



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ADAPTAÇÃO DO ENSAIO CBR PARA O MÉTODO DO
AGULHAMENTO COM O USO DE RESÍDUOS CERÂMICOS**

EDUARDA RICCI TROMBETA

Orientador: Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de
Lima

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha
Solteira – UNESP; como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Engenheiro Civil.

ILHA SOLTEIRA – SP

2023

EDUARDA RICCI TROMBETA

Orientador: Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima

**ADAPTAÇÃO DO ENSAIO CBR PARA O MÉTODO DO
AGULHAMENTO COM O USO DE RESÍDUOS CERÂMICOS**

ILHA SOLTEIRA – SP

2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T849a Trombeta, Eduarda Ricci.
Adaptação do ensaio CBR para o método do agulhamento com o uso de
resíduos cerâmicos / Eduarda Ricci Trombeta. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Jairo Salim Pinheiro de Lima

Inclui bibliografia

1. Infraestrutura de transportes. 2. Estabilizaçãode solos. 3. Agregado
cerâmico . 4. Índice de suporte Califórnia (CBR). 5. Resíduos da construção civil
(RCC). 6. Revestimento primário.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURSO: ENGENHARIA CIVIL

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSPORTES

REALIZADA EM: 19-01-2023

DISCENTE: Eduarda Ricci Trombeta

COMISSÃO EXAMINADORES

1. Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima – UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador).
2. Prof. Ms. Alan Henrique Vicentini – UNESP/FE Ilha Solteira (Examinadora).
2. Prof. Dr. Cesar Gustavo da Rocha Lima – UNESP/FE Ilha Solteira (Examinador).

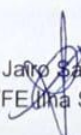
Título do trabalho: Adaptação do ensaio CBR para o método do agulhamento com uso de resíduos cerâmicos.

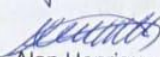
Local: Unesp, Departamento de Engenharia Civil.

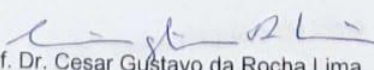
Horário de início: 16 h

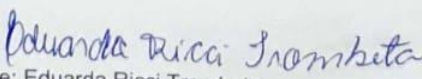
Em sessão pública, após exposição em torno de 40 (quarenta minutos), a discente foi arguida oralmente, e no final da exposição foi **"APROVADA"** pelos membros componentes da Comissão Examinadora. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ATA, a qual é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo discente.

Ilha Solteira, 19 de janeiro de 2023.


Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima
UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador)


Prof. Ms. Alan Henrique Vicentini
UNESP/FE Ilha Solteira


Prof. Dr. Cesar Gustavo da Rocha Lima
UNESP/FE Ilha Solteira (Examinador)

Ciente: 
Discente: Eduarda Ricci Trombeta

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Cursos: Agronomia, Ciências Biológicas, Eng. Civil, Eng. Elétrica, Eng. Mecânica, Física, Matemática e Zootecnia.
Avenida Brasil Centro, 56 - Caixa Postal 31 CEP 15385-000 Ilha Solteira - São Paulo - Brasil
pabx (18) 3743 1000 fax (18) 3742 2735 scom@adm.feis.unesp.br www.feis.unesp.br

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter me dado a força necessária para seguir em frente independente das dificuldades que encontrei ao longo do caminho.

Aos meus pais, Isabel e Paulo, que são o maior motivo e razão do sonho de uma formação em um curso superior estar se tornando realidade, que nunca mediram esforços, me proporcionando todas as oportunidades e apoio incondicional que tive durante a toda minha vida.

A minha irmã Paula, que do seu modo sempre me apoiou e me mostrou o quão longe eu poderia chegar.

Ao meu namorado, Matheus, que foi peça fundamental especialmente no final da minha graduação e início da jornada no mercado de trabalho, tornando essa fase tão difícil em algo mais leve.

Ao professor e meu orientador Jairo, que é um excelente educador, com um conhecimento vasto do mundo e do tema, e que esteve sempre de prontidão para ajudar e auxiliar em qualquer dúvida e problema que surgisse.

Ao técnico de laboratório Ozias, que me deu completo apoio na realização dos ensaios em laboratório.

Aos professores da Engenharia Civil da FEIS, por todo o conhecimento transmitido.

Ao Programa de Ensino Tutorial – PET e ao Centro Acadêmico da Engenharia Civil “Augusto Carlos Vasconcelos”, grupos acadêmicos dos quais fiz parte, por me proporcionarem um grande crescimento pessoal e profissional.

Aos amigos que fiz ao longo desse caminho, que com certeza foram parte essencial para o meu crescimento e que me ajudaram a sempre seguir em frente nas situações mais difíceis, proporcionando diversas risadas e momentos especiais que jamais serão esquecidos. Um agradecimento especial à Rhayane, que sempre esteve ao meu lado e nunca me deixou desistir e à Stefanny, Tainá e Bruno, por todos os momentos.

RESUMO

A construção civil é um dos setores de maior importância para o desenvolvimento da economia e das cidades no Brasil. Porém, aliado à sua importância, é preciso atentar para o grande volume de resíduos sólidos que ela gera e que necessitam de descarte e destinação final corretos, embora muitas vezes não seja o que acontece. Pensando nesse cenário, os Resíduos da Construção Civil (RCC) podem ganhar novas finalidades. Este trabalho propõe uma adaptação do ensaio CBR para prever o comportamento das misturas solo-agregado, adotando o método de cravamento e não de misturas prévias, técnica comum em revestimento primário de estradas vicinais. Além disso, avalia a aplicação dos resíduos da produção de cerâmica em misturas com solos para pavimentação de estradas. Amostras de agregados cerâmicos foram compactadas previamente e, depois, adicionadas camadas de solo e também compactado. Pode-se concluir que assim como no campo, o ensaio de agulhamento é possível em laboratório e há uma melhora na capacidade de suporte do solo quando cravado pelo agregado cerâmico em relação ao solo puro.

Palavras chave: Infraestrutura de transportes. Estabilização de solos. Agregado cerâmico. Índice de Suporte Califórnia (CBR). Resíduos da Construção Civil (RCC). Revestimento Primário.

ABSTRACT

Civil construction is one of the most important sectors for the development of the economy and cities in Brazil. However, along with its importance, it is necessary to pay attention to the large volume of solid waste that it generates and that require correct disposal and final destination, although this is often not what happens. Thinking about this scenario, Civil Construction Waste (RCC) can gain new purposes. This work evaluates the application of waste from ceramic production in mixtures with soils for road paving. In addition, it proposes an adaptation of the CBR test to predict the behavior of these mixtures, adopting the method of nailing and not premixing, a common technique in the primary coating of secondary roads. Ceramic aggregate samples were previously compacted and then soil layers were added and also compacted. It can be concluded that, as in the field, the needling test is possible in the laboratory and there is an improvement in the support capacity of the soil when nailed by the ceramic aggregate in relation to pure soil.

Keywords: Transport infrastructure. Soil stabilization. Ceramic aggregate. California Support Index (CBR). Civil Construction Waste (RCC). Primary Coating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Separação do solo em amostras.

Figura 2 – Secagem do agregado cerâmico.

Figura 3 – Imersão do agregado cerâmico.

Figura 4 – Preparação do corpo-de-prova para imersão.

Figura 5 – Leitura da penetração no Ensaio CBR.

Figura 6 – Ensaio de compactação.

Figura 7 – Esquema da montagem dos corpos-de-prova.

Figura 8 – Retirada do anel de fundo do cilindro.

Figura 9 – Corpo-de-prova imerso em água.

Figura 10 – Corpo-de-prova após a penetração do pistão.

Figura 11 – Extração do corpo-de-prova.

Figura 12 – Classificação dos solos (*Transportation Research Board*).

Figura 13 – Curva de Compactação no Proctor Intermediário.

Figura 14 – Curva de penetração do solo puro.

Figura 15 – CBR solo-caco de telha saturado (CP1).

Figura 16 – CBR solo-caco de telha saturado (CP2).

Figura 17 – CBR solo-caco de telha saturado (CP3).

Figura 18 – CBR solo-caco de telha seco (CP4).

Figura 19 – CBR solo-caco de telha seco (CP5).

Figura 20 – CBR solo-caco de telha seco (CP6).

Figura 21 – Medição do cravamento no CP1.

Figura 22 – Medição do cravamento no CP4.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados obtidos no ensaio de Proctor Intermediário.

Tabela 2 – Dados obtidos no ensaio de CBR.

Tabela 3 – Dados obtidos no ensaio de CBR para do solo-agregado.

Tabela 4 – Dados obtidos na determinação do teor de umidade.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações do uso dos materiais empregados em pavimentação.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Aspectos gerais	14
3.2 Classificação das vias	14
3.3 Revestimento primário	15
3.4 Estabilização de solos	16
3.5 Ensaio Índice de Suporte Califórnia (ISC)	16
3.6 Ensaio Índice de Suporte Califórnia (ISC) por agulhamento	17
4. METODOLOGIA	18
4.1 Matéria-prima para os ensaios	18
4.2 Preparação das amostras	18
4.3 Ensaios com o solo	20
4.3.1 Ensaio Granulométrico, Classificação TRB e MCT	20
4.3.2 Ensaio de Compactação Proctor	20
4.3.3 Ensaio CBR e Expansão	20
4.4 Ensaio com o agregado cerâmico	22
4.5 Ensaio de CBR por cravamento do agregado	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1 Ensaios com o solo	27
5.1.1 Classificação TRB	27
5.1.2 Classificação miniatura compactado tropical - MCT	28
5.1.3 Ensaio de Compactação do solo	28
5.1.4 Ensaio CBR do solo	29
5.2 Ensaios realizados com o agregado	30

5.3 Ensaio com o solo e o agregado cerâmico	30
5.4 Cravamento do agregado cerâmico no solo	34
5.5 Teor de umidade do solo no contato solo-agregado	36
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	37
6.1 Conclusões	37
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
APÊNDICE	41

1. INTRODUÇÃO

Dados do anuário de 2020 da Confederação Nacional do Transporte – CNT (2020), confirmam que a extensão total da malha rodoviária brasileira em 2019 era de 1.720.700 km, dos quais apenas 12,4% eram pavimentadas. Então 1.349.938 km da malha rodoviária do país são de vias não pavimentadas, cuja superfície de tráfego é o próprio solo local ou o revestimento primário.

De acordo com o Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo – DER:

O revestimento primário compreende a execução de camada granular, composta por agregados naturais ou artificiais, aplicada sobre o reforço do subleito ou diretamente sobre o subleito compactado em rodovias não pavimentadas, com a função de assegurar condições de rolamento e de aderência do tráfego satisfatórias, mesmo sob condições climáticas adversas (2006).

Mas em muitos casos, os solos locais ou da região da obra não atendem os padrões mínimos para a sua utilização, gerando demanda por solos de melhor qualidade em regiões distantes da obra, dificultando o acesso aos materiais e encarecendo as obras.

Nestes casos, a estabilização granulométrica é uma alternativa possível, uma vez que “A estabilização consiste no tratamento do solo, por um processo mecânico, ou químico, tornando-o estável para os limites de sua utilização, e permanecendo assim, mesmo sob a ação de cargas exteriores e ações climáticas” (BATISTA, 1976).

Somando o conceito da estabilização com a preocupação crescente e necessária com o meio ambiente, o uso dos Resíduos da Construção Civil – RCC na pavimentação é cada vez mais abordado. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010), os RCC são resíduos de difícil degradação, dado que não tendem a ter o seu volume diminuído com o passar do tempo.

Para a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2017), uma das vantagens em utilizar os resíduos é que esse processo exige pouca tecnologia e um baixo custo. Além disso, a moagem não exige muita energia porque os agregados podem ser utilizados com granulometria gráuda.

Neste trabalho foi utilizado o caco de telha cerâmica como um dos resíduos da Construção Civil a ser empregado para a estabilização de solos em pavimentação rodoviária. Vale destacar que para o Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos

Resíduos Sólidos – SINIR (2015), do Ministério do Meio Ambiente, os blocos cerâmicos apresentam o segundo maior percentual de material encontrado nos resíduos da Construção Civil, 29%, atrás apenas da argamassa, com 63%.

Mas a estabilização granulométrica de solos (exemplo o solo-brita) é feita tradicionalmente com a mistura prévia dos materiais. Antes, portanto, da sua compactação para determinar a massa específica aparente seca máxima e o teor ótimo de umidade. Estas condições também prevalecem no caso do CBR.

O ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia) avalia a resistência do solo à penetração de um cilindro padrão em relação à penetração do cilindro em uma brita graduada padrão (NBR 9895, 1987).

Vale destacar que, em laboratório, os ensaios buscam replicar as condições de trabalho em campo. Mas no método chamado cravamento (ou agulhamento) os materiais são aplicados separadamente. A camada de solo é compactada e, sobre ela, é depositada a camada de agregado, também compactada posteriormente. Dessa forma, a estabilização da camada acontece pelo cravamento do agregado na camada de solo previamente compactada. Este procedimento construtivo não encontra representação nas normas técnicas ou métodos de ensaios para a previsão do seu comportamento em laboratório. Desse cenário vem a necessidade de adaptações do ensaio tradicional.

