



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufpe.br/

10.24221/jeap.8.2.2023.5294.123-139



Evolução da estabilização química em solos expansivos

Evolution of chemical stabilization in expansive soils

Luana Dantas de Medeiros^a, Silvio Romero de Melo Ferreira^b, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello^a

^a Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Campus Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Av. Marielle Franco, s/n, Km 59, Nova, Caruaru, Pernambuco, Brasil. CEP: 55014-900. E-mail: luana.dantasm@ufpe.br, isabelamevbelo@hotmail.com.

^b UFPE. Av. da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 50740-550. E-mail: silvio.mferreira@ufpe.br.

ARTICLE INFO

Recebido 12 Out 2022

Aceito 07 Jun 2023

Publicado 15 Jun 2023

ABSTRACT

The expansive soils suffer volumetric variations due to moisture variation, so their behavior varies throughout the year depending on the climatological conditions, with expansion and shrinkage, which can cause damage to buildings, thus the need to perform stabilization. There are several methods to perform the stabilization of expansive soils. Chemical stabilization of expansive soils is one of the treatment methods used to improve engineering properties making the soil suitable for use and occupation. The purpose of the article is to provide a review of the current comprehensive literature of articles published in the last 70 years on the subject. Portals of scientific publications, periodicals, conference proceedings, a virtual library of scientific associations, and the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations were consulted with the search for the keyword's expansive soils and chemical stabilization. It found 78 publications, of which 44% were published in the 2010s, the most used materials for the formation of composites are Lime, Ash, Cement, and Sodium derivatives. The most used composites were hydrated lime (57%) and ash (32%). The formation of composites with two or three materials reduces expansivity, expansion stress, and the propagation and formation of cracks in expansive soils.

Keywords: Expansive soils, chemical additives, chemical stabilization.

RESUMO

Os solos expansivos sofrem variações volumétricas em decorrência da variação da umidade, e por esse motivo, o seu comportamento varia ao longo do ano em função dos condicionantes climatológicos, havendo expansão e retração, podendo provocar danos nas construções, havendo assim a necessidade de realizar a sua estabilização. Existem vários métodos para realizar a estabilização dos solos expansivos. A Estabilização química dos solos expansivos é um dos métodos de tratamento utilizados para melhorar as propriedades de engenharia tornando o solo adequado para o uso e ocupação. O objetivo do artigo é fornecer uma revisão da literatura abrangente atual de matérias publicadas nos últimos 70 anos sobre o tema. Foram consultados portais de publicações científicas, periódicos, anais de congressos, biblioteca virtual das associações científicas e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações com busca das palavras chaves solos expansivos e estabilização química. Foram encontradas 78 publicações, destas 44% foram publicadas na década de 2010, os materiais mais utilizados para a formação dos compósitos são Cal, Cinzas, Cimento e derivados de Sódio. Os compósitos mais utilizados foram com cal hidratada (57%) e com cinzas (32%). A formação dos compósitos com dois ou três materiais reduz a expansividade, a tensão de expansão e a propagação e formação de fissuras nos solos expansivos.

Palavras-Chave: Solos expansivos, aditivos químicos, estabilização química.



Introdução

Solos expansivos são solos não saturados que apresentam variação volumétrica com a mudança de sucção. Esses solos aumentam de volume quando a sucção diminui e contraem quando a sucção aumenta em seus vazios. A magnitude da expansão depende de fatores intrínsecos ao solo (distribuição do ar nos vazios, tipo de mineral argílico presente na fração argila e microestrutura do solo) e de fatores externos relacionados os condicionantes ambientais e do estado tensional em que se encontra o solo e do que será submetido (Chen, 1988; Ferreira, Paiva & Moraes, 2017).

Solo expansivo é um solo problemático para a Engenharia Civil, Ciência dos Solos e para o uso e ocupações. Em períodos chuvosos aumentam de volume, apresentam consistência plástica e pegajosa e redução de resistência ao cisalhamento, dificultando o manejo do solo nas práticas agrícolas, favorecendo o adensamento das camadas mais superficiais por pisoteio dos animais e pelas máquinas agrícolas, (Mitchell, 1996; Biassusi et al., 1999; Petry & Little, 2002; Flores et al., 2007; Moraes et al., 2011). O aumento de volume é devido à hidratação da dupla camada dos argilominerais expansivos do tipo 2:1. A expansão do solo exerce uma tensão de expansão, de baixo para cima, nas edificações de engenharia que pode ser superior às transmitidas de cima para baixo. Cuidados especiais devem ser dados principalmente em edificações de menor porte e em canais de irrigação, causando patologias ou mesmo a ruptura dos elementos estruturais (Ferreira & Ferreira, 2009; Ikeagwuani & Nwonu, 2019).

Em períodos de estiagem com a perda de umidade, a sucção do solo cresce, as tensões superficiais aumentam e o fendilhamento superficial aparece. Há formação de aglomerados internos favorecendo o aparecimento de uma macroestrutura e a consistência do solo torna-se dura. Essas condições dificultam as práticas agrícolas, o desenvolvimento da cobertura vegetal e propicia o aparecimento de fissuras, que se estende por toda a capa ativa do solo (Yu et al., 2022). As edificações de Engenharia Civil, em especial as de infraestrutura como: vias de acesso, pavimentação, canais de irrigação e conjuntos habitacionais podem apresentar trincas, fissuras, rachaduras comprometendo o desempenho quanto ao uso e ocupação do solo. Os condicionantes climatológicos influenciam comportamento tensão, deformação e resistência de solos expansivos (Moraes et al., 2017; Pilares-Hualpa et al., 2021).

Solos potencialmente expansivos são encontrados em todo o mundo, em regiões onde a

evapotranspiração excede a precipitação, regiões semiáridas e de clima tropical e temperado (Schreiner, 1987; Vilar & Ferreira, 2015). Os custos financeiros para recuperação das edificações podem ser maiores do que os danos causados por inundações, tornados e furacões em alguns países, tanto para os proprietários e associações de seguros quanto para o poder público (Nelson & Miller, 1992; Driscoll & Crilly, 2000; Murthy, 2003). No Brasil já foram encontrados solos expansivos em todas as regiões do país (Costa Nunes et al., 1982; Vilar & Ferreira, 2015), entretanto não há registro dos custos financeiros dos danos.

Existem diferentes técnicas de estabilização dos solos expansivos: a mecânica, a química ou a utilização das duas técnicas. A estabilização mecânica compreende a adição de um material inerte (normalmente a areia) em substituição parcial do solo expansivo e a compactação mecânica, sem modificação do argilomineral no composto e sim redução da quantidade de argilominerais expansivos (Moraes et al., 2017). As melhorias da estabilização química nas propriedades geotécnicas de são atribuídas a quatro reações básicas: troca catiônica, floculação e aglomeração, carbonatação e, finalmente, à reação pozolânica (Eades & Grim, 1966; Nalbantoglu, 2006; Al-Mukhtar et al., 2010; Amin Soltani et al., 2021) A estabilização do solo é utilizada para melhorar as propriedades físicas, ou seja, a permeabilidade, a plasticidade, capacidade de suporte, estabilidade e durabilidade do solo. E o uso de aditivos químicos ajuda a melhorar as suas características (Rosales et al., 2020).

O objetivo deste artigo é fornecer uma revisão da literatura abrangente e atual de pesquisas publicadas nos últimos 70 anos, sobre a estabilização química dos solos expansivos por todo o mundo.

Material e Métodos

O estudo consiste em uma pesquisa bibliográfica que efetivamente avalia os principais estudos sobre o tema estabilização química dos solos. É comum desenvolver um estudo bibliométrico que avalie as publicações mais relevantes, visando dar subsídio ao desenvolvimento da pesquisa, sem restringir as fontes do material.

Foram consultados diversos instrumentos de publicação: portais de publicações científicas, periódicos, anais de congressos, biblioteca virtual das associações científicas e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), publicados nos últimos 70 anos. Foram levantadas cerca de 200 publicações, sendo selecionados 78 artigos para o estudo da arte, que foram reunidos

por ano de publicação, por continente de origem do primeiro autor e por material que foi adicionado ao solo expansivo para formar os compósitos. Quando então, foi realizada uma visão sistêmica sobre os estudos encontrados.

Essas pesquisas desenvolvidas sobre solos expansivos utilizam diferentes metodologias para identificação desses solos e dos minerais básicos constituintes, definir os fatores que influenciam na expansividade do solo e por consequência, como se dará a sua estabilização.

