

O Cone de Penetração Estática (CPE) Para Previsão da Capacidade de Carga de um Solo Compactado da Região de Joaçaba-SC

Diego Zago

Universidade do Oeste de Santa Catarina, Joaçaba, Brasil, diegozago999@hotmail.com

Lucas Quiocca Zampieri

Universidade do Oeste de Santa Catarina, Joaçaba, Brasil, lucas.zampieri@unoesc.com.br

Gislaine Luvizão

Universidade do Oeste de Santa Catarina, Joaçaba, Brasil, gislaine.luvizao@unoesc.com.br

Fabiano Alexandre Nienov

Universidade do Oeste de Santa Catarina, Joaçaba, Brasil, fabiano.nienov@unoesc.com.br

RESUMO: A investigação do subsolo consiste em uma etapa de grande importância para a concepção de diferentes tipos de obras na Engenharia Civil. Porém, em alguns casos, este material não apresenta resistência suficiente para resistir aos esforços sob o qual é submetido. A fim de aumentar a capacidade de suporte do solo, pode-se utilizar o método de compactação, que garante um aumento de resistência através da redução de vazios. O controle tecnológico em um procedimento de compactação é uma etapa fundamental para alcançar o melhor desempenho do solo. Dessa forma, neste trabalho foram utilizadas quatro amostras de solos caracterizados, coletadas na região meio oeste de Santa Catarina. Os solos coletados foram classificados através do método HRB como solo argiloso A7-5. Este trabalho relacionou resultados das curvas de compactações em ensaio de Proctor, com equipamento de cone de penetração estática (CPE), medindo a resistência de cada amostra com a variação do teor de umidade. Essas resistências são correlacionadas com a massa específica aparente seca, formando equações que possibilitam estabelecer qual a densidade da compactação. Nos resultados, nota-se o aumento de resistência à penetração do CPE com o aumento da energia de compactação aplicada e a perda de resistência crescente com o aumento do teor de umidade. Com relação às equações geradas, definem-se correlações que expressam em campo dados aproximados da massa específica aparente seca de um solo compactado e que contribuem para um acompanhamento técnico. O método de estudo utilizando o cone de penetração estática pode viabilizar o uso de um equipamento de controle econômico em obras civis.

PALAVRAS-CHAVE: Investigação do Subsolo, Ensaios de Campo, Cone de Penetração Estática, Solo Compactado, Correlações.

1 INTRODUÇÃO

Para a utilização de solos com baixa capacidade de suporte de carga, necessita-se aumentar a resistência do solo, o que se obtém atuando no ângulo de atrito interno ou na coesão, ou ainda em ambos. Os valores desses parâmetros dependem de três fatores: granulometria, compacidade e umidade (CAPUTO, 2003).

Segundo Terzaghi e Peck (1987) os objetivos

da compactação são: o aumento da resistência à ruptura dos solos, sob a ação de cargas externas, redução de possíveis variações volumétricas, tanto por ação da água, que pode percolar pela sua massa, quanto pela ação de cargas e a impermeabilização dos solos, resultado de um menor número de vazios. Pode-se definir compactação como o processo de aumentar mecanicamente a densidade de um material.

Para Pinto (2010) a densidade com que um

solo é compactado, sob uma determinada energia de compactação, depende da umidade do solo no momento da compactação, e os solos apresentam características de consistência diferentes conforme os teores de umidade que possuem.

Para Pinto (2010) o que mais atrasa o cálculo da densidade é a determinação do teor de umidade, no entanto é fundamental o conhecimento rápido do grau de compactação para que se possa prosseguir com serviços de terraplanagem.

O comportamento dos solos é verificado pelas tensões efetivas sob as quais permanecerem submetidos, ou seja, as forças que se transmitem de grão a grão, das quais derivam as deformações do solo e a mobilização de sua resistência. Isso é o resultado do atrito entre as partículas e do seu rolamento e acomodação, que vem das forças conduzidas de partícula a partícula (PINTO, 2010).

Cada solo se comporta de uma maneira distinta. Dentre os grupos com mesmas características são comuns comportamentos mais próximos uns dos outros. Segundo Fiori e Carmignani (2009), o comportamento de um solo argiloso varia em função do teor de umidade que este apresenta em um dado momento, podendo passar de um estado quase líquido até um estado sólido.

