

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS PATOS
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO VICTOR FONTES CAVALCANTE

**MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTIMATIVA DE COLAPSO EM SOLOS A
PARTIR DO TEOR DE PARTÍCULAS GROSSAS E MASSA ESPECÍFICA
APARENTE SECA**

PATOS - PB

2026

JOÃO VICTOR FONTES CAVALCANTE

**MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTIMATIVA DE COLAPSO EM SOLOS A
PARTIR DO TEOR DE PARTÍCULAS GROSSAS E MASSA ESPECÍFICA
APARENTE SECA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba – *Campus* Patos, como
requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador (a): Prof. MSc. Valteson da Silva
Santos

PATOS - PB

2026

C377m Cavalcante, João Victor Fontes.

Modelo simplificado para estimativa de colapso em solos a partir do teor de partículas grossas e massa específica aparente seca / João Victor Fontes Cavalcante. - Patos, 2026.

75 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)-Instituto Federal do Sertão da Paraíba, Campus Patos-PB, 2026.

Orientador(a): Prof. MSc. Valteson da Silva Santos

1. Colapso de solos 2. Geotecnia-Alerta geotécnico 3. Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC) I. Título II. Santos, Valteson da Silva III. Instituto Federal do Sertão da Paraíba.

CDU – 624.131

JOÃO VICTOR FONTES CAVALCANTE

**MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTIMATIVA DE COLAPSO EM SOLOS A
PARTIR DO TEOR DE PARTÍCULAS GROSSAS E MASSA ESPECÍFICA
APARENTE SECA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba – *Campus* Patos, como
requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Civil.

APROVADO EM: 25/ 06 /2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Valteson da Silva Santos - Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Prof. Me. Dennis Oliveira Galdino – Examinador Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Prof. Dr. Pablo da Silva Araujo – Examinador Externo
UNIFIP Centro Universitário

AGRADECIMENTOS

Expresso, primeiramente, minha gratidão a Deus e a Nossa Senhora, por sempre me abençoarem, permanecerem ao meu lado e me ajudarem a superar os desafios ao longo desta caminhada.

Agradeço a toda a minha família, meu alicerce, por todo o apoio, incentivo e carinho. Vocês foram essenciais para a minha formação e para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus pais, Adenildo e Jussara, agradeço por todo o esforço dedicado à minha educação, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da minha vida, pelo apoio constante durante esta trajetória e por celebrarem comigo cada conquista.

Aos meus irmãos, Luis Antônio e Ricardo, agradeço pela presença, pelo companheirismo e pelo apoio ao longo dessa caminhada.

Agradeço aos meus avós por todo o cuidado, carinho, amor e zelo que sempre tiveram comigo. Aos meus avós maternos, Mãe Lourinha e Pai Joãozinho, pelos ensinamentos, pelo apoio e pelas lembranças construídas ao longo da minha vida. À minha avó paterna, Dona Ana, por todo o carinho, pelos ensinamentos e pelas histórias compartilhadas comigo ao longo dos anos.

À minha noiva e futura esposa, Bianca, agradeço por todo o apoio ao longo dessa trajetória, por ser meu porto seguro nos momentos de cansaço, pela compreensão, pelo incentivo e por todo o esforço dedicado a me ajudar nos momentos em que mais precisei.

Agradeço, de modo especial, ao Prof. MSc. Valteson da Silva Santos, pela disponibilidade em orientar este trabalho, pelas contribuições durante seu desenvolvimento e pelos ensinamentos transmitidos em sala de aula.

Agradeço também ao meu amigo Eng. Carlos Henrique, e ao Sr. Iramilton e à Sra. Claudineia, por terem contribuído para o meu contato com a profissão de engenheiro civil e para o meu desenvolvimento profissional.

A todos os meus amigos e colegas, agradeço pelos momentos de apoio, colaboração, aprendizado e alegria compartilhados durante essa trajetória.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa tão importante da minha vida.

