

COMPARATIVO DE TÉCNICAS PARA MELHORIA DE SOLOS COLAPSÍVEIS: Análise da Viabilidade de Aplicação no Solo de Ibimirim-PE

COMPARISON OF TECHNIQUES FOR IMPROVEMENT OF COLLAPSIBLE SOILS: Analysis of the Feasibility of Application in the Soil of Ibimirim-PE

Geruza Izabele Gomes da Silva ¹ Jaily Moreira Xavier ¹

¹Faculdade de Integração do Sertão – FIS, Serra Talhada-PE, Brasil.

Resumo

Os solos colapsíveis são classificados como solos não saturados que possuem elevado índice de vazios e pouca umidade, podendo ter deformações bruscas devido à mudança no teor de umidade e ocasionar danos nas construções. Esse tipo de solo ganhou maior visibilidade no estado de Pernambuco após estudos acerca do conjunto habitacional de Petrolina, no ano de 1982, pelos transtornos causados à construção civil, quando se trata especialmente de fundações. Este trabalho tem o objetivo de apresentar algumas técnicas de estabilização do solo colapsível e fazer um comparativo entre elas, assim como sugerir a utilização de uma dessas técnicas para estabilização do solo de Ibimirim, localizado no interior de Pernambuco. A metodologia deste trabalho se desenvolveu a partir da determinação de critérios como custo benefício, eficácia da técnica e o tipo de solo estudado que auxiliaram na análise e comparação das técnicas, assim como foi feito com o solo do município de Ibimirim, utilizando critérios de climatologia, pedologia e microrregiões. Como resultado, as técnicas que apresentaram melhores índices foram a compactação controlada, as colunas de solo compactado e uso da cinza da casca do arroz, apresentando níveis de eficiência entre 90% e 100%. As técnicas com resultados menos satisfatórios foram a injeção de lodo e a mistura de XPS-cimento, com níveis que chegam a 70% de eficiência. De um modo geral, a técnica de compactação apresentou melhores resultados para diferentes tipos de solos e se apresentou como a técnica mais indicada para a mitigação dos efeitos do colapso no solo do município de Ibimirim.

Palavras-Chave: Solo colapsível. Solos não saturados. Soluções geotécnicas.

Abstract

Collapsible soils are classified as unsaturated soils that have a high rate of voids and low humidity, and may have sudden deformations due to changes in the moisture content and cause damage to constructions. This type of soil gained greater visibility in the state of Pernambuco after studies on the housing complex in Petrolina, in 1982, due to the disturbances caused to civil construction, especially when it came to foundations. This work aims to present some techniques for stabilization of the collapsible soil and make a comparison between them, as well as to suggest the use of one of these techniques to stabilize the soil of Ibimirim, located in the interior of Pernambuco. The methodology of this work was developed from the determination of criteria such as cost-benefit, effectiveness of the technique and the type of soil studied that helped in the analysis and comparison of the techniques, as was done with the soil of the municipality of Ibimirim, using climatology criterion pedology and microregions. As a result, the techniques with the best rates were controlled compaction, compacted soil columns and use of rice husk ash, with efficiency levels between 90% and 100%. The techniques with less satisfactory results were sludge injection and XPS-cement mixing, with levels reaching 70% efficiency. In general, the compaction technique showed better results for different types of soils and was the most suitable technique for mitigating the effects of collapse on the soil in the municipality of Ibimirim.

Key words: Collapsible soil. Unsaturated Soils. Geotechnical solutions.

Introdução

É de fundamental importância que o solo seja estudado antes do início de qualquer processo em obras de construção civil. O estudo prévio através da investigação geotécnica permite o acesso à constituição e à estrutura do solo. Uma das características muito vistas principalmente nos dias atuais e consideradas uma problemática nas construções, são os solos não saturados de comportamento colapsível, que são comumente encontrados em regiões com maior volume de evapotranspiração em função das precipitações, regiões secas como o semiárido.

Solo colapsível é um exemplo de solo não saturado que apresenta alta instabilidade, isso ocorre devido a mudanças de umidade que podem ocorrer no solo, gerando, segundo Rodrigues (2007), uma brusca variação dos índices de vazios sem que haja necessariamente uma carga aplicada. Os solos colapsíveis não se encontram na natureza na condição saturada (LOLLO, 2008), ou seja, seus vazios não são totalmente preenchidos por água, assim, Ferreira (2015) afirma que esse tipo de solo é composto por três fases: partículas sólidas, água e ar. Segundo Teixeira (2019), solos colapsíveis são problemáticos, principalmente para a construção civil, pela drástica redução de volume que podem sofrer uma vez que sua umidade é alterada, podendo gerar a diminuição de sua resistência, e se não forem tratados adequadamente, podem gerar altos prejuízos às construções tais como: recalque em áreas já construídas, resultando em trincas e rachaduras, ruptura de casas, reservatórios, canais, assim como podem ocorrer também deslizamentos de terras.

A maior parte dos solos não saturados pode ser do tipo aterro compactado, residual, depósito de solos aluviais, coluviais e eólicos (LOLLO, 2008). Em uma definição geral, colapsos são bruscas diminuições do volume de solo que podem causar patologias e recalque em construções.

O fenômeno de colapso do solo pode ser definido como a degradação do agente cimentante, que são pontes de agregação das partículas de solo e são as grandes responsáveis pela estabilidade aparente dos solos colapsíveis presente em sua estrutura através da umidade. Os solos colapsíveis em condições de baixo teor de umidade apresentam uma espécie de resistência aparente graças à pressão de sucção que se desenvolve em seus vazios (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011). É uma relação de proporções: que determinam quanto menor a umidade presente no solo, maior será sua capacidade de cargas, enquanto que quanto maior for o seu teor de umidade, menor será sua capacidade de cargas, a tensão efetiva e também a resistência, Cintra e Aoki (2009) afirmam que é o aumento do teor de umidade que produz o fenômeno de colapsibilidade.