A utilização de equipamentos, que facilitam as análises de diferentes casos, podem ajudar os processos a se tornarem mais dinâmicos e objetivos, encurtar o tempo entre um estudo preliminar e o início de uma obra ou a liberação de um serviço, gerar um ganho financeiro significativo e ainda evitar entraves no decorrer da sua execução.

Para definir a resistência do solo em função da sua compactação e sua umidade é preciso a realização de ensaios laboratoriais.

A ideia de correlacionar os ensaios de campo diretamente com o ensaio de CPE, tem como grande objetivo aumentar a velocidade de liberação dos serviços. Para tanto, faz-se necessário uma pesquisa para aumentar a precisão dos resultados.

A possibilidade de encontrar respostas mais rápidas e tão precisas quanto às com os ensaios conhecidos, fazem do CPE uma importante ferramenta para determinação de capacidade de carga dos solos. Além de diminuir o tempo para

as análises, o equipamento também é considerado um instrumento de fácil utilização e de baixo custo.

Desta maneira, a pesquisa apresenta dados para aprimorar a precisão do equipamento de Cone de Penetração Estática, calibrando uma equação para previsão da capacidade de carga do solo e massa específica aparente seca dos solos.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho teve como base quatro amostras de solos coletados em diferentes locais da região meio oeste catarinense, submetidos ao ensaio de compactação Proctor, caracterização e análise dos resultados obtidos.

2.1 Materiais

As amostras de solo estudadas foram coletadas de locais próximos às rodovias que ligam o município de Capinzal - SC aos outros municípios próximos, e no município de Joaçaba - SC, nas dependências da UNOESC, situado na Rua José Firmo Bernardi. As amostras foram enumeradas e referenciadas com as coordenadas de localização da seguinte forma:

- Amostra 1- (Joaçaba - SC)
Ref: 27°09'27,41" S; 51°31'21,16" O;
- Amostra 2- Rodovia SC 390 (Capinzal - Zortéa)
Ref: 27°24'09,37" S; 51°34'24,79" O;
- Amostra 3- Rodovia SC 150 (Capinzal - Piratuba)
Ref: 27°26'09,96 S; 51°39'39,88" O;
- Amostra 4 - Rodovia SC 150 (Capinzal - Joaçaba)
Ref: 27°14'33,41" S; 51°32'22,99" O;

Para a coleta das amostras, retirou-se uma camada superficial, de aproximadamente um metro, objetivando a remoção da camada orgânica. As valas foram abertas com o auxílio de uma picareta, retirando-se uma quantia de aproximadamente 30 quilogramas de solo através de uma pá.

Todos os solos foram classificados pela classificação tipo HRB como um solo A7-5, solos argilosos, apresentando grande quantidade

de grãos finos.

2.2 Métodos

O solo foi identificado e transportado até o laboratório de materiais da UNOESC, onde todos os ensaios foram realizados.

As amostras de solo foram levadas para a estufa a uma temperatura de 100 °C (± 5 °C). Após, o solo foi destorroado com o auxílio da mão de Grahl e almofariz. Para os ensaios de Proctor e CBR, seguiram-se as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 1986). As amostras secas foram previamente peneiradas na peneira 4,75mm e separadas em quantidades de 2,5 e 5 Kg respectivamente.

Cada amostra foi ensaiada em três energias de compactação: normal, intermediária e modificada, orientados pela NBR 7182 (ABNT, 1986). A Tabela 1 exemplifica as camadas executadas em cada energia e o soquete de compactação utilizado.

Tabela 1 - Energias de Compactação.

Cilindro	Caract.p/ cada energia	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno (4")	Soquete	2500g	4536g	4536g
	Nº de camadas	3	3	5
	Golpes por camada	26	21	27
Grande (6")	Soquete	4536g	4536g	4536g
	Nº de camadas	5	5	5
	Golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador(mm)	63,5	63,5	63,5

O equipamento CPE foi montado para o ensaio, unindo através de rosca metálica ao anel dinamométrico com a haste e o cone para a penetração na amostra. O cone possui medidas de 2,84 cm de diâmetro e 5 cm de altura, havendo a necessidade de calcular a área penetrada em cada realização do ensaio. Para isso foi utilizada a equação 1.

$$\frac{a}{A} = \frac{h^2}{H^2} \quad (1)$$

Onde:

a: área da base na altura que o cone penetrou

A: área da base do cone

h: altura que o cone penetrou

H: altura total do cone

O manômetro foi aferido para estar zerado antes de efetuar cada penetração.

