



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



LUIZ GABRIEL RIBEIRO VAZ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**FLUXO AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROJETOS DE
FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS**

UBERLÂNDIA – MG

2026

LUIZ GABRIEL RIBEIRO VAZ

**FLUXO AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROJETOS DE
FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA – MG

2026



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	GCI057 - Trabalho de Conclusão de Curso				
Data:	23/02/2026	Hora de início:	14h01min	Hora de encerramento:	15h08 min
Matrícula do Discente:	12121ECV040				
Nome do Discente:	Luiz Gabriel Ribeiro Vaz				
Título do Trabalho:	FLUXO AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÃO EM PROJETOS DE FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS				

Reuniu-se na Sala de Projeções do Bloco 1Y, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Civil, assim composta:

Professores doutores:

Jean Rodrigo Garcia - FECIV/UFU, orientador do candidato.

Michael Andrade Maedo - FECIV/UFU e

Antônio de Paulo Peruzzi - FECIV/UFU

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, **Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia**, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Curso.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Jean Rodrigo Garcia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 15:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio de Paulo Peruzzi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 15:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Michael Andrade Maedo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 15:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7046194** e o código CRC **065AA50D**.

Referência: Processo nº 23117.006921/2026-11

SEI nº 7046194

RESUMO

As fundações são elementos essenciais para o pleno funcionamento e garantia de segurança das edificações. Para isso, o solo deve ser devidamente estudado para uma adequada adoção e dimensionamento desses elementos. Entretanto, a presença de solos colapsíveis em grande parte do território brasileiro representa um desafio técnico significativo, por conta de as técnicas usuais de identificação estarem voltadas majoritariamente à ensaios de laboratório, além das formas de tratamento disponíveis de acordo com as peculiaridades desses solos, que nem sempre se apresenta viáveis economicamente. Esses solos são caracterizados por elevada porosidade e baixa umidade, se carregados e em algum momento sofrerem aumento de umidade poderão sofrer bruscas reduções de volume, representando um risco ao aparecimento de manifestações patológicas para a edificação, como recalques diferenciais, trincas e fissuras. Diante da lacuna nas normas vigentes quanto ao detalhamento para a escolha de fundações para esses solos, este trabalho teve como objetivo construir um fluxo decisório para orientar profissionais na identificação de solos colapsíveis e na escolha de fundações e técnicas mitigadoras. Como resultado, o fluxo decisório proposto organiza de forma lógica a prospecção inicial, a classificação do solo e a definição das soluções mais adequadas, contribuindo, portanto, para a redução de riscos à estrutura-fundação e para a segurança e durabilidade das edificações em regiões onde predominam camadas superficiais em solos colapsíveis.

Palavras-chave: solos colapsíveis, escolha de fundações, solos tropicais, solos lateríticos, fluxo decisório.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Solos – Classificação de Solos Finos Tropicais Para Finalidades Rodoviárias Utilizando Corpos de Prova Compactados Em Equipamento Miniatura – Classificação (2023)	11
Figura 2 - Locais com registro de ocorrência de solos colapsíveis no Brasil.....	12
Figura 3 - Critério de GIBBS & BARA para identificação da colapsibilidade de solos.	16
Figura 4 - Potencial de colápio do solo em relação a compacidade relativa e desvio de umidade.	18
Figura 6 - Curva de compressão confinada do ensaio edométrico.	19
Figura 7 - Curvas de compressão confinada do ensaio edométrico duplo.	20
Figura 8 - Utilização de sapatas em solo colapsível compactado.....	24
Figura 9 - Exemplo de Geocélulas.	25
Figura 10 - Exemplo de Geogrelhas.	25
Figura 11 - Proposta de fluxo auxiliar para tomada de decisão em projetos de fundações em solos colapsíveis.	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	SOLOS LATERÍTICOS	8
2.1	CARACTERIZAÇÃO.....	8
2.2	IDENTIFICAÇÃO	9
2.2.1	Ensaio da metodologia MCT.....	9
3	SOLOS COLAPSÍVEIS.....	11
3.1	CARACTERIZAÇÃO.....	12
3.2	ASPECTOS NORMATIVOS	13
3.3	IDENTIFICAÇÃO	14
3.3.1	Critérios baseados em índices físicos	14
3.3.2	Ensaio de laboratório.....	18
3.3.3	Ensaio de campo.....	21
3.4	PATOLOGIAS ASSOCIADAS A SOLOS COLAPSÍVEIS.....	21
3.5	TÉCNICAS MITIGADORAS.....	23
3.5.1	Compactação do solo	23
3.5.2	Controle de drenagem	24
3.5.3	Reforço com geossintéticos	24
3.5.4	Compactação dinâmica	26
3.5.5	Vibro compactação	26
3.5.6	Inclusões rígidas e semirrígidas	26
4	CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DO TIPO DE FUNDAÇÃO.....	28
5	FLUXO DECISÓRIO	28
5.1	PROSPECÇÃO INICIAL.....	29
5.2	CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS.....	29
5.3	CLASSIFICAÇÃO DE COLAPSIBILIDADE	29
5.4	PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES TÉCNICAS	29

5.5	APLICABILIDADE DO FLUXO DECISÓRIO	30
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

As fundações representam um dos principais elementos de uma edificação, essas têm a função de dar suporte, transmitindo adequadamente os esforços da estrutura para o solo e, inevitavelmente, é a primeira etapa de qualquer construção, garantindo estabilidade e segurança. Se a fundação não for adequadamente escolhida e dimensionada, ocorrerão futuros problemas na construção, como recalques, trincas, fissuras e, até mesmo, podendo chegar à inutilização e colapso estrutural. Esses problemas não só afetam a segurança dos usuários, como também, resultam em grandes prejuízos financeiros. Esses custos de manutenção e reparo, na maioria dos casos, são maiores que os de execução de uma fundação bem dimensionada desde a sua concepção. Por conta disso, é fundamental compreender o comportamento do solo e suas particularidades para o seu correto desempenho.

Segundo (Lollo, 2008), em grande parte do território brasileiro se predomina os solos de clima tropical, entre eles, destacam-se os solos lateríticos e, entre esses, os colapsíveis; sendo especiais nesse estudo por conta de seu comportamento peculiar e sua dificuldade de ser identificado. Os solos colapsíveis são solos não saturados que apresentam baixo teor de umidade, alta porosidade e elevado índice de vazios, mantidos estáveis pela sucção matricial, resultante das forças de capilaridade e adsorção. Essa sucção confere ao solo uma coesão aparente, aumentando sua resistência ao cisalhamento. Contudo, quando o solo é submetido a um acréscimo significativo de umidade e mantido os carregamentos, essa sucção é reduzida, levando à perda de resistência e à consequente redução abrupta de volume, fenômeno denominado de colapso. A previsão desse fenômeno exige ensaios específicos que simulem a variação de umidade, já que os métodos convencionais de caracterização nem sempre o identificam. Esses solos representam um desafio técnico relevante, sobretudo em edificações de pequeno porte, pois nesses casos, é frequente a ausência de estudos geotécnicos mais detalhados, aumentando assim o risco de adoção de tipos de fundação inadequados.

Segundo a ABNT NBR 6122:2022, “solos colapsíveis são solos que apresentam brusca redução de volume quando submetidos a acréscimos de umidade, sob a ação de carga externa”. Além disso, a norma cita que deve ser considerada a possibilidade de ocorrer o encharcamento de um solo colapsível no projeto e no método construtivo. Entretanto, ela não detalha métodos de tratamento específicos para solos colapsíveis e, tampouco, auxilia na escolha do tipo de fundação nesses solos. Dessa forma, observa-se

uma lacuna a ser preenchida quanto à definição de critérios decisórios para escolha de fundações em solos de regiões tropicais potencialmente colapsíveis. Diante dessa realidade, há uma grande necessidade de se definir critérios claros e acessíveis que auxiliem na escolha do tipo de fundação mais adequado para adoção quando se há presença desses solos. Essa pesquisa se justifica pela relevância do tema, considerando que grande parte das construções brasileiras são executadas sem a utilização de ensaios do solo mais sofisticados. A elaboração de um fluxo decisório para a escolha do tipo de fundação auxiliará profissionais e reduzirá o risco de patologias e prejuízos financeiros, além de contribuir para a segurança e durabilidade das edificações construídas sobre solos colapsíveis.

