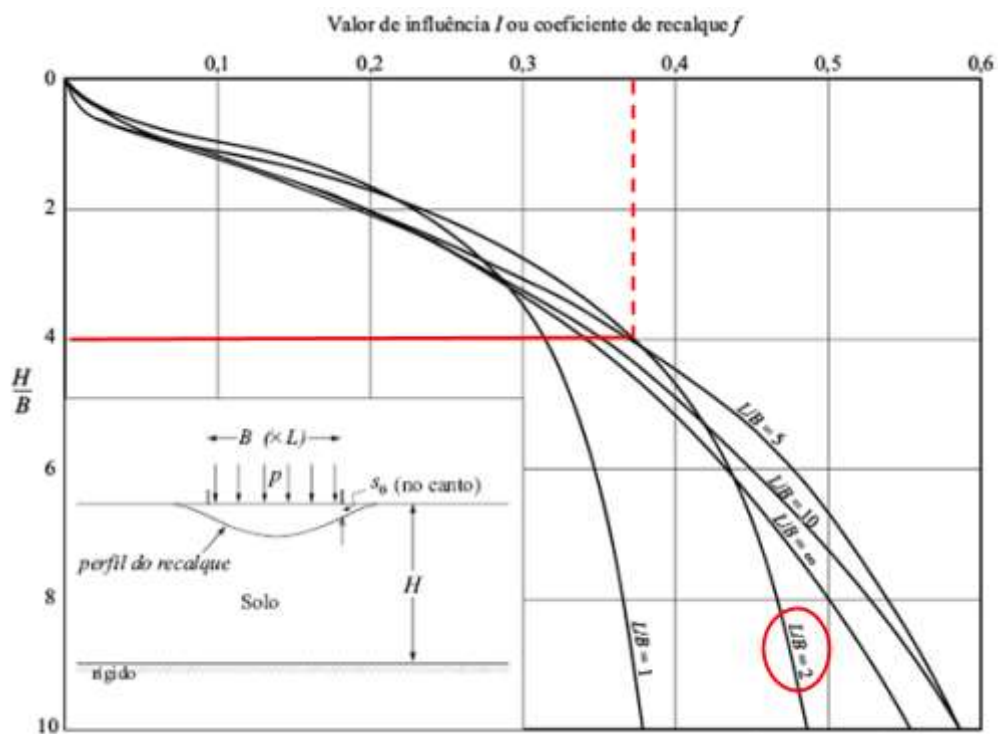
$$H = 20 \text{ m}$$

$$\sigma = 120 \text{ kPa} = 0,12 \text{ MPa}, E_u = 20 \text{ MPa}$$

a)



$$H/B = 20/5 = 4; L/B = 10/5 = 2$$



BARNES, 2016

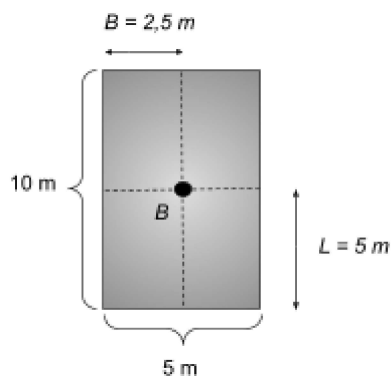
$$f \approx 0,37$$

$$\rho_A = \frac{0,12 \cdot 5}{20} \cdot 0,37$$

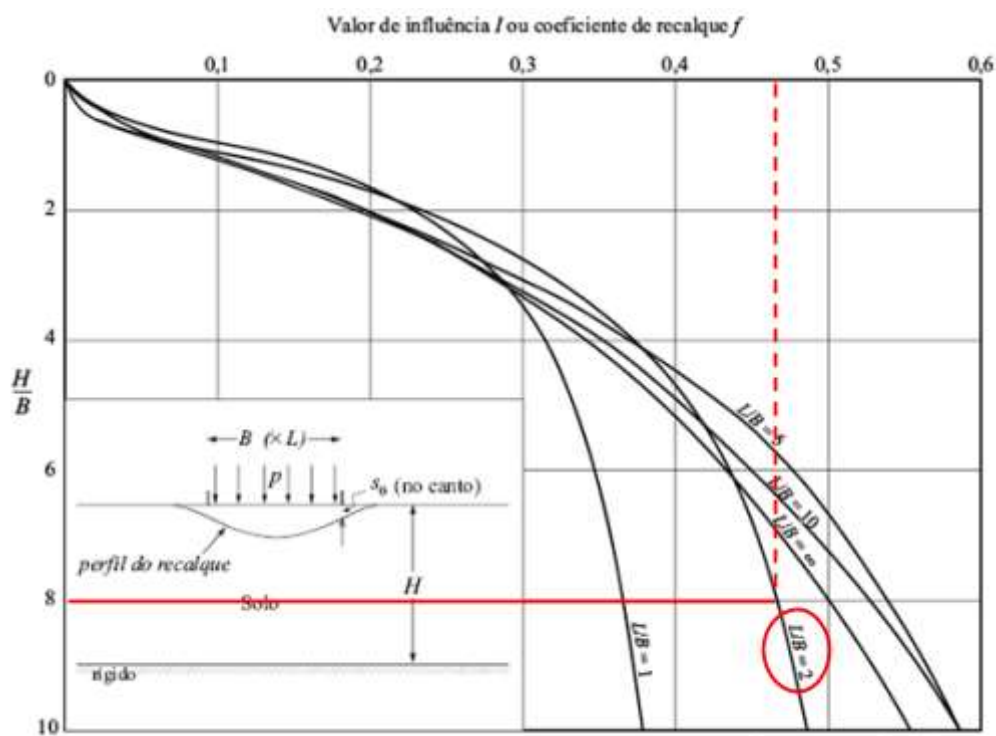
$$\rho_A \approx 0,0111 \text{ m} \approx 1,1 \text{ cm}$$

b)

O ponto de interesse sempre estará nos vértices das figuras, portanto divide-se a planta em retângulos menores.



$$H/B = 20/2,5 = 8; L/B = 5/2,5 = 2$$



BARNES, 2016

$$f \approx 0,47$$

$$\rho_{B'} = \frac{0,12 \cdot 2,5}{20} \cdot 0,47 \approx 0,00705 \text{ m}$$

$$\rho_B = \rho_{B'} \cdot 4 \approx 0,0282 \text{ m} \approx 2,8 \text{ cm}$$

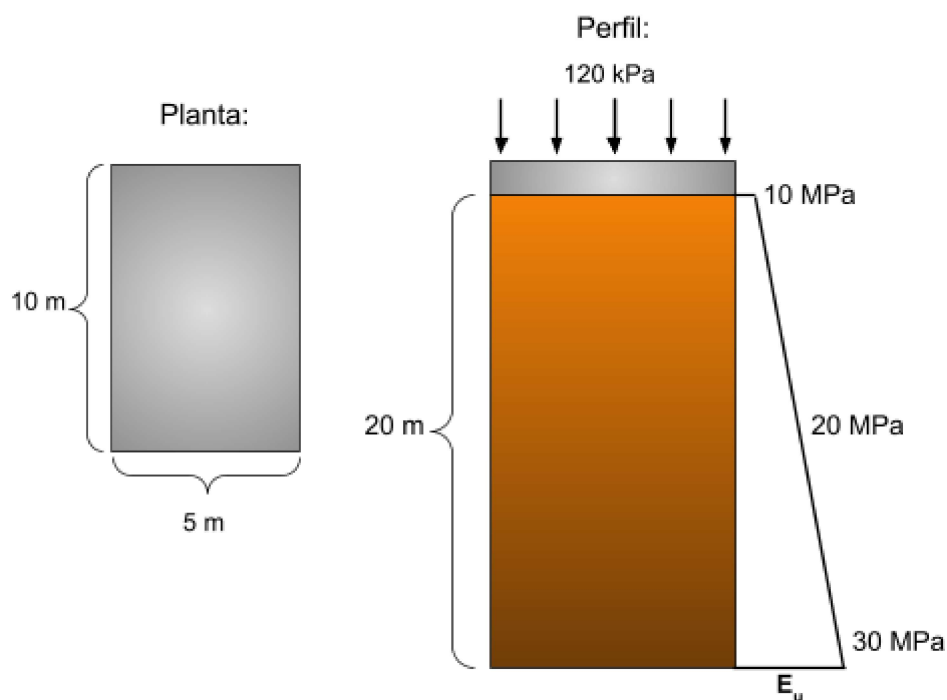
Adensamento 04.02

Uma fundação retangular flexível com 5 metros de largura e 10 metros de comprimento, deve ser construída sobre a superfície de uma camada de argila, com 20 metros de espessura, em que o módulo não drenado aumenta de 10 MPa, no nível do terreno, para 30 MPa, na base da argila. A fundação suportará uma tensão de 120 kPa.

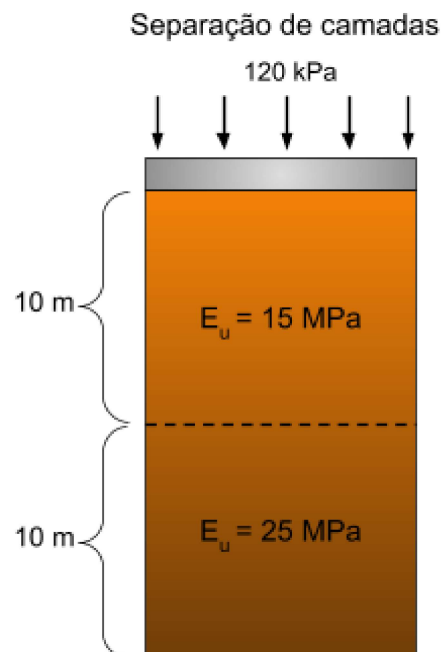
- Determine o recalque imediato no canto da fundação.
- Determine o recalque imediato no centro da fundação.

Resolução 04.02

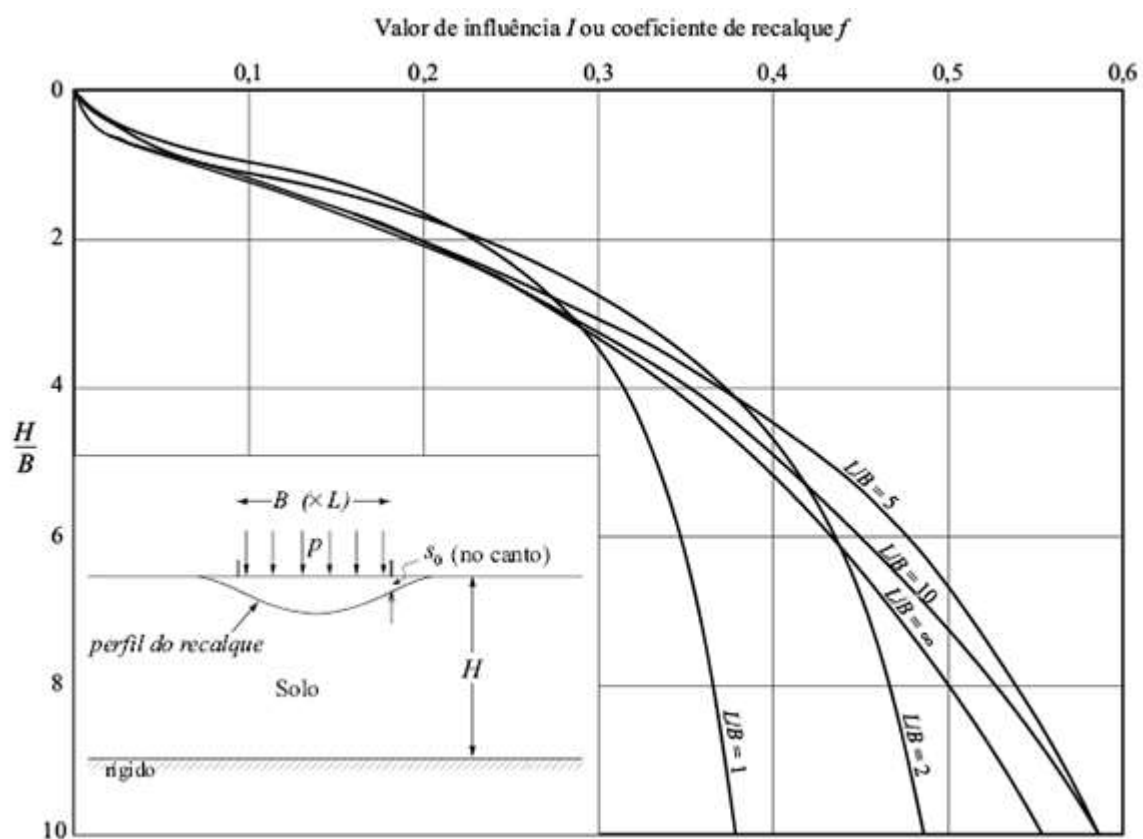
Representação do caso:



Para efeitos de cálculos, divide-se o solo em camadas com igual módulo não drenado, referente à média do valor de cada camada.



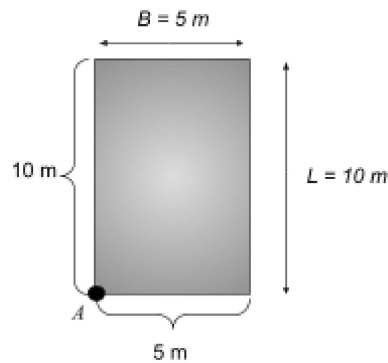
Recalque imediato (solução de Ueshita e Meyerhof para estruturas flexíveis):



BARNES, 2016

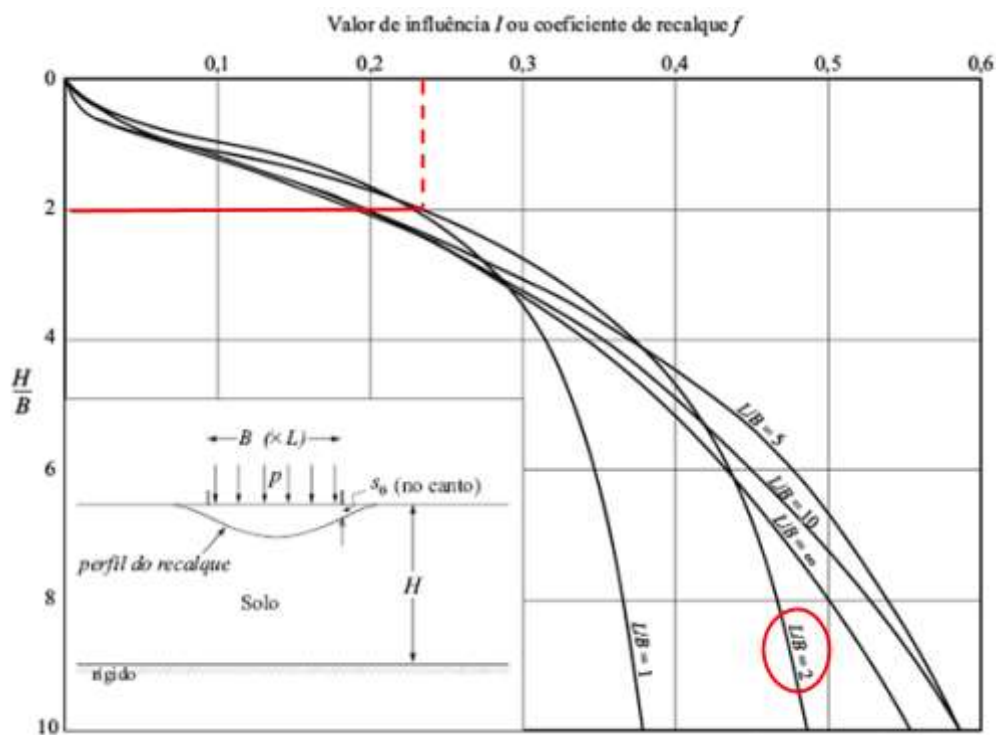
$$\sigma = 120 \text{ kPa} = 0,12 \text{ MPa}, E_{u_1} = 15 \text{ MPa}, E_{u_2} = 25 \text{ MPa}$$

a)