Com o resultado obtido no ensaio do CPE, a tensão de ruptura é determinada através da equação 2. O coeficiente de calibração 0,196 é específico do equipamento utilizado.

$$\sigma_{rup} = \left(\frac{L}{Ac} \right) \times 0,196 \quad (2)$$

Onde:

σ_{rup} : tensão de ruptura (kg/cm²)

L: leitura do manômetro

Ac: área da base do cone penetrado

Juntamente com os ensaios de Proctor e CBR, foram realizadas as leituras com o CPE para cada ponto de umidade compactado e cada energia de compactação. Nessa etapa foram catalogados a leitura no manômetro e a altura de penetração do cone no corpo de prova para o cálculo da tensão de ruptura nesses pontos. O ensaio foi realizado conforme Figura 1.



Figura 1 - Ensaio de CPE.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os resultados são apresentados e analisados de acordo com a energia de compactação e teores de umidade em cada ponto.

3.1 Ensaio de Proctor e Determinação da Umidade Ótima de Compactação

Para verificação do teor de umidade ótima foram analisados os gráficos de compactação, verificando o comportamento da densidade da

amostra com a alteração do teor de umidade.

Os resultados das umidades ótimas são apresentados nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 2 - Energia Normal.

Amostra	Umidade (%)	γ (kg/m ³)
Solo 1	33	1362
Solo 2	36	1366
Solo 3	32	1382
Solo 4	20	1785

Tabela 3 - Energia Intermediária.

Amostra	Umidade (%)	γ (kg/m ³)
Solo 1	33	1480
Solo 2	36	1398
Solo 3	29	1452
Solo 4	17	1932

Tabela 4 - Energia Modificada.

Amostra	Umidade (%)	g (kg/m ³)
Solo 1	28	1582
Solo 2	32	1496
Solo 3	29	1527
Solo 4	15	2045

As amostras 1, 2 e 3 apresentaram um comportamento semelhante, enquanto a amostra 4 apresentou maior massa específica aparente seca e menor teor de umidade necessário para a compactação.

Com o aumento da energia de compactação, o comportamento das amostras se mostrou similar. As umidades apresentaram diminuição no teor de umidade ótima referente à energia normal, intermediária e modificada. A massa específica aparente seca mostrou crescimento em todas as amostras, conforme indicado por Lancellota (2009).

Em todas as amostras ficou evidente que o aumento da energia de compactação reflete em um aumento da massa específica aparente seca e consequentemente em um menor teor de umidade necessário para alcançar a umidade ótima.

Os gráficos das Figuras 2, 3 e 4 apresentam os resultados dos quatros solos para os ensaios de compactação separados pelos diferentes tipos de energia de compactação.

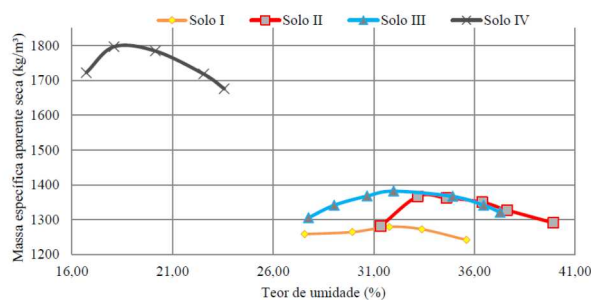


Figura 2 - Energia Normal.

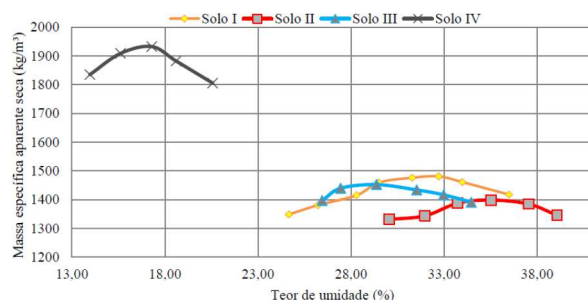


Figura 3 - Energia Intermediária.

