

## **Influência da adição de um subproduto da produção de sal (Carago) e do tempo de cura nas propriedades de expansibilidade de um solo expansivo da cidade de Mossoró no estado do Rio Grande do Norte (RN)**

### *Influence of the addition of a byproduct of salt production (Carago) and curing time on the expansibility properties of an expansive soil in the city of Mossoró in the state of Rio Grande do Norte (RN)*

**Afrânio Pereira de Oliveira Júnior<sup>1</sup>; Osvaldo de Freitas Neto<sup>2</sup>; Olavo Francisco dos Santos Júnior<sup>3</sup>; Ricardo Nascimento Severo Flores<sup>4</sup>; Juciele Carla do Nascimento Costa<sup>5</sup>**

- <sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: [afranio.2038935@educar.rn.gov.br](mailto:afranio.2038935@educar.rn.gov.br)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9491-7287>
- <sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: [osvaldo.neto@ufrn.br](mailto:osvaldo.neto@ufrn.br)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9488-4123>
- <sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: [olavo.santos@ufrn.br](mailto:olavo.santos@ufrn.br)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6646>
- <sup>4</sup> Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil. Email: [Ricardo.severo@ifrn.edu.br](mailto:Ricardo.severo@ifrn.edu.br)  
ORCID: <https://orcid.org/000-0001-9568-860X>
- <sup>5</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: [juciele.costa.702@ufrn.edu.br](mailto:juciele.costa.702@ufrn.edu.br)  
ORCID: <https://orcid.org/000-0005-5982-1916>

**Resumo:** Os solos expansivos têm como principal característica a variação volumétrica a partir da mudança do teor de umidade que resultam em danos nas obras de engenharia. A estabilização desses solos pode ser feita com a da adição de aglomerantes que reduzam ou eliminem a expansão. Essa pesquisa teve como objetivo de avaliar a influência da adição de carago nas propriedades de expansibilidade e resistência ao cisalhamento de um solo expansivo da cidade de Mossoró/RN. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, compactação, expansão livre, tensão de expansão e resistência ao cisalhamento direto em misturas de solo com adição de 5% e 10% de carago. As amostras com 10% de carago apresentaram redução da expansão livre, com destaque para a redução de 25% nas amostras com 7 dias de cura úmida. Ocorreu aumento na tensão de expansão em todas as amostras com carago submetidas à cura seca, com exceção da amostra com 10% de carago e sem cura. O maior tempo de cura seca elevou a expansão livre e a tensão de expansão em todas as amostras.

**Palavras-chave:** Solo expansivo; Estabilização; Gipsita.

**Abstract:** Expansive soils have as their main characteristic the volumetric variation due to the change in moisture content that results in damage to engineering works. The stabilization of these soils can be done with the addition of binders that reduce or eliminate the expansion. This research aimed to evaluate the influence of the addition of carago on the properties of expansibility and shear strength of an expansive soil in the city of Mossoró/RN. For this, tests of geotechnical characterization, compaction, free expansion, expansion stress and direct shear strength were carried out in soil mixtures with addition of 5% and 10% of carago. The samples with 10% carago showed a reduction in free expansion, with emphasis on the 25% reduction in the samples with 7 days of wet curing. An increase in the expansion stress occurred in all samples with carago subjected to dry curing, with the exception of the sample with 10% carago and without curing. Longer dry curing time increased free expansion and expansion stress in all samples.

**Keywords:** Expansive soil; Stabilization; Gypsum.

## 1. Introdução

A variação volumétrica de um solo ocorre por fatores intrínsecos ao solo, como mineralogia, textura e estrutura; e fatores externos, como clima, vegetação e variação do lençol freático (FERREIRA et al, 2017). A combinação desses dois fatores leva a mudanças no teor de umidade e, conseqüentemente, a variações de sucção. Quando a sucção aumenta, ocorre a contração do solo, quando a sucção diminui, ocorre a expansão (MEDEIROS et al, 2023).

Essas expansões e contrações do solo podem levar a danos estruturais nas obras de engenharia, sendo necessária a realização da sua estabilização, que pode ser física ou química. A estabilização física inclui a compactação, pré-umedecimento e tratamento eletro cinético, enquanto a estabilização química é realizada a partir da adição de materiais como cimento, cal e cinzas volantes, com o objetivo de alterar a matriz química do solo e garantir uma maior estabilidade e resistência (BARMAN; DASH, 2022).

Embora sejam os materiais mais amplamente utilizados na estabilização de solos expansivos, a fabricação do cimento e da cal demanda a queima de materiais que geram gases do efeito estufa. Esses gases são os responsáveis pelas mudanças climáticas atuais. Devido a isso, surge a necessidade urgente de pesquisar sobre outros materiais e resíduos que causem menos impacto ambiental e que tenham efetividade semelhante na estabilização de solos expansivos.

O estudo sobre o uso de resíduos e materiais alternativos em obras de engenharia é cada vez mais frequente. Nas obras de terra, em particular, a descoberta de materiais ambientalmente sustentáveis e de pouco impacto ambiental podem gerar grandes resultados, uma vez que esse tipo de obra demanda grandes volumes de material.

Um desses materiais é a gipsita ou o gesso reciclado. Segundo Abdolvand e Sadeghiamirshahidi (2024), a gipsita pode melhorar significativamente a resistência à compressão simples e o CBR dos solos, principalmente em argilas expansivas e com alta plasticidade, embora, os resultados sejam diferentes dependendo da origem da gipsita ou do gesso reciclado.

Nesse sentido, um resíduo produzido pela indústria salineira, denominado popularmente de “carago”, tem se mostrado promissor para a aplicação em obras geotécnicas. Esse resíduo é formado por sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), a mesma composição química da Gipsita. Por muitos anos, o carago foi utilizado apenas como aterro, lançado no leito dos rios e córregos ou ficava acumulado nos pátios das salinas, ocupando o espaço destinado para a armazenamento de sal. O primeiro uso do carago foi como revestimento primário de estradas vicinais e vias urbanas das cidades salineiras. Em função desse uso, o carago também já foi chamado de “asfalto branco”. Mais recentemente, ele é comercializado para as fábricas de cimento da região de Mossoró/RN (GOMES FILHO, 2019).

Em pesquisas atuais, o carago puro apresentou Índice de Suporte Califórnia (CBR) de 78,9% e variação de volume de 0,02%, na energia Proctor Modificada, que classifica o material com potencial para ser utilizado em base de uma via com tráfego moderado, e apresentou resistência à compressão simples crescente com o aumento do tempo de cura. (SOUZA, 2024).

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da adição do carago e do tempo e do tipo de cura nas propriedades de expansibilidade de um solo expansivo da cidade de Mossoró/RN.

## 2. Metodologia

A Figura 1 mostra a divisão das etapas realização na pesquisa e os procedimentos que foram adotados em cada uma delas com o objetivo de caracterizar os materiais e determinar os dados necessários para a análise.

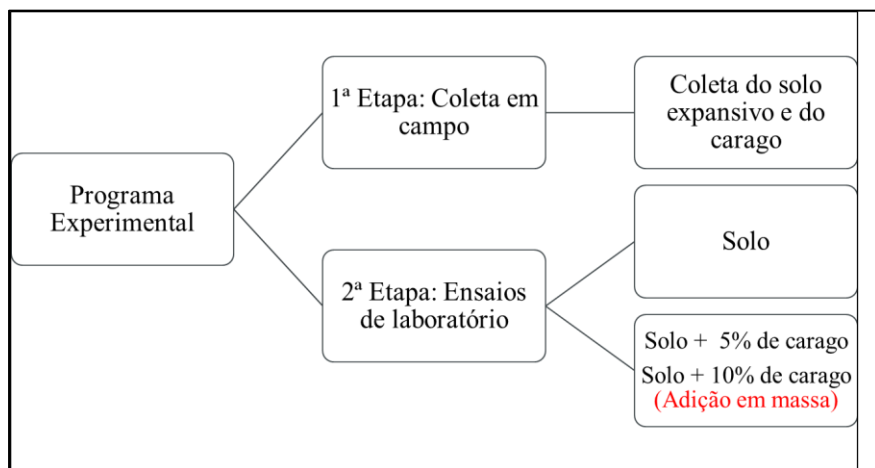


Figura 1 – Programa Experimental para realização da pesquisa.  
Fonte: Autores (2025).