Identificação de solos expansivos

Schreiner (1988), Ferreira (1995) e Asuri & Keshavamurthy (2016) utilizaram dois métodos para identificação de solos expansivos. O primeiro, indireto faz uso de propriedades de índice do solo, como por exemplo, limite de liquidez, encolhimento, composição percentual do tamanho das argilas dos solos. No segundo, os métodos diretos verificam o potencial de um solo diretamente. Segundo Constantino (2018), os métodos diretos utilizam a expansão “livre” e tensão de expansão, obtidas em laboratório. Os solos expansivos podem ser facilmente identificados devido a sua alta plasticidade, alto potencial de expansão e encolhimento (Ikeagwuani & Nwonu, 2019).

Minerais básicos do solo

Os principais argilominerais formadores constituintes dos solos expansivos, destacam-se caulinita, ilita, montmorilonita e vermiculita. A estrutura mineralógica é, normalmente, cristalina. Quimicamente são silicatos cujas redes são formadas por elementos tetraédricos e octaédricos (Delgado, 1986).

Segundo Caputo & Caputo (2022), a montmorilonita é o mineral argiloso com propriedades expansivas mais acentuadas. São estruturalmente formadas por alumínio e silício. A ligação entre elas, não é forte o suficiente para impedir a entrada das moléculas de água, tornando assim, as argilas montmorilonitas muito expansivas, e, portanto, instáveis na presença de água; a ilita possui estrutura similar à da montmorilonita, mas possuindo composição química diferente. São estruturas semelhante às montmorilonitas, entretanto menos expansiva, ou seja, não é permitida a entrada de água entre as unidades elementares); as caulinitas são formadas por silício e alumínio, que se ligam alternadamente, tornando-se uma estrutura rígida. Entretanto, as argilas cauliniticas na presença de água são relativamente estáveis.

Segundo Paiva (2009), a caulinita é uma estrutura que resiste a penetração de água nas

camadas por ser muito estável, mas quando está em regime de saturação é considerada não expansiva. A vermiculita possui expansão restringida quando comparada com a montmorilonita na presença de água e outras moléculas polares (Pereira, 2004). A capacidade de expansão da vermiculita em presença de cátions bivalentes é menor do que a montmorilonita, mas para cátions monovalentes é variável (Carcedo et al., 1986).

Fatores que influenciam na expansividade do solo

Segundo Oliveira, Jesus & Miranda (2006), o fenômeno de expansão dos solos envolve diversos fatores que influenciam e interagem entre si, tanto na expansão e na contração, como a composição das argilas (argilomineral) e os fatores ambientais (clima, natureza do fluido, grau de saturação). Segundo Ferreira & Ferreira (2009), a disponibilidade de água é fator de maior influência na expansão do solo. Com as mudanças sazonais de umidade ao longo do ano e a precipitação/evapotranspiração, tem-se as oscilações de umidade na superfície do terreno.

Estabilização do solo

A estabilização visa reduzir a variação de volume, aumentar a resistência e diminuir (ou aumentar) a permeabilidade do solo submetido a variação de carga externa e aos condicionantes climatológicos (Ferreira, 1995; Morais, 2018).

A utilização desses mecanismos afeta a mudança de volume dos solos potencialmente expansivos (Ferreira, 1995). Contudo, a eficácia submete-se a condição do solo em termos de propriedades físicas e químicas (Singh & Sharma, 2017), das propriedades do estabilizador e do tipo de construção (L-RAWAS, 2002).

Cristelo (2001) classifica as técnicas de melhoramento dos solos em três grupos: a estabilização mecânica, na qual as características do solo são melhoradas através de um arranjo das partículas constituintes e/ou recorrendo a soluções de sua composição granulométrica; a estabilização física, na qual as propriedades do solo são alteradas através do calor, da eletricidade etc.; e a estabilização química, na qual as propriedades do solo são alteradas por meio de aditivos químicos.

A escolha do método de estabilização de um solo depende dos fatores econômicos, do objetivo do estudo, das características dos materiais aditivos e das características do solo, as quais devem ser corrigidas pela estabilização (Albuquerque et al., 2020).

Segundo Petry & Little (2002), as empreiteiras, arquitetos e engenheiros, tentaram de muitas formas realizar a estabilização dos solos potencialmente expansivos. Inicialmente

utilizavam a estabilização mecânica, mas verificou-se, também, a necessidade de alteração das propriedades físico-químicas dos solos para estabilizá-los. Em meados nos anos 1950, começaram a expor os sucessos na estabilização química dos solos expansivos.

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os principais estudos reportados na literatura técnica sobre a estabilização de solos expansivos e os correspondentes aditivos químicos utilizados dos anos 50 até os dias atuais.

Tabela 1. Evolução da estabilização química em solos expansivos. Fonte: Medeiros et al. (2023).

Autor	Aditivo	Local	Resultados das Pesquisas
Barshad (1950)	-	-	Efeitos de cátions intercalados, bem como a natureza da substância, sobre a expansão dos solos.
Chu et al. (1955)	Cinzas volantes e cal	Texas, Virginia, Iowa e Kentucky	As misturas contendo 25% de cal e cinzas apresentaram resistências mais altas do que as misturas com 15%.
Jones (1958)	Cal hidratada e cimento	Vale Central da Califórnia	O cimento reduziu o encolhimento do solo depois de seco, contudo a cal foi superior com relação à deterioração pela ação de umedecimento e secagem.
Carroll (1959)	Cal	-	As reações são devidas a composição química do mineral e dos elementos químicos (troca iônica em argilas).
Hilt & Davidson (1960)	Cal	Iowa, Texas, Michigan, Illinois, Carolina do Norte e Virginia	Em solos caulínticos e montmoriloníticos obtiveram ganho de resistência apenas com a cal, mas o clorítico e elítico necessitaram da adição do cimento juntamente com a cal para obter aumento de resistência.
Davidson et al. [1961]	Fosfato de sódio, carbonato de sódio ou hidróxido de sódio	Iowa	O carbonato de sódio e o fosfato de sódio não são tão promissores quanto o hidróxido de sódio para melhorar a estabilização da cal de solos argilosos.
Anday (1960)	Cal	Virginia	Indicação de uma previsão de aumento da resistência com base na cura laboratorial.
Mitchell & Hooper (1961)	Cal	Califórnia	Um tratamento com 4% de cal foi considerado como um aditivo estabilizador para a argila expansiva. Entretanto, há melhoria na resistência não foi elevada; no entanto, a eficácia da cal na redução do inchaço.
Ruff & Davidson (1961)	Cal e silicato de sódio	Iowa	Das combinações de cal e silicato analisadas, a mistura ideal para resistência máxima foi de 6% de cal mais 4% de silicato.
Eades & Grim (1963)	Cal	Virginia	Com base nos resultados dos três projetos de campo, pode-se concluir que com cal hidratada há um aumento da resistência, devido à formação de novos minerais.
Anday (1963)	Cal	Virginia	Desenvolvimento da reação pozolânica, investigando o ganho das forças dos solos curados em campo e no laboratório.
Mateos (1964)	Cinzas volantes	-	Analisou vários tipos de cinzas volantes, onde constatou que algumas cinzas volantes possuem qualidades cimentícias sem adição de cal.
Diamond & Kinter (1965)	Cal	Texas	Profunda compreensão do mecanismo de como as moléculas hidróxido de cálcio interatuam na superfície dos minerais de argila para modificar a superfície e estabilizar a argila. Necessidade da ocorrência da reação pozolânica para aumentar a resistência e reduzir a plasticidade.
Walker & Karabulut (1965)	Cal	Virginia	Analisaram o efeito do congelamento e descongelamento de solos estabilizados com adição de cal. Verificou-se aumento da resistência com a cal, entretanto, sofreu diminuição na resistência à compressão quando exposto ao congelamento e descongelamento.
Laguros (1965)	Cal hidratada e aditivos químicos (hidróxido de sódio, cloreto de cálcio e ortossilicato de sódio)	Texas	A estabilização do solo com a cal oferece algumas promessas que se tornam consideráveis com o uso de aditivos químicos, entretanto a adição de produtos químicos não melhora as propriedades de consistência das misturas.
Townsend & Klym (1966)	Cal	Canadá	Durabilidade de solos estabilizados com cal
Lundy & Greenfield (1968)	Cal	Pensilvânia	Primeiros a estudar a estabilização do solo por injeção de pasta de cal de alta pressão