Recalque nos primeiros 10 m:

$$H/B = 10/5 = 2; L/B = 10/5 = 2$$



BARNES, 2016

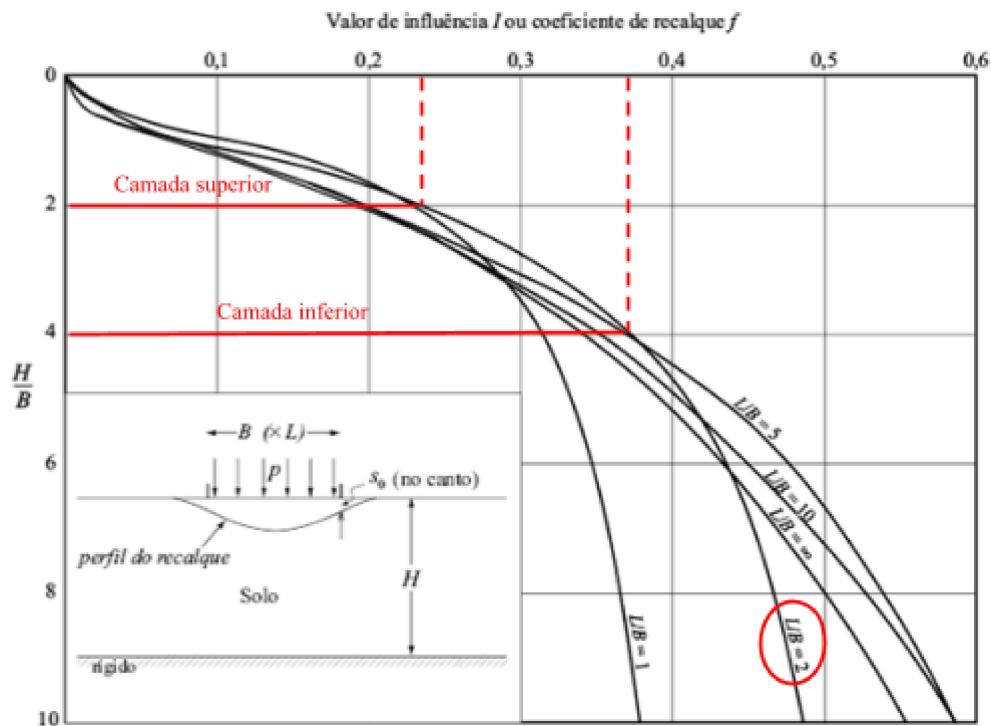
$$f \approx 0,24$$

$$\rho_{A_1} = \frac{0,12 \cdot 5}{15} \cdot 0,24 \approx 0,0096 \text{ m} \approx 9,6 \text{ mm}$$

Recalque nos últimos 10 m (deve-se descontar a influência da camada superior, já considerada no cálculo anterior):

$$H/B = 20/5 = 4; H'/B = 10/5 = 2$$

$$L/B = 10/5 = 2$$



BARNES, 2016

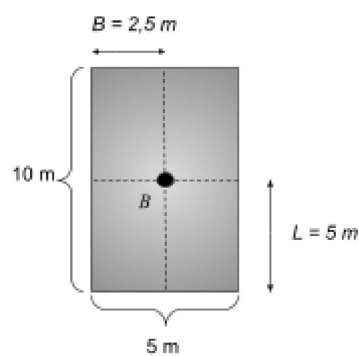
$$f \approx 0,37; f' \approx 0,24$$

$$\rho_{A_2} = \frac{0,12 \cdot 5}{25} \cdot (0,37 - 0,24) \approx 0,0031 \text{ m} \approx 3,1 \text{ mm}$$

$$\rho_A = \rho_{A_1} + \rho_{A_2} \approx 12,7 \text{ mm}$$

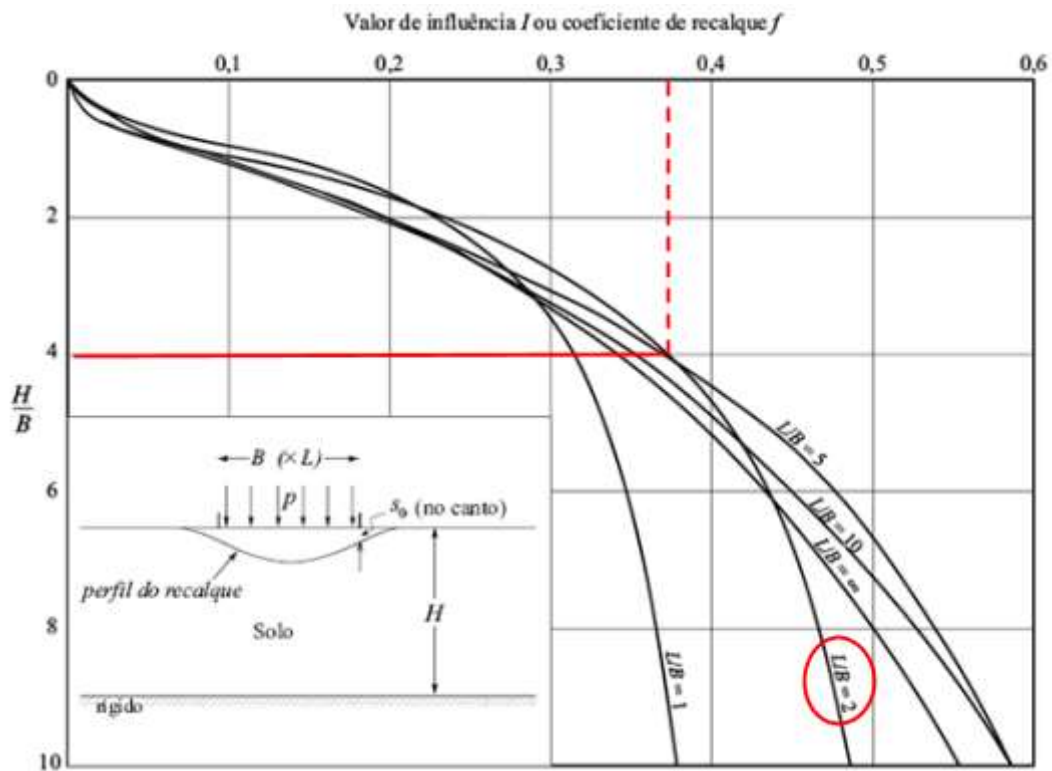
b)

Separação da planta em retângulos menores:



Recalque nos primeiros 10 m:

$$H/B = 10/2,5 = 4; L/B = 5/2,5 = 2$$



BARNES, 2016

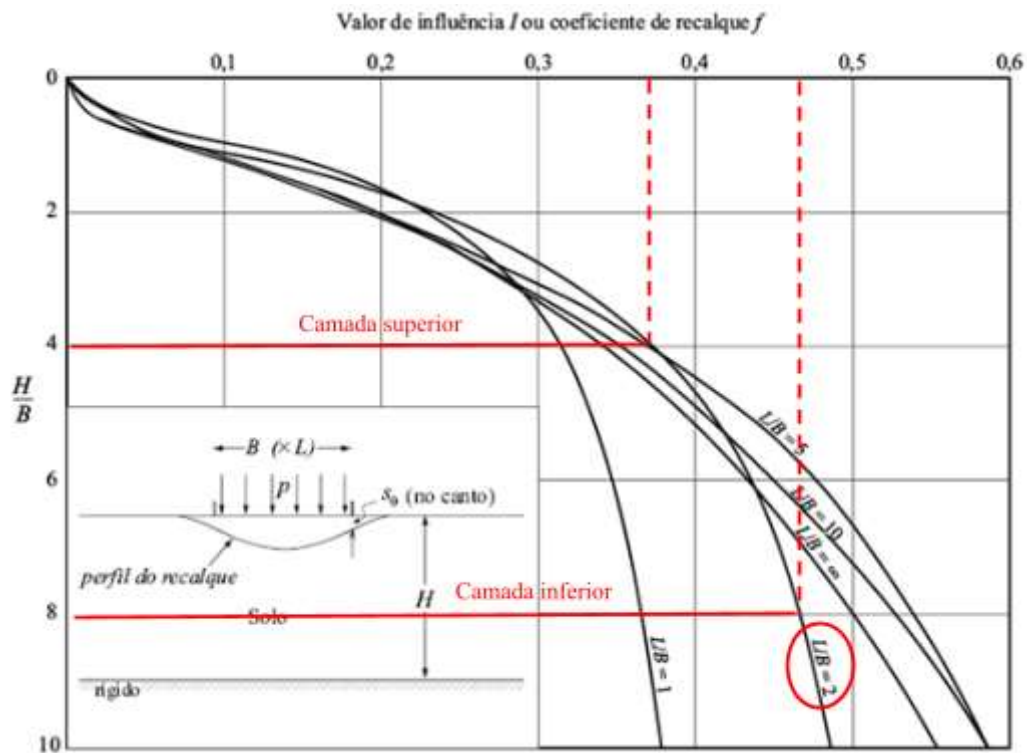
$$f \approx 0,37$$

$$\rho_{B_1} = \frac{0,12 \cdot 2,5}{15} \cdot 0,37 \cdot 4 \approx 0,0296 \text{ m} \approx 29,6 \text{ mm}$$

Recalque nos últimos 10 m (deve-se descontar a influência da camada superior, já considerada no cálculo anterior):

$$H/B = 20/2,5 = 8; H'/B = 10/2,5 = 4$$

$$L/B = 5/2,5 = 2$$



BARNES, 2016

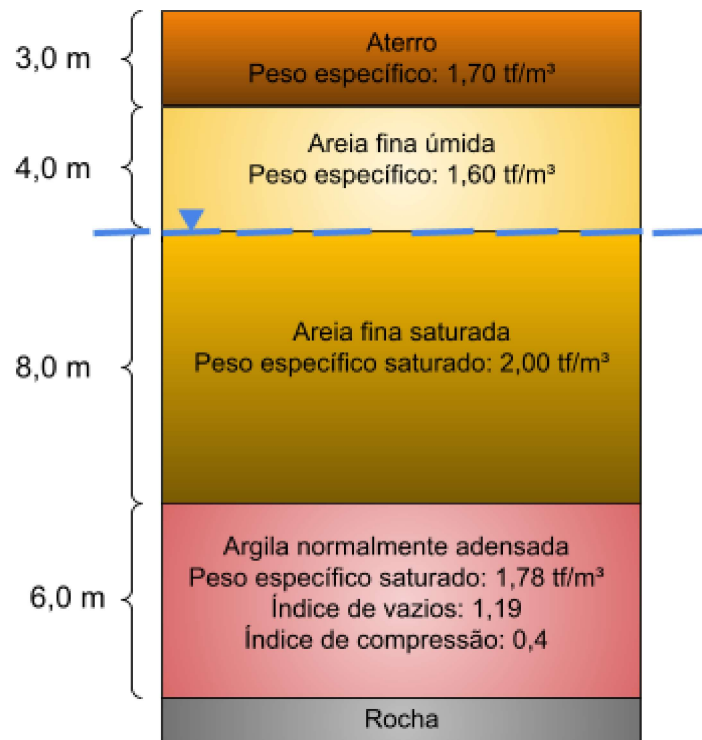
$$f \approx 0,46; f' \approx 0,37$$

$$\rho_{B_2} = \frac{0,12 \cdot 2,5}{25} \cdot (0,46 - 0,37) \cdot 4 \approx 0,0043 \text{ m} \approx 4,3 \text{ mm}$$

$$\rho_B = \rho_{B_1} + \rho_{B_2} \approx 33,9 \text{ mm}$$

Adensamento 04.03

Um aterro com peso específico $\gamma = 1,7 \text{ tf/m}^3$, de 3,0 m de altura, foi recentemente colocado sobre uma extensa área. Determine o recalque total do aterro, para os dados indicados no perfil abaixo.



Resolução 04.03

Analisando os dados do enunciado, conclui-se que o solo estava em estado normalmente adensado inicialmente.

Portanto, a equação utilizada é:

$$\rho_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{0,i}}{1+e_{0,i}} \cdot (C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v,fi}}{\sigma'_{v,0i}}) \right]$$

Calcula-se a tensão efetiva inicial no centro da camada de argila:

$$\sigma' = 4 \cdot 1,6 + (2,00 - 1,0) \cdot 8 + (1,78 - 1,0) \cdot 3 \Rightarrow \sigma' = 16,74 \text{ tf/m}^2$$

Tensão efetiva após a construção do aterro:

$$\sigma' = 4 \cdot 1,6 + (2,00 - 1,0) \cdot 8 + (1,78 - 1,0) \cdot 3 + 3 \cdot 1,7 \Rightarrow \sigma' = 21,84 \text{ tf/m}^2$$

Cálculo do recalque:

$$\rho_1 = \frac{6}{1+1,19} \cdot (0,4 \cdot \log \frac{21,84}{16,74}) \Rightarrow \rho_1 = 0,126 \text{ m}$$

A argila terá 12,6 cm de recalque devido à construção do aterro.

Adensamento 04.04

Calcule o recalque na camada de argila causado pelo aterro construído recentemente numa extensa área, esquematizado no perfil abaixo. Dados da camada de argila:

- Coeficiente de compressão: 0,6
- Coeficiente de adensamento: 10^{-4} cm/s
- Índice de vazios: 1,2

Resolução 04.04

Analisando os dados do enunciado, conclui-se que o solo estava em estado normalmente adensado inicialmente.

Portanto, a equação utilizada é:

$$\rho_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{0,i}}{1+e_{0,i}} \cdot (C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v,fi}}{\sigma'_{v,0i}}) \right]$$

Calcula-se a tensão efetiva inicial no centro da camada de argila:

$$\sigma' = 5 \cdot 1,70 + 4 \cdot (1,90 - 1,0) \text{ gf/cm}^2 \Rightarrow \sigma' = 12,10 \text{ gf/cm}^2$$

Tensão efetiva após a construção do aterro:

$$\sigma' = 4 \cdot 1,65 + 5 \cdot 1,70 + 4 \cdot (1,90 - 1,0) \text{ gf/cm}^2 \Rightarrow \sigma' = 18,70 \text{ gf/cm}^2$$

Cálculo do recalque:

$$\rho_1 = \frac{8}{1+1,20} \cdot (0,6 \cdot \log \frac{18,70}{12,10}) \Rightarrow \rho_1 = 0,4125 \text{ m}$$

A argila terá 41,25 cm de recalque devido à construção do aterro.

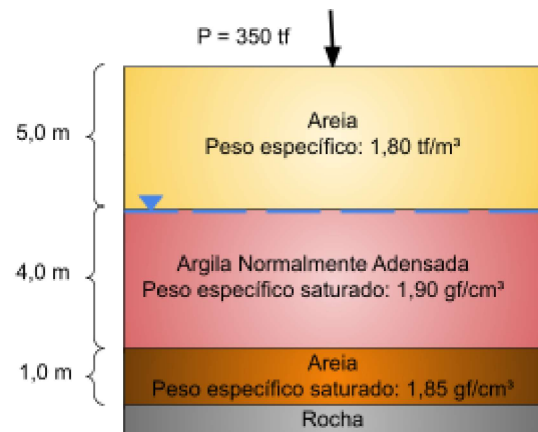
Adensamento 04.05

Calcule o recalque total sob o ponto de aplicação da sobrecarga considerada como concentrada, devido ao adensamento da camada de argila.

