

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E DA CURVA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

DETERMINATION OF THE CALIFORNIA BEARING RATIO AND SOIL COMPACTION CURVE

HELLEM VICTÓRIA RIBEIRO DOS SANTOS

Graduada em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) e Mestranda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Goiás (UFG)
hellemvsantos@gmail.com

DÉBORA SILVA SANTOS

Graduada em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás)
deborasilva.dss@gmail.com

GUSTAVO COUTINHO BORGES

Graduado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás)
itzgustavo@icloud.com

Resumo: No procedimento de compactação, aplica-se repetidas cargas no solo, reduzindo seu volume e, conseqüentemente, os vazios presentes no mesmo, o que leva a um aumento do seu peso específico seco. O ensaio laboratorial do tipo Proctor é o ensaio de compactação mais usado e conhecido, e surgiu visando controlar a compactação do solo em obras. Este ensaio consiste em compactar uma amostra de solo em um molde, determinando seu teor de água e seu peso específico seco, com esses valores é possível traçar a curva de compactação do solo e também determinar o Índice de Suporte Califórnia do mesmo, neste caso o ISC do solo analisado no ensaio foi de 42, 61%, sendo este um resultado satisfatório.

Palavras-chave: Índice de Suporte Califórnia. Curva de compactação. Solo.

Abstract: In the compaction procedure, repeated loads are applied to the soil, reducing its volume and, consequently, the voids present in it, which leads to an increase in its dry specific weight. The laboratory test of the Proctor type is the most used and well-known compaction test, and it was created to control soil compaction in works. This test consists of compacting a soil sample in a mold, determining its water content and its dry specific weight, with these values it is possible to draw the soil compaction curve and also determine the California Bearing Ratio of the same, in this case the Soil CBR analyzed in the test was 42, 61%, which is a satisfactory result.

Keywords: California Bearing Ratio. Compaction curve. Soil.

INTRODUÇÃO

O procedimento capaz de conferir uma melhora às propriedades do solo bem como a diminuição dos vazios presentes no mesmo é denominado compactação. A compactação pode

ser realizada de forma manual ou mecânica, por intermédio de forças exteriores como compressão, vibração ou impacto (PEREIRA, 2017).

Produz um crescimento ao peso específico do solo e à resistência ao cisalhamento. Por meio da redução de vazios, ocorre também a redução da permeabilidade e compressibilidade (PEREIRA 2017).

O processo de compactação acarreta como resultado um maior contato entre as partículas, o que gera uma maior resistência ao solo e a conseqüente diminuição de sua deformabilidade, desse modo, portanto, o solo fica mais denso e também menos permeável (SANTOS, 2008).

A relação entre o peso específico seco do solo e o teor de umidade pode ser determinada através do ensaio de compactação. O ensaio mais comum para compactação de solos é o de Proctor, padronizado pela ABNT NBR 7182:2016 (SANTOS, 2008). Este ensaio surgiu da necessidade de controle dos resultados dos solos após a compactação em obras.

A compactação do solo é de suma importância para a estabilização de maciços terrosos e barragens de terra, além de ser fundamental ter um solo devidamente compacto para execução de pavimentação, por isso antes do início de uma obra deve-se obter a curva de compactação do solo (TONIN, 2017).

O ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia determina a relação entre a pressão exercida por um pistão no solo e a pressão padrão necessária para esse mesmo pistão penetrar um solo de brita (MALANCONI, 2013).

Este ensaio do ISC é altamente usado para a construção de rodovias, e também faz uso da curva de compactação para a determinação do resultado final deste ensaio (MALANCONI, 2013).

A compactação do solo é um procedimento, no qual se aplica repetidas cargas no solo, reduzindo seu volume e, portanto, seu índice de vazios, gerando um aumento de seu peso específico seco. A redução de volume ocorre devido à expulsão de ar, entretanto não ocorre alteração no teor de umidade do solo, nem alteração no volume de sólidos do mesmo (TONIN, 2017).

O que ocorre com a compactação é o aumento da saturação do solo, com a expulsão do ar, mas não é possível fazer com que todos os vazios de ar sejam expulsos, pois sempre

fica ar aprisionado entre as partículas sólidas. O que este processo gera é a aproximação das partículas de solo, e também o deixa mais denso e menos permeável (PEREIRA, 2013).

