



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

SUÉLEN DOS ANJOS FAGUNDES

**INFLUÊNCIA DO PROCEDIMENTO DE CURA NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DIAMETRAL EM MISTURAS SOLO-CIMENTO**

BARREIRAS - BA

2023

SUÉLEN DOS ANJOS FAGUNDES

**INFLUÊNCIA DO PROCEDIMENTO DE CURA NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DIAMETRAL EM MISTURAS SOLO-CIMENTO**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, Campus Reitor Edgard Santos, apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius de Oliveira Kühn
Coorientador: Prof. Me. Felipe Ferreira Sousa Junior.

BARREIRAS - BA

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

F156 Fagundes, Suélen dos Anjos.

Influência do procedimento de cura na resistência à compressão diametral em misturas solo-cimento. / Suélen dos Anjos Fagundes. – 2023.

62f.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius de Oliveira Kühn.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2023.

1. Resistência à compressão diametral. 2. Cimento Portland. 3. Cura em câmara úmida. 4. Cura submersão. 5. Cura ao ar livre. I. Kühn, Vinícius de Oliveira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 624

SUÉLEN DOS ANJOS FAGUNDES

**INFLUÊNCIA DO PROCEDIMENTO DE CURA NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DIAMETRAL EM MISTURAS SOLO-CIMENTO**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, Campus Reitor Edgard Santos, apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 04 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vinícius de Oliveira Kühn - Orientador
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Prof. Dra. Oisy Hernandez Menendez
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Prof. Dr. Kuelson Randello D. Maciel,
Universidade Federal do Oeste da Bahia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me abençoar todos os dias e me permitir concluir essa etapa tão importante em minha vida. Aos meus pais, Maria e Batista, pelo apoio, carinho, paciência e incentivo durante toda minha existência. Sem vocês eu não teria conseguido.

Ao Saulo, por todo o amor, segurança, carinho e motivação durante a realização deste trabalho. Ao meu irmão Vinicius e minha amiga Geovânia, pelos conselhos e por acreditarem em mim.

Ao meu professor orientador Vinícius, pelo suporte, disponibilidade e paciência durante o desenvolvimento desse trabalho. Agradeço também ao meu professor coorientador Felipe, pelos ensinamentos e sugestões.

Gratidão a todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desse trabalho.

“O que o olho não viu, nem o ouvido ouviu, nem jamais subiu ao coração do homem, é o que Deus preparou para aqueles que o amam” Coríntios 2:9.

RESUMO

O solo foi utilizado como material de construção desde os povos antigos, principalmente em locais que não tinha pedra e madeira disponíveis. No entanto, nem sempre se encontra um solo de qualidade, sendo então necessário realizar a sua estabilização. Um exemplo é o solo-cimento, que é composto por solo, cimento e água e pode ser empregado em várias atividades da construção civil. Com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre esta técnica, o presente trabalho tem como objetivo verificar a influência do procedimento de cura na resistência a compressão diametral e absorção de água de misturas solo-cimento. Para isso, foram utilizados o cimento Portland CP II-E-32 e solo da região de Barreiras/BA, seguindo o traço de 1:13. Foram moldados 60 corpos de prova com dimensão 0,25x5cm, sendo 30 com energia de compactação Proctor normal e 30 com a energia de compactação intermediária. Os corpos de prova foram analisados em três vias de cura: ao ar livre, submersão e câmara úmida, nas idades de 7, 14 e 28 dias. Foram realizados ensaios de ruptura por compressão diametral e absorção de água em todos os corpos de prova, onde foi testado 3 corpos de prova por idade. Os dados obtidos foram testados quanto a sua normalidade e homoscedasticidade. Para os dados paramétricos foi aplicado a ANOVA de duas vias, com post hoc de Bonferroni e os dados não paramétricos foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis. Com base nos resultados obtidos, foi determinado que o aumento da energia de compactação favorece o ganho de resistência do solo-cimento, os corpos de prova curados ao ar livre, com energia intermediária, apresentaram um ganho de resistência de 52% em relação aos de energia normal. Em relação ao tipo de cura, a cura submersa apresentou uma resistência quatro vezes maior que a cura ao ar livre aos 28 dias, enquanto que a cura em câmara úmida apresentou uma resistência três vezes maior em relação ao ar livre, dos corpos de prova moldados com energia normal.

Palavras-chave: Resistência à compressão diametral; Cimento Portland; Cura em câmara úmida; Cura submersão; Cura ao ar livre.

ABSTRACT

The soil has been used as a building material since ancient times, mainly in places where stone and wood were not available. However, quality soil is not always found, making it necessary to stabilize it. An example is soil-cement, which is composed of soil, cement, and water and can be used in various civil construction activities. With the aim of deepening knowledge about this technique, the present work aims to verify the influence of the curing procedure on the diametrical compression resistance and water absorption of soil-cement mixtures. For this, Portland cement CP II-E-32 and soil from the Barreiras/BA region were used, following the 1:13 ratio. 60 test specimens with a dimension of 0.25x5cm were molded, 30 with normal Proctor compaction energy and 30 with intermediate compaction energy. The test specimens were analyzed in three curing paths: in the open air, submersion, and humid chamber, at ages 7, 14, and 28 days. Diametrical compression rupture tests and water absorption tests were carried out on all specimens, where 3 specimens per age were tested. The data obtained were tested for their normality and homoscedasticity. For parametric data, two-way ANOVA was applied, with Bonferroni post hoc, and for non-parametric data, the Kruskal-Wallis test was used. Based on the results obtained, it was determined that the increase in compaction energy favors the strength gain of soil-cement, the specimens cured outdoors, with intermediate energy, showed a strength gain of 52% compared to those of normal energy. Regarding the type of cure, the submerged cure showed a resistance four times greater than the outdoor cure at 28 days, while the cure in a humid chamber showed a resistance three times greater compared to the outdoors, of the specimens molded with normal energy.

Keywords: Diametral compression resistance; Portland Cement; Humid chamber cure; Submersion cure; Outdoor cure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo tradicional de construção de uma parede de taipa.....	13
Figura 2. Componentes da mistura solo-cimento.....	14
Figura 3. Solo-cimento aplicado na pavimentação.....	16
Figura 4. Pavimento flexível.....	17
Figura 5. Casa de tijolo de solo-cimento.....	17
Figura 6. Solo-cimento como base de fundação.....	18
Figura 7. Levantamento de alvenaria de tijolo ecológico.....	18
Figura 8. Curva de RCS x percentual em peso de cimento para 7 dias de cura.....	21
Figura 9. Resultados médios de resistência à compressão para 6 traços e requisitos de normas diversas.....	21
Figura 10. Ensaio do método de dosagem físico-químico.....	22
Figura 11. Resultado de dosagem físico-químico.....	24
Figura 12. Método de dosagem físico-químico.....	24
Figura 13. Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento Portland.....	26
Figura 14. Curvas de compactação normal e intermediária.....	28
Figura 15. Absorção de água média após imersão por 4 horas versus resistência à compressão simples média - Teor de cimento de 6%.....	29
Figura 16. Esquema do ensaio de compressão diametral desenvolvido por Fernando Lobo para a medida da tração indireta.....	33
Figura 17. RTCD para misturas solo-cimento com adição de cimento CP II em função do teor, dimensão e tempo de cura.....	34
Figura 18. Imagem via satélite do local da coleta do solo.....	35
Figura 19. Curvas de compactação do solo natural e solo-cimento com energia de compactação normal e intermediária.....	37
Figura 20. Preparação da mistura solo-cimento: a) Solo natural; b) Solo natural + cimento; c) Mistura dos secos; d) Adição de água; e) Mistura pronta para fabricação do corpo de prova.....	39
Figura 21. Extração do corpo de prova.....	40
Figura 22. Corpo de prova de solo-cimento.....	40
Figura 23. Cura dos corpos de prova por submersão em água.....	41
Figura 24. Cura dos corpos de prova em câmara úmida.....	41

Figura 25. Cura dos corpos de prova ao ar livre.	42
Figura 26. Pórtico de Lottman.	42
Figura 27. Prensa CBR/Marshall Automática.	43
Figura 28. Curvas carga x deslocamento dos corpos de prova moldados com energia de compactação normal que foram curados por submersão, ar livre e câmara úmida na idade de 28 dias.	45
Figura 29. Curvas carga x deslocamento dos corpos de prova moldados com energia de compactação intermediária que foram curados por submersão, ar livre e câmara úmida na idade de 28 dias.	45
Figura 30. Modo de ruptura dos corpos de prova.....	46
Figura 31. Resistência à compressão diametral dos tipos de cura no tempo da energia normal.	47
Figura 32. Resistência à compressão diametral dos tipos de cura no tempo da energia intermediária.....	47
Figura 33. Média da absorção de água por idade nos tipos de cura moldados com energia normal.	51
Figura 34. Média da absorção de água por idade nos tipos de cura moldados com energia intermediária.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação do solo-cimento.	20
Tabela 2. Caracterização do solo.....	36
Tabela 3. Ensaio de compactação do solo e solo-cimento.	38
Tabela 4. Resistência a compressão diametral dos tipos de cura moldados com energia normal.	49
Tabela 5. Resistência a compressão diametral dos tipos de cura moldados com energia intermediária.....	49
Tabela 6. Absorção de água no tempo - Energia normal.	52
Tabela 7. Absorção de água no tempo - Energia intermediária.	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Histórico básico das construções com solos	12
2.2 Solo-cimento.....	14
2.2.1 Aplicações do solo-cimento na engenharia	15
2.3 Estudo de dosagem	19
2.3.1 O solo	25
2.3.2 Cimento Portland.....	29
2.3.3 A água.....	31
2.4 Estudo da cura	31
2.5 Comportamento mecânico do solo-cimento.....	33
2.5.1 Resistência a compressão diametral.....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Materiais.....	35
3.2 Métodos.....	36
3.2.1 Ensaio de compactação	36
3.2.2 Tratamento dos corpos de prova.....	38
3.2.3 Resistência à tração por compressão diametral e absorção de água	42
3.2.4 Análise estatística	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Compressão diametral.....	45
4.2 Absorção de água	50
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos métodos de construção e a utilização de materiais com baixo impacto ambiental são temas importantes para a evolução da construção civil e da sociedade, principalmente em relação ao desenvolvimento sustentável (NASCIMENTO *et al*, 2018).

Nesse sentido, o solo se destaca por ser um material abundante, de baixo custo e de fácil aplicação. Porém, nem todas as regiões se encontra um solo de qualidade, sendo então necessário utilizar técnicas de estabilização e solidificação, como o solo-cimento. Essa técnica foi empregada pela primeira vez em 1915, na pavimentação de estradas nos Estados Unidos e depois passou a ser utilizada em revestimentos de canais, aeroportos, diques, fundações, reservatórios, barragens de terra e estabilização de taludes (ABIKO, 1980).

Além disso, também é possível utilizar essa mistura no estado plástico, com consistência semelhante a de uma argamassa. O solo-cimento plástico (SCP) pode ser empregado em fundações e revestimento de edificações. Uma vantagem dessa técnica é a rapidez da produção e aplicação do material, uma vez que o processo de preparação da mistura em betoneira proporciona maior agilidade e qualidade final, possibilitando a boa homogeneização dos elementos (SEGANTINI, 2000).

Outra aplicação dessa mistura é o tijolo de solo-cimento, ou tijolo ecológico, que consiste na mistura do solo, cimento e água, que é compactado e curado a sombra. Uma das vantagens desse método é a economia no custo da obra e a diminuição da poluição, já que não há a necessidade de serem queimados (MOTTA *et al*, 2014).

No caso do concreto, a cura tem o objetivo de evitar a evaporação da água utilizada na mistura, para garantir a completa hidratação das fases do cimento (PINHEIRO; CRIVELARO, 2020). Da mesma forma, espera-se que a cura influencie na resistência da mistura de solo-cimento, visto que, há recomendações de cura das empresas que fabricam as prensas de tijolos.

Assim sendo, o intuito desse trabalho é ampliar os conhecimentos neste tema investigando se o tipo e o tempo de cura influenciam na resistência das misturas de solo-cimento. Os dados obtidos foram avaliados quanto a sua normalidade e

homoscedasticidade e foi aplicado os testes de ANOVA e Kruskal-Wallis para os dados paramétricos e não paramétricos, respectivamente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar a influência da cura na resistência a compressão diametral e absorção de água de misturas solo-cimento.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar se a adição de cimento e a variação da energia de compactação faz alguma modificação nas curvas de compactação;
- Avaliar as modificações nos resultados dos ensaios de compressão diametral em corpos de prova submetidos a cura submersa em água, em câmara úmida e ao ar livre;
- Avaliar a absorção de água dos corpos de prova submetidos a cada tipo de cura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico básico das construções com solos

O uso do solo como material de construção tornou-se um recurso amplamente utilizado e valorizado ao longo da história, devido principalmente a sua abundância e facilidade de aceso e de execução. Uma vez que, materiais como pedra e madeira não estavam sempre disponíveis no território (BOTINAS, 2017).

Ao longo de vários milênios, diversos povos utilizaram a terra como material de construção. Por exemplo, os povos da antiga Mesopotâmia, do antigo Egito (junto ao rio Nilo), os Fenícios (na costa Ocidental do Mar Mediterrâneo), as civilizações grega e romana, os povos da América Andina e da América Central e Latina (MOREIRA, 2008).

Ainda segundo Moreira (2008), esse recurso não foi utilizado apenas para construir pequenas construções. Grandes monumentos importantes também usufruíram dessa técnica. Alguns exemplos são a Muralha da China, o Palácio do Dalai Lama, no Tibete ou as Pirâmides de Saqqarah, no Egito.

De acordo com Ferreira (2012), os registros mais antigos de construções com solo são referentes a região da Mesopotâmia e do Egito antigo. E isso se deve ao fato da presença abundante de água nessa região, que favorece o processo geológico de sedimentação e formação de argila. Outro fator presente nessa região é o clima seco, sendo assim necessário residências que proporcione o conforto térmico.