Dados da camada de argila:

- Coeficiente de compressão: 0,50
- Coeficiente de adensamento:
 $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$
- Índice de vazios inicial: 1,2

Obs: para a distribuição de pressão devido à sobrecarga considerar a solução de Boussinesq.



Resolução 04.05

Analisando os dados do enunciado, conclui-se que o solo estava em estado normalmente adensado inicialmente.

Portanto, a equação utilizada é:

$$\rho_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{0,i}}{1+e_{0,i}} \cdot (C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v,fi}}{\sigma'_{v,0i}}) \right]$$

Calcula-se a tensão efetiva inicial no centro da camada de argila:

$$\sigma' = 5 \cdot 1,80 + 2 \cdot (1,90 - 1,0) \text{ tf/m}^2 \Rightarrow \sigma' = 10,80 \text{ tf/m}^2$$

Acréscimo de tensão devido cargas pontuais por Boussinesq:

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{z^2} \cdot I \mid I = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{[(r/z)^2 + 1]^{5/2}} \mid r = 0 \Rightarrow I = \frac{3}{2\pi} \text{ (pois } r = 0)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{350}{7^2} \cdot \frac{3}{2\pi} \mid \Delta\sigma_z = 3,41 \text{ tf/m}^2$$

Cálculo do recalque:

$$\rho_1 = \frac{4}{1+1,20} \cdot (0,5 \cdot \log \frac{10,80+3,41}{10,80}) \Rightarrow \rho_1 = 0,1083 \text{ m}$$

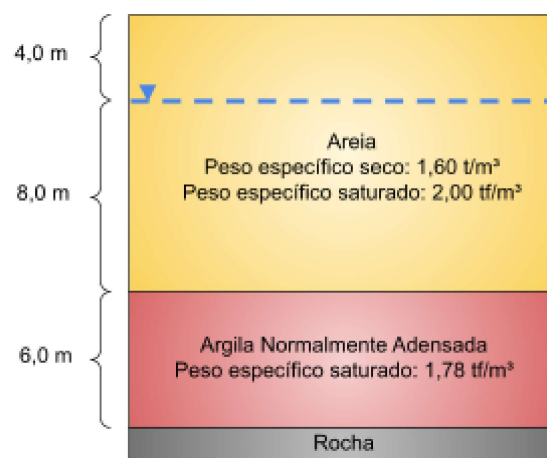
A argila terá 10,83 cm de recalque sob o ponto de aplicação.

Adensamento 04.06

Qual será o recalque total devido ao adensamento da camada de argila indicada no perfil a seguir, caso seja provocado um rebaixamento do lençol d'água de 3,00 metros?

Dados da argila:

- Coeficiente de adensamento: 6×10^{-2}
- Coeficiente de compressão: 0,396
- Índice de vazios inicial: 1,19



Resolução 04.06

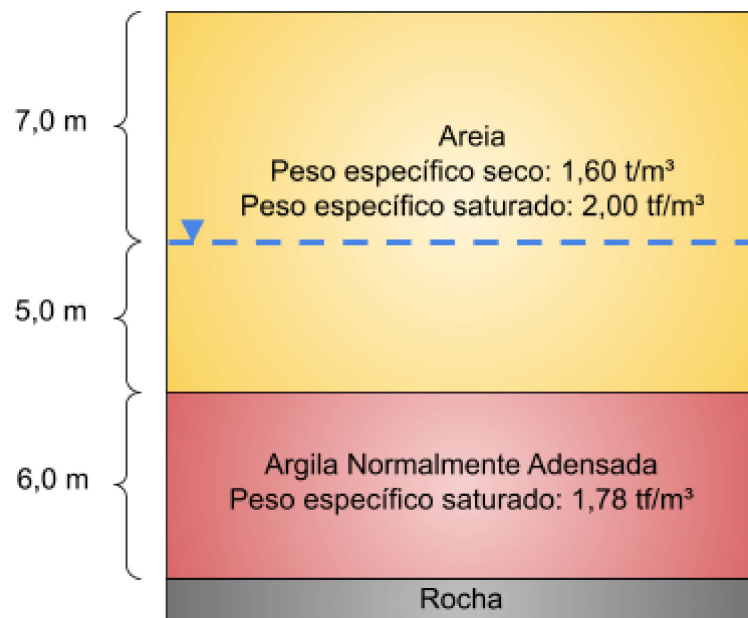
Analisando os dados do enunciado, pode-se concluir que o solo estava em estado normalmente adensado inicialmente e após o rebaixamento do lençol freático, haverá um aumento na tensão efetiva.

Portanto, a equação utilizada é:

$$\rho_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{0,i}}{1+e_{0,i}} \cdot (C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v,fi}}{\sigma'_{v,0i}}) \right]$$

Calcula-se a tensão efetiva inicial no centro da camada de argila:

$$\sigma' = 4 \cdot 1,60 + 8 \cdot (2,0 - 1,0) + 3 \cdot (1,78 - 1,0) \text{ tf/m}^2 \Rightarrow \sigma' = 16,74 \text{ tf/m}^2$$



Tensão efetiva após rebaixamento do lençol freático:

$$\sigma' = 7 \cdot 1,6 + 5 \cdot (2,0 - 1,0) + 3 \cdot (1,78 - 1,0) \Rightarrow \sigma' = 18,54 \text{ tf/m}^2$$

Cálculo do recalque:

$$\rho_1 = \frac{6}{1+1,19} \cdot (0,396 \cdot \log \frac{18,54}{16,74}) \Rightarrow \rho_1 = 0,0481 \text{ m}$$

A argila terá 4,81 cm de recalque sob o ponto de aplicação.

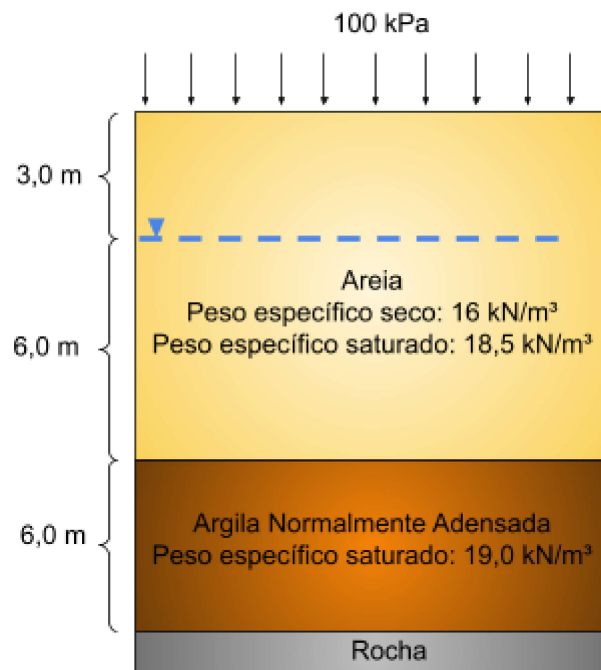
Adensamento 04.07

No perfil abaixo, foi aplicado um carregamento distribuído no valor de 100 kPa na superfície do terreno. Calcule:

- O recalque na camada de argila.
- O recalque na camada de argila considerando-a normalmente adensada.

Dados da argila:

- Tensão de pré-adensamento: 140 kPa
- Índice de compressão: 0,35
- Índice de recompressão: 0,05
- Índice de vazios: 0,95



Resolução 04.07

a)

Cálculo da tensão efetiva antes da aplicação da carga:

$$\sigma' = 3 \cdot 16 + 6 \cdot (18,5 - 10) + 3 \cdot (19 - 10) \Rightarrow \sigma' = 126 \text{ kPa}$$

Como a tensão efetiva no centro da camada de argila é inferior a 140 kPa, o solo é pré adensado.

$$\text{Tensão após a aplicação da carga: } \sigma'_v = 226 \text{ kPa}$$

A tensão inicial é menor que a tensão de adensamento e a tensão final é maior que a tensão de adensamento, portanto a equação utilizada é:

$$\rho_1 = \left[\frac{H_0}{1+e_0} \cdot (C_R \cdot \log \frac{\sigma'_{OCR}}{\sigma'_v} + C_C \cdot \log \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{OCR}}) \right]$$

$$\rho_1 = \left[\frac{6}{1+0,95} \cdot (0,05 \cdot \log \frac{140}{126} + 0,35 \cdot \log \frac{226}{140}) \right]$$

$$\rho_1 = 23 \text{ cm.}$$

O recalque é de 23 cm.

b)

Se o solo fosse normalmente adensado:

$$\rho_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{0,i}}{1+e_{0,i}} \cdot (C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v,fi}}{\sigma'_{v,0i}}) \right]$$

$$\rho_1 = \frac{6}{1,95} \cdot 0,35 \cdot \log \frac{226}{126} \Rightarrow \rho_1 = 0,273 \text{ m}$$

O recalque seria de 27,3 cm.

Adensamento 04.08

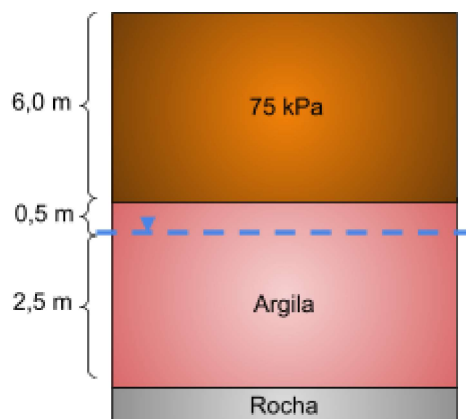
Um aterro granular de 6 metros de altura e de grande comprimento foi construído sobre uma camada de argila de 3 metros de espessura sobrejacente a uma rocha impermeável. O nível d'água situa-se 0,5 m abaixo da superfície do terreno. Se o aterro aplica uma sobrecarga de 75 kPa na superfície do terreno, e a argila encontra-se saturada acima do nível d'água, pede-se calcular o recalque final de adensamento primário da camada de argila.

Dados:

- Índice de vazios no centro da camada: 0,8
- Densidade dos grãos: $G_s = 2,6$
- Razão de pré-adensamento: 4
- Índice de compressão: 0,21
- Índice de recompressão: 0,035

Resolução 04.08

Representação do caso:



Razão de pré-adensamento maior que 1 implica que o solo é sobreadensado.

$$OCR = 4,0 \Rightarrow \frac{\sigma'_{\text{pré-adensamento}}}{\sigma'_{\text{atual}}} = 4,0 \Rightarrow \sigma'_{\text{pré-adensamento}} = 4,0 \cdot \sigma'_{\text{atual}}$$

Cálculo do peso específico saturado da argila:

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{G + S \cdot e}{1 + e} \cdot \gamma_w = \frac{2,6 + 1 \cdot 0,8}{1 + 0,8} \cdot 10 \Rightarrow \gamma_{\text{sat}} = 18,89 \text{ kN/m}^3$$

Tensão efetiva inicial no meio da camada de argila:

$$\sigma' = 1,5 \cdot 18,89 - 1 \cdot 10 \Rightarrow \sigma' = 18,335 \text{ kPa}$$

Tensão de sobreadensamento:

$$\sigma'_{\text{sobreadensamento}} = 4,0 \cdot 18,335 = 73,34 \text{ kPa}$$

Tensão após a aplicação da carga:

$$\sigma' = 18,335 + 75 = 93,335 > 73,34 \text{ kPa} \rightarrow \text{solo normalmente adensado}$$

Cálculo do recalque:

$$\rho_1 = \left[\frac{H_0}{1 + e_0} \cdot (C_R \cdot \log \frac{\sigma'_{OCR}}{\sigma'_v} + C_C \cdot \log \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{OCR}}) \right]$$

$$\rho_1 = \left[\frac{3}{1 + 0,8} \cdot (0,035 \cdot \log \frac{73,34}{18,335} + 0,21 \cdot \log \frac{93,335}{73,34}) \right] \Rightarrow \rho_1 = 0,072 \text{ m} = 7,2 \text{ cm}$$

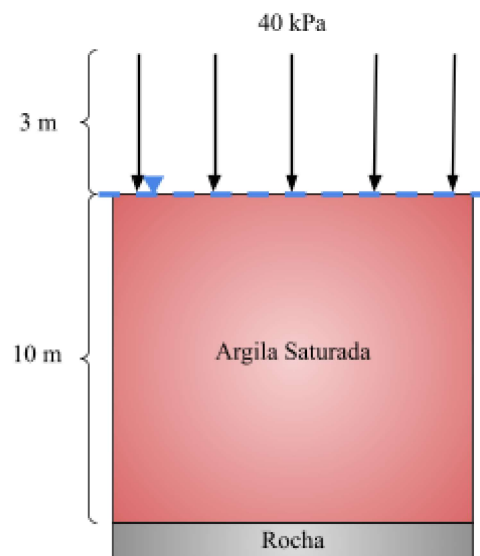
Adensamento 04.09

Um aterro granular de 3 metros de altura e de grande comprimento foi construído sobre uma camada de argila normalmente adensada de 10 metros de espessura sobrejacente a uma rocha impermeável. O nível d'água situa-se na superfície do terreno. Se o aterro aplica uma sobrecarga de 40 kPa na superfície do terreno, pede-se calcular o recalque final de adensamento primário da camada de argila.

Dados:

- Índice de vazios no centro da camada: 1,2
- Peso específico saturado: 15 kN/m^3
- Índice de compressão: 0,3
- Índice de recompressão: 0,03

Resolução 04.09



Por se tratar de um solo normalmente adensado, utiliza-se a seguinte equação:

$$\rho_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{0,i}}{1+e_{0,i}} \cdot (C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v,fi}}{\sigma'_{v,0i}}) \right]$$

Cálculo da tensão efetiva inicial no centro da camada de argila:

$$\sigma' = 5 \cdot (15 - 10) \Rightarrow \sigma' = 25 \text{ kPa}$$

Após a aplicação da carga:

$$\sigma' = 25 + 40 \Rightarrow \sigma' = 65 \text{ kPa}$$

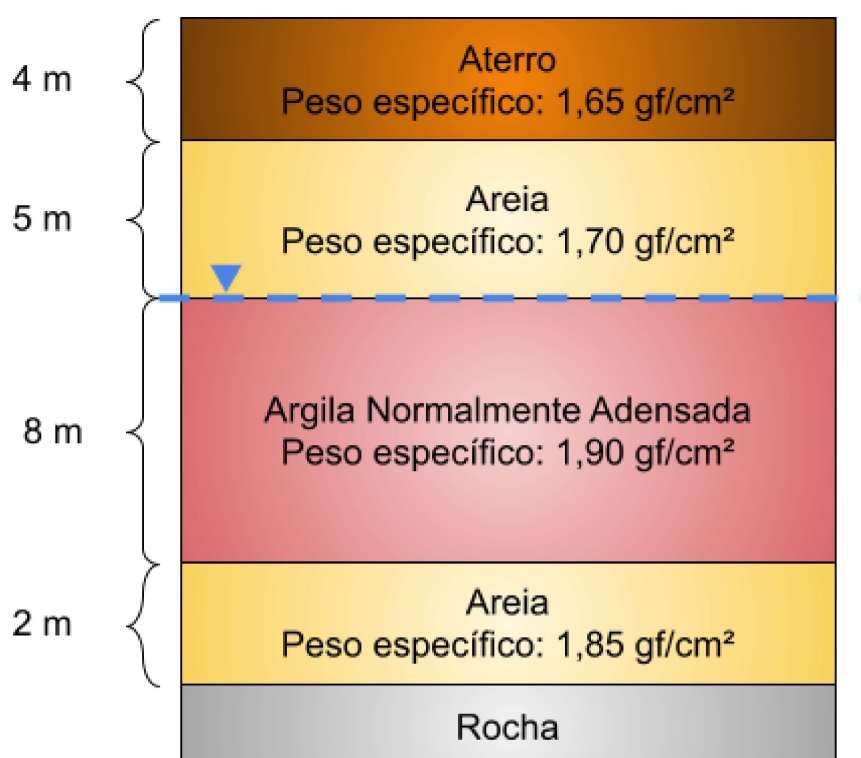
$$\rho_1 = \frac{10}{1+1,2} \cdot 0,3 \cdot \log \frac{65}{25} \Rightarrow \rho_1 = 0,56 \text{ m} = 56 \text{ cm}$$

Adensamento 04.10

Qual será o tempo necessário para que ocorra um recalque por adensamento de 33 cm, causado pelo aterro construído recentemente numa extensa área, esquematizado no perfil abaixo?

