

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

MECÂNICA DOS SOLOS

Controle Tecnológico de Solos na Execução de Camadas de Pavimentos

1. Semestre 2025

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

1

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

O solo escolhido para ser utilizado para uma dada camada de pavimento, primeiramente foi escolhido devido a sua: disponibilidade, quantidade e localização em relação onde deverá ser utilizado e, em uma segunda avaliação o solo foi submetido ao ensaio de resistência (CBR).

Como sequência de ensaio temos:

- a) a quantidade de material se é satisfatória
- b) quanto logística - distância de transporte da jazida à obra;
- c) resistência do solo frente ao ensaio de CBR com o solo nas condições acima

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

2

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Por exemplo:

Para um determinado trecho, entre as estacas 1231 e 1256, (500m) será utilizado o solo da Fazenda Itororomba como camada de reforço do subleito.

Características do controle	Massa específica aparente seca = 1,650 g/cm ³
	Umidade de compactação = 19.6%
Grau de compactação	95% PN.

Observe que a característica principal que o solo deve apresentar em serviço é a resistência que ele apresentou em laboratório. Logo, todo o projeto de dimensionamento das camadas do pavimento, (no caso) foi feito levando em consideração essa resistência, portanto, é de fundamental importância que o solo trabalhe com a referida resistência

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

3

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Processo construtivo

No processo construtivo de uma camada de pavimento de solo, basicamente consiste em esparramar o solo conforme estaqueamento feito pela topografia, a espessura do solo a ser esparramada, denominada de espessura solta (Es). Normalmente, é feito um trecho experimental para determinação, não só da espessura de solo a ser esparramada, mas também para a determinação do número de fechas, dentre outros procedimentos de execução.

Em seguida o solo é compactado por amassamento até que o solo apresente as características de resistência (obtidas em laboratório).

Comumente não se controla da resistência (CBR) em campo e sim a umidade de compactação e a densidade seca máxima que o material está, logo, se o material está dentro dos limites especificados, de densidade e umidade, pode-se esperar que o solo esta dentro da resistência desejada.

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

4

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

5

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO

Escavação, carregamento e transporte de solos consistem em operações recorrentes da implantação da via. Através do levantamento topográfico da geometria do terreno, verifica-se a necessidade, em função do projeto, os locais que deverão ocorrer corte de solo e locais de aterro.

É comum a ocorrência de não se dispor de solo suficiente na sessão de corte para suprir a sessão de aterro, tornando-se necessário solo de outros locais, nesse caso o local de onde se importa esse solo recebe o nome de caixa de empréstimo

Dentre as 3 atividades, o transporte é a mais onerosa. Caso ocorra corte de solo em excesso, esse material, denominado de bota fora, será transportado para um local de bota fora.

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

6

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO

Os serviços referentes a cada etapa: escavação e transporte consistem, normalmente, em medições distintas, sendo essas medições objeto de pagamento.

A medição do volume escavado é feita cubizando-se no talude o volume escavado em m³.

Já para o transporte, a medição é feita por momento de transporte, sendo a unidade volume x km (m³/km) transportado, considerando-se como mínima distância para medição de 10 dam (100 m), conforme Especificação Técnica ET-DE-Q00/002 (2006) – Escavação e carga de material.

Entretanto, é comum depararmos com condições em que no custo do transporte já esteja incluso a atividade de escavação.

7

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO**Empolamento**

Empolamento é uma propriedade característica dos solos, que somente é considerada quando da necessidade de transporte de solo.

Tem-se como sinônimo de empolamento a expansão volumétrica. O valor é expresso como taxa de empolamento (TE), em porcentagem e a determinação é função da relação entre as densidades naturais e a densidade solta, trataremos a densidade solta como densidade de transporte (γ_t).

$$TE = \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_t} - 1 \right) * 100$$

Onde: TE = taxa de empolamento (%)
 γ_n = densidade natural (g/cm³)
 γ_t = densidade de transporte (g/cm³)

8

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO

O solo nas condições de terreno natural se encontra com um dado volume denominado de volume natural (V_n) que, por conseguinte, apresenta densidade denominada de massa específica aparente natural (γ_n), essa condição é função do seu próprio processo de formação geológica.