## 2.1 Coleta de Materiais

Na 1ª Etapa, foram realizadas as coletas dos materiais, cujas coordenadas estão mostradas na Figura 2. Em P1 foi coletado o solo, e P2 é a localização da salina que disponibilizou o carago.

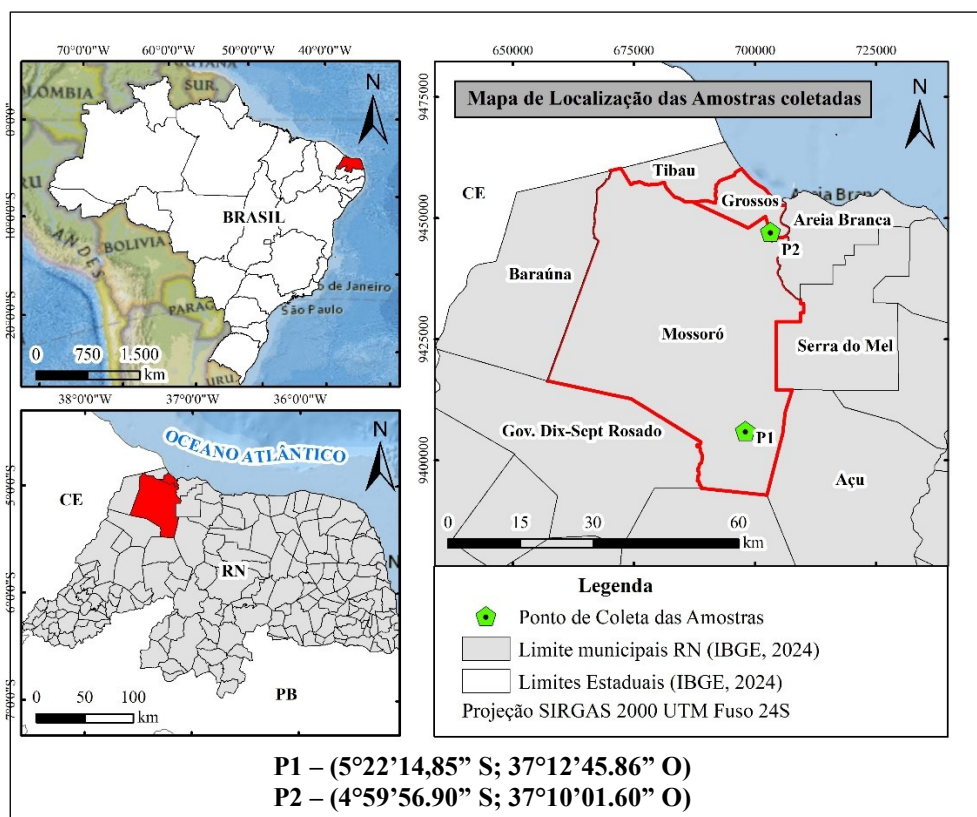


Figura 2 – Mapa de localização das amostras coletadas.  
Fonte: Autores (2025).

A escolha do local para a coleta da amostra do solo expansivo foi realizada com base em Santos (2017), que identificou uma amostra de solo com classificação pedológica de Chernossolo/Vertissolo como solo com potencial de expansão “Extremamente Alto”, com base na classificação proposta por o Yukselen-Aksoy e Kaya (2010).

Visualmente, o solo apresenta uma cor acinzentada e é possível ver a presença de matéria orgânica, pedregulhos e algumas rachaduras na superfície, como mostrado na Figura 3. Além disso, apresentava elevada dificuldade para coleta devido a resistência do material em campo.

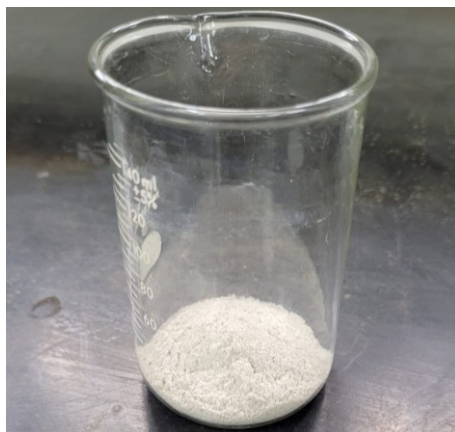


*Figura 3 – Perfil de solo expansivo da região de Mossoró/RN.*

*Fonte: Braz (2024).*

O carago foi disponibilizado por uma salina da cidade de Grossos/RN já embalado em sacos de rafia com aproximadamente 30kg cada um. Entretanto, após a colheita, o material fica armazenado e exposto ao ar livre nos pátios da salina, para a redução da umidade. Visualmente, o carago bruto tem uma coloração cinza claro e apresenta muitos torrões, semelhante a uma areia grossa com pedregulhos, diferenciando-se do material utilizado por Araújo (2023), onde o carago apresentava coloração branca, granulometria fina a partir da análise tátil-visual e com cristais bem definidos.

Após o recebimento no laboratório, o material foi armazenado em sua embalagem original até a preparação para a realização dos ensaios. Nessa pesquisa, o carago foi destorroado manualmente e o material utilizado foi o passante na peneira nº 40 de 0,42mm, como mostrado na Figura 4.



*Figura 4 – Carago destorroado, passante na peneira nº 40.*

*Fonte: Autores (2025).*

## 2.2 Métodos

Na Etapa 2, os materiais foram preparados conforme preconiza a NBR 6457 (ABNT, 2016). Após a preparação, o solo e as misturas foram submetidos aos ensaios listados na Tabela 1, no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

*Tabela 1 – Ensaios de laboratório realizados no solo puro e misturas.*

Ensaio	Norma	Materiais
<b>Granulometria</b>	NBR 7181/2016	Solo
<b>Limite de liquidez</b>	NBR 6459/2016	Solo
<b>Limite de plasticidade</b>	NBR 7180/2016	Solo
<b>Massa específica dos sólidos</b>	DNER-ME 093/94	Solo e solo-carago
<b>Compactação de solos</b>	NBR 7182/2016	Solo e solo-carago
<b>Expansão livre</b>	ASTM D4546-21	Solo e solo-carago
<b>Tensão de expansão</b>	ASTM D4546-21	Solo e solo-carago

*Fonte: Autores (2025).*

Os corpos de prova para a realização dos ensaios de expansão livre e tensão de expansão foram nomeados com ELS: Corpos de prova para o ensaio de Expansão Livre submetidos à cura seca., e ELU: Corpos de prova para o ensaio de Expansão Livre submetidos à cura úmida.

### 2.2.1 Moldagem dos corpos de prova

As misturas foram preparadas utilizando o solo passante na peneira nº 4 de 4,8mm conforme a NBR 7182/2016, e o carago passante na peneira nº 40 de 0,42 mm, para uma melhor homogeneização. Para os ensaios de Expansão livre, Tensão de expansão foi necessário moldar os corpos de prova para os respectivos ensaios. A moldagem foi realizada em um processo semi-estático com o auxílio de uma prensa como mostrado na Figura 5.



*Figura 5 – Moldagem dos corpos de prova.*

*Fonte: Autores (2025).*

Para determinar a massa dos materiais necessários foram utilizados os parâmetros de Massa específica seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) e umidade ótica ( $w_{\acute{o}t}$ ) obtidos no ensaio de compactação Proctor normal de cada amostra, como recomendado por Abdolvand e Sadeghiamirshahidi (2024). Após cada moldagem eram medidas a massa, o diâmetro médio e a altura média, além da coleta de material para calcular o teor de umidade.

Os corpos de prova foram moldados em dimensões diferentes, a depender do tempo de cura aos quais foram submetidos. Para os ensaios em que não foi necessário realizar a cura, os corpos de prova foram moldados em duas camadas de mesma

altura, diretamente no anel de adensamento com dimensões aproximadas de 50 mm x 20 mm e, em seguida colocados na célula de adensamento.

Já os corpos de prova que passaram pelos períodos de cura de 7 e 28 dias foram moldados em dimensões maiores para serem talhados no anel de adensamento no momento da realização do ensaio. Isso foi necessário pois os ensaios e as moldagens eram realizados simultaneamente, e o anel que estava em uso na realização do ensaio. O molde utilizado foi um anel metálico cilíndrico de 59 mm x 32 mm aproximadamente, e o material foi prensado em três camadas de mesma altura.

### 2.2.2 Cura dos corpos de prova

Na cura seca, os corpos de prova foram embalados em dupla camada papel filme, identificados e armazenados em uma caixa de isopor, como mostrado na Figura 8. O objetivo foi evitar que o corpo de prova perdesse a umidade rapidamente.

