

**AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS OBTIDOS NOS
ENSAIOS ÍNDICE CBR E PENETRÔMETRO COM ANEL
DINAMOMÉTRICO**

Hugo Villa RODRIGUES

Graduando em Engenharia Civil
IFSP/Câmpus Votuporanga

Vitória Zignani SAES

Graduanda em Engenharia Civil
IFSP/Câmpus Votuporanga

Cristiane Prado MARIN

Mestra em Ciências e Engenharia de Materiais/USP –São Carlos
Docente do curso de Engenharia Civil
IFSP/Câmpus Votuporanga

RESUMO

O objetivo deste estudo é estabelecer uma correlação entre os resultados obtidos nos ensaios Índice CBR e Penetrômetro com Anel Dinamométrico para fins de pavimentação. A pesquisa segue procedimentos metodológicos que envolvem testes de compactação em amostras de solo, medições de resistência à penetração e Índice CBR. Os resultados indicam uma relação entre os valores de resistência obtidos pelo Penetrômetro e o índice CBR, demonstrando a viabilidade de correlacionar esses dois métodos para avaliar a capacidade de suporte do solo. Conclui-se que a correlação das técnicas estudadas indica uma boa eficiência do Penetrômetro com Anel Dinamométrico, principalmente para uma rápida obtenção de parâmetros do solo, se destacando pela praticidade da execução do ensaio.

Palavras-chave: CBR; Penetrômetro com Anel Dinamométrico; Correlação; Compactação; Pavimentação.

**EVALUATION OF THE CORRELATION BETWEEN THE PARAMETERS
OBTAINED FROM CBR AND PROVING RING PENETROMETER TESTS**

ABSTRACT

This paper aims to establish a correlation between the results obtained from the CBR (California Bearing Ratio) and the Proving Ring Penetrometer tests for pavement purposes. The research follows methodological procedures involving compaction tests on soil samples, measurements of penetration resistance, and CBR. The results indicate a relation between the resistance values obtained by the Penetrometer and the CBR, demonstrating the feasibility of correlating these two methods to assess soil bearing capacity. It is concluded that the correlation of the studied

techniques indicates good efficiency of the Proving Ring Penetrometer, especially for the quick acquisition of soil parameters, standing out for the practicality of test execution.

Keywords: CBR; Proving Ring Penetrometer; Correlation; Compaction; Pavement.

Introdução

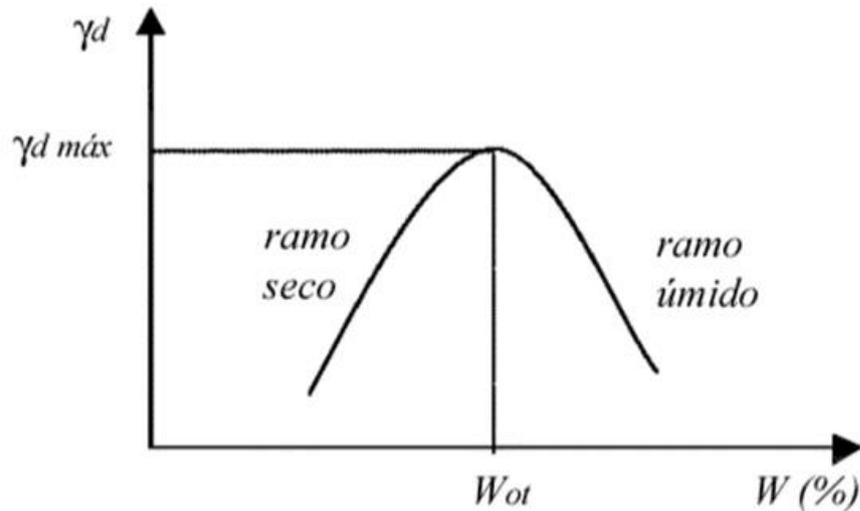
A análise da capacidade de suporte de solos é essencial no projeto e execução de obras geotécnicas, proporcionando informações cruciais para garantir a estabilidade e durabilidade das estruturas. Desde o princípio da engenharia civil, compreender como os solos respondem às cargas impostas tem sido vital para o desenvolvimento de estruturas seguras e duráveis. Inicialmente, métodos empíricos e observações práticas foram predominantes, mas com o avanço da ciência e tecnologia, surgiram instrumentos e técnicas mais precisos, proporcionando uma avaliação mais refinada das propriedades geotécnicas dos solos (Ribeiro *et al.*, 2023).