Carroll & Starkey (1971)	Ácido clorídrico, ácido acético, hidróxido de sódio, cloreto de sódio e água do mar natural.	Wyoming, Kentucky, Illinois, Utah, Virginia, Guam.	Descobertas sobre a reatividade de minerais de argila com ácidos e alcalinos, o que desencadeou o uso de outros agentes químicos além da cal para melhorar as propriedades físicas do solo expansivo.
Ozier & Moore (1977)	Cal de sal	Oklahoma, Alabama	Fatores que interferem na força de compressão não confinada de uma argila tratada com cal de sal, de forma a determinar se pequenas quantidades de cloreto de sódio podem acelerar o processo de estabilização.
Brandl (1981)	Cal, cimento, hidróxido de sódio, cloreto de cálcio e cloreto de sódio.	Estados Unidos	Os fatores de influência das características são extremamente dependentes do tempo de reação, teor de água e o tipo de cura das amostras.
Jeyapalan, Jr. & Lytton (1981)	-	-	Revisão sobre os métodos de tratamentos de solos expansivos, onde acrescenta que o tratamento químico é o mais utilizado.
Kennedy et al. (1987)	Cal e Cimento	Texas	Os solos expansivos de alta plasticidade tratados com cal obtiveram uma maior resistência à compressão do que os tratados com cimento.
Bell (1989)	Cal	-	Os teores de cal normalmente são baseados no efeito de várias adições da cal, ou seja, uma variação de misturas de cal-solo pode ser utilizada de forma a alcançar diferentes objetivos.
McCallister & Petry (1987)	Cal	Texas	Indicaram que para fornecer durabilidade, a porcentagem da cal adicionada necessita ser suficiente para gerar reações pozolânicas de longo prazo e também grandes formações de silicato de cálcio.
Basma & Tuncer (1991)	Cal	Jordânia	O efeito da cal na mudança de volume e compressibilidade das argilas expansivas (mudanças nas propriedades físicas pela adição da cal diminuindo a expansividade do solo).
McCallister & Petry (1991)	Cal	Texas	Verificaram as mudanças nas propriedades físicas causadas por lixiviação.
Nicholson et al. (1994)	Cal e cinzas volantes	Haváí	Obtendo melhorias na resistência, diminuição da plasticidade e redução do inchaço.
Bell (1996)	Cal	-	As propriedades da cal no solo variam e dependem do tipo de solo argiloso, a duração da cura e o método. Quando a cal é adicionada ao solo, os íons de cálcio são combinados ou absorvidos pelos minerais da argila e essas mudanças continuam até o ponto de fixação.
Attom & Al-Sharif (1997)	Resíduos de azeitona queimada	Jordânia	Diminuição da plasticidade, aumentou a densidade seca e o aumento resistência à compressão.
Miller & Azad (2000)	Pó de forno de cimento	Oklahoma	Redução do índice de plasticidade de solo.
Çokça (2001)	Cinzas Volantes de classe C	-	Obteve resultados favoráveis para se realizar a estabilização do solo, onde foram comparados com a estabilização utilizando cal e cimento.
Nalbantoğlu (2004)	Cinzas Volantes	Chipre	Com o uso de cinzas volantes de forma a reduzir o seu potencial de expansão e constatou que o tratamento com as cinzas é eficaz.
Ribeiro & Conciani (2005)	Cal hidratada	Cuiabá	Analisa a expansividade do solo saprolítico de filito, concluindo que a estabilização com cal é utilizada para ganho de resistência e também para problemas químicos.
Punthutaecha (2006)	Cinzas volantes classe F, fibras de polipropileno e fibras de náilon	Texas	O solo estabilizado com cinzas mostrou melhorias na redução das características de expansão, contração e plasticidade em 20 a 80%, enquanto o tratamento com fibras resultou em melhorias variadas.
Okagbue (2007)	Cinza de madeira	Nigéria	O ganho de força teve vida curta devido a sua resistência diminuir após 7-14 dias de cura.
Brooks (2009)	Cinza de casca de arroz e cinzas volantes	Filadélfia	Resultado favorável para utilização dessa estabilização para subleito.
Santos (2009)	Emulsão asfáltica	Sergipe	No solo argiloso observou-se diminuição no processo expansivo do solo devido à ação impermeabilizante da emulsão asfáltica, evitando que a saturação do solo influenciasse na sua deformação.
Oliveira (2010)	Cal	Ribeirão das Neves/MG	Vantagens como aditivo estabilizador do solo, comprovando a redução da expansão e redução de espessura final do pavimento.

Kawahashi et al. (2010)	Ligantes com alto teor de escória	São Paulo	Resultados positivos para o controle da expansão, entretanto sem alteração significativa quanto ao módulo de resiliência das misturas.
Vizcarra (2010)	Cinzas de resíduos sólido urbano (RSU)	Campo Grande/RJ	Diminuição da expansividade do solo e um comportamento mecânico compatível há um pavimento de baixa intensidade de tráfego.
Seco et al. (2010)	Cal, gesso, óxido de magnésio, cinzas de casca do arroz, de carvão, de aço, enchimento de aluminato	Tudela (Espanha)	A cinza de casca de arroz apresentou maior eficácia nas capacidades mecânicas do solo.
Yadu, Tripathi & Singh (2011)	Cinza de casca de arroz e cinzas volantes	Chhattisgarh (Índia)	Redução no índice de plasticidade e densidade do solo.
Al-Mukhtar et al. (2012)	Cal	-	As melhorias das propriedades geotécnicas que surgem nas reações cal-argila, principalmente uma reação pozolânica, por meio de uma análise microscópica.
Dash & Hussain (2012)	Cal	-	O tratamento com cal deve ser evitado a solos ricos em sílica, devido o gel de sílica reter uma grande quantidade de água, fazendo com que haja o aumento da plasticidade e do inchaço.
Obuzor et al. (2012)	Escória de alto-forno granulada moída ativado com cal	-	Sua utilização podem ser duráveis nas camadas estruturais de estradas/ aterros.
Barbosa (2013)	Cal	Cabrobó/PE	Resultados positivos do comportamento geotécnico do solo argiloso potencialmente expansivo, estabilizado com cal.
Celik & Nalbantoğlu (2013)	Escória e cal	Chipre	Estudo dos efeitos nas propriedades de expansão de solos contendo sulfato estabilizado com cal. Os resultados dos ensaios mostraram que a cal misturada a escória melhorou a plasticidade e o potencial de expansão.
Saride et al. (2013)	Cal e cimento	Texas	Estudo para compreender os mecanismos comportamentais de solos expansivos tratados com esses aditivos.
Fattah, Rahil & Al-Soudany (2013)	Cinza de casca de arroz	Iraque	Verificou-se uma redução no limite líquido e também no índice de plasticidade.
Khemissa & Mahamedi (2014)	Cal e cimento	Argélia	Melhores desempenhos com o tratamento misto com 8% de cimento e 4% de cal.
Sabat & Pradhan (2014)	Cinzas volantes reforçadas com fibra de polipropileno.	-	A porcentagem ideal de fibra de polipropileno para reforço de solo expansivo estabilizado com porcentagem ideal de cinza volante (20%) é de 1% e o comprimento ideal de 12 mm. Pode-se obter uma economia 7% e 13,6% no custo de construção por metro quadrado de área de pavimento.
Malekzadeh & Bilsel (2014)	Cinza de Posidonia oceanica (PO)	Chipre do Norte	O uso de 10% de PO, que é uma alga marinha mais abundante do Mar Mediterrâneo, apresentou uma redução de intumescimento e aumento de resistência à compressão.
Modarres & Nosoudy (2015)	Residuais de carvão e cal	Irã	Os resultados obtidos através das análises de mineralógica e microestrutural indicaram mudanças substanciais na estrutura do solo após a adição dos aditivos.
Paiva et al. (2016)	Cal	Paulista/PE	A-expansão “livre” e da tensão de expansão tornaram-se praticamente nulos com o acréscimo de 5% de cal hidratada.
Goodarzi et al. (2016)	Cimento e sílica ativa	Irã	Com base nas análises de raio X e microscopia eletrônica de varredura, a incorporação de sílica ativa na matriz cimentícia prolonga a formação de novos compostos cimentantes e proporciona uma microestrutura mais densa.
Michael, Singh & Kesharwani (2016)	Cinza da manga	Índia	Os resultados mostraram potencial para melhorar as propriedades do solo.
Liu et al. (2017)	Acetato de polivinila	China	Efeito nas propriedades de dilatação e contração do solo expansivo.
James, Pandian & Switzer. (2017)	Cinza de casca de ovo e cal	Índia	Aumento na resistência inicial e uma redução da plasticidade.
Mousavi (2017)	Cinza de turfa	Malásia	Êxito no acréscimo da cinza de turfa pode substituir o cimento como aditivo de estabilização.
Morais (2017)	Solo natural	Paulista/PE	O solo expansivo na condição natural exibiu alto potencial de expansão. Chegou a conclusão que qualquer tipo de construção que venha a ser executada sobre este solo ou com este solo, necessita ser levado em consideração o período climático, o grau de expansividade e maneiras de estabilização.