Na cura úmida, os corpos de prova foram armazenados em um dessecador hermeticamente fechado de dois níveis com livre circulação de umidade entre os eles. O nível inferior foi preenchido com água destilada e o superior armazenava os corpos de prova, como mostrado na Figura 6. O objetivo foi permitir a livre troca de umidade entre o ambiente fechado e os corpos de prova.

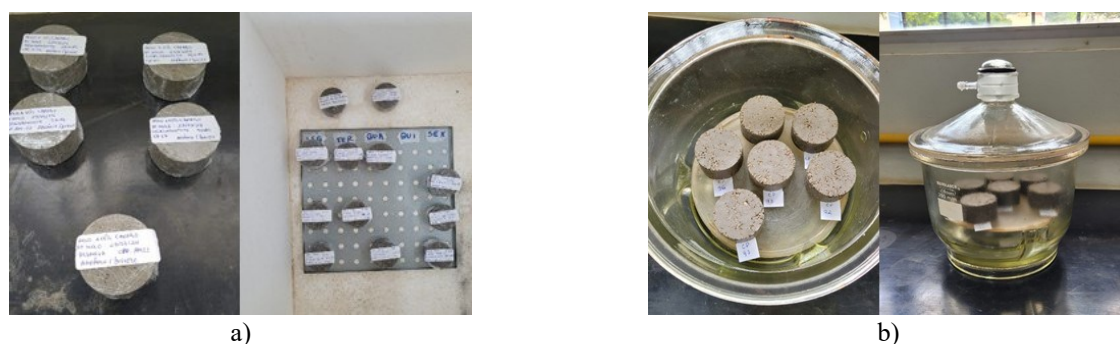


Figura 6 – a) Corpos de prova submetidos à cura seca. b) Corpos de prova submetidos à cura úmida.

Fonte: Autores (2025).

### 2.2.3 Ensaios de Expansão livre e tensão de expansão

Os ensaios de Expansão livre e tensão de expansão foram realizados conforme a ASTM 4546-21 – Métodos de ensaio padrão para expansão e compressão unidirecional de solos. A norma apresenta três métodos diferentes para a realização do ensaio, entretanto, para esta pesquisa foi utilizado o Método A. Nesse método, são necessários pelo menos quatro corpos de prova com diâmetro mínimo de 50mm e altura mínima de 20mm, moldados em condições idênticas e submetidos a cargas diferentes, simulando as tensões de campo. Devido às limitações de equipamentos, a tensão mínima aplicada nos corpos de prova foi de 7 kPa, diferente da orientada pela norma que é de 1 kPa.

Após a moldagem, os corpos de prova são montados na célula de adensamento, confinados lateralmente por um anel metálico e colocados na prensa de adensamento. Em seguida, é aplicada uma carga de assentamento de 7 kPa durante pelo menos 5 minutos. Se a amostra ensaiada for para a determinação da expansão livre, onde o ensaio é realizado sob uma tensão de 7 kPa, o corpo de prova é inundado e inicia-se as leituras. Para as demais tensões, após a carga de assentamento, realiza-se o acréscimo de carga até alcançar a tensão desejada. Em seguida, a célula de adensamento é inundada e inicia-se as leituras no extensômetro nos intervalos de tempo de 0,5 min., 1 min., 2 min., 4 min., 8 min., 15min., 30 min., 1 h., 2h., 4h., 8h. e 24h.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1 Ensaios de caracterização geotécnica

- Análise granulométrica e Limites de Atterberg

A curva granulométrica do solo estudado é apresentada na Figura 7, onde é possível perceber a predominância das frações finas.

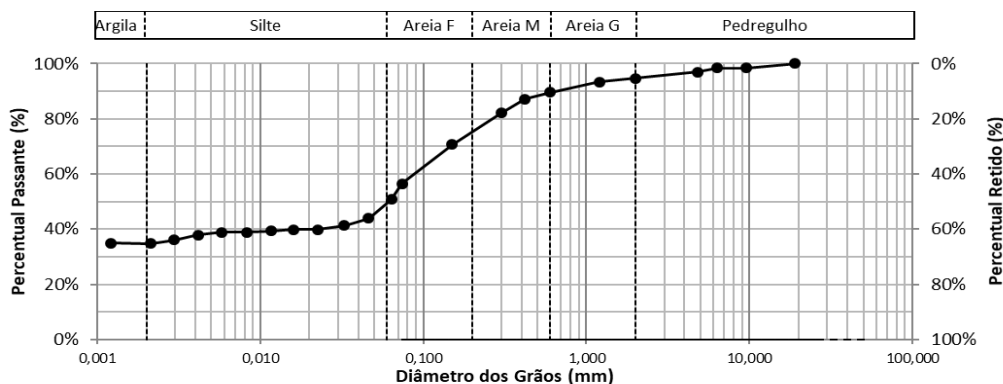


Figura 7 – Curva granulométrica do solo pesquisado.  
Fonte: Autores (2025).

A Tabela 2 mostra o detalhamento da curva granulométrica e os dados de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).

Tabela 2 – Detalhamento da curva granulométrica e limites de Atterberg.

Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
5,3	5,1	15,2	25,0	14,7	34,7
$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
-	-	0,084	60,0	31,0	29,0

Fonte: Autores (2025).

A partir da curva granulométrica e dos limites de Atterberg, foi possível avaliar o potencial de expansão do solo indiretamente. Pelo critério indireto de Skempton (1953), a atividade da argila (A), resultado da razão entre IP e a porcentagem de argila presente no solo, é de 0,84, o que representa uma argila de média atividade, semelhante à da Ilita. Já pela carta de Van Der Merve (1962), levando em consideração a fração argila de 34,7 % e IP = 29 %, a argila presente no solo é considerada de alta atividade, como representado pelo ponto S na Figura 8.

Alinhado com as classificações acima, com base na trabalhabilidade do material em laboratório, já era possível notar algumas características de solo expansivo. O solo apresentava-se com muitos torrões, sendo necessário a aplicação de duas a três seções de destorroamento e secagem, uma vez que, devido a sua plasticidade, não era possível destorroar o solo enquanto a umidade ainda estivesse elevada. À medida que o solo secava, a energia aplicada para destorroar era maior.

Durante a realização do ensaio de granulometria conjunta, foi possível perceber que, na etapa de sedimentação, mesmo com a utilização de defloculante e dispersor, o solo ainda apresentava partículas agregadas que aderiam às paredes do copo dispersor. Na etapa seguinte, para realizar o peneiramento fino foi necessário lavar o solo na peneira nº 200 durante cerca de 30 minutos, pois a fração argilosa aderiu e obstruiu a malha da peneira, dificultando a realização do ensaio.

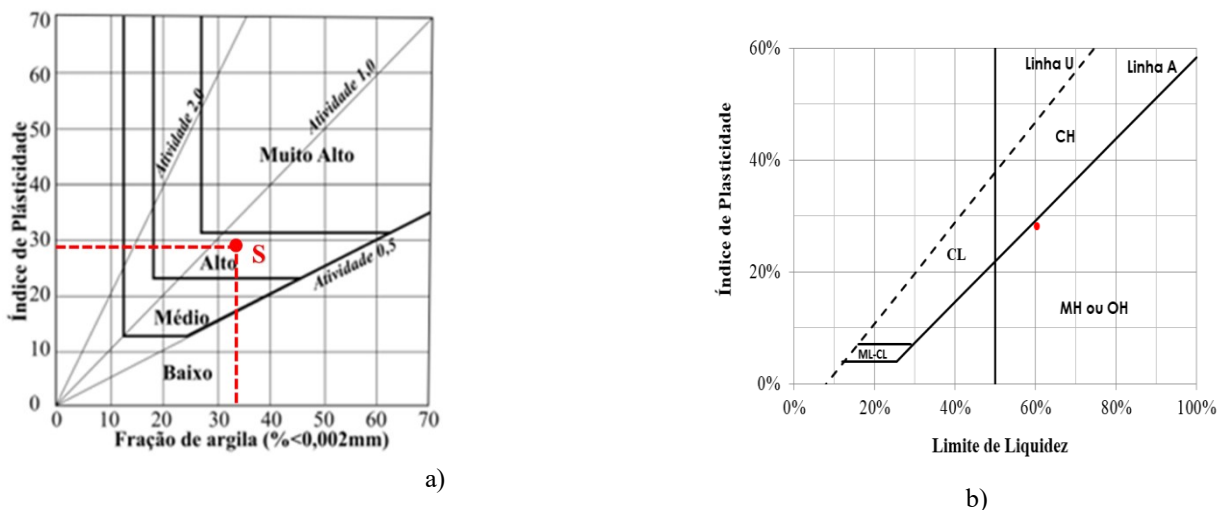


Figura 8 – a) Localização do ponto S na Carta de Van Der Merve (1962). b) Classificação do solo segundo o Gráfico de Plasticidade.