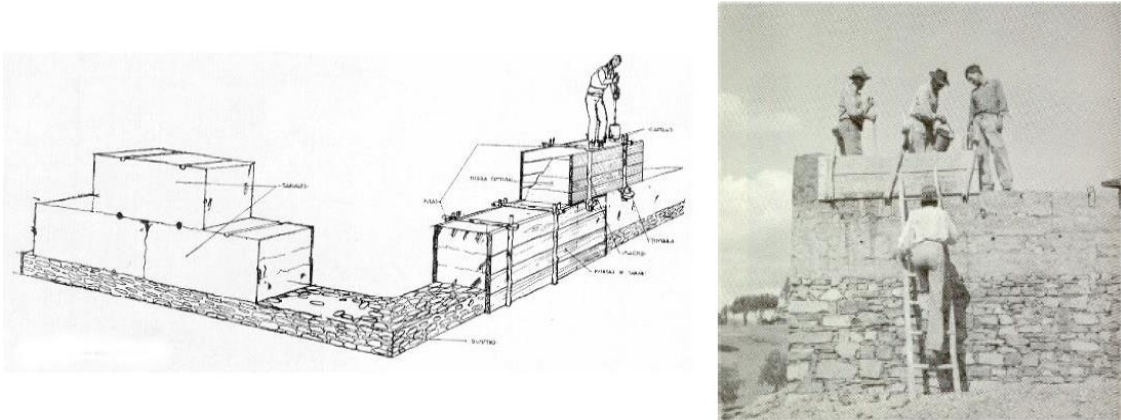
Já no Brasil, até o século XVIII, a terra teve seu emprego generalizado principalmente nas regiões que não tinha muitas pedras. Em Salvador podemos citar a Catedral Basílica da Sé de palha e as muralhas feitas de taipa. A casa bandeirista também foi construída por essa técnica e pode ser vista ainda hoje em São Paulo (SANTIAGO, 2001).

De modo geral, existem muitas técnicas de construção com terra, que são utilizadas por todo o mundo. Sendo que as mais utilizadas e conhecidas são os blocos de adobe, taipa e os blocos de terra compactada (BTC) (MARTINS, 2011).

O sistema construtivo monolítico consiste na extração e transformação do solo no próprio local da obra, logo, dispensa o custo com o transporte. Um exemplo dessa técnica construtiva é a taipa, que o método tradicional (Figura 1), consiste na construção de paredes monolíticas em terra umedecida, que são colocadas em

moldes, em camadas de até 60 cm. São utilizadas taipas de madeira, que comprimem o solo para eliminar os vazios. Atualmente são utilizados moldes de diferentes materiais como, contraplacado, alumínio, aço e fibra de vidro (FERREIRA, 2012; MOREIRA, 2008).

Figura 1. Processo tradicional de construção de uma parede de taipa.



Fonte: Moreira (2008).

Além disso, a taipa requer um baixo consumo de água, além de possuir um bom desempenho em climas úmidos e devido a sua natureza porosa, possui uma boa resistência em períodos de chuva (LOURENÇO, 2002 *apud* BOTINAS, 2017).

Uma outra técnica de construção com solo utilizada é o adobe. Eles são tijolos de terra crua que são secos ao sol ou à sombra, sem a necessidade da queima. Sua utilização é constatada desde o ano de 5.000 a.C nas primeiras mastabas. Podem ser executados de forma manual ou mecânica, utilizando moldes de madeira, plástico ou metal e desmoldantes (SANTIAGO, 2001).

Os blocos prensados, também conhecidos como BTC (Blocos de Terra Compactada), consiste em comprimir a terra seca em moldes com o auxílio de um pilão, ou com o uso de máquinas (FERREIRA, 2012).

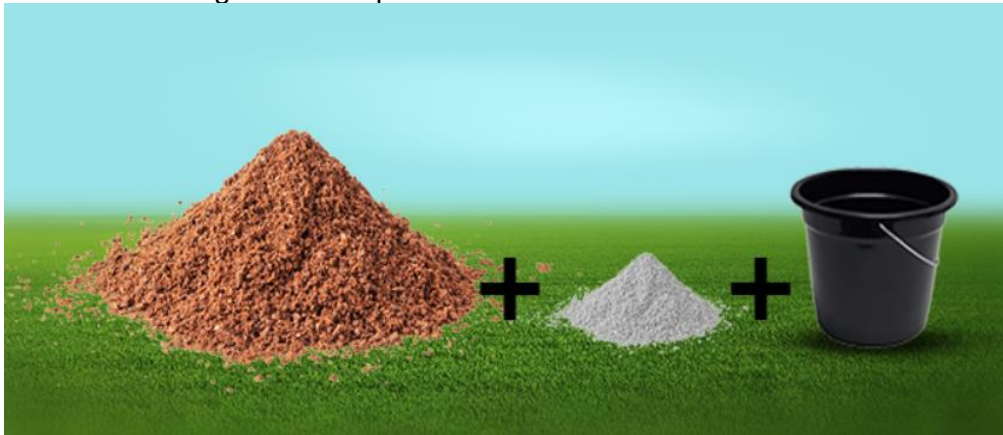
A diferença entre as técnicas de adobe e BTC consiste na resistência, uma vez que o adobe adquire sua resistência máxima após o período de cura, enquanto o BTC atinge sua resistência máxima com a compactação. O autor ainda afirma que, a compactação da terra com a prensa melhora a qualidade do material pois a maior densidade aumenta a resistência à compressão e erosão (MATEUS, 2004 *apud* DOMINGUES, 2015).

Em resumo, a terra crua foi utilizada pelo homem para a construção há bastante tempo. Atualmente, essa técnica construtiva ganhou destaque como uma alternativa devido a sustentabilidade, seja econômica ou ambiental (FERREIRA, 2012).

2.2 Solo-cimento

O solo-cimento é composto pela mistura de solo, aglomerante hidráulico artificial (Cimento Portland) e água (Figura 2). O resultado dessa mistura deve apresentar uma homogeneidade adequada seguindo as exigências definidas pela norma regulamentadora (NASCIMENTO *et al*, 2018).

Figura 2. Componentes da mistura solo-cimento.



Fonte: Verde equipamentos (2020).

Conforme a norma DNIT 143: Pavimentação - Base de solo-cimento - Especificação de serviço (ABNT, 2010), o solo-cimento é um material proveniente da mistura de solo, cimento e água, que devem ter suas proporções previamente definidas por meio da dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade.

De acordo com a NBR 12023: Solo-cimento - Ensaio de compactação (ABNT, 2012), o solo-cimento consiste em um produto endurecido, proveniente da compactação e cura da mistura de solo, cimento e água, seguindo as proporções estabelecidas através de dosagem, conforme especificado na NBR 12253: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento (ABNT, 1992).

Vale ressaltar que, as propriedades mecânicas dessa mistura irão variar conforme as características originais do solo e cimento utilizados. As características

também serão influenciadas pelas condições de cura e da dosagem (CONSOLI *et al*, 2012 *apud* LLAJARUNA, 2017).

Uma das vantagens da utilização dessa mistura como material de construção está relacionado com a sustentabilidade. Os tijolos de solo-cimento por exemplo, são moldados por prensagem, sem a necessidade da queima, o que resulta na redução da emissão de gases nocivos, quando comparado com os sistemas construtivos tradicionais (NASCIMENTO *et al*, 2018).

Além de ser sustentável, os tijolos de solo-cimento são mais econômicos quando comparado aos tijolos convencionais. Um trabalho realizado por Motta *et al* (2014), constatou uma economia de quase 21%, onde o tijolo de solo-cimento tem o custo de 21,047/m² contra 26,59/m².

De acordo com Euphrosino *et al* (2022), uma outra vantagem dessa técnica construtiva está relacionada com a facilidade da obtenção dos materiais. Uma vez que o solo utilizado poderá ser retirado do próprio local da construção, contribuindo assim com o desenvolvimento sustentável.

Uma desvantagem da utilização dos tijolos ecológicos, como também são conhecidos, está relacionado com alguns cuidados necessários, no sentido de evitar patologias comuns, como fissuras por efeito de retração, desgaste superficial e percolação de umidade através de paredes (FIAIS E SOUZA, 2017).

De acordo com Motta (2014), uma desvantagem dessa técnica está relacionada ao uso indiscriminado do solo, que pode favorecer processos erosivos ao meio ambiente. Além disso, o autor cita o erro de dosagem que pode ocasionar o surgimento de patologias na construção.

Outra desvantagem é a falta de conhecimento técnico por parte dos consumidores e de alguns profissionais da construção, que se apegam aos métodos tradicionais. Muitos profissionais acreditam que os tijolos de solo-cimento não são resistentes quanto os tijolos cerâmicos tradicionais (FRAGA *et al*, 2016).

2.2.1 Aplicações do solo-cimento na engenharia

No Brasil, essa técnica foi utilizada inicialmente em 1939, na aplicação em pavimentos de estradas (TREVISAN, 2017). Posteriormente, ele começou a ser empregado em outros setores, como na proteção superficial de taludes de barragens

de terra. Outra aplicação é na contenção de contaminantes e na construção de camadas de suporte para fundações superficiais (ALENCAR, 2017).

De acordo com Macedo (2004), o primeiro trecho de solo-cimento executado no Brasil ocorreu em 1940, no Aeroporto Santos Dumond. O trecho se tratava de uma pequena pista de circulação de aproximadamente 1.600 m², que foi realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e autorizado pela Diretoria da Aeronáutica Civil.

Na pavimentação, o solo-cimento pode ser utilizado nas camadas de leito do pavimento como também em camadas de base e sub-base (Figura 3). Os pavimentos flexíveis são constituídos por misturas betuminosas nas camadas superiores e material granular em uma ou duas camadas, onde esses podem ser tratados com ligantes hidráulicos (cimento) (MONTE, 2012).

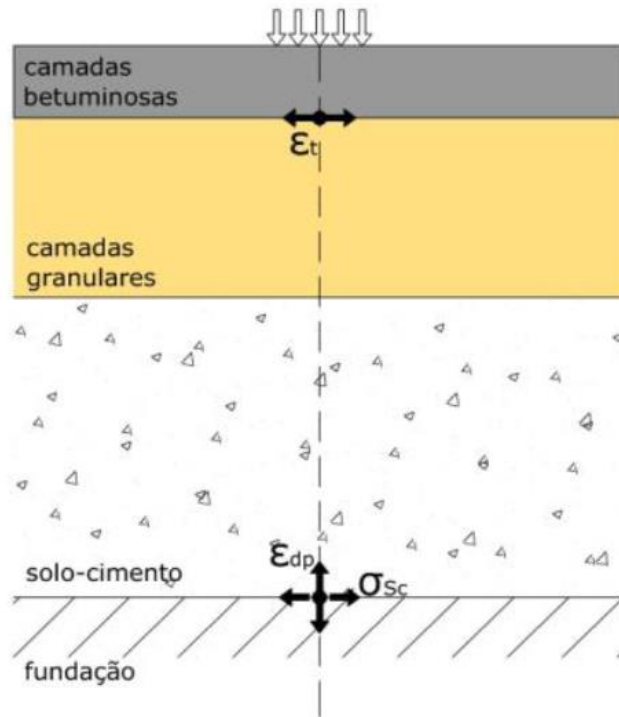
Figura 3. Solo-cimento aplicado na pavimentação.



Fonte: Monte (2012).

Conforme a Figura 4, a camada de solo-cimento atua como degradação das tensões, onde é calculado a tensão na base da camada (σ_{sc}). Na Figura 4 também está representada o (ε_t), que é a extensão de tração na base da camada betuminosa, e o (ε_{dp}) é a extensão vertical no topo do solo de fundação.

Figura 4. Pavimento flexível.



Fonte: Monte (2012).

Segundo Llajaruna (2017), esse produto pode ser aplicado em diversas atividades na construção civil. Além da pavimentação, ele também pode ser empregado em vedações de edificações, seja através de estruturas monolíticas ou na utilização de tijolos pré-moldados (Figura 5) e em fundações de edificações no seu estado plástico (Figura 6).

Figura 5. Casa de tijolo de solo-cimento.



Fonte: O tijolo (2020).

Figura 6. Solo-cimento como base de fundação.



Fonte: Mr Marcarf (2021).

O sistema de alvenaria de blocos de solo-cimento pode ser considerado uma evolução do sistema de adobe, pois além de serem blocos mais leves, eles possibilitam a passagem de tubulações no interior dos blocos, conforme a Figura 7 (CALDAS; TOLEDO FILHO, 2019).

Figura 7. Levantamento de alvenaria de tijolo ecológico.



Fonte: MF rural (2012).

2.3 Estudo de dosagem

As quantidades ideais de cada componente do solo-cimento são definidas em ensaios de laboratório, conforme os tipos de solo e cimento a serem usados (BAUER, 2019). Essa dosagem depende da aplicação que é esperada para aquela mistura.

Tendo em vista a aplicação em alvenaria de vedação, a empresa Jarfel Sahara, fabricante de prensa de tijolos ecológicos, recomenda o traço de 1:7. Além disso, a empresa sugere que o solo utilizado deve ser arenoso, com 70% de areia e 30% de argila (LEONARDO, 2018).

Já a empresa Verde equipamentos, recomenda os traços 7:1, 10:1 e 14:1, mas informa que para saber o traço ideal é necessário realizar os ensaios de laboratório seguindo as normas técnicas (VERDEEQUIPAMENTOS, 2020).

Do mesmo modo, a empresa Vimaq prensas, relata que a dosagem pode variar de acordo com a composição do solo, mas recomenda o traço de 8 a 10 partes de solo para 1 parte de cimento (VIMAQPRESAS, 2020).

Além da quantidade de cimento, o teor de umidade também interfere na qualidade da mistura, uma vez que influencia na trabalhabilidade, cura do cimento, e formação de poros (GOMES, 2022).

Na dosagem é utilizado o ensaio de compactação, que irá determinar a umidade ótima e a máxima densidade da mistura solo-cimento. Outro ensaio utilizado é o de durabilidade, que determina a dosagem ótima correspondente à porcentagem mínima de cimento necessário para assegurar a estabilidade da mistura (CAPUTO; ALBUQUERQUE; GARCIA, 2022).

De acordo com Santiago (2001), a dosagem irá depender do tipo de solo e da forma de preparo do material. Ele afirma que 3% de cimento é suficiente para apresentar resultados satisfatórios, no entanto os critérios de resistência exigem teores mais altos (6 a 12%).

No caso da aplicação do solo-cimento em camadas de pavimento, a NBR 12253 (ABNT, 2012) apresenta um método de dosagem que se aplica apenas nos solos que se enquadrem nas classificações A1, A2, A3 e A4, segundo a ASTM D 3282:2015 - Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. Além disso, é necessário que 100% do material passe na peneira de 76 mm de abertura, e que no máximo 45% do material fique retido na peneira de 4,8 mm de abertura.

O método consiste em fazer a curva de compactação, conforme a NBR 12023 (ABNT, 2012), utilizando o tipo de solo para determinar o teor de cimento, de acordo com a Tabela 1. A partir da curva de compactação, anota-se os valores de umidade ótima (h_0) e massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{m\acute{a}x}$). Em seguida é realizado a moldagem e cura de três corpos de prova, para cada teor de cimento, é recomendado que seja mais de um. Posteriormente, realiza-se o ensaio de compressão simples, conforme a NBR 12024: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimentos (ABNT, 2012), e por fim, deve-se adotar o teor de cimento que atinja a resistência média à compressão de 2,1 MPa aos 7 dias de idade. Além disso, a norma recomenda que o teor mínimo de cimento em massa é de 5 %.