Tenório (2018)	Resíduo de mármore e cal	Paulista/PE	Verificou que o resíduo pode controlar a expansão do solo, entretanto ele se comporta com um ativo inerte, sem provocar reações químicas.
James & Pandian (2018)	Bagaço de cana-de-açúcar e cal	Índia	Aumentou a resistência imediata, precoce e tardia quando comparado com o solo estabilizado com cal.
James et al. (2017)	Cal, açúcar mascavo e pó de noz	Índia	A adição de pó de noz resultou em um aumento na resistência do solo estabilizado.
Silva (2018)	Cinza de casca de arroz e cal	Agrestina/PE	Redução significativamente da expansão, influenciando nas características físicas e químicas.
Constantino (2018)	Cinza de casca de arroz	Paulista/PE	Redução da expansão “livre” e a da tensão de expansão.
Liu et al. (2019)	Cinza de casca de arroz e resíduo de carboneto de cálcio	China	O mecanismo apresentou eficiência de substituição, reação de coagulação e troca iônica.
Bezerra (2019)	Cinza de casca de arroz (CCA)	Brejo da Madre de Deus/PE	Com a adição da CCA, houve redução da expansão “livre” e da tensão de expansão do solo. A porcentagem que se mostrou eficaz para estabilizar o solo foi de 20%.
Lacerda (2019)	Cinza de casca de arroz (CCA)	Cabrobó/PE	Foram analisados dois solos C1 com baixa expansividade e C2 com média expansividade. Com o acréscimo de 10% de CCA em C1, observou a redução da expansão e da tensão de expansão e o solo C2 apresentou redução da tensão de expansão com 8% de CCA. Houve redução na resistência a tração nos dois solos em todas os percentuais de CCA.
Drumond (2019)	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)	Paulista/PE	Com a inserção da CBCA o solo apresentou redução da expansão “livre” e pressão de expansão, com isso esse aditivo pode ser utilizado dependendo das características do projeto.
Zhang, Zhang & Hong (2019)	Álcool polivinílico e carbonato de potássio	-	Todos os resultados dos ensaios mostram que a combinação é capaz de estabilizar efetivamente o solo expansivo natural e aumentar a resistência ao cisalhamento, e além disso, é possível pulverizar diretamente a solução estabilizadora na superfície do solo para formar uma camada relativamente espessa do solo expansivo estabilizado.
Naseem et al. (2019)	Pó de borracha de pneu e pó de forno de cimento	-	Êxito com a adição de 5% de pó de borracha de pneu e 10% de pó de forno de cimento na estabilização no solo, do ponto de vista das características de plasticidade e resistência.
Amu et al. (2020)	Cinza de palha de cana de açúcar no solo estabilizado com cal	Nigéria	Objetivo de melhorar as condições geotécnicas das estruturas do solo.
Rosales et al. (2020)	Nanomateriais comerciais	Espanha	Melhora no comportamento da camada de sub-base estabilizada. Através da avaliação da vida útil, o uso de nanomateriais reduz o impacto ambiental associado à estabilização do solo.
Sofwan & Nurdin (2020)	Cimento e óxido de ferro.	-	Melhoria da capacidade de suporte do solo expansivo
Bezerra (2020)	Areia, Cal e Cinza de Casca de Arroz (CCA)	Paulista/PE	Os resultados obtidos no estudo com a adição de areia, cal ou CCA indica que o método promove a redução do processo de fissuração por ressecamento considerando as reações e substituições das partículas do solo com os materiais.
Guedes et al. (2021)	Cimento	Paulista/PE	Estudo de uma nova metodologia de dosagem, onde os resultados exibiram o aumento da resistência em decorrência do aumento da porcentagem de cimento e com a diminuição da porosidade.
Al-Atroush et al. (2021)	Espuma de poliuretano hidrofóbica	-	Redução do potencial de expansão e fissuração por retração.
Dinesh, Indhumathi & Pichumani (2021)	Escória de cobre e cinza de serragem	-	Resultados satisfatórios para estabilização do solo, como isso, o uso de resíduos sólidos como aditivos estabilizadores ajudaria diretamente na diminuição dos impactos ambientais.

Na Figura 1 é apresentada a evolução dos estudos publicados sobre estabilização de solos expansivos, por décadas. Claramente, de 2010 a 2019, o volume de estudos foi bem maior do que em outras décadas. Esse cenário pode ser atribuído

ao avanço do conhecimento da interação entre solo e diferentes aditivos, a necessidade de aproveitar materiais que provavelmente seriam descartados. Um outro fator relevante é que os terrenos com os melhores solos vão sendo ocupados nas últimas

décadas, e os terrenos disponíveis para construção em geral vem apresentando solos problemáticos, entre eles os solos expansivos, necessitando assim,

de pesquisas para compreensão do comportamento desses solos e para estabilização da sua expansão.

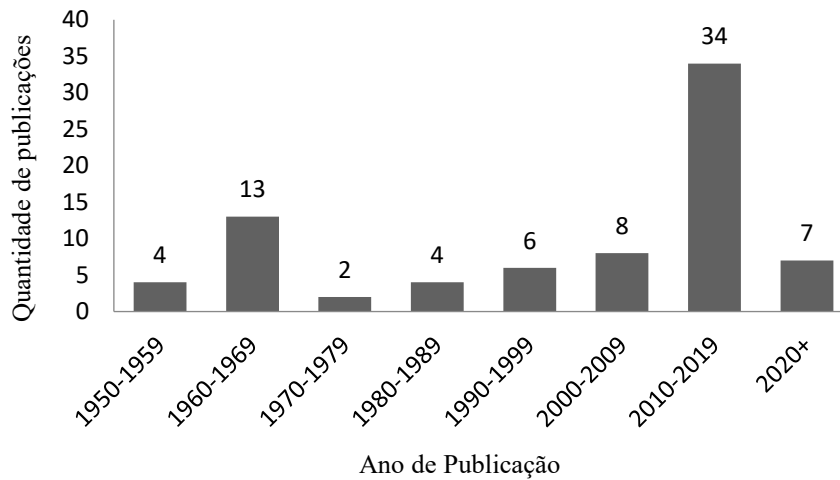


Figura 1. Evolução dos estudos publicados sobre estabilização de solos expansivos, por décadas. Fonte: Medeiros et al. (2023).

Na Figura 2 são mostrados os tipos de aditivos e os respectivos números de estudos realizados. Destaca-se que vários estudos utilizaram mais de um tipo de aditivo, na maioria das vezes para servir de comparativo. Observa-se claramente que o uso da cal para estabilização de solos expansivos foi e, ainda é amplamente estudado com relação à estabilização dos solos expansivos. De fato, existe uma tradição do uso da cal para estabilizar a expansão do solo. Trata-se de um produto industrializado e disponível em todas as regiões, no qual ocorre a reação pozolânica com

o tempo. Importante ressaltar que a cal como aditivo, modifica as características mineralógicas do solo porque aumenta a atração dos cátions de cálcio e reduz as cargas negativas da água. Com isso, ocorre uma redução do espaçamento basal, além do processo de cristalização (pozolanização), conferindo reações mais estáveis.

Entretanto, deve-se considerar os impactos ambientais causado pelo uso da cal misturada ao solo em áreas de grande extensão, mesmo com o domínio da tecnologia para compactação dos solos.