As pontes de aderência podem ser formadas por argilas ou por carbonato de cálcio e que, por sua vez, são extremamente fortes em condições normais. Segundo Lollo (2008), estabilidade provisória ou aparente da estrutura destes solos é interrompida, portanto, quando ocorrem variações de sucção por umedecimento. De acordo com Souza Neto (2004), alguns possíveis arranjos nos solos colapsíveis dependem de seus respectivos agentes cimentantes e variam de acordo com sua formação, alguns exemplos são: por intemperismo - vínculo com partículas de silte envolvidos por areia; por lixiviação - vínculo com partículas de argila floculada; por sedimentação - é o vínculo com partículas de argila dispersas que envolvem um grão maior e pontes de argila - são formados pela agregação de argila ou silte e unidos por pontes de argilas interligadas, sua ocorrência é mais frequente em regiões tropicais, onde ocorre a lixiviação da fração fina do solo nos horizontes superficiais.

Sabe-se que nos dias atuais o número de cidades que possuem esse tipo de solo já teve aumento significativo. A literatura já demonstra estudos sobre solos colapsíveis em várias regiões do Brasil, assim como demonstrado no trabalho de Xavier (2018) mostrando a existência dos mesmos no estado de Pernambuco, em cidades como Recife, Carnaíba, Nova Rodelas, Floresta, Petrolândia, Gravatá, Santa Maria da Boa Vista e Petrolina. No entanto, segundo Campos e Santos (2019), a maioria dos estudos se destinam as regiões sul e sudeste, podendo causar a falsa impressão de que o norte e nordeste do país estão livres desse tipo de solo.

Apesar da ampla gama de estudos a respeito desses solos e de suas características, ainda existe um déficit muito grande quando se trata de estudos relacionados aos solos de Pernambuco e de como fazer o seu melhoramento, o que reforça ainda mais a importância do estudo desses solos no estado. Segundo Motta (2006), os estudos sobre solos colapsíveis no estado de Pernambuco começaram a ter destaque após a análise do solo de um conjunto habitacional em Petrolina. Diante do entendimento sobre o que o colapso do solo pode causar para as construções civis, é importante que novos projetos e técnicas de mitigação do colapso sejam estudados e viabilizados para o uso em solos pernambucanos. Também é indicado realizar a identificação e caracterização, através de ensaios laboratoriais de solos colapsíveis na maior quantidade de cidades que for possível no estado de Pernambuco.

A identificação dos solos colapsíveis pode ser realizada através dos métodos diretos e indiretos. Segundo Souza Neto *et al.* (2004), os métodos indiretos se baseiam nos resultados de ensaios de caracterização, tais como: índices físicos, ensaios expedidos pedológicos e microscopia, que geralmente estão ligados à textura dos solos. Já os métodos diretos se baseiam em avaliação e quantificação de colapso nos solos estudados. Os ensaios comumente utilizados nos métodos diretos são: os edométricos simples, duplos e ensaio de campo com o expansocolapsômetro.

Partindo do posicionamento de que esses solos existem e que em algum momento precisam necessariamente ser utilizados, surgiu necessidade de implementar técnicas que mitigassem o efeito do colapso no solo ou até mesmo que extinguisse esse efeito. As técnicas de mitigação se relacionam com melhoria do solo para que o mesmo receba as tensões vindas das edificações. A estabilização de solos é um método eficiente de tratamento de solos, fornecendo a eles um ganho estrutural, pode ser considerado um método rápido e de baixo custo (KAWAHASHI *et al.* 2010).

Pensando no melhoramento das características geotécnicas do solo, a estabilização pode se dá através do colapso induzido, tratamentos químicos e tratamentos mecânicos. O colapso induzido se trata da inundação do solo ou aumento da sobrecarga no solo. Essas ações farão com que a estrutura metaestável do solo seja quebrada, associada à compactação do solo faz com que haja o aumento da capacidade de carga e a diminuição da permeabilidade do solo. Tratamentos químicos ocorrem com a injeção de aditivos como o óxido de cálcio no solo, segundo Freitas (2016) essa ação envolve a cimentação no interior da estrutura do solo e sua resistência ao colapso. Os tratamentos mecânicos envolvem a remoção da profundidade que apresenta colapso no solo, substituindo-o por um solo que apresentem melhores características de resistência.

Com o entendimento das proporções que as deformações do solo podem tomar, esse trabalho tem como principal objetivo apresentar e caracterizar algumas das técnicas usadas para mitigar os efeitos causados pelo colapso do solo, realizando uma comparação entre elas, observando os resultados relacionados ao tipo de solo estabilizado e eficácia da técnica para aquele determinado solo. É uma pretensão do trabalho analisar também, que muitos dos solos do território pernambucano detém características de colapsividade e que as técnicas apresentadas poderão auxiliar no desenvolvimento da área geotécnica e da construção civil no estado. A metodologia será realizada através da análise das características de um solo da cidade de Ibimirim, localizada no sertão do moxotó no estado Pernambuco.

Materiais E Métodos

A metodologia empregada consistiu na realização de uma pesquisa bibliográfica, com base em autores que aplicaram métodos visando diminuir o efeito do colapso no solo. Para análise e comparação entre eles, foram desenvolvidos alguns critérios de observação, tais como: eficiência da técnica, tipo de técnica (mecânica, química ou indução), custo benefício, material utilizado e características do solo estabilizado.

Após a comparação das técnicas de mitigação, de acordo com os critérios desenvolvidos, foram observadas as características de um solo da cidade de Ibimirim-PE, que é citada por

Amorim (2004) como uma das cidades do estado que detém um solo com alta suscetibilidade ao colapso, mas que ainda não houve estudos aprofundados sobre esse efeito no solo. Com as informações analisadas e concluídas foi possível indicar uma técnica para a estabilização do solo que melhor se adequasse ao solo estudado e a realidade da cidade a qual este solo pertence.