Fonte: Autores (2025).

Com base no Limite de Liquidez de 60,0% e Índice de Plasticidade de 29,0%, a localização do solo na carta de plasticidade está ligeiramente abaixo da linha “A”, que o classifica pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como MH (silte de alta compressibilidade), como mostrado na Figura 15.

Entretanto, devido as proporções de silte e argila e proximidade com a Linha “A” a classificação adequada é MH-CH (Silte argiloso de alta compressibilidade).

Portanto, pelas classificações indiretas de expansibilidade, classificação granulométrica e resultados do ensaio de DRX, de Braz (2024), o solo pode ser caracterizado como de alto potencial expansivo.

- Massa específica dos sólidos

Os ensaios de Massa Específica dos Sólidos ( $\rho_s$ ) foram realizados no solo e nas misturas, os resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de Massa Específica dos Sólidos do solo e das misturas.

Mistura	$\rho_s$ - (g/cm <sup>3</sup> )
Solo puro	<b>2,70</b>
Solo + 5% de carago	<b>2,64</b>
Solo + 10% de carago	<b>2,61</b>

Fonte: Autores (2025).

Pode-se notar que à medida que a porcentagem de carago aumentava, a massa específica dos sólidos diminuía. Esse resultado era esperado pois, o  $\rho_s$  do carago é em torno de 2,30 g/cm<sup>3</sup>, segundo Souza (2024).

### 3.2 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados com reuso e na energia Proctor Normal. As curvas de compactação do solo e das misturas está mostrado na Figura 9.

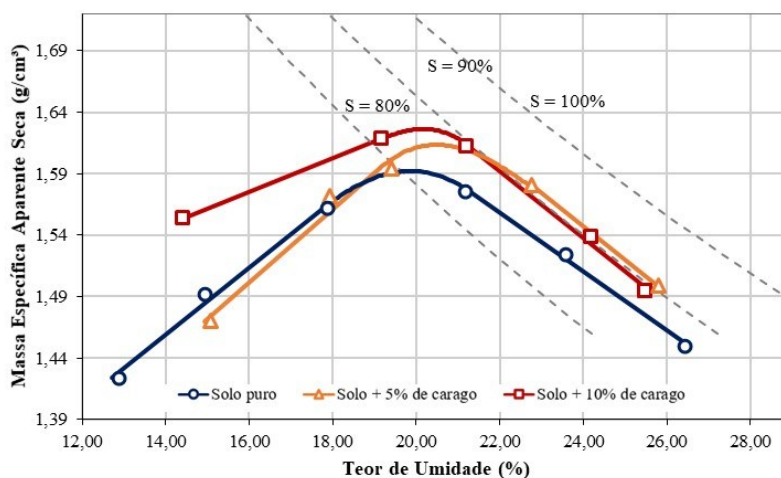


Figura 9 – Curvas de compactação do solo e das misturas, realizado na energia normal. Fonte: Autores (2025).

Pode-se destacar a dificuldade para destorrear o solo e as misturas após a cada compactação, quando o corpo de prova estava com pouca umidade, apresentava alta resistência mecânica, com o aumento da umidade apresentava alta plasticidade. Isso deve-se à característica expansiva do solo e até mesmo característica inerente do carago quando compactado, como citado por Souza (2024).

É possível perceber que a massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ) mostrou-se crescente com a adição do carago, e a umidade ótima ( $w_{ótima}$ ) teve uma pequena variação. A Tabela 4 mostra os dados detalhados do ensaio de compactação.

Tabela 4 – Influência da adição de carago nos parâmetros de compactação.

Mistura	$\rho_{d,máx}$ (g/cm³)	$w_{ótima}$ (%)	e	n (%)
Solo puro	1,59	19,86	0,70	41,2
Solo + 5% de carago	1,61	20,49	0,64	39,0
Solo + 10% de carago	1,63	20,17	0,60	37,5

Fonte: Autores (2025).

É possível notar a tendência de crescimento na massa específica seca máxima, e a redução do índice de vazios e porosidade, à medida que a porcentagem de carago na mistura aumenta. Esse comportamento segue às conclusões de Abdolvand e Sadeghiamirshahidi, (2024). Por ter sido usado uma granulometria mais fina do carago nas misturas, era de se esperar que ele ocupasse mais os vazios do solo, e à medida que aumenta a quantidade de carago na mistura, mais vazios são preenchidos, resultando nos dados apresentados acima.

### 3.3 Expansão Livre e Tensão de expansão

#### 3.3.1 Influência do percentual de carago na mistura

A Figura 10 mostra a expansão ou compressão apresentado por cada corpo de prova (CP) submetido ao ensaio sem processo de cura.

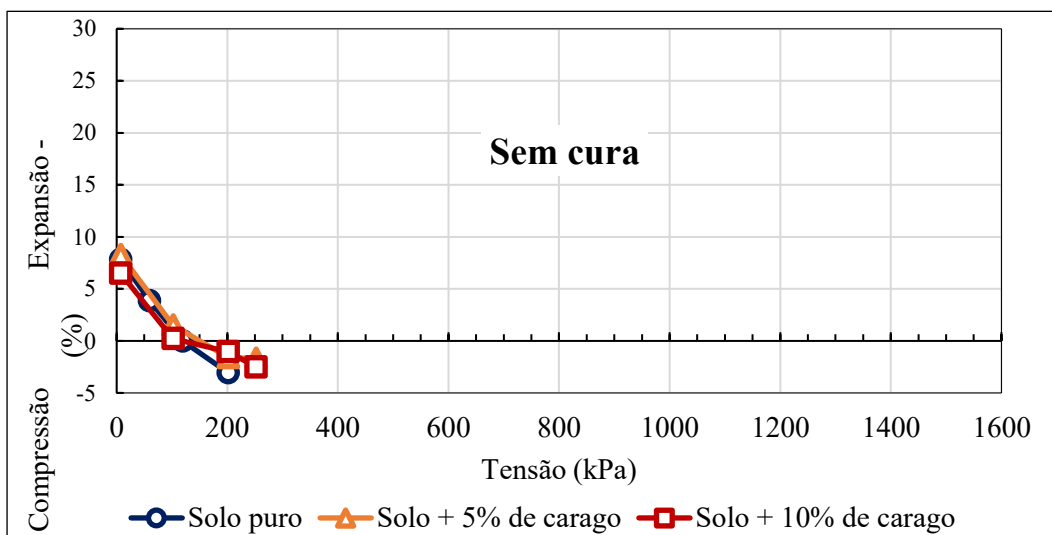


Figura 10 – Expansões e compressões dos CPs sem cura.  
Fonte: Autores (2025).

Pode-se perceber que a expansão livre a 7 kPa ficou entre 5% e 10%, sendo a menor expansão obtida na amostra com 10% de carago. A tensão de expansão variou entre 120 kPa e 200 kPa. A Tabela 5 detalha os resultados de expansão livre (EL) e tensão de expansão (TE) em cada uma das amostras, e suas respectivas variações ( $\Delta EL$ ) e ( $\Delta TE$ ), em relação à amostra de solo puro.

Tabela 5 – Expansão livre e Tensão de Expansão das amostras com idade zero dias.

Mistura	Expansão Livre (%)	$\Delta EL$ (%)	Tensão de Expansão (kPa)	$\Delta TE$ (kPa)
Solo puro	<b>7,8</b>	-	<b>120</b>	-
Solo + 5% de carago	<b>8,3</b>	<b>+0,5</b>	<b>150</b>	<b>+ 30</b>
Solo + 10% de carago	<b>6,6</b>	<b>-1,4</b>	<b>120</b>	<b>0</b>

Fonte: Autores (2025).

Com base nos dados, pode-se destacar a redução de expansão livre da amostra com adição de 10% de carago, de 7,8% para 6,6%, e a elevação da expansão livre e tensão de expansão da amostra com 5% de carago, de 7,8% para 8,3% e 120 kPa para 150kPa, respectivamente. Diferente do esperado, apenas a amostra com 10% de carago reduziu a expansão livre e a tensão de expansão. A Figura 11 mostra os resultados de expansão ou compressão apresentados por cada corpo de prova que foram submetidos à cura seca durante de 7 dias.