RESUMO

A identificação de solos suscetíveis ao colapso é relevante para o planejamento de investigações geotécnicas, uma vez que esse comportamento pode provocar deformações volumétricas significativas após o umedecimento. Entretanto, sua avaliação depende, em geral, de ensaios laboratoriais específicos, o que pode limitar a identificação preliminar do fenômeno. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um modelo simplificado para estimar preliminarmente o potencial de colapso de solos não saturados a partir do teor de partículas grossas e da massa específica aparente seca. O modelo foi fundamentado em conceitos micromecânicos relacionados ao número de coordenação, à distribuição estatística dos contatos e à ocorrência de partículas potencialmente instáveis. Para seu desenvolvimento, foram utilizados dados de 29 amostras provenientes de ensaios de colapso, empregados na obtenção e no ajuste das correlações matemáticas. Posteriormente, realizou-se uma verificação experimental preliminar com cinco corpos de prova submetidos a ensaios edométricos com inundação. Os resultados experimentais apresentaram potenciais de colapso entre 1,19% e 3,01%, com média de 1,98%, enquanto o modelo apresentou valor médio estimado de aproximadamente 2,37%. A análise micromecânica indicou relação entre o índice de vazios, o número médio de coordenação e a fração estimada de partículas potencialmente instáveis, permitindo representar o colapso como uma reorganização da estrutura granular. Conclui-se que o modelo apresenta potencial como ferramenta preliminar de triagem para identificação de situações que justifiquem a realização de ensaios específicos de colapso. Entretanto, devido ao número reduzido de corpos de prova utilizados na verificação experimental, os resultados não permitem estabelecer capacidade de generalização, sendo necessária a ampliação da base experimental para avaliar sua aplicação em diferentes condições geotécnica.

Palavras-chave: Colapso de solos; número de coordenação; modelo de Oda; partículas instáveis; CDPC; alerta geotécnico.

ABSTRACT

The identification of soils susceptible to collapse is relevant to the planning of geotechnical investigations, since this behavior may cause significant volumetric deformations after wetting. However, its assessment generally depends on specific laboratory tests, which may limit the preliminary identification of the phenomenon. In this context, this study aimed to develop and evaluate a simplified model for the preliminary estimation of the collapse potential of unsaturated soils based on coarse particle content and dry apparent density. The model was based on micromechanical concepts related to coordination number, the statistical distribution of contacts, and the occurrence of potentially unstable particles. Data from 29 soil samples subjected to collapse tests were used for the development and adjustment of the mathematical correlations. Subsequently, a preliminary experimental verification was carried out using five specimens subjected to oedometer tests with inundation. The experimental results showed collapse potential values ranging from 1.19% to 3.01%, with a mean of 1.98%, whereas the model provided an estimated mean value of approximately 2.37%. The micromechanical analysis indicated a relationship between void ratio, mean coordination number, and the estimated fraction of potentially unstable particles, allowing collapse to be represented as a reorganization of the granular structure. It is concluded that the model shows potential as a preliminary screening tool for identifying situations in which specific collapse tests are recommended. However, due to the limited number of specimens used in the experimental verification, the results are not sufficient to establish the model's generalization capability, and a larger experimental database is required to assess its applicability under different geotechnical conditions.

Keywords: Soil collapse; coordination number; Oda's model; unstable particles; contact number probability distribution (CDPC); geotechnical screening tool.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONCEITO BÁSICO DE COLAPSO.....	16
FIGURA 2 - SOLOS COLAPSÍVEIS ESTUDADOS NO BRASIL	17
FIGURA 3 - ESTRUTURA DO SOLO CARREGADA ANTES E DEPOIS DA INUNDAÇÃO	19
FIGURA 4 - CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS COLAPSÍVEIS (SEGUNDO GIBBS E BARA 1962).	20
FIGURA 5 - ENSAIO EDOMÉTRICO EM LABORATÓRIO PARA REPRODUÇÃO DO EFEITO DE COLAPSO.	21
FIGURA 6 - CPDC COM REPRESENTAÇÃO DE PARTÍCULAS INSTÁVEIS	34
FIGURA 7 - FLUXOGRAMA.....	40
FIGURA 8 – CDPCs TEÓRICAS ANTES E APÓS COLAPSO	42
FIGURA 9 - DESTORROAMENTO E HOMOGENEIZAÇÃO DA AMOSTRA DE SOLO.	43
FIGURA 10 - DETERMINAÇÃO DAS MASSAS DE SOLO E DE ÁGUA UTILIZADAS NA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	44
FIGURA 11 - MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA EM ANEL METÁLICO	44
FIGURA 12 - PRENSA UTILIZADA NA COMPACTAÇÃO ESTATICA DOS CORPOS DE PROVA.	45
FIGURA 13 - MONTAGEM DO CORPO DE PROVA NO EQUIPAMENTO DE ADENSAMENTO.....	45
FIGURA 14 – RESULTADO DA ANÁLISE DE BOXPLOT REALIZADA.....	54
FIGURA 15 - DESVIO PADRÃO EXPERIMENTAL	58
FIGURA 16 – CORRELAÇÃO ENTRE E_0 E PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS PÓS-COLAPSO.....	61
FIGURA 17 - HISTOGRAMA DE ERROS ABSOLUTOS DA AVALIAÇÃO INTERNA DO MODELO	63
FIGURA 18 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DE CONTATOS DE UMA AMOSTRA DE SOLO	66
FIGURA 19 - QR CODE PARA DOWNLOAD DA PLANILHA AUTOMATIZADA.	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS	53
TABELA 2 - POTENCIAL DE COLAPSO OBTIDO NOS ENSAIOS LABORATORIAIS.....	53