Para avaliar a colapsividade do solo de Ibimirim e verificar a viabilidade de aplicação da técnica de mitigação, foi realizada uma comparação entre o solo da cidade e os solos citados nos trabalhos pesquisados, utilizando-se de critérios como características climatológicas, pedologia e microrregiões a qual pertencem cada solo.

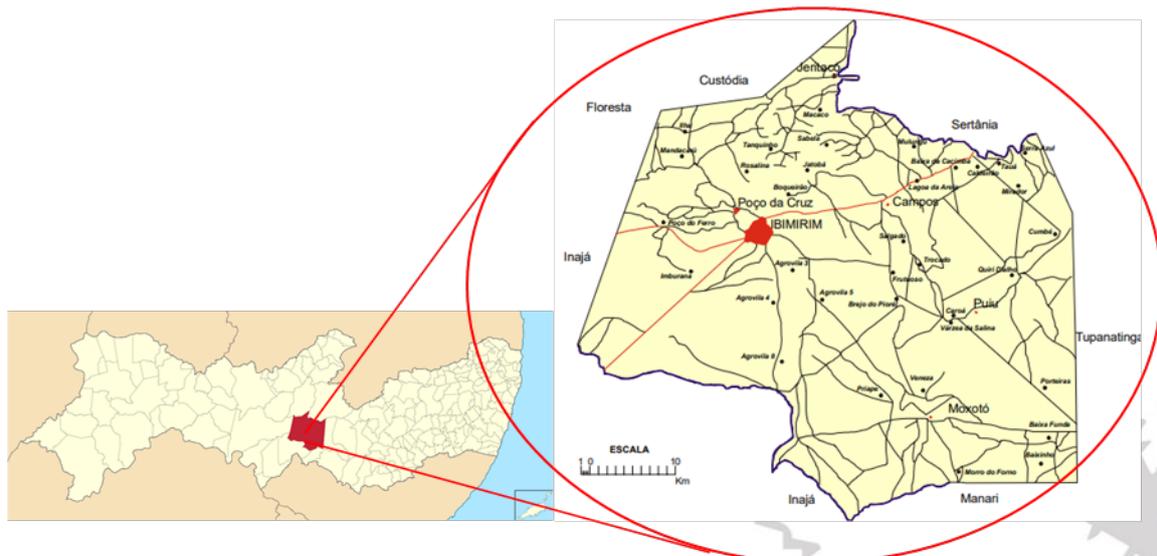
Com a visível dificuldade de estudos que abordem os solos colapsíveis de maneira geral no estado de Pernambuco, os trabalhos analisados em relação às técnicas de mitigação existentes se estenderam a várias partes do mundo que apresentassem a mesma linha de. Para uma conclusão em relação às técnicas estudadas, foi desenvolvido um resumo e neste contém a porcentagem de eficácia, desenvolvida a partir dos resultados apresentados sobre a redução do colapso com a aplicação da técnica em cada um dos trabalhos a qual maioria dos autores definiru o PC e sua respectiva redução através dos ensaios edométricos simples e duplos. Com resultados analisados foi feito um simples calculo utilizando regra de três para definir a quanto equivalia a redução do potencial de colapso (PC) em cada caso. A maioria dos autores definiram o PC através dos ensaios edométricos simples e duplos o de cada uma das técnicas apresentadas.

CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A cidade de Ibimirim – PE está situada no sertão do estado de Pernambuco, na microregião do Moxotó. Inicialmente foi distrito das cidades de Moxotó e Inajá, se elevando como município no ano de 1963. Hoje o município conta com a sede, o distrito de Moxotó, os povoados de Campos, Jeritacó, Poço da Cruz, Puiú e agrovilas Rurais, abrangendo uma área e 1.906,437km² e uma população estimada em 29.412 pessoas (IBGE, 2020). A sede da cidade está localizada a 339 km da capital do estado, Recife.

A Figura 1 representa a localização do município de Ibimirim dentro do estado de Pernambuco, bem como seu território.

Figura 1 – Localização da cidade de Ibimirim-PE.



Fonte: Adaptado de Temotéo, 2000

Resultados E Discussão

A partir da literatura pesquisada a respeito de solos colapsíveis e da alta necessidade da mitigação de seus efeitos nos solos, foi possível observar que alguns pesquisadores se empenharam em desenvolver técnicas de mitigação no intuito de subsidiar um melhor uso desse

solo sem prejudicar a construção que ele receberá. Dessa forma, foram analisados trabalhos que demonstram técnicas já desenvolvidas há algum tempo, assim como novas técnicas que ainda são experimentais, todas apresentando bons níveis de redução do colapso no solo estudado em cada trabalho. Tendo em mente a existência dessas técnicas, alguns trabalhos foram escolhidos para exemplificá-las.

CARACTERIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO COMPACTAÇÃO CONTROLADA

Um dos métodos mais práticos e eficazes de minimizar o colapso do solo é a compactação. Rollins e Rogers (1994) assinalaram que este método: diminui a quantidade de solo colapsível na zona de tensão; aumenta a profundidade que a água deve percolar antes de atingir materiais colapsíveis; e diminui a tensão induzida a qual o solo colapsível é submetido, além de diminuir os níveis de permeabilidade do solo e aumentar a resistência ao cisalhamento.

Marinho (2018) apresenta um estudo de caso realizado na cidade de Santa Maria da Boa Vista – PE, para o melhoramento de solos expansivos e colapsíveis. O solo foi identificado como areia fina, muito siltosa e com presença de pedregulhos. Foram realizados testes físicos e químicos para a caracterização do solo, assim como os ensaios endométricos simples a fim de medir as propriedades mecânicas do solo.