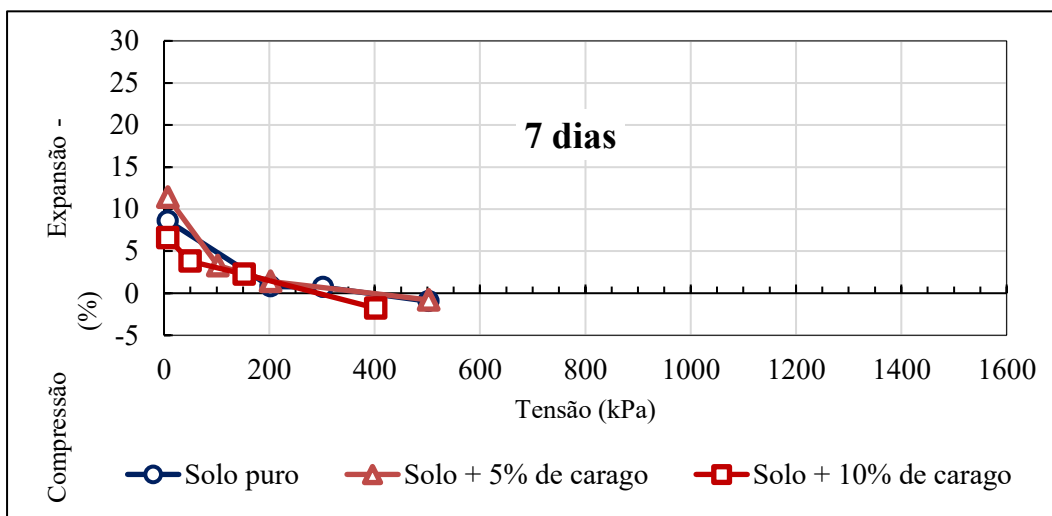


Figura 11 – Expansões e compressões dos CPs com 7 dias de cura seca.  
Fonte: Autores (2025).

É possível verificar que a expansão livre a 7 kPa para os CPs com 7 dias de cura ficou entre 5% e 15%, sendo a menor expansão obtida na amostra com 10% de carago. A Expansão Livre ficou entre 250 kPa e 400 kPa, sendo que a menor expansão também foi verificada na amostra com 10% de carago. A Figura 12 mostra os resultados de expansão ou compressão apresentados por cada corpo de prova que foi submetido à cura seca durante de 28 dias.

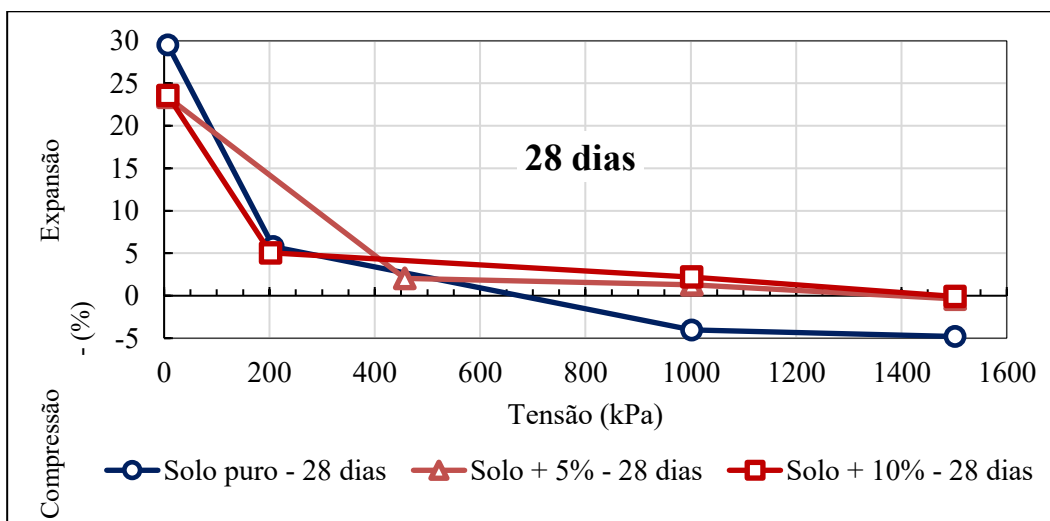


Figura 12 – Expansões e compressões dos CPs com 28 dias de cura seca.  
Fonte: Autores (2025).

Aos 28 dias de cura seca, a expansão livre ficou entre 20% e 30%. Nesse caso, as duas amostras com carago apresentaram valores próximos de expansão livre. Entretanto, essas mesmas amostras apresentaram elevada tensão de expansão, superando 1 Mpa, e a amostra com solo puro apresentou valor próximo de 650 kPa, ou seja, a adição de carago elevou a tensão de expansão para a cura seca durante 28 dias. A Tabela 6 detalha os resultados obtidos para as amostras submetidas à cura seca durante 7 e 28 dias, e suas respectivas variações em relação à amostra com solo puro.

Tabela 6 – Expansão livre e Tensão de Expansão das amostras com idades de 7 e 28 dias, submetidos à cura seca.

Mistura	Idade (dias)	Expansão Livre (%)	$\Delta EL$ (%)	Tensão de Expansão (kPa)	$\Delta TE$ (kPa)
Solo puro	7	8,6	-	385,0	-
Solo + 5% de carago	7	11,4	+2,8	385,0	0
Solo + 10% de carago	7	6,6	-2,0	290,0	-95
Solo puro	28	29,5	-	650,0	-
Solo + 5% de carago	28	23,4	-6,1	1500	+850
Solo + 10% de carago	28	23,6	-5,9	1500	+850

Fonte: Autores (2025).

Com base nos dados, pode-se destacar a redução da expansão livre e da tensão de expansão nas amostras com 10% de carago com 7 dias de cura. Nesse mesmo período, as amostras com 5% de carago mantiveram a tendência de elevação da expansão livre, assim como ocorreu nas amostras sem cura. Já nos CPs com carago e com 28 dias de cura seca, houve uma redução da expansão livre e um aumento de 130% na tensão de expansão em relação aos CPs com solo puro. Esse comportamento não era esperado, uma vez que a expansão livre reduziu, espera-se que o mesmo ocorresse com a tensão de expansão.

As Figuras 13 e 14 mostram os resultados de expansão ou compressão apresentados por cada corpo de prova que foi submetido à cura úmida, com idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

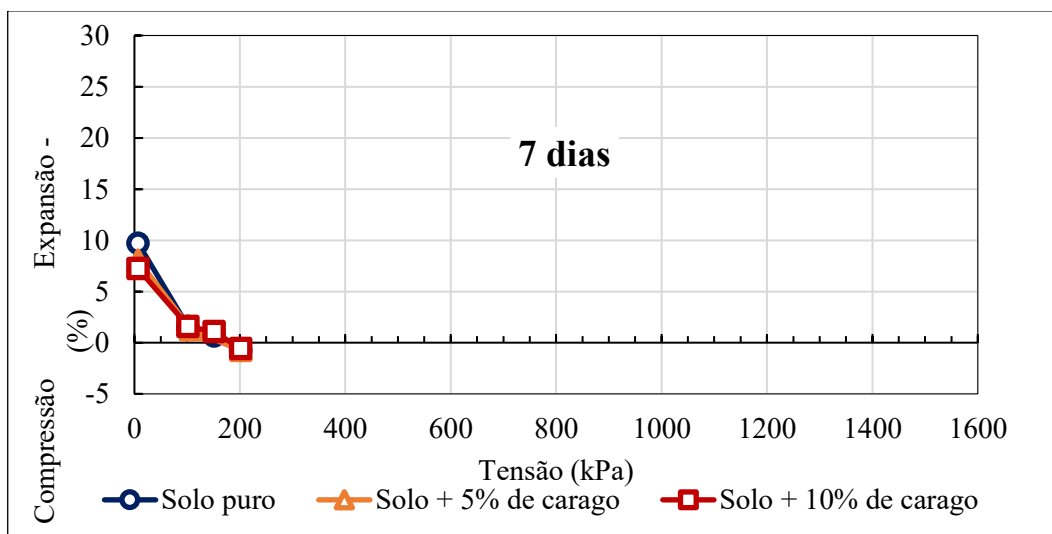


Figura 13 – Expansões e compressões dos CPs submetidos à cura úmida por 7 dias.