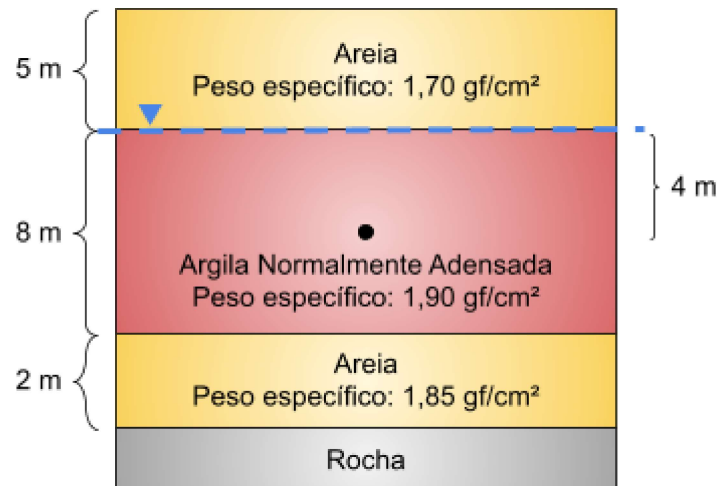
Dados da camada de argila:

- $C_c = 0,6$;
- $C_v = 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$;
- $e_0 = 1,2$.



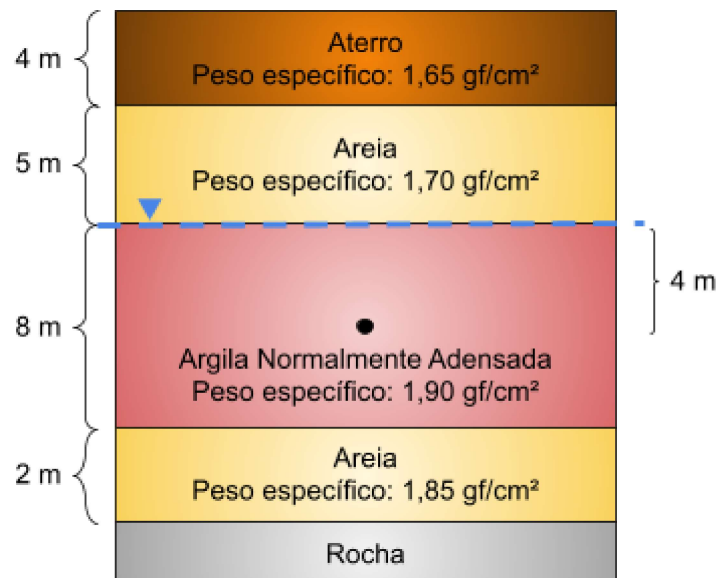
Resolução 04.10

Determina-se a tensão efetiva no centro da camada de argila antes do aterro (σ'_{v0}):



$$\sigma'_0 = 1,70 \cdot 500 + 1,90 \cdot 400 - 1,00 \cdot 400 = 1210 \text{ gf/cm}^2$$

Então calcula-se a tensão efetiva no mesmo ponto após a construção do aterro (σ'_f):



$$\sigma'_f = \sigma'_0 + 1,65 \cdot 400 = 1870 \text{ gf/cm}^2$$

Utiliza-se a equação do recalque para solos normalmente adensados:

$$\rho_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{0,i}}{1+e_{0,i}} \cdot (C_c \cdot \log \frac{\sigma_{f,i}}{\sigma_{0,i}}) \right]$$

Onde H_0 é a espessura inicial da camada analisada (800 cm); e_0 é o índice de vazios inicial

(1,2) e C_c é o índice de compressão (0,6):

$$\rho = \frac{800}{1+1,2} \cdot (0,6 \cdot \log \frac{1870}{1210}) \approx 41,25 \text{ cm}$$

Após determinado o recalque total para a situação, estima-se o grau de consolidação U quando o recalque for de 33 cm:

$$U = \frac{33}{41,25} \approx 0,8 \approx 80\%$$

Com o grau de consolidação, determina-se o fator tempo T :

Para $U \geq 60\%$:

$$T = -0,933 \cdot \log(1 - U) - 0,085$$

$$T = -0,933 \cdot \log(1 - 0,8) - 0,085 \approx 0,567$$

Com o fator tempo T , calcula-se o tempo t :

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2}$$

$$0,567 = \frac{10^{-4} \cdot t}{400^2}$$

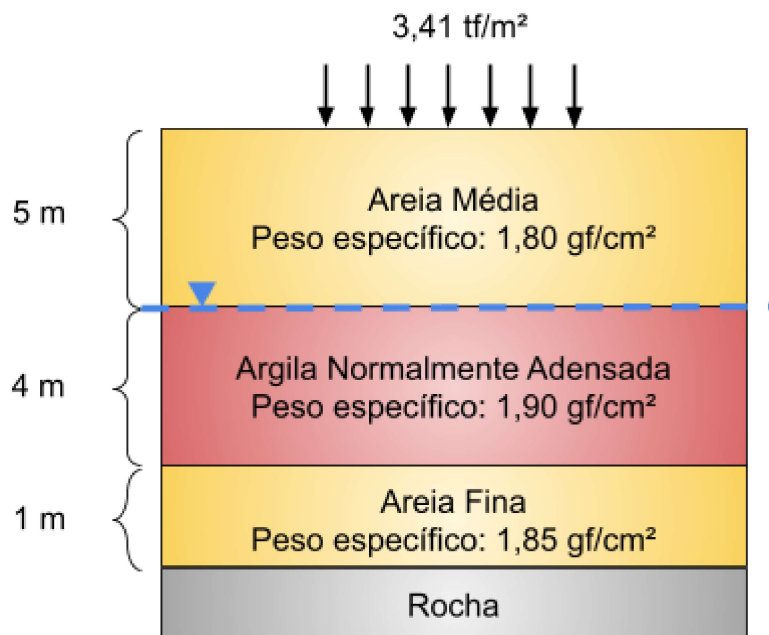
$$t \approx 9,1 \cdot 10^8 \text{ s} \approx 29 \text{ anos}$$

Adensamento 04.11

Calcular o recalque sob o ponto de aplicação da sobrecarga considerada como concentrada, devido ao adensamento da camada de argila, para um tempo de adensamento de 6×10^6 segundos.

Dados da camada de argila:

$$C_c = 0,50; C_v = 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}; e_0 = 1,2$$



Resolução 04.11

Inicialmente, calcula-se a tensão efetiva no centro da camada de argila antes da aplicação da sobrecarga:

$$\sigma'_0 = 500 \cdot 1,80 + 200 \cdot 1,90 - 200 \cdot 1,00 = 1080 \text{ gf/cm}^2$$

Então, determina-se a tensão efetiva após a sobrecarga:

$$\sigma'_f = \sigma'_0 + \Delta\sigma = 1080 + 341 = 1421 \text{ gf/cm}^2$$

Utiliza-se a equação do recalque total para solos normalmente adensados:

$$\rho_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{0,i}}{1+e_{0,i}} \cdot (C_c \cdot \log \frac{\sigma_{f,i}}{\sigma_{0,i}}) \right]$$

Onde H_0 é a espessura inicial da camada analisada (400 cm); e_0 é o índice de vazios inicial (1,2) e C_c é o índice de compressão (0,5):

$$\rho = \frac{400}{1+1,2} \cdot (0,5 \cdot \log \frac{1421}{1080}) \approx 10,83 \text{ cm}$$

A partir do tempo t , determina-se o fator tempo T :

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 10^6}{200^2} \approx 0,045$$

Assim, determina-se o grau de consolidação:

$$U = \sqrt[6]{\frac{T^3}{T^3+0,5}} \approx 0,24 \approx 24\%$$

E verifica-se a parcela do recalque total correspondente ao grau de consolidação estimado:

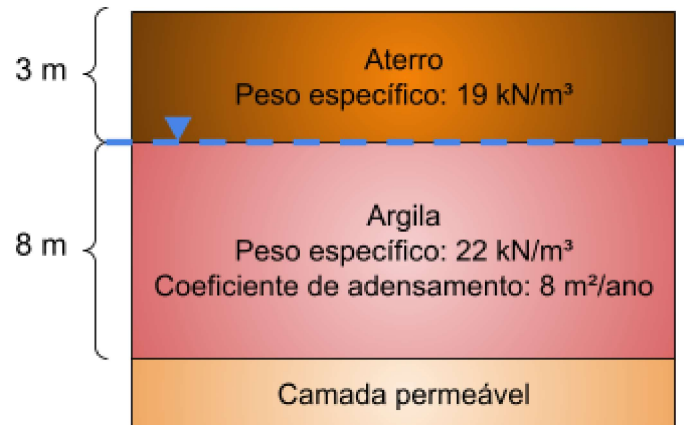
$$\rho' = \rho \cdot U = 10,83 \cdot 0,24 \approx 2,60 \text{ cm}$$

Adensamento 04.12

Uma grande área de aterro de areia, com 3 metros de espessura e peso específico igual a 19 kN/m^3 , se espalha sobre uma camada de argila com 8 metros de espessura, estando o lençol freático na superfície. O coeficiente de adensamento da argila é de $8 \text{ m}^2/\text{ano}$ e seu peso específico é de 22 kN/m^3 . Determine a poro-pressão e a tensão efetiva no meio da camada de argila três meses após a colocação do aterro. Considera-se que o aterro de areia seja colocado instantaneamente e que haja um estrato permeável por baixo da argila.

Resolução 04.12

Representação da situação:



Antes do aterro, verifica-se as tensões no centro da camada de argila:

$$\sigma_0 = 22 \cdot 4 = 88 \text{ kN/m}^2$$

$$u_0 = 10 \cdot 4 = 40 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u_0 = 48 \text{ kN/m}^2$$

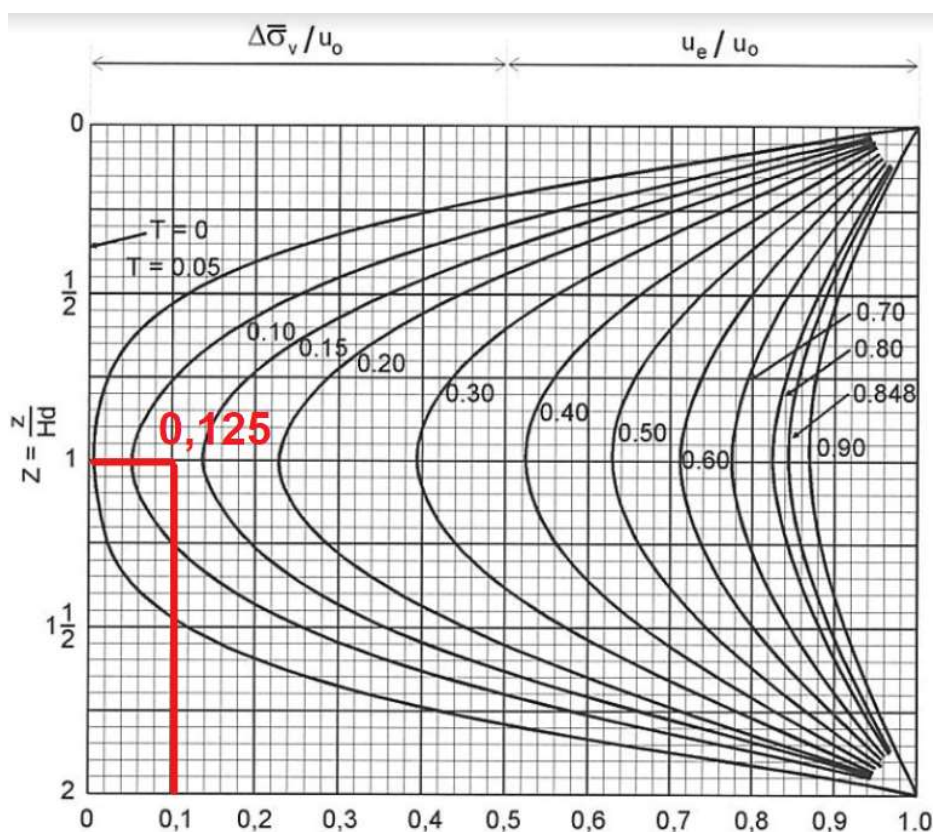
Determina-se o acréscimo de tensão gerado pelo aterro:

$$\Delta\sigma = 19 \cdot 3 = 57 \text{ kN/m}^2$$

Com o coeficiente de adensamento (8 m²/ano), o tempo (3 meses) e a altura de drenagem (4 m, devido à possibilidade de drenagem para cima e para baixo), determina-se o fator tempo T:

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} = \frac{8 \cdot (3/12)}{4^2} = 0,125$$

A partir do fator tempo T (0,125) e da razão entre a profundidade da camada de argila analisada (4 m) e a altura de drenagem (4 m), determina-se graficamente ao Grau de Consolidação (U):



SOUZA PINTO (2006)

$$U \approx 0,1 \approx 10\%$$

Portanto, determina-se que em 03 meses ocorrerá 10% do recalque total na camada de argila devido ao aterro.

No primeiro instante de aplicação de carga, todo o acréscimo de tensão é suportado pela água nos poros, gerando um aumento na poropressão.

Tempo 0:

$$u = u_0 + \Delta\sigma = 40 + 57 = 97 \text{ kN/m}^2$$

Com o passar do tempo, a água é drenada e o acréscimo de tensão passa a ser suportado pelas partículas sólidas - configurando acréscimo de tensão efetiva. Este acréscimo de tensão efetiva depende diretamente do grau de consolidação:

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma \cdot U$$

Em 03 meses:

$$\Delta\sigma' = 57 \cdot 0,1 = 5,7 \text{ kN/m}^2$$

Assim, uma tabela pode ser utilizada para definir os acréscimos de tensão efetiva e total no momento desejado:

σ_0 (kN/m ²)	σ'_0 (kN/m ²)	u (kN/m ²)	$\Delta\sigma$ (kN/m ²)	U	$\Delta\sigma'$ (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)	u (kN/m ²)
88	48	40	57	0,1	5,7	53,7	91,3

Portanto, define-se que após 03 meses da construção do aterro a tensão efetiva no centro da camada de argila será de aproximadamente 53 kN/m² e a poropressão 91 kN/m².