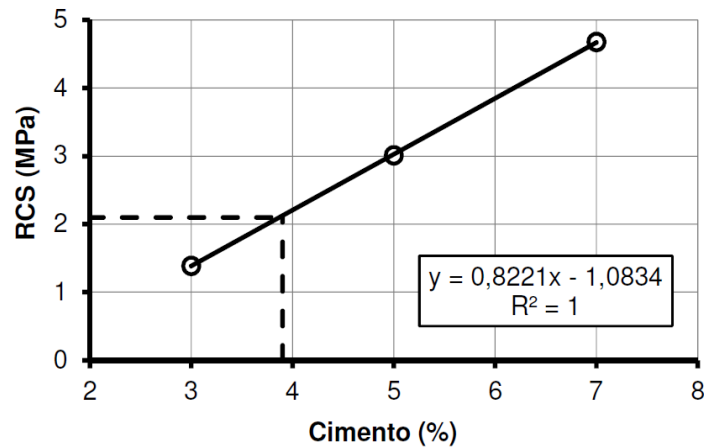
Tabela 1. Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação do solo-cimento.

Classificação do solo, segundo a ASTM D 3282	Teor de cimento sugerido, em massa (%)
A 1-a	5
A 1-b	6
A 2	7
A 3	9
A 4	10

Fonte: NBR 12253 (ABNT, 2012).

Sanbonsuge (2017), realizou a dosagem do solo coletado na estrada entre os municípios de Patrocínio Paulista a Batatais, no interior do Estado de São Paulo, segundo a NBR 12023 (ABNT, 2012). Foi adotado os teores de cimento de 2, 5 e 7% em relação a massa seca do solo. Na Figura 8 mostra que 4% seria o suficiente para atingir a resistência mínima exigida pela norma. No entanto, o autor adotou o teor de 5% para que houvesse uma margem de segurança.

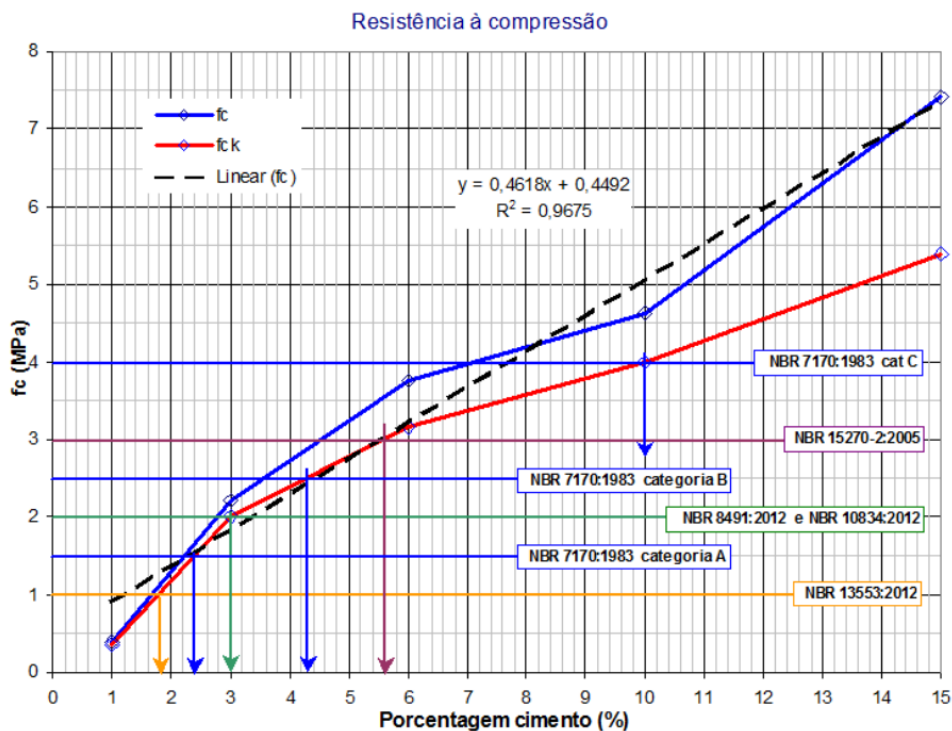
Figura 8. Curva de RCS x percentual em peso de cimento para 7 dias de cura.



Fonte: Sanbonsuge (2017).

A Figura 9 apresenta um estudo de dosagem feito por Pinto (2016), com os teores de cimento de 1, 3, 6, 10 e 15%. É possível observar que com o aumento do teor de cimento, ouve o ganho de resistência, como já era esperado. No entanto, diferente de Sanbonsuge (2017), a relação não se ajusta a uma reta, já que o $R^2=0,9675$.

Figura 9. Resultados médios de resistência à compressão para 6 traços e requisitos de normas diversas.



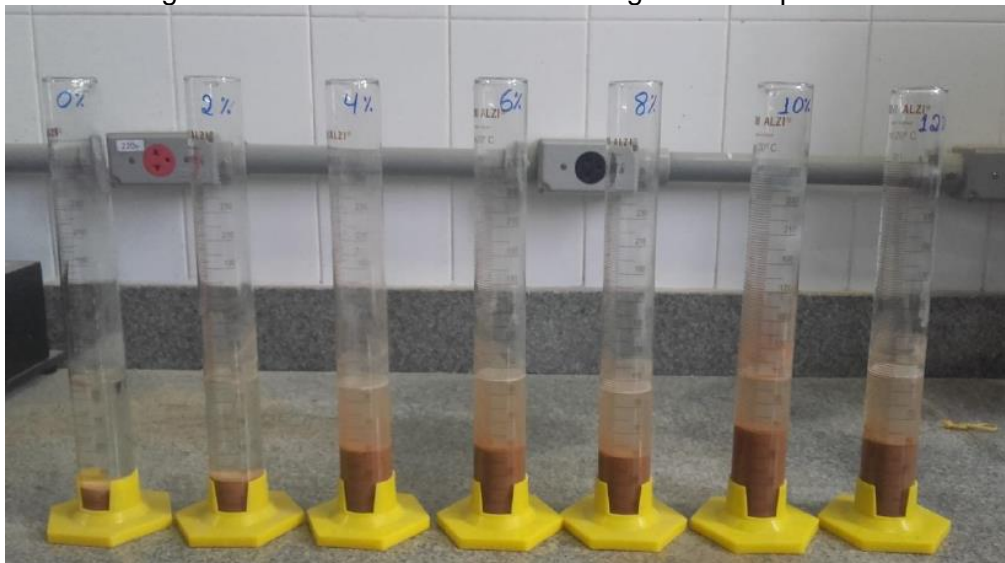
Fonte: Pinto (2016).

Também é possível observar na Figura 9, a relação de critérios de resistência determinado por diversas normas para fins de comparação. A NBR 7170: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria (ABNT, 1983), estabelece três categorias A, B e C, com resistência mínima a compressão de 1,5; 2,5 e 4,0 MPa, respectivamente. Já a NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural (ABNT, 2005), estabelece a resistência mínima de 5,6 MPa. A NBR 8491- Tijolo de solo-cimento – Requisitos (ABNT, 2012) e a NBR 10834: Bloco de solo-cimento sem função estrutural (ABNT, 2012), estabelecem a resistência mínima de 3,0 MPa. Por fim, a NBR 13553: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural (ABNT, 2012), determina a resistência mínima de 1,8 MPa.

A norma do DNIT 414: Pavimentação - Solo-Cimento - Dosagem físico-química de solo-cimento (ABNT, 2019), estabelece um método de dosagem físico-químico de solo-cimento destinado a pavimentação, que é baseado na interação elétrica do cimento com as partículas argilosas do solo, que contribuem para mudanças físico-químicas complexas na mistura solo-cimento.

De acordo com Rodrigues (1992), a presença das partículas do cimento carregadas eletricamente, aumenta a condutividade elétrica da massa solo-cimento. Essa interação produz mudanças físico-químicas rápidas e, conseqüentemente, variações volumétricas quando a mistura é suspensa em água, como mostra a Figura 10.

Figura 10. Ensaio do método de dosagem físico-químico.



Fonte: DNIT (2019).

Ainda segundo o DNIT 414 (2019), o teor de cimento que provoca a maior variação volumétrica indica que a estabilização do solo está completa e que a mistura está estável. A metodologia consiste em utilizar no mínimo 7 provetas de 250 ml, variando o teor de cimento, sendo a primeira com 0% de cimento. Em cada uma delas coloca-se 20 g de solo e o cimento correspondente a cada teor, mistura-se os secos e depois é adicionado 50 ml de água. A mistura deve ser homogeneizada utilizando o bastão de baquelite e depois adiciona-se água destilada até atingir a marca de 100 ml.

Após 24 horas deve-se agitar a mistura novamente e depois de 2 horas fazer a leitura do volume ocupado pelo sedimento em cada proveta. No terceiro dia deve-se agitar a mistura novamente e realizar a leitura. A operação se repete por vários dias até se obter leituras constantes por dois dias seguidos. Posteriormente, calcula-se a variação volumétrica percentual para cada cimento, utilizando a Equação 1, e é elaborado o gráfico de variação volumétrica x teor de cimento.

$$\Delta V(\%)_{teor} = \frac{V_{m\acute{a}x(teor)} - V_{m\acute{a}x(0\%)}}{V_{m\acute{a}x(0\%)}} \quad (1)$$

Onde,

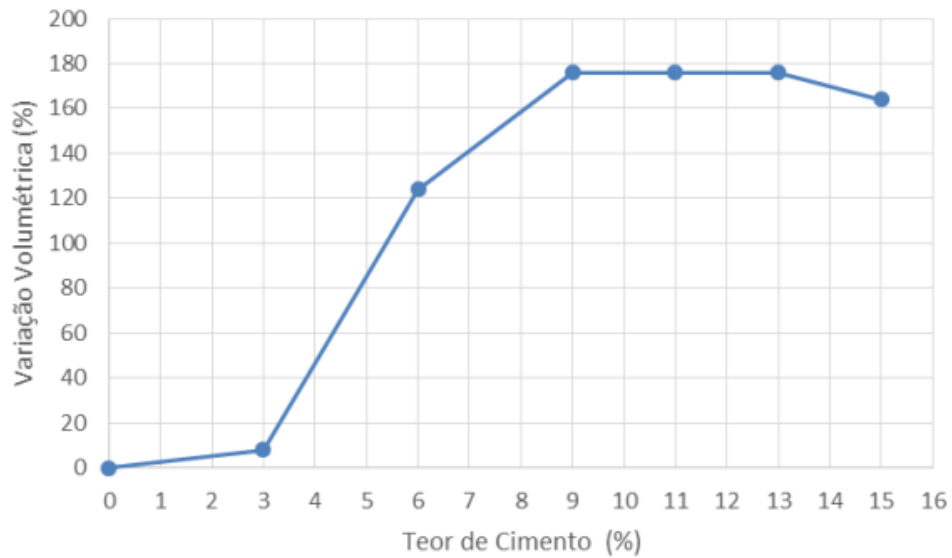
$\Delta V(\%)_{teor}$ é a variação volumétrica percentual para cada teor de cimento;

$V_{m\acute{a}x(teor)}$ é o volume máximo lido na proveta para cada teor de cimento;

$V_{m\acute{a}x(0\%)}$ é o volume máximo lido na proveta para o solo puro (teor de cimento de 0%).

Com isso, o ponto máximo da variação volumétrica corresponde ao teor mínimo de cimento necessário para a estabilização completa do solo, conforme a Figura 11 (DNIT, 2019).

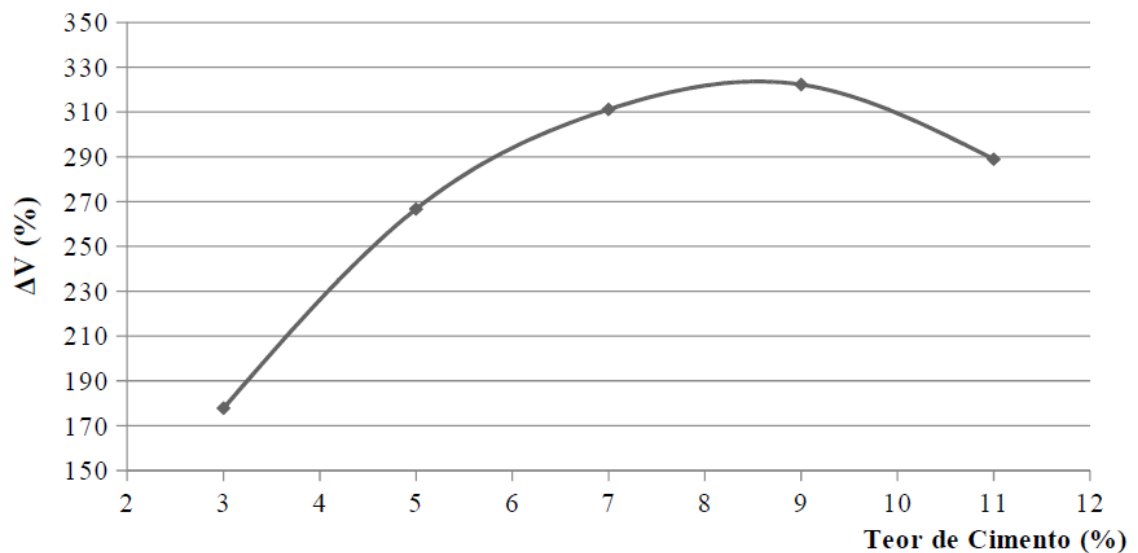
Figura 11. Resultado de dosagem físico-químico.



Fonte: DNIT (2019).

Aragão *et al* (2022), realizou a dosagem com o método físico-químico em um latossolo amarelo, retirado no município de Cruz das Almas – Bahia. Na Figura 12 é possível observar o crescimento da variação volumétrica até 9% de teor de cimento. Logo, essa é a porcentagem de cimento que promove a melhor interação físico-químico entre o solo e o cimento.

Figura 12. Método de dosagem físico-químico.



Fonte: Aragão *et al* (2022).

2.3.1 O solo

O termo solo estabilizado é utilizado na engenharia rodoviária para misturas de solo e aditivo, que promovem ganhos significativos de resistência e durabilidade em relação ao solo natural, para a aplicação em bases de pavimentos flexíveis. Já o termo melhorado, é utilizado para misturas de solo e aditivo que não promovem um ganho de resistência significativo, porém altera as propriedades de plasticidade, expansão e contração, em relação ao solo natural (NÚNEZ, 1991 *apud* SERVI, 2022).

A estabilização do solo pela adição de cimento Portland se aplica a maioria dos solos de maneira eficiente e econômica (CAPUTO; ALBUQUERQUE; GARCIA, 2022).