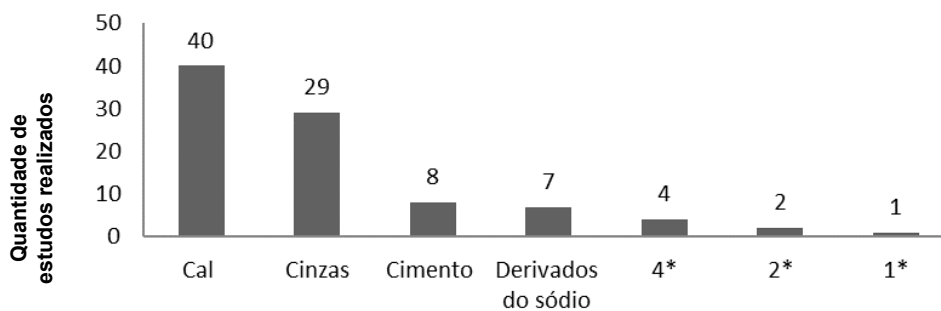


Figura 2. Estudos publicados sobre estabilização de solos expansivos por tipo de aditivo. Aditivos utilizados em quantidades repetidas; 4* = Cloretos, Escórias e Pós; 2* = Ácidos, Bagaço de cana-de-açúcar, Carbonatos, Fibras, Óxidos e Resíduos; 1* = Acetado de polivinila, Açúcar mascavo, água do mar, álcool polivinílico, Areia, Carboneto de cálcio, Emulsão Asfáltica, Enchimento de Aluminato, Espuma de poliuretano hidrofóbica, Gesso, Sílica ativa e Nanomateriais comerciais. Fonte: Medeiros et al. (2023).

A utilização de resíduos depende da sua disponibilidade local, sendo mais uma questão de redução de um passivo ambiental do que fornecimento em escala industrial. Na Figura 3a, 3b e 3c são mostrados os percentuais dos estudos

publicados sobre estabilização química de solos expansivos, por continente, do uso da cal e o uso de cinzas, respectivamente. Verifica-se que 40% dos estudos publicados sobre estabilização química de solos expansivos são oriundos do continente norte-

americano, seguido por 26% do continente sul-americano e 21% da Europa. O continente europeu e o africano somam juntos 13% dos estudos. Este fato deve-se evidentemente à presença desses solos e a consequente necessidade de estudá-los, além do domínio da tecnologia.

Quanto aos estudos que utilizaram a cal como aditivo, 57% dos estudos são de origem norte-americana, seguido por 20% do continente

sul-americano e 14% da Europa. O continente europeu e o africano somam juntos 13% dos estudos. Considerando o uso de cinzas, a América do Sul e a Ásia detém 27% dos estudos, cada, seguidos por 9% da Europa, 15% da América do Norte e 12% da África. Nota-se a preocupação em utilizar resíduos, a maioria de origem agrícola, atividade dominada pela América do Sul e Ásia.

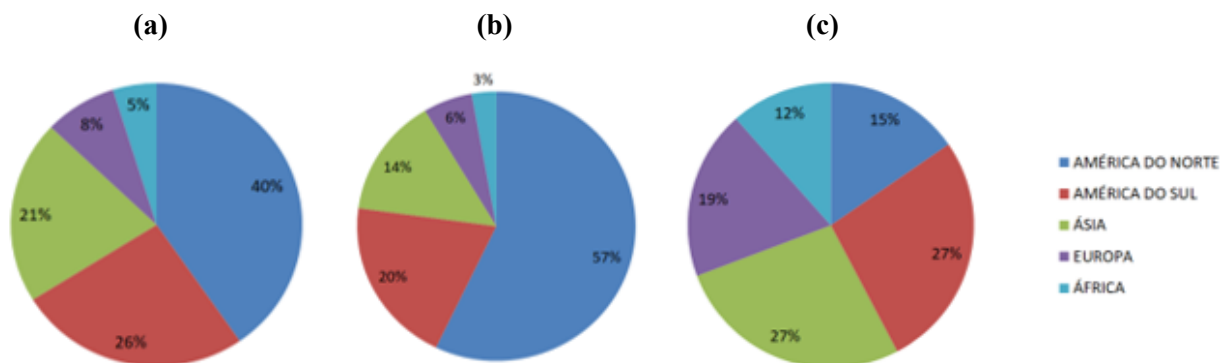


Figura 3. Estudos publicados sobre estabilização química de solos expansivos, percentual por continente: (a) de estudos publicados; (b) do uso da cal por continente; (c) de uso de cinzas por continente. Fonte: Medeiros et al. (2023).

Evolução da estabilização química do solo no Brasil e em Pernambuco

De acordo com Mahler (1994), as primeiras menções de solos expansivos no Brasil foram em um estudo no Recôncavo Baiano em um solo de Massapê feito por Sobral (1956). Após esse estudo vários outros foram desenvolvidos como Bezerra (1976) que estudou a estabilização de solos lateríticos adição de cimento, cal e asfalto diluído.

Presa (1978) apresentou um estudo sobre fundações em solos expansivos acrescentando sobre a necessidade de se realizar a estabilização desse tipo de solo, para evitar problemas nas construções. Aflitos (1981) verificou que a cal se mostrou eficiente na melhoria das propriedades de plasticidade, resistência e capacidade de carga de solos vermelhos tropicais do Norte e Nordeste do Brasil. Ao longo dos anos, outros aditivos foram analisados como emulsão asfáltica (Santos, 2009) resíduo de mármore (Tenório, 2018), cinza de casca de arroz (Constantino, 2018; Silva, 2018; Bezerra, 2019; Lacerda, 2019) e cimento (Suedes, Tenório & Silvani, 2021).

Em Pernambuco, estudos foram realizados quanto ao uso de cal hidratada e cinza de casca de arroz como aditivos químicos, são eles: Barbosa (2013), Paiva (2016), Ataíde (2017), Tenório (2018), Constantino (2018), Silva (2018), Lacerda (2019) e Bezerra (2020).

Barbosa (2013) analisou a expansividade do solo expansivo da cidade de Cabrobó-PE através de ensaios de laboratório, no seu estado

natural e nas misturas solo-cal com adição, em peso, de 3%, 5% e 7% e constatou que o acréscimo de 7% de cal hidratada ao solo obteve-se a estabilização com relação a expansão, acrescentando ainda que houve melhoras nas propriedades mecânicas do solo estabilizado.

Paiva et al. (2016) verificaram que a adição de 7% de cal indicado pelo critério de Eades & Grim (1966) não estabilizou o solo expansivo de Ipojuca-PE. A estabilização da expansividade (expansão “livre e tensão de expansão) foi obtida com a adição de 11%, devido a capacidade de cimentação da mistura solo-cal que reduz a capacidade de absorver de água das argilas saturadas. Ataíde (2017) faz uma análise dos resultados, do ponto de vista da economia financeira, da utilização da areia como agente estabilizante foi mais que satisfatória do que com a cal hidratada para os solos expansivo de Ipojuca-PE considerando um aterro compactado de grande movimentação de terra, destaca ainda como fatores influentes, a expansividade do solo no que concerne à expansão livre e tensão de expansão e distância de transporte.

Tenório (2018) empregou a cal hidratada e o resíduo de mármore como aditivos para realizar a estabilização de um solo expansivo averiguando a influência sobre a expansão e resistência do solo. Utilizou o solo de Paulista-PE e adicionou os seguintes percentuais 30%, 40% e 50% de resíduo de mármore e 2%, 4%, 6% e 8% de cal da massa seca. Através dos ensaios pode-se observar que o

resíduo de mármore conteve a expansão solo, entretanto ele não apresentou reações químicas comportando-se como um aditivo inerte. Por meio dos ensaios, averiguou que o resíduo proporcionou um acréscimo de 13 KPa na parcela da coesão efetiva do solo. Os solos estabilizados com a cal apresentaram aumento de resistência a compressão, capacidade de controlar a expansão e desenvolvimento de reações pozolânicas.

Constantino (2018) analisou o solo de Paulista-PE, assim como Tenório (2018), só que adicionou cinza de casca de arroz como aditivo estabilizante com os seguintes percentuais, em peso, 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, realizando o comparativo do solo natural e o solo com o aditivo. Obtendo uma redução na expansão “livre” de 80%, na tensão de expansão de 91% e um ganho na resistência a compressão simples e diametral para o percentual de 4%. Para que não ocorra danificações em construções, o percentual de 8% mostrou-se mais indicado.

Lacerda (2019) investigou o comportamento de dois solos expansivos da cidade de Cabrobó em seu estado natural e com adição de cinza de casca de arroz (CCA), com os seguintes percentuais, de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de forma a diminuir a expansão do solo, o primeiro (C1) solo apresentou baixa expansividade e o segundo (C2) solo apontou média expansividade. No C2, com a adição de 8%, observou a redução da expansão e o acréscimo de 10% de CCA, com redução na expansão “livre” e na tensão de expansão. A adição de CCA no solo C1 reduziu a resistência à compressão, entretanto, no solo C2 ocorreu um aumento da resistência, com 28 dias de cura, houve uma redução nos dois solos com relação a resistência a tração. Comparando os resultados obtidos com os de Barbosa (2013), concluiu-se que, tanto a CCA e a cal são adequadas para estabilizar o solo.