Após o seu desmonte, assume, portanto, volume solto, nessa apostila denominado de volume de transporte V_t , maior do que aquele em que se encontrava em seu estado natural V_n ($V_t > V_n$)

Consequentemente, com uma massa específica aparente solta, denominada de massa específica aparente de transporte (γ_t) correspondente ao material solto, obviamente, menor do que massa específica aparente natural (γ_n).

9

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO

Observe-se que a massa de solo no talude de corte é a mesma quando ocorre o desmonte. O que muda é o volume da massa de solo, e consequentemente, muda a massa específica aparente em que o solo se encontra, assim, pode-se assegurar a igualdade da Equação:

$$M = \gamma_n * V_n = \gamma_t * V_t$$

O espalhamento e a compactação do solo como camada de pavimento, pode-se afirmar que, o volume de solo compactado (V_c) x a massa específica aparente úmida de campo γ_u iguala-se a M

$$M = \gamma_n * V_n = \gamma_t * V_t = \gamma_u * V_c$$

Salienta-se que a operação de compactação do solo numa dada camada de pavimento não consiste em operação de terraplanagem.

10

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO**Exercício resolvido:**

Em uma implantação de rodovia estavam executando uma camada de reforço do subleito entre as estacas 421 e 457. O material (solo) escolhido foi o da jazida: Mão Pelada com distância de transporte até a obra de 3,340 km. O solo apresentou massa específica aparente seca aparente = 1,59 g/cm³, umidade ótima = 18,2%, taxa de empolamento TE = 27,5% e massa específica natural (γ_n) = 1,10 g/cm³. A largura da plataforma de 12 m. A camada de reforço com 40 cm, executada em duas camadas de 20 cm cada. Assumindo-se o custo de escavação R\$ 9,30 para cada m³, custo de transporte de R\$ 3,34 m³/km e o custo de compactação R\$ 9,76 m³, determinar o custo final para execução do serviço incluindo todos os custos: escavação, transporte e compactação.

11

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO**Exercício resolução:**

Dados:	Jazida Mão Pelada –	$\gamma_n = 1,1 \text{ g/cm}^3$
	$\gamma_s = 1,59 \text{ g/cm}^3$	TE = 27,5%
	$w_{ot} = 18,2\%$	
	$\gamma_u = 1,88 \text{ g/cm}^3$	

Resolução:

Determinação do volume de solo necessário da camada compactada (V_c):	
Extensão = 457 – 421	= 36 estacas
	= 36 * 20 m = 720 m
Volume compactado (V_c)	= 720 m * 12 m * 0,40 m
	$V_c = 3.456 \text{ m}^3$

Determinação da densidade de transporte	$27,5\% = (1,1/\gamma_t - 1) * 100$
	$\gamma_t = 0,862 \text{ g/cm}^3$

12

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

ESCAVAÇÃO / TRANSPORTE / COMPACTAÇÃO

Exercício resolução:

Volume transportado (Vt) $\gamma_u * V_c = \gamma_t * V_t$
 $V_t = 1,88 * 3456 / 0,862$
 $V_t = 7537 \text{ m}^3$

Volume de escavação (Vn) $\gamma_u * V_c = \gamma_n * V_n$
 $V_n = 1,88 * 3456 / 1,1$
 $V_n = 5907 \text{ m}^3$

Determinação do custo

Serviço	Custo unitário		Parâmetros do solo		Volume total	Custo R\$
	R\$	Unidade	Massa esp. ap.			
Escavação	9,30	m ³	γ_{nat} 1,1	g/cm ³	5907	R\$ 54.935,10
Transporte	3,34	m ³ /km	γ_t 0,82	g/cm ³	7537	R\$ 84.079,76
Compactação	9,76	m ³	γ_u 1,88	g/cm ³	3456	R\$ 33.730,56
Distância de transporte = 3,340 km					Total	R\$ 172.745,42