Neste trabalho será estudado um procedimento alternativo ao ensaio CBR descrito em norma técnica, buscando prever o comportamento de misturas estabilizadas com o método de cravamento. O agregado empregado será rejeito cerâmico da produção de telhas.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é realizar uma adaptação do método de ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) para estudar um solo estabilizado granulometricamente sem que o agregado e o solo sejam previamente misturados, ou seja, pelo procedimento do agulhamento, analisando assim o emprego da técnica do agulhamento como procedimento para a construção de camadas de revestimentos primários.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos gerais

A Segunda Revolução Industrial, que ocorreu na segunda metade do século XIX até a segunda metade do Século XX, representou um avanço tecnológico seguido do surgimento de novas indústrias e do aumento da capacidade produtiva com o surgimento de novas máquinas e novos meios de produção. Como resultado, o setor rodoviário passou a ser o principal meio de escoamento dessas mercadorias, com o objetivo de integrar e industrializar o Brasil com a formação de polos de economia.

Como consequência dessa grande modernização, veio a mecanização das atividades em campo, o que gerou índice crescente de desemprego uma vez que a força de trabalho humana passou a ser substituída pelas máquinas. Dessa maneira, o êxodo rural ocorreu e as cidades receberam um grande número de pessoas vindas do campo em busca de melhores condições de vida.

Esse aumento populacional acelerado fez aquecer o setor da construção civil, gerando uma enorme quantidade de resíduos e aumentando os impactos socioambientais (LEITE, 2001). Segundo Santana (2016), esses resíduos dispostos de maneira irregular causam a proliferação de vetores, assoreamento de córregos e rios e obstrução de vias e logradouros públicos.

A reciclagem e o reuso dos rejeitos são alternativas para minimizar tais problemas. Em 2010 foi criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS nº 12.305 que tem como objetivo a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos e disposição final adequada dos rejeitos. Outro ponto importante dessa Política é que a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição – ABRECON foi reconhecida como representante do setor.

3.2 Classificação das vias

De acordo com o Art. 60 da Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 (BRASIL, 1997) do Código de Trânsito Brasileiro, as vias são classificadas em dois grupos: as urbanas e rurais. As vias urbanas são divididas em quatro categorias, sendo elas:

- a) via de trânsito rápido: caracterizada por acessos especiais com trânsito livre;
- b) via arterial: possibilita o trânsito entre as regiões da cidade, com interseções em nível geralmente semaforizadas;
- c) via coletora: destinada a coletar e escoar o trânsito das vias de trânsito rápido ou

arteriais; e

- d) via local: destinada somente para acessos locais ou áreas restritas, com interseções em nível não semaforizadas.

As vias rurais são divididas em apenas duas categorias, de acordo com a existência ou não de pavimentação:

- a) rodovias: vias pavimentadas; e
- b) estradas: vias não pavimentadas.

As vias não pavimentadas, conhecidas comumente como estradas de terra são aquelas onde predomina o solo natural como superfície de tráfego, não sendo revestidas por qualquer tratamento, seja ele betuminoso ou de cimento. Segundo Nunes (2003), essas vias normalmente apresentam um volume de tráfego médio diário inferior a 400 veículos. Carvalho (1992) também ressalta que há a presença de rampas acentuadas e curvas com pequenos raios, dificultado a visibilidade e mobilidade dos usuários.

Uma vez que o solo natural se torna a pista de rolamento, diversos problemas são percebidos por conta das intempéries. A precipitação se torna um dos maiores fatores causadores dos danos, visto que o solo natural possui baixa capacidade de infiltração, criando assim um escoamento superficial que acarretará no transporte de sedimentos. Com a presença das rampas acentuadas, a velocidade de escoamento da água aumenta, aumentando também o volume de sedimentos transportados (PRUSKI, 2003). O tráfego também é um fator considerável para aumentar a intensidade e a severidade dos danos, dado que a operação dos veículos produz desgaste, erosão e deformações na superfície da via.

Como resultado dessas intempéries, surgem ondulações, buracos, erosões e atoleiros que reduzem e limitam a vida útil da via.

3.3 Revestimento primário

Pela especificação técnica do Departamento de Estradas de Rodagem – DER (2006), o revestimento primário tem a função de assegurar condições de rolamento e de aderência satisfatórias em rodovias não pavimentadas. O revestimento primário é composto por camada granular flexível e estabilizada granulometricamente resultante (ou não) da mistura de materiais. Esses materiais podem ser: saibro, cascalho, rocha decomposta, seixo rolado ou não, pedregulho, areia, material sílico-argiloso, subprodutos industriais e escórias e as misturas de quaisquer um deles podem ser prévias, misturas na própria pista ou sem misturas.

3.4 Estabilização de solos

A estabilização dos solos consiste no tratamento do solo e pode ser por processo mecânico, químico ou granulométrico, aumentando a sua resistência mecânica e maximizando as suas condições operacionais, permanecendo assim mesmo sob a ação de cargas exteriores ou climáticas (BATISTA, 1976).

No processo mecânico o ganho de resistência do solo é proveniente do rearranjo das partículas, fazendo com que haja diminuição do índice de vazios. A estabilização mecânica pode ser realizada por meio de impacto, pressão ou vibração no solo (VARGAS, 1977).

O tratamento químico consiste na adição de estabilizadores que causam reações químicas, ajudando a alcançar maior resistência. Exemplo desses estabilizantes são o cimento, a cal e os betumes.

A correção granulométrica se dá pela adição de outros tipos de solos ou agregados granulares ao solo de referência para a construção. Esse processo melhora a resistência do solo pelo preenchimento dos vazios pelos grãos menores e o contato grão a grão das partículas maiores (VILLIBOR, 1982). Como exemplo, as misturas solo-brita são comumente utilizadas e de acordo com o Departamento de Estradas de Rodagem – DER:

A sub-base e base de solo-brita são camadas constituídas de mistura artificial em usina (ou na pista) de solo com agregado pétreo britado que apresentam grande estabilidade e durabilidade, para resistir às cargas do tráfego e ação dos agentes climáticos, quando adequadamente compactadas (2006).

3.5 Ensaio Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O ISC ou CBR (California Bearing Ratio) foi criado em 1929 pelo engenheiro O. J. Porter. Ele passou a ser difundido rapidamente no Brasil e é regido atualmente pela ABNT: NBR 9895 (2016): Solo - Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de Ensaio.

O ensaio é dividido em três fases. A compactação do corpo-de-prova é a primeira delas, que pode ser feita com a energia Proctor normal (12 golpes), intermediária (26 golpes) ou modificada (55 golpes). Os golpes são realizados uniformemente sobre a superfície de cada camada. Após a compactação, o material excedente é retirado com o auxílio de uma régua e depois os corpos-de-prova são imersos em água por 4 dias, obtendo-se assim os valores de expansividade do solo. Por fim, o corpo-de-prova é submetido à penetração de um pistão

cilíndrico de 2” de diâmetro a uma velocidade constante de 1,27 mm/min, obtendo-se assim a resistênciado solo em comparação a uma brita padrão.

3.6 Ensaio Índice de Suporte Califórnia (ISC) por agulhamento

Diferente do que é realizado tradicionalmente no ensaio CBR, onde as amostras de solo e agregado são previamente misturadas, no método do agulhamento os materiais são dispostos separadamente no cilindro de compactação. Esse procedimento assemelha às práticas adotadas em campo para as estradas não pavimentadas. Nesses casos, o agregado é espalhado com motoniveladora e em camadas com espessuras uniformes e homogêneas sobre o solo da superfície da estrada de terra. Esse procedimento é seguido da compressão do agregado, realizada por rolo liso até a cravação do agregado na camada primitiva da estrada.

Não há registros conhecidos de normas técnicas para o ensaio de agulhamento. Este trabalho propõe a adaptação do ensaio CBR com o solo e o agregado cerâmico não homogeneizados previamente. Também há carência na literatura acerca deste assunto. Assim, alguns métodos existentes foram tomados como referências, como a Especificação Técnica para Serviço de Execução de Agulhamento do Subleito do Pavimento – ESP (NOVACAP, 2012).

Neste trabalho, será utilizado como agregado o rejeito da produção cerâmica que, usado em grande escala, poderá gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos, uma vez que minimiza a necessidade de novos agregados para a produção de misturas estabilizadas, minimiza a quantidade de rejeitos da construção civil e reduz a quantidade de danos pela deposição incorreta dos rejeitos da produção industrial.

4. METODOLOGIA

4.1 Matéria-prima para os ensaios

O solo utilizado nos ensaios foi retirado da jazida conhecida como Torre, em Ilha Solteira – SP. Após a coleta, o solo foi colocado para secagem e, depois, destorroado. Em seguida a amostra foi estocada em barril metálico com tampa para proteção da chuva e sujeiras para os ensaios posteriores.

O agregado cerâmico foi fornecido pela Cerâmica Guerra, empresa de Três Lagoas – MS. Para reduzir o tamanho do agregado e facilitar a sua utilização, os cacos de telha foram quebrados com o auxílio de um rolo liso. O material triturado foi então estocado em de caixas de plástico no laboratório de pavimentação.

4.2 Preparação das amostras

Após o solo ser retirado do barril, ele foi separado em amostras que foram pesadas e embaladas em sacos plásticos para realizar os ensaios, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Separação do solo em amostras.



Fonte: Acervo da autora (2022).

O agregado cerâmico foi dividido em duas parcelas: uma porção foi para a estufa (Figura 2) e outra foi colocada em imersão, para a sua saturação (Figura 3).

Figura 2 – Secagem do agregado cerâmico.



Fonte: Acervo da autora (2022).

Figura 3 – Imersão do agregado cerâmico.



Fonte: Acervo da autora (2022).

4.3 Ensaios com o solo

4.3.1 Ensaio Granulométrico, Classificação TRB e MCT

Para essa pesquisa, os dados de granulometria e as classificações TRB e MCT do solo foram obtidos de ensaios realizados por CRUZ (2018). Os valores estão no item 5.1 de Resultados e Discussões.

4.3.2 Ensaio de Compactação Proctor

Para o ensaio de compactação foi utilizada a NBR 7182 (ABNT, 2020) – Solo: Ensaio de Compactação. A compactação é método de estabilização que visa aumentar a resistência do solo ao diminuir o seu índice de vazios. Com esse ensaio é possível determinar o teor de umidade ótima (w_{ot}) e a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d\text{ máx}}$) da amostra.

A energia de compactação empregada foi a do Proctor intermediário, com 26 golpes em cada uma das 5 camadas do corpo-de-prova. Ao todo, foram moldados 5 corpos-de-prova, com diferentes teores de umidade, atentando-se para alcançar 2 pontos percentuais abaixo, 2 acima e 1 próximo à umidade ótima (w_{ot}). O teor de umidade em cada amostra foi calculado pela Equação 1 e a massa específica aparente seca pela Equação 2.

$$W = \frac{M_a}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

- w – umidade do solo (%);
- M_a – massa de água contida na amostra (g);
- M_s – massa de solo seco (g).

$$\rho_d = \frac{M}{V(100+W)} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

- ρ_d – Massa específica aparente seca (g/cm³);
- M – Massa úmida do corpo-de-prova (g);
- V – Volume do corpo-de-prova (cm³).

4.3.3 Ensaio CBR e Expansão

Para realizar o ensaio CBR, a metodologia adotada foi a da NBR 9895 (2016) – Índice de Suporte Califórnia e também a NBR 6457 (ABNT, 2016) – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. As amostras foram compactadas nas condições de teor de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima obtidas no ensaio de Compactação Proctor. Como no ensaio Proctor, a energia adotada foi a intermediária.

Após a moldagem dos corpos-de-prova, eles foram submetidos à imersão por 96 horas (4 dias) para determinação da expansão do solo (Figura 4). O valor da expansão do foi determinado em leituras da variação da altura da amostra compactada, de acordo com a Equação 3.

Figura 4 – Preparação do corpo-de-prova para imersão.



Fonte: Acervo da autora (2022).

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial}}{\text{altura inicial do cp}} \quad (3)$$

Depois da imersão, os corpos-de-prova foram rompidos em prensa (Figura 5) para determinar a curva de penetração e, por fim, calcular o valor de CBR (Equação 4) para cada teor de umidade. O CBR do solo corresponde ao valor medido na curva de CBR por teor de umidade, equivalente ao teor ótimo de umidade.

Figura 5 – Leitura da penetração no Ensaio CBR.



Fonte: Acervo da autora (2022).

$$CBR (\%) = \frac{\text{pressão calculada (ou corrigida)}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (4)$$

4.4 Ensaio com o agregado cerâmico

Para o agregado cerâmico foi realizado o ensaio de absorção de acordo com o DNER-ME 195/97: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. O agregado foi lavado sobre a peneira de 4,8 mm e colocado na estufa à temperatura de 105 °C, até que a diferença de massa em duas determinações consecutivas fosse menor do que 0,1 g. A amostra foi retirada da estufa até que atingisse uma temperatura em que sua manipulação fosse possível. Então a amostra de agregado cerâmico foi pesada e imersa em água por 24 horas. Após esse tempo, a amostra foi espalhada sobre um pano absorvente até que as partículas de água visíveis fossem eliminadas. O agregado também foi pesado em condição saturada, permitindo calcular a absorção de água (Equação 5).

$$A = \frac{MA_w - MA_s}{MA_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

- A – absorção de água pelo agregado (%);
- MA_w – massa do agregado saturado (g);

- MA_s – massa do agregado seco (g).