Dessa maneira, este trabalho tem como objetivo construir um fluxo decisório a fim de orientar a escolha de fundações quando se há a presença de solos colapsíveis, considerando aspectos técnicos, econômicos e construtivos para isso, especialmente para obras de pequeno porte, como casas e sobrados. Assim, busca-se contribuir com a sociedade e o setor da construção civil, em especial a construção de edificações de pequeno e médio porte.

2 SOLOS LATERÍTICOS

Um solo de região tropical, tipicamente bem drenada, pode ser considerado como laterítico segundo a classificação Miniatura, Compactado e Tropical (MCT), método de classificação de solos desenvolvido no Brasil para classificar e avaliar o comportamento de solos tropicais.

2.1 CARACTERIZAÇÃO

Segundo (Nogami & Villibor, 1995), os solos lateríticos são composto por uma mineralogia comum, contendo, principalmente, elevada presença de quartzo nas frações de areia e pedregulho, o que constitui ao solo elevada resistência a compressão, elevado módulo de elasticidade e elevada dureza; quando o quartzo está presente na fração de areia, frações do solo recebem películas de óxidos, o que garantirá uma tonalidade avermelhada, arroxeada, roseada ou amarelada ou solo, além de depressões, indicando uma desagregação gradual.

Ainda segundo os autores, outro mineral que pode ser encontrado na fração pedregulho ou areia é a laterita, a qual possui várias singularidades, com grandes variações de propriedades, dificultando prever comportamentos do solo decorrentes de

sua presença; além do mais, ela possui maior resistência mecânica consideravelmente menor, quando comparada com o quartzo, maior massa específica e maior absorção de água.

Os solos lateríticos conhecidos como terra roxa ou latossolo roxo frequentemente se predomina minerais como magnetita e ilmenita na fração de areia, por conta desses minerais considerados pesados, a massa específica do solo dobra seu peso. Outro ponto, é a fração areia resultante do ensaio de granulometria do solo, que resulta em elevada presença de agregados, predominantemente constituídos de argila, possuindo resistência bem inferior à das outras parcelas.

No geral, os solos lateríticos possuem:

- Estruturação dos materiais que o constituem;
- Elevada porosidade, mesmo após encharcamento;
- Permanência de agregados na fração areia;
- Homogeneização simples;
- Resistência a compressão e cisalhamento acima do previsto por índices físicos;
- Fenômeno de colapsibilidade em alguns solos.

2.2 IDENTIFICAÇÃO

2.2.1 Ensaios da metodologia MCT

Segundo (Nogami & Villibor, 1995), os ensaios MCT, como o próprio nome já sugere são ensaios destinados a solos tropicais com corpos de provas de pequenas dimensões, com 50 cm de diâmetro e 50 cm de altura, com o solo em estado compacto.

- Mini-MCV

O ensaio *Moisture Condition Value*, ensaio MCV, foi proposto por Parsons em 1976 e adaptado por Nagomi e Villibor em 1985 para os solos tropicais. Para a realização do ensaio pega-se uma amostra seca ao ar e separada em 4 partes com diferentes umidades, H1, H2, H3 e H4. Começa-se pela mais úmida, H1, o que será feito igualmente a todas as amostras posteriormente, e a introduz no molde de compactação, é colocada a amostra no amostrador abaixo do soquete, medida altura do corpo de prova e dá-se golpes sucessivamente parando nos seguintes golpes para serem realizadas as medidas: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, ..., n, ...4n. O ensaio é finalizado quando 4n atingir 256 ou medidas sucessivas com diferença inferior à 1 mm.

A partir dos dados obtidos é traçada, para cada teor de umidade, as curvas Mini-MCV definidas pelo número de golpes em função da altura naquele ponto subtraída da altura final. Com a angulação dessas curvas obtidas é possível obter 4 coeficientes c' , uma para cada curva, onde fixa-se a curva com Mini-MCV 10, para o cálculo direto de c' , no caso de não ocorrer Mini-MCV 10, deve-se realizar interpolação gráfica. Esse coeficiente é utilizado na classificação MCT, onde é o coeficiente angular da reta assimilável à curva Mini-MCT. Um c' com valores acima de 1,5 indicam argilas e solos argilosos, valores de c' abaixo de 1,0 indicam areias e siltes pouco coesivos, enquanto valores de c' entre 1,0 e 1,5 não possuem um padrão definido.

Além disso, há o coeficiente d' , obtido pelo coeficiente angular da curva seca no ramo correspondente a 12 golpes; desconhece-se relações desse coeficiente com propriedades físicas de solos lateríticos. Para a classificação Mini-MCV, esse coeficiente será utilizado no cálculo das ordenadas do gráfico.

- Mini-CBR

O ensaio Mini-CBR é uma adaptação do ensaio CBR tradicional, aplicado a corpos de prova de pequenas dimensões, sendo amplamente utilizado na caracterização de solos tropicais no contexto da metodologia MCT. O ensaio avalia a resistência à penetração de um pistão padronizado em amostras compactadas, fornecendo uma estimativa simplificada da capacidade de suporte do solo. No âmbito da metodologia MCT, o Mini-CBR é empregado como ensaio complementar ao Mini-MCV, fornecendo informações adicionais sobre a resistência do solo após a compactação e auxiliando na avaliação do seu desempenho frente à variação de umidade.

- Perda de Massa por Imersão

Os corpos de prova utilizados nesse ensaio são obtidos do Mini-MCV, estes precisam ser submetidos previamente ao ensaio de penetração Mini-CBR, então saca-se os moldes de compactação, ficando 10 mm salientes, transfere-os para uma cuba que é posteriormente preenchida com água. Após 20 horas são recolhidas as capsulas e obtidas as respectivas massas secas, posteriormente comparadas com as iniciais, expresso em porcentagem e então obtido o coeficiente P_i .

Para se obter o correto P_i , deve-se traçar a curva de variação das porcentagens e procurar-se o valor correspondente ao Mini-MCV 10 (para solos com baixa massa específica: altura final do corpo de prova Mini-MCT 10 igual ou maior a 48 mm), ou correspondente a Mini-MCV 15 (para solos com elevada massa específica: altura final do

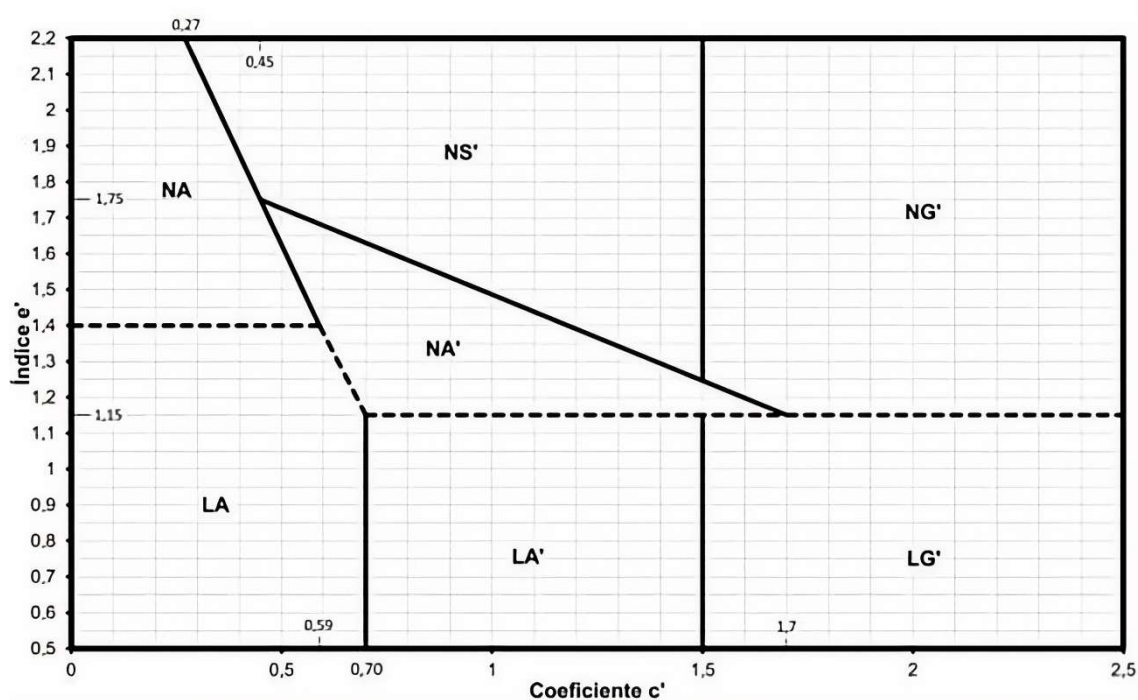
corpo de prova Mini-MCT 10 menor que 48 mm). Sua utilização é efetuada para a determinação do coeficiente das ordenadas do gráfico Mini-MCT.