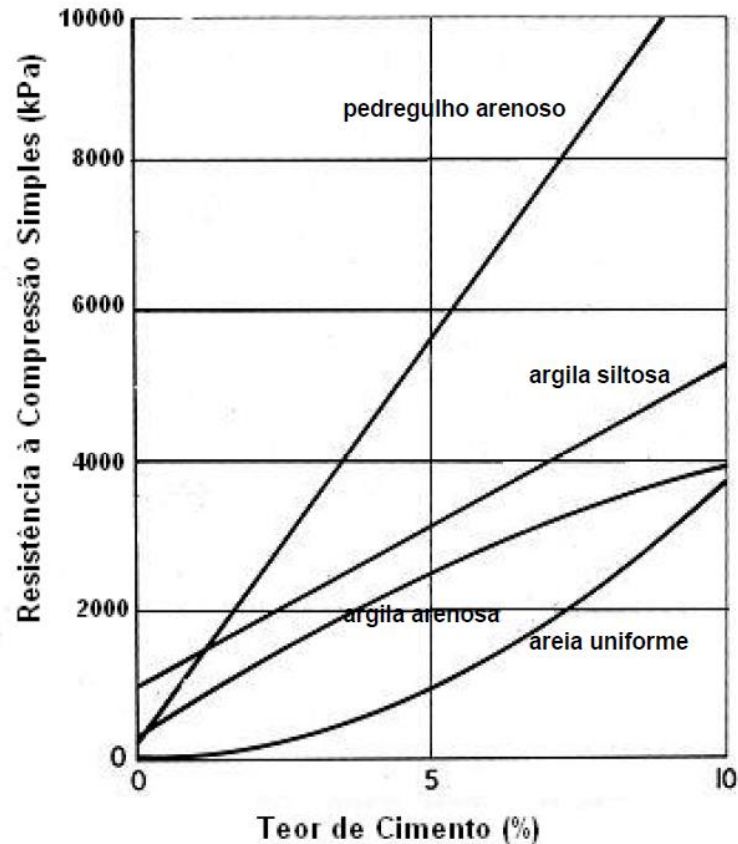
Segundo Bauer (2019), os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento. Porém, a argila é uma parcela importante nessa mistura, a fim de proporcionar coesão quando for umedecida e compactada, permitindo assim a retirada imediata da fôrma após a moldagem.

Da mesma forma, Vitali (2008) afirma que é interessante que o solo possua uma fração mínima de finos para que proporcione uma maior estabilidade estrutural, facilitar a compactação e evitar altas porcentagem de cimento.

Conforme Santiago (2001), em relação a resistência mecânica, os solos arenosos e os que possuem pedregulhos são os que apresentam os melhores resultados com a estabilização com cimento, embora quase todos os tipos de solos se prestarem a este tipo de estabilização.

De acordo com Foppa (2005), no geral, a resistência à compressão simples apresenta um crescimento linear com o aumento do teor de cimento, no entanto, cada tipo de solo apresenta uma taxa de crescimento distinta, como mostra a Figura 13.

Figura 13. Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento Portland.



Fonte: Foppa (2005).

A ABCP (2000) ressalta que os solos que contenham matéria orgânica em sua composição devem ser evitados, uma vez que podem alterar a hidratação do cimento e a estabilização do solo.

Segundo Moreira (2008), a estabilização do solo tem o objetivo de aumentar a resistência mecânica, a coesão e a resistência à erosão. Além disso, reduzir a porosidade e variações de volume.

Ainda segundo o autor, existem três métodos de estabilização, que é a mecânica, física e química. A estabilização mecânica ocorre por meio da compactação e adição de fibras, e são alterados a resistência mecânica, a porosidade, permeabilidade e compressibilidade. A estabilização física ocorre a partir da mistura controlada de partículas de diferente composição e granulometria. Já a estabilização química ocorre por meio da alteração das características da terra através de produtos químicos e suas reações.

Segundo Murrieta (2018), a compactação dos solos pode ser definida como o melhoramento artificial de suas propriedades por meios mecânicos que provocam a

redução do volume e, conseqüentemente, a redução do índice de vazios via compressão ou expulsão dos gases. A compactação dos solos é interessante pois aumenta a estabilização da resistência, diminui a deformabilidade e reduz a permeabilidade.

De acordo com Knappett e Craig (2018), a compactação do solo é o processo de aumentar a massa específica (densidade), que adensa as partículas com uma redução do volume de ar. Por exemplo, nos aterros e barragens, o solo solto é colocado em camadas de 75 a 450 mm de espessura, que são compactadas por meio de rolos compressores, vibradores ou soquetes. Quanto maior o grau de compactação, maior a resistência ao cisalhamento e menor a compressibilidade do solo.

Aplicar mais energia ao solo reduz o teor de vazios de ar e aumenta a densidade seca, logo, uma maior energia de compactação pode ser eficiente principalmente para solos secos com relação ao valor ideal. No entanto, se o solo estiver úmido e acima do teor de umidade ótima, a aplicação de mais energia é inútil, pois é possível remover o ar rapidamente (BARNES, 2016).

Ainda segundo o autor, aplicar muita energia em um solo muito úmido pode ser prejudicial, uma vez que não é possível expelir mais ar e é provável que haja acúmulo de poro-pressões altas, e isso pode provocar a instabilidade do talude durante a construção e recalques por adensamento, conforme ocorra a dissipação após a construção.

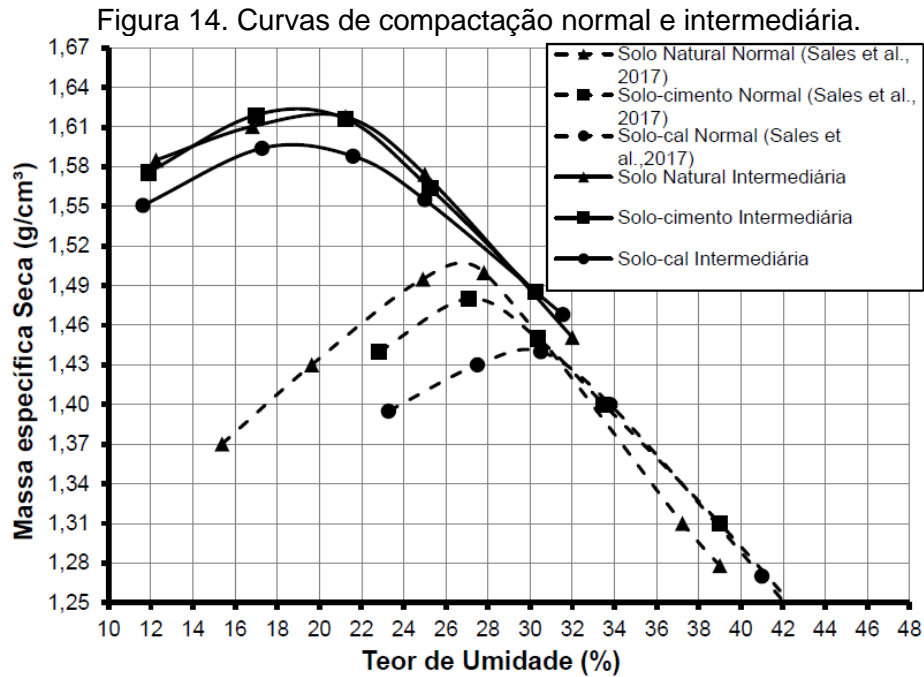
Segundo Murrieta (2018), a energia de compactação ideal irá depender do tipo de equipamento disponível e da importância da camada compactada, bem como fatores econômicos.

Ainda segundo o autor, geralmente em subleitos e aterros rodoviários emprega-se a energia Proctor Normal, já em sub-bases rodoviárias emprega-se a energia do ensaio Proctor Intermediário. Enquanto que em bases pode-se empregar a energia do Proctor Intermediário ou Modificado.

A adição de cimento ao solo apresenta pouca influência nos valores de umidade ótima e densidade máxima (VITALI, 2008 *apud* CAVARSAN, 2018).

A Figura 14 apresenta a comparação entre as curvas de compactação do solo, solo-cimento e solo-cal, e os efeitos causados pela variação de energia de aplicação. Observa-se que em todas as misturas houve o aumento da massa específica seca e

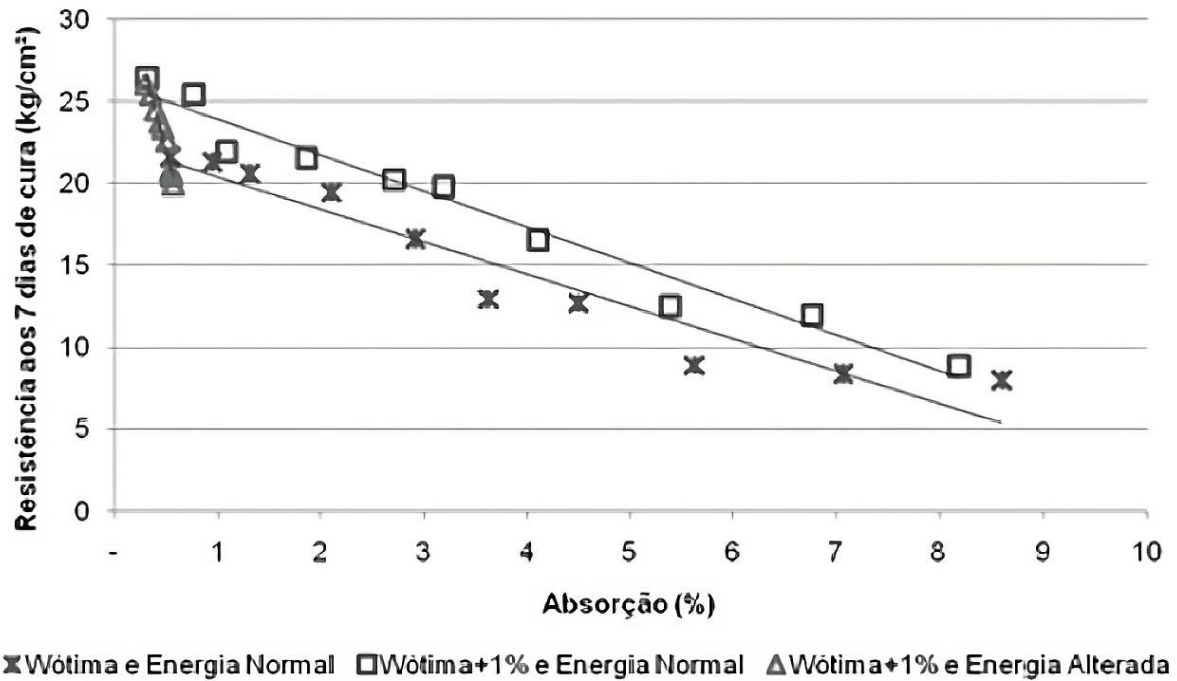
a diminuição da umidade, com as curvas se movendo para cima e para a esquerda (CAVARSAN, 2018).



Ainda segundo o autor, nota-se que as curvas de solo e solo-cimento, para a mesma energia de aplicação, apresentam resultados e formatos parecidos, sendo de acordo com o esperado.

Cancian *et al* (2017) observou em sua pesquisa a influência da porosidade na resistência à compressão simples das misturas solo-cimento, conforme a Figura 15. Segundo o autor a resistência à compressão simples da mistura varia linearmente com a absorção de água, evidenciando que, quanto menor for a porosidade, menor será a absorção de água e menor índice de vazios do solo-cimento, logo haverá mais pontos de contato entre os grãos de solo e cimento, com isso a cimentação é otimizada e melhora o desempenho mecânico da mistura.

Figura 15. Absorção de água média após imersão por 4 horas versus resistência à compressão simples média - Teor de cimento de 6%.



Fonte: Cancian *et al* (2017).

A Figura 15 também mostra que os corpos de prova moldados com a energia de compactação alterada apresentaram um aumento considerável na resistência a compressão simples e uma menor absorção de água.

2.3.2 Cimento Portland

O cimento Portland pode ser definido como um aglomerante hidráulico que é obtido através da moagem do clínquer. Sua composição é formada por silicatos de cálcio hidráulicos, com a adição de sulfato de cálcio (PINHEIRO; CRIVELARO, 2020).

O cimento Portland é composto basicamente por argila, calcário e outros minerais. As matérias primas são trituradas, moídas e pesadas, de acordo com o tipo de cimento. Posteriormente são misturadas e seguem para o forno rotativo, com a uma temperatura entre 1400 e 1650 °C. O resultado desse processo é chamado de clínquer que será moído e adicionado uma quantidade de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (SMITH; HASHEMI, 2012).

A adição de gesso (sulfato de cálcio) possui a função de controlar o tempo de pega. Sem essa adição o cimento endureceria no momento em que ocorre a

hidratação do clínquer (GOTO *et al*, 2018). Além do gesso, o cimento Portland também pode conter adições que irá definir os diferentes tipos de cimento (ABCP, 2002).

O cimento Portland pode ser classificado em 6 categorias diferentes, que são:

- Cimento Portland comum (CP I) e (CP I-S);
- Cimento Portland composto de escória granulada de alto forno (CP II-E), material pozolânico (CP II-Z) e material carbonático (CP II-F);
- Cimento Portland de alto forno (CP III);
- Cimento Portland pozolânico (CP IV);
- Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI);
- Cimento Portland branco (CPB).

Os cimentos Portland que recebem a adição de escória, pozolana ou filler, geram calor em uma velocidade menor que o CP I e possuem uma melhor resistência quando submetidos a sulfatos presentes no solo (PEREIRA, 2012).

A escória granulada de alto forno é obtida durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e possui propriedade de ligante hidráulico, mas suas reações de hidratação são muito lentas (ABCP, 2002). Portanto, o CP II-E é recomendado para estruturas de concreto que exigem um desprendimento de calor moderadamente lento, ou que possam ser atacadas por sulfatos (PINHEIRO; CRIVELARO, 2020).

O autor também define que o cimento Portland com adição de material pozolânico é recomendado para grandes lançamentos de concreto, uma vez que gera calor em uma velocidade menor que o cimento Portland comum. Já o CP II-F, é utilizado em aplicações gerais.

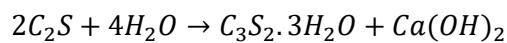
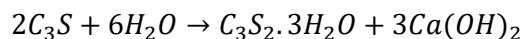
O CP III possui de 35% a 70% em massa de escória, o que lhe garante baixo calor de hidratação e maior impermeabilidade e durabilidade. Sendo assim, é indicado para construções de grande porte e agressividade (PEREIRA, 2012).

De acordo com a ABCP (2002), o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), possui essa característica em decorrência da dosagem do calcário e argila serem diferentes na produção do clínquer. Além do mais, ele é um cimento mais fino e isso lhe garante elevada resistência em alta velocidade.

Segundo Bauer (2019), o processo de hidratação do cimento ocorre, inicialmente, por meio floculação dos grãos, que se aglutinam uns aos outros formando uma estrutura que proporciona a estabilidade da estrutura. Esse processo continua com o decorrer do tempo e proporciona o endurecimento permanente.