Adensamento 04.13

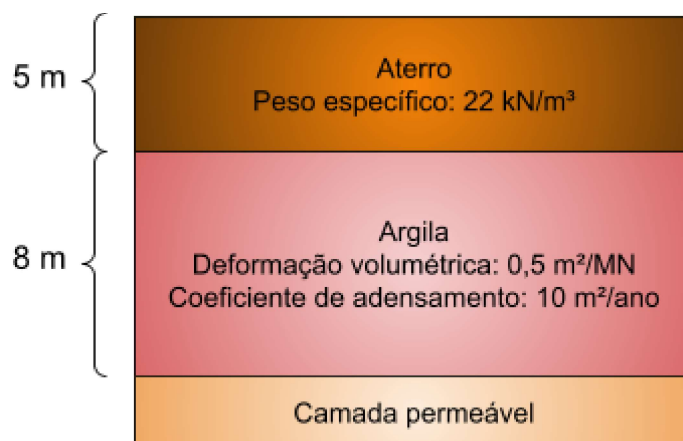
Um aterro de estrada, 5 metros acima do nível do terreno existente, deve ser colocado sobre um depósito de argila mole, com 8 metros de espessura ($m_v = 0,5 \text{ m}^2/\text{MN}$ e $C_v = 10 \text{ m}^2/\text{ano}$).

A densidade aparente do aterro é de 2200 kg/m³. Considerar que a carga foi colocada instantaneamente.

- Considerando que o pavimento final da estrada sobre a camada possa suportar 50 mm de recalque após a construção, calcule quando o pavimento poderá ser colocado.
- Determine o grau de adensamento após 05 meses.

Resolução 04.13

Representação da situação:



- Se a estrada poderá suportar um recalque de até 50 mm, considera-se que sua construção será possível quando restarem no máximo 50 mm para a camada de argila recalcar, ou seja, a diferença entre o recalque total e o recalque no instante t :

$$\rho_T - \rho_t = 0,05 \text{ m}$$

Em termos do coeficiente de deformação volumétrica, o recalque total é dado por:

$$\rho_T = H_0 \cdot m_v \cdot \Delta\sigma'_v$$

Onde H_0 é a espessura inicial da camada de argila e $\Delta\sigma'_v$ é a variação da tensão efetiva no centro da camada.

$$H_0 = 8 \text{ m}$$

$$m_v = 0,5 \text{ m}^2/\text{MN}$$

Para determinar o recalque total, deve-se considerar o fato de que a estrada possui cota final pré-estabelecida, e que portanto a camada de aterro construída deverá possuir esta altura de recalque a mais, para evitar que após a consolidação da camada de argila hajam variações de altura entre projeto e execução:

$$\Delta\sigma'_v = 22 \cdot (5 + \rho) \cdot \frac{1}{1000} \text{ MN/m}^2$$

$$\rho_T = H_0 \cdot m_v \cdot \Delta\sigma'_v$$

$$\rho_T = 8 \cdot 0,5 \cdot 22 \cdot (5 + \rho_T) \cdot \frac{1}{1000} \text{ MN/m}^2$$

$$\rho_T = 0,088 \cdot (5 + \rho_T) = 0,44 + 0,088 \rho_T$$

$$\rho_T \approx 0,482 \text{ m}$$

O pavimento poderá ser construído quando $\rho_t = \rho_T - 0,05$:

$$\rho_t = 0,482 - 0,05 \approx 0,432 \text{ m}$$

Assim, determina-se o grau de consolidação neste instante:

$$U = \frac{\rho}{\rho_T} = \frac{0,432}{0,482} \approx 0,89 \approx 90\%$$

Então pode-se calcular o fator tempo T e consequentemente o tempo t :

Para $U \geq 60\%$:

$$T = 1,781 - 0,933 \cdot \log(1 - U)$$

$$T = 1,781 - 0,933 \cdot \log(1 - 0,9) \approx 2,7$$

$$t = \frac{T \cdot H_d^2}{C_v} = \frac{2,7 \cdot 4^2}{10} \approx 4,3 \text{ anos} \approx 50 \text{ meses}$$

Portanto, o pavimento poderá ser implementado após cerca de 50 meses da construção do aterro.

b) Com o tempo t igual a 05 meses, determina-se o fator tempo T :

$$t = \frac{T \cdot H_d^2}{C_v}$$

$$T = \frac{t \cdot C_v}{H_d^2} = \frac{5 \cdot 10}{4^2} \approx 0,26$$

O fator tempo T possui relação direta com o grau de consolidação U :

$$U = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot T} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 0,26} \approx 0,57 \approx 57\%$$

O recalque após 05 meses é calculado através da relação direta entre o grau de consolidação U e o recalque total ρ_T :

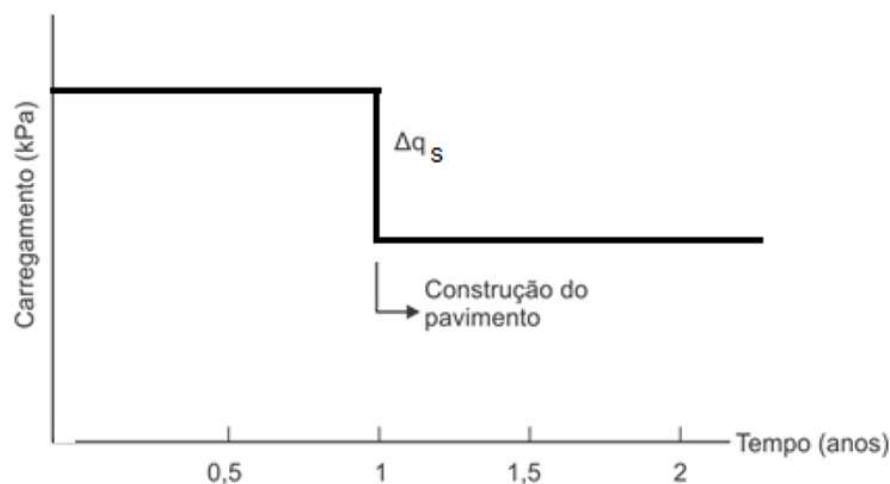
$$\rho_t = \rho_T \cdot U = 0,48 \cdot 0,57 \approx 0,27 \text{ m} \approx 27 \text{ cm}$$

Adensamento 04.14

Um grande aterro rodoviário ($\Delta\sigma_f = 60\text{kPa}$) será construído sobre uma camada de argila de 6 m de espessura sobrejacente a um estrato de areia profunda.

Para minimizar a ocorrência de recalque após aplicação do revestimento asfáltico, um pré-carregamento ($\Delta\sigma_s$) instantâneo é aplicado sobre a camada de argila durante um período de 1 ano, conforme a figura.

O material do aterro é altamente permeável e as propriedades da argila são $C_v = 4,5 \text{ m}^2/\text{ano}$ e $m_v = 0,001 \text{ m}^2/\text{kN}$.



- Determine o recalque total referente ao carregamento $\Delta\sigma_f$.
- Determine o valor do pré-carregamento $\Delta\sigma_s$ caso o projeto especifique que o pavimento não deve experimentar recalque após 01 ano.

Resolução 04.14

a) O recalque total é diretamente determinado:

$$\rho_{T_f} = H_0 \cdot m_v \cdot \Delta\sigma_f$$

$$H_0 = 6 \text{ m}$$

$$m_v = 0,001 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_f = 60 \text{ kPa}$$

$$\rho_{T_f} = 6 \cdot 0,001 \cdot 60 = 0,36 \text{ m}$$

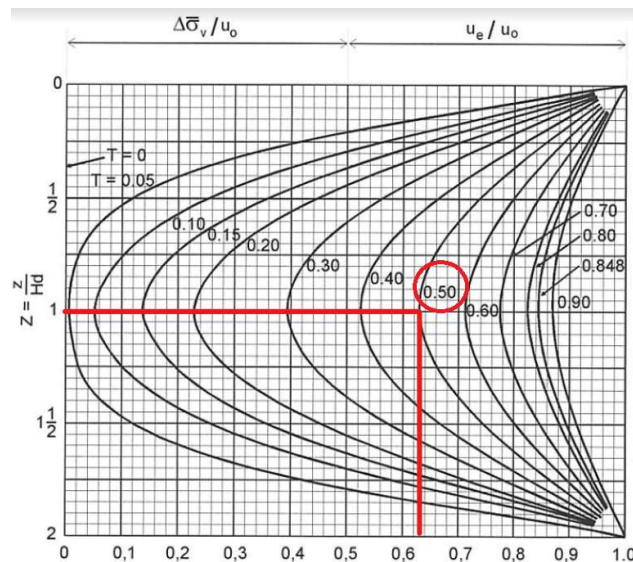
b) Para não haver recalque após 01 ano, todos os 0,36 m (ρ_{T_f}) de consolidação devem ocorrer neste período, considerando a carga extra $\Delta\sigma_s$. Então, o grau de adensamento U correspondente à carga $\Delta\sigma_f + \Delta\sigma_s$ será a relação entre os recalques:

$$U = \frac{\rho_f}{\rho_s} = \frac{H_0 \cdot m_v \cdot \Delta\sigma_f}{H_0 \cdot m_v \cdot (\Delta\sigma_f + \Delta\sigma_s)} = \frac{60}{60 + \Delta\sigma_s}$$

O tempo t e o coeficiente de adensamento C_v permitem determinar o fator tempo T :

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} = \frac{4,5 \cdot 1}{3^2} = 0,5$$

Graficamente define-se o grau de consolidação U :



SOUZA PINTO (2006)

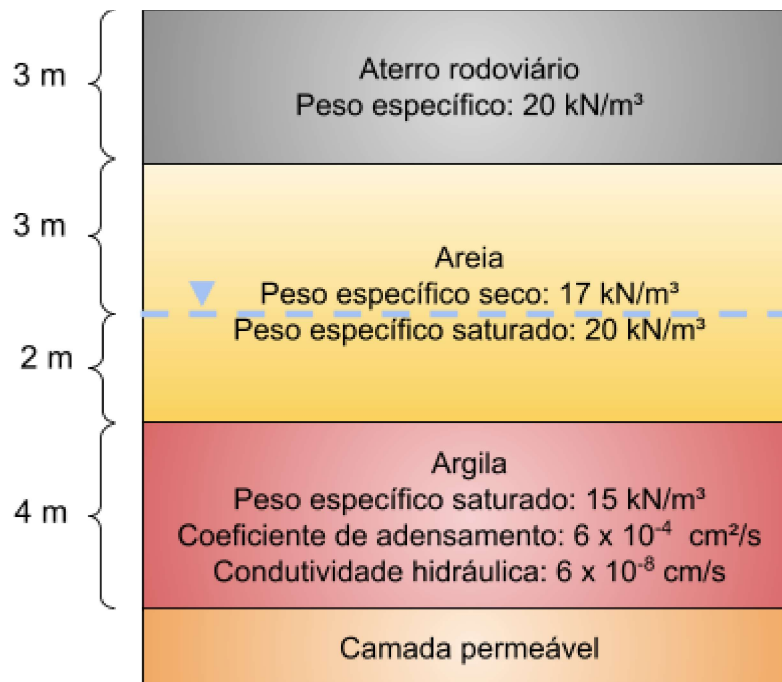
$$U \approx 0,63$$

$$0,63 = \frac{60}{60 + \Delta\sigma_s}$$

$$\Delta\sigma_s \approx 35 \text{ kPa}$$

Adensamento 04.15

O cronograma de uma obra prevê que 90% do recalque final de adensamento primário causado pelo aterro rodoviário aplicado no perfil apresentado deverá ocorrer em até 150 dias. A condição de projeto será atendida?



Resolução 04.15

Inicialmente, determina-se o coeficiente de variação volumétrica:

$$m_V = \frac{k}{\gamma_w \cdot C_V} = \frac{6 \cdot 10^{-10}}{10 \cdot 6 \cdot 10^{-8}} = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN}$$

E então o recalque total para o aterro:

$$\rho_T = m_V \cdot H_0 \cdot \Delta \sigma'$$

$$\rho_T = 10^{-3} \cdot 4 \cdot (20 \cdot 3) = 0,24 \text{ m}$$

Com o coeficiente de consolidação C_V , o tempo t e a altura de drenagem H_d determina-se o fator tempo T :

$$T = \frac{C_V \cdot t}{H_d^2} = \frac{6 \cdot 10^{-8} \cdot (150 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)}{2^2} \approx 0,194$$

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,194}{\pi}} \approx 0,5 \approx 50\%$$

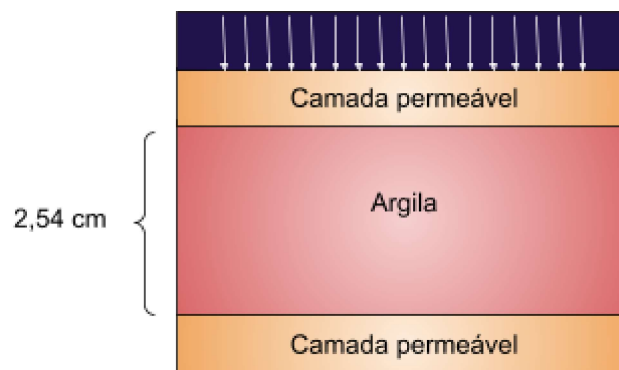
Em 150 dias ocorrerá apenas 50% do recalque total previsto para a construção do aterro rodoviário, portanto a condição de projeto não será atendida.

Adensamento 04.16

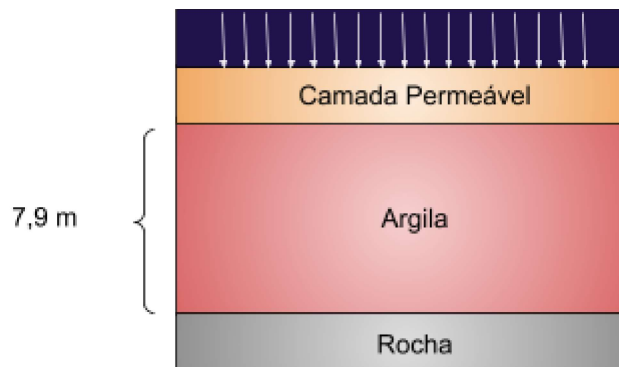
Num ensaio edométrico, o corpo de prova com altura de 2,54 cm alcançou 50% de adensamento em 8 minutos, com drenagem em ambas as faces. A camada argilosa, da qual foi coletada a amostra, tem 7,9 m de espessura, e está compreendida entre uma camada arenosa e uma rocha praticamente impermeável. Quanto tempo será necessário para que a camada de argila chegue a 50% de adensamento?