- Classificação Mini-MCT

Por meio do ensaio Mini-MCV foi possível encontrar o coeficiente c' , o qual será utilizado para desenhar o eixo das abscissas do ábaco de classificação mostrado na Figura 1. Nesse mesmo ensaio foi encontrado o coeficiente d' que juntamente com o coeficiente P_i , encontrado no ensaio de Perda de Massa por Imersão, será possível traçar o eixo das ordenadas por meio da seguinte equação:

$$e' = \sqrt{\frac{P_i}{100} - \frac{20}{d'}} \quad \text{Eq. 1}$$

Figura 1: Solos – Classificação de Solos Finos Tropicais Para Finalidades Rodoviárias Utilizando Corpos de Prova Compactados Em Equipamento Miniatura – Classificação (2023)



Fonte: IPR (2023)

3 SOLOS COLAPSÍVEIS

Os solos colapsíveis são solos tipicamente formados em regiões tropicais e comumente classificados como solos lateríticos, por conta disso, ele está presente em diversas regiões do Brasil, principalmente no Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste, conforme apresentado na Figura 2 que mostra um mapa do Brasil com as regiões onde já foi constatada a ocorrência de solos colapsíveis.

Figura 2 - Locais com registro de ocorrência de solos colapsíveis no Brasil.



Fonte: Rodrigues e Vilar (2013).

3.1 CARACTERIZAÇÃO

A ABNT NBR 6122:2022 define os solos colapsíveis como aqueles que apresentam brusca redução de volume quando submetidos a acréscimos de umidade, sob a ação de carga externa. Segundo (Cintra & Aoki, 2009) esse fenômeno se deve as suas particularidades, pois esses são solos não saturados, apresentando baixo teor de umidade, alta porosidade, e consequentemente, elevado índice de vazios, além de alta sucção matricial, ocasionada devido às forças de capilaridade e de adsorção. Pois quando se há baixos valores de umidade, há altos valores de sucção matricial, portanto, gerando uma coesão adicional e aumentando a resistência ao cisalhamento do solo. Após a aplicação de cargas nesses solos, quando estes forem expostos a um grande aumento do seu teor de umidade, mesmo sem atingir a saturação, essa sucção matricial é reduzida, perdendo-se a parcela de resistência ao cisalhamento vinda dela, dessa forma, podendo sofrer uma brusca redução de volume, fenômeno conhecido como colapso.

Segundo (Lollo, 2008), a formação dos solos colapsíveis depende dos fatores climáticos regionais e do ambiente geológico, o que faz com que sua ocorrência apresente grande variabilidade e características distintas. Mas é possível descrever que esses solos possuem granulometria predominantemente arenosa, siltosa ou argilosa, com valores de

massa específica aparente seca baixos, alta porosidade e índice de vazios elevado. O grau de saturação tende a ser baixo e a plasticidade reduzida. A observação microscópica revela uma matriz porosa e irregular, o que explica a elevada compressibilidade desses solos quando submetidos a saturação.

Ainda segundo o autor, para que sua estrutura se mantenha com uma maior capacidade de carga mesmo apresentando altos índices de vazios, além da sucção matricial, forças eletromagnéticas de superfície e presença de agentes cimentantes também podem colaborar com a sua resistência em condições de baixa saturação. A sucção matricial decorre das forças de capilaridade e adsorção, quando ocorre o aumento do teor de umidade, a sucção matricial é reduzida. As forças eletromagnéticas do solo estão relacionadas com as forças de *Van der Waals*, de osmose e de atração molecular, quando o solo se encharca, há diminuição da concentração de íons e das tensões, aumentando as forças repulsivas. Nos casos em que a colapsibilidade está associada à presença de agentes cimentantes, esses promovem maior aderência entre os grãos do solo aumentando assim a resistência quando solicitado, se saturado total ou parcialmente, o agente cimentante será dissolvido, resultando na redução da resistência do solo.

3.2 ASPECTOS NORMATIVOS

As normas ABNT NBR 6122:2022 e ABNT NBR 8044:2018 indicam que sempre que um solo não saturado for suscetível a colapso com o aumento de umidade, deve ser realizado o ensaio de colapsibilidade. O método mais simples segundo as normas é realizado utilizando o mesmo equipamento empregado nos ensaios de adensamento, para determinar a deformação vertical adicional da amostra após a inundação sob uma tensão aplicada. De acordo com a ABNT NBR 16853:2020 (Ensaio de adensamento unidimensional), quando o ensaio envolve corpos de prova obtidos de amostras não saturadas, a inundação pode ser realizada sob níveis de tensão que representem as condições esperadas em campo. Além disso, a norma estabelece que o molhamento só deve ocorrer após o término do adensamento primário no estágio de carga correspondente e que após a inundação, devem ser registradas as variações de altura do corpo de prova até que se verifique a estabilização das deformações, sendo recomendado um período mínimo de observação de 24 horas.

A ABNT NBR 6489:2019, que trata da prova de carga estática em fundações diretas (ensaio em placa), estabelece os critérios para execução e interpretação do ensaio de placa, no qual são aplicados esforços estáticos axiais de compressão e medidos os

deslocamentos correspondentes, levando a carga pelo menos ao dobro da tensão admissível estimada ou até o deslocamento limite definido em projeto. É citado que, sempre que necessário, a investigação geotécnica pode ser aprofundada por meio de sondagens adicionais ou ensaios complementares para aprimorar a caracterização do perfil geológico-geotécnico, incluindo a verificação de possíveis manifestações de expansibilidade ou colapsibilidade do solo.

3.3 IDENTIFICAÇÃO

Os solos colapsíveis apresentam uma grande sensibilidade com relação à infiltração da água no solo. O aumento do teor de umidade é o mecanismo detonador ou o “efeito gatilho” do colapso (Cintra & Aoki, 2009). Diante disso, o Ensaio de Sondagem a Percussão (SPT), comumente utilizado em projetos geotécnicos, se torna ineficaz se não considerado o índice de saturação do solo no momento da realização do ensaio; pois, o Índice de Resistência à Penetração (N_{SPT}) terá uma grande redução quando houver o encharcamento do solo. Diante disso, surge a necessidade de métodos geotécnicos mais complexos para identificação da colapsibilidade do solo.

Segundo (Lollo, 2008), os solos colapsíveis por se encontrarem na condição não saturada têm sido avaliados sob o ponto de vista de compressibilidade através de ensaios edométricos em laboratório, por provas de carga em campo, nas condições de umidade *in situ* e inundado, e também podem ser identificados por meio de critérios empíricos baseados em índices físicos, como mostrado nas seções 3.3.1, 3.3.2, 0.