A partir das reações de hidratação ocorre o endurecimento do cimento Portland. Quando o silicato tricálcico (C_3S) e silicato bicálcico (C_2S) reagem com a água, formam um material cristalino chamado de hidróxido de cálcio. Outro produto dessa reação é o silicato tricálcico hidratado que constitui um gel coloidal.

Segundo Smith e Hashemi (2012), o silicato tricálcico (C_3S) é responsável pelo aumento inicial da resistência mecânica do cimento Portland e endurece rapidamente. Já o silicato dicálcico (C_2S) possui uma reação de hidratação lenta no início da hidratação, porém vai crescendo até os 28 dias.



2.3.3 A água

Assim como o solo, a água utilizada na mistura também pode apresentar impurezas, que poderá interagir de forma agressiva ao cimento. Como é o caso dos sulfatos e da matéria orgânica por exemplo (BAUER, 2019).

Ainda segundo Bauer (2019) os componentes do cimento endurecido podem reagir quimicamente com diferentes substâncias. Essas reações podem ocorrer por meio da lixiviação do cimento endurecido, causada geralmente pela água doce, ácidos, sais, graxas e óleos. Além disso, pode ocorrer a expansão gerada pela formação de novos produtos, como os sulfatos.

2.4 Estudo da cura

No caso do concreto, a cura pode ser definida como um conjunto de medidas que são capazes de evitar que a água utilizada na mistura evapore. Visto que ela deverá reagir com o cimento, hidratando-o (BAUER, 2019).

A cura tem o objetivo de evitar a retração hidráulica e garantir que ocorra as reações hidráulicas do cimento. Principalmente no momento após a moldagem que é quando a peça ainda não possui uma resistência significativa (LISBOA *et al*, 2017).

Além disso, evitar a perda de água do concreto também é importante pelo fato de evitar a retração plástica, o aumento da permeabilidade e a redução da resistência á abrasão (NEVILLE, 2016).

Similar ao que ocorre no concreto, o solo-cimento apresenta ganhos na resistência mecânica de forma gradual com o tempo de cura, em decorrência da presença do cimento (ENAMORADO, 1990 *apud* NERY *et al*, 2017).

Segundo Pinheiro e Crivelaro (2020), a escolha do tipo de cura ideal dependerá da análise de cada processo construtivo. Para isso, é levada em consideração o custo, as ferramentas disponíveis, bem como as condições do canteiro de obras.

Dentre os métodos de cura podemos citar a cura ao ar livre, câmara úmida e submersão. A cura ao ar livre, também conhecida como cura por aspersão, é um dos métodos mais simples de proteção do concreto fresco, que consiste na irrigação da superfície exposta em intervalos frequentes (BAUER, 2019).

Ainda segundo Bauer (2019), a cura por submersão é considerada o método ideal de cura, mas seu uso é restrito e nada prático. Pode ser usado em lajes, pisos e pavimentos quando não há necessidade da utilização da superfície nos primeiros dias.

Da mesma forma, a hidratação do tijolo de solo-cimento nos primeiros dias após a moldagem é de grande importância. Pois, isso garante que a resistência não seja comprometida pela secagem rápida da peça (CEBRACE, 1980 *apud* CAMPOS; JUNIOR; BRITO, 2019).

Uma pesquisa realizada por Campos; Junior; Brito (2019), que consiste na produção de tijolos de solo-cimento a partir de diferentes fontes de água, com os métodos de cura ao ar natural, câmara úmida e regado, demonstraram que quando maior for o tempo de cura, melhor será o desempenho no tijolo de solo-cimento.

A NBR 12024: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimentos (ABNT, 2012), determina que após a moldagem o corpo de prova deverá ser colocado na câmara úmida, com a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar igual ou superior a 95%.

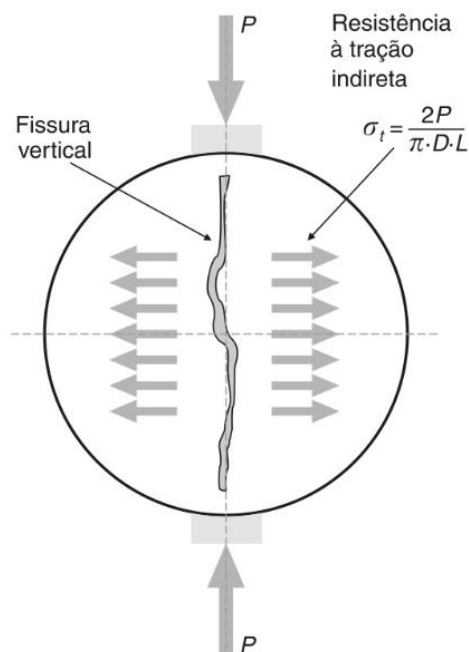
A norma ainda determina que a cura em câmara úmida deve ser de 7 dias, obrigatoriamente. Além disso, no caso da utilização de recipiente de cura, deve-se garantir que a umidade da serragem ou areia não interfira na umidade do corpo de prova.

2.5 Comportamento mecânico do solo-cimento

2.5.1 Resistência a compressão diametral

O ensaio de compressão diametral, também conhecido por Ensaio Brasileiro, foi desenvolvido por Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro, engenheiro brasileiro, em 1943. Na Figura 16 é possível observar a fissura central vertical no corpo de prova que é gerada pela tensão trativa transversal (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2017).

Figura 16. Esquema do ensaio de compressão diametral desenvolvido por Fernando Lobo para a medida da tração indireta.



Fonte: Garcia, Spim e Santos (2017).

Para a obtenção das tensões de tração e compressão, foram utilizadas as equações 1 e 2, conforme a NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio (ABNT, 2011):

$$\sigma_T = \frac{-2.F}{\pi.d.h} \quad (1)$$

$$\sigma_C = \frac{6.F}{\pi.d.h} \quad (2)$$

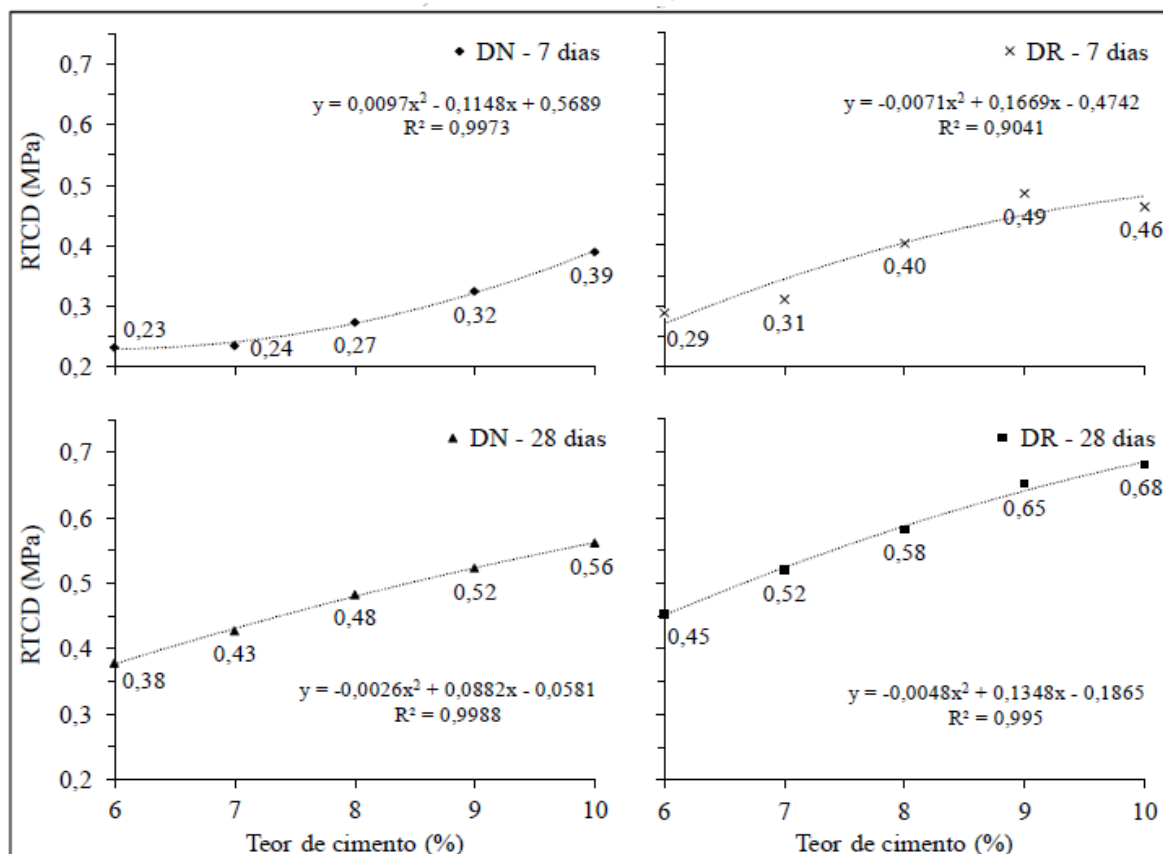
Onde:

σ_T é a resistência à tração por compressão diametral;

σ_c é a tensão de compressão;
 F é a carga máxima aplicada;
 d é o diâmetro do corpo de prova;
 h é a altura do corpo de prova.

A Figura 17 apresenta um dos resultados obtidos por Ferreira (2019). Nela mostra a resistência à tração por compressão diametral (RTCD) de corpos de prova de dimensão normal (DN) e dimensão reduzida (DR), que foram curados em sacos plásticos e levados a câmara úmida, variando o teor de cimento e o tempo de cura.

Figura 17. RTCD para misturas solo-cimento com adição de cimento CP II em função do teor, dimensão e tempo de cura.



Fonte: Ferreira (2019).

Na Figura 17, observa-se, que para o teor de cimento de 7%, os corpos de prova com dimensão reduzida (DR), moldados com energia normal, aos 7 e 28 dias de cura apresentaram a resistência média de 0,31 MPa e 0,52 MPa, respectivamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos que foram utilizados no desenvolvimento do trabalho, incluindo ensaio de compactação, moldagem dos corpos de prova, procedimento de cura, ensaio de compressão diametral, absorção de água e procedimento estatístico.

3.1 Materiais

O solo utilizado foi coletado por Sousa Junior (2023) dentro das dependências da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), no *campus* Reitor Edgar Santos, que fica localizado na cidade de Barreiras-BA, na região de coordenadas $12^{\circ}08'51''$ S; $45^{\circ}01'26''$ W, conforme indicada na Figura 18.

Figura 18. Imagem via satélite do local da coleta do solo.



Fonte: Adaptado do Google Earth (2023).

A coleta da amostra totalmente deformada foi realizada por cava manual, com profundidade de até 100 cm, sendo desprezado os primeiros 40 cm a fim de reduzir a quantidade de material orgânico.

O cimento *Portland* utilizado foi o CP II-E-32, que como disposto no capítulo anterior, ele libera calor a uma baixa velocidade e apresenta uma maior resistência

aos sulfatos presentes no solo. Foi utilizada a água da rede hidráulica disponível na universidade, fornecido pela Embasa.

A Tabela 2 apresenta o resultado da caracterização do solo, que foi realizada por Sousa Junior (2023). O solo possui o limite de liquidez de 16,2% e índice de plasticidade de 4,1%, que se enquadram nas recomendações da NBR 10832: Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual (ABNT, 1989). Essa norma define requisitos para a produção de tijolos maciços de solo-cimento em prensas manuais e recomenda que o limite de liquidez e índice de plasticidade seja menor ou igual a 45% e 18%, respectivamente. Além disso, o solo possui a massa específica de 2,438 g.cm³ e é classificado como areia argilosa (SC) segundo a classificação unificada, e A-2-4 segundo a classificação rodoviária.

Tabela 2. Caracterização do solo.

Informação	Valor	Unidade
Limite de liquidez (LL)	16,2	%
Índice de plasticidade (IP)	4,1	%
Massa específica dos grãos	2,438	g/cm ³
Classificação do solo	Areia Argilosa (SC)	Não se aplica
Classificação rodoviária	A-2-4	Não se aplica

Fonte: Adaptado de Sousa Junior (2023).

3.2 Métodos

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia, localizado na Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), no *campus* Reitor Edgar Santos.

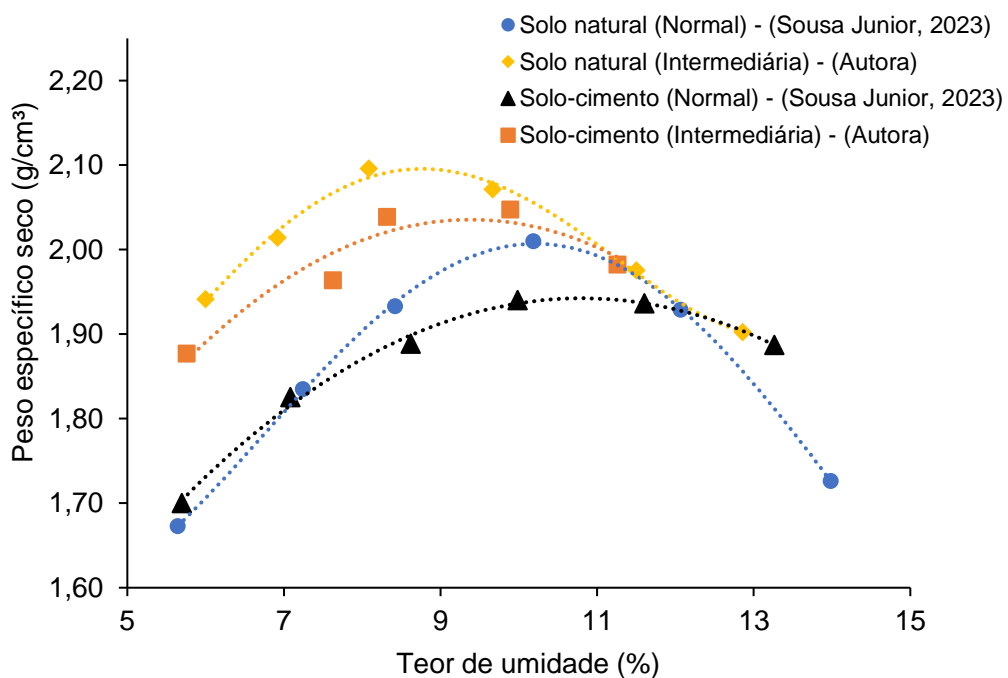
3.2.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação do solo natural foi realizado segundo às especificações da NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação (ABNT, 2016). Com o solo previamente seco ao ar e destorroado. O processo de ensaio teve início com a aferição do teor de umidade e, a partir dela, foram preparadas 5 amostras de solo, com massa de 2,5 kg, variando o teor de umidade para 2 pontos acima e abaixo da umidade ótima esperada.