Fonte: Autores (2025).

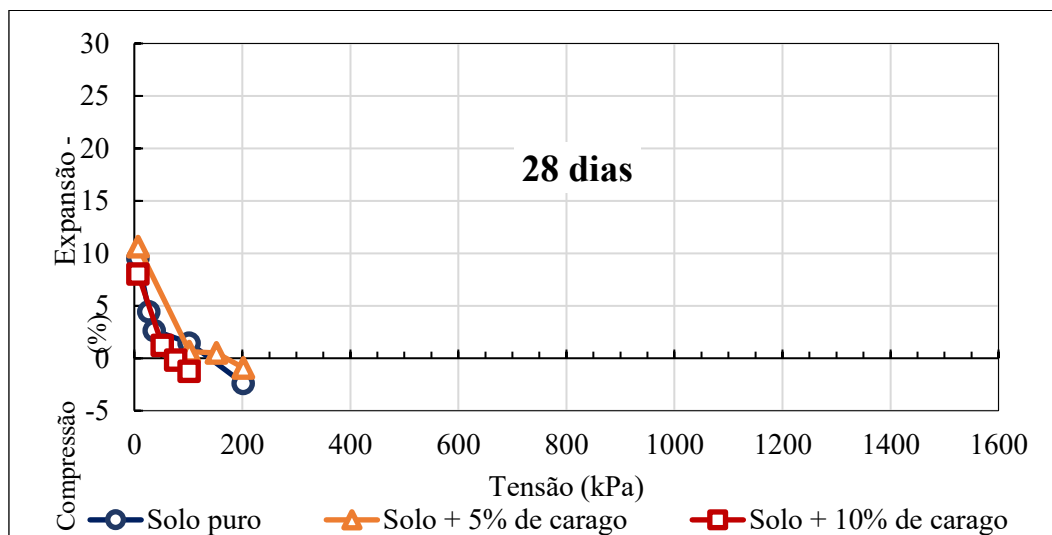


Figura 14 – Expansões e compressões dos CPs submetidos à cura úmida por 28 dias. Fonte: Autores (2025).

Com base nos resultados, pode-se destacar a redução de 25% na expansão livre das amostras com 10% de carago e 7 dias de cura úmida, e redução de 15% naquelas com 28 dias de cura úmida. Os demais resultados não seguiram um padrão em relação à porcentagem de carago adicionada.

Na cura úmida, a expansão livre variou entre 5% e 10% para os CPs com idade de 7 dias e, entre 5% e 15% para as amostras com idade de 28 dias. Pode-se destacar a redução da expansão livre nas amostras com 10% de carago nas duas idades de cura pesquisadas. Além disso, com 7 dias de cura, as amostras apresentaram valores de tensão de expansão próximos, variando entre 150 kPa e 200 kPa. Já com 28 dias de cura, ocorreu uma redução na tensão de expansão nos CPs com 10% de carago. A Tabela 7 apresenta os dados detalhados de expansão livre e tensão de expansão.

Tabela 7 – Expansão livre e Tensão de Expansão das amostras com idades de 7 e 28 dias, submetidos à cura úmida.

Mistura	Idade (dias)	Expansão Livre (%)	$\Delta EL$ (%)	Tensão de Expansão (kPa)	$\Delta TE$ (kPa)
Solo puro	7	9,7	-	170,0	-
Solo + 5% de carago	7	8,0	-1,7	165,0	-5
Solo + 10% de carago	7	7,2	-2,5	185,0	+15
Solo puro	28	9,5	-	140	-
Solo + 5% de carago	28	10,6	+1,1	170,0	+50
Solo + 10% de carago	28	8,0	-1,5	75,0	-45

Fonte: Autores (2025).

### 3.3.2 Influência do tempo de cura

As Figuras 15 e 16 apresentam a comparação da expansão livre e da tensão de expansão, respectivamente, das amostras de solo puro.

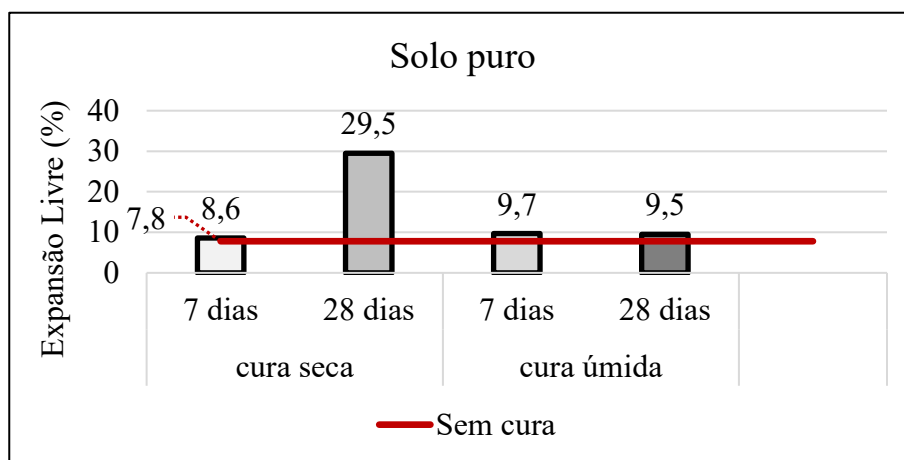


Figura 15 – Comparação da Expansão Livre entre as amostras de solo puro sem cura e com 7 e 28 dias de cura.

Fonte: Autores (2025).

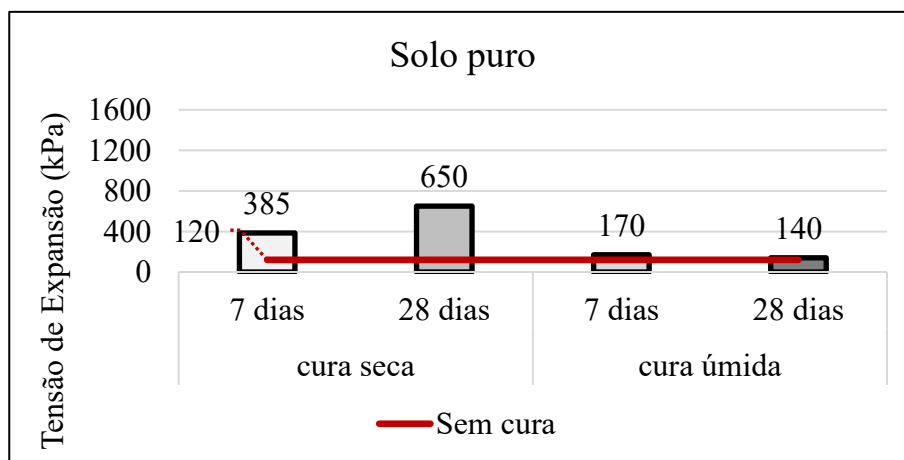


Figura 16 – Comparação da Tensão de Expansão entre as amostras de solo puro sem cura e com 7 e 28 dias de cura.

Fonte: Autores (2025).

Pode-se perceber novamente a elevação da tensão de expansão e expansão livre nas amostras de solo puro com 28 dias de cura seca, + 278% de expansão livre e +441% de tensão de expansão. Na cura úmida, esses dois parâmetros apresentaram variação significativamente menor, sendo destacados um aumento da expansão livre de aproximadamente

24%, e um aumento de 41% na tensão de expansão nas amostras de 7 dias. Nesse mesmo tipo de cura, a amostra com 28 dias apresentou aumento de 21% da expansão livre. As Figuras 17 e 18 apresentam a comparação da expansão livre e tensão de expansão, respectivamente, das amostras com 5% de carago.

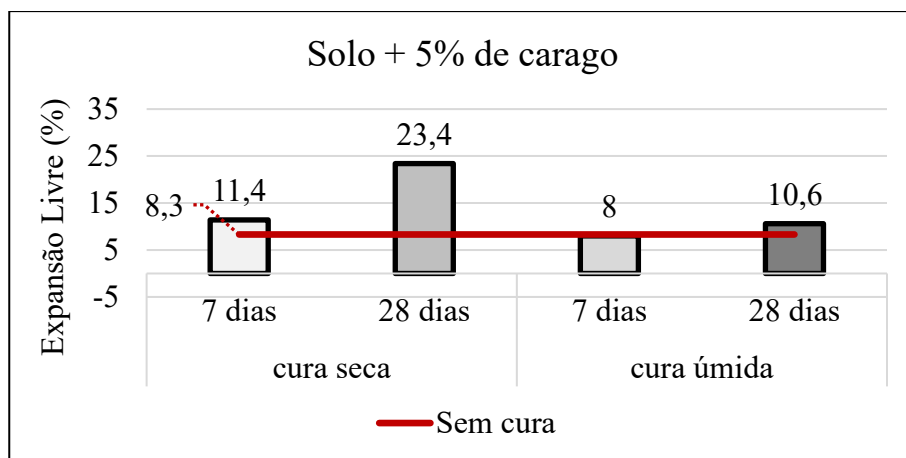


Figura 17 – Comparação da Expansão Livre entre as amostras com 5% de carago sem cura e com 7 e 28 dias de cura.