Resolução 04.16

Em laboratório:



Em campo:



Com os dados obtidos no ensaio, obtém-se o fator tempo T:

$$U < 60\% \Rightarrow T = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot U^2 \Rightarrow T = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 0,50^2 \Rightarrow T = 0,196$$

Altura drenante: $\frac{2,54}{2} = 1,27 \text{ cm}$ | tempo em segundos: $t = 8 \cdot 60$

Cálculo do coeficiente de adensamento:

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} \Rightarrow C_v = \frac{T \cdot H_d^2}{t} \Rightarrow C_v = \frac{0,196 \cdot 1,27^2}{(8 \cdot 60)} \Rightarrow C_v = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

Em campo, tem-se:

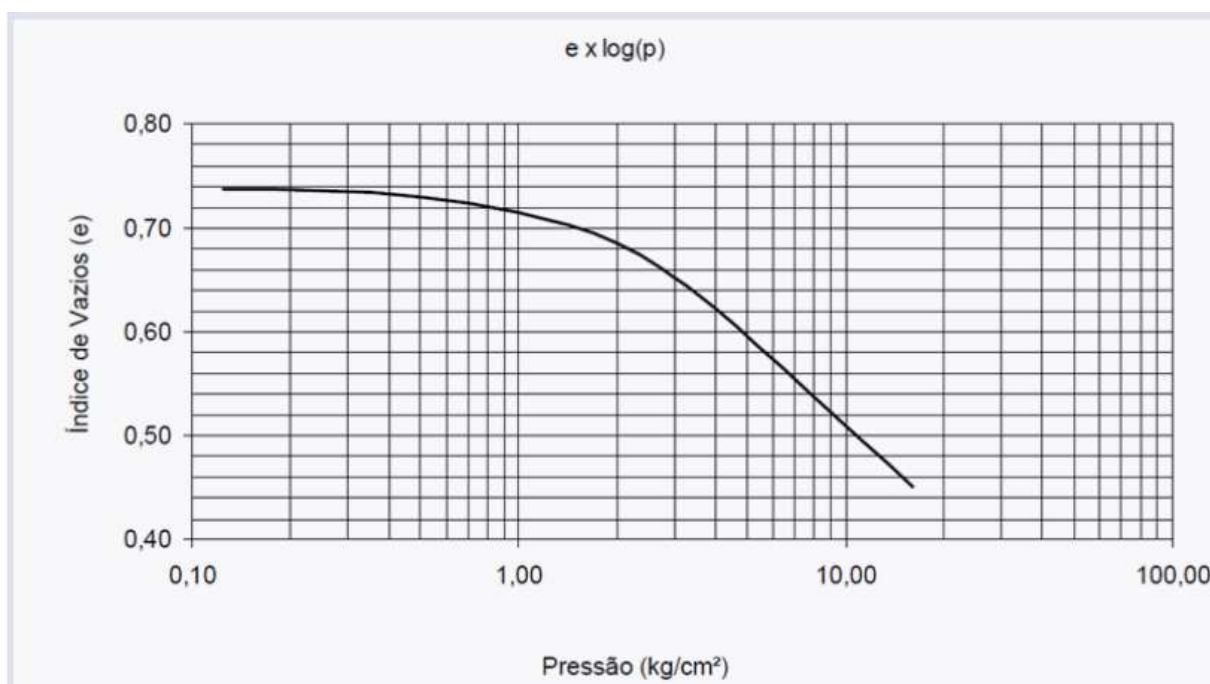
$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} \Rightarrow t = \frac{T \cdot H_d^2}{C_v} = \frac{0,196 \cdot 7,90^2}{6,5 \cdot 10^{-4}} \approx 188.190.153 \text{ segundos}$$

$$t \approx 2178 \text{ dias}$$

Adensamento 04.17

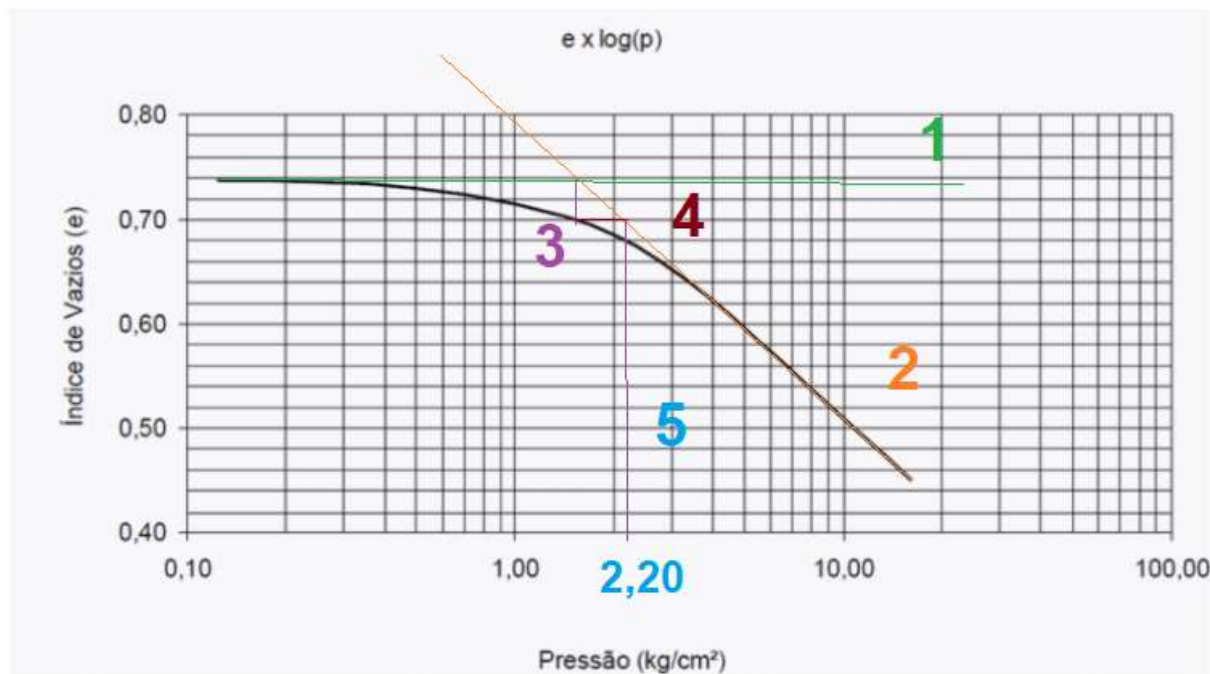
O gráfico apresentado a seguir representa os resultados de um ensaio de adensamento com dupla drenagem, realizado com uma amostra indeformada de argila. Calcule:

- A pressão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva.
- O índice de compressão.
- Sabendo que a tensão efetiva sobre a amostra era de 15 kPa, defina qual o estado deste solo.



Resolução 04.17

a) Com estes dados, aplica-se o método de Pacheco Silva:

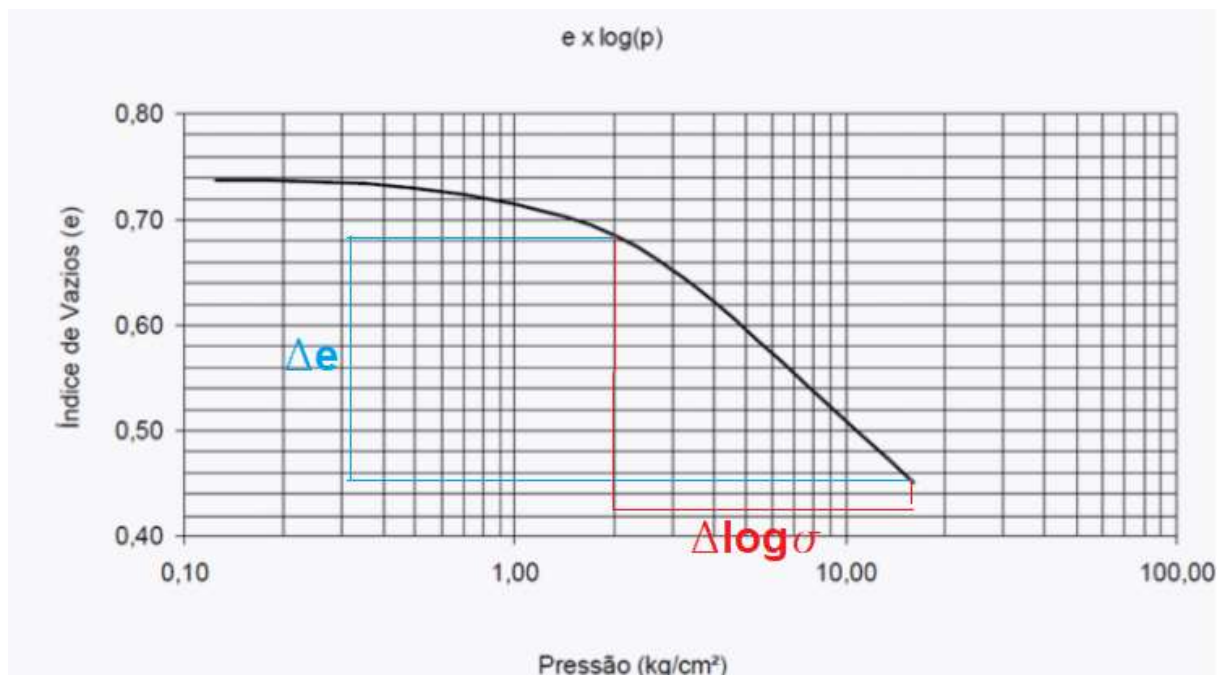


- 1) Traça-se uma reta horizontal passando pelo ponto de índice de vazios inicial.
- 2) Traça-se a continuação da reta virgem até interceptar a reta horizontal 1.
- 3) No ponto que estas retas se interceptam, traça-se uma reta vertical até atingir a curva.
- 4) No ponto onde a reta vertical intercepta a curva, traça-se uma horizontal até interceptar a continuação da reta virgem.
- 5) Neste ponto de interceptação, traça-se uma reta vertical até o eixo da tensão. Com isso, define-se que a tensão de pré-adensamento é de aproximadamente 2,20 kg/cm^2 .

A tensão de pré-adensamento é de aproximadamente 220 kPa.

b)

Cálculo do índice de compressão:



Graficamente, verifica-se que:

$$\Delta \log \sigma' = \log(18) - \log(2,3) \Rightarrow \Delta \log \sigma' \approx 0,89 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta e = 0,67 - 0,441 \approx 0,229$$

Cálculo do índice de compressão:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{0,229}{0,89} \approx 0,260$$

c)

Visto que a tensão efetiva neste solo era de 15 kPa, o solo estava em estado de pré-adensamento. Isso implica que as deformações são baixas, pois esta tensão já foi suportada por este solo em algum momento em seu histórico de tensões.

Adensamento 04.18

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos em um ensaio edométrico feito em um espécime de argila totalmente saturada. Determine:

- O índice de vazios no final de cada incremento de pressão e construa o gráfico de índice de vazios em função de log da pressão.
- O índice de compressão para o trecho normalmente adensado.
- O coeficiente de compressibilidade volumétrica para o incremento de pressão 50-100 kPa

Dados:

- Espessura inicial: 20 mm.
- Teor de umidade inicial: 24%.
- Densidade dos grãos: 2,70.

Pressão aplicada (kPa)	Espessura do espécime (mm)
0	20
25	19,806
50	19,733
100	19,600
200	19,357
400	18,835
800	18,167

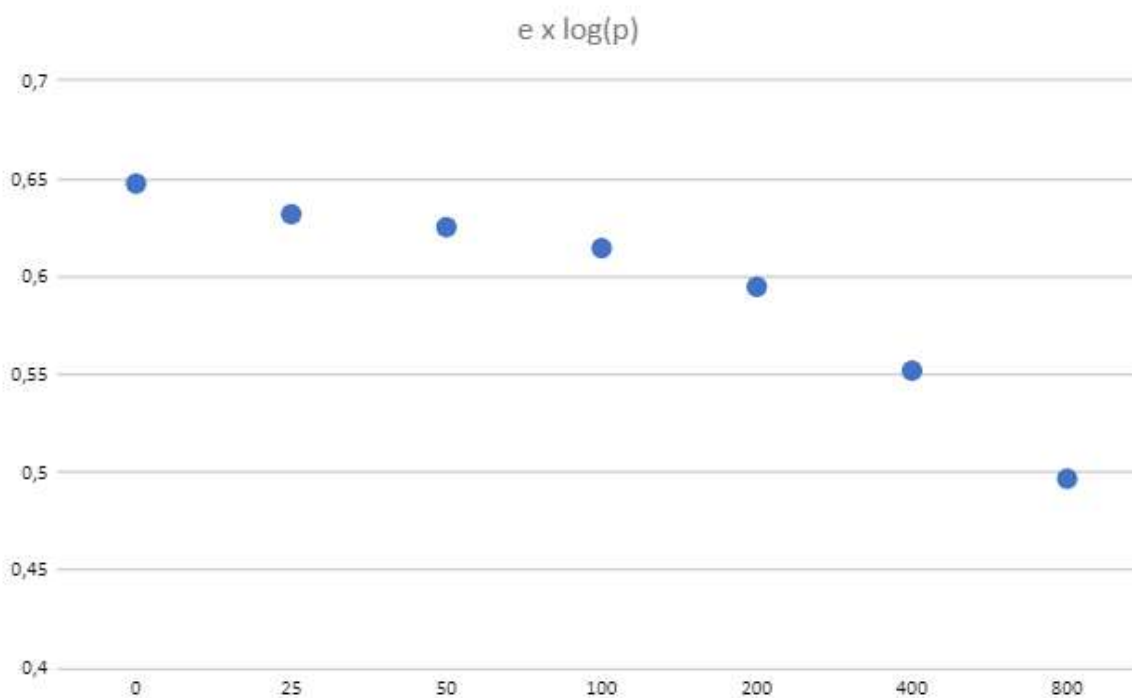
Resolução 04.18

a)

Para o cálculo do índice de vazios, constrói-se a seguinte tabela:

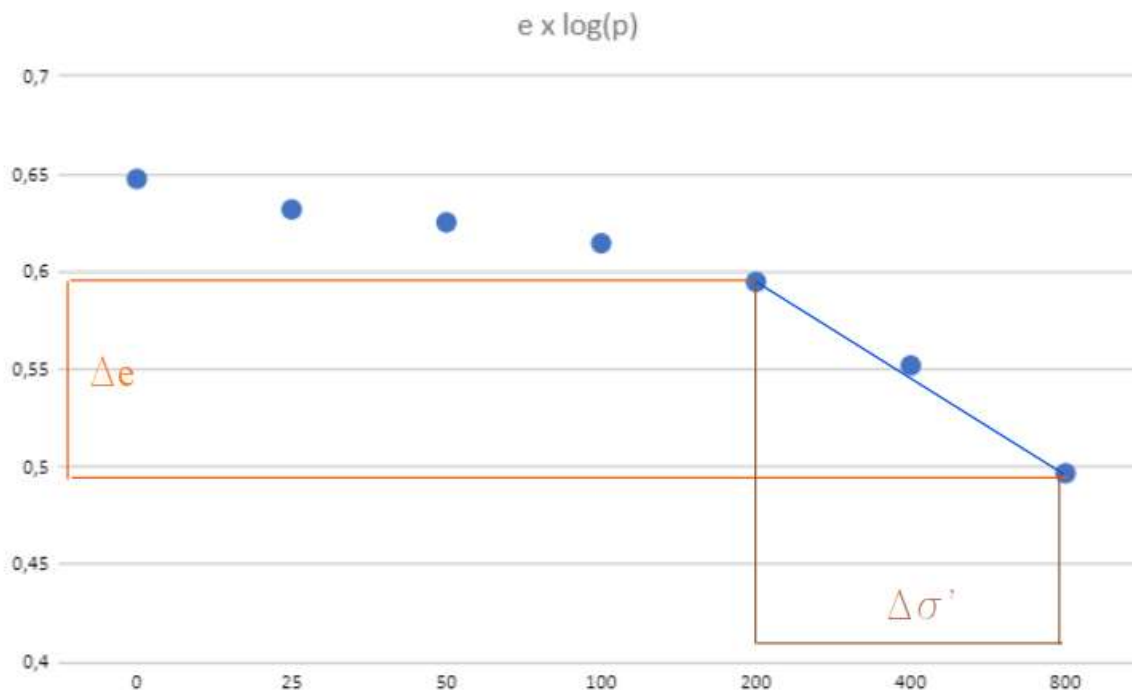
Inicial	Altura	20 mm	$e = \frac{h}{h_s} - 1$ $h_s = \frac{h_0}{1+e_0}$	
	Teor de umidade (w)	24%		
Grau de Saturação (S)	100%		Índice de vazios	0,648
Densidade dos grãos(G)	2,70		Altura dos sólidos	12 mm
Tensão (kPa)	Altura da espécime (mm)		índice de vazios	
0	20,00		0,647	
25	19,81		0,632	
50	19,73		0,625	
100	19,60		0,614	
200	19,36		0,595	
400	18,84		0,552	
800	18,17		0,497	