Em seguida, para a energia intermediária de compactação, foi utilizado o cilindro pequeno (diâmetro de 10 cm e altura de 12,73 cm) que foi preenchido em 3 camadas, aplicando 21 golpes com o soquete grande por camada. Entre as camadas foi realizado a escarificação da superfície.

Por fim, foi determinado a massa específica do corpo de prova e a umidade. Esse processo foi repetido nas demais amostras e os pontos plotados na Figura 19.

Figura 19. Curvas de compactação do solo natural e solo-cimento com energia de compactação normal e intermediária.



Fonte: Autora.

O ensaio de compactação do solo-cimento, com energia de aplicação intermediária, seguiu as recomendações da NBR 12023 (ABNT, 2012), com adição de 7% de cimento em relação a massa do solo seco. Em resumo, o ensaio seguiu-se as mesmas etapas da compactação do solo natural, que foi descrito anteriormente.

Na Figura 19, também estão apresentadas a curva de compactação do solo natural e do solo-cimento com a energia normal de aplicação, que foram realizadas por Sousa Junior (2023). Ao comparar as curvas de compactação é possível observar que elas seguem o mesmo formato e que o cimento não causa uma grande influência nos valores de umidade ótima e peso específico seco, sendo assim coerente com resultados de outros autores, como Cavarsan (2018).

O ensaio de compactação do solo natural, com a energia normal, resultou em um peso específico de 2,01 g/cm³ e umidade ótima de 10,1%. Enquanto que para a energia intermediária, o peso específico foi de 2,10 g/cm³ e umidade ótima de 8,5%. Já a compactação do solo-cimento com energia normal, resultou no peso específico de 1,945 g/cm³ e umidade ótima de 10,3%. E para energia intermediária, o peso específico foi de 2,04 g/cm³ e umidade ótima de 9,4%, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Ensaio de compactação do solo e solo-cimento.

Energia	Material	Peso específico aparente seco máximo (g/cm³)	Teor de umidade ótima (%)	Referência
Solo natural	Normal	2,01	10,1	Sousa Junior (2023)
	Intermediário	2,10	8,5	Autora
Solo - cimento	Normal	1,945	10,3	Sousa Junior (2023)
	Intermediário	2,04	9,4	Autora

Fonte: Autora.

Observa-se que com o aumento da energia de compactação houve o aumento do peso específico seco e a redução do teor de umidade, tanto para o solo natural como para o solo-cimento.

Quando o solo se encontra abaixo da umidade ótima, o aumento da energia de compactação gera o aumento do peso específico seco. Porém, se o solo se encontra acima da umidade ótima, a aplicação de uma maior energia pouco irá alterar a densidade do solo, e isso ocorre em função da dificuldade de retirar o ar dos vazios. Como resultado, a curva se desloca para a esquerda e para cima (PINTO, 2006).

3.2.2 Tratamento dos corpos de prova

A partir do peso específico do solo e da umidade ótima encontrada no ensaio de compactação, juntamente com o teor de umidade do solo-natural, foi calculado o traço da mistura de solo-cimento.

Foi considerado a proporção de 1:13, que é a dosagem comumente indicada pelos fabricantes de prensas de tijolos solo-cimento, e foi a mesma proporção utilizada por Sousa Junior (2023) em sua pesquisa.

Para a preparação da mistura solo-cimento, inicialmente foi pesado o solo, o cimento (Figura 20a, b) e a água. Posteriormente realizou-se a mistura dos secos até atingir uma mistura homogênea (Figura 20c), seguido da adição de água e homogeneização da mistura (Figura 20d,e).

Figura 20. Preparação da mistura solo-cimento: a) Solo natural; b) Solo natural + cimento; c) Mistura dos secos; d) Adição de água; e) Mistura pronta para fabricação do corpo de prova.



Fonte: Autora.

Foi reservado uma parte da mistura de solo-cimento úmido para a determinação do teor da umidade no momento da moldagem.

O corpo de prova possui a dimensão de 2,5x5,0 cm visando a economia dos materiais, bem como a praticidade de manuseio e confecção. Para a compactação dos corpos de prova, foi utilizado o molde cilíndrico de 5x10 cm, como mostra a Figura 21.

Figura 21. Extração do corpo de prova.



Fonte: Autora.

Foram compactados 60 corpos de prova de solo-cimento (Figura 22) que foram divididos em dois grupos. Sendo 30 moldados com a energia de compactação normal e 30 com a energia de compactação intermediária.

Figura 22. Corpo de prova de solo-cimento.



Fonte: Autora.

Após 24 horas da moldagem os corpos de prova foram divididos em três vias de cura diferentes, onde 20 foram curados por submersão, 20 em câmara úmida e 20 ao ar livre.

A cura submersa foi realizada com a imersão dos corpos de prova em água, conforme a Figura 23.

Figura 23. Cura dos corpos de prova por submersão em água.



Fonte: Autora.

Já a câmara úmida consiste em um recipiente fechado, onde os corpos de prova ficaram cobertos com tecido de algodão úmido e diariamente foi aspergida água nos corpos de prova e paredes do recipiente, conforme a Figura 24.

Figura 24. Cura dos corpos de prova em câmara úmida.



Fonte: Autora.

A cura ao ar livre ocorreu dentro do laboratório de geotecnia, em um local protegido da incidência direta de raios solares, conforme a Figura 25.

Figura 25. Cura dos corpos de prova ao ar livre.



Fonte: Autora.

3.2.3 Resistência à tração por compressão diametral e absorção de água

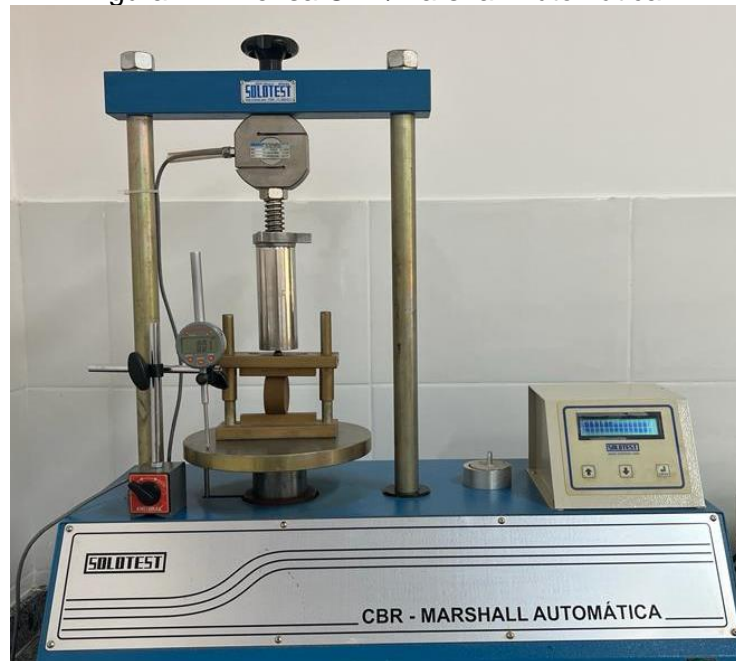
Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi utilizado o molde de tração indireta, também chamado de pórtico de Lottman (Figura 26), e a prensa CBR/Marshall Automatizada, da marca Solotest (Figura 27).

Figura 26. Pórtico de Lottman.



Fonte: Autora.

Figura 27. Prensa CBR/Marshall Automática.



Fonte: Autora.

Antes da ruptura, os corpos de prova ficaram 24 horas imersos em água. Para a determinação da absorção de água, após a ruptura, os corpos de prova foram levados para estufa, onde permaneceram por 24 horas.

3.2.4 Análise estatística

As variáveis independentes da pesquisa são o solo, o traço, cimento, o tipo e tempo de cura, enquanto as dependentes são a resistência a compressão diametral e absorção de água.

Para a realização dos ensaios foi definido seis grupos, em que três grupos foram compactados com a energia Proctor normal e curados por submersão, ar livre e câmara úmida e três grupos foram compactados com a energia intermediária e curados com os mesmos três métodos de cura. Cada grupo é composto por 10 corpos de prova, totalizando 60 corpos de prova. Além disso, cada grupo foi testado com o ensaio de tração por compressão diametral nas idades de 7, 14 e 28, sendo assim 3 corpos de prova para cada idade e 1 de reserva para possíveis imprevistos.

Após a realização dos ensaios, os dados foram organizados no *software* Microsoft Excel 2016 e para a análise dos dados foi utilizado o *software* Statistical Package for Social Science (SPSS) versão 20.0 para Windows.

Os dados contínuos de resistência a compressão diametral e absorção de água, foram testados quanto a normalidade da distribuição, usando o teste de Shapiro-Wilk, e quanto a homoscedasticidade, utilizando o teste de Levene.

Para as medidas que houve normalidade e homogeneidade de variância, foi aplicado a Análise de Variância de Duas Vias (ANOVA) da resistência e absorção de água independentes e cruzadas, seguido do *post hoc* de Bonferroni. Para as medidas que não apresentarem normalidade e homogeneidade, as diferenças estatísticas serão aferidas pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.

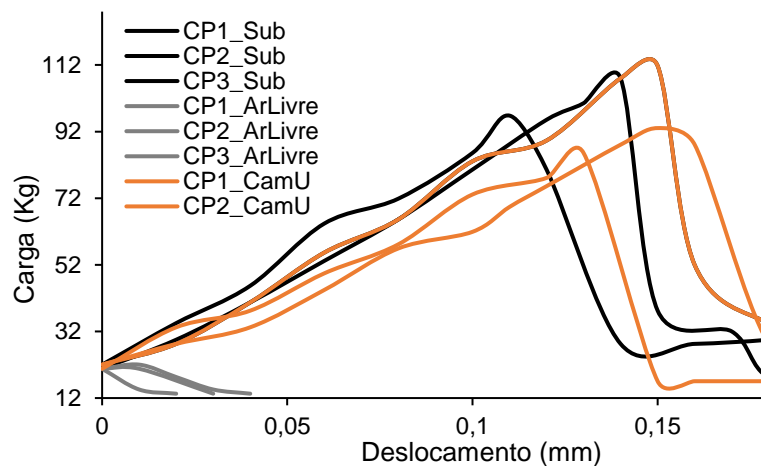
O *post hoc* foi escolhido em função da natureza dos resultados, que foram expressos com a média \pm desvio padrão. Para todos os dados foi considerado o nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Compressão diametral

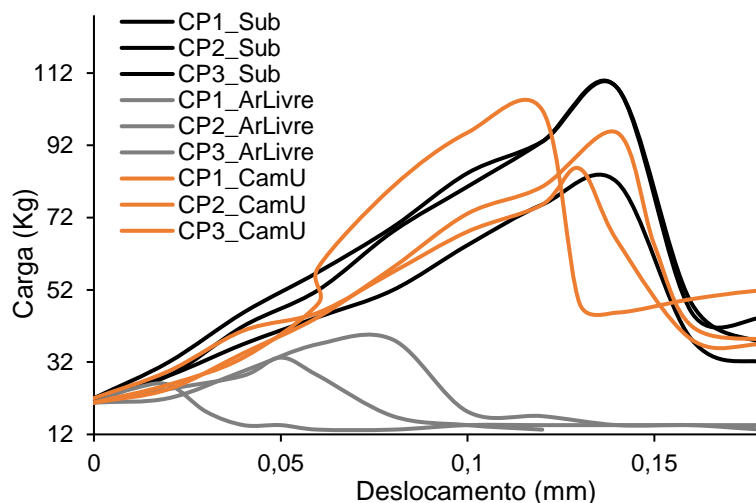
A Figura 28 e a Figura 29 apresentam os resultados do ensaio de compressão diametral aos 28 dias, em curvas de carga x deslocamento dos corpos de prova que foram moldados com a energia de compactação normal e intermediária, respectivamente.

Figura 28. Curvas carga x deslocamento dos corpos de prova moldados com energia de compactação normal que foram curados por submersão, ar livre e câmara úmida na idade de 28 dias.



Fonte: Autora.

Figura 29. Curvas carga x deslocamento dos corpos de prova moldados com energia de compactação intermediária que foram curados por submersão, ar livre e câmara úmida na idade de 28 dias.



Fonte: Autora.

Ao comparar a Figura 28 com a Figura 29 é possível observar que a cura ao ar livre foi a que apresentou o menor desempenho em ambas as energias de compactação. A cura submersa e câmara úmida apresentaram uma resistência de aproximadamente quatro vezes maior que a cura ao ar livre.

Além disso, observa-se que o aumento da energia de compactação provocou um aumento considerável na resistência dos corpos de prova que foram curados ao ar livre. Isso decorre do aumento da densidade, que conseqüentemente produz um corpo de prova menos poroso e mais resistente.

A Figura 30 apresenta o corpo de prova após o ensaio de compressão diametral. É possível observar o modo de ruptura do corpo de prova, que ocorre na parte central em sentido vertical. O mesmo padrão de ruptura foi obtido por Kuhn (2014), ao estudar a resistência ao cisalhamento de um solo tropical compactado não saturado.