Existem dois fatores que influenciam no resultado de compactação do solo: o teor de água usado na compactação e a energia aplicada à mesma (PEREIRA, 2013).

O ensaio laboratorial de compactação mais usado e conhecido é o tipo Proctor, este surgiu da necessidade de controle da compactação do solo em obras. O ensaio consiste em compactar uma amostra de solo em um molde, determinando seu teor de água e seu peso específico seco. Este procedimento deve ser feito com o mesmo tipo de solo para diferentes teores de água, podendo ao final traçar a curva de compactação (TONIN, 2017).

Os estudos de compactação do solo se iniciaram com a teoria da compactação que foi desenvolvida por Ralph Proctor. Em 1933, ele divulgou seu método de compactação e chegou à conclusão de que a compactação do solo está diretamente relacionada ao teor de umidade do mesmo (TONIN, 2017).

A curva de compactação do solo é representada por meio de um Gráfico da variação do peso específico versus o teor de umidade do solo durante sua compactação. Essa curva é composta por dois ramos: o ascendente, também chamado ramo seco, onde ocorre à lubrificação das partículas de solo ocorrendo um aumento do peso específico, e o descendente, ou ramo úmido, onde se tem mais água que sólidos, levando à diminuição do peso específico (SANTOS, 2008).

De acordo com Pereira (2013), para construir a curva de compactação é necessária a aplicação da Equação 1:

$$\gamma_d = \frac{S \times \gamma_s \times \gamma_w}{(S \times \gamma_w) + (\gamma_s \times W)} \quad \text{Eq.1}$$

Onde γ_d é o peso específico aparente seco em g/cm^3 ; γ_s é o peso específico real dos grãos em g/cm^3 ; γ_w é o peso específico da água, considerado igual a 1g/cm^3 ; S é o grau de saturação, considerado 100% e W é o teor de umidade em %.

No ensaio de compactação é necessário que seja aplicado um esforço ou energia de compactação ao solo ao longo das camadas. O ensaio Proctor está diretamente relacionado a

essa energia, podendo ser uma energia compactação do tipo normal, intermediária ou modificada. Para cada energia aplicada a compactação do solo, a ABNT NBR 7182:2016 determina o soquete que será utilizado e o número de camadas para colocar todo o solo no recipiente/cilindro, além de determinar a energia que será aplicada à compactação deve-se definir também qual cilindro será usado (SANTOS, 2008).

Após compactado, o solo pode apresentar estrutura floclada, quando se tem baixos teores de umidade e a atração face-aresta não é vencida pela energia aplicada; ou estrutura dispersa, com elevado teor de umidade, onde há o aumento da repulsão e a compactação as orienta fazendo com que fiquem paralelas (TONIN, 2017).

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado no laboratório de geotecnia da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para determinar a curva de compactação do solo e o índice de suporte Califórnia. De acordo com a ABNT NBR 7182:2016, a preparação de solo deve ser realizada seguindo os parâmetros da ABNT NBR 6457:2016, e de acordo com esta norma, a quantidade de amostra necessária para um ensaio de compactação, com reuso de material seco, é de 7kg, sendo que todo esse material deve passar pela peneira de 19,1mm. Com essa massa já pronta coloca-a em cilindro grande (Figura 1).

Figura 1 – Bacia para colocar o solo, peneira de 19,1mm e cilindro grande.



Fonte: próprios autores (2017).

Fazendo uso de uma balança, de resolução de 0,001 g, aferiu-se uma massa de solo igual a 5,243 kg de uma bacia metálica, de tara igual a 0,732 kg, preenchida com cascalho. Após a aferição da massa, este solo passou pelo peneiramento nas peneiras de 25 e de 04,8 mm (Figura 2) e o material retido foi destorroado em um almofariz com o auxílio de uma mão de gral.

Figura 2 – Peneiramento do solo nas peneiras de 25 mm e 4,8 mm e Destorroamento do solo.



Fonte: próprios autores (2017).