O estudo evidencia que foram coletadas e analisadas amostras indeformadas e deformadas. De acordo com Vargas (1978) *apud* Marinho (2018), a amostra de solo indeformada e compactada nas condições de campo são consideradas colapsíveis, uma vez que, seus potenciais de colapso obtiveram valores acima de 2%. Como resultado a pesquisa mostrou que a compactação na amostra indeformada com uma tensão de inundação de 120 kPa resulta em um potencial de colapso de 8,75%, enquanto a amostra em condições de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, mostra considerável redução no colapso, apresentando resultados 1,01% de potencial de colapso, tornando-o não colapsível.

Castro (2016) fez a análise da influência da compactação em um solo arenoso, o trabalho foi desenvolvido na cidade de Bauru – SP acerca de uma areia pouco argilosa, contendo cerca de 80% de areia e 20% de argila. O estudo foi desenvolvido a partir da análise das amostras indeformadas (solo natural) e deformadas (solo compactado) pelos métodos de classificação e ensaios edométricos simples e duplos, dando ênfase na umidade ótima e no controle de sucção, respectivamente, em cada um dos estudos.

Reafirmando mais uma vez o exposto em outros trabalhos, a autora ressaltou os bons resultados e a eficiência da técnica de compactação. O estudo de Castro (2016) se baseia também no conceito de Vargas, no qual demonstra que potenciais de colapso acima de 2% equivalem a solos colapsíveis. Para o desenvolvimento dos resultados, o trabalho tem a influência do grau de compactação em função da umidade de compactação.

Diante de todos os ensaios realizados e dos resultados obtidos por Castro (2016) afirmam que o grau de compactação em 85% apresenta potencial de colapso inferior a 2% para todas as umidades testadas (4,5%; 6,5%; 8,5% e 10,6%) para o tipo de solo estudado. Os resultados mostram que a compactação para uma umidade ótima de 10,6%, reduziu o potencial de colapso de 3,01% para 0,18%, mostrando a eficácia na mitigação do colapso do solo. Ainda apresentando os resultados, o autor afirma que o grau de compactação a 90% é suficiente para que o solo não se encontre mais em colapso. Vale salientar que a sucção do solo tem grande influência nesses resultados, por ser responsável pela rigidez do solo, sendo assim, quanto mais seco for o solo maior será sua rigidez e nesta lógica menor também será a deformação do solo.

Chagas, Moura e Carneiro (2016) mostram a redução do potencial de colapso através da compactação na cidade de Icó – PE em um solo silte argiloso. Foram realizados ensaios de caracterização, LL, LP assim como o SPT e também os ensaios edométricos simples e duplos. Foram escolhidas apenas duas sondagens à percussão (SPT), das vinte que foram feitas, que seriam as que estavam mais próximas ao local de coleta das amostras de solo.

Após estudos, o solo de Icó foi considerado como potencialmente colapsível, assim como os estudos de Marinho (2018) e Castro (2016), citados anteriormente. Percebe-se no trabalho a análise e comparação de duas amostras da cidade de Icó, uma de solo natural e outra de solo compactado. Os resultados do estudo mostraram que a compactação teve eficácia no solo de Icó. Segundo Chagas, Moura e Carneiro (2016), foi determinada a redução do potencial de colapso para 0,21%, desta forma reduzindo e praticamente extinguindo o colapso da região, tornando o solo viável para o suporte de fundações superficiais.

O trabalho de Xavier *et al.* (2018) Foi realizado em Juazeiro do Norte- CE e se trata da análise do efeito que o grau de compactação tem na eficácia da técnica de compactação em um solo colapsível. O trabalho foi desenvolvido a partir da análise de um solo areno-argiloso, feita através de sondagem SPT, ensaios de caracterização física e mecânica e ensaios edométricos.

Os autores se basearam em dois critérios para avaliação da possibilidade de colapso no solo, sendo assim, pelo o critério de Vargas (1978) o solo natural ultrapassa o valor de deformação de colapso de 2%, sendo considerado um solo colapsível, e pelo critério de Jennings e Knight (1975), que liga a gravidade causada em obras com o potencial de colapso, o solo é considerado de problema grave.

Após os ensaios, Xavier *et al.* (2018) demonstram que a compactação é um método viável, mas salienta-se que, para que esses resultados sejam alcançados é de suma importância que a compactação seja feita de forma adequada, de modo a garantir o grau de compactação exigido em projeto, neste caso um grau de compactação maior que 88% e que a uma tensão de 164 kPa o potencial de colapso é reduzido de 9% para 0,16%, indo de acordo com o critério de Vargas (1978). É importante ressaltar que o grau de compactação pode aumentar (por Norma NBR 5681) a depender do tipo de obra.

COLONAS DE SOLO LATERÍTICO COMPACTADO

O uso e eficácia da compactação para a redução ou anulação do potencial de colapso nos solos já foi comprovado por vários estudos: Freitas (2016) aprofunda esses estudos e demonstra o uso da compactação associada ao solo laterítico da cidade de São Carlos – SP. O estudo tem por finalidade analisar a utilização da compactação com solo laterítico, para amenizar o tempo e o custo da estabilização de solos colapsíveis. O solo é descrito como argiloso laterítico, tendo um nível de lençol freático que varia entre 9 m a 12 m.

O procedimento de testes foi descrito no trabalho e se basearam em dois critérios: os testes de carga de placas e a avaliação do efeito da compactação ao redor das colunas. O trabalho apresenta resultados satisfatórios para os dois critérios. Iniciando pela prova de carga, os resultados demonstram uma redução de recalque de 21,31 mm para 1,47 mm para uma tensão de 40 kPa, enquanto a compactação ao redor da coluna atinge um raio de 80 cm, indicando que a técnica pode melhorar o entorno da coluna executada. Vale salientar que a técnica tem menor custo e menor tempo de execução em relação a técnica de compactação, além de poder utilizar em sua compactação o material encontrado no local de estudo. É importante ressaltar que uma única coluna conferiu ao solo um acréscimo da capacidade de carga de 4 vezes mais.