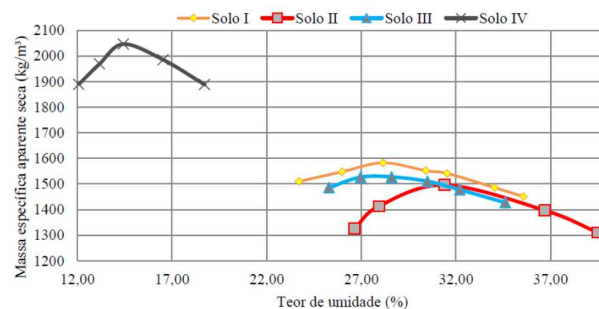


Figura 4 - Energia Modificada.

Pode-se confirmar que os solos apresentaram as características clássicas de solos com grande quantidade de finos, apesar de todos terem sido classificados como o mesmo solo. A amostra 4 ficou com os resultados diferentes dos demais. Uma possível causa dessa heterogeneidade pode ter sido no momento da coleta do material, com interferência da contaminação de materiais orgânicos, ou por terem sido coletadas amostras para caracterização e para o ensaio de Proctor em diferentes etapas da pesquisa.

3.2 Tensão de Ruptura

Os resultados da tensão de ruptura são provenientes dos ensaios realizados com o cone de penetração estática (CPE). O esse ensaio ocorreu em cada ponto de compactação de todas as amostras.

Os resultados do ensaio com o CPE são agrupados por amostra de solo, e representados a

fim de se ter a comparação do comportamento em relação à energia de compactação aplicada.

Para cada energia de compactação foram realizados ensaios de penetração com o equipamento de CPE para três pontos, onde um ponto corresponde ao teor de umidade ótima e os outros dois pontos correspondem a valores de 2% abaixo e 2% acima do teor de umidade ótima.

Os resultados ensaiados para o solo 1 são apresentados na Figura 5.

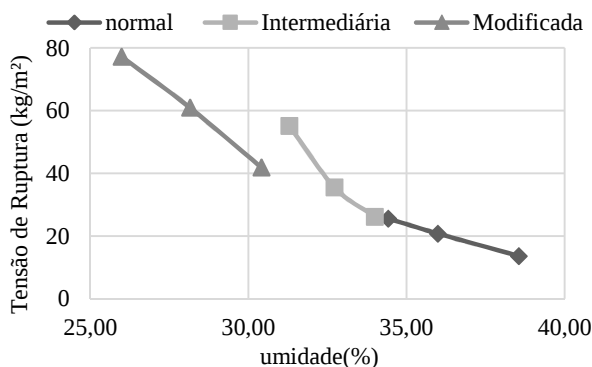


Figura 5 - Amostra Solo 1

Na análise dos resultados para a amostra do solo 1, ao utilizar energia modificada de compactação é perceptível o ganho de resistência a penetração do cone com relação a energia normal, tanto quanto menor for a umidade de compactação. Na energia intermediária, nota-se que ao chegar no ramo úmido a tensão fica próxima da resistência obtida nas compactações com energia normal dentro do ramo seco.

Para os resultados de tensão de ruptura da amostra de solo 2, os resultados mostram-se diferentes dos apresentados no solo 1. A variação de valores não foi tão expressiva. Na Figura 6, apresentam-se os respectivos valores.

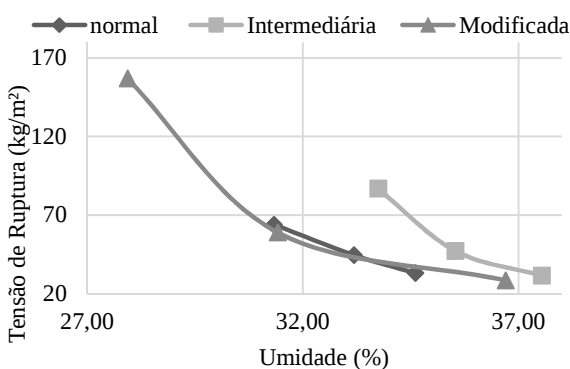


Figura 6 – Amostra Solo 2.

Os valores de resistência à penetração do cone

CPE, utilizando solos compactados na energia normal e intermediária, ficam muito próximos, mostrando uma não contribuição do aumento de energia para elevação da resistência.

Quando aumentada a energia de compactação para a energia modificada, os valores permanecem próximos no ramo úmido e com grande elevação no ramo seco, conferindo acréscimo nos valores de resistência do solo.

Os resultados obtidos nas amostras do solo 3 são apresentados na Figura 7.