3.3.1 Critérios baseados em índices físicos

Critérios baseados em índices físicos são aqueles que avaliam o potencial de colapso dos solos a partir de parâmetros como índice de vazios, umidade natural, grau de saturação e massa específica, permitindo uma identificação preliminar do comportamento colapsível do solo sem a necessidade de ensaios mais complexos de laboratório ou provas de cargas, sendo dessa forma mais fáceis de serem executados e economicamente mais viáveis; entretanto, não podendo ser utilizados como fonte única de informação sobre o potencial de colapso. Dessa forma, são apresentados alguns critérios citados em Lollo (2008):

- Critério de Denisov (1951)

Este critério faz a relação entre o índice de vazios do solo no limite de liquidez (e_L) e o índice de vazios no estado natural (e_0), encontrando então o coeficiente de subsidência (K);

$$K = \frac{e_L}{e_0} \quad \text{Eq. 2}$$

Para $0,5 < K < 0,75 \rightarrow$ solos altamente colapsíveis;

Para $0,75 < K < 1,5 \rightarrow$ margas não colapsíveis;

Para $1,5 < K < 2,0 \rightarrow$ solos não colapsíveis.

- Critério de PRIKLONKIJ (1952)

Este critério em função dos limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e teor de umidade natural (w_0) encontra um coeficiente (K_d);

$$K_d = \frac{LL - w_0}{LL - LP} \quad \text{Eq. 3}$$

Para $K_d < 0 \rightarrow$ solos altamente colapsíveis;

Para $K_d \geq 0,5 \rightarrow$ solos não colapsíveis;

Para $K_d > 1,0 \rightarrow$ solos expansivos.

- Código de construção da União Soviética (1977)

Aplicado apenas para solos com teor de umidade menor ou igual à 60%, em função do índice de vazios no estado natural (e_0) e do índice de vazios no estado do limite de liquidez (e_L), este critério encontra um coeficiente (λ);

$$\lambda = \frac{e_0 - e_L}{1 - e_0} \quad \text{Eq. 4}$$

Para $\lambda \geq -0,1 \rightarrow$ solos colapsíveis;

Para $\lambda \leq -0,3 \rightarrow$ solos expansivos.

- Critério de Feda (1966)

Utilizado em solos parcialmente saturados, utiliza uma função da umidade natural (w_0), do grau de saturação natural (S_0), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL) este critério define um coeficiente (K);

$$K = \frac{\left(\frac{w_0}{S_0}\right) - LP}{LL - LP} \quad \text{Eq. 5}$$

Para $K > 0,85 \rightarrow$ solos subsidientes;

Para $K > 0,85$ e $S_0 < 60\% \rightarrow$ solos colapsíveis.

- Critério de Gibbs & Bara (1961)

Este critério faz uma relação entre o teor de umidade para 100% de saturação (w_{SAT}) e limite de liquidez (LL), encontrando o coeficiente de subsidência (R);

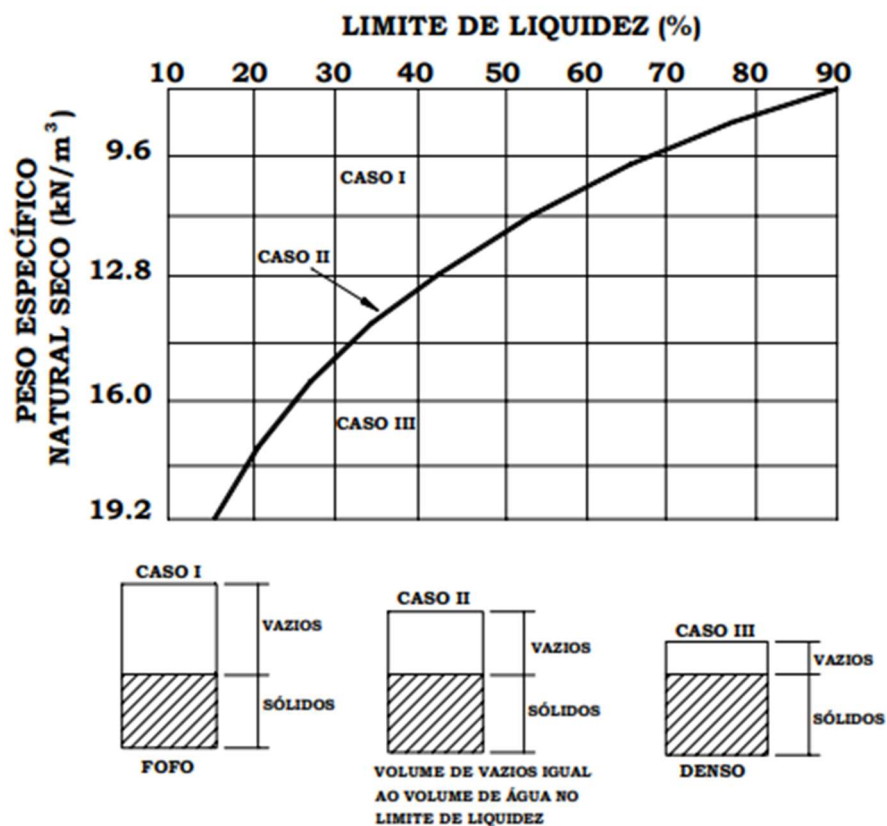
$$R = \frac{w_{SAT}}{LL} \quad Eq. 6$$

Podendo ser reescrita em função do peso específico da água (γ_w), do peso específico do solo seco (γ_d), do peso específico dos sólidos (γ_s) e do limite de liquidez (LL);

$$R = \frac{\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right) - \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right)}{LL} \quad Eq. 7$$

A partir do gráfico mostrado na Figura 3 é possível realizar análises em relação a colapsibilidade do solo.

Figura 3 - Critério de GIBBS & BARA para identificação da colapsibilidade de solos.



Fonte: Lollo (2008)

- Caso I: solo propício ao colapso;
- Caso II: características limites para que um solo não sofra colapso;
- Caso III: solo não sujeito a colapso.
- Código de obras da URSS

Em função do índice de vazios inicial no estado natural (e_0) e do índice de vazios no estado do limite de liquidez da amostra é definido o coeficiente de colapsibilidade (CI);

$$CI = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0} \quad \text{Eq. 8}$$

Para solos com graus de saturação menor que 80% e o coeficiente (CI) maior que os valores indicados na tabela abaixo para cada intervalo do índice de plasticidade (IP), o solo é considerado potencialmente colapsível;

Tabela 1 - Coeficiente de colapsibilidade (CI) em função do Índice de Plasticidade (IP).

Índice de Plasticidade	CI
$1 \leq IP \leq 10$	0,10
$10 \leq IP \leq 14$	0,17
$14 \leq IP \leq 22$	0,24

- Critério de Jennings & Knight

Em função do Grau de saturação e do material do solo o Critério de Jennings e Knight classifica o solo como colapsível ou não colapsível, como mostrado na Tabela 2;

Tabela 2 - Limites do critério de Jennings e Knight

Material predominante no solo	Grau de saturação (%)	Classificação de colapsividade
Cascalho fino	$S_r < 6$	Colapsível
	$S_r > 10$	Não colapsível
Areia fina	$S_r < 50$	Colapsível
	$S_r > 60$	Não colapsível
Silte argiloso	$S_r < 90$	Colapsível
	$S_r > 95$	Não colapsível

Fonte: Feuerharmel (2003)

- Atualização de métodos rápidos para identificação de solos potencialmente colapsíveis por Vilar & Rodrigues

A classificação de (Vilar, O.M. & Rodrigues, 2015) baseia-se principalmente nos critérios propostos por (Gibbs & Bara, 1961 apud Vilar, O.M. & Rodrigues, 2015) e de (Mello, 1973 apud Vilar, O.M. & Rodrigues, 2015). Contudo, o método de Gibbs e Bara, apesar de amplamente aplicado a solos finos, apresenta limitações, pois não identifica adequadamente solos não plásticos e pode falhar na detecção de alguns solos colapsíveis.