4.5 Ensaio de CBR por cravamento do agregado

Para o ensaio de CBR com o cravamento do agregado cerâmico no solo, alguns procedimentos do ensaio tradicional foram mantidos, uma vez que não foram encontradas normas ou literatura para este tipo de ensaio. Dentre esses procedimentos, estão: o solo deverá estar em sua umidade ótima (12,22% - Tabela 1), o número de camadas dos corpos-de-prova será 5 e a energia de compactação intermediária, ou seja, 26 golpes em cada camada (Figura 6).

Figura 6 – Ensaio de compactação.



Fonte: Acervo da autora (2022).

Foram compactados 6 corpos-de-prova: 3 com o agregado cerâmico saturado; e 3 com o agregado seco. A confecção dos corpos-de-prova se deu pela inserção do anel de fundo, seguido por 2 camadas de caco de telha e, por fim, 3 camadas de solo, que foram escarificadas no final da série de golpes com o soquete para garantir a aderência da camada seguinte (Figura 7).

Figura 7 – Esquema da montagem dos corpos-de-prova.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Em campo, o agregado é aplicado sobre o solo compactado para melhorar as propriedades da superfície de tráfego. Mas neste ensaio adaptado, a configuração adotada foi invertida, com o solo sobre a camada de agregado compactado. Essa configuração foi proposta, uma vez que é necessário girar o corpo-de-prova para o teste de carga na prensa. Assim, as camadas de agregado sofrem a ação direta do pistão de penetração.

Após a compactação, os corpos-de-prova foram preparados e ajustados para a imersão em água para o ensaio de expansão. O excesso de solo no cilindro foi retirado, mantendo constante o volume do corpo-de-prova.

Ao contrário do CBR tradicional, onde o anel de fundo é retirado apenas puxando o molde cilíndrico, nesta adaptação foi necessário virar o corpo-de-prova e retirar o anel com o auxílio de um ímã. Esse procedimento preserva as camadas do agregado (Figura 8).

Figura 8 – Retirada do anel de fundo do cilindro.



Fonte: Acervo da autora (2022).

Após imersão em água por 96 horas (Figura 9), o corpo-de-prova foi retirado e levado à prensa e testado (Figura 10), como descrito no item 4.3.3.

Figura 9 – Corpo-de-prova imerso em água.



Fonte: Acervo da autora (2022).

Figura 10 – Corpo-de-prova após a penetração do pistão.



Fonte: Acervo da autora (2022).

As deformações do anel medidas em mm foram anotadas e assim plotado o gráfico de carga por penetração. Com esses dados, é possível encontrar o CBR do solo estabilizado com o agregado cerâmico. O corpo-de-prova foi retirado do cilindro (Figura 11) e o cravamento do caco de telha também foi medido afim de avaliar se o agulhamento realmente aconteceu.

Figura 11 – Extração do corpo-de-prova.



Fonte: Acervo da autora (2022).

Uma pequena amostra de solo na interface com o agregado cerâmico também foi retirada para avaliar se houve ou não absorção da água do solo pelo agregado. Neste caso, foram recolhidas porções do solo nos seis corpos-de-prova, considerando, portanto, as condições de compactação com agregados cerâmicos secos e saturados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaios com o solo

5.1.1 Classificação TRB

Os estudos realizados previamente com o solo Torre (CRUZ, 2018) forneceram os seguintes valores: limite de plasticidade (LP) – 17%; limite de liquidez (LL) – 24%; índice de plasticidade (IP) – 7%; índice de grupo (IG) – 4; e os valores passantes nas peneiras de #10, #40 e #200 foram, respectivamente: 100%, 97,70% e 56,60%. De acordo com a Figura 12, do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), os solos são classificados de acordo com a sua granulometria, limite de consistência e índice de grupo.

Figura 12 – Classificação dos solos (*Transportation Research Board*).

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

Portanto, o solo utilizado no presente estudo é classificado como A-4. O solo típico é siltsoso não plástico ou moderadamente plástico. Seu comportamento em subleito é de sofrível a mal, caracterizando assim o solo como material de bota-fora.

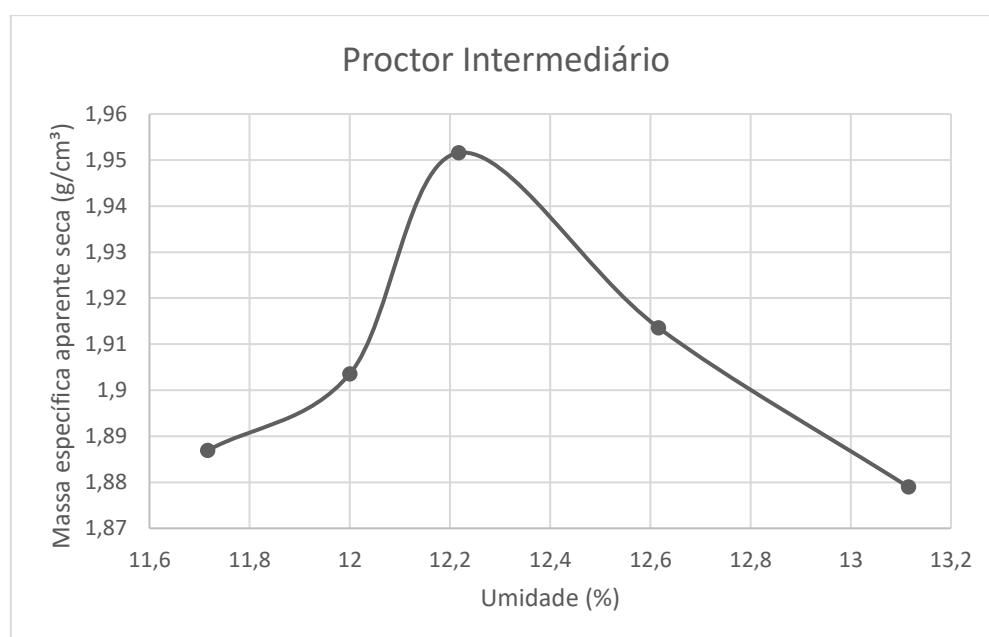
5.1.2 Classificação miniatura compactado tropical – MCT

O ensaio de classificação TRB não é representativo quando se tratam dos solos tropicais. O ensaio MCT visa suprir essa carência. Os valores dos coeficientes encontrados para a classificação MCT foram: $c' = 1,1$; $d' = 135,7 \text{ kg/m}^3$; $e' = 1,01$; $PI = 16\%$. O solo é classificado como de comportamento laterítico arenoso, caracterizado por baixas expansão, permeabilidade e perda de suporte por imersão, plasticidade e contração baixas a médias e capacidade de suporte alta a muito alta. Para Nogami e Villibor (1995) esse tipo de solo pode ser utilizado em subleito e camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos.

5.1.3 Ensaio de Compactação do solo

Com base nos dados do ensaio de compactação Proctor, cujos dados primários estão no Apêndice deste trabalho, foi possível plotar a curva de compactação do solo (Figura 13). Os resultados do ensaio de compactação estão resumidos na Tabela 1.

Figura 13 – Curva de Compactação no Proctor Intermediário.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 1 – Dados obtidos no ensaio de Proctor Intermediário.

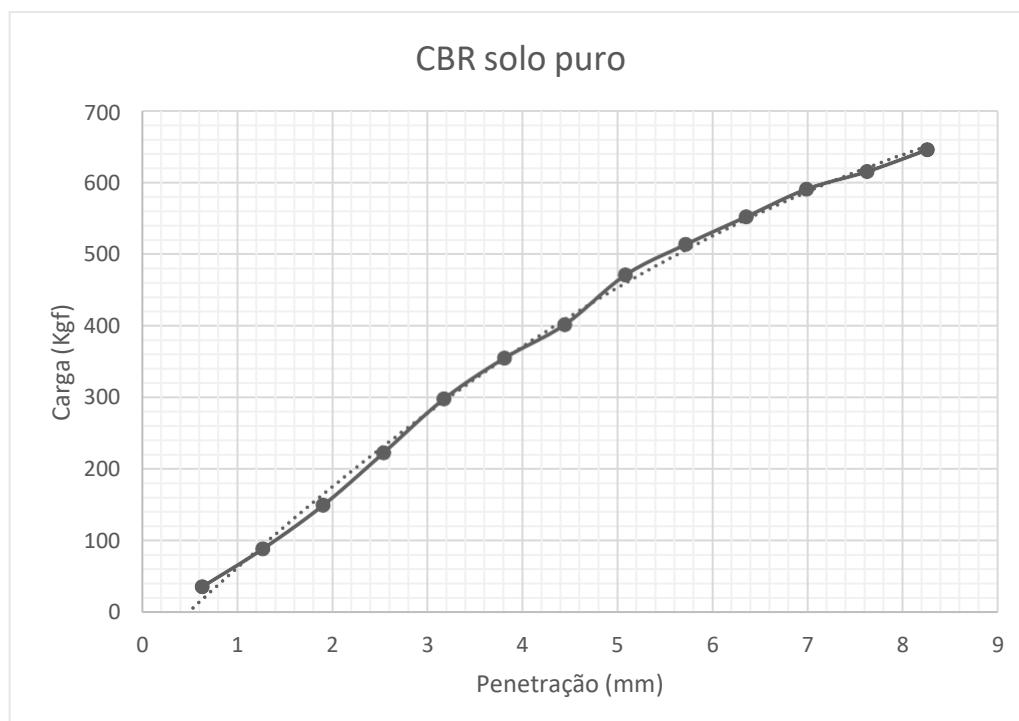
Número da amostra	Teor de umidade(%)	Massa específica aparente seca (g/cm ³)	Teor de umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)
1	11,716	1,886927	12,22	1,95
2	12,000	1,903571		
3	12,217	1,951576		
4	12,616	1,913580		
5	13,115	1,883916		

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

5.1.4 Ensaio CBR do solo

O ensaio de CBR foi realizado como descrito no item 4.3.3, utilizando como referência a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótima do ensaio de compactação. A Figura 14 ilustra o gráfico obtido de carga (Kgf) versus penetração (mm) e os valores de CBR (%) e do ensaio de expansão estão resumidos na Tabela 2.

Figura 14 – Curva de penetração do solo puro.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 2 – Dados obtidos no ensaio de CBR.

Penetração (mm)	CBR (%)	CBR do solo (%)	Expansão (%)
2,54	20,70	24,6	0,13
5,08	24,64		

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

De acordo com o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), os materiais devem apresentar as características descritas no Quadro 1 para servirem como material de construção em pavimentos rodoviários.

Quadro 1 – Especificações do uso dos materiais empregados em pavimentação.

Camada	CBR (%)	Expansão (%)
Subleito	≥ 2	≤ 2
Reforço do subleito	< que o do subleito	≤ 1
Sub-base	≥ 20	≤ 1
Base	≥ 80 para $N > 5 \times 10^6$ e ≥ 60 para $N \leq 5 \times 10^6$	$\leq 0,5$

Fonte: Adaptado do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)

Com os valores de CBR e expansão, pode-se observar que este solo pode ser utilizado com subleito, reforço do subleito e sub-base.

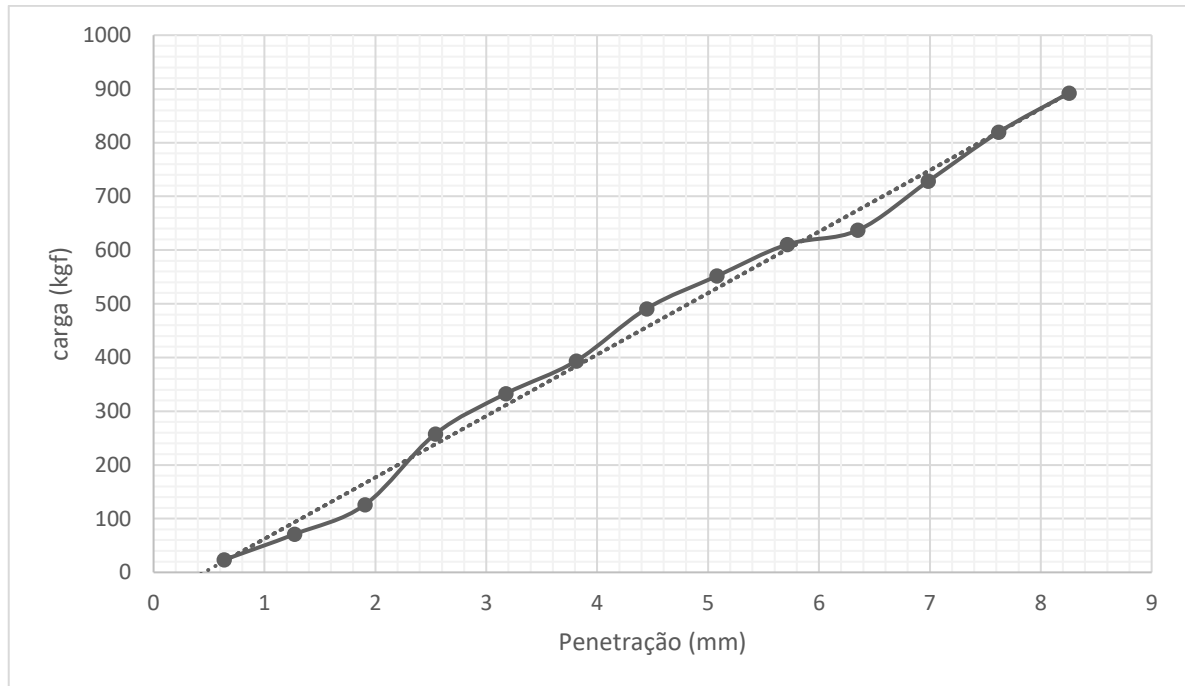
5.2 Ensaios realizados com o agregado

A massa do agregado seco mais a tara do recipiente foi de 1.364,30 g. Para o agregado saturado mais a tara, o valor foi de 1.611,30 g. Assim, a absorção do caco de telha cerâmico foi de 18,10%. Portanto se trata de material poroso, com alta capacidade de reter água.