Concomitantemente, foram realizadas três medições da altura do cilindro de número 16, bem como três mediações do seu diâmetro (Figura 3), realizando a média para ambas as grandezas, de acordo com o apresentado pelo Quadro 1:

Figura 3 – Medições da altura e diâmetro do cilindro com paquímetro digital.



Fonte: próprios autores (2017).

Quadro 1 – Valores das medições do cilindro.

Grandezas	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
Altura (cm)	11,495	11,469	11,452	11,472
Diâmetro (cm)	15,222	15,214	15,214	15,217

Fonte: próprios autores (2017).

Através destas médias, calcula-se o volume do cilindro que, por sua vez, é utilizado para determinação da massa específica aparente seca. Após o destorroamento, o solo foi depositado em uma fôrma metálica de tara igual a 1,847 kg e estes foram levados à balança, que registrou a massa de 7,062 kg, ou seja, uma massa de solo igual a 5,215 kg. Adicionou-se a este solo uma quantia de água destilada correspondente a 9% de sua massa, ou seja, 0,46935 kg que é igual a 469,35 ml (Figura 4). No entanto, foi utilizada uma quantidade de água destilada igual a 469,63 ml, foi encontrada fazendo uso de uma proveta e de uma balança de resolução igual a 0,01 g.

Figura 4 – Mistura de Solo e Água Destilada



Fonte: próprios autores (2017).

Os 469,63 ml de água destilada foram dispostos no solo e esta mistura foi revolvida até apresentar-se homogênea. As capsulas 41 e 82 (Figura 5) foram preenchidas até, aproximadamente, a metade de seu volume e foram levadas à estufa para eliminar a água presente no solo, com dados apresentados no Quadro 2:

Figura 5 – Capsula 82 e seu respectivo peso.



Fonte: próprios autores (2017).

Quadro 2 – Valores das massas do solo úmido e seco.

Capsulas	Tara (g)	Massa de Solo úmido + Tara (g)	Massa de Solo Seco + Tara (g)
41	24,42	122,52	112,37
82	24,38	106,36	98,26
27	24,41	153,97	142,87
98	26,20	156,10	145,95
81	12,40	85,55	80,55
140	11,90	72,24	67,91
146	12,15	63,83	59,33
102	11,02	69,40	65,10

Fonte: próprios autores (2017).

O solo úmido foi dividido em cinco frações aparentemente iguais (Figura 6) e cada uma das porções foi colocada no cilindro, que estava com o anel superior (colarinho) e com o disco espaçador e o conjunto foi apoiado sobre uma base rígida de madeira. Cada camada recebeu 26 golpes para obter uma energia intermediária e a compactação de cada uma delas foi precedida da escarificação da superfície da camada anterior para aumentar a adesão.

O cilindro preenchido com solo úmido compactado foi levado à balança que registrou uma massa de 21,208 kg. A massa do conjunto cilindro, anel superior e disco espaçador são de 16,882 kg, isto é, 4,326 kg de solo úmido compactado.

Posteriormente, foram retirados o anel superior e o espaçador. O cilindro foi virado de ponta cabeça, ainda apoiado na base rígida e recebeu anilhas; em seguida, foi mergulhado em água até a altura do colarinho e recebeu um relógio extensor que foi regulado com duas voltas positivas e zerado (Figura 7).

Figura 6 – Solo úmido dividido em cinco porções.



Fonte: próprios autores (2017).

Figura 7 – Cilindro com relógio extensor mergulhado em água.



Fonte: próprios autores (2017).

O relógio extensor foi fotografado no primeiro, segundo, terceiro, quarto e quinto dia após o início do procedimento. Foram realizadas, mediante intervalos, leituras do relógio extensor e, para melhor avaliação da expansão do solo, as medidas percentuais foram estabelecidas mediante a Equação 2. Onde Δh representa a expansão e h_0 representa a altura inicial:

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: ϵ é a expansão do solo, em percentuais (%), Δh representa a expansão em cm e h_0 representa a altura inicial em cm.