CINZA DE CASCA DE ARROZ

A cinza de casca de arroz é um resíduo da agroindústria gerado durante o processo de secagem e parbolização dos grãos de arroz, já que a casca *in natura* é utilizada para a geração de energia (YACOURB 2017). Como a enorme quantidade de cinzas gerada não tem uma utilidade específica, ela é descartada em aterros. Estudos foram realizados para associação do CCA (Cinza de Casca de Arroz) como aditivo mineral para a produção de argamassas e concretos e, de acordo com:) Fagundes *et al.* (2015) *apud* Yacoub (2017), foi realizado um estudo substituindo-se parcialmente um solo arenoso fino por CCA, a fim de avaliar a redução do potencial de colapso do solo.

Yacoub (2017) apresenta um estudo realizado na cidade de Ilha Solteira – SP em um solo arenoso fino. O estudo contou com ensaios como caracterização física, granulometria, ensaios edométricos simples e caracterização microestrutural. Ao apresentar seus resultados o autor observou que a CCA, de acordo com a granulometria a laser, preencheu os vazios aumentando seu volume e o grau de compactação a 90% expressa um colapso insignificante. Por fim, mostrou que foram realizadas três divisões de porcentagem de adição de CCA no solo (2% a 4%, 6% a 8% e 10% a 14%). Os dois primeiros demonstraram valores de significância e eficácia para colapsos definidos como moderados. Já a terceira divisão, de porcentagem de adição de CCA mais especificamente aos 14%, demonstrou o menor potencial de colapso, indo de 9,80% para 1,94%, mostrando a eficácia na mitigação do colapso do solo.

USO DE LODO DE ESGOTO

O desenvolvimento sustentável tem se tornado cada vez mais importante para a sobrevivência do planeta, pensando nisso o trabalho de Feitosa (2009) se direciona para o uso consciente do lodo que, atualmente é tratado de despejado em rios, após seu tratamento esta matéria se torna rica matéria orgânica e nutriente. Como principal objetivo o trabalho apresenta o uso dessa matéria no melhoramento de solos colapsíveis e como agregado leve para concreto.

O estudo de Feitosa (2009) é feito com a caracterização física, química e mecânica das amostras do solo (areia siltosa) e do lodo, encontrados no IPA e na ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) Mangueira e ETE Curado respectivamente, na cidade de Goiana – PE, seguindo por ensaios edométricos simples, duplos, etc. Os testes analisados demonstraram que o solo com adição de lodo tem um peso específico de $17,00\text{kN/m}^3$ e indicaram que o acréscimo de 10% de lodo ao solo, a uma tensão de 320 kPa, resultou em um potencial de colapso igual 1,08 %, sendo assim, concluiu-se que há alterações físicas com a adição de lodo e esta técnica é adequada para o melhoramento de solos colapsíveis.

MISTURA DE CIMENTO – XPS

O uso de cimento como agente modificante das características de solos colapsíveis é uma técnica bastante utilizada e, segundo Arabani e Lasaki (2016), o mais antigo dos métodos utilizados para esta finalidade. Pensando na diminuição da quantidade do uso de cimento usado, alcançar uma técnica mais viável economicamente e a utilização de um material que pudesse substituir os vazios existentes no solo, surgiu a ideia do uso de XPS (poliestireno extrudido).

O solo analisado no trabalho de Arabani e Lasaki (2016) é um silte, presente na cidade de Ardabil no Irã, mostra um estudo, relativamente novo, sobre o uso da mistura de XPS- cimento para melhoria de solos colapsíveis no Irã. Os resultados desse experimento demonstraram que o uso da mistura se mostrou eficiente no combate ao colapso do solo, explicitando que a partir da adição de 6% de cimento os resultados já foram satisfatórios, apresentando redução do colapso de 8,76% para 1,66%.

USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

É visível o enorme crescimento da indústria da construção civil no Brasil nos últimos tempos, com esse crescimento a quantidade de resíduos também teve seu aumento relativo e como consequências surgem vários problemas ambientais como: obstrução de vias e logradouros públicos, assoreamento de rios e córregos, entre outros. Visando a melhor utilização do RCC, segundo Silva *et al.* (2016), a reciclagem desses resíduos, além de gerar economia com a limpeza urbana, diminui a exploração de novas jazidas.

Silva *et al.* (2016) faz a análise de um solo colapsível, denominada como areia fina siltosa, coletada na cidade de Petrolina-PE. A caracterização do solo foi realizada através do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e de ensaios edométricos simples. Como resultados da adição de RCC no solo foram obtidos resultados de diminuição de 5,29% para 1,35% no potencial de colapso, esses valores são apresentados para uma tensão vertical de 40 kPa e um

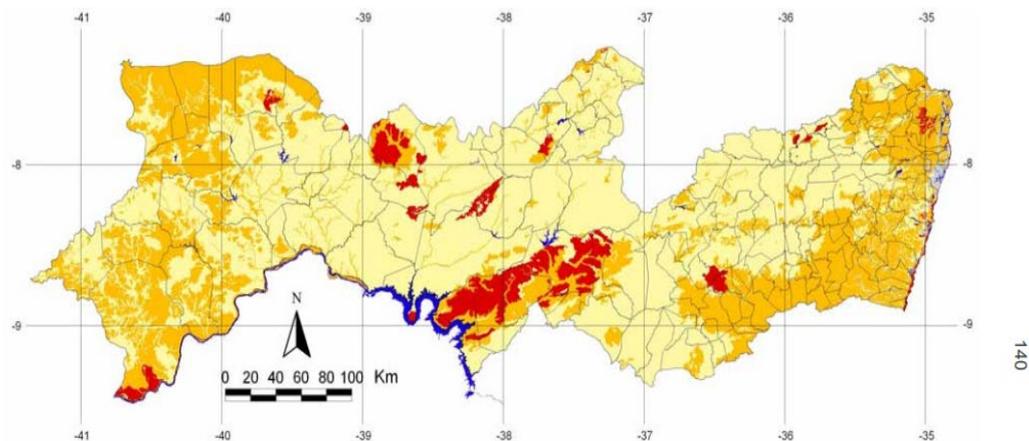
grau de compactação de 95%. De acordo com esses resultados, os autores consideram a técnica eficaz, uma vez que a mesma melhora as propriedades físicas e mecânicas do solo.