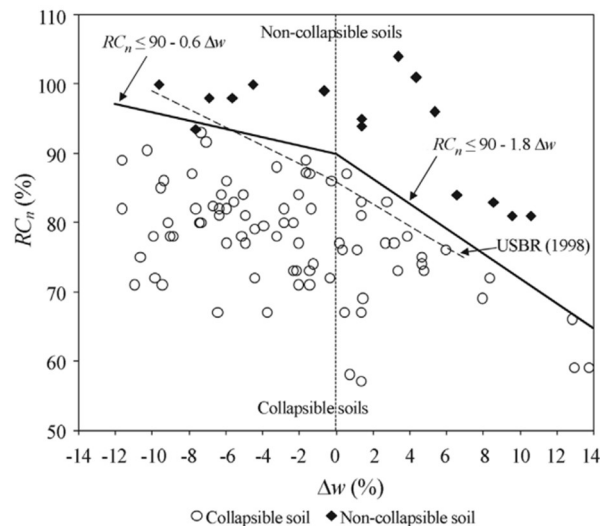
Em razão dessas restrições, os autores sugerem um critério mais atualizado, que considera diretamente a baixa compacidade natural como característica fundamental desses solos.

Com base na análise de diversos resultados experimentais de solos provenientes de diferentes regiões do mundo, os autores construíram um gráfico relacionando a compacidade relativa natural, apresentado na Eq. 9, que relaciona o peso específico seco natural do solo e o peso específico seco máximo do ensaio Proctor, e o desvio de umidade apresentada na Eq. 10, que relaciona a umidade natural do solo e a umidade ótima do ensaio Proctor. Esse gráfico permite separar regiões correspondentes a solos colapsíveis e não colapsíveis.

$$RC_n = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dm\acute{a}x}} * 100 \quad Eq. 9$$

$$\Delta w = w - w_{opt} \quad Eq. 10$$

Figura 4 - Potencial de colápsio do solo em relação a compacidade relativa e desvio de umidade.

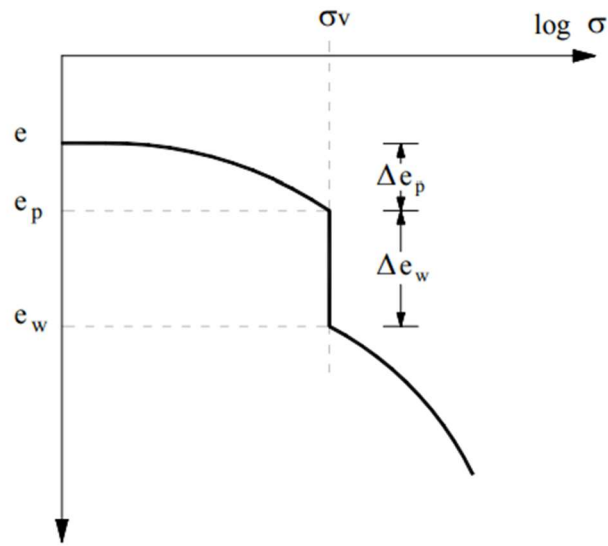


Fonte: (Vilar, O.M. & Rodrigues, 2015)

3.3.2 Ensaios de laboratório

De acordo com (Lollo, 2008) o ensaio edométrico, oedométrico, ou ensaio de colapsibilidade, executado por compressão confinada, é o método laboratorial mais utilizado para caracterizar e quantificar o colapso, realizado através da medição das deformações axiais sob inundação, podendo ser executado como ensaio duplo ou ensaio simples. Graficamente os resultados são apresentados por curvas que representam o índice de vazios do solo (e) em função das tensões aplicadas (σ') em escala logarítmica, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Curva de compressão confinada do ensaio edométrico.

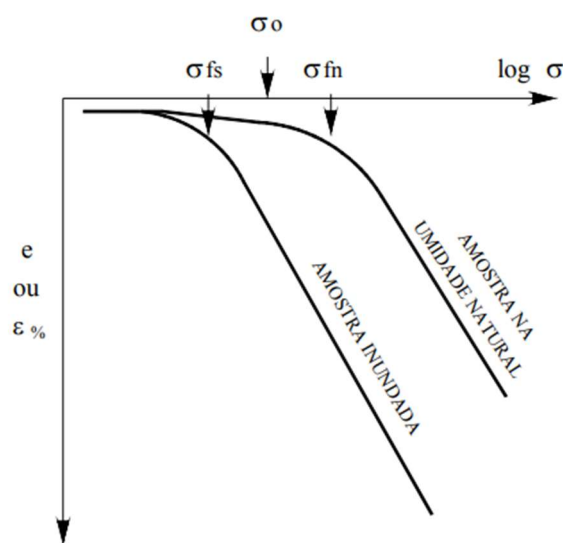


Fonte: (Lollo, 2008)

O ensaio edométrico simples consiste na aplicação de carregamentos verticais graduais sobre uma amostra de solo, mantendo-se a condição de drenagem, com o objetivo de avaliar a compressibilidade e a consolidação do solo. Nesse ensaio, a amostra é carregada apenas uma vez, sem a repetição do ciclo de carregamento, permitindo determinar parâmetros como o índice de compressão e o recalque ao longo do tempo. Além disso, é determinado o Potencial de Colapso (PC) do solo, calculado pela variação do índice de vazios (Δe_c) ou altura (ΔH_c) devida à inundação.

Já o ensaio edométrico duplo envolve dois ciclos de carregamento, sendo o segundo realizado após a amostra ter sido previamente saturada ou inundada. Esse procedimento permite analisar o comportamento do solo em estado natural e em estado de inundação, sendo especialmente importante para a identificação de solos colapsíveis, pois evidencia a variação de deformação causada pela entrada de água sob tensão constante. O seu gráfico terá as curvas das duas amostras plotadas, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Curvas de compressão confinada do ensaio edométrico duplo.



Fonte: Reginatto & Ferrero (1973, apud Lollo 2008)

Sabe-se que o ensaio edométrico duplo é o mais indicado para essa identificação e estudo do potencial de colapso dos solos.

Para se determinar a colapsibilidade de um solo a partir dos ensaios edométricos Jennings & Knight (1975, apud Lollo 2008) definiram o parâmetro de potencial de colapso do solo (CP), com base na variação do índice de vazios e índice de vazios inicial ou variação da altura do corpo de prova e altura inicial dele, que é utilizado para comparar os valores com os de referência na

$$CP = \frac{\Delta e_c}{1 + e_0} * 100\% \quad \text{Eq. 11}$$

ou

$$CP = \frac{\Delta H_c}{1 + H_0} * 100\% \quad \text{Eq. 12}$$

CP	Gravidade do Problema
0-1%	Nenhum
1-5%	Moderado
5-10%	Problemático
10-20%	Grave
>20%	Muito Grave

Outro critério baseado no ensaio edométrico é o de Vargas (1978, apud Lollo, 2008) que defini um parâmetro i a partir da variação do índice de vazios e o índice de vazios inicial, onde solos com índice $i > 0,02$ são considerados colapsíveis;

$$i = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \quad \text{Eq. 13}$$

3.3.3 Ensaios de campo

A ABNT NBR 6489:2019 (Solo — Prova de carga estática em fundação direta), especifica o ensaio de prova de carga para fundações diretas (ensaio em placa); o procedimento baseia-se na aplicação de cargas axiais estáticas de compressão sobre a placa, com o monitoramento dos recalques correspondentes. O ensaio deve prosseguir até que seja atingido, no mínimo, o dobro da tensão admissível estimada para o solo, ou até que se alcance o deslocamento máximo definido pelo projetista.

A única citação de solos colapsíveis nessa norma é que, quando necessário, a investigação geotécnica pode ser complementada por novas sondagens ou ensaios para avaliação de solos colapsíveis, por exemplo. Além disso, ela não cita a sua execução com a influência de encharcamento; entretanto, é utilizado para caracterização de um solo colapsível a prova de carga com inundação prévia do solo, como executado em uma análise efetuada por (Pereira et al., 2024), os resultados mostraram que houve uma redução expressiva da tensão de ruptura das sapatas nos ensaios realizados em condição inundada, em comparação àquelas ensaiadas no estado natural do solo. Essa redução foi da ordem de 24% quando a inundação ocorreu após a aplicação de um pré-carregamento, e de aproximadamente 64% quando a sapata permaneceu inundada desde o início do ensaio de prova de carga.