Após realizar a expansão, aferiu-se as cápsulas 41 e 82, para completar o Quadro 2, referente à umidade higroscópica. Também deve ser calculada a massa específica aparente através da equação 3, para melhor compreensão dos dados da curva de compactação do solo.

$$\gamma_s = \frac{Phx100}{V(100+h)} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde γ_s é o peso específico seco em g/cm^3 , Ph é o peso úmido do solo compactado em g, V é o volume útil do molde cilíndrico em cm^3 e h é o teor de umidade do solo compactado, em %.

Posteriormente, o cilindro foi levado ao equipamento chamado “Prensa CBR/Marshall”, para realizar o ensaio CBR e, como este é contínuo, fez-se necessário efetuar uma gravação para coletar todos os dados necessários. Para representar graficamente a calibração da prensa, é preciso determinar a força que a mesma aplica no solo, a partir da Equação 4:

$$F = 1,8177.Ld.G \quad \text{Eq. 4}$$

Onde F é a força dada em N, Ld é a leitura feita no extensômetro e g é a aceleração da gravidade em m/s^2 .

A pressão lida, por sua vez, é calculada pela divisão da força pela área que são determinadas, respectivamente, pelas Equações 5 e 6:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde σ é a pressão dada em MPa, F é a força em N e A é a área em mm^2 .

$$A = \pi r^2 \quad \text{Eq. 6}$$

Onde A é a área dada em mm^2 e r é o raio, igual a 49,4mm.

O CBR ou ISC (Índice de Suporte Califórnia) é determinada a partir da divisão entre a pressão lida e a pressão padrão, onde o resultado é multiplicado por 100, como expresso pela Equação 7:

$$CBR = \frac{\text{Pressão Lida}}{\text{Pressão Padrão}} \cdot 100 \quad \text{Eq. 7}$$

Onde CBR é o índice de suporte Califórnia em %, a Pressão lida é a calculada na equação 3 em MPa e a Pressão padrão é dada em MPa.

Os dados acerca dos cilindros foram expostos e estão apresentados no Quadro 3 e, no Quadro 2, os dados para determinação da umidade higroscópica dos outros grupos foram adicionados.

Quadro 3 – Dados referentes aos cilindros.

Cilindros	Umidade (%)	Volume (cm ³)	Massa do Cil. Vazio (g)	Massa do Cil. + Solo (g)
16	9	2.086,35	16.882	21.208
09	7	2.069,99	16.297	20.252
12	8	2.054,93	17.933	21.624
04	6	3.237,98	16.300	20.177

Fonte: baseado nos dados fornecidos pela Disciplina ENG1081 – Geotecnia I (2017).

Visando a obtenção de resultados e a composição de Gráficos, utilizou-se as planilhas eletrônicas disponibilizadas pela disciplina ENG 1081.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos dados extraídos das fotografias do relógio extensor apresentadas anteriormente, fez-se o Quadro 4 e as Figuras 8 e 9:

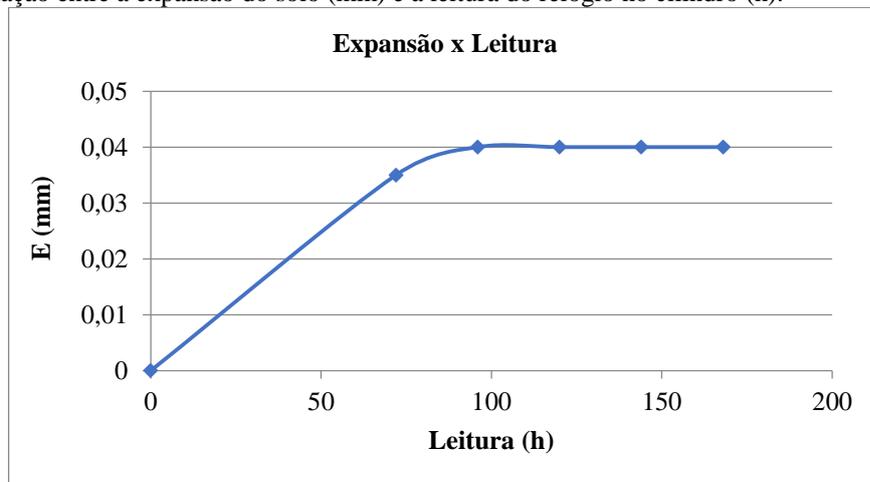
Quadro 4 – Dados das leituras do relógio extensor.