Silva, Bello & Ferreira (2020) adicionaram cal-hidratada nas proporções, em peso, de 3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13% e com cinza de casca de arroz (CAA), de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% ao solo expansivo Agrestina-PE. Os autores verificaram que com sobrecarga de 10 kPa a expansão “livre” é de 6,58% e a tensão de expansão, a volume constante, é de 155 kPa. A tensão de expansão do solo diminuiu a medida os teores das misturas, alcançando valores próximos a 1 kPa para porcentagem de 9% de cal-hidratada. O teor de 14% de CCA adicionado ao solo reduziu de expansão “livre” a valores 1,5%, reduzindo a tensão de expansão a valores inferiores a 10 kPa.

Bezerra (2020) verificou que o processo de propagação de fissuras por dissecação com o tempo nas misturas de solo de Paulista-PE com areia, cal

hidratada e CCA ocorreram em três estágios. No estágio inicial, na perda de umidade da mistura, praticamente não ocorreu contração ou aparecimento de fissuras. No segundo estágio de dissecação, de fissuras primárias, há um acréscimo significativo nos índices geométricos das fissuras com o tempo. No terceiro estágio, há uma redução do acréscimo dos índices geométricos no processo de propagação das fissuras com o tempo. Ocorrem fissuras em forma de “T” ou “Y” e as fissuras secundárias partem das primárias. A adição de areia, cal ou CCA ao solo expansivo de Paulista-PE reduz o processo de propagação de fissura com o tempo e a adição de CCA foi o que mais reduziu as fissuras. Ainda, segundo Bezerra (2020), a CCA apresentou menores índices geométricos no processo de propagação de fissuras com o tempo, devido ao processo de secagem.

Guedes et al. (2021) utilizaram cimento como aditivo e propôs uma nova metodologia de dosagem, onde os resultados exibiram o aumento da resistência, em decorrência do aumento do teor de cimento e com a diminuição da porosidade. Os resultados desses estudos mostraram uma previsão da resistência a compressão simples em solos expansivos com diversos teores de cimento e pesos específicos baseado metodologia de dosagem com base no índice porosidade por teor volumétrico. Com esse estudo chegaram às seguintes considerações: que com o aumento do teor de cimento a resistência à compressão do solo melhora consideravelmente, a aplicação do índice η/Civ retificado pelo coeficiente 0,26 é eficiente para antecipar a resistência a compressão do solo com base na curva de dosagem que associa a porosidade e o teor do cimento. Verificaram que a resistência à compressão é influenciada pelo teor de cimento e o peso específico do solo.

Medeiros (2023) utilizou cinza de algaroba como aditivo para estabilização de um solo expansivo localizado na cidade de Agrestina, Pernambuco. Este solo e suas misturas com cinza de casca de arroz e de cal foi estudado por Silva (2018). O uso da cinza de algaroba na estabilização de solos expansivos é pioneiro no país. Esse resíduo é amplamente disponibilizado nas inúmeras lavanderias de fábricas de roupas da região do agreste pernambucano. De acordo com Nascimento (2014), a cinza de Algaroba é rica em carbonato de cálcio, apresenta em sua microestrutura a presença predominante de cálcio (77,85%), potássio (13,81%), também apresentando outros elementos como ferro e silício. Por características pozolânica deste aditivo, são esperados resultados bastantes satisfatórios.

Verifica-se uma grande preocupação em se realizar a estabilização do solo expansivo, para que

ele possa resistir a todos os esforços a ele solicitados, além de alguns avanços importantes quanto ao impacto ambiental, como o uso de resíduos de processos produtivos industriais. É de suma importância considerar além do tipo de aditivo, também a quantidade necessária para a estabilização da expansão e a sua disponibilidade. Esses fatores incidirão diretamente na viabilidade e os custos da obra.

Conclusão

Os principais compósitos utilizados na estabilização química dos solos expansivos são solo-cal, solo cimento, solo-cinza (volante e casca de arroz), e solo-cal-cinza de casca de arroz.

Muitos pesquisadores analisam os efeitos da estabilização química nos índices físicos, na compactação, compressão simples e diametral, CBR e no comportamento de expansão do solo expansivo.

Os efeitos da estabilização química na compressibilidade, na resistência ao cisalhamento nos métodos de construção e na condutividade hidráulica dos compósitos com solo expansivo são pouco encontrados na literatura.

O comportamento da propagação de fissuras com ciclos de secagem e molhagem no solo estabilizado vem sendo mais pesquisados nas duas últimas décadas.

Estudos insignificantes também foram feitos sobre a estabilização de solos expansivos ricos em sulfato.

A utilização da estabilização química tem a maioria das aplicações em reforço do subleito do pavimento e na base de fundações superficiais. No entanto, na literatura há poucas aplicações, como material de revestimento em aterros de engenharia e material de aterro em muro de contenção.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), Processo nº IBPG-0989-3.01/21, pelo financiamento da bolsa de Mestrado de Luana Dantas de Medeiros.

Referências

Abiodun, A. A.; Nalbantoglu Z. 2015. Lime pile techniques for the improvement of clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 6, <https://doi.org/10.3390/polym13081335>

Aflitos, A. O. 1981. A influência de aditivos químicos em propriedades selecionadas e de engenharia de solos vermelhos tropicais do Norte e Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil. 266p.

<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/6899>

- Al-Atroush, M. E.; Shabbir, O.; Almeshari, B. 2021. A novel application of the hydrophobic polyurethane foam: Expansive soil stabilization. *Polymers*, 13, 8, 1335. <https://doi.org/10.3390/polym13081335>
- Albuquerque, F. C. 2020. Review of Expansive Soil Stabilization Methods. VI International Symposium on Innovation and Technology (SIINTEC), pp. 217-225.
- Al-Mukhtar M.; Lasledj A.; Alcover, J. F. ANO. Behaviour and mineralogy changes in limetreated expansive soil at 20°C, *Applied Clay Science*, 50, 191-198.
- Al-Mukhtar, M.; Khatlab, S.; Alcover, J. F. 2012. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139-140, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>
- Al-Rawas, A. A. 2002. A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils. *Geotechnical Testing Journal*, 25, (2), 199-209. <https://doi.org/10.1520/gtj11363j>
- Amu, O. O.; Fapohunda, C. A.; Adetayo, O. A. 2020. Sugarcane Straw Ash Effects on Lime Stabilized Lateritic Soil for Structural Works. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, 29, (03), 306-314. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2020.03.0027>
- Anday, M. C. 1961. Accelerated Curing for Lime-Stabilized Soils. Highway Research Board Washington, DC, pp. 1-13.
- Anday, M. C. 1963. Curing Lime-Stabilized Soils. Highway Research Board, 29, 13-26.
- Asuri, S.; Keshavamurthy, P. 2016. Expansive Soil Characterization: An Appraisal. In *Letters*, 1, 29-33. <https://doi.org/10.1007/s41403-016-0001-9>
- Ataíde, S. O. F. 2017. Análise do Comportamento de Variação de Volume Devido à Inundação de um Solo Expansivo Quando Misturado com Areia. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 117p. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29710>
- Attom, M. F.; Al-sharif, M. M. 1997. Soil stabilization with burned olive waste. *Applied Clay Science*, 13, (3), 219-230. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(98\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(98)00007-6)
- Barbosa, V. 2013. Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal. Dissertação de Mestrado, Universidade

- Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 111p.
<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/12488>
- Barshad, I. 1950. The effect of the interlayer cations on the expansion of the mica type of crystal lattice. *American Mineralogist*, 25, 225-238.
- Basma, A. A.; Tuncer, E. R. 1991. Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation and Research Record*, 1295, 52-61.
- Bell, F. G. 1989. Lime stabilization of clay soils. *Bulletin of the International Association of engineering geology*, 39, 67-74.
<https://doi.org/10.1007/BF02592537>
- Bell, F. G. 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42, 223-237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bezerra, A. L. 2019. Análise da expansão de um solo no estado natural e compactado com adição de cinza de casca de arroz no município de Brejo da Madre de Deus-PE, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 127p.
<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/35807>
- Bezerra, I. M. L. 2020. Análise da interação interpartículas e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 105p.
<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/38374>
- Bezerra, R. L. 1996. A durabilidade de solos lateríticos estabilizados com cimento e aditivos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa Paraíba, Brasil. 96p.
- Biassusi, M.; Pauletto, E. A.; Crestana, S. 1999. Estudo da deformação de um Vertissolo por meio da tomografia computadorizada de dupla energia simultânea. *Rev Bras Cienc Solo*, 23, 1-7. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000100001>
- Brandl, H. 1981. Alteration of Soil Parameters by Stabilization with Lime. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, pp. 587-594.
- Brooks, R. M. 2009. Soil stabilization with fly ash and rice husk ash. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 1, (3), 2076-734.
- Caputo, H. P.; Caputo, A. N. 2022. *Mecânica dos Solos - teoria e aplicações*. Atualizado por Paulo Albuquerque; Jean Garcia. Rio de Janeiro: LTC, 8 ed. 127p.
- Carcedo, F. J. A.; Gijon, M. F.; Mazo C. O. 1986. Mapa predictor de riesgos por expansividad de argillas en España a Escala 1:1.000.000. In: *Geologia Ambiental*. Instituto Geologico y Minero de España, Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Públicas. <http://igme.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=f4a038cbb9cb4fb19d2b90324cabbf74>
- Carroll, D. 1959. Ion exchange in clays and other minerals. *Bulletin of the Geological Society of America*, 70, (6), 749-779.
- Carroll, D.; Starkey, H. C. 1971. Reactivity of clay minerals with acids and alkalis. *Clays and Clay Minerals*, 19, (5), 321-333.
- Celik, E.; Nalbantoglu, Z. 2013. Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils. *Engineering Geology*, 163, 20-25.
- Chen, F. H. 1998. *Foundation on Expansive Soils*. New York: Elsevier, 463p.
- Chu, T. Y. 1955. Soil stabilization with lime-flyash mixtures: preliminary studies with silty and clayey soils. *Highway Research Board Bulletin*, 108, 102-111.
- Çokça, E. 2001. Use of class c fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 7, 568-573.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(568\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(568))
- Constantino, C. S. 2018. Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinzas de casca de arroz. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 97p.
<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33985>
- Nunes, A. J. C.; Vasconcelos, E. M.; Pandolfi, R. M. 1982. Ocorrências e propriedades de engenharia de solos expansivos na área do grande Recife. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Olinda/Recife, v.2, pp. 193-209.
- Cristelo, N. M. C. 2001. Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da Adição de Cal. *Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal*. 96p.

- Dash, S. K.; Hussain, M. 2012. Lime Stabilization of Soils: Reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 6, 707-714.
- Davidson, D. T.; Mateos, M.; Barnes, H. F. 1961. Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soils with chemical additives. *Highway Research Board Bulletin*, 195, 33-50.
- Delgado, A. 1986. Influência de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Universidad de Sevilla. 560p. <http://hdl.handle.net/11441/24350>
- Diamond, S.; Kinter, E. B. 1965. Mechanisms of soil-lime stabilization an interpretive review. *Highway Research Record*, pp. 83-102.
- Dinesh, A.; Indhumathi, S.; Pichumani, M. 2021. Performance assessment of copper slag and sawdust ash in stabilization of black cotton soil. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 124, 213-227.
- Driscoll, R.; Crilly, M. 2000. Subsidence damage to domestic buildings, Lessons learned and questions asked, London, Building Research Establishment. Num págs
- Drumond, M. A. M. M. 2019. Avaliação da aplicação da cinza resultante da queima do bagaço da cana-de-açúcar sobre o potencial expansivo de uma argila proveniente do município de Paulista-PE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 65p. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/36836>
- Eades, J. L.; Nichols Jr, F. P.; Grim, R. E. 1963. Formation of new minerals with lime stabilization as proven by field experiments in Virginia. *Highway. Research Board Bulletin*, 335, 31-39.
- Eades, J.; Grim, R. E. 1966. A Quick Test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Bulletin*, 139, 61-72.
- Fattah, M. Y.; Rahil, F. H.; Al-Soudany, K. Y. H. 2013. Improvement of clayey soil characteristics using rice husk ash. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 3, (1), 12-18.
- Ferreira S. R. M.; Paiva S. C.; Morais J. J. O. 2017. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista PE melhorado com cal. *Revista Matéria*, 22, Supl. 1, e11930. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0266>
- Ferreira, S. R. M. 1995. Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 379p.
- Ferreira, S. R.; Ferreira M. G. V. X. 2009. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no Semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 779-791. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400004>
- Flores, J. P. C.; Anghinoni, I.; Cassol, L. C., Carvalho, P. C. F.; Leite, J. G. D. B.; Fraga, T. I. 2007. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 31, 771-80. <https://doi.org/10.1590/S0100-0683200700040001>
- Goodarzi, A. R.; Akbari, H. R.; Salimi, M. 2016. Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Applied Clay Science*, 132-133, 675-684. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>
- Guedes, J. P. C.; Tenório, E. A. G.; Silvani, C. 2021. Previsão da resistência à compressão simples de um solo expansivo estabilizado com cimento através do índice porosidade/teor volumétrico de cimento. *Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, 59, 547-561. <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5043>
- Hilt, G. H.; Davidson, D. T. 1960. Lime fixation in clayey soils. *Highway Research Board*, 262, 20-32.
- James, J.; Karthickeyan, S.; Chidambaram, S. 2018. Effect of Curing Conditions and Freeze-Thaw Cycles on the Strength of an Expansive Soil Stabilized with a Combination of Lime, Jaggery, and Gallnut Powder. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1813563. <https://doi.org/10.1155/2018/1813563>.
- James, J.; Pandian, P. K.; Switzer, A. S. 2017. EGG shell ash as auxiliary addendum to lime stabilization of an expansive soil. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 43, (1), 15-25.
- Jeyapalan, J. K.; Rice, G.T. Jr.; Lytton, R. L. 1981. State-of-the-art Review of expansive soil Treatment Methods. 140p.
- Jones, C. W. 1958. Stabilization of expansive clay with hydrated lime and with Portland cement. *Highway Research Bulletin*, 193, 40-47.

- Kawahashi, J. 2010. Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação. *Transportes*, 18, (2), 5-16. <https://doi.org/10.14295/transportes.v18i2.418>
- Kennedy, T. W. 1987. Evaluation of Lime and Cement Stabilization. *Transportation Research Record*, 1119, 11-25.
- Khemissa, M.; Mahamedi, A. 2014. Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. *Applied Clay Science*, 95, 104-110.
- Lacerda, L. S. S. N. 2019. Análise do comportamento geotécnico de solos de Cabrobó, potencialmente expansivos, estabilizados com cinza de casca de arroz. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 82p. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33207>
- Laguros, J. G. 1965. Lime-stabilized soil properties and the beam action hypothesis. *Highway Research Record*, 92, 12-20.
- Liu, J.; Wang, Y.; Lu Y. 2017. Effect of Polyvinyl Acetate Stabilization on the Swelling-Shrinkage Properties of Expansive Soil. *International Journal of Polymer Science*. 8p. <https://doi.org/10.1155/2017/8128020>
- Liu, Y.; Chang, C. W.; Namdar, A. 2019. Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 221, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.157>
- Lundy, H. L.; Greenfield, B. J. 1968. Evaluation of deep in-situ soil stabilization by high-pressure lime-slurry injection. Committee on Lime and Lime-Fly Ash Stabilization and presented at the 47th Annual Meeting. pp 27-35.
- Mahler, C. F. 1994. Análise de obras assentes em solos colapsáveis e expansivos. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 255p.
- Malekzadeh, M.; Bilsel, H. 2014. Use of *Posidonia oceanica* ash in stabilization of expansive soils. *Marine Georesources and Geotechnology*, 32, (2), 179-186. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2012.728685>
- Mateos, M. 1964. Stabilization of Soils with Fly Ash Alone. *Highway Research Board*, 52, 59-65.
- Mccallister, L. D.; Petry, T. M. 1990. Property changes in lime treated expansive clays under continuous leaching. *Geotechnical Research Laboratory, Texas*. 428p.
- Mccallister, L. D.; Petry, T. M. 1991. Physical property changes in a lime-treated expansive clay caused by leaching. *Transportation Research Record*, 1295, 37-44.
- Medeiros, L. D. 2023. Melhoramento do comportamento mecânico de um solo estabilizado com cinza da lenha de algaroba. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco, Brasil. 106p.
- Michael, T.; Singh, S. K.; Kesharwani, M. 2016. Geotechnical Characteristics of Mango Shell Ash (Msa) on Black Cotton Soil as Pavement Material. *International Journal of Innovative Research in Science and Engineering*, 2, (09), 192-199.
- Miller, G. A.; Azad, S. 2000. Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. *Construction and Building Materials*, 14, (2), 89-97.
- Mitchell, J. K. 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*. 2nd Ed John Willey e Sons. 592p.
- Mitchell, J. K.; Hooper, D. R. 1961. Influence of time between mixing and compaction on properties of lime stabilized expansive clay. *Highway Research Bulletin* 304, *Highway Research Record*, pp. 14-31.
- Modarres, A.; Nosoudy, Y. M. 2015. Clay stabilization using coal waste and lime - technical and environmental impacts. *Applied Clay Science*, 116-117, 281-288.
- Morais C. J. 2018. Tentativa de Estabilização de um Solo Expansivo com Adição de Polímero Industrial. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe. 92p. <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/10138>
- Morais, J. J. O. 2017. Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de Paulista-PE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 127p. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26786>
- Mousavi, S. E. 2017. Stabilization of compacted clay with cement and/or lime containing peat ash. *Road Materials and Pavement Design*, 18, (6), 1304-1321.
- Murthy, V. N. S. 2003. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics*