Fonte: Autores (2025).

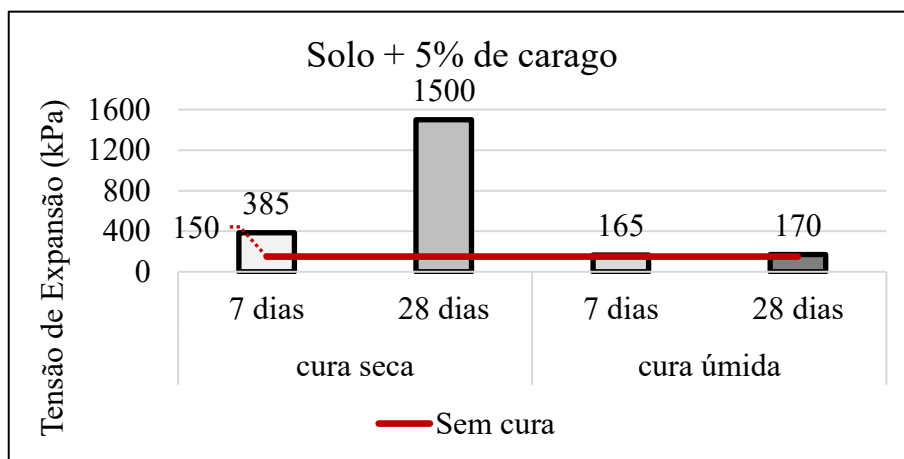


Figura 18 – Comparação da Tensão de Expansão entre as amostras com 5% de carago sem cura e com 7 e 28 dias de cura.

Fonte: Autores (2025).

É perceptível que a tendência de elevação da expansão livre das amostras com 28 dias de cura seca continua, mesmo com a adição de carago. Nesse tipo de cura, a amostra apresentou +27% e +181% de expansão livre nas amostras com 7 dias e 28 dias, respectivamente. Na cura úmida, ocorreu uma pequena redução de 3,6% aos 7 dias e um aumento de 27% aos 28 dias.

Essa tendência de aumento da expansão livre na cura seca se deve à redução do teor de umidade das amostras, o mesmo não ocorreu na cura úmida.

O comportamento é idêntico ao da expansão livre, elevação na cura seca maior que na cura úmida. Ocorreu um aumento de 156% aos 7 dias e 900% aos 28 dias. Na cura úmida, também ocorreu um comportamento parecido, as variações foram menores, os aumentos foram de 10% e 13%, respectivamente aos 7 dias e 28 dias.

As Figuras 19 e 20 apresentam a comparação da expansão livre e tensão de expansão, respectivamente, das amostras com 10% de carago.

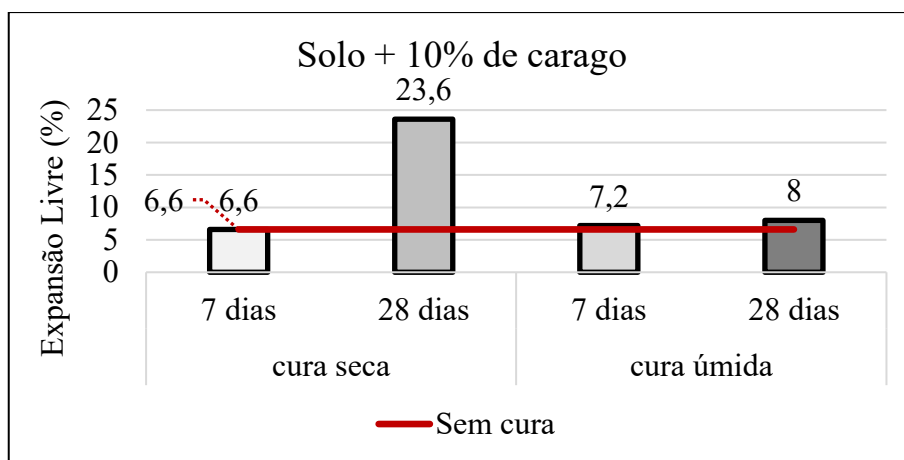


Figura 19 – Comparação da Expansão Livre entre as amostras com 10% de carago sem cura e com 7 e 28 dias de cura.

Fonte: Autores (2025).

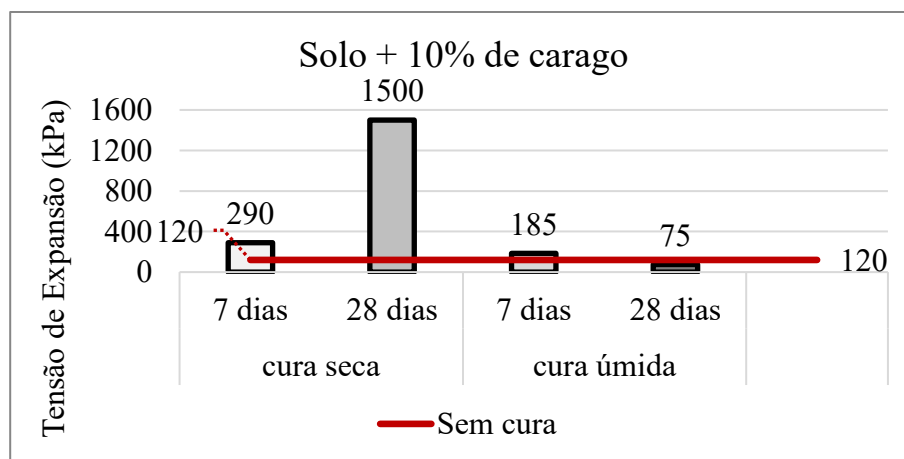


Figura 20 – Comparação da Tensão de Expansão entre as amostras com 10% de carago sem cura e com 7 e 28 dias de cura.

Fonte: Autores (2025).

A amostra submetida à cura seca durante 28 dias foi a que apresentou maior elevação da expansão livre, com aumento de 262%, embora tenha apresentado variação nula com 7 dias. Na cura úmida, ainda ocorreu elevação, de 9% aos 7 dias e 21% aos 28 dias.

Essa amostra apresentou a mesma tensão de expansão aos 28 dias que a da amostra com 5% de carago, entretanto, como o resultado aos zero dias foi menor, a variação foi maior, de 1150%. Essas elevações nas amostras com carago são maiores que a do solo puro apresentado anteriormente no Gráfico 11, ou seja, nesse tempo maior de cura seca, o carago potencializou a tensão de expansão. Já na cura úmida aos 28 dias, ocorreu uma redução de 37,5% da tensão de expansão, essa foi a única variação negativa apresentada pelas amostras.

O maior período de cura seca resultou no aumento da expansão livre e da tensão de expansão do solo. A exceção foi a amostra com 10% de carago e 7 dias de cura, cuja variação da expansão livre foi nula. Este aumento na cura seca é atribuído à retração inicial por perda de umidade, fazendo com que as amostras absorvessem mais água e expandissem mais durante os ensaios, se comparadas às de outros processos. Já na cura úmida, a elevação desses parâmetros foi significativamente menor: o aumento da tensão de expansão foi nulo no solo puro (28 dias) e negativa na amostra com 10% de carago (28 dias).

Por fim, a adição de 10% de carago resultou na redução da expansão livre do solo (a 7 kPa) em todas as amostras, sob ambos os tipos de cura, quando comparado ao solo puro. Isso confirma a estabilização do solo pelo carago, indicando a necessidade de mais estudos com porcentagens maiores para achar o teor ideal que maximize a redução de expansão ou garanta a estabilização total. Segundo Abdolvand e Sadeghiamirshahidi (2024), essa redução da expansão é causada pela troca catiônica: íons de cálcio do carago substituem cátions monovalentes, aumentando a ligação entre as partículas e reduzindo a expansão.