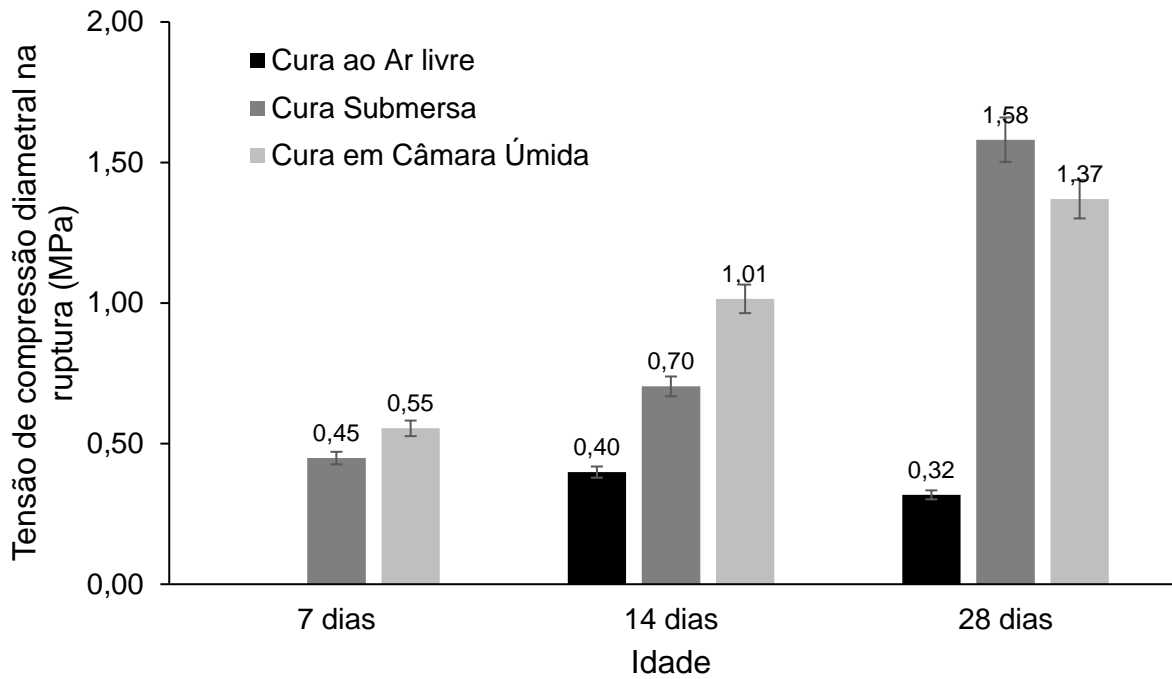
Figura 30. Modo de ruptura dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

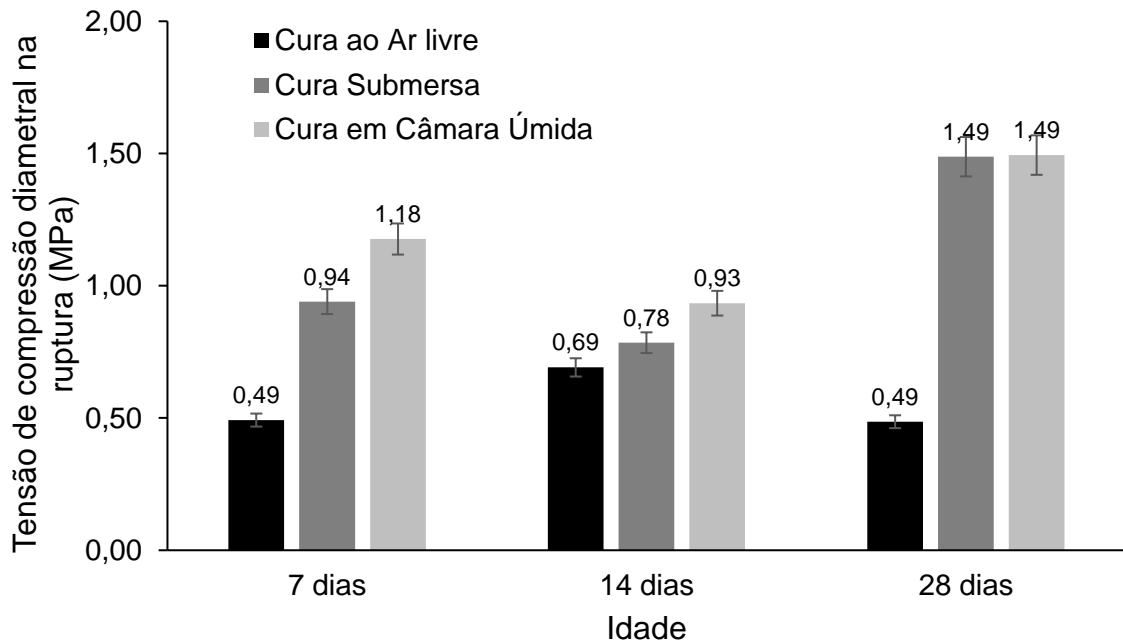
A Figura 31 apresenta a média da resistência a compressão diametral dos corpos de prova que foram moldados com energia normal. Já a Figura 32 apresenta a média da resistência a compressão diametral dos corpos de prova que foram moldados com energia intermediária.

Figura 31. Resistência à compressão diametral dos tipos de cura no tempo da energia normal.



Fonte: Autora.

Figura 32. Resistência à compressão diametral dos tipos de cura no tempo da energia intermediária.



Fonte: Autora.

Ao comparar os resultados da tensão de compressão diametral com o trabalho de Ferreira (2019), comentada anteriormente, observa-se que os valores obtidos são razoavelmente maiores.

Analisando a Figura 31 com a Figura 32, é possível notar que nas idades de 7 e 14 dias, a cura em câmara úmida foi a que apresentou o maior ganho de resistência. No entanto, aos 28 dias, os corpos de prova que estavam submersos possuem a maior resistência. Esse fenômeno pode estar relacionado com a disponibilidade de água da câmara úmida, e essa não ser o suficiente para hidratar o cimento.

Em específico para a cura ao ar livre, após 7 dias (Figura 31), os corpos de prova romperam antes da prensa atingir a carga mínima. É provável que isso ocorreu em função da umidade do ambiente e do tempo de cura ser insuficiente para hidratar o cimento e desenvolver resistência.

Além disso, para a cura ao ar livre, o aumento da energia de compactação é favorável pois gera um aumento na densidade, como mostra as curvas de compactação. E isso provoca o aumento da resistência.

De acordo com Vitali (2008) a redução na porosidade influencia o aumento na resistência do solo-cimento pode estar relacionado com a existência de um maior número de contatos, que gera um maior intertravamento entre as partículas do solo e o maior atrito.

Porém, pensando em um solo cimentado que vai passar por algum processo de cura, o efeito do aumento da energia de compactação não é tão significativo, quando se compara os gráficos (Figura 31 e Figura 32). Isso ocorre em função do efeito da cimentação ser mais relevante para o ganho de resistência do que a menor porosidade.

Na Tabela 4 estão apresentadas a média e o desvio padrão da resistência a compressão diametral por idade e pelos diferentes tipos de cura, dos corpos de prova moldados com a energia de compactação normal.

Tabela 4. Resistência a compressão diametral dos tipos de cura moldados com energia normal.

Tipo de cura	Resistência à compressão diametral por idade (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
Submersa	0,45 ± 0,04	0,70 ± 0,06	1,58 ± 0,12 ^a
Ar livre		0,4 ± 0,02	0,32 ± 0,01 ^b
Câmara úmida	0,55 ± 0,07	1,01 ± 0,05	1,37 ± 0,08 ^a

^a Não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tipos de cura para a idade de 28 dias.

^b Há diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tipos de cura para a idade de 28 dias.

Fonte: Autora.

Ao realizar o teste para verificar a natureza dos dados, constatou-se que os dados de resistência a compressão diametral, dos corpos de prova moldados com energia normal, não demonstrou normalidade e nem homoscedasticidade.

Nesse caso, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, que demonstrou existe um efeito significativo do tipo de cura sobre resistência ($X^2(2) = 12,599$; $p < 0,01$). Para encontrar onde ocorre essa influência foi aplicado o *post hoc* comparando os pares e demonstrou que há uma diferença significativa entre a cura ao ar livre com submersa e ar livre com câmara úmida.

A Tabela 5 apresenta a média e o desvio padrão da resistência a compressão diametral por idade e pelos diferentes tipos de cura, dos corpos de prova moldados com a energia de compactação intermediária.

Tabela 5. Resistência a compressão diametral dos tipos de cura moldados com energia intermediária.

Tipo de cura	Resistência à compressão diametral por idade (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
Submersa	0,94 ± 0,13	0,78 ± 0,21	1,49 ± 0,23 ^a
Ar livre	0,49 ± 0,10	0,69 ± 0,18	0,49 ± 0,09 ^b
Câmara úmida	1,18 ± 0,08	0,93 ± 0,09	1,49 ± 0,20 ^a

^a Não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tipos de cura para a idade de 28 dias.

^b Há diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tipos de cura para a idade de 28 dias.

Fonte: Autora.

A análise estatística dos corpos de prova moldados com energia de compactação intermediária demonstrou que os dados de tensão de compressão

diametral seguem a distribuição normal e homogênea, sendo assim executado a ANOVA de duas vias.

O resultado do teste demonstrou que o tipo de cura causa um efeito significativo na resistência ($F(2, 18) = 43,695$; $p \leq 0,05$). Da mesma forma, o tempo de cura também causa um efeito significativo na resistência ($F(2, 18) = 13,192$; $p \leq 0,05$), como também a interação entre o tipo de cura e a idade ($F(4, 18) = 7,739$; $p \leq 0,05$).

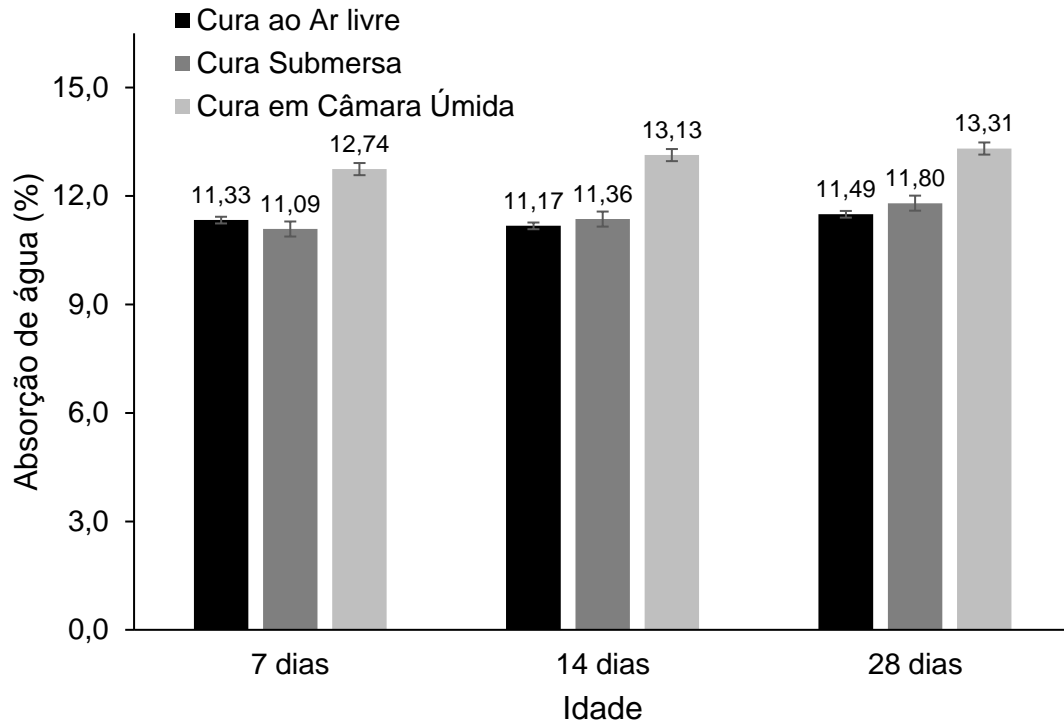
Já para a interação entre os tipos de cura e as idades, verificou-se que aos 28 dias de cura há diferenças significativas na resistência entre as curas ao ar livre com submersa e ar livre com câmara úmida (two way ANOVA, $p \leq 0,01$, *post hoc* Bonferroni).

Nota-se que em nenhuma das idades houve diferença significativa entre a cura submersa e câmara úmida, isso se deve ao fato da alta capacidade de absorção de água do solo, que garante a hidratação completa do corpo de prova mesmo em câmara úmida.

4.2 Absorção de água

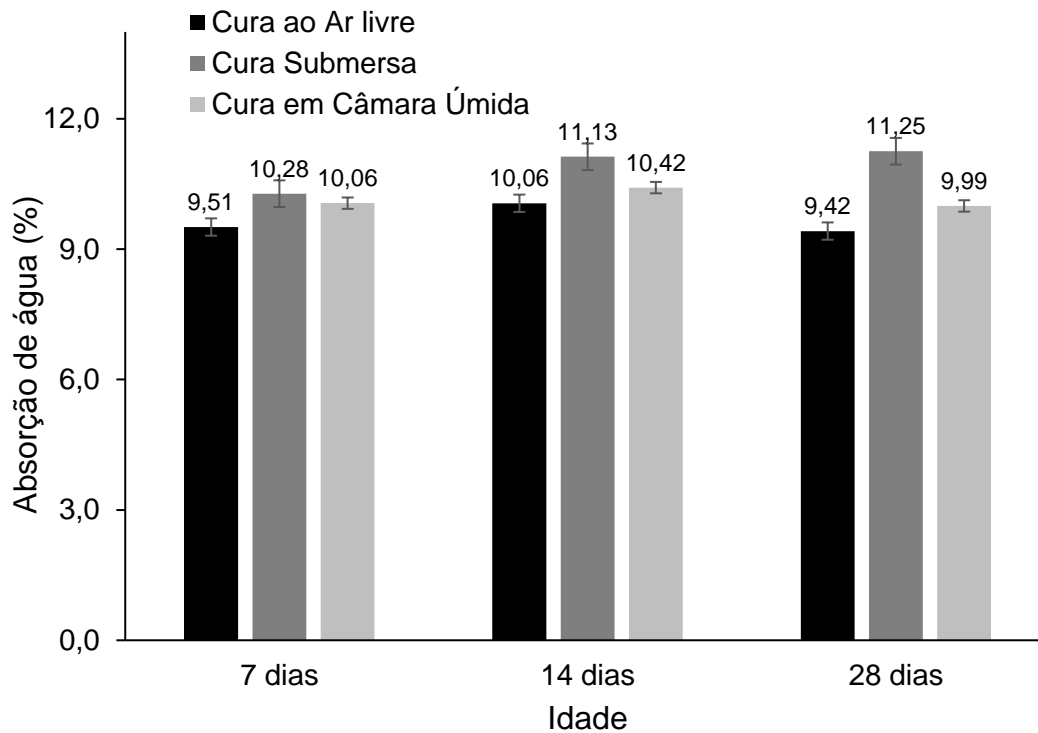
Após o ensaio de compressão diametral foi realizado o ensaio de absorção de água. Os corpos de prova já rompidos foram pesados e levados para estufa, onde permaneceram por 24 horas. A Figura 33 e a Figura 34 apresentam as médias da absorção de água dos tipos de cura em cada uma das idades da energia normal e intermediária, respectivamente.

Figura 33. Média da absorção de água por idade nos tipos de cura moldados com energia normal.



Fonte: Autora.

Figura 34. Média da absorção de água por idade nos tipos de cura moldados com energia intermediária.



Fonte: Autora.

Observa-se que os resultados são muito semelhantes para cada tipo de cura entre as idades de 7, 14 e 28 dias. Isto mostra que o tempo de cura pode não ter sido um importante aspecto na absorção de água.

Ao comparar a Figura 33 com a Figura 34, observa-se que a absorção de água dos corpos de prova moldados com energia Proctor Normal foi ligeiramente maior que da energia intermediária. E isso se deve ao fato de que a energia de compactação intermediária produz corpos de prova com uma maior densidade e menor índice de vazios, propiciando assim menor espaço para absorção de água. Esse comportamento também foi encontrado na pesquisa do Cancian *et al* (2017), comentado anteriormente.

A Tabela 6 apresenta a média e o desvio padrão da absorção de água por idade dos diferentes tipos de cura, dos corpos de prova moldados com a energia de compactação normal.

Tabela 6. Absorção de água no tempo - Energia normal.