3.4 PATOLOGIAS ASSOCIADAS A SOLOS COLAPSÍVEIS

Inevitavelmente as fundações em geral sofrem recalques, independente do solo ao qual estejam apoiadas, variando o deslocamento a depender do tipo de solo e carga aplicada. Esses recalques tendem a se estabilizar com o tempo após a aplicação das cargas da estrutura. Entretanto, quando se há a presença de solo colapsível no local, haverá um recalque repentino assim que o solo for inundado. Segundo (Cintra & Aoki, 2009) as fundações implantadas nesses solos se comportaram de forma satisfatória por algum tempo, mas bruscamente sofrer um recalque adicional, em geral de considerável magnitude, devido ao aparecimento de uma fonte de água que passa a inundar o solo.

Essa inundação que acarretará um colapso não afetará apenas a fundação, pois a análise de recalques em edificações não deve ser limitada à capacidade de carga isolada da fundação, sendo imprescindível considerar a Interação Solo-Estrutura. Segundo (Garcia & Albuquerque, 2025), a Interação solo-estrutura estuda a influência entre a rigidez da superestrutura, o tipo de fundação e a deformabilidade do solo de suporte. Em solos colapsíveis, esse fenômeno torna-se ainda mais agravante para as condições de segurança da estrutura, pois conforme o solo sofre umedecimento, ocorre uma redução brusca em seu módulo de deformabilidade, alterando as condições de apoio dos elementos de fundação.

De acordo com Lollo (2008), as patologias mais comuns incluem trincas e fissuras em paredes, pisos e elementos estruturais, deformações em lajes, afundamentos localizados, portas e janelas emperradas ou desalinhadas, além de rompimento de revestimentos e tubulações enterradas. Em pequenas edificações o colapso do solo de fundação pode gerar desníveis perceptíveis no piso, comprometendo a segurança e a durabilidade da edificação. O autor ressalta que esses problemas tendem a se agravar quando há falta de impermeabilização adequada, ausência de sistemas de drenagem e execução de fundações rasas sem estudo geotécnico prévio.

O surgimento de recalques diferenciais causará uma redistribuição de esforços que acarretará esforços secundários nos elementos estruturais, atingindo a alvenaria, vigas e pilares (Garcia & Albuquerque, 2025). Ainda segundo esses autores, caso a viga não esteja devidamente armada ocorrerá fissuração na mesma e o acréscimo de cargas nos pilares devido a redistribuição de esforços o que poderá causar seu esmagamento. Enquanto nas estruturas de alvenaria autoportante a fissuração será influenciada pela presença de aberturas. É possível dividir esses danos causados na edificação em estéticos, funcionais e estruturais, (Garcia & Albuquerque, 2025 adaptado de Burland et al., 1977), como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Danos associados a movimentos da fundação.

Tipo de dano	Características	Exemplos
Estético	-Dano afeta apenas a aparência, sem comprometer o uso e a estabilidade da edificação	-Fissuras em painéis de estrutura aporticadas - Pequena inclinação de corpo rígido
Funcional	- Dano afeta o uso e/ou a funcionalidade da edificação	- Dificuldade para abertura de portas e janelas - Reversão de drenagem - Inclinação de poço de elevador
Estrutural	- Dano afeta os elementos estruturais e pode comprometer a estabilidade da edificação	- Fissuras em lajes, vigas e pilares em estruturas aporticadas - Fissuras em paredes de alvenaria estrutural

Fonte: Burland; Broms; Mello (1977).

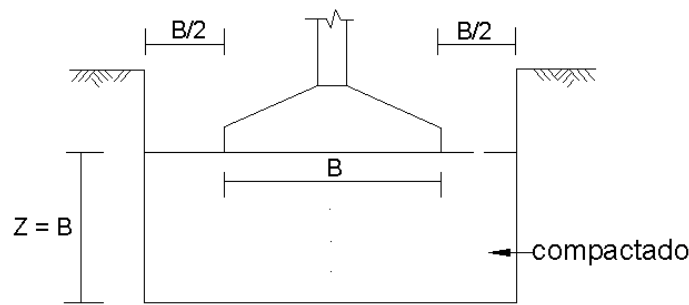
3.5 TÉCNICAS MITIGADORAS

Podem ser utilizadas técnicas de melhoramento ou de reforço do solo, a fim de mitigar os efeitos causados pelo colapso repentino de um solo colapsável. O melhoramento de solo consiste em técnicas que visam modificar as propriedades do próprio solo, por meio de técnicas como de compactação, drenagem ou estabilização. Já o reforço do solo baseia-se na introdução de elementos, como geossintéticos, que passam a trabalhar em conjunto com o solo, aumentando sua capacidade de carga e controlando deformações.

3.5.1 Compactação do solo

Segundo Cintra & Aoki (2009), a técnica de melhoramento de solo mais utilizada para a utilização de fundação superficial é a compactação do solo até a metade do bulbo de tensões. É escavada uma cava com altura z igual a base B da sapata a partir de sua cota de apoio e largura igual a $2 \times B$, isso a fim de se garantir que a propagação de tensões ocorra apenas no maciço compactado até a cota z . Após isso, o próprio solo que foi escavado é aterrado novamente em camadas compactadas, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Utilização de sapatas em solo colapsível compactado.



Fonte: (Cintra et al., 2003b, adaptado de Silveira e Souto e Silveira, 1963)

3.5.2 Controle de drenagem

Tem a função de impedir que o fluxo de água de chuva ou de vazamentos chegue à fundação superficial. Para que esse controle seja eficiente, o projeto deve integrar sistemas de drenagem superficial e profunda.

- Calçadas de proteção e canaletas: direcionam o fluxo pluvial para longe da base da edificação, minimizando a infiltração direta;
- Drenos franceses e colchões drenantes: o colchão é uma camada horizontal de material granular forrada com algum reforço impermeável que coleta toda a água abaixo da edificação e a leva para os drenos franceses que percorrem todo o perímetro da obra coletando a água dos colchões e a levando para longe da construção ou para o lençol freático por meio de tubos, sendo feita analogamente ao colchão drenante.

3.5.3 Reforço com geossintéticos

Segundo (Santomauro, 2022), os geossintéticos são materiais poliméricos, de origem sintética ou natural, podendo desempenhar funções de reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle da erosão superficial. Os principais polímeros empregados em sua fabricação são o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o poliéster (PET). No contexto de fundações diretas, a utilização de geossintéticos contribui para o aumento da capacidade de carga e a redução dos recalques, configurando-se como uma solução eficiente para os solos colapsíveis. Nessa técnica, parte do solo natural é removida e substituída por um material compactado reforçado com geossintético, destacando-se como principais vantagens o baixo custo e a simplicidade executiva, dispensando o uso de mão de obra especializada e equipamentos sofisticados.

- Geocélulas: consistem em estruturas tridimensionais de espessura considerável, como mostrado na Figura 8, fabricadas a partir de tiras de polímero conectadas entre si. Esse sistema forma compartimentos que recebem preenchimento de solo ou concreto, atuando primordialmente no reforço estrutural e na prevenção de processos erosivos;

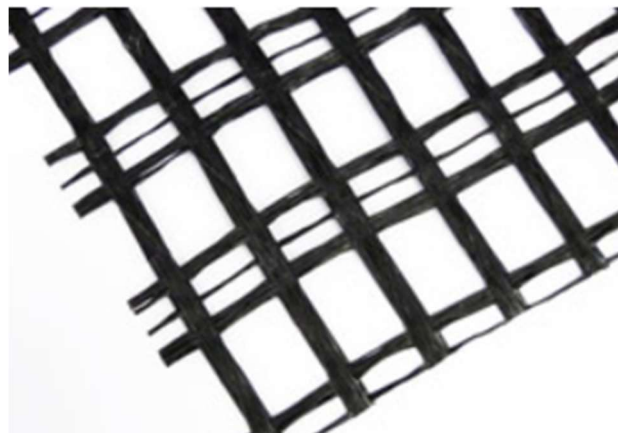
Figura 8 - Exemplo de Geocélulas.



Fonte: Santomauro (2022)

- Geogrelhas: atuam primordialmente como um elemento de reforço estrutural para o solo, elevando sua capacidade de suporte. Um diferencial crítico desse material é sua excelente resistência à fluência; isso significa que as fibras poliméricas são projetadas para suportar cargas constantes por décadas sem sofrer deformações permanentes, garantindo que a estrutura mantenha sua integridade e geometria ao longo de toda a sua vida útil, abaixo é apresentado um exemplo na Figura 9

Figura 9 - Exemplo de Geogrelhas.