#### 4. Considerações finais

Esta pesquisa experimental buscou entender a influência da adição do carago e do tempo de cura nas propriedades de expansibilidade de um solo expansivo da cidade de Mossoró/RN. Com os resultados obtidos foi possível chegar às seguintes considerações.

Com relação à influência da adição do carago no solo, foi possível observar que, a massa específica dos sólidos das misturas reduziu com o aumento da adição de carago, isso era esperado pois o carago possui menor massa específica dos sólidos do que a do solo pesquisado. Na compactação Proctor Normal, a adição de carago aumentou a massa específica seca máxima e provocou pouca variação na umidade ótima. Por ser de granulometria mais fina, o carago preencheu os vazios do solo. Além disso, houve uma redução da expansão livre em todas as amostras com 10% de carago em relação às amostras com solo puro, independente do tempo e tipo de cura, com destaque para a redução de 25% na expansão livre das amostras com 10% de carago e 7 dias de cura úmida em relação amostra de solo puro com mesma idade, e houve um aumento na tensão de expansão em todas as amostras com carago submetidas à cura seca em relação ao solo puro, com exceção da amostra com 10% de carago e sem cura, que apresentou um valor igual ao do solo puro.

Com relação à influência do tempo e tipo de cura das misturas, foi possível observar que o maior tempo de cura seca elevou a expansão livre e a tensão de expansão em todas as amostras submetidas a esse tipo de cura, e o maior tempo de cura úmida também elevou a expansão livre e a tensão de expansão, entretanto esse aumento foi menor se comparado com a cura seca.

#### Referências

- ABDOLVAND, Yasaman; SADEGHAMIRSHAHIDI, Mohammadhossein. Soil stabilization with gypsum: a review. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 16, n. 12, p. 5278-5296, dez. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.02.007>.
- AFRIN, Habiba. A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. **International Journal Of Transportation Engineering And Technology**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 19, 2017. Science Publishing Group. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ijtet.20170302.12>.
- ARAÚJO, Tatiane Milene de. **Estudo da potencialidade do arisco na produção de tijolos maciços estabilizados com cimento portland e teores de carago, cal hidratada e metacaulim**. 2023. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/54847>. Acesso em: 17 fev. 2024.

- 
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3080-11 - **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. U.S. 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4546-21- **Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils**. U.S. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 – Solo Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180 – Solo Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 - Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182 - Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- BARRETO, Eduardo Mathews do Rego. **Caracterização geotécnica de um resíduo da produção de sal (carago)**. 2022. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/48725>. Acesso em: 15 maio 2023.
- BARMAN, Dharmendra; DASH, Sujit Kumar. **Stabilization of expansive soils using chemical additives: a review**. Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 1319-1342, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>.
- BATISTA, Vanessa de Souza. **Potencial do uso de resíduo de mineração de rocha calcária para estabilização de solos expansivos**. 2021. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/45854>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- BENTO, P. F. 2006. **Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/5261>
- BRAZ, R. I. F. **Avaliação da redução da expansividade de solo estabilizado com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Rio grande do Norte (UFRN), Natal, 2024.
- CHEN, F. H. **Foundation on Expansive Soils**, Amsterdam: Elsevier, 275 - 463 p, 1975.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 093/94 – SOLOS – Determinação da densidade real - Método de Ensaio**. 1994.
- FERREIRA, Ítalo Falcão de Brito. **Estudo sobre composições de partida para cerâmica dielétrica via incorporação de carago (CaSO4.2H2O)**. 2013. 130f. DISSERTAÇÃO (MESTRADO) - Programa de Pós-Graduação em Física, Mossoró, RN, 2013.
- 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>
- GONDIM, L. M. 2008. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe, Ceará**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. [http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/1704/1/2008\\_dis\\_imgondim.pdf](http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/1704/1/2008_dis_imgondim.pdf)

GOMES FILHO, T. S. **Incorporação de gesso alfa, oriundo de resíduos da indústria salineira, e de gesso beta reciclado em pastas para revestimento de construção civil.** 2019. 325 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

GOMES, M. F. **Optimization of time and temperature in the processing of the gypsum from of the crystallizers of the salt production for use plaster in civil construction.** 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

ISMAIL, A.; HILO, W.J.. **Withdrawn: deformation of gypsum sand during cyclic soaking and drying.** Journal Of Applied Sciences, [S.L.], v. 8, n. 24, p. 4610-4616, 1 dez. 2008. Science Alert. <http://dx.doi.org/10.3923/jas.2008.4610.4616>. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-63049119622&origin=inward&txGid=f5fd315623c9e582a1c53991dbf87a40>. Acesso em: 15 jan. 2025.

KUTTAH, Dina; SATO, Kenichi. **Review on the effect of gypsum content on soil behavior.** Transportation Geotechnics, [S.L.], v. 4, p. 28-37, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.06.003>.

LATIFI, Nima; VAHEDIFARD, Farshid; SIDDIQUA, Sumi; HORPIBULSUK, Suksun. **Solidification–Stabilization of Heavy Metal–Contaminated Clays Using Gypsum: multiscale assessment.** International Journal Of Geomechanics, [S.L.], v. 18, n. 11, p. 1-13, nov. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001283](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001283). Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001283?casa\\_token=J8lowykQRR8AAAAA:dADCsZDjli40pFcXI4Suvhd1bL5IF3VVk8K0m1iV\\_ttOUaCKo4SCRMaR-SzPCdreZzuccu1FroeA](https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001283?casa_token=J8lowykQRR8AAAAA:dADCsZDjli40pFcXI4Suvhd1bL5IF3VVk8K0m1iV_ttOUaCKo4SCRMaR-SzPCdreZzuccu1FroeA). Acesso em: 15 dez. 2024.

MEDEIROS, Luana Dantas; FERREIRA, Silvio Romero de Melo; BELLO, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira. **Evolução da estabilização química em solos expansivos.** Journal Of Environmental Analysis And Progress, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 123-139, 15 jun. 2023. Journal of Environmental Analysis and Progress - JEAP. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.8.2.2023.5294.123-139>.

PAIVA, Sergio Carvalho de; LIMA, Márcia Alves de Assis; FERREIRA, Maria da Graça de Vasconcelos Xavier; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal.** Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 21, n. 2, p. 437-449, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160002.0041>.

PU, Shaoyun; ZHU, Zhiduo; HUO, Wangwen. **Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled gypsum stabilized soil in geotechnical engineering: a comprehensive review.** Resources, Conservation And Recycling, [S.L.], v. 174, p. 105780, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105780>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134492100389X?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SKEMPTON, Alec Westley. **The colloidal activity of clays.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS. 3rd., 1953 Zurich, Proceeding. Zurich, 1953. v.1, p. 57–61.

SOUZA, Thalita Costa Mauricio de. **Efeitos de períodos de cura no comportamento geomecânico de um resíduo da produção de sal (carago)** . 2024. 22f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrrn.br/handle/123456789/59905>. Acesso em: 15/12/2024.

SPAULDING, Charles; MASSE, Frederic; LABROZZI, Justin. **Ground Improvement Technologies for a Sustainable World.** Civil Engineering Magazine, [S.L.], v. 78, n. 4, p. 54-59, abr. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE). <http://dx.doi.org/10.1061/ciegag.0000168>. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/ciegag.0000168>. Acesso em: 15 jan. 2025.

- 
- SING, N. B.; MIDDENDORF, B. **Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization.** Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, v. 53, n. 1, p. 57 - 77, 2007.
- SINHA, Pritam; IYER, Kannan K. R.. **Effect of Stabilization on Characteristics of Subgrade Soil: a review.** Lecture Notes In Civil Engineering, [S.L.], p. 667-682, 2020. Springer Singapore. [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-0886-8\\_54](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-0886-8_54).
- 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.
- YUKSELEN-AKSOY, Y.; KAYA, A. **Predicting soil swelling behaviour from specific surface area.** Geotechnical Engineering, v. 163, p. 229-238, 2010.
- ZHA, Fusheng; QIAO, Borui; KANG, Bo; XU, Long; CHU, Chengfu; YANG, Chengbin. **Engineering properties of expansive soil stabilized by physically amended titanium gypsum.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 303, p. 124456, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124456>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821022133>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- ZHANG, Feng; CUI, Yu-Jun. **Microstructure-based insight into different swelling pressure determination methods.** Engineering Geology, [S.L.], v. 307, p. 106777, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106777>. Disponível em: [https://www.sciencedirect-com.ez18.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0013795222002629?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com.ez18.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0013795222002629?via%3Dihub). Acesso em: 14 fev. 2025.