Com estes dados, plota-se o gráfico dos índices de vazios pelo logaritmo da tensão:



b)

Determina-se o índice de compressão:



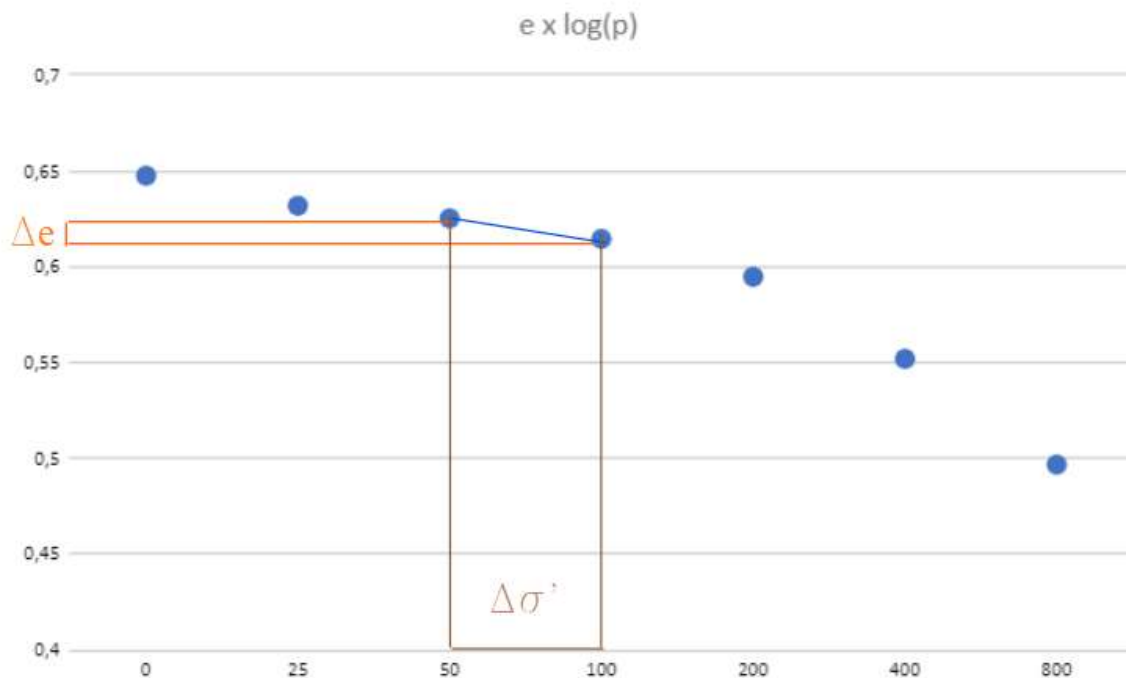
Conseguimos determinar, graficamente, a variação da tensão efetiva e a variação no índice de vazios:

$$\Delta e = 0,58 - 0,49 \Rightarrow \Delta e = 0,09 \mid \Delta \log \sigma' = \log(800) - \log(200) \approx 0,602$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{0,09}{0,602} \approx 0,150$$

c)

Cálculo do coeficiente de compressibilidade volumétrica entre 50 e 100 kPa:



Graficamente, tem-se que:

$$\Delta \sigma = 50 \text{ kPa} \mid \Delta e = 0,63 - 0,62 \Rightarrow \Delta e = 0,01 \mid e_i = 0,63$$

Cálculo do coeficiente de compressibilidade volumétrica:

$$m_v = \frac{\Delta e}{1+e_i} \cdot \frac{1}{\Delta \sigma} = \frac{0,010}{1+0,63} \cdot \frac{1}{50} \approx 0,000122 \text{ m}^2/\text{KN}$$

$$m_v \approx 0,122 \text{ m}^2/\text{MN}$$

Adensamento 04.19

Com os dados contidos nas tabelas a seguir, faça a curva de índice de vazios x log da tensão efetiva.

Dados:

Anel de Moldagem	6.00
Diâmetro do anel (cm)	5.040
Altura do anel (cm)	1.983
Volume do anel (cm ³)	39.56

UMIDADE INICIAL :

Cápsula Número	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula mais solo úmido (g)	Massa da Cápsula mais solo seco (g)	Umidade (%)
200	9.79	21.77	18.69	34.61
221	9.99	22.49	19.33	33.83
223	09.06	21.32	18.20	34.14
Umidade Inicial (%)				34.2

Massa do anel (g)	37.42
Massa do anel + solo (g) Inicial	111.44
Massa do anel + solo (g) Final	111.08
ÍNDICES FÍSICOS :	
Densidade inicial (gi)	
Densidade seca inicial(gsi)	
Índice de vazios inicial(e0)	
Altura de sólidos (Hs)	
Massa Específica Real (g/cm³)	2.812
Grau de saturação inicial (Si)	
Grau de saturação final (Sf)J27	

Pressão (kPa)		5	10	20	40	80	160	320	640	1280
Leituras do Carregamento	Inicial (mm)	26,287	26,245	26,239	26,230	26,200	26,139	25,998	25,846	25,542
	Final (mm)	26,280	26,241	26,230	26,206	26,145	25,998	25,846	25,542	25,035
	Diferença (mm)	0,007	0,004	0,009	0,024	0,055	0,141	0,152	0,304	0,507

Resolução 04.19

- 1) Cálculo do peso específico aparente seco e do peso específico das partículas sólidas:

Definição dos pesos específicos	
Peso específico Seco (dado em g/cm^3):	2,81
Massa média:	18,74
Volume (cm^3):	39,56
Peso específico aparente seco:	0,47

$$\gamma_s = 2,81 \text{ g/cm}^3 \text{ (dado no enunciado)}$$

Cálculo do peso específico aparente seco:

$$\gamma_d = \frac{\text{(massa média seca)}}{\text{(volume do anel)}} = \frac{18,74}{39,56} \approx 0,47 \text{ g/cm}^3$$

Índice de vazios:

$$e_0 = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \approx 4,94$$

- 2) Cálculo das alturas dos sólidos:

$$H_s = \frac{H_0}{1+e_0}$$

Pressão (kPa)		5	10	20	40	80	160	320	640	1280
Leituras do Carregamento	Inicial (mm)	26,287	26,245	26,239	26,230	26,200	26,139	25,998	25,846	25,542
	Final (mm)	26,280	26,241	26,230	26,206	26,145	25,998	25,846	25,542	25,035
	Diferença (mm)	0,007	0,004	0,009	0,024	0,055	0,141	0,152	0,304	0,507
Leituras Acumuladas										
Altura H (mm)		4,43	4,42	4,42	4,42	4,41	4,40	4,38	4,35	4,30

- 3) Cálculo do índice de vazios após a tensão:

$$e_i = \frac{H_i}{H_s} - 1$$

Pressão (kPa)		5	10	20	40	80	160	320	640	1280
Leituras do Carregamento	Inicial (mm)	26,287	26,245	26,239	26,230	26,200	26,139	25,998	25,846	25,542
	Final (mm)	26,280	26,241	26,230	26,206	26,145	25,998	25,846	25,542	25,035
	Diferença (mm)	0,007	0,004	0,009	0,024	0,055	0,141	0,152	0,304	0,507
Leituras Acumuladas										
Altura H (mm)		4,43	4,42	4,42	4,42	4,41	4,40	4,38	4,35	4,30
Índice de Vazios (e)		4,93	4,94	4,93	4,93	4,92	4,90	4,90	4,87	4,82

- 4) Cálculo do logaritmo da tensão efetiva:

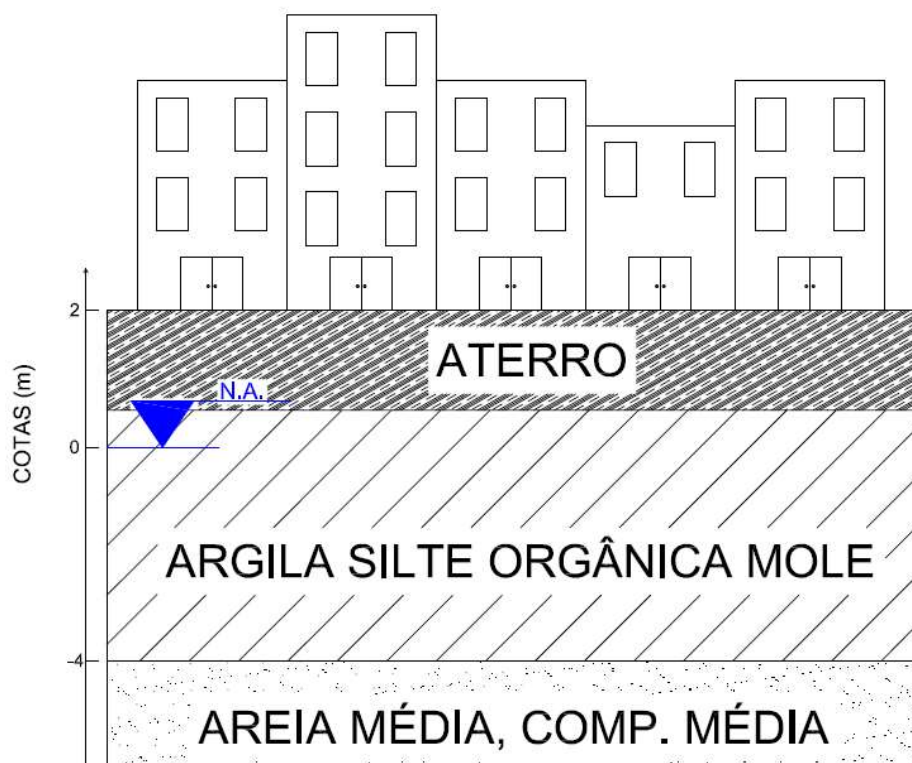
Log tensão efetiva:								
0,70	1,00	1,30	1,60	1,90	2,20	2,51	2,81	3,11

- 5) Plotagem do gráfico:



Adensamento 04.20

Num terreno às margens do rio Tietê deseja-se construir um conjunto habitacional, com edificações de dois pavimentos. Uma seção do terreno, determinada por sondagens de reconhecimento, é apresentada:



A superfície do terreno está na cota 0,5 m, o nível de água está na cota 0,0 m e a camada de argila mole tem uma espessura de 4,5 m. Como as edificações devem ser construídas na cota 2,0 m, em virtude da necessidade de declividade para o sistema de esgotos, deverá ser feito um aterro. O peso do aterro somado ao das edificações provocará recalques importantes, que não podem deixar de ser considerados. Por esse motivo, decidiu-se construir um aterro de sobrecarga que, permanecendo no terreno durante dois meses, provoque os recalques devidos às próprias edificações.

O material disponível para construir o aterro, quando compactado, apresenta um peso específico natural de $18,5 \text{ kN/m}^3$. Este aterro não é permeável. As edificações aplicarão no terreno uma carga equivalente a 12 kN/m^2 uniformemente distribuída em toda a superfície.

Experiências anteriores em regiões semelhantes indicam que a argila mole apresenta as seguintes características:

Umidade natural = 75%; limite de liquidez = 80%; índice de plasticidade = 48%; índice de vazios inicial = 1,95; peso específico natural = 15,9 kN/m³; razão de sobreadensamento = 2; índice de compressão = 1,2; índice de recompressão = 0,15 e coeficiente de adensamento = 0,04 m²/dia. Com base nestes dados, determine que altura deve ter o aterro de sobrecarga para satisfazer as condições de projeto descritas.

Resolução 04.20

Representação da situação inicial:



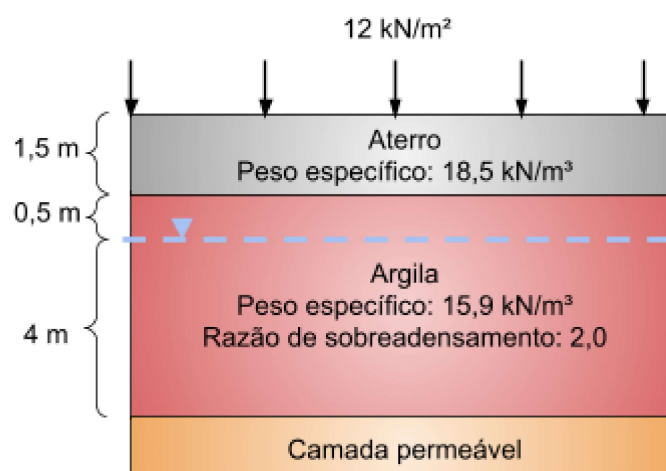
Cálculo da tensão efetiva inicial no centro da camada de argila:

$$\sigma'_0 = 2,25 \cdot 15,9 - 1,75 \cdot 10 \approx 18,3 \text{ kPa}$$

Determinação da tensão de pré-adensamento:

$$\sigma'_{RSO} = \sigma' \cdot RSO = 18,3 \cdot 2,0 \approx 36,6 \text{ kPa}$$

Situação após a construção do aterro:



Acréscimo de carga:

$$\Delta\sigma' = 1,5 \cdot 18,5 + 12 = 39,75 \text{ kPa}$$

Como a carga atual somada ao acréscimo de carga superará a tensão de pré-adensamento, a determinação do recalque total será composta por 02 parcelas - 01 referente ao trecho de recompressão, quando a carga total é menor que a tensão de pré-adensamento e 01 referente ao trecho em compressão, quando a tensão de pré-adensamento já foi ultrapassada:

$$\rho_T = \frac{H_0}{1+e_0} \cdot [C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma_{RSO}}\right) + C_R \cdot \log\left(\frac{\sigma_{RSO}}{\sigma'_0}\right)]$$

$$\rho_T = \frac{4,5}{1+1,95} \cdot [1,2 \cdot \log\left(\frac{18,3+39,75}{36,6}\right) + 0,15 \cdot \log\left(\frac{36,6}{18,3}\right)]$$

$$\rho_T \approx 0,44 \text{ m}$$

Deve-se atentar ao fato de que se o aterro for construído com a espessura apresentada, a cota final das casas ficaria abaixo do definido em projeto. Portanto, reprojeta-se o aterro considerando o recalque estimado, verificando o novo acréscimo de tensão devido a ele:

$$\Delta\sigma' = (1,5 + \rho_T) \cdot 18,5 + 12$$

$$\rho_T = \frac{4,5}{1+1,95} \cdot [1,2 \cdot \log\left(\frac{18,3+(1,5+\rho_T) \cdot 18,5+12}{36,6}\right) + 0,15 \cdot \log\left(\frac{36,6}{18,3}\right)]$$

$$\rho_T = 1,525 \cdot [1,2 \cdot \log\left(\frac{18,3+27,75+12+18,5 \rho_T}{36,6}\right) + 0,15 \cdot 0,301]$$

$$\rho_T = 1,525 \cdot [1,2 \cdot \log\left(\frac{58,05+18,5 \rho_T}{36,6}\right) + 0,045]$$

$$\rho_T = 1,525 \cdot [1,2 \cdot \log(1,586 + 0,505 \rho_T) + 0,045]$$

$$\rho_T = 1,525 \cdot 1,2 \cdot \log(1,586 + 0,505 \rho_T) + 1,525 \cdot 0,045$$

$$\rho_T = 1,83 \cdot \log(1,586 + 0,505 \rho_T) + 0,069$$

Por tentativa:

ρ_T	$1,83 \cdot \log(1,586 + 0,505 \rho_T) + 0,069$	Ok?
0,50	0,55	Não
0,55	0,56	Não
0,56	0,57	Não
0,57	0,57	Sim!