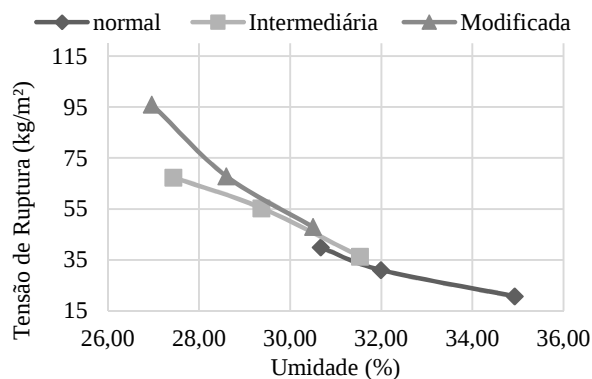


Figura 7 - Amostra Solo 3.

Analisando os resultados correspondentes ao solo 3, percebe-se um ganho de resistência gradativo em relação as três energias aplicadas e com a redução do teor de umidade. As três energias apresentam tendência de crescimento parecido, quando visualizados graficamente as inclinações das curvas.

O solo 4 apresenta os resultados ilustrados na Figura 8.

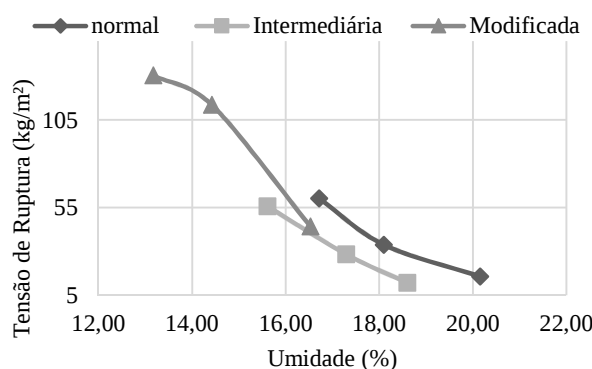


Figura 8 - Amostra Solo 4.

Nota-se que no comportamento do solo 4, os valores da tensão de ruptura para as energias de compactação normal e intermediária próximos entre si, tanto no ramo seco quanto no ramo úmido. Porém, quando se analisa a energia de

compactação modificada, o ganho de tensão de ruptura é expressivo em relação às outras energias.

Percebe-se de maneira geral, que o aumento de resistência à penetração do cone CPE se dá com a redução do teor de umidade, ou seja, no ramo seco são encontradas resistências superiores ao ramo úmido. Quando se eleva a energia de compactação para modificada, os valores de resistência à cravação se mostram superiores às energias de compactação normal e intermediária.

3.3 Relação Entre Massa Específica Aparente Seca e Tensão de Ruptura

Nesta etapa o solo 4 não participou dos resultados, devido a diferença apresentada nos ensaios de compactação frente a comparação com os solos 1, 2 e 3.

As amostras são divididas em dois ramos, um que representa as amostras abaixo da umidade ótima (ramo seco) e a outra acima da umidade ótima (ramo úmido). Esse critério foi utilizado pelo comportamento dos solos perante a compactação em função da umidade, onde para umidades diferentes, pode-se atingir a mesma massa específica aparente seca no ramo seco e no ramo úmido.

Nas Figuras 9, 10, 11, 12, 13 e 14 são apresentados os resultados da relação entre a massa específica aparente seca e a tensão de ruptura obtida pelo CPE.

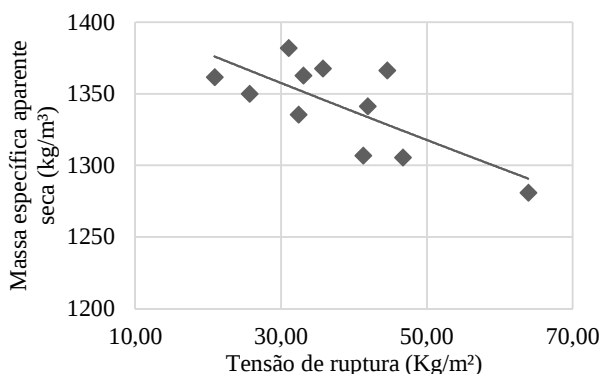


Figura 9 - Energia Normal, ramo seco.