ANÁLISE PARA O SOLO DE IBIMIRIM-PE

Ibimirim – PE foi citada no trabalho de Amorim (2004) or possuir um solo com alta susceptibilidade ao colapso. O solo da cidade citada é composto por um misto de vários tipos, sendo eles Latossolo amarelo e vermelho amarelo, neossolo quartzarênico, planossolo, vertissolo, neossolo Flúvico, solo litólico, luvisolo e Pdzólico amarelo e vermelho amarelo (SILVA, 2016).

O Mapa a seguir apresenta a susceptibilidade ao colapso nos estados de Pernambuco de acordo com sua geologia, onde em vermelho estão indicados a maior incidência de solos suscetíveis ao colapso.

Figura 2- Mapa de suscetibilidade ao colapso do estado de Pernambuco



Fonte: Amorim (2004)

Numa maior concentração e com maior suscetibilidade ao colapso, de acordo com Silva (2006), pode-se destacar o neossolo quartzarênico (areia quartzosa), que tem como uma de suas principais características a textura arenosa, o que é muito comum para solos colapsíveis. É possível observar isso nos trabalhos citados anteriormente em que a maioria dos solos se trata de areias. São solos cuja estrutura é formada basicamente de grãos de quartzo, sendo portanto, altamente suscetíveis à erosão, apresentam drenagem excessiva, baixa retenção de água e lixiviação de nutriente (SPERA *et al.* 1999).

Segundo Ferreira (1989), esses solos são muito comuns em regiões áridas e semiáridas, que é justamente o caso cidade de Ibimirim. A cidade apresenta temperaturas que variam entre 35° C e 40° C nos meses mais quentes, sendo eles novembro e dezembro e temperaturas mínimas que giram em torno de 23° C nos meses de julho e agosto. Os períodos de precipitação são curtos, concentrando-se em apenas dois meses do ano, de acordo com Temóteo (2000) a precipitação média anual equivale a 513,31mm. A alternância de estações de relativa seca e precipitação intensa e o déficit de umidade causado pela evapotranspiração maior que a precipitação, característico de regiões semiáridas e áridas (FERREIRA, 1989), por esta afirmação é possível identificar que esta região detém as características climatológicas de uma região com solos colapsíveis.

COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO ESTUDADAS

Com a análise dos trabalhos citados, observou-se que as técnicas de compactação e colunas de solo compactado, (meios mecânicos), e a injeção de cinza de casca de arroz, (meio químico), apresentaram os melhores resultados para diminuir consideravelmente o colapso do solo, esses trabalhos apresentaram níveis de diminuição do colapso entre 80% e 95%, alcançando os maiores valores dentre todas as técnicas.

Para as técnicas de injeção de lodo de esgoto e adição de resíduo da construção civil, os resultados foram menos satisfatórios, gerando valores entre 60% e 75% de eficácia para as respectivas técnicas, ainda assim ambas as técnicas apresentam considerável eficácia quando se trata da mitigação dos colapsos do solo. Vale salientar que apesar do menor percentual de eficiências, as técnicas que utilizaram os meios químicos também apresentaram significativa redução do colapso estudado em cada estudo. Sendo assim, todas as pesquisas citadas neste artigo apresentaram técnicas com viabilidade para mitigação do colapso e de seus efeitos para o solo.

Para uma possível aplicação em um solo ainda não estabilizado do interior de Pernambuco, como o de Ibimirim – PE pode-se fazer a análise de duas das técnicas que apresentaram os bons resultados quando se trata da redução do potencial de colapso, sendo elas a compactação controlada e o uso de lodo de esgoto. Ambas apresentam altos índices de redução de colapso e estudos com solos parecidos, no entanto utilizam de metodologias muito diferentes. Dentro desse contexto, para uma melhor avaliação se fez necessário apresentar alguns pontos positivos e negativos em relação as duas técnicas.

A utilização do lodo de esgoto se desenvolveu em uma cidade que contém estações de tratamento esgoto (ETE) o que facilitou a obtenção da matéria prima principal de utilização, podendo dificultar a obtenção do mesmo quando o local de estabilização não tiver uma ETE para obtenção da matéria principal. O lodo não pode ser considerado como um único resíduo, uma vez que é formado por inúmeros componentes, sendo assim não pode ser considerado o mesmo material em ETE's diferentes, em cada uma delas será necessário um estudo aprofundado sobre a origem desse lodo.

Em contrapartida, a utilização deste resíduo na construção civil traz muitos benefícios, como a destinação correta, evitando a contaminação de rios. Além da utilização como estabilizante de solos colapsíveis, este material também pode ser reutilizado em outras áreas da construção civil como, por exemplo, na fabricação de concreto como agregado miúdo.