Data	Variação de Horas	Expansão (mm)	Expansão (%)
17/11/2017	0	0	0
20/11/2017	72	0,035	0,305
21/11/2017	96	0,040	0,349
22/11/2017	120	0,040	0,349

Data	Varição de Horas	Expansão (mm)	Expansão (%)
23/11/2017	144	0,040	0,349
24/11/2017	168	0,040	0,349

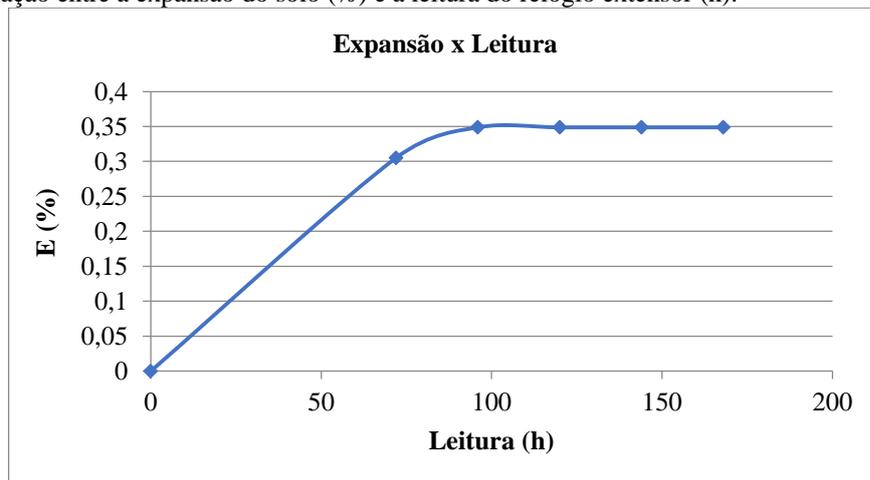
Fonte: baseado no material disponibilizado pela Disciplina ENG1081 – Geotecnia I (2017).

Figura 8 – Relação entre a expansão do solo (mm) e a leitura do relógio no cilindro (h).



Fonte: próprios autores (2017).

Figura 9 – Relação entre a expansão do solo (%) e a leitura do relógio extensor (h).



Fonte: próprios autores, utilizando o material fornecido pela disciplina (2017).

Fazendo uso dos valores adquiridos através da determinação da umidade higroscópica, que consiste em dividir a massa de água pela massa de solo seco, do material fornecido pela disciplina, dos dados retirados do cilindro e dos dados fornecidos por outros grupos, obteve-se os Quadros 2 e 3, apresentados no tópico anterior. Com os dados coletados,

tem-se o Quadro 5 e a Figura 10, para o cálculo da massa específica aparente que está diretamente relacionada ao grau de compactação do solo:

$$\gamma_s = \frac{Ph \times 100}{V(100+h)} \quad \text{Eq. 7}$$

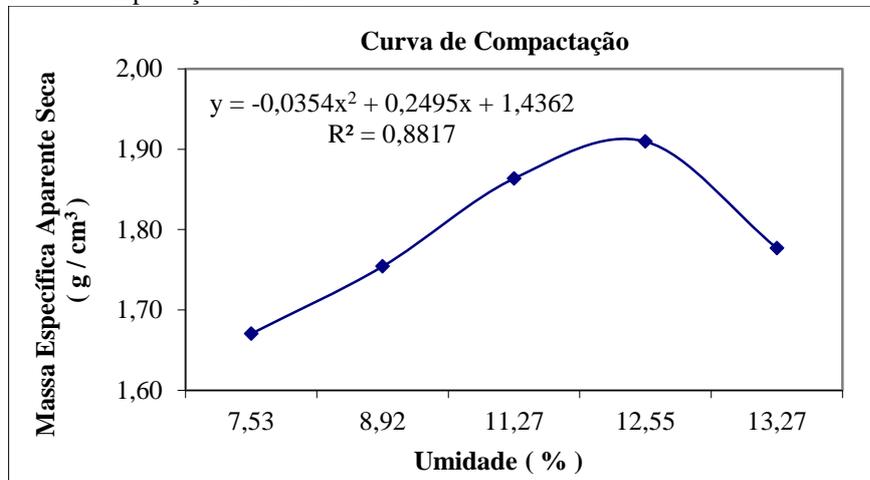
Onde γ_s é o peso específico seco em g/cm^3 , Ph é o peso úmido do solo compactado em g, V é o volume útil do molde cilíndrico em cm^3 e h é o teor de umidade do solo compactado em %.