Portanto, o recalque total da camada de argila referente ao aterro definitivo é de 0,57 m. É este o recalque que deve ser alcançado em 02 meses para atender as condições de projeto. Com o coeficiente de consolidação C_v , o tempo t e a altura de drenagem H_d determina-se o fator tempo T :

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} = \frac{0,04 \cdot 60}{4,5^2} \approx 0,12$$

A partir do fator tempo T determina-se o grau de consolidação U:

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,12}{\pi}} \approx 0,39$$

Com o grau de consolidação U calcula-se o recalque total:

$$U = \frac{\rho}{\rho_T}; \quad 0,39 = \frac{0,57}{\rho_T}$$

$$\rho_T = 1,46 \text{ m}$$

Determina-se o acréscimo de tensão total necessário para gerar o recalque definido:

$$\rho_T = \frac{H_0}{1+e_0} \cdot [C_C \cdot \log(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma_{RSO}}) + C_R \cdot \log(\frac{\sigma_{RSO}}{\sigma'_0})]$$

$$1,46 = \frac{4,5}{1+1,95} \cdot [0,15 \cdot \log(\frac{18,3+\Delta\sigma'}{36,6}) + C_R \cdot \log(\frac{36,6}{18,3})]$$

$$1,46 = 1,52 \cdot [1,2 \cdot \log(\frac{18,3+\Delta\sigma'}{36,6}) + 0,15 \cdot 0,301]$$

$$0,96 = 1,2 \cdot \log(\frac{18,3+\Delta\sigma'}{36,6}) + 0,045$$

$$0,905 = 1,2 \cdot \log(\frac{18,3+\Delta\sigma'}{36,6})$$

$$\log(\frac{18,3+\Delta\sigma'}{36,6}) = 0,80$$

$$10^{0,80} = \frac{18,3+\Delta\sigma'}{36,6}$$

$$\Delta\sigma' = 10^{0,80} \cdot 36,6 - 18,3 \approx 213 \text{ kPa}$$

O acréscimo de tensão total é composto pelo aterro e pelas casas. Separa-se o acréscimo gerado por cada origem:

$$\Delta\sigma'_{casas} = 12 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma'_{aterro} = \Delta\sigma' - \Delta\sigma'_{casas} = 201 \text{ kPa}$$

Para o aterro de sobrecarga alcançar o recalque necessário, deve ser atingida a carga de 201 kPa:

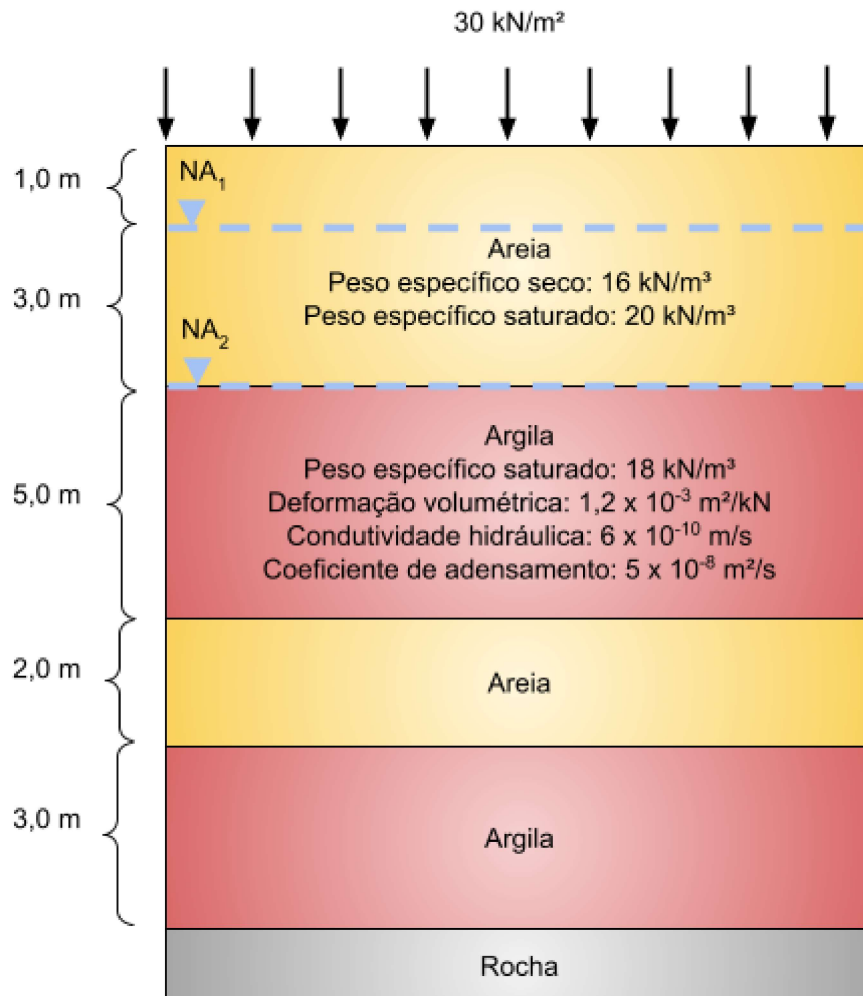
$$\Delta\sigma'_{aterro} = \gamma \cdot H$$

$$201 = 18,5 \cdot H$$

$$H \approx 10,8 \text{ m}$$

Adensamento 04.21

A figura a seguir ilustra um perfil no qual o nível de água, inicialmente na posição NA_1 , foi rebaixado para a posição NA_2 . Nove meses após o início do rebaixamento foi construído um aterro infinito que provoca um acréscimo de tensão de 30 kN/m^2 .



- Determine o recalque total em cada camada de argila.
- Determine o recalque após 9 meses em cada camada de argila.
- Determine a porcentagem média de recalque após 9 meses em relação ao recalque total em cada camada de argila.
- Determine a porcentagem média de recalque na profundidade de 5 metros após 1 ano.

Resolução 04.21

a)

Inicialmente verifica-se o acréscimo de tensão efetiva devido ao rebaixamento do lençol freático no centro de cada camada de argila:

Camada superior:

$$\sigma_{s_0} = 1 \cdot 16 + 3 \cdot 20 + 2,5 \cdot 18 = 121 \text{ kN/m}^2$$

$$u_{s_0} = 5,5 \cdot 10 = 55 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{s_0} = \sigma_{s_0} - u_{s_0} = 66 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{s_f} = 4 \cdot 16 + 2,5 \cdot 18 = 109 \text{ kN/m}^2$$

$$u_{s_f} = 2,5 \cdot 10 = 25 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{s_f} = \sigma_{s_f} - u_{s_f} = 84 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma'_s = \sigma'_{s_f} - \sigma'_{s_0} = 18 \text{ kN/m}^2$$

Então determina-se o recalque total devido ao rebaixamento do lençol freático:

Como o diagrama de tensões é triangular, considera-se a metade do acréscimo.

$$\rho_{\text{Srebaixamento}} = H \cdot m_v \cdot \frac{\Delta\sigma'_s}{2}$$

$$\rho_{\text{Srebaixamento}} = 5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{18}{2} = 0,054 \text{ m} \approx 5 \text{ cm}$$

E o recalque total devido ao aterro:

$$\rho_{\text{Saterro}} = H \cdot m_v \cdot \Delta\sigma'_{\text{aterro}}$$

$$\rho_{\text{Saterro}} = 5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 0,180 \text{ m} \approx 18 \text{ cm}$$

E, por fim, o recalque total da camada superior de argila:

$$\rho_{ST} = \rho_{\text{Srebaixamento}} + \rho_{\text{Saterro}} = 0,234 \text{ m} \approx 23 \text{ cm}$$

Camada inferior:

$$\sigma_{l_0} = 1 \cdot 16 + 3 \cdot 20 + 5 \cdot 18 + 2 \cdot 20 + 1,5 \cdot 18 = 233 \text{ kN/m}^2$$

$$u_{l_0} = 11,5 \cdot 10 = 115 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{l_0} = \sigma_{l_0} - u_{l_0} = 118 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{l_f} = 4 \cdot 16 + 5 \cdot 18 + 2 \cdot 20 + 1,5 \cdot 18 = 221 \text{ kN/m}^2$$

$$u_{l_f} = 8,5 \cdot 10 = 85 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{lf} = \sigma_{lf} - u_{lf} = 136 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma'_l = \sigma'_{lf} - \sigma'_{l0} = 18 \text{ kN/m}^2$$

Então determina-se o recalque total devido ao rebaixamento do lençol freático:

$$\rho_{\text{rebaixamento}} = H \cdot m_v \cdot \frac{\Delta\sigma'_l}{2}$$

$$\rho_{\text{rebaixamento}} = 3 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{18}{2} = 0,032 \text{ m} \approx 3 \text{ cm}$$

E o recalque total devido ao aterro:

$$\rho_{\text{aterro}} = H \cdot m_v \cdot \Delta\sigma'_{\text{aterro}}$$

$$\rho_{\text{aterro}} = 3 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 0,108 \text{ m} \approx 11 \text{ cm}$$

E, por fim, o recalque total da camada inferior de argila:

$$\rho_{IT} = \rho_{\text{rebaixamento}} + \rho_{\text{aterro}} = 0,140 \text{ m} \approx 14 \text{ cm}$$

b) Após 09 meses, não haverá o aterro. Portanto, todo o acréscimo de tensão será devido ao rebaixamento do lençol freático.

Camada superior:

Com coeficiente de adensamento C_v , o tempo t e a altura de drenagem H_d determina-se o fator tempo T :

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_{ds}^2} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot (9 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)}{2,5^2} \approx 0,19$$

E portanto calcula-se o grau de consolidação U :

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,19}{\pi}} \approx 0,49 \approx 49\%$$

O recalque parcial é relação direta entre o recalque total e o grau de consolidação:

$$\rho_{\text{9 meses}} = \rho_{\text{rebaixamento}} \cdot U = 0,054 \cdot 0,49 \approx 0,026 \approx 2,6 \text{ cm}$$

Camada inferior:

Com coeficiente de adensamento C_v , o tempo t e a altura de drenagem H_d determina-se o fator tempo T :

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_{dl}^2} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot (9 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)}{3^2} \approx 0,13$$

E portanto calcula-se o grau de consolidação U :

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,13}{\pi}} \approx 0,41 \approx 41\%$$

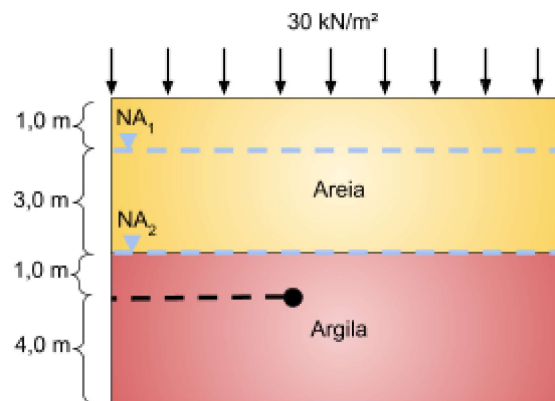
O recalque parcial é relação direta entre o recalque total e o grau de consolidação:

$$\rho_{\text{19 meses}} = \rho_{\text{rebaixamento}} \cdot U = 0,032 \cdot 0,41 \approx 0,013 \approx 1,3 \text{ cm}$$

c) A porcentagem média de recalque após 9 meses é exatamente o grau de consolidação neste momento.

Portanto, para a camada superior $U_s = 49\%$ e para a camada inferior $U = 41\%$, referindo-se apenas ao acréscimo de tensão devido ao rebaixamento do lençol freático.

d) Análise um ponto na profundidade 5 m:



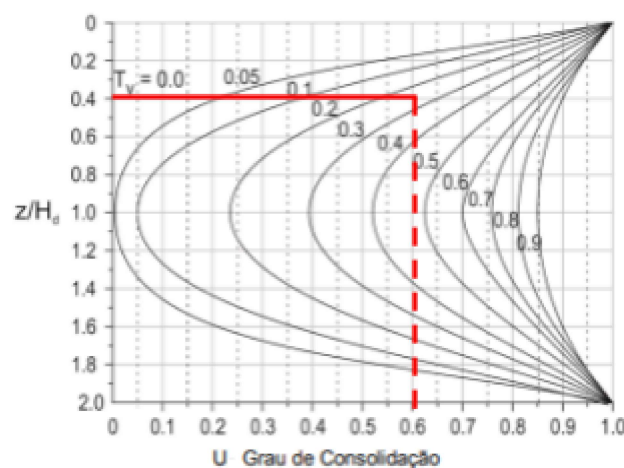
Após 01 ano, obtém-se o seguinte fator tempo T:

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot (365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)}{2,5^2} \approx 0,25$$

O ponto em questão se encontra na profundidade 1,0 m em relação à camada de argila,

$$\text{portanto } \frac{z}{H_d} = \frac{1}{2,5} = 0,4.$$

Graficamente, determina-se o grau de consolidação $U_{1 \text{ ano}}$:



$$U_{1 \text{ ano}} \approx 0,60 \approx 60\%$$

Conclusão

O esforço multidisciplinar empregado por parte de monitores, alunos, membros do Grupo de Estudos em Geotecnia da UFPR (GEGEO) e docentes do Departamento de Construção Civil da Universidade (DCC) possibilitou a produção do documento. O crescimento acadêmico dos autores se evidenciou na necessidade da constante procura e reflexões acerca dos temas, para ser entregue um material verdadeiramente útil e objetivo à comunidade acadêmica.

Espera-se que o alcance da apostila se estenda para além dos limites da UFPR e que auxilie o aprendizado da Mecânica dos Solos e da Geotecnia em geral para todos que tenham contato. O documento é gratuito e de livre divulgação e solicita-se que seja referenciado sempre que utilizado.

Os autores agradecem a todos os participantes, que proporcionaram a elaboração do projeto e o trataram com a seriedade necessária. A você, estudante, também estendemos nosso muito obrigado. Sem você o trabalho não teria sentido.

Referências

- BÉLA, BODÓ; COLIN, JONES,. *Introdução à Mecânica dos Solos*: Grupo GEN, 2017. Disponível em: integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521633129/. Acesso em: 28 de setembro de 2021.
- BARNES, Graham. *Mecânica dos Solos - Princípios e Práticas*: Grupo GEN, 2016. Disponível em: integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155084/. Acesso em: 28 de setembro de 2021.
- DAS, Braja. M.; SOBHAN, Khaled. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. Cengage Learning Brasil, 2019. Disponível em: integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522128280/. Acesso em 28 setembro de 2021.
- MURRIETA, Pedro. *Mecânica dos Solos*. Grupo GEN, 2018. Disponível em: integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595156074/. Acesso em 28 de setembro de 2021.
- PINTO, Souza. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3ª Edição Carlos de Souza Pinto. São Paulo: Oficina de textos, 2006.