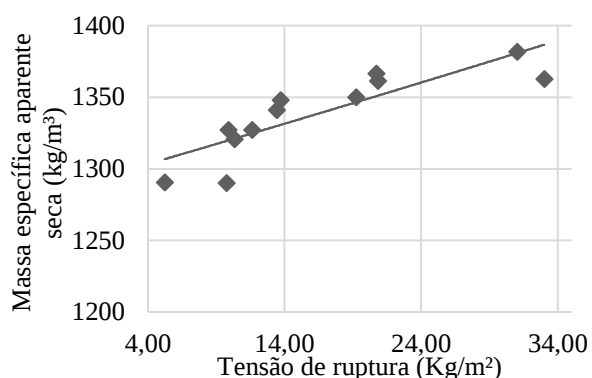


Figura 10 - Energia Normal, ramo úmido.

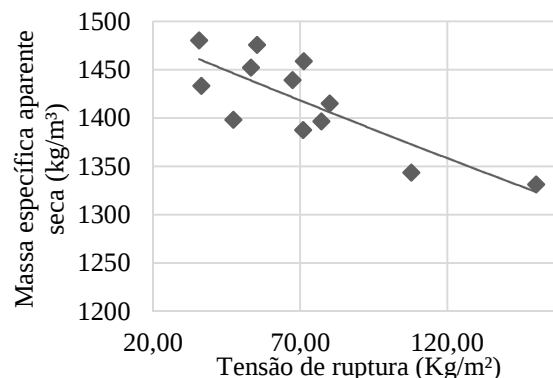


Figura 11 - Energia Intermediária, ramo seco.

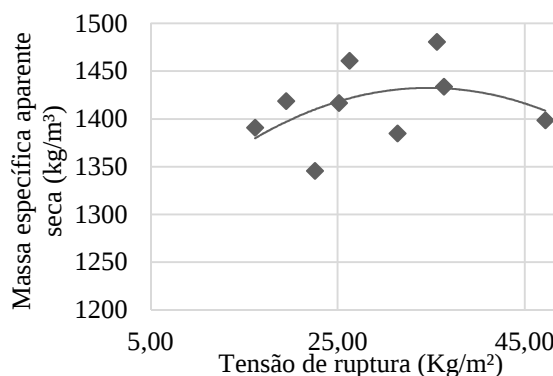


Figura 12 - Energia Intermediária, ramo úmido.

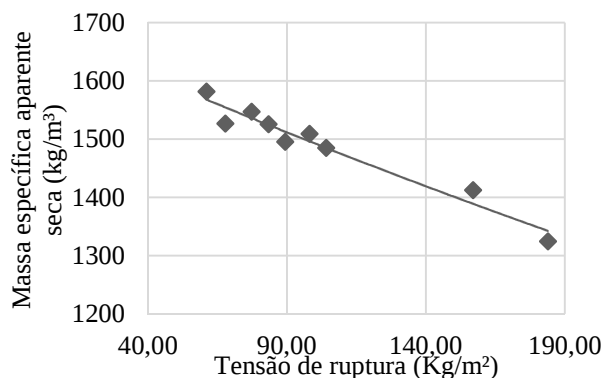


Figura 13 - Energia modificada, ramo seco.

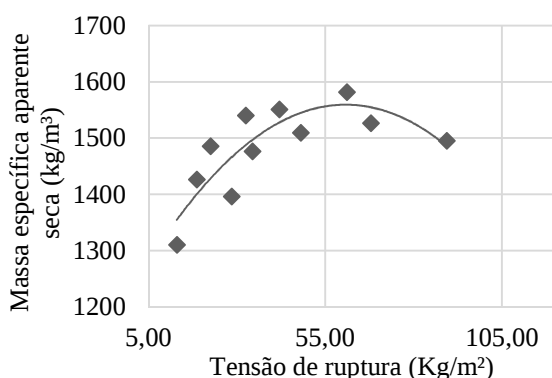


Figura 14 - Energia modificada, ramo úmido.

Para criar uma relação entre a medida do CPE e a massa específica aparente seca, foram determinadas equações apresentadas na Tabela 5 para o ramo seco e na Tabela 6 para o ramo úmido.

Tabela 5 – Equações ramo seco.

Energia	Ramo Seco	R ²
Normal	$y = 1419,3e^{-0,001x}$	0,54
Intermediária	$y = 1506,5e^{-9E-04x}$	0,65
Modificada	$y = 1693,8e^{-0,001x}$	0,95

Tabela 6 – Equações ramo úmido.