5.3 Ensaio com o solo e o agregado cerâmico

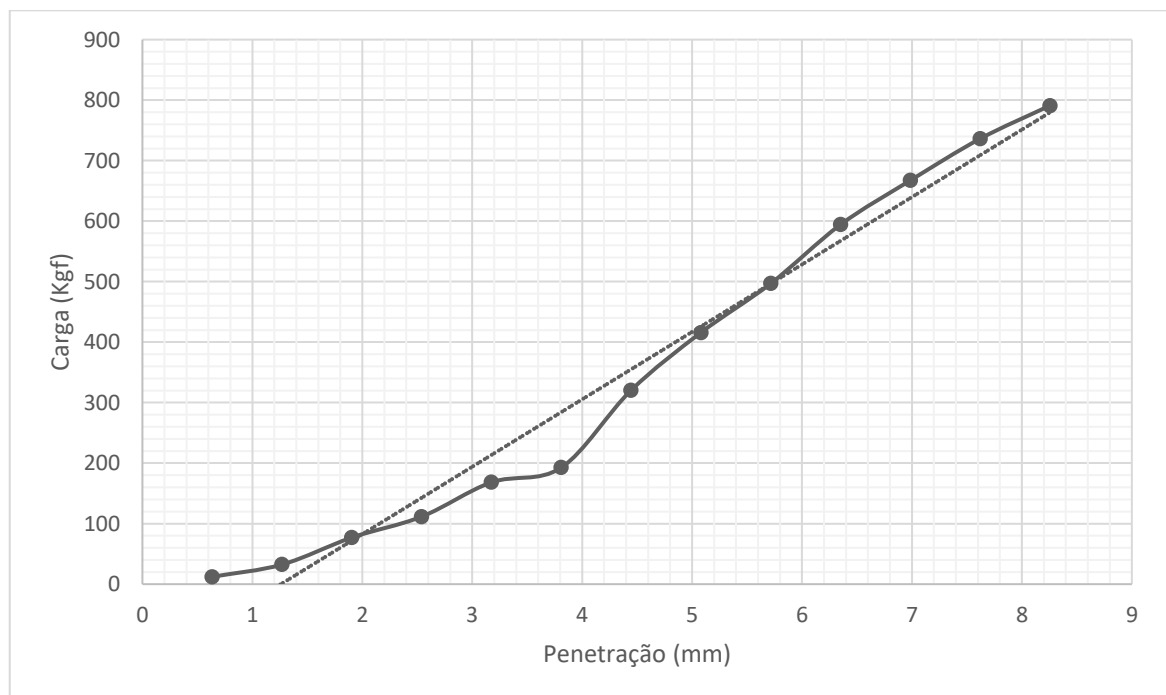
Conforme o item 4.5, foram realizados ensaio de CBR para o solo e o agregado cerâmico não homogeneizados previamente. A primeira série de três resultados refere-se aos dados para o solo estabilizado como caco de telha saturada os três últimos para o caco no estado seco. As curvas de carga versus penetração estão nas Figuras 15, 16, 17, 18, 19 e 20.

Figura 15 – CBR solo – caco de telha saturado (CP1).



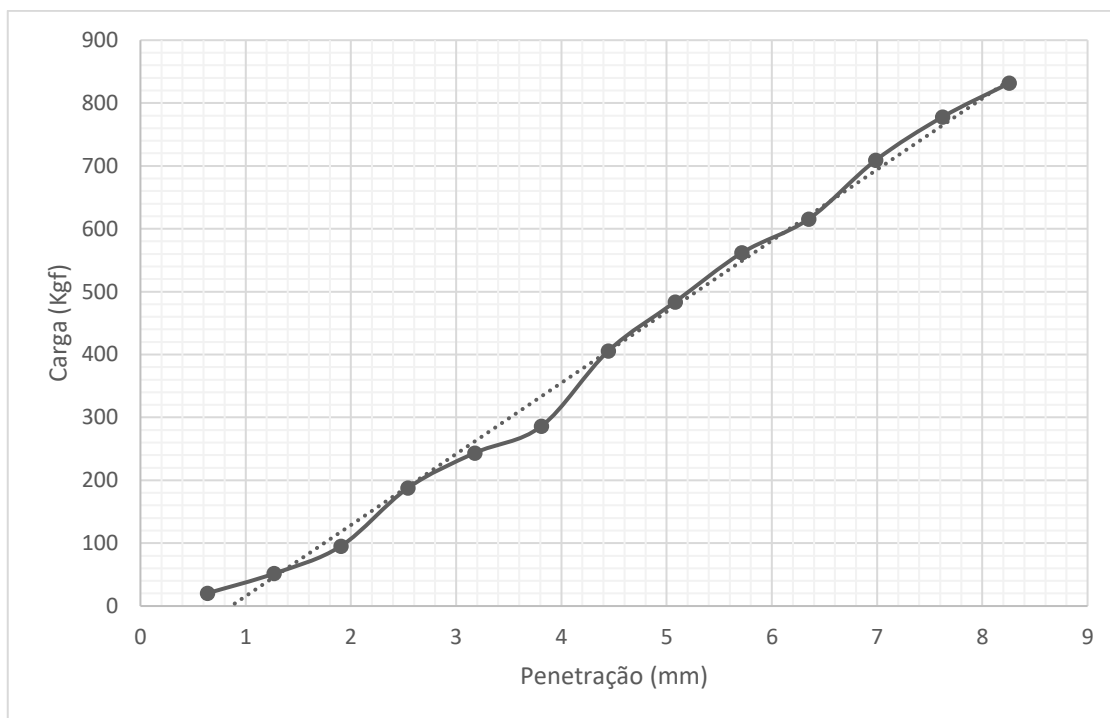
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 16 – CBR solo – caco de telha saturado (CP2).



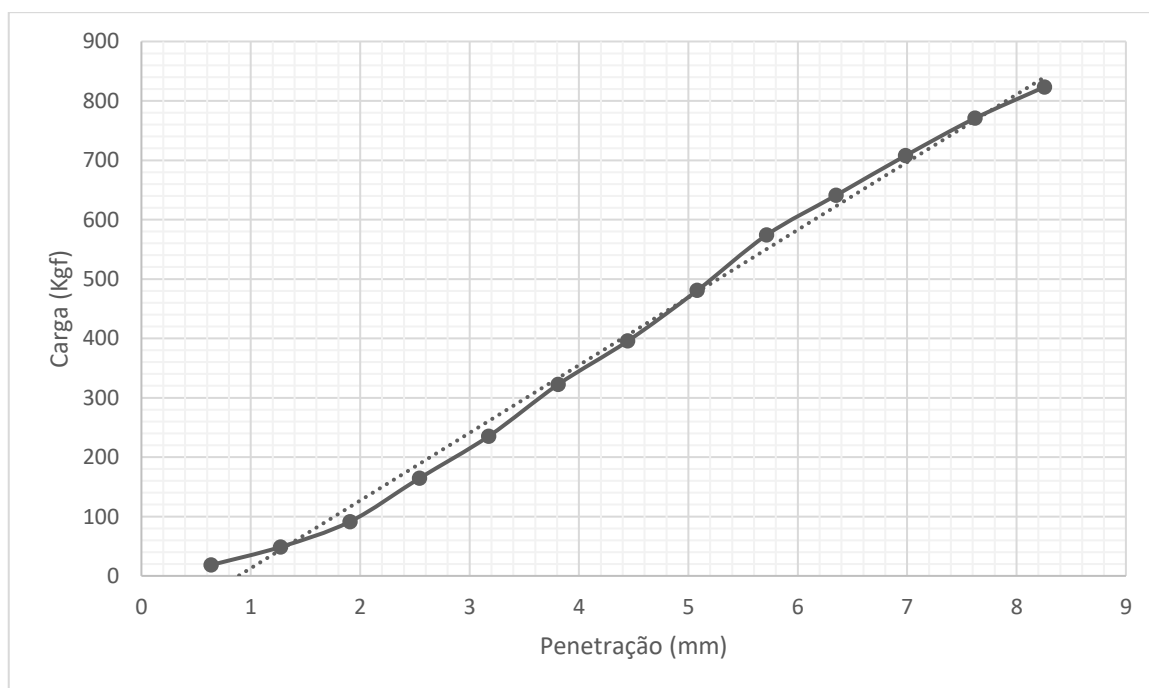
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 17 – CBR solo – caco de telha saturado (CP3).



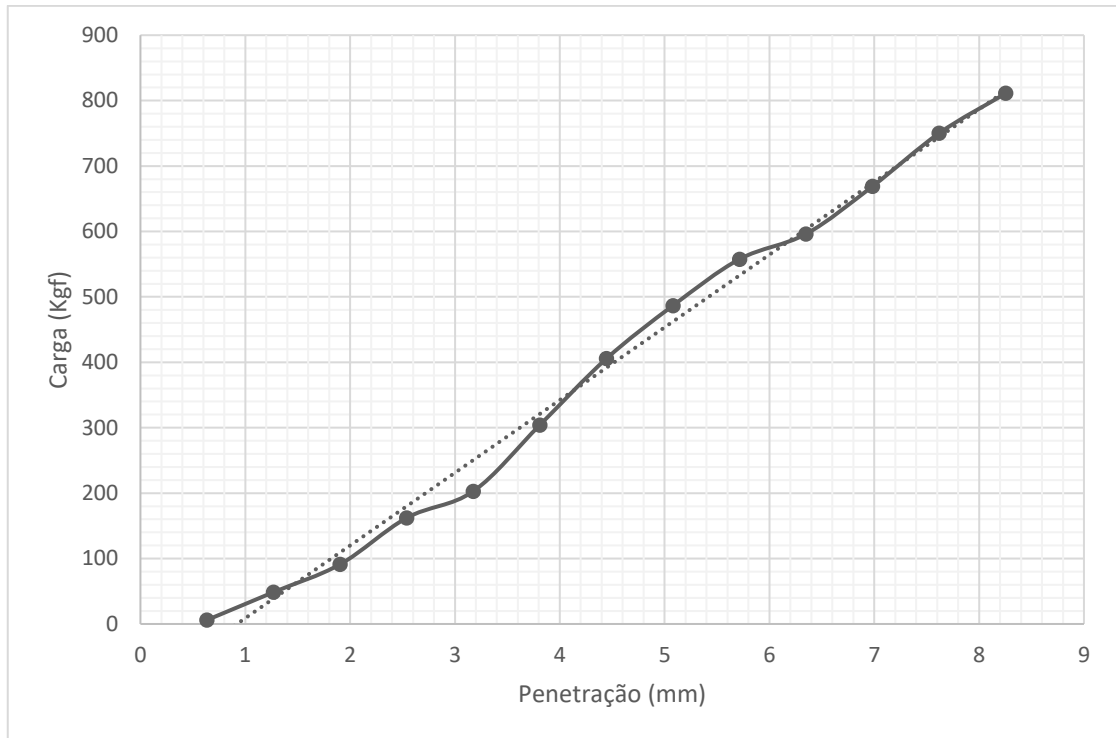
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 18 – CBR solo – caco de telha seco (CP4).



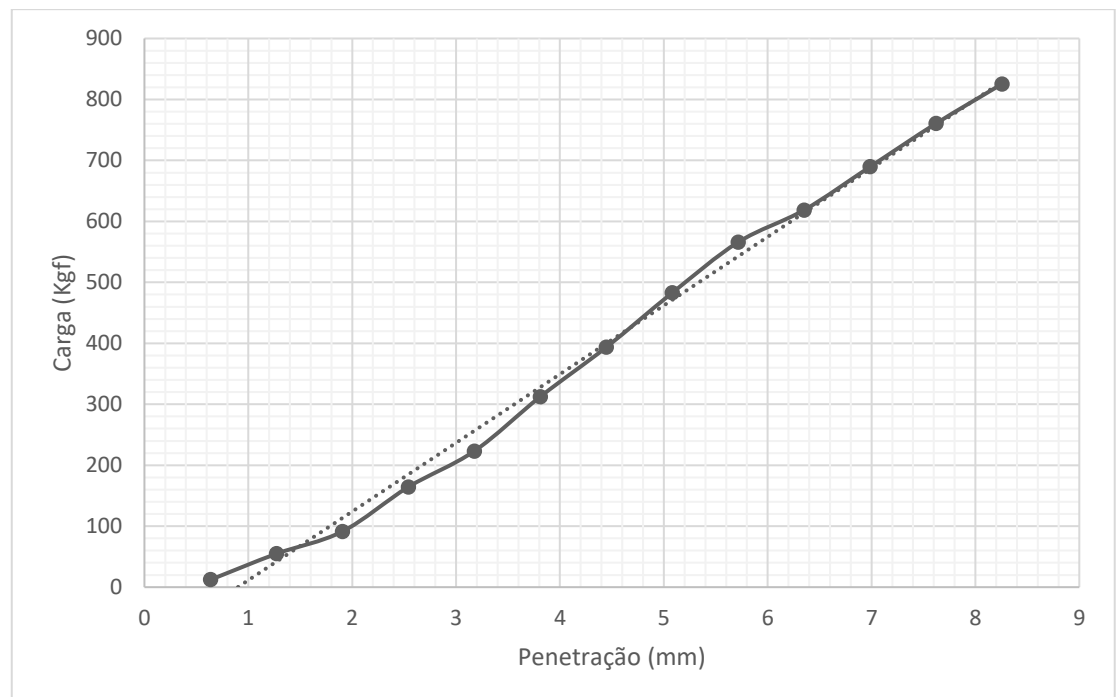
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 19 – CBR solo – caco de telha seco (CP5).