Fonte: Santomauro (2022)

- Geomembranas: A principal função da geomembrana é a de estanqueidade, desse modo, criando uma barreira para que os fluidos não atravessem onde ela está empregada.

3.5.4 Compactação dinâmica

Segundo (Natário, 2017) a compactação dinâmica baseia-se na aplicação de impactos repetidos de massas de diferentes pesos, lançadas de alturas variadas em queda livre ou guiada, com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas em profundidade, sendo uma técnica aplicável principalmente a solos granulares. A definição dos pontos de impacto, do número de repetições e cargas depende das características do solo e do nível de melhoramento requerido, de modo a atender aos critérios de recalque admissível e capacidade de carga. Em solos granulares, esse procedimento pode resultar em compactação imediata, decorrente da reorganização instantânea das partículas e da redução do índice de vazios, observada por meio dos recalques após o impacto, bem como em compactação diferida, típica de alguns solos saturados, associada ao aumento temporário da pressão neutra, que pode provocar liquefação momentânea e permitir uma reorganização mais densa das partículas durante a dissipação dessa pressão.

3.5.5 Vibro compactação

De acordo com (Natário, 2017) a técnica de vibro compactação é um melhoramento do solo voltado a sua densificação, realizada por meio de um vibrador suspenso por grua, equipado com uma ponta metálica provida de orifícios para injeção de água sob pressão. O processo tem início com a cravação do vibrador até a profundidade determinada, a qual é alcançada pelo peso próprio do equipamento associado à ação da água injetada. A vibração juntamente com a adição de água promove a compactação dos solos granulares, possibilitando a reorganização das partículas e resultando em densificação imediata. A técnica também pode ser empregada em solos coesivos, desde que seja complementada com a introdução de material granular. O espaçamento dos pontos de vibro compactação devem ser definidos com base nas propriedades mecânicas iniciais do solo, nos critérios de recalque admissível e capacidade de carga exigidos pelo projeto.

3.5.6 Inclusões rígidas e semirrígidas

As inclusões rígidas e semirrígidas, como as colunas executadas in situ, atuam promovendo o aumento da rigidez do maciço e a redistribuição das tensões para camadas

mais competentes, reduzindo recalques e mitigando os efeitos da colapsibilidade do solo. A seguir são apresentados alguns métodos consultados em Natário (2017).

- Colunas de britas

As colunas de brita são executadas com o auxílio de um equipamento semelhante ao utilizado na vibro compactação, o qual é cravado no solo juntamente com a introdução de material granular, formando inclusões verticais caracterizadas por elevada rigidez, boa resistência ao cisalhamento e capacidade de drenagem. Durante a fase de penetração do vibrador, o solo é deslocado lateralmente. Após alcançar a profundidade de projeto, inicia-se a retirada gradual do equipamento, acompanhada da alimentação ascendente do material granular pela extremidade inferior e pelo interior do vibrador. A conformação da coluna ocorre por meio de apiloamentos sucessivos, executados em incrementos da ordem de 0,3 a 0,5 m, até atingir a superfície. O diâmetro da coluna pode variar ao longo do seu comprimento, em função das características do solo circundante nos diferentes estratos atravessados.

- Colunas de Módulo Controlado

As colunas de módulo controlado (CMC) são executadas por meio da cravação de uma ferramenta rotativa, projetada para penetrar e deslocar lateralmente o solo, sem a retirada de material. Essa ferramenta, com diâmetro geralmente entre 250 e 450 mm, é acoplada a equipamentos de alto torque, que permitem sua introdução até a profundidade de projeto. Após atingir a cota prevista, a ferramenta é retirada de forma controlada, enquanto ocorre a injeção sob pressão de calda de cimento, argamassa ou concreto, formando a coluna. Diferentemente das fundações profundas tradicionais, as CMC atuam aumentando a rigidez do maciço, possibilitando que a carga seja compartilhada entre as colunas e o solo melhorado, sendo parte transmitida às colunas e parte absorvida pelo solo adjacente.

- Trenchmix

O Trenchmix é uma técnica patenteada de melhoramento de solos desenvolvida a partir da adaptação de equipamentos convencionais de escavação de valas, modificados para desagregar o solo, incorporar um agente ligante e realizar a mistura *in situ* de forma eficiente. Inserida no grupo das técnicas de *deep soil mixing*, a metodologia consiste na execução de valas preenchidas com solo tratado, nas quais o solo é desmontado e misturado ao ligante por meio de uma serra de ação contínua, enquanto o equipamento se desloca. A incorporação do ligante pode ocorrer tanto a seco quanto via úmida, conforme as características do solo. Durante a execução, os principais parâmetros operacionais são

monitorados em tempo real, permitindo o controle da qualidade do processo. Como resultado, obtém-se um material com boa homogeneidade e resistência ao longo da profundidade da vala.

4 CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DO TIPO DE FUNDAÇÃO

Diante das particularidades apresentadas pelos solos colapsíveis e das possíveis técnicas mitigadoras, torna-se fundamental estabelecer critérios técnicos que orientem a escolha do tipo de fundação mais adequado.

Segundo Albuquerque & Garcia (2020), a escolha do tipo de fundação é uma das etapas mais importantes presentes na engenharia de fundações, podendo ser rasa ou profunda, e em variados processos construtivos. A sua escolha irá depender de alguns fatores, entre eles:

- Sistema estrutural empregado: podendo ser reticulado em concreto armado, alvenaria estrutural, estrutura de aço, estrutura de madeira, entre outros;
- Forma dos carregamentos: podem ser concentrados ou distribuídos;
- Intensidade dos carregamentos: variando em função do tamanho da edificação e do uso empregado;
- Tipo dos carregamentos: compressão, tração, horizontal, momento, entre outros;
- Informações geológicas e geotécnicas a respeito do subsolo, além do nível do lençol freático;
- O cenário do mercado local: considerando a disponibilidade dos métodos executivos na região;
- Custos associados: determinadas soluções podem ser tecnicamente viáveis, mas apresentar um custo maior em relação à outras soluções;
- Localização da obra: por conta das patologias que podem surgir devido a determinados métodos construtivos de fundação;
- Tempo despendido: logística e economia de tempo devem ser priorizados a fim de se adequar ao cronograma da obra.

5 FLUXO DECISÓRIO

A partir da análise crítica da literatura técnica sobre solos colapsíveis foi possível propor um fluxograma estruturado de forma sequencial e lógica, considerando desde a identificação preliminar do solo até a definição do tipo de fundação e das medidas

mitigadoras mais adequadas. A Figura 10 apresenta o fluxo decisório proposto para a escolha do tipo de fundação.

A elaboração do fluxo decisório baseou-se em algumas premissas. Primeiramente, o fluxo foi desenvolvido com foco em edificações de pequeno porte, como residências unifamiliares e sobrados, que geralmente apresentam carregamentos relativamente baixos e sistemas estruturais convencionais. Outra premissa importante é a possibilidade de ocorrência de encharcamento do solo ao longo da vida útil da edificação, seja por infiltrações, falhas em sistemas de drenagem ou variações do nível do lençol.

5.1 PROSPECÇÃO INICIAL

A primeira etapa do fluxo é a localização da obra, caso a região não esteja em região de clima tropical, as premissas deste fluxo não se aplicam. Em seguida, verifica-se a saturação do solo; se estiver permanentemente saturado, os riscos de colapso por umedecimento são eliminados, permitindo o uso de critérios usuais de projeto.

5.2 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS

Para solos não saturados em clima tropical, o fluxo direciona para a classificação do solo tropical. Caso esse seja laterítico não seja laterítico, segue-se com o dimensional usual, mas com verificação de recalques; caso seja um solo laterítico, segue no fluxo, pois esses possuem comportamento peculiar de resistência e porosidade que influenciam na colapsibilidade.