Energia	Ramo Úmido	R ²
Normal	$y = 1292,3e^{0,0021x}$	0,72
Intermediária	$y = -0,1534x^2 + 10,65x + 1247,7$	0,19
Modificada	$y = -0,0897x^2 + 10,906x + 1228$	0,72

A aproximação destes valores possibilita a aplicação do ensaio para obras correntes, viabilizando a utilização do mesmo para relacionar a massa específica aparente seca, e os valores de resistência do solo.

3.4 Verificação da capacidade de resistência do solo ao CPE saturado e não saturado

Utilizando os cilindros de CBR, foram realizadas duas compactações para cada amostra. Em uma amostra foi realizado o ensaio com o cone de penetração estática imediatamente após a moldagem e a segunda submersa em água por 24 horas, antes do ensaio com o CPE.

Nesse procedimento foi analisada a diferença da resistência das amostras compactadas na energia normal no estado saturado e não saturado.

Na Tabela 7 são apresentados os valores resultantes deste ensaio.

Tabela 7 - Cravação CPE.

SOLO	Após Inundação (kg/cm ²)	Umidade de Compactação (kg/cm ²)
1	10,24	21,66
2	23,60	25,50
3	14,98	24,86
4	11,84	24,19

Na Figura 15 pode ser feita uma comparação entre os valores da tensão de ruptura do solo na condição saturada e não saturada. Em todas as amostras houve uma queda de resistência na condição saturada. O solo 1 apresentou uma queda de resistência de 52,72%, o solo 2 de 7%, o solo 3 de 39,74% e solo 4 de 51,05%.

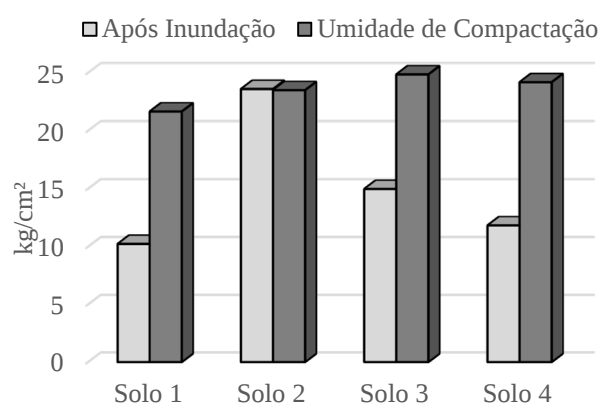


Figura 15 – Comparação das resistências ao CPE.

Todas as amostras de solo sofreram grande interferência devido à saturação, exceto o solo 2, que apresentou pouca variação de resistência entre as duas condições.

Assim, evidencia-se que o solo, quando no estado de saturação, tende a apresentar resistência à cravação do cone de penetração estática inferior ao estado de não saturação.

4 CONCLUSÃO

A massa específica aparente seca apresentou aumento nos valores até atingir o teor ótimo de umidade. As amostras foram comparadas e analisadas entre si quanto aos seus comportamentos no ensaio de Proctor. Nessa etapa, a amostra de solo 4 apresentou grande diferença em relação às demais, atingindo massas específicas mais elevadas, com teores de umidade menores, apontando um provável erro de classificação.

Verificando a tensão de ruptura em cada

ponto compactado, percebe-se que as maiores tensões de ruptura (CPE) são apresentadas no ramo seco e com o aumento de teor de umidade, as tensões diminuem, apresentando uma tendência de estabilização no ramo úmido.

Foram determinadas equações para obter em campo a massa específica aparente seca de uma compactação, alimentando a equação com a tensão de ruptura medida com o CPE no local.

Observa-se que os solos, quando levados a condição de saturação, apresentam resistências à penetração do CPE inferiores aos ensaios realizados no estado de não saturação.

Portanto, foi possível desenvolver equações que podem definir correlações expressando em campo dados aproximados que contribuam para um acompanhamento técnico.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos professores, aos colegas e também à UNOESC, que forneceu recursos para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Caputo, H. (2003) *Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos*. 6ª ed., rev. ampl. Rio de Janeiro: LTC. 234 p.
- Fiori, A. P.; Carmignani, L. (2009) *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. 2. ed. Curitiba: Ed. UTFPR. 604 p.
- Lancellota, R. (2009) *Geotechnical Engineering*. 2nd ed. CRC Press. London.
- Pinto, C. S (2010). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3ed. São Paulo: Oficina de Textos. 356p.
- Terzaghi, K. e Peck, R.B. (1987) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.