Quadro 5 – Umidade higroscópica e massa específica de um ensaio de compactação.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - NBR 7182								
Local		Saibreira Edson Bento - Araquari						
Data da Coleta		05/04/2004			Amostra		2	
Energia de Compactação		Intermediária						
Umidade Higroscópica								
C.P nº	Capsula nº	Tara (g)	Tara Solo Água (g)	Tara Solo (g)	Água (g)	Solo (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)
12	81	12,4	85,55	80,55	5	68,15	7,34	7,53
	140	11,9	72,24	67,91	4,33	56,01	7,73	
9	27	24,41	153,97	142,87	11,1	118,46	9,37	8,92
	98	26,2	156,1	145,95	10,15	119,75	8,48	
16	41	24,42	122,52	112,37	10,15	87,95	11,54	11,27
	82	24,38	106,36	98,24	8,12	73,86	10,99	
1	25	31,8	217,37	196,75	20,62	164,95	12,50	12,55
	62	30,32	209,77	189,69	20,08	159,37	12,60	
5	106	23,73	141,11	127,84	13,27	104,11	12,75	13,27
	115	25,83	137,25	123,74	13,51	97,91	13,80	
Massa Específica - Ensaio de Compactação								
Corpo de Prova nº				12	9	16	1	5
Peso do Cilindro (g)				17933	16297	16882	16255	16603
Volume do Cilindro (cm^3)				2054,93	2069,99	2086,35	2079,90	2071,33
Peso do Cilindro + Solo + Água (g)				21624	20252	21208	20725	20772
Peso Solo + Água (g)				3691	3955	4326	4470	4169
Massa Específica Natural (g/cm^3)				1,80	1,91	2,07	2,15	2,01
Massa Específica Seca (g/cm^3)				1,67	1,75	1,86	1,91	1,78
Massa Específica Seca Ótima				1,91	Umidade Ótima			12,55

Fonte: disponibilizado pela Disciplina ENG1081 – Geotecnia I (2017).

Figura 10 – Curva de Compactação do solo.



Fonte: disponibilizado pela Disciplina ENG1081 – Geotecnia I (2017).

A função parabólica presente na Figura 11 advém do comportamento da massa específica após a realização da compactação. A massa específica cresce à medida que a umidade também cresce; no entanto, ao atingir a umidade ótima e, conseqüentemente, o maior valor de massa específica – apresentando a maior compactação do solo –, inicia-se a fase decrescente. Nesta fase, a umidade aumenta e o rendimento da compactação diminui; portanto, a massa específica aparente apresenta valores menores.

Observou-se que, neste caso, melhor compactação é gerada por valores próximos a 12% de umidade. Desta forma, a uma massa específica seca 1,91 g/cm³ corresponde a umidade ótima de 12,55%.