5.3 CLASSIFICAÇÃO DE COLAPSIBILIDADE

Caso o solo seja identificado como potencialmente colapsível, o fluxo direciona para a aplicação de critérios de colapsibilidade, como os de Vargas, Jennings & Knight, entre outros. Se o solo for classificado, segundo o critério adotado, como colapsível, deve-se avançar para as estratégias de mitigação ou solução profunda.

5.4 PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES TÉCNICAS

As soluções apresentadas no fluxo visam garantir o desempenho da edificação ao longo de sua vida útil, mantendo recalques totais e diferenciais em níveis aceitáveis mesmo em solos colapsíveis. Se for possível a adoção de fundação rasa em função dos critérios de cálculo, deve-se exigir mitigação do colapso, podendo ser empregado técnica de melhoramento do solo, que permita a utilização de fundação rasa (radier ou sapata), prevendo-se um controle rigoroso de drenagem. Caso seja adotada fundação profunda,

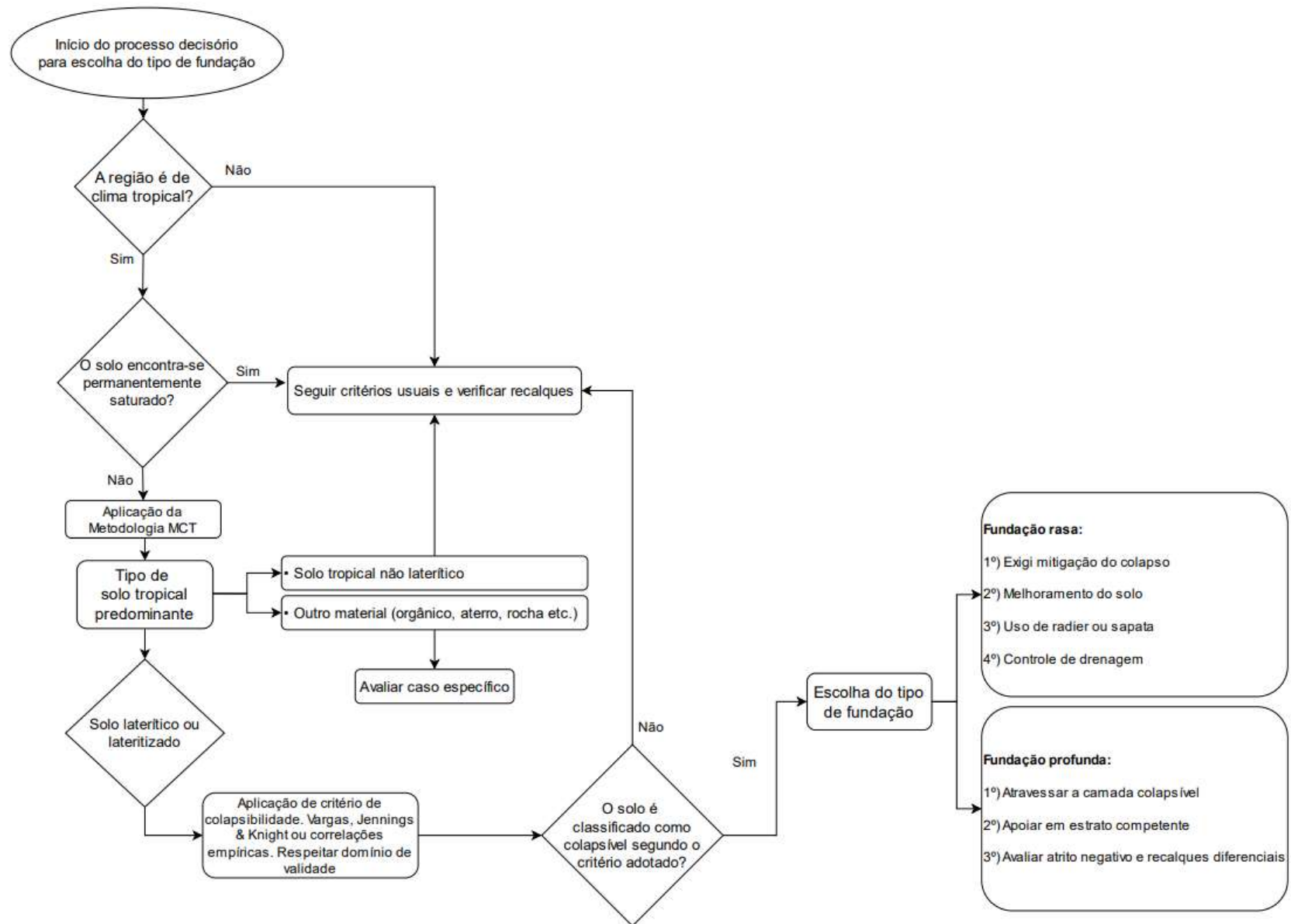
deve-se atravessar a camada de solo potencialmente colapsível apoiando em estrato competente, além de avaliar atrito negativos e recalques diferenciais.

5.5 APLICABILIDADE DO FLUXO DECISÓRIO

O fluxo decisório proposto tenta preencher a lacuna apontada acerca da falta de detalhamento das normas atuais sobre como proceder na escolha do tipo de fundação em solos colapsíveis. Ao priorizar ensaios simples e observações de campo, a ferramenta torna-se acessível para obras de pequeno e médio porte.

Assim, traz uma contribuição à sociedade e o setor da construção civil, em especial a proprietários e pequenos construtores que, muitas vezes, não dispõem de condições para realizar análises geotécnicas mais detalhadas antes da execução das edificações.

Figura 10 - Proposta de fluxo auxiliar para tomada de decisão em projetos de fundações em solos colapsíveis.



Fonte: Autores (2026)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo a sugestão de um fluxo decisório para auxiliar a escolha do tipo de fundação para edificações de pequeno porte em solos colapsíveis. Visto que esses representam um desafio relevante para a geotecnia e a engenharia de fundações, não só por conta de seus bruscos recalques quando levado ao encharcamento, como também, por sua dificuldade de identificação. Observou-se que as normas técnicas brasileiras reconhecem a existência do fenômeno da colapsibilidade, porém não fornecem diretrizes quanto à escolha do tipo de fundação ou às medidas mitigadoras mais adequadas, o que reforça a importância de estudos complementares e de ferramentas de apoio à tomada de decisão.

Diante dessa lacuna, o proposto trabalho traz uma proposta de fluxo decisório apresentado que contribui de forma lógica e sequencial para a identificação do solo potencialmente colapsível, assim como na avaliação do potencial de colapso e definição das soluções técnicas mais adequadas. Esse fluxo decisório proposto pode ser utilizado como base para identificação de solos colapsíveis em regiões tropicais auxiliando na tomada de decisão na escolha mais adequada do tipo de fundação para determinado empreendimento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, P. J.; GARCIA, J. R. **Engenharia de Fundações**. São Paulo: LTC. 2020
- BURLAND, J. B.; BROMS, B. B.; MELO, V. F. B. Behavior of foundations and structures. **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engeneering, 9**. Tóquio. 1977
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Projeto de Fundações em Solos Colapsíveis**. São Carlos: EESC-USP. 2009
- GARCIA, J. R.; ALBUQUERQUE, P. J. R. De. **Patologia das Construções**. Rio de Janeiro: LTC. 2025
- IPR, I. de P. em T. –. Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. 2023
- LOLLO, J. A. De. **Solos Colapsíveis: Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. São Paulo: Cultura Acadêmica. 2008
- NATÁRIO, P. J. G. OBRAS DE MELHORAMENTO E REFORÇO DE SOLOS. **Sociedade Portuguesa de Geotecnia**. p. 77–98. 2017
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo. 1995

PEREIRA, B. E.; OLIVEIRA, E. A. dos S.; GARCIA, J. R. Análise Experimental de Sapatas Isoladas em Solo Colapsível sob Diferentes Condições de Umidade e Pré-carregamento. **COBRAMSEG**. 2024

SANTOMAURO, A. C. **6 principais tipos de geossintéticos**. 2022

VILAR, O.M. & RODRIGUES, R. A. Revisiting classical methods to identify collapsible soils. **Soils and Rocks**. p. 265–278. 2015