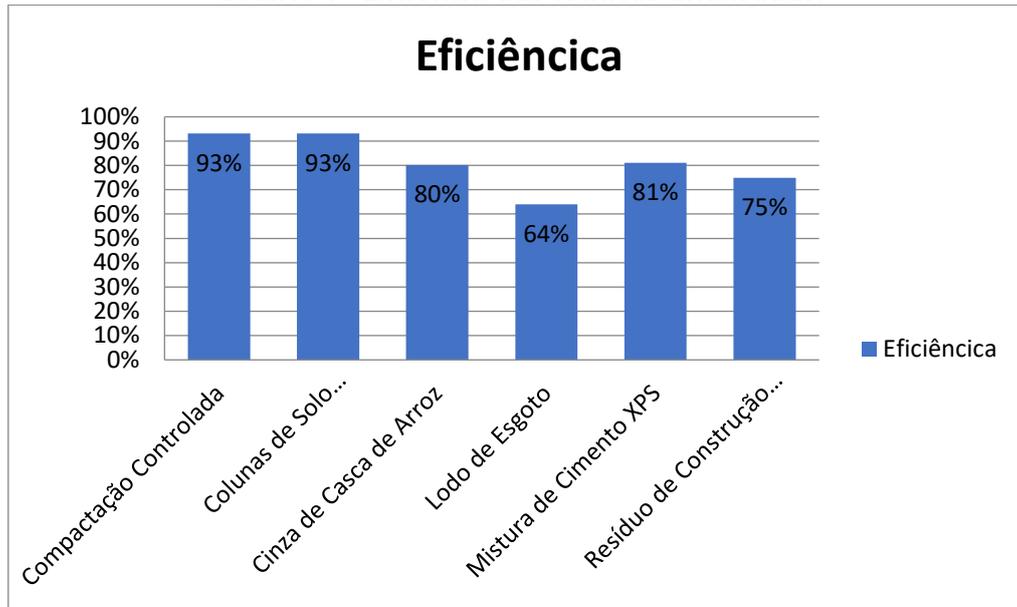
Para a compactação controlada observou-se que é de extrema importância que haja um profissional capacitado para fazer o acompanhamento, o que não se difere das outras técnicas, uma vez que essa técnica para ser realizada com êxito necessita que seu grau de compactação seja executado de acordo com o projeto.

Esta técnica é a mais utilizada desde os princípios dos estudos dos solos colapsíveis, uma vez que exibe uma enorme praticidade. O material utilizado para a realização da compactação pode ser o mesmo material retirado do solo colapsível, não sendo necessário coletá-lo em outros lugares. A compactação é um dos métodos mais antigos e por consequência o mais utilizado. Este estabilizante apresentou mais estudo em solos diferentes e ainda assim apresentou os melhores resultados de redução para todos os solos estudados, demonstrando que sua utilização pode ser utilizada em mais de um solo diferente se apresentando por consequência em cidades e estados diferentes.

Para o uso na cidade de Ibimirim – PE ambas as técnicas seriam viáveis pela utilização em solos semelhantes, entretanto vale salientar os prós e contras em relação as duas técnicas e o que define qual delas melhor se aplica ao solo da cidade. A compactação traz uma alta praticidade e viabilidade com a estabilização mecânica, necessitando de um trabalho de maior parte realizado por máquinas. Já o lodo de esgoto é um material que proporciona não só o melhoramento do solo como também do meio ambiente, melhorando as características físicas do solo.

Por outro lado, as técnicas encontrariam certa dificuldade para serem executadas na cidade, por ela ainda ser pouco desenvolvida, onde a necessidade de profissionais habilitados e que residam na cidade, disponíveis para acompanhar a técnica de compactação resultaria entraves. Já em relação ao uso do lodo de esgoto, a existência de uma ETE na cidade representaria o principal empecilho para sua execução no solo do município.

A eficiência das técnicas está representada na Figura 1, ressaltando-se que os solos que apresentaram melhor eficiência são os solos arenosos.

Gráfico 1- Eficiência das técnicas analisadas.

Fonte: Autora (2021)

No Quadro 1 é apresentado um resumo dos trabalhos analisados, demonstrando seus autores, técnicas utilizadas, tipo de solo, método de determinação do colapso, critérios de classificação e, através dos valores de percentual de colapso - PC (ou recalque) após a aplicação da técnica, demonstra a eficiência de cada técnica de mitigação.

Quadro1- Resumo de técnicas e seus resultados

Referência	Técnica de Mitigação	Tipo de Solo	Método de determinação do potencial de colapso	Crítérios de Classificação	PC após a aplicação da técnica
Arabani e Lasaki (2016)	Mistura de cimento XPS	Silte	Ensaio Edométrico Simples	ASTM D5333-03	1,66%
Castro (2016)	Compactação	Areia Ariglosa	Ensaio Edométrico Simples e Duplo	Jennings e Kight (1975)	0,18%
Chagas, Moura e Carneiro (2016)	Compactação	Silte Argiloso	Ensaio Edométrico Simples e Duplo	Reginatto e Ferrero (1973)	0,21%
Feitosa (2009)	Lodo de esgoto	Areia Siltosa	Ensaio Edométrico Simples e Duplo	Jennings e Kight (1975)	1,08%
Marinho (2018)	Compactação	Areia Siltosa	Ensaio Edométrico Simples	Gibbs e Bara (1961)	1,01%
Xavier et al. (2018)	Compactação	Areia Ariglosa	Ensaio Edométrico Duplo e Simples	Jennings e Kight (1975)	0,16%
Silva et al. (2016)	Adição de RCC ao solo	Areia fina Siltosa	Ensaio Edométrico simples	Vargas (1978)	1,35%
Yacoub (2017)	Cinza de casca de Arroz	Arenoso	Ensaio Edométrico simples	Jennings e Kight (1975)	1,94%
Freitas (2016)	Colunas de solo compactado	Areia Argilosa	Prova de carga em placa	Comparação dos recalques	1,47 mm

Fonte: Autora (2021)

Também é possível verificar que a técnica de compactação controlada foi utilizada para a estabilização de mais de um tipo de solo e ainda assim apresentou resultados satisfatórios em todos. A maioria dos solos analisados era constituído de areia, mas cada um desses solos apresentou características únicas o que é um importante critério de influência para a determinação da redução de colapso após o uso da técnica.

Ainda se tratando do Quadro 1, observam-se também os critérios de classificação, esses critérios são o embasamento para a definição se o solo é o ou não colapsível. Alguns dos autores muito conhecidos para essas classificações são Vargas e Jennings e Knighth(1957) *apud* Xavier (2018) e Vargas (1978) *apud* Silva (2003).

Considerações Finais

Observou-se que existem várias técnicas para o melhoramento de solos colapsíveis e que dentre elas a compactação controlada e colunas de solo laterítico compactado apresentam maior eficácia do que as outras técnicas quando se trata da redução do potencial de colapso. A partir da comparação feita entre algumas técnicas foi possível ressaltar seus pontos negativos e positivos e qual melhor se adequou ao solo de Ibimirim-PE.