SUMÁRIO

	Pg
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.1.1. <i>Geral</i>	14
1.1.2. <i>Específicos</i>	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	15
2.1. SOLOS COLAPSÍVEIS	15
2.1.1. <i>Definição</i>	15
2.1.2. <i>Características dos solos colapsíveis</i>	17
2.1.3. <i>Estrutura metaestável</i>	18
2.1.4. <i>Critérios de classificação</i>	19
2.2. MICROMECAÂNICA DOS MATERIAIS GRANULARES.....	21
2.2.1. <i>Estrutura granular</i>	22
2.2.2. <i>Número de coordenação</i>	23
2.2.3. <i>Rede de contatos</i>	24
2.3. MODELO DE ODA (1977)	25
2.3.1. <i>Conceito de partículas instáveis</i>	26
2.3.2. <i>Critério estrutural de estabilidade</i>	27
2.3.3. <i>Aplicações do modelo de Oda ao estudo do colapso</i>	29
2.4. MODELO DE ISOLA (2008)	29
2.4.1. <i>Distribuição estatística do número de contatos</i>	30
2.4.2. <i>Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC)</i>	31
2.4.3. <i>Desvio padrão e heterogeneidade estrutural</i>	32
2.4.4. <i>Fração de partículas instáveis</i>	33
2.4.5. <i>Aplicação da abordagem micromecânica ao modelo de colapso</i>	34
2.5. MODELO DE UEDA ET AL. (2011)	35
2.5.1. <i>Relação entre índice de vazios e número de coordenação</i>	35
2.5.2. <i>Interpretação física da conectividade estrutural</i>	36
2.5.3. <i>Aplicação do modelo de Ueda ao estudo do colapso</i>	37
2.6. INTEGRAÇÃO CONCEITUAL DOS MODELOS DE ODA (1977), ISOLA (2008) E UEDA ET AL. (2011).....	38
3. MATERIAIS E METODOS	40
3.1. ESTIMATIVA DA CONDIÇÃO PÓS-COLAPSO	41
3.2. ESTIMATIVA DA DEFORMAÇÃO DE COLAPSO	41
3.3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	42
3.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	42
3.5. DESENVOLVIMENTO DO MODELO SIMPLIFICADO.....	46
3.5.1. <i>Hipótese estrutural do colapso</i>	47
3.5.2. <i>Variáveis de entrada</i>	47
3.5.3. <i>Determinação da condição estrutural inicial</i>	48
3.5.4. <i>Determinação da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos</i>	48
3.5.5. <i>Determinação da fração de partículas instáveis</i>	49
3.5.6. <i>Critério de estabilidade pós-colapso</i>	49
3.5.7. <i>Determinação da coordenação pós-colapso</i>	49
3.5.8. <i>Determinação do índice de vazios pós-colapso</i>	50
3.5.9. <i>Estimativa da deformação de colapso</i>	50
3.6. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS	50

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS ANALISADAS.....	52
4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COLAPSO	53
4.3. INFLUÊNCIA DO TEOR DE PARTÍCULAS GROSSAS NO COMPORTAMENTO	
ESTRUTURAL	55
4.4. RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE VAZIOS E DESVIO PADRÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE	
CONTATOS	57
4.5. RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE VAZIOS, P_i E N_c APÓS COLAPSO.	60
4.6. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS	63
4.7. VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DO MODELO PROPOSTO	64
4.8. INTERPRETAÇÃO MICROMECAÂNICA DOS RESULTADOS	65
4.9. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO PROPOSTO.....	69
5. CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

Solos colapsíveis são materiais não saturados que, quando submetidos à inundação sob tensão constante, podem sofrer redução abrupta do índice de vazios devido à ruptura de sua estrutura metaestável. Caracterizam-se, em geral, por baixa densidade, baixo teor de umidade natural e elevada rigidez aparente no estado seco (Li *et al.*, 2016).