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

13

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Tipos de controle executados em campo

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

14

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Controle de Campo por Deflexão com a viga Benkelman

Deflexão com a saída do caminhão



Posicionamento da viga Benkelman

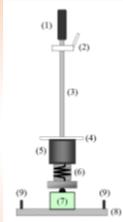



Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

15

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Controle de Campo por Deflexão low weight deflectometer – LWD

1. – Manopla
2. – Batente superior e trava
3. – Haste
4. – Limitador do soquete
5. – Soquete
6. – Conjunto de molas
7. – Sensor de medição
8. – Base

LWD

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

16

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Controle de Campo por Deflexão



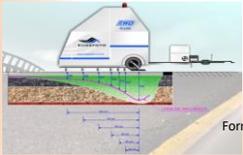
Equipamento FWD



Detalhe da placa e dos geofones



Equipamento Kuab



Forma de auscultação do pavimento

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

17

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Módulo de Compressibilidade - Placa de carga dinâmica



Placa de carga dinâmica

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

18

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Cone Sul africano

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

19

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

CONTROLE DE UMIDADE DE CAMPO

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

20

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Controle de Umidade de Campo

- Estufa
- Frigideira
- Álcool
- Speedy
- Nuclear
- Outros

Qualquer dispositivo capaz de remover ou medir a massa de água da amostra de forma rápida, ou ainda, de medir a massa de água de forma indireta através de algum procedimento de compactação do solo, por exemplo!

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

21

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

CONTROLE DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA DE CAMPO

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

22

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Controle da Densidade de Campo (γ campo)

- Cravação de cilindro
- Frasco de Funil e areia
- Óleo
- Nuclear
- Outros

Processo de abertura do furo Frasco do funil areia apoiado sobre o furo Frasco do funil areia apoiado sobre o furo

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

23

Fatec- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Funil areia

$P_{af} = P_{if} - P_{ff} - P_c$

Onde: P_{af} = Peso de areia do furo
 P_{if} = Peso inicial do funil
 P_{ff} = Peso final do funil
 P_c = Peso de areia do cone

$V_f = P_{af} / \gamma_{areia}$

Onde V_f = volume do furo
 γ_{areia} = densidade da areia

$\gamma_{seca} = P_u / V_f * F_c$

Mecânica dos solos Prof. Edson de Moura

24

Grau de compactação

O controle tecnológico de solos em pavimentação, consiste basicamente em comparar:

teor de umidade de campo X teor de umidade de laboratório

A comparação é direta. Indicam-se as estacas que estão fora do limite especificado (laboratório).

massa específica aparente seca de campo X massa específica aparente seca de laboratório

Verifica-se através do grau de compactação

$$GC = \frac{Y_{campo}}{Y_{laboratório}} * 100$$

Tratamento estatístico de conformidade para aceitação

A Especificação técnica ET-DE-P00/015 (2005) - Sub-Base ou Base de Solo Arenoso Fino de Comportamento Laterítico –SAFL do DER-SP, apresenta o tratamento estatístico de conformidade para aceitação do teor de umidade, da massa específica aparente seca "in situ", e o respectivo grau de compactação, a ser realizado a cada 150 m² de pista compactada. O procedimento consiste em duas formas:

a) Através da comparação direta entre os resultados individuais obtidos com o limite inferior (ou superior) especificado LIE (LSE).

b) Com análise estatística unilateral

$$X = \bar{X} - KS \geq LIE$$

Onde: X = valor individual determinado,
 X barra = média aritmética,
 K = coeficiente tabelado em função do número de amostras
 S = desvio padrão e,
 LIE = limite inferior especificado