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 20 – CBR solo – caco de telha seco (CP6).



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Com base nas Figuras 15 a 20, foi possível construir a Tabela 3, que resume os valores de CBR (%) e expansão (%) medidos em cada amostra.

Tabela 3 – Dados obtidos no ensaio CBR para solo-agregado.

Corpo-de-prova	Condição do agregado	CBR (%) para penetração de 2,54 mm	CBR (%) para penetração de 5,08 mm	CBR (%)	Expansão(%)
CP1	saturado	13,31	28,64	28,6	0,00
CP2	saturado	20,70	24,64	24,6	0,00
CP3	saturado	18,93	28,00	28,0	0,01
Média				27,1	0,00
CP4	seco	19,52	29,48	29,5	0,00
CP5	seco	18,63	28,54	28,5	0,00
CP6	seco	17,67	28,69	28,7	0,01
Média				28,7	0,00

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

É possível verificar que, em comparação com o CBR do solo puro (24,6%), todas as amostras de solo-agregado cerâmico não homogeneizados apresentaram valor igual ou superior, reforçando a ideia de que a estabilização granulométrica aumenta o CBR do solo.

Também foi possível notar que independente da condição de saturação (ou não) dos agregados cerâmicos pouco influíram nos resultados de CBR e expansão, embora a média dos valores com o agregado seco seja levemente maior.

De acordo com os valores obtidos e apresentados na Tabela 3, todos os corpos-de-prova apresentam valor de CBR maior que 20% e expansão menor que 1%. Assim, a sua utilização pode ser em subleito, reforço do subleito e sub-base de vias pavimentadas. No caso das estradas de terra, não existem capazes de indicar os valores e parâmetros limites para o seu uso.

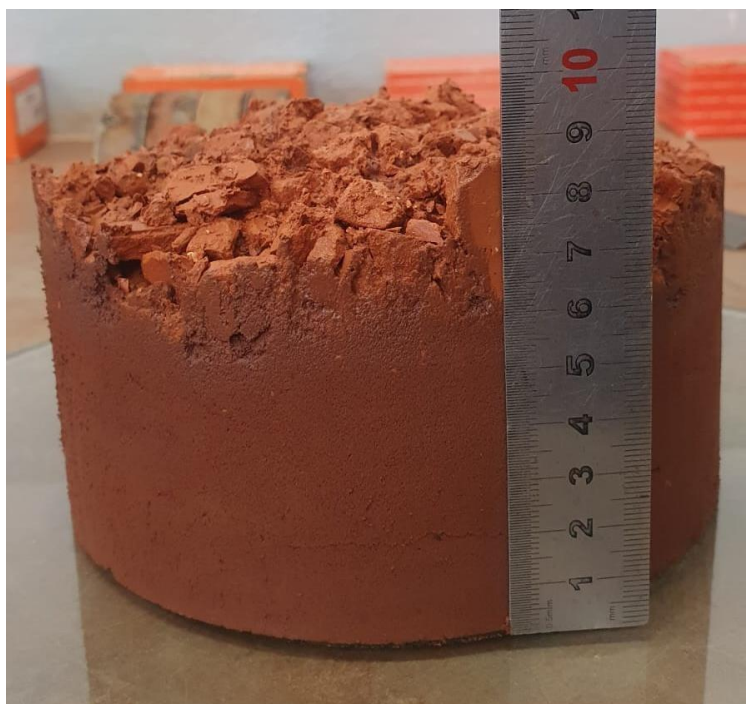
5.4 Cravamento do agregado cerâmico no solo

A análise do cravamento do agregado é importante para verificar se realmente houve a penetração (agulhamento) do caco cerâmico no solo. Essa medição foi feita com o auxílio de uma régua. Geralmente a altura do corpo-de-prova no ensaio CBR é da ordem de 11,5 cm, mas nesse ensaio adaptado, ao retirá-lo do cilindro alguns fragmentos de agregado se desprenderam, o que deixou o corpo-de-prova com altura menor.

Na Figura 21 é possível observar que a altura total é de 8,5 cm e o caco de telha penetrou de 2,3 e 3,1 cm em relação ao topo do corpo-de-prova. Na Figura 22 nota-se que

a altura total é de 8 cm e o agregado penetrou de 3,3 e 3,8 cm em relação ao topo do corpo-de-prova.

Figura 21 – Medição do cravamento no CP1.



Fonte: Acervo da autora (2022).

Figura 22 – Medição do cravamento no CP4.



Fonte: Acervo da autora (2022).

5.5 Teor de umidade do solo no contato solo-agregado

Após os ensaios e medições, uma amostra de solo de cada corpo-de-prova foi retirada na região do contato com o agregado para analisar se o caco cerâmico havia absorvido umidade do solo. Os valores obtidos estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados obtidos na determinação do teor de umidade.

Corpo-de-prova	Condição do agregado	w média (%)
CP1	saturado	13,09
CP2	saturado	13,36
CP3	saturado	13,10
CP4	seco	12,49
CP5	seco	12,56
CP6	seco	12,51

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O valor obtido para o teor de umidade ótima do solo puro foi de 12,22% (Tabela 1). Todos os valores de umidade medidos após a imersão e o ensaio foram maiores do que esse valor, provando que o agregado não absorveu umidade do solo.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

6.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, foi possível concluir que o uso do solo com o agregado cerâmico é apto do ponto de vista das propriedades físicas e mecânicas para pavimentação como: subleito e camadas de reforço do subleito e de sub-base. No caso das vias não pavimentadas não há parâmetros normativos, porém a sua utilização parece viável em revestimentos primários quando se toma por base os parâmetros das vias pavimentadas.

É possível calcular o CBR de amostras utilizando o método do agulhamento. A condição de saturação ou não do agregado não teve grandes interferências nos resultados e apesar da grande capacidade de absorção, o caco de telha não absorveu umidade do solo. Os valores de expansão também foram baixos e menores que os valores do solo puro.

A utilização do caco cerâmico em camada de cravamento aumentou o CBR da mistura estabilizada em relação ao solo in natura. Ressalta-se que esse ganho não foi significativo e a boa qualidade do solo pode ser uma explicação.

Além do ganho estrutural, existe o ganho ambiental e social relacionado ao uso do caco de telha cerâmica para a estabilização granulométrica de solos, uma vez que o rejeito seria entulho descartado em aterros.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para futuros trabalhos, destacam-se os seguintes temas e sugestões:

- Utilizar diferentes energias de compactação (Proctor normal e Proctor modificado).
- Repetir o trabalho adotando a mesma energia de compactação, porém com diferentes dosagens de materiais e/ou esquemas de montagens dos corpos-de-provas.
- Repetir o mesmo trabalho utilizando outro tipo de solo.
- Estudos com outros materiais rejeitos da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil**. 2017. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf>. Acesso em: 28 de setembro de 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

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

BATISTA, C. F. N. **Ensaaios Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição. Porto Alegre, RS: Editora Globo, 1976.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.

CARVALHO, L. D. V. Avaliação da viabilidade da melhoria do projeto geométrico e da conservação das estradas de terra. 1992. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1992.

CÓDIGO DE TRÂNSITO BRASILEIRO - CTB. **Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997**.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Anuário do Transporte**. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2020/Rodoviario/1-1-/Inicial>>. Acesso em: 28 de setembro de 2022.

CRUZ, F.A. **Estabilização de solos com o uso de resíduos da construção civil**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER. **DER ET-DE-P00/006: Especificação Técnica**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER. **DER ET-DE-P00/013: Especificação Técnica**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 195/97: Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª edição. Rio de Janeiro, RJ: 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª edição. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/sibcs/classificacao-de-solos>>. Acesso em 19 de outubro de 2022.

SANTANA, I. C. **Análise dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos de construção e demolição em Conceição do Almeida - BA**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

LEITE, B. M. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; BRANDÃO, V. S. **Infiltração de água no solo: manejo de solos, percolação da umidade dos solos**. Viçosa: Editora UFV, 2008, 98 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos - SINIR. **Resíduos Sólidos da Construção Civil**. 2015. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-da-construcao-civil/>>. Acesso em: 03 de outubro de 2022.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. 2ª edição. São Paulo, SP: Arte & Ciência, 2009.

NOVACAP - COMPANHIA URBANIZADORA DA NOVA CAPITAL. **Especificação técnica para serviço de execução de agulhamento do subleito do pavimento – ESP 04**. Distrito Federal, DF, 2012.

NUNES, T. V. L. **Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso das redes neurais artificiais: trecho de Aquiraz – CE**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Secretaria de Infra-Estrutura Urbana. **PMSP/SP ETS – 001/2003: Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. São Paulo, 2003.

VARGAS, M. **Introdução a Mecânica dos Solos**. 1ª edição. São Paulo, SP: Mcgraw-Hill do Brasil, 1977.

VILLIBOR, D. F. **Estabilização Granulométrica ou Mecânica**. São Carlos, SP: GRÁFICA EESC - USP, 1982.

WALLAU, J. R. **Avaliação da Técnica de Estabilização Granulométrica como Revestimento Primário de Rodovias Não-Pavimentadas**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2004.

APÊNDICE

Dados do ensaio Proctor Intermediário do solo in natura.

Número da amostra	Massa de solo úmido da amostra (g)	Massa de solo seco da amostra (g)	Massa de água contida na amostra (g)	Umidade (%)	Massa úmida da amostra de solo (g)	Volume do corpo-de-prova (cm ³)	Massa específica aparente seca (g/cm ³)
1	32,42	29,02	3,40	11,716	2108	1000	1,886927
2	31,08	27,75	3,33	12,000	2132	1000	1,903571
3	26,27	23,41	2,86	12,217	2190	1000	1,951576
4	31,51	27,98	3,53	12,616	2155	1000	1,913580
5	26,65	23,56	3,09	13,115	2131	1000	1,883916

unesp

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL

ENSAIO DE CBR

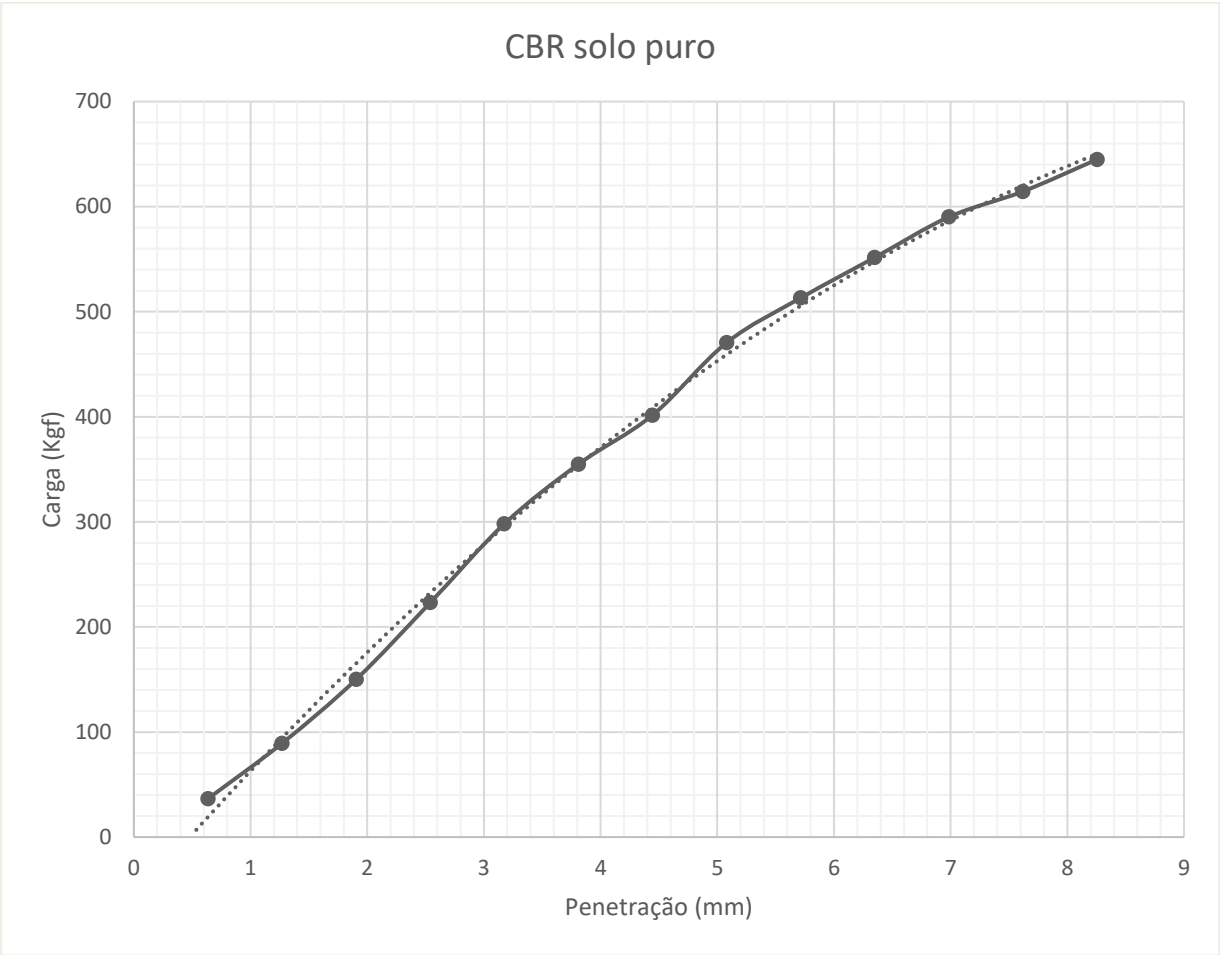
Operador: Eduarda Ricci	Umidade ótima (w): 12,22%
Local: Ilha Solteira	Densidade Máxima (pd máx): 1,95 g/cm³
Amostra: Solo puro	Data: 17/05/2022

PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA		
Cilindro N°	4	
N° de camadas	5	
N° de golpes	26	
DADOS DE AMOSTRA	ANTES DA SATURAÇÃO	APÓS SATURAÇÃO
Peso am. Um. + molde	8,655 Kg	8,650 Kg
Peso do molde	4,296 Kg	4,296 Kg
Peso da amostra	4,359 Kg	4,354 Kg
Volume da amostra	2.100 cm³	2.100 cm³
Densidade aparente úmida	2,1 g/cm³	2,07 g/cm³

DETERMINAÇÃO DO TEOR DA UMIDADE	
Capsula:	M 36
Solo + Água + Tara (g)	56,74
Solo + Tara (g)	52,17
Solo (g)	39,06
Água (g)	4,70
Tara (g)	27,90
w (%)	12,03
w média (%)	12,03
Densidade aparente seca máxima (g/cm³)	

SATURAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA					
DIA	HORA	TEMP. DEC.	ALTURA INICIAL:		
			LEITURA DEFLECT.	Δh	(%)
0	10:00	0	0,200	0,000	0,00
1	10:00	24	0,200	0,000	0,00
2	10:00	48	0,215	0,015	0,13
3	10:00	72	0,210	0,010	0,09
4	10:00	96	0,210	0,010	0,09
CBR: 24,6 %					
EXPANSÃO: 0,13 %					
GRAU DE COMPACTAÇÃO:					

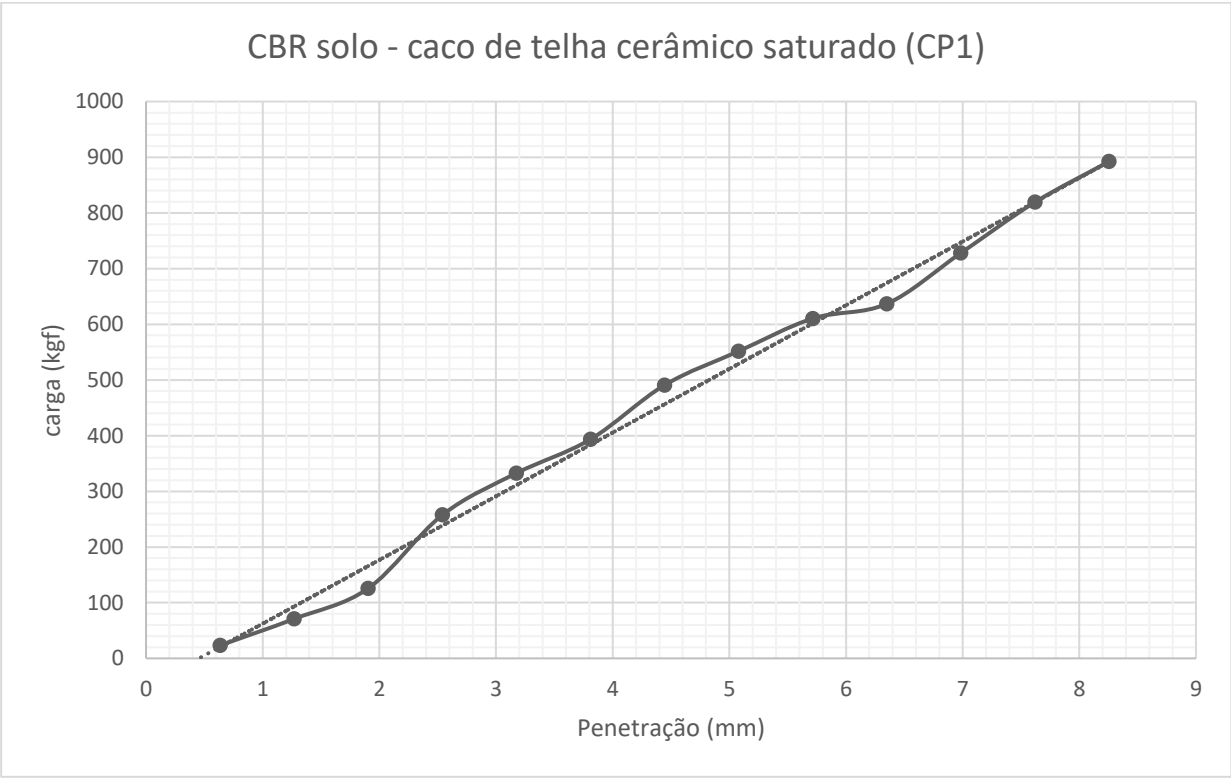
PENETRAÇÃO (mm)	TEMPO (mm)	PENETRAÇÃO (pol)	GOLPES POR CAMADA	
			Def. do anel (mm)	Carga (Kgf)
0,635	0,5	0,025	18	36,504
1,270	1	0,050	44	89,232
1,905	1,5	0,075	74	150,072
2,540	2	0,100	110	223,080
3,175	2,5	0,125	147	298,116
3,810	3	0,150	175	354,900
4,445	3,5	0,175	198	401,544
5,080	4	0,200	232	470,496
5,715	4,5	0,225	253	513,084
6,350	5	0,250	272	551,616
6,985	5,5	0,275	291	590,148
7,620	6	0,300	303	614,484
8,255	6,5	0,325	318	644,904



Penetração (mm)	Pressão (Kgf)			CBR (%)	CBR do solo (%)	Expansão (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão			
2,54	223,08	280,00	1.352,54	20,70	24,6	0,13
5,08	470,05	500,00	2.028,82	24,64		

Dados do ensaio CBR para o solo – caco de telha cerâmico saturado (CP1).

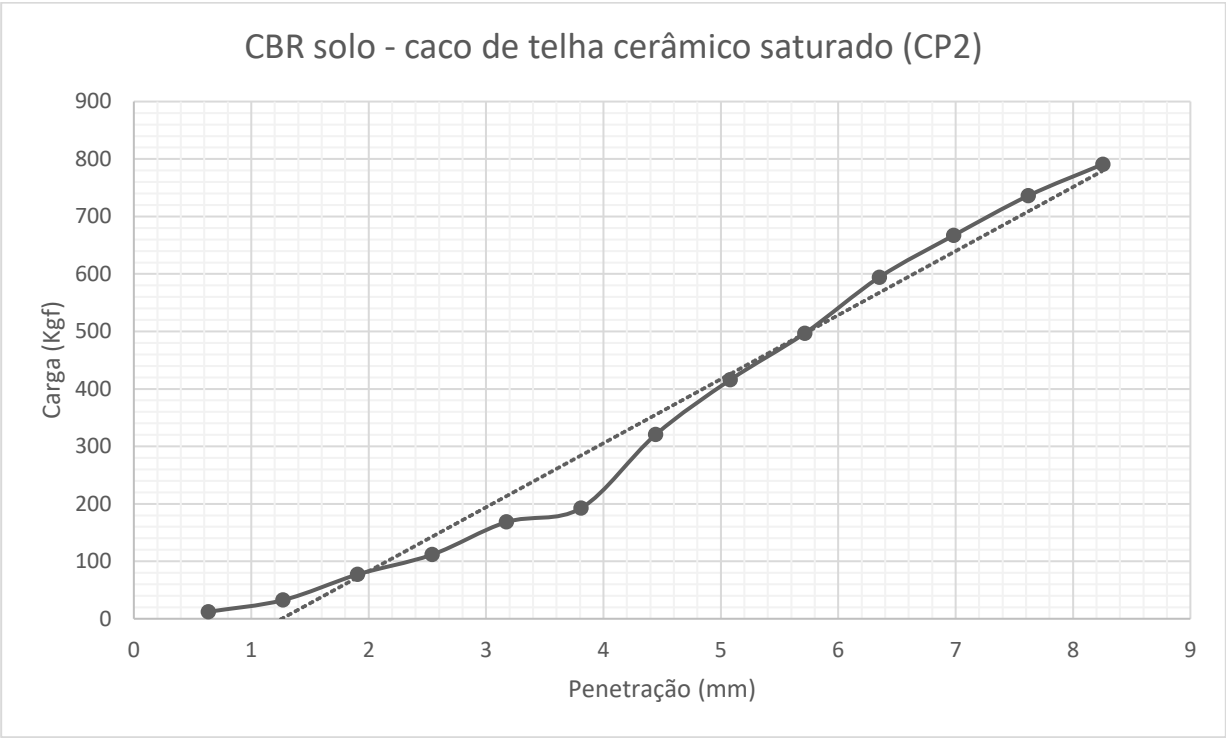
		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL						
ENSAIO DE CBR								
Operador: Eduarda Ricci			Umidade ótima (w):					
Local: Ilha Solteira			Densidade Máxima (pd máx):					
Amostra: Solo - caco de telha cerâmico saturado (CP1)			Data: 26/05/2022					
PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA			SATURAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA					
Cilindro N°	8		DIA	HORA	TEMP. DEC.	ALTURA INICIAL:		
N° de camadas	5					LEITURA DEFLECT.	Δh	(%)
N° de golpes	26							
DADOS DE AMOSTRA			DADOS DE AMOSTRA					
	ANTES DA SATURAÇÃO	APÓS SATURAÇÃO						
Peso am. Um. + molde	9,515 Kg	9,610 Kg						
Peso do molde	5,520 Kg	5,520 Kg						
Peso da amostra	3,995 Kg	4,090 Kg						
Volume da amostra	2.092 cm³	2.092 cm³						
Densidade aparente úmida	1,91g/cm³	1,96 g/cm³						
DETERMINAÇÃO DO TEOR DA UMIDADE			DETERMINAÇÃO DO TEOR DA UMIDADE					
Capsula:	M 36	M 43						
Solo + Água + Tara (g)	57,02	55,71						
Solo + Tara (g)	53,78	52,39						
Solo (g)	25,88	24,32						
Água (g)	3,24	3,32						
Tara (g)	27,90	28,07						
w (%)	12,52	13,65						
w média (%)	13,09							
Densidade aparente seca máxima (g/cm³)								
			CBR: 28,8 % EXPANSÃO: 0,00 % GRAU DE COMPACTAÇÃO:					
PENETRAÇÃO					GOLPES POR CAMADA			
PENETRAÇÃO (mm)	TEMPO (mm)	PENETRAÇÃO (pol)	Def. do anel (mm)		Carga (Kgf)			
0,635	0,5	0,025	11,5		23,322			
1,270	1	0,050	35		70,980			
1,905	1,5	0,075	62		125,736			
2,540	2	0,100	127		257,556			
3,175	2,5	0,125	164		332,592			
3,810	3	0,150	194		393,432			
4,445	3,5	0,175	242		490,776			
5,080	4	0,200	272		551,616			
5,715	4,5	0,225	301		610,428			
6,350	5	0,250	314		636,792			
6,985	5,5	0,275	359		728,052			
7,620	6	0,300	404		819,312			
8,255	6,5	0,325	440		892,320			



Penetração (mm)	Pressão (Kgf)			CBR (%)	CBR (%) solo - caco cerâmico	Expansão (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão			
2,54	257,56	314,00	1.352,54	23,22	28,83	0,00
5,08	551,62	585,00	2.028,82	28,83		

Dados do ensaio CBR para o solo – caco de telha cerâmico saturado (CP2).