O colapso estrutural pode induzir recalques significativos e inesperados, comprometendo o desempenho de fundações superficiais, aterros, pavimentos e redes de infraestrutura. Depósitos com esse comportamento ocorrem em diversas regiões do mundo, especialmente em ambientes áridos, semiáridos e tropicais (Dudley, 1970; Al-Rawas, 2000). No Brasil, sua ocorrência é ampla, com destaque para as regiões Centro-Sul e Nordeste (Rocha, 2023).

A identificação do potencial de colapso ainda depende predominantemente de ensaios específicos, como ensaios edométricos simples ou duplos, além de métodos de campo como o expansocolapsímetro (Souza Neto *et al.*, 2012). Métodos qualitativos baseiam-se em índices físicos e limites de consistência, enquanto métodos quantitativos requerem ensaios laboratoriais controlados (Jennings & Knight, 1975; Gibbs & Bara, 1967). Tais procedimentos demandam tempo, infraestrutura especializada e, frequentemente, amostras indeformadas, o que pode dificultar sua aplicação nas fases preliminares de investigação geotécnica (Rocha, 2024). Nesse contexto, ferramentas de triagem baseadas em parâmetros de fácil obtenção tornam-se particularmente relevantes.

Este trabalho propõe um modelo simplificado para estimativa preliminar da suscetibilidade ao colapso utilizando apenas a massa específica aparente seca do solo. O modelo fundamenta-se no conceito de partículas instáveis de Oda (1977), segundo o qual a estabilidade estrutural de um arranjo granular está relacionada ao número de contatos entre partículas. A distribuição do número de contatos é modelada estatisticamente como normal (Isola, 2008), sendo sua variabilidade associada também ao índice de vazios inicial.

O colapso é estimado ao determinar-se a nova média capaz de reduzir a fração de partículas instáveis para aproximadamente um valor aqui chamado de Π . A partir desse ajuste, estimam-se o índice de vazios pós-colapso e a deformação volumétrica associada. O modelo não substitui ensaios laboratoriais especializados, mas constitui ferramenta preliminar de triagem aplicável às fases iniciais de investigação geotécnica, contribuindo para o planejamento mais eficiente de campanhas experimentais.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Geral

- Desenvolver um modelo simplificado, fundamentado em princípios micromecânicos, para estimar preliminarmente o potencial de colapso de solos não saturados a partir do teor de partículas grossas e da massa específica aparente seca.

1.1.2. Específicos

- Revisar os principais mecanismos de colapso em solos não saturados e os modelos teóricos relevantes para sua estimativa;

- Estabelecer a relação entre o teor de partículas grossas, a massa específica aparente seca e a estabilidade estrutural do arranjo granular do solo;

- Construir a Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC) do solo a partir de seus parâmetros físicos;

- Propor um procedimento para estimar a condição estrutural pós-colapso com base na redução da fração de partículas instáveis;

- Avaliar o desempenho do modelo desenvolvido por meio da comparação com resultados experimentais de ensaios de colapso.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. SOLOS COLAPSÍVEIS

2.1.1. Definição

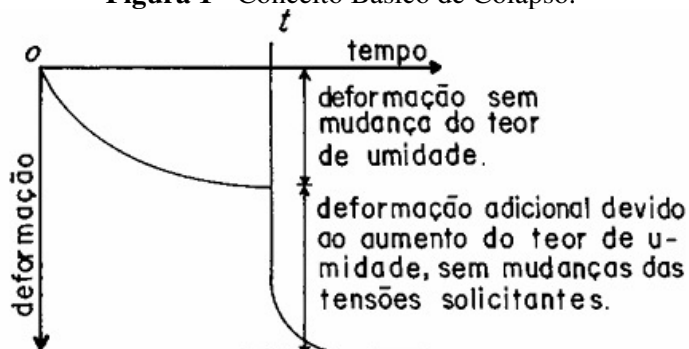
Os solos colapsíveis são materiais não saturados que apresentam deformações volumétricas significativas quando submetidos ao umedecimento, ao carregamento ou à combinação simultânea desses fatores. Existem solos colapsíveis que, ao serem inundados, entram em colapso apenas pelo próprio peso da camada. Em outros, o colapso está associado a uma sobrecarga. Entretanto, mais frequentemente, o