Aceitação / Rejeição

Para as condições de aceitação/rejeição, tanto para as condições unilaterais como bilateral, aplicam-se as equações

$$\bar{X} - KS \geq LIE \rightarrow \text{aceita - se o serviço}$$

$$\bar{X} - KS < LIE \rightarrow \text{rejeita - se o serviço}$$

$$\bar{X} + KS \leq LSE \rightarrow \text{aceita - se o serviço}$$

$$\bar{X} + KS > LSE \rightarrow \text{rejeita - se o serviço}$$

Os valores de K são tabelados

N	K	N	K	N	K
4	0,95	10	0,77	25	0,67
5	0,89	12	0,75	30	0,66
6	0,85	14	0,73	40	0,64
7	0,82	16	0,71	50	0,63
8	0,80	18	0,70	100	0,60
9	0,78	20	0,69	∞	0,52

Resolvido de controle de campo umidade e massa específica aparente seca pelo método funil areia

CONTROLE TECNOLÓGICO DE UMIDADE PELO MÉTODO DA FRIGIDEIRA E DENSIDADE PELO MÉTODO DO FUNIL E AREIA COM ESPECIFICAÇÃO DE ACEITAÇÃO DE SERVIÇO PELO CRITÉRIO ESTADÍSTICO

n	Parâmetros				Especificação	Critério de aceitação	Limites
	W _{líq} (%)	P ₁₀₀ (%)	P ₂₀₀ (%)	T ₂₀₀ (%)			
211	184,81	130,61	10,32	23,2	+ 1% e - 2%	por comparação direta	LIE ≥ 18,5% LSE < 21,5%
212	179,26	146,06	11,01	22,6		Análise estatística	$\bar{X} - KS \geq LIE \geq 95\%$
213	157,46	123,82	10,24	22,8			
214	150,81	117,28	10,50	19,7			
215	158,17	165,06	12,11	20,1			
216	204,86	171,17	11,60	18,7			
217	170,11	142,06	10,20	19,8			
218	172,47	147,88	10,16	19,8			
219	156,58	161,08	12,26	19,3			
213	187,49	155,56	11,59	20,5			

n	Teor de umidade				P ₁₀ (%)	P ₂₀ (%)	P ₄₀ (%)	P ₆₀ (%)	P ₁₀₀ (%)	T ₂₀₀ (%)	CG	
	W _{líq} (%)	P ₁₀₀ (%)	P ₂₀₀ (%)	T ₂₀₀ (%)								
211	184,81	130,61	10,32	23,2	1273,02	1045,10	6395,34	4518,92	1061,05	685,32	1,52	0,94
212	179,26	146,06	11,01	22,6	1242,81	1030,04	6326,38	4508,49	1071,52	611,82	1,58	0,98
213	157,46	123,82	10,24	22,8	1137,12	929,60	5480,18	4119,92	910,94	593,69	1,56	0,90
214	150,81	117,28	10,50	19,7	1126,01	806,60	5710,93	3956,78	950,83	606,07	1,50	0,90
215	158,17	165,06	12,11	20,1	1154,77	961,51	5829,45	4085,71	940,42	626,72	1,55	0,98
216	204,86	171,17	11,60	18,7	1121,02	946,32	5652,47	3939,69	918,96	585,32	1,60	0,94
217	170,11	142,06	10,20	19,8	1132,26	965,13	5974,54	4242,07	930,15	598,16	1,58	0,98
218	172,47	147,88	10,16	19,8	1189,78	979,44	5985,27	4229,28	907,66	576,11	1,59	0,98
219	156,58	161,08	12,26	19,3	1205,04	1008,37	5908,00	4085,07	1008,05	624,39	1,54	0,92
213	187,49	155,56	11,59	20,5	1222,94	1014,02	6012,76	4184,19	1001,26	622,12	1,51	0,93

Y _{de arena}	1,57	g/cm ³	Módulo (C)	1,96	0,0033
P ₁₀	198,52	g	σ _x (padrão (S))		0,8194
			$\bar{X} - KS$		0,96

PESSOAL O CURSO DE MECÂNICA DOS SOLOS FINALIZA AQUI!!

ESPERO QUE TENHAM GOSTADO E APROVEITADO, ABRAÇO A TODOS E AGUADO VCS. NO PRÓXIMO CURSO.

Prof. Edson