- and Foundation Engineering. Marcel Dekker, Inc. New York. Num págs.
- Nalbantoğlu, Z. 2004. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 18, (6), 377-381.
- Nalbantoglu, Z. 2006. Lime estabilization of expansive clay. In: Al-Rawas, A. A.; Goosen, M. F. A. (Eds.) *Expansive soils: Recent advances in characterization and treatment*. London: Taylor & Francis Group. pp. 341-348.
- Nascimento, J. E. M. F. 2014. Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 99p. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11306>
- Naseem, A.; Mumtaz, W.; Fazal-e-Jalal; De Backer, H. 2019. Stabilization of Expansive Soil Using Tire Rubber Powder and Cement Kiln Dust, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 56, (1), 54-58. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09569-8>
- Nelson, J. D.; Miller, D. J. 1992. *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*, New York, John Wiley & Sons.
- Nicholson, P. G.; Kashyap, V.; Fujii, C. F. 1994. Lime and fly ash admixture improvement of tropical Hawaiian soils. *Transportation research record*, 1440, 71-78.
- Obuzor, G. N.; Kinuthia, J. M.; Robinson, R. B.; 2012. Soil stabilization with lime-activated-GGBS-A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains. *Engineering Geology*, 151, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.09.010>
- Okagbue, C. O. 2007. Stabilization of Clay Using Woodash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 1, 14-18.
- Oliveira A. G. S.; Jesus A. C.; Miranda S. B. 2006. Estudo Geológico – Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano. II Simpósio Brasileiro Jovens Geotécnicos - II Geojovem, pp.1-6.
- Oliveira, E. 2010. Emprego da cal na Estabilização de Solos Finos de Baixa Resistência e Alta Expansão: Estudo de caso no Município de Ribeirão das Neves/MG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. 171p.
- <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93651>
- Ozier, J. M.; Moore, R. K. 1977. Factors Affecting Unconfined Compressive Strength of Salt-Lime-Treated Clay. *Transportation Research Record*, 2, 17-24.
- Paiva, S. C. 2016. Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca-PE e de suas misturas com cal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 168p. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/25101>
- Paiva, S. C.; Morais, J. J. O.; Viana, R. B. 2016. Caracterização da Expansividade de um Solo Natural e Tratado com Cal do Município de Paulista-PE. *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. 8p.
- Pereira E. M. 2004. Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Brasil. 253p. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/1/8/18132/tde-09052006-144706/pt-br.php>
- Petry, T. M.; Little D. N. 2002. Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures - History, Practice, and Future. *Perspectives in Civil Engineering; Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers*, pp. 307-320.
- Pilares-Hualpa, A; Alfaro-Alejo, R.; Pilares-Calla, C. A.; Alfaro-Vilca, O. E. 2021. Characterization of expansive soils for the foundation of an irrigation canal in the Peruvian Andes, Cabana-Mañazo case. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 939, 2021, 012062. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/939/1/012062/pdf>
- Presas, E. P. 1978. Fundações em Solos Expansivos, *Universitas*, Salvador, 23, especial, pp. 99-129.
- Punthutaecha, K. 2006. Volume Change Behaviors of Expansive Soils Stabilized with Recycled Ashes and Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18, (2), 295-306.
- Rabbani, A. 2019. Utilization of Solid Wastes for the Stabilization of Expansive Soil: A Review. *International Journal for Research in Applied Science Engineering Technology*, 7, (10), 219-222.

<https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=25301>

- Ribeiro, I. Jr.; Conciani, W. 2005. Estabilização da Expansão do Solo Saprolítico de Filito com Cal Hidratada Cálcica. In: I seminário Mato-Grossense de Habitação de Interesse Social, pp. 553-561.
- Rosales, J.; Agrela, F.; Marcobal, J. R. 2020. Use of nanomaterials in the stabilization of expansive soils into a road real-scale application. *Materials*, 13, 14, 1-25.
- Ruff, C. G.; Davidson, D. T. 1961. Lime and sodium silicate stabilization of montmorillonite clay soil. *Highway Research Board proceedings*, pp. 107-128.
- Sabat, A. K.; Pradhan, A. 2014. Fiber reinforced-fly ash stabilized expansive soil mixes as subgrade material in flexible pavement. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19 T, 5757-5770.
- Santos, W. J. 2009. Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil. 141p. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4076>
- Saride, S.; Puppala, A. J.; Chikyala, S. R. 2013. Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays. *Applied Clay Science*, 85, 39-45.
- Schreiner H. D. 1988. Volume change of compacted highly plastic African clays. Thesis of Department of Civil Engineering University of London, London, England. 132p.
- Seco, A. 2010. Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science*, (51), 3, 348-352.
- Silva, J. A. 2018. Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco, Brasil. 137p. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32236>
- Silva, J. A.; Bello, M. I. M. C. V.; Ferreira, S. R. M. 2020. Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5, (2), 232-256. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.2.2020.3205.232-256>
- Singh, M.; Sharma, R. 2017. Soil Stabilization Using Industrial Waste (Wheat Husk and Sugarcane Straw Ash). *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4, 9, 589-596.
- Sofwan; Nurdin, S. 2020. Bearing Capacity Improvement of Expansive Soil: Stabilization with Cement and Iron Oxide Additive. *MATEC Web of Conferences*, 331, 02005.
- Soltani, A.; Taheri, A.; Deng, A.; Kelly, O. 2022. Stabilization of a Highly Expansive Soil Using Waste-Tire-Derived Aggregates and Lime Treatment, Case Studies in Construction Materials. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01133>
- Tenório, E. A. G. 2018. Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil. 107p.
- Townsend, D. L.; Klym, T. W. 1996. Durability of Lime-Stabilized Soils. *Highway Research Record* 139, Behavior Characteristics of Lime-Soil Mixtures. pp. 25-41.
- Vilar, O. M.; Ferreira, S. R. M. 2015. Solos colapsáveis e expansivos. In: *Solos não saturados no contexto geotécnico*, São Paulo, ABMS, 1 Ed., 15, pp. 415-440.
- Vizcarra, G. O. C. 2010. Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. 144p.
- Walker, R. D.; Karabulut, C. 1965. Effect of Freezing and Thawing on Unconfined Compressive Strength of Lime-Stabilized Soils. *Highway Research Record*, 92, 1-8.
- Yadu, L.; Tripathi, R. K.; Singh, D. 2011. Comparison of fly ash and rice husk ash stabilized black cotton soil", *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4, (6), 42-45.
- Yu, X.; Xiao, H.; Li, Z.; Qian, J.; Luo, S.; Su, H. 2022. Experimental Study on Microstructure of Unsaturated Expansive Soil Improved by MICP Method. *Appl. Sci.*, 2022, 12, 342. <https://doi.org/10.3390/app12010342>
- Zhang, F.; Zhang, L.; Hong, W. 2019. Stabilization of Expansive Soil with Polyvinyl Alcohol and Potassium Carbonate. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 7032087. <https://doi.org/10.1155/2019/7032087>
- Zhang, R.; Long, M.; Zheng, J. 2019. Comparison of environmental impacts of two alternative stabilization techniques on expansive soil slopes. *Advances in Civil Engineering*, 2019,

9454929.

<https://doi.org/10.1155/2019/9454929> .