A cidade de Ibimirim possui uma alta susceptibilidade a solos colapsíveis e para que sejam evitados os transtornos causados pelo colapso dos solos a técnica que apresenta maior viabilidade para o município é a compactação controlada, visto que este método de estabilização apresentou características como praticidade e maior facilidade de obtenção dos materiais utilizados. A semelhança entre os solos citados nos trabalhos analisados e o solo presente no município de Ibimirim também é um ponto favorável para a escolha desta técnica.

Ao final do estudo foi possível destacar que as técnicas de mitigação podem apresentar pontos positivos e negativos a depender dos locais que serão aplicadas, cabe aos profissionais decidirem optar pela técnica que melhor se adequará ao solo em análise.

Para estudos futuros visando a maior explanação deste assunto, são sugeridos estudos laboratoriais cerca do solo da cidade de Ibimirim – PE, comprovando seu potencial de colapso. É importante também que a técnica sugerida neste trabalho seja testada em laboratório para que haja um aporte científico a respeito de seus efeitos no solo do sertão Pernambucano.

Referências

AMORIM, S.F., **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco (SIGSEC-PE)**. (Dissertação de Pós-Graduação) Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2004

ARABANI, M.; LASAKI, B. A. **Behavior of a Simulated Collapsible Soil Modified with XPS-Cement Mixtures**. Springer International Publishing , Suíça 2016.

CAMPOS, G.C.; SANTOS, F.S. **Colapsibilidade de solos em um distrito de Porto Velho - Rondônia: impactos em Habitações Populares**. Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP. 2019

CASTRO, A. P. A. **Influência da compactação no colapso de um solo arenoso**. (Dissertação de Mestrado), Universidade Estadual Paulista. 2016.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Projeto de fundações em solos colapsíveis**. São Carlos: EESC-USP, 2009.

CINTRA, J. C. Â.; AOKI, N; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. 3 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

CHAGAS, G. S.; MOURA, A. S.; CARNEIRO, A. A. **Utilização da compactação para redução do potencial de colapso/ expansão de um solo silto argiloso de massapê da cidade de Icó – CE**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Ceará, v. 13. 2016.

FEITOSA, M. C. A. **Lodo de esgoto: algumas aplicações em engenharia**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife. 2009.

FERREIRA, S., **Influência da mudança de umidade no comportamento de variação de volume dos solos colapsíveis e expansivos**. Univerdade Federal de Pernambuco. 2015

FERREIRA, S.R.M. **Solos especiais - colapsíveis dispersíveis expansivos**. Relatório final CNPQ (1989)

FREITAS, M. C. **Avaliação da técnica de melhorias de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado**. (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de são Carlos, Universidade de São Paulo. 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Cidades e Estados - Ibimirim**. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/ibimirim.html> > Acessado em 16 de Julho de 2021.

KAWAHASHI, J.; TOMEI JUNIOR, R.B.; TATSUTA, E.K.; BALBO, J.T.; BALZAN, D.C. **Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação**. Transportes, São Paulo 2010.

LOLLO, J.A. **Solos Colapsíveis: Identificação, Comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. Editora Cultura Acadêmica, vol. 22, nº 3, São Paulo, 2008.

MARINHO, R. P. **Melhoramento de solo colapsível e expansivo de santa maria da boa vista-pe**. (Dissertação de Mestrado). Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

MOTTA, E.Q., **Análise do colapso de um solo compactado devido a inundação e à interação solo-liquido contaminante**. (Dissertação de Pós-Graduação). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2006.

RODRIGUES, R.A., **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático**. (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

ROLLINS, K.M e ROGERS, G.W. **Medidas de mitigação para pequenas estruturas em solos aluviais colapsáveis**. Journal of Geotechnical Engineerin. 1994

SILVA, A.C.; NETO. F. C. S.; SUKAR. S. F.; FERREIRA. S. R.M. **Avaliação da Adição de Resíduos de Construção Civil (RCC) para Estabilização de Solos Colapsíveis**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica O Futuro Sustentável do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais. 2016

SILVA, M. J. R. **Comportamento Goemecânico de Solos Colapsíveis e Expansivos em Petrolina – PE: Carta de Suscetibilidade.** (Tese de pós-graduação). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SILVA, V. Diagnostico de da Desertificação no município de Ibimirim-Pe.(Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. 2006.

SOUZA NETO, J. B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso).** (2004)

SOUZA NETO, J. B.; MARTINS, P. A.; PEREZ, E. N. P.; SANTOS, M.V.F. **Avaliação da Colapsibilidade do Solo de um Trecho do Projeto de Integração do Rio São Francisco por meio de Ensaio de Laboratório e de Campo.** Ano 2008.

[SPERA, S. T.](#); [REATTO, A.](#); [MARTINS, E. de S.](#); [CORREIA, J. R.](#); [CUNHA, T. J. F.](#) **Solos arenos-quartzosos no cerrado: características, problemas e limitacoes ao uso.** [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.](#) 1999.

TEIXEIRA, C.Z., **Solos colapsíveis: um problema para a engenharia de fundações.** Universidade Federal de Lavras. 2019

TEMÓTEO, J.W.C, **Base municipal de informações das águas subterrâneas. Município de Ibimirim – PE.** Recife. CPRM. 2000.

XAVIER, J. M.; COUTINHO, R.Q.; NETO, J.B.S.; BANDEIRA, A. P.N. **Características de um solo colapsível e o efeito do grau de compactação.** XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. Salvador, Bahia. 2018.

XAVIER, J. M. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais.** (Dissertação de Mestrado). Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

YACOUB, J. D. **Melhoria do comportamento colapsível de um solo arenoso fino com uso de cinza de casca de arroz.** (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista. 2017.

Recebido em: 20/08/2021

Aprovado em: 15/09/2021