Tipo de cura	Absorção de água por idade (%)		
	7 dias	14 dias	28 dias
Submersa	11,09 ± 0,12	11,36 ± 0,07	11,80 ± 0,13 ^a
Ar livre	11,33 ± 0,43	11,17 ± 0,16	11,49 ± 0,28 ^a
Câmara úmida	12,74 ± 0,29	13,13 ± 0,33	13,31 ± 0,23 ^b

^a Não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tipos de cura para a idade de 28 dias.

^b Há diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tipos de cura para a idade de 28 dias.

Fonte: Autora.

A análise estatística dos dados da absorção de água, dos corpos de prova moldados com energia normal, não apresentam normalidade na sua distribuição. No entanto, possui homogeneidade.

O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis demonstrou que existe um efeito significativo do tipo de cura sobre a absorção de água ($X^2(2) = 17,429$; $p < 0,01$). Ao aplicar o *post hoc* comparando os pares, obteve-se que há uma diferença significativa entre a cura em câmara úmida com a cura ao ar livre e a cura submersa.

Entretanto, o teste de Kruskal-Wallis demonstrou que não há efeito significativo da idade sobre a absorção de água ($X^2(2) = 3,411$; $p > 0,05$).

A Tabela 7 apresenta a média e o desvio padrão da absorção de água por idade dos diferentes tipos de cura, dos corpos de prova moldados com a energia de compactação intermediária.

Tabela 7. Absorção de água no tempo - Energia intermediária.

Tipo de cura	Absorção de água por idade (%)		
	7 dias	14 dias	28 dias
Submersa	10,28 ± 0,26	11,13 ± 0,37	11,25 ± 0,31 ^a
Ar livre	9,51 ± 0,02	10,06 ± 1,03	9,42 ± 0,06 ^b
Câmara úmida	10,06 ± 0,43	10,42 ± 0,42	9,99 ± 1,00 ^b

^a Há diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tipos de cura para a idade de 28 dias.
^b Não ocorre diferença significativa ($p > 0,05$) entre os tipos de cura para a idade de 28 dias.

Fonte: Autora.

Para os corpos de prova moldados com a energia de compactação intermediária, a análise estatística demonstrou que os dados de absorção de água seguem a distribuição normal, logo, foi realizado a ANOVA de duas vias. Esse teste demonstrou que o tipo de cura causa efeito significativo sobre a absorção de água ($F(2, 18) = 11,283$; $p \leq 0,05$). Já em relação a idade não houve diferenças significativas em relação aos tipos de cura ($F(2, 18) = 2,539$; $p > 0,05$). Por fim, não houve interação entre o tipo de cura e a idade ($F(4, 18) = 0,972$; $p > 0,05$).

Em seguida, foi aplicado o *post hoc* de Bonferroni. Esse teste apresentou que não há diferença significativa na absorção de água entre as idades em todos os tipos de cura (*two way ANOVA*, $p > 0,05$, *post hoc* Bonferroni).

Além disso, na idade de 28 dias, constatou-se que há uma diferença significativa entre as curas submersa e ar livre (*two way ANOVA*, $p \leq 0,01$, *post hoc* Bonferroni), e entre submersa e câmara úmida (*two way ANOVA*, $p \leq 0,05$, *post hoc* Bonferroni).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos dados obtidos nessa pesquisa foi possível concluir alguns pontos importantes do desempenho da mistura solo-cimento e seu processo de cura.

O ensaio de compactação com a energia intermediária do solo e do solo-cimento apresentaram resultados coerentes com a literatura. Para ambas as amostras a curva se moveu para esquerda e para cima, quando comparados com a compactação de energia Proctor normal, que foi realizado por Sousa Junior (2023).

Durante o trabalho foi discutido a influência que o tipo de cura exerce no decorrer do tempo na mistura e obteve-se que a cura submersa é a que apresenta o melhor desempenho aos 28 dias de idade. Entretanto, a cura em câmara úmida foi a que apresentou o melhor desempenho aos 14 dias de cura.

Como esperado, a cura ao ar livre foi a que teve o menor desempenho em todas as idades, e isso se deve ao fato do corpo de prova perder umidade para o ambiente e não possuir água suficiente para hidratar as reações do cimento. Esse comportamento foi obtido tanto para os corpos de prova moldados com energia normal de compactação, quanto para os de energia intermediária.

Na prática, pode-se afirmar que realizar algum tipo cura com água proporciona um maior ganho na resistência, do que apenas aumentar a energia de compactação e não realizar a cura adequada.

Também foi observado que o aumento da energia de compactação influencia na absorção de água da mistura. Os resultados mostraram que os corpos de prova moldados com energia normal apresentaram um ligeiro aumento na absorção de água em relação aos da energia intermediária. E isso é decorrente da maior densidade proporcionar o maior contato entre os grãos e menor espaço para absorção de água. Dessa forma, como a absorção de água está diretamente relacionada com o índice de vazios, recomenda-se na prática a utilização da energia intermediária.

Entretanto, o fato da energia intermediária ter um menor índice de vazios faz com que o corpo de prova tenha um comportamento abrupto na ruptura, fazendo com que se rompa sem escoar. Diferente disso, os corpos de prova moldados com a energia normal de compactação aceitam uma deformação antes da ruptura e no estágio de plastificação o corpo de prova pode apresentar uma maior resistência.

Sugestões para pesquisas futuras:

- Realizar os ensaios de resistência a compressão diametral e absorção de água com a energia de compactação modificada e diferentes traços;
- Verificar o comportamento em idades avançadas;
- Realização do ensaio de difração de raios-X (DRX) do solo e solo-cimento nos diferentes tipos de cura;
- Estudar o comportamento ao variar o tipo de cimento;
- Realizar teste de resistência a ácidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIKO, A. K. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 1980. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

ALENCAR, I. B. **Análise experimental e numérica da compressibilidade de solos cimentados artificialmente**. 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

ARAGÃO, J. C. *et al.* Estudo de um solo estabilizado com cimento portland a partir do método de dosagem físico-química. **XX COBRAMSEG**, Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estudo-de-um-solo-estabilizado-com-cimento-portland-a-partir-do-metodo-de-dosage?lang=pt-br>> Acesso em: 15 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. 3.ed.rev.atual. São Paulo, 2000. 16 p. (BT-111)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28 p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10832: Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual**. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10834. Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12023: Solo-cimento - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12024: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13553: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270-2:2005. Componentes cerâmicos - Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7170. Tijolo maciço cerâmico para alvenaria.** Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8491: Tijolo de solo-cimento — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2012.

BARNES, Graham. **Mecânica dos Solos: Princípios e Práticas.** 3. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2016. 576 p.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção v. 1.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção v. 2.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BOTINAS, R. A. **Estudo do solo como material de construção sustentável.** 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.

CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação ambiental do sistema construtivo de alvenaria de blocos de solocimento considerando diferentes especificações de projeto. **Gestão & Tecnologia de Projetos.** São Carlos, v16, n2, 2021.

CAMPOS, A.; JUNIOR, J. B. DO N.; BRITO, L. T. Comportamento estrutural de tijolos de solo-cimento utilizando diferentes fontes de água e métodos de cura. **Interações.** Campo Grande, MS, v. 20, n. 1, p. 283–296, 2019.

CANCIAN, M. A.; CANCIAN, V. A.; TEIXEIRA, R. S.; FONTENELE, H. B., COSTA BRANCO, C. J. M. Influência do teor de umidade, da porosidade e do intervalo de tempo até a aplicação da mistura solo-cimento em pavimento rodoviário. **Transportes,** v. 25, n. 1, p. 48, 2017.

CAPUTO, H. P., 1923 - **Mecânica dos solos: teoria e aplicações** / Homero Pinto Caputo, Armando Negreiros Caputo; atualização Paulo José Rocha de Albuquerque, Jean Rodrigo Garcia - 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

CAVARSAN, M. P. G. **Análise dos efeitos da adição de cal e de cimento para estabilização de solos.** 2018. 91 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **DNIT 143: Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **DNIT 414: Pavimentação – Solo-Cimento – Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio** Brasília, DF. 2019.

DOMINGUES, R. M. V. **Avaliação do potencial económico de implementação da construção em BTC**. Braga: Universidade do Minho, 2015. 136p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

EUPHROSINO, C. A.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL; CAMARINI, G.; FONTANINI, P. S. P. Tijolos de solo-cimento usados para Habitação de Interesse social (HIS) em mutirão: estudo de caso em olaria comunitária. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/D8XXF4S3Wt8DYr8kkFfrmHr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 18 out. 2022.

FERREIRA, C. C. **A sustentabilidade do sistema construtivo em terra: um projecto de reabilitação**. 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.

FERREIRA, J. W. S. **Comportamento mecânico de misturas solos-cimento para aplicação em pavimentos**. 2019. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

FIAIS, B. B.; SOUZA, D. S. Construção sustentável com tijolo ecológico. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**. Araçatuba, SP, v. 02, n. 01, p. 94–108, jan./ago. 2017.

FOPPA, DIEGO. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

FRAGA, Y. S. B.; BARBOSA, A. Q.; DORTAS, I. S.; SANTOS, L. H. P.; MOTA, W. V. Tecnologia dos materiais: a utilização do tijolo de solo-cimento na construção civil. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**. Aracaju, SE, v. 3, n. 3, p. 11-24, outubro. 2016.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GOMES, N. T.; SILVA, B. S. S.; OLIVEIRA, G. S.; ALEXANDRE, J. Análise do comportamento estrutural de corpos de prova de solo-cimento utilizando diferentes métodos de cura. **Research, Society and Development**. v. 11, n. 3, p. 1-13. 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i3.26570. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/26570>. Acesso em: 20 out. 2023.

GOTO, H.; RIBEIRO, J. P. C.; CENTOFANTE, R. **Materiais de construção**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Craig mecânica dos solos** / J. A. Knappett e R. F. Craig; tradução Amir Elias Abdalla Kurban - 8. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2018.

KÜHN, V. O. **Resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado considerando altas sucções**. 2014, 192 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2014.

LEONARDO. **O que é solo-cimento?** Jarfel/Sahara. São Paulo, 01 fev, 2018. Disponível em: <<https://www.sahara.com.br/o-que-e-o-solo-cimento/>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

LISBOA, E. S.; ALVES, E. S.; MELO, G. H. A. . **Materiais de construção: concreto e argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

LLAJARUNA, M. A. V. **Estudo do solo-cimento auto adensável para a fabricação de tijolos de pó de mármore e resíduo de construção**. 2017, 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.

MACÊDO, M. M. **Solos modificados com cimento - efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. 2004, 298 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

MARCARF, M. **Construção do zero (parte 5) Fundação : Solo Cimento passo a passo**. 10 jun. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=lv62OC6jywM&ab_channel=MRMARCARF>. Acesso em: 10 dez. 2022.

MARTINS, V. M. V. **Alvenaria em solo-cimento para moradias unifamiliares em Angola**. 2010/2011, 127 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

MF RURAL. **Tijolo Ecológico - Solo Cimento em Oriente SP à venda. Compre 104899**. 2012. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/104899/tijolo-ecologico-solo-cimento>. Acesso em: 01 out. 2023.

MONTE, M. A. **Aplicação de solo-cimento em pavimentos flexíveis**. 2009, 81 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2011/2012 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

MOREIRA, A. M. **Terra crua**. Notas de aula. Materiais de construção I 2008/2009 - 1º semestre. Instituto Politécnico de tomar, Portugal, 2008.

MOTTA, J. C. S. S. *et al.* Tijolo de solo-cimento: Análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **E-xacta**, v. 7, n. 1, p. 13–26, 2014.

MURRIETA, P. S. N. **Mecânica dos solos** / Pedro Murrieta Santos Neto. - 1. ed. Rio de Janeiro : Elsevier, 2018.

NASCIMENTO, Á. M. DO; FEITOSA, A. DE O.; ALMEIDA, T. DA S.; LACERDA, D. M. DE. Tijolo modular de solo-cimento como material na construção civil. **Revista Inter Scientia**, v. 6, n. 1, p. 187–202, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.unipe.br/index.php/interscientia/article/view/645/527>>. Acesso em: 20/ out. 2022.

NERY, K.; RIBEIRO, D.; SALES, A. **Efeitos da Adição de Cimento e de Cal em um Solo da Região de Curitiba para Fins de Pavimentação**. 2017. 91 pp. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OTIJOLO. **Tijolo ecológico: Resistência e durabilidade comprovadas**. 2020. Disponível em: <https://otijolo.com/artigos/ART2314/tijolo-ecologico-resistencia-e-durabilidade-comprovadas/>. Acesso em: 23 set. 2023.

PEREIRA, Miguel F. **Estudo dos cimentos comercializados em Campo Mourão**. 2012. 40f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Tecnologia em Construção Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.

PINHEIRO, A. C. F. B.; CRIVELARO, M. **Materiais de construção** / Marcos Crivelaro, Antônio Carlos da Fonseca Bragança Pinheiro. 3. Ed. – São Paulo: Érica, 2020.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, E. S. **Solo-cimento compactado: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Bauru, 2016

RODRIGUES, M. G. M. **Contribuição ao estudo do Método Físico-químico de dosagem do Solo-cimento** / Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992. 193p. (Tese, Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro, 1992.

SANBONSUGE, K.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.; DE MOURA, E. Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento. **Transportes**, v. 25, n. 4, p. 68, 2017.

SANTIAGO, C. C. **O solo como material de construção** / Cybèle Celestino Santiago; ilustrações de Adamastor C. Santana. 2. Ed. rev. Salvador: EDUFBA, 2001.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira (SP)**. Campinas, 2000. 176 f. Tese (Doutorado

em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

SERVI, S. P. **Comportamento mecânico de resíduo de minério de ferro estabilizado com agentes aglomerantes.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais.** William F. Smith, Javad Hashemi ; tradução: Necesio Gomes Costa, Ricardo Dias Martins de Carvalho, Mírian de Lourdes Noronha Motta Melo. – 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

SOUSA JUNIOR, Felipe Ferreira. **Enriquecimento de solo do Cerrado para aplicação em materiais sustentáveis,** 61 f. il. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, 2023.

TREVISAN, M. D. **Aplicação de solo-cimento em obras de engenharia: estudo de caso.** 2017. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

VERDEEQUIPAMENTOS. **Qual o Traço do Tijolo Ecológico?** Verde Equipamentos. 2020. Disponível em: <<https://verdeequipamentos.com.br/2020/08/27/qual-o-traco-do-tijolo-ecologico/>>. Acesso em: 30 nov. 2022.

VIMAQ PRENSAS. **Máquinas para Tijolo Ecológico de Solo-cimento.** Disponível em: <<http://vimaqprensas.com.br/>>. Acesso em: 28 nov. 2022.

VITALI, O. P. M. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Geotecnia) - Universidade do Porto, Porto, 2008.