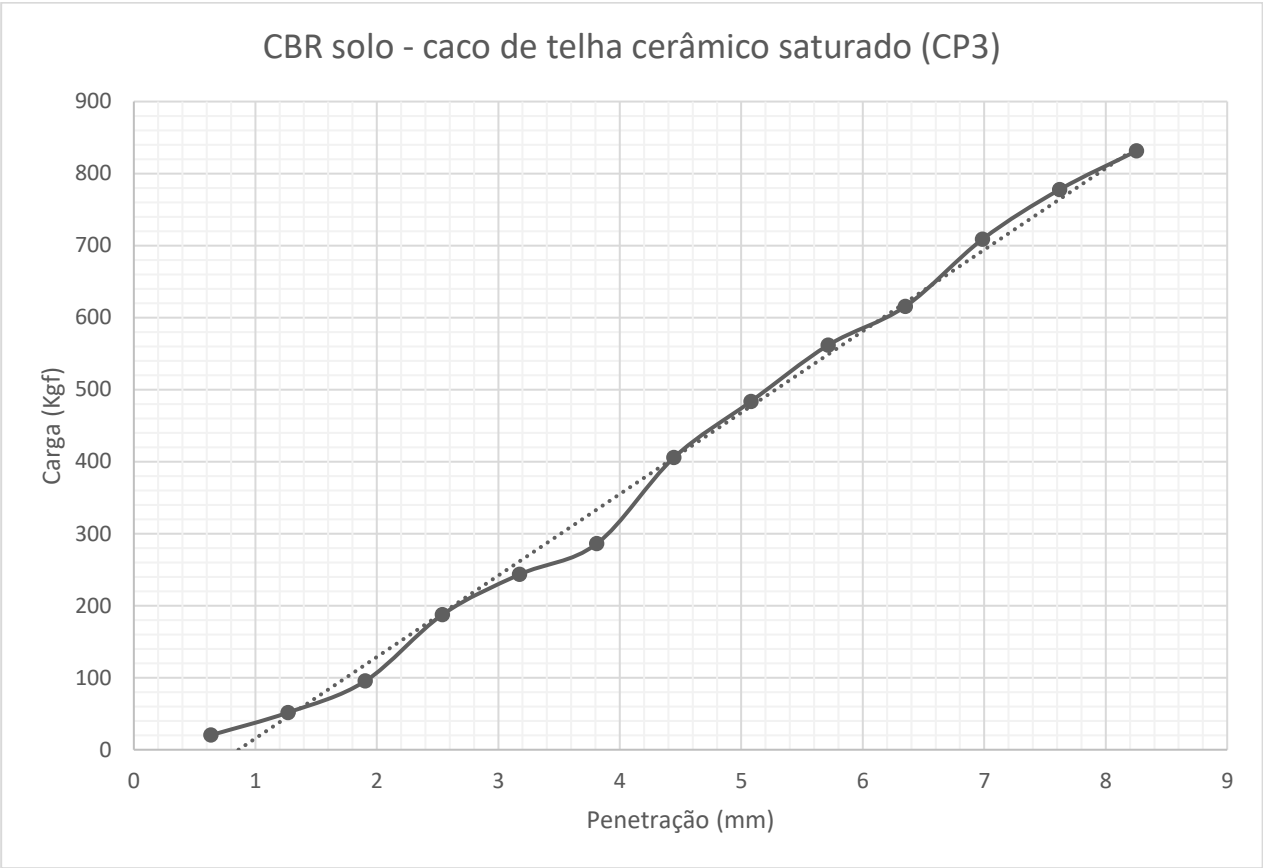
		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
ENSAIO DE CBR					
Operador: Eduarda Ricci			Umidade ótima (w):		
Local: Ilha Solteira			Densidade Máxima (pd máx):		
Amostra: Solo - caco de telha cerâmico saturado (CP2)			Data: 30/05/2022		
PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA					
Cilindro N°	2				
N° de camadas	5				
N° de golpes	26				
DADOS DE AMOSTRA	ANTES DA SATURAÇÃO	APÓS SATURAÇÃO			
Peso am. Um. + molde	8,285 Kg	8,335 Kg			
Peso do molde	4,261 Kg	4,261 Kg			
Peso da amostra	4,024 Kg	4,074 Kg			
Volume da amostra	2.081 cm³	2.081 cm³			
Densidade aparente úmida	1,93 g/cm³	1,96 g/cm³			
DETERMINAÇÃO DO TEOR DA UMIDADE					
Capsula:	M 31	M 37			
Solo + Água + Tara (g)	58,30	51,01			
Solo + Tara (g)	55,03	48,23			
Solo (g)	26,53	19,31			
Água (g)	3,27	2,78			
Tara (g)	28,50	28,92			
w (%)	12,33	14,40			
w média (%)	13,36				
Densidade aparente seca máxima (g/cm³)					
SATURAÇÃO DOS CORPOS- DE-PROVA					
DIA	HORA	TEMP. DEC.	ALTURA INICIAL:		
			LEITURA DEFLECT.	Δh	(%)
0	10:00	0	0,000	0,000	0,00
1	10:00	24	0,000	0,000	0,00
2	10:00	48	0,000	0,000	0,00
3	10:00	72	0,000	0,000	0,00
4	10:00	96	0,000	0,000	0,00
CBR: 28,6 %					
EXPANSÃO: 0,00 %					
GRAU DE COMPACTAÇÃO:					
GOLPES POR CAMADA					
PENETRAÇÃO (mm)	TEMPO (mm)	PENETRAÇÃO (pol)	Def. do anel (mm)	Carga (Kgf)	
0,635	0,5	0,025	6	12,168	
1,270	1	0,050	16	32,448	
1,905	1,5	0,075	38	77,064	
2,540	2	0,100	55	111,540	
3,175	2,5	0,125	83	168,324	
3,810	3	0,150	95	192,660	
4,445	3,5	0,175	158	320,424	
5,080	4	0,200	205	415,740	
5,715	4,5	0,225	245	496,860	
6,350	5	0,250	293	594,204	
6,985	5,5	0,275	329	667,212	
7,620	6	0,300	363	736,164	
8,255	6,5	0,325	390	790,920	



Penetração (mm)	Pressão (Kgf)			CBR (%)	CBR (%) solo - caco cerâmico	Expansão (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão			
2,54	111,54	180,00	1.352,54	13,31	28,6	0,00
5,08	415,74	581,00	2.028,82	28,64		

Dados do ensaio CBR para o solo – caco de telha cerâmico saturado (CP3).

		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL						
ENSAIO DE CBR								
Operador: Eduarda Ricci			Umidade ótima (w):					
Local: Ilha Solteira			Densidade Máxima (pd máx):					
Amostra: Solo - caco de telha cerâmico saturado (CP3)			Data: 04/07/2022					
PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA			SATURAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA					
Cilindro N°	9		DIA	HORA	TEMP. DEC.	ALTURA INICIAL:		
N° de camadas	5					LEITURA DEFLECT.	Δh	(%)
N° de golpes	26							
DADOS DE AMOSTRA								
	ANTES DA SATURAÇÃO	APÓS SATURAÇÃO						
Peso am. Um. + molde	9,497 Kg	9,513 Kg	0	10:00	0	0,000	0,000	0,00
Peso do molde	5,450 Kg	5,450 Kg	1	10:00	24	0,000	0,000	0,00
Peso da amostra	4,047 Kg	4,063 Kg	2	10:00	48	0,000	0,000	0,00
Volume da amostra	2.093 cm³	2.093 cm³	3	10:00	72	0,000	0,000	0,00
Densidade aparente úmida	1,93 g/cm³	1,94 g/cm³	4	10:00	96	0,001	0,001	0,01
DETERMINAÇÃO DO TEOR DA UMIDADE			CBR: 28,0 %					
Capsula:	M 47	M 05	EXPANSÃO: 0,01 %					
Solo + Água + Tara (g)	69,27	55,32	GRAU DE COMPACTAÇÃO:					
Solo + Tara (g)	64,88	52,01						
Solo (g)	34,32	24,69						
Água (g)	4,39	3,31						
Tara (g)	30,56	27,32						
w (%)	12,79	13,41						
w média (%)	13,10							
Densidade aparente seca máxima (g/cm³)								
PENETRAÇÃO			GOLPES POR CAMADA					
PENETRAÇÃO (mm)	TEMPO (mm)	PENETRAÇÃO (pol)	Def. do anel (mm)		Carga (Kgf)			
0,635	0,5	0,025	10		20,280			
1,270	1	0,050	26		51,714			
1,905	1,5	0,075	47		95,316			
2,540	2	0,100	92		187,590			
3,175	2,5	0,125	120		243,360			
3,810	3	0,150	141		285,948			
4,445	3,5	0,175	200		405,600			
5,080	4	0,200	240		483,678			
5,715	4,5	0,225	277		561,756			
6,350	5	0,250	303		615,498			
6,985	5,5	0,275	349		707,786			
7,620	6	0,300	384		777,738			
8,255	6,5	0,325	410		831,480			



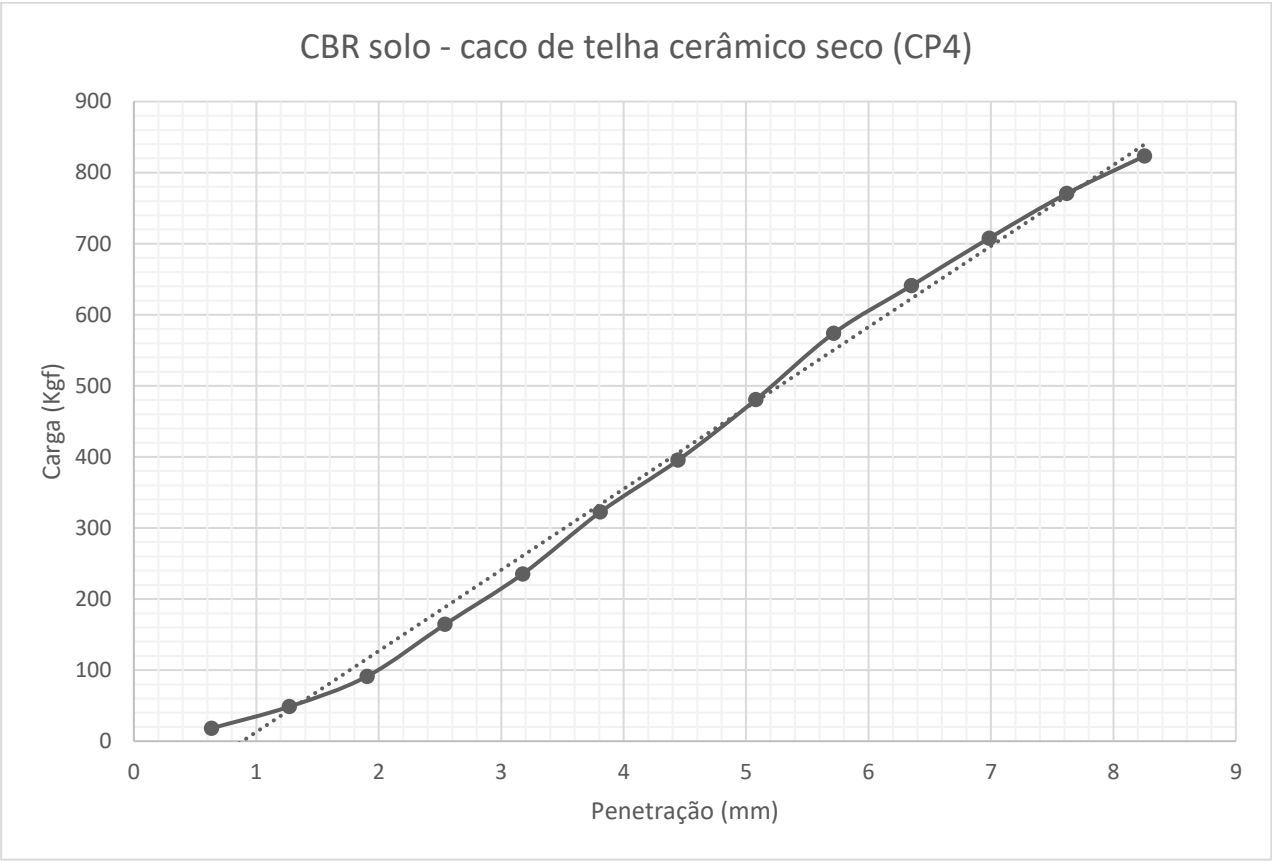
Penetração (mm)	Pressão (Kgf)			CBR (%)	CBR (%) solo - caco cerâmico	Expansão (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão			
2,54	187,59	256,00	1.352,54	18,93	28,0	0,01
5,08	483,68	568,00	2.028,82	28,00		