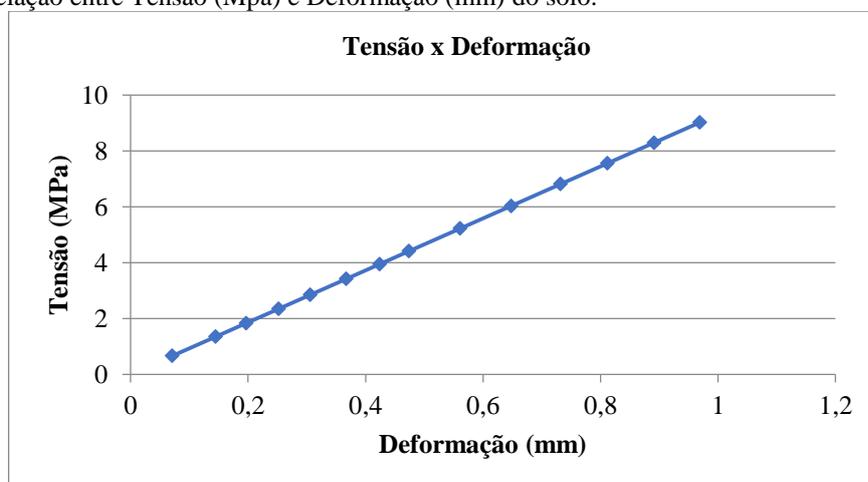
Através da prensa Marshall, ou CBR, foi mensurada a tensão necessária para romper as camadas de solo contidas no cilindro. Por meio das fórmulas fornecidas pela disciplina, a respeito da força necessária para deformar o anel metálico da prensa, e por meio do diâmetro do pistão, montou-se o Quadro 6, correlacionando a penetração no solo com a deformação do anel que, fazendo uso das fórmulas citadas no tópico anterior, fornece as tensões exercidas no solo e o Gráfico 4:

Quadro 6 – Penetração, Carga e Pressão do solo.

Penetração (mm)	Leitura (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,63	0,071	1266,046	0,661
1,27	0,145	2585,587	1,349
1,9	0,197	3512,832	1,833
2,54	0,252	4493,573	2,344
3,17	0,306	5456,481	2,847
3,81	0,367	6544,211	3,414
4,44	0,424	7560,614	3,945
5,08	0,474	8452,196	4,410
6,35	0,561	10003,548	5,219
7,62	0,648	11554,901	6,029
8,89	0,732	13052,758	6,810
10,16	0,812	14479,289	7,554
11,43	0,891	15887,989	8,289
12,7	0,969	17278,856	9,015

Fonte: baseado no material disponibilizado pela Disciplina ENG1081 – Geotecnia I (2017).

Figura 11 – Relação entre Tensão (Mpa) e Deformação (mm) do solo.



Fonte: próprios autores (2017).

Os dados obtidos, pressão nas penetrações de 2,54 e 5,08 mm – Determinados pela ABNT NBR 9895:2016 –, possibilitam o cálculo do ISC. Para a penetração de 2,54 mm, utiliza-se 6,9 MPa como pressão padrão e, para a penetração de 5,08 mm, utiliza-se 10,35 MPa. O Quadro 7 apresenta os resultados dos cálculos:

Quadro 7 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo ensaiado.

Penetração (mm)	Pressão Calculada	Pressão Padrão	ISC (%)
2,54	2,344	6,9	33,98%
5,08	4,410	10,35	42,61%

Fonte: baseado no material disponibilizado pela Disciplina ENG1081 – Geotecnia I (2017).

O ISC, de acordo com a ABNT NBR 9895:2016, corresponde ao maior valor encontrado, portanto, $ISC = 42,61\%$. Os resultados obtidos foram satisfatórios; possíveis vetores de erros, como a diferença entre a umidade desejada e a umidade obtida, que se deve à umidade já presente no solo; ou como a diferença de data e horário dos experimentos das outras turmas, que fez com que a umidade não seguisse um padrão de aumento na porcentagem desejada por cilindro, não prejudicaram o resultado final.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos por meio do ensaio de compactação do solo e obtenção da umidade higroscópica e da massa específica do solo estudado, foi possível obter a curva de compactação. Além dessa curva o objetivo do trabalho era também de encontrar o ISC, e este foi calculado após obtenção do gráfico tensão X deformação. Obteve-se então um índice de suporte Califórnia equivalente a 42,61%. Desse modo o objetivo do presente artigo foi alcançado de maneira satisfatória.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 9895:** Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

MALANCONI, M. **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2013.

PEREIRA, C. **Compactação de Solos.** 2013. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/compactacao-de-solos/>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

SANTOS, J. A. **Compactação: Elementos Teóricos.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Instituto Superior Técnico, 2008.

TONIN, F. **Compactação dos Solos.** Notas de aula- mecânica dos solos.

MATERIAL FORNECIDO PELA DISCIPLINA ENG1081 – **Geotecnia I**, da Escola de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2017.