Segundo Pinto (2006), a compactação do solo desempenha um papel fundamental na capacidade de suporte do solo, influenciando diretamente as características do material, como a massa específica, permeabilidade etc. Este artigo busca explorar e comparar a capacidade de suporte de solos submetidos a diferentes energias de compactação, utilizando dois métodos distintos: o Penetrômetro de solos com Anel Dinamométrico, que ao medir a resistência à penetração do solo de maneira dinâmica, oferece uma perspectiva em tempo real das propriedades mecânicas do solo, e o Índice CBR (*California Bearing Ratio*), que ao fornecer uma medida relativa de suporte, proporciona uma abordagem mais estática e normatizada.

Por volta de 1930, surgiram os estudos geotécnicos relacionados à compactação. Ralph Proctor desenvolveu a Teoria de Compactação e divulgou seu método de controle de compactação, concluindo que a densidade com que um solo é compactado, sob uma determinada energia de compactação, depende do teor de umidade do solo. O processo de compactação é representado por um gráfico da variação do peso específico aparente seco pelo teor de umidade correspondente. A curva no gráfico corresponde ao processo de compactação. A parte ascendente da curva do gráfico, ilustrado na Figura 1, é chamada de "ramo seco", no qual a água atua como um lubrificante nas partículas do solo, facilitando o arranjo destas partículas, o que resulta no aumento do peso específico aparente seco. A parte descendente da curva, chamada de "ramo úmido", ocorre quando a água começa a amortecer a compactação, nessa parte a amostra passa a ser composta

por mais água do que sólidos, o que leva à redução do peso específico aparente seco (Nonato, 2016).

Figura 1 – Curva de Compactação



Fonte: Trindade *et al.* (2003).

Ainda na década de 1930, O. J. Porter desenvolveu um método específico de ensaio de penetração para avaliar a resistência dos materiais granulares utilizados em obras de pavimentação. Esse método visa determinar o Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou CBR. O CBR representa a relação entre a pressão necessária para induzir a penetração de um pistão, indicado na Figura 2, em uma amostra de solo e a pressão necessária para provocar a mesma penetração em uma brita graduada com elevada resistência mecânica, estabelecida como um padrão de referência. A relevância do CBR não se limita apenas à sua aplicação predominante nos procedimentos de dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos, ele também desempenha o papel de indicador da qualidade do solo de fundação de obras viárias e dos materiais empregados na formação das camadas do pavimento (Lelis, 2004).

Figura 2 – Prensa para determinação do CBR



Fonte: Os autores (2024).

O ensaio do Penetrômetro de solos com anel dinamométrico tem a função de medir a resistência do solo à aplicação de força, o que permite determinar sua capacidade de suportar cargas variáveis. Esse ensaio se destaca pela sua facilidade de execução, podendo ser realizado tanto em campo como em laboratório e permitindo a realização do ensaio mesmo em locais de difícil acesso. Sua aplicação é bastante ampla, abrangendo diversas áreas da engenharia civil e geotecnia. No entanto, é importante ressaltar que atualmente não existe uma norma brasileira que regulamente esse método de ensaio. Logo, para orientar sua execução, foi utilizado o Manual de instruções de uso do penetrômetro de solos (Solotest, 2019), que descreve os procedimentos a serem seguidos. Esse manual serve como referência para a realização do ensaio do penetrômetro de solos com anel dinamométrico em ausência de uma normatização específica no Brasil.

Diante disso, é notável a escassez de informações detalhadas disponíveis sobre o ensaio do Penetrômetro de solos com Anel Dinamométrico. Logo, neste artigo, também busca-se estabelecer uma correlação significativa entre os resultados obtidos por meio do ensaio do Penetrômetro e o ensaio CBR.

No estudo realizado por Gonçalves *et al.* (2022), foi apresentado resultado satisfatório ao correlacionar os ensaios de Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL) e CBR, em que foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) de 95,4% para um solo A-2-4.

Souza (2019), utilizou o Penetrômetro Dinâmico de Cone (PDC) e duas amostras de solo obtidas em locais diferentes, classificadas como A-2-4, trabalhou com amostras inundadas e não inundadas e para todas as situações obteve uma forte correlação CBR x PDC, com R^2 de 94% ou superior.

Alves (2002), comparou os resultados obtidos pelo PDC e CBR, em cinco grupos de solos diferentes (A-2-4, A-2-7, A-7-6, A-7-5 e A-4), ambos os ensaios na mesma umidade, obtendo coeficientes R^2 de no mínimo 82%.

Também com o PDC, Matos e Vieira (2020) trabalharam com um solo classificado como A-2-4, a correlação foi feita com o CBR imerso em água por 4 dias e o PDC realizado sem imersão e sem as sobrecargas, resultando em um R^2 de 99,65%.

Com base nisso, a pesquisa foi conduzida por meio de ensaios laboratoriais utilizando amostras representativas de solos. Inicialmente foi realizada a compactação controlada das amostras em diferentes energias, seguida pelo ensaio do Índice CBR e pela aplicação do Penetrômetro de solos com Anel Dinamométrico. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente para identificar padrões e estabelecer correlações entre os resultados dos dois métodos de análise em diferentes energias de compactação.

Metodologia

Este artigo abrange levantamentos bibliográficos e uma pesquisa experimental, conduzida com o suporte do laboratório de solos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), campus de Votuporanga, que disponibiliza acesso a profissionais qualificados, materiais e equipamentos necessários para a realização dos ensaios. O solo utilizado foi adquirido da empresa D.A. Terra e trata-se de um solo de corte coletado de uma obra situada em Votuporanga-SP.

Inicialmente, o processo começou com a preparação das amostras de solo, seguindo as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 6457 (2016), que incluía uma etapa de secagem prévia. Este procedimento foi fundamental para garantir a uniformidade e a consistência das amostras, proporcionando condições ideais para a realização dos ensaios de caracterização do solo. Em seguida, foi conduzido o ensaio, que inclui a etapa

de peneiramento e separação das amostras peneiradas, representadas na Figura 3, além da determinação da curva granulométrica de acordo com as especificações da ABNT NBR 7181 (2018), o que permitiu uma análise detalhada da distribuição dos diferentes tamanhos de partículas presentes no solo.

Figura 3 – Peneiramento e separação das amostras



Fonte: Os autores (2024).

Posteriormente, foram realizados os ensaios para determinar o limite de liquidez, conforme estabelecido pela ABNT NBR 6459 (2017), e o limite de plasticidade, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 7180 (2016). Esses ensaios foram essenciais para avaliar as propriedades de plasticidade do solo, fornecendo dados para sua classificação de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e de acordo com o Sistema Rodoviário de Classificação (HRB – *Highway Research Board*).

Após isso, foi executado o ensaio de compactação, visando determinar a umidade ótima do solo para cada uma das três energias de compactação: normal, intermediária e modificada. Este processo foi conduzido utilizando o cilindro pequeno, como pode ser observado na Figura 4, para a moldagem dos corpos de prova (CP), de acordo com a ABNT NBR 7182 (2016).

Figura 4 – Compactação e extração do CP



Fonte: Os Autores (2024).

Após a etapa de compactação, o próximo passo foi a realização do ensaio de CBR, seguindo as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 9895 (2016). Este ensaio foi conduzido utilizando o cilindro grande e uma amostra de 7kg do material passante pela peneira de 4,8mm. A moldagem dos corpos de prova foi realizada com esse material na umidade ótima determinada anteriormente para cada uma das três energias de compactação mencionadas. A Figura 5 mostra um CP imerso no tanque de água, que, posteriormente, foi rompido na prensa.

Figura 5 – CP imerso no tanque e o rompimento na prensa



Fonte: Os Autores (2024).

No ensaio realizado com o Penetrômetro de Solos com Anel Dinamométrico, adotou-se o mesmo procedimento utilizado no ensaio do CBR para a moldagem dos corpos de prova, a fim de proporcionar as mesmas condições do solo para ambos os ensaios. Para garantir a precisão dos resultados obtidos com esse equipamento, é crucial que ele esteja devidamente calibrado. Para fazer a calibração, determinou-se um fator de correção, utilizando cinco leituras no anel dinamométrico com cargas conhecidas e obtida a relação entre o valor real e o valor encontrado pela leitura. O fator de correção foi dado pela média dessas relações, que, posteriormente, foi multiplicado pela carga de penetração. Para obter a resistência à penetração do solo, a carga de penetração corrigida foi dividida pela área da base do cone, que, de acordo com o manual do fabricante, é 6,33 cm². Embora este ensaio não seja especificamente regido por nenhuma normativa brasileira, a sua execução foi embasada nos procedimentos descritos no Manual de instruções de uso do Penetrômetro de solos da Solotest (2019). A Figura 6 ilustra o ensaio.

Figura 6 – Ensaio Penetrômetro e CP após o ensaio

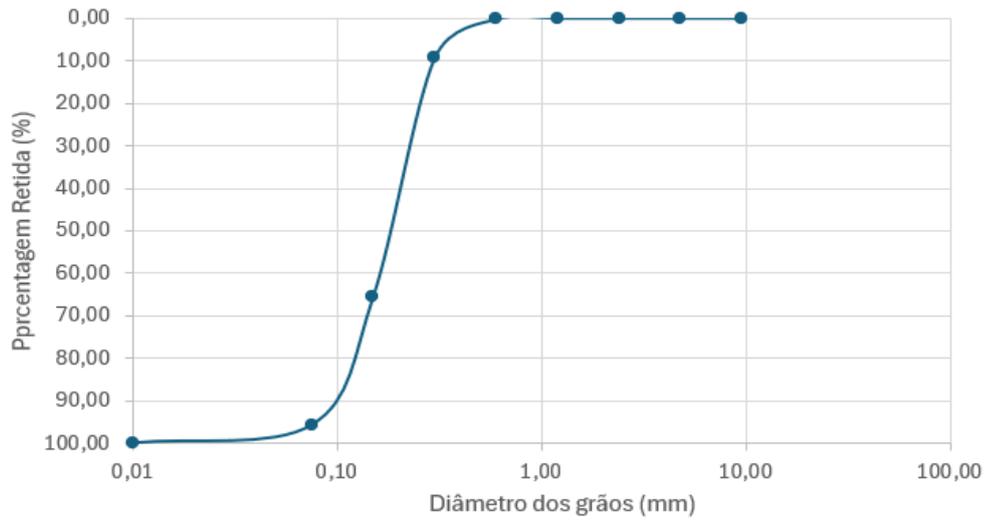


Fonte: Os Autores (2024).

Resultados e Discussões

A Figura 7 exibe a curva granulométrica que foi gerada a partir dos resultados do ensaio de granulometria do solo. Pela curva percebe-se forte predominância de areia no solo, com maior ocorrência de material entre as aberturas de 0,1 mm a 1,0 mm.

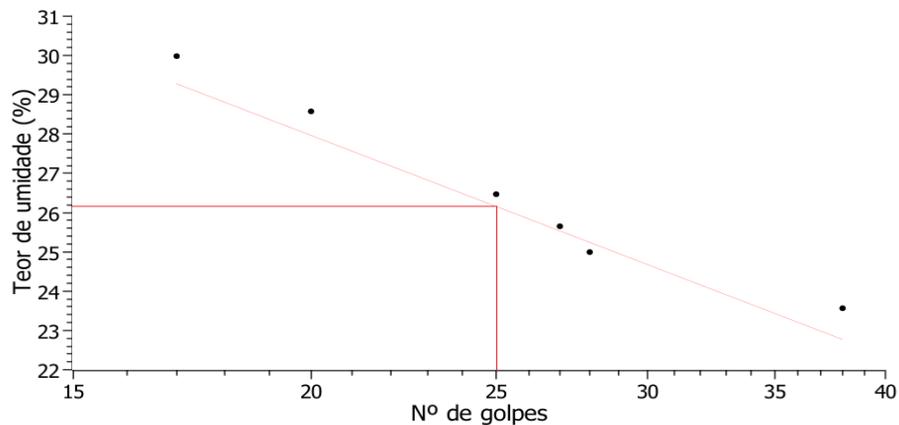
Figura 7: Curva Granulométrica



Fonte: Os Autores (2024).

Também foram registrados os resultados dos ensaios do limite de liquidez (LL), conforme apresentado na Figura 8, obtendo um valor de 26,19%. E o limite de plasticidade (LP) obtido nos ensaios foi de 16%.

Figura 8: Limite de Liquidez

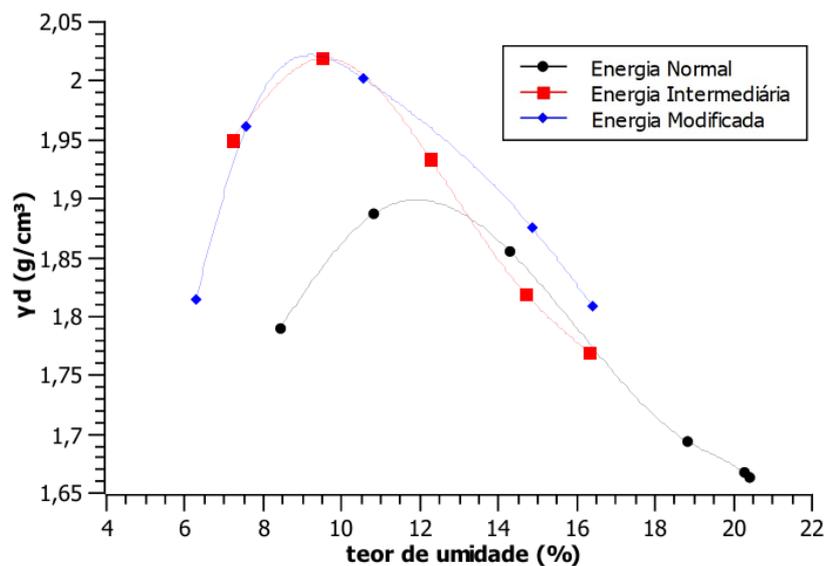


Fonte: Os Autores (2024).

Com base nisso, de acordo com o SUCS, o solo em questão foi identificado como uma areia bem graduada, com uma composição de 4,27% de finos. Isso sugere a presença de silte ou argila na composição do solo, o que justifica a viabilidade da moldagem do cilindro para o ensaio de limite de plasticidade. E de acordo com o HRB, o solo foi classificado como A-2-6.

Após essa etapa, o ensaio de compactação foi realizado, resultando na obtenção de três curvas de compactação distintas, conforme mostrado na Figura 9. Os resultados indicaram uma umidade ótima de 12% para a energia de compactação normal, 9,8% para a energia intermediária e 8,7% para a energia modificada. Esses valores de umidade ótima foram empregados na moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios de CBR e Penetrômetro de Solos com Anel Dinamométrico.

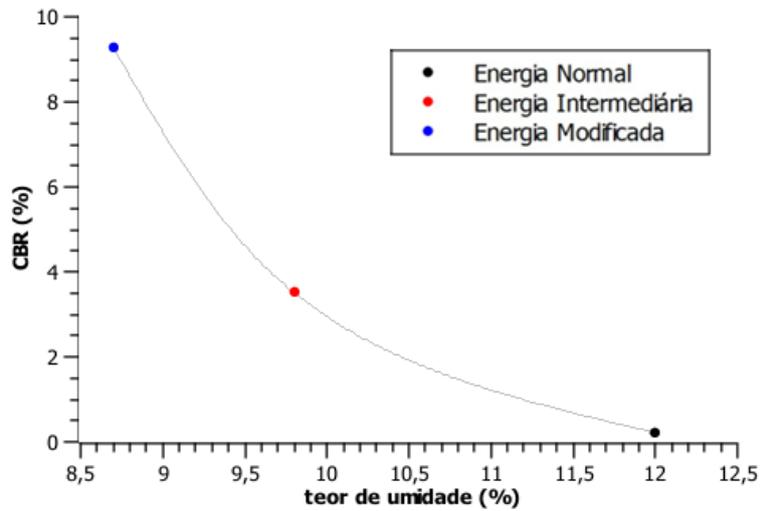
Figura 9: Curvas de Compactação



Fonte: Os Autores (2024).

A partir disso, foram conduzidos os ensaios de CBR e obtidos os resultados, conforme representado na Figura 10. Como mencionado anteriormente, foram utilizadas as umidades ótimas determinadas no ensaio de compactação. Dessa forma foram determinados os seguintes valores de CBR: 0,21% para a energia de compactação normal, 3,51% para a energia intermediária e 9,29% para a energia modificada.

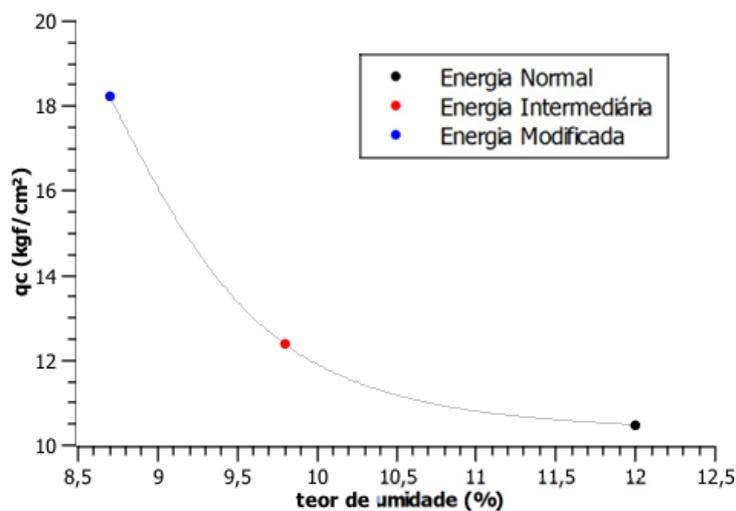
Figura 10: Teor de umidade x CBR



Fonte: Os Autores (2024).

Para o ensaio do Penetrômetro de Solos com Anel Dinamométrico, inicialmente, na etapa de calibração do equipamento, foi determinado um fator de correção de 1,073. Em seguida, os corpos de prova foram moldados e os ensaios foram conduzidos, resultando nas seguintes resistências à penetração (q_c): 10,47 kgf/cm² para a energia normal, 12,38 kgf/cm² para a energia intermediária e 18,23 kgf/cm² para a modificada, conforme ilustrado na Figura 11.

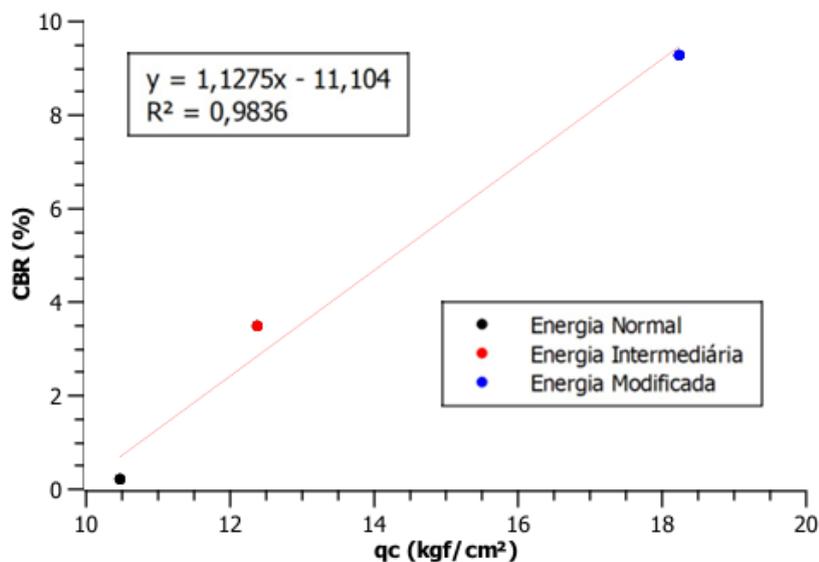
Figura 11: Teor de umidade x q_c



Fonte: Os Autores (2024).

Com base nos dados apresentados acima, foi elaborado um gráfico (Figura 12), que compara os valores de CBR e da resistência à penetração para cada nível de energia aplicada. Utilizando uma técnica estatística conhecida como regressão linear simples, foi possível analisar e entender a correlação que existe entre essas duas variáveis.

Figura 12: qc x CBR



Fonte: Os Autores (2024).

Analisando os dados contidos na Figura 12, observa-se que o coeficiente de determinação R^2 encontrado foi de 98,36%. Esse valor expressa uma forte correlação entre os conjuntos de dados, indicando uma relação positiva entre os ensaios de CBR e do Penetrômetro de solos com Anel Dinamométrico para um solo arenoso. Com isso, à medida que os valores de CBR aumentam, a resistência à penetração também tende a aumentar de forma consistente, como esperado. O quadro 1 traz os resultados obtidos, comparando-os com os estudos mencionados anteriormente.

Quadro 1: Comparativo dos resultados

	PENETRÔMETRO	SOLO	R²
Gonçalves <i>et al.</i> (2022)	Dinâmico Leve	A-2-4	95,4%
Souza (2019)	Dinâmico de Cone	A-2-4	94%
Alves (2002)	Dinâmico de Cone	A-2-7	82%
Matos e Vieira (2020)	Dinâmico de Cone	A-2-4	99,65%
Os autores (2024)	Anel Dinamométrico	A-2-6	98,36%

Fonte: Os Autores (2024).

Conclusão

Este trabalho teve como principal objetivo estabelecer uma correlação entre os resultados obtidos nos ensaios do Penetrômetro de solos com Anel Dinamométrico e Índice CBR.

Para isso, foi utilizado um solo classificado como uma areia bem graduada com uma composição de finos menor que 5%, e realizados ambos os ensaios com corpos de prova moldados nas três energias de compactação a fim de obter um resultado mais preciso.

Foi estabelecido um coeficiente de determinação de 98,36%, que é um resultado satisfatório assim como os outros trabalhos mencionados anteriormente, em que também foram obtidos coeficientes com valores superiores a 90% no uso de diferentes tipos de penetrômetros.

Diante disso, pode-se observar que os ensaios de Penetrômetro e CBR possuem objetivos similares, sendo que o CBR apresenta uma análise mais completa do material e o Penetrômetro consiste em um ensaio mais prático, que pode ser realizado em locais de difícil acesso, e que apresenta uma boa eficiência, podendo ser utilizado para uma rápida obtenção de parâmetros do solo principalmente para a camada de subleito.

Referências

ALVES, Anelise Beatriz Cardoso. **AValiação da Capacidade de Suporte e Controle Tecnológico de Execução da Camada Final de Terraplenagem Utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone**. 2002. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo — Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

GONÇALVES, Ezequiel Martins *et al.* **Estudo da correlação entre os ensaios de laboratório PDL e CBR**. 2022. 25 f. TCC - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Una, Itabira, 2022.

LELIS, Tathiana Aparecida. **Influência de energia de compactação nas relações entre o módulo resiliente, CBR e resistência à compressão não confinada de solos da zona Norte de Minas Gerais**. 2004. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2004.

MATOS, Daniel A. de; VIEIRA, Larissa B.. **PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE APLICADO PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE E CONTROLE TECNOLÓGICO DA COMPACTAÇÃO DE VIAS**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 34., 2020, Campo Grande. Campo Grande: Anpet, 2020. p. 936-943.

NONATO, Guilherme Henrique Waltrick. **ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO**. Campo Mourão: Ufpr, 2016.

PINTO, Carlos de Souza. **CURSO BÁSICO DE MECÂNICA DOS SOLOS**: Com exercícios resolvidos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 363 p.

RIBEIRO, Julia Cândido *et al.* **ANÁLISE E PROJETO DE FUNDAÇÕES E SUA IMPORTÂNCIA PARA SEGURANÇA E ECONOMIA NAS OBRAS: ESTRATÉGIAS AVANÇADAS DE ANÁLISE E PROJETO DE FUNDAÇÕES**. **Revista Ibero-**

Americana de Humanidades, Ciências e Educação- Rease, São Paulo, v. 9, n. 11, p. 2612-2650, nov. 2023.

SOLOTEST. INSTRUÇÕES DE USO DO PENETRÔMETRO DE SOLOS MARCA SOLOTEST - REF. 1.210.001. São Paulo, 2019.

SOUZA, Bruma Morganna Mendonça de. **ESTUDO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE DCP E CBR DE SOLOS TÍPICOS DA CIDADE DE NATAL/RN**. 2019. 25 f. TCC - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

TRINDADE, Tiago Pinto da *et al.* **COMPACTAÇÃO DOS SOLOS**. In: 6º SIMPOSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 6., 2003, Belo Horizonte. **6º Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal**. Belo Horizonte: Suprema Grafica e Editora Lta, 2003. p. 297-325.