unesp

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL

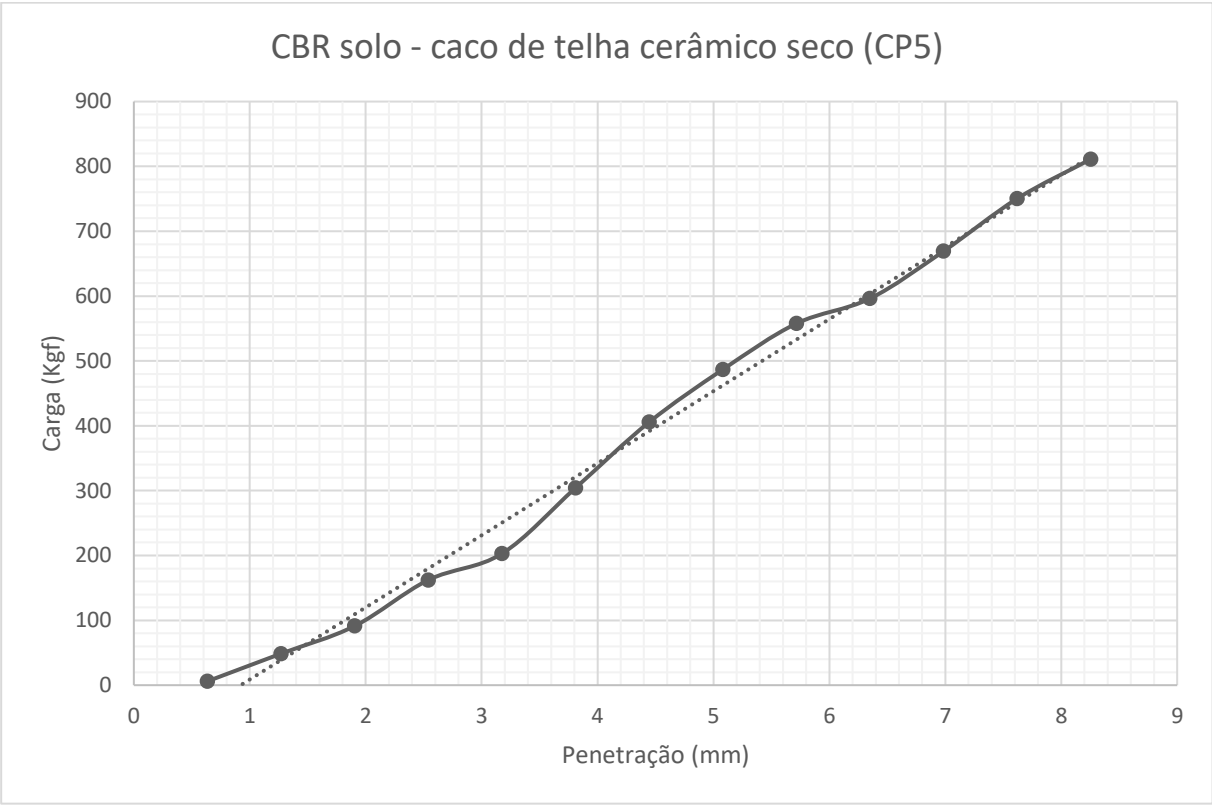
ENSAIO DE CBR								
Operador: Eduarda Ricci			Umidade ótima (w):					
Local: Ilha Solteira			Densidade Máxima (pd máx):					
Amostra: Solo - caco de telha cerâmico seco (CP4)			Data: 04/07/2022					
PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA			SATURAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA					
Cilindro N°	1		DIA	HORA	TEMP. DEC.	ALTURA INICIAL:		
N° de camadas	5					LEITURA DEFLECT.	Δh	(%)
N° de golpes	26							
DADOS DE AMOSTRA			CBR: 29,5 %					
Peso am. Um. + molde	7,880 Kg	8,290 Kg	EXPANSÃO: 0,00 %					
Peso do molde	4,295 Kg	4,295 Kg	GRAU DE COMPACTAÇÃO:					
Peso da amostra	3,585 Kg	3,995 Kg						
Volume da amostra	2.105 cm³	2.105 cm³						
Densidade aparente úmida	1,70 g/cm³	1,89 g/cm³						
DETERMINAÇÃO DO TEOR DA UMIDADE								
Capsula:	M 59	M 13						
Solo + Água + Tara (g)	49,76	55,17						
Solo + Tara (g)	46,78	48,23						
Solo (g)	24,57	21,72						
Água (g)	2,98	2,79						
Tara (g)	22,21	30,66						
w (%)	12,13	12,84						
w média (%)	12,49							
Densidade aparente seca máxima (g/cm³)								
PENETRAÇÃO (mm)	TEMPO (mm)	PENETRAÇÃO (pol)	GOLPES POR CAMADA					
			Def. do anel (mm)	Carga (Kgf)				
0,635	0,5	0,025	9	18,252				
1,270	1	0,050	24	48,672				
1,905	1,5	0,075	45	91,260				
2,540	2	0,100	81	164,268				
3,175	2,5	0,125	116	235,248				
3,810	3	0,150	159	322,452				
4,445	3,5	0,175	195	395,460				
5,080	4	0,200	237	480,636				
5,715	4,5	0,225	283	573,924				
6,350	5	0,250	316	640,848				
6,985	5,5	0,275	349	707,772				
7,620	6	0,300	380	770,640				
8,255	6,5	0,325	406	823,368				



Penetração (mm)	Pressão (Kgf)			CBR (%)	CBR (%) solo - caco cerâmico	Expansão (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão			
2,54	164,27	264,00	1.352,54	19,52	29,5	0,00
5,08	480,64	598,00	2.028,82	29,48		

Dados do ensaio CBR para o solo – caco de telha cerâmico seco (CP5).

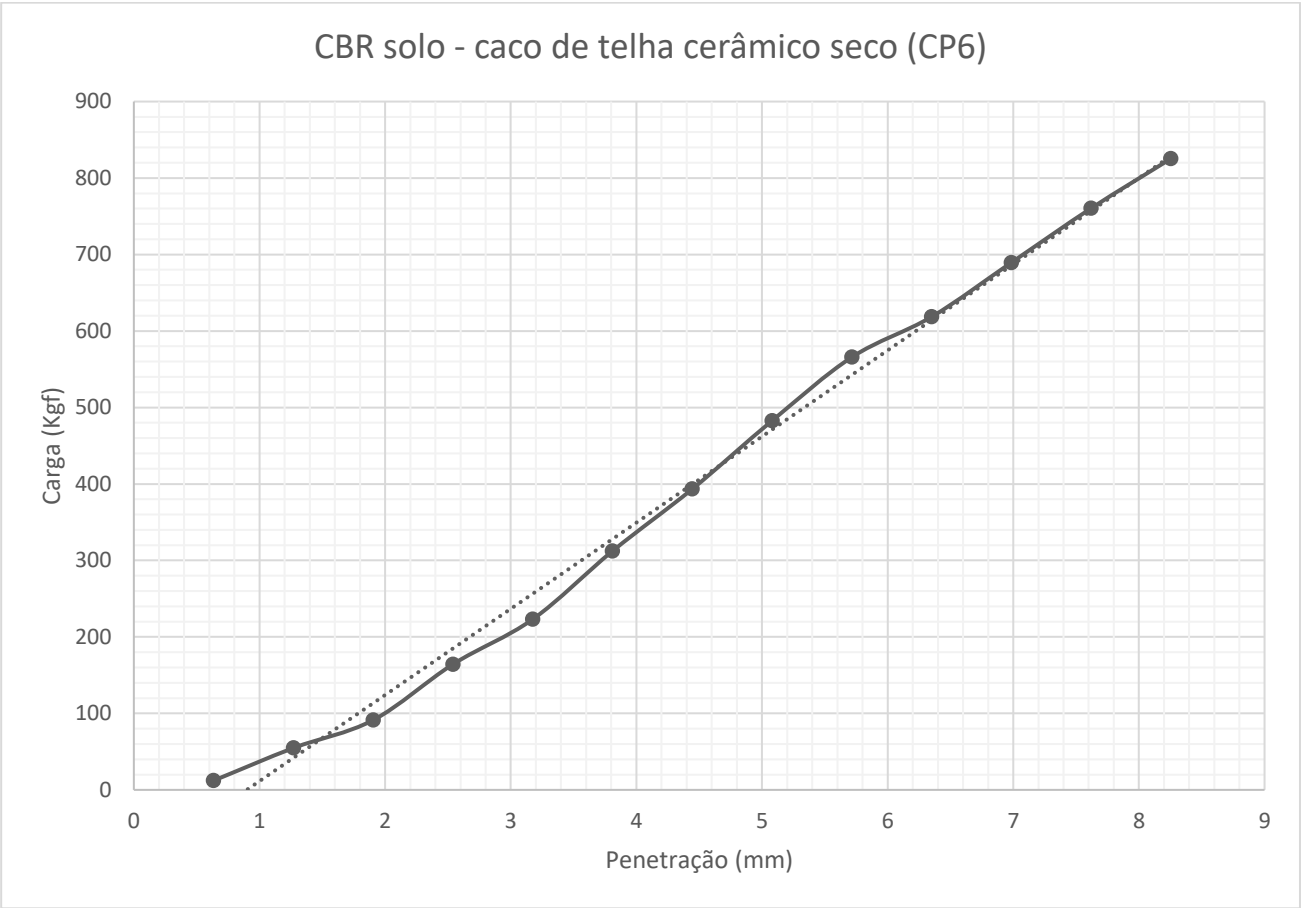
		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL		
ENSAIO DE CBR				
Operador: Eduarda Ricci		Umidade ótima (w):		
Local: Ilha Solteira		Densidade Máxima (pd máx):		
Amostra: Solo - caco de telha cerâmico seco (CP5)		Data: 26/07/2022		
PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA		SATURAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA		
Cilindro N°	9			
N° de camadas	5			
N° de golpes	26			
DADOS DE AMOSTRA		ANTES DA SATURAÇÃO	APÓS SATURAÇÃO	
Peso am. Um. + molde	9,243 Kg	9,565 Kg		
Peso do molde	5,450 Kg	5,450 Kg		
Peso da amostra	3,793 Kg	4,115 Kg		
Volume da amostra	2.105 cm³	2.093 cm³		
Densidade aparente úmida	1,80 g/cm³	1,97 g/cm³		
DETERMINAÇÃO DO TEOR DA UMIDADE				
Capsula:	M 37	M 55		
Solo + Água + Tara (g)	80,64	49,99		
Solo + Tara (g)	74,93	47,29		
Solo (g)	46,00	21,23		
Água (g)	5,71	2,71		
Tara (g)	28,93	26,06		
w (%)	12,41	12,76		
w média (%)	12,56			
Densidade aparente seca máxima (g/cm³)				
GOLPES POR CAMADA				
PENETRAÇÃO (mm)	TEMPO (mm)	PENETRAÇÃO (pol)	Def. do anel (mm)	Carga (Kgf)
0,635	0,5	0,025	3	6,084
1,270	1	0,050	24	48,672
1,905	1,5	0,075	45	91,260
2,540	2	0,100	80	162,240
3,175	2,5	0,125	100	202,800
3,810	3	0,150	150	304,200
4,445	3,5	0,175	200	405,600
5,080	4	0,200	240	486,720
5,715	4,5	0,225	275	557,700
6,350	5	0,250	294	596,232
6,985	5,5	0,275	330	669,240
7,620	6	0,300	370	750,360
8,255	6,5	0,325	400	811,200



Penetração (mm)	Pressão (Kgf)			CBR (%)	CBR (%) solo - caco cerâmico	Expansão (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão			
2,54	162,24	252,00	1.352,54	28,63	28,5	0,00
5,08	486,72	579,00	2.028,82	28,54		

Dados do ensaio CBR para o solo – caco de telha cerâmico seco (CP6).

		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL	
ENSAIO DE CBR			
Operador: Eduarda Ricci		Umidade ótima (w):	
Local: Ilha Solteira		Densidade Máxima (pd máx):	
Amostra: Solo - caco de telha cerâmico seco (CP6)		Data: 26/07/2022	
PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA		SATURAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	
Cilindro N°	5		
N° de camadas	5		
N° de golpes	26		
DADOS DE AMOSTRA		ALTURA INICIAL:	
	ANTES DA SATURAÇÃO	APÓS SATURAÇÃO	LEITURA DEFLECT.
Peso am. Um. + molde	7,999 Kg	8,176 Kg	0,000
Peso do molde	4,188 Kg	4,188 Kg	-0,001
Peso da amostra	3,811 Kg	3,988 Kg	-0,001
Volume da amostra	2.102 cm³	2.102 cm³	-0,001
Densidade aparente úmida	1,81 g/cm³	1,89 g/cm³	-0,001
DETERMINAÇÃO DO TEOR DA UMIDADE			
Capsula:	M 23	M 44	
Solo + Água + Tara (g)	77,63	65,20	
Solo + Tara (g)	72,40	60,87	
Solo (g)	42,18	34,01	
Água (g)	5,23	4,33	
Tara (g)	30,22	26,86	
w (%)	12,39	12,73	
w média (%)	12,51		
Densidade aparente seca máxima (g/cm³)			
		CBR: 28,7 % EXPANSÃO: 0,01 % GRAU DE COMPACTAÇÃO:	
PENETRAÇÃO (mm)	TEMPO (mm)	PENETRAÇÃO (pol)	GOLPES POR CAMADA
			Def. do anel (mm) Carga (Kgf)
0,635	0,5	0,025	6 12,168
1,270	1	0,050	27 54,756
1,905	1,5	0,075	45 91,260
2,540	2	0,100	81 164,268
3,175	2,5	0,125	110 223,080
3,810	3	0,150	154 312,312
4,445	3,5	0,175	194 393,432
5,080	4	0,200	238 482,664
5,715	4,5	0,225	279 565,812
6,350	5	0,250	305 618,540
6,985	5,5	0,275	340 689,520
7,620	6	0,300	374 760,500
8,255	6,5	0,325	407 825,396



Penetração (mm)	Pressão (Kgf)			CBR (%)	CBR (%) solo - caco cerâmico	Expansão (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão			
2,54	164,27	239,00	1.352,54	27,67	28,7	0,01
5,08	482,66	582,00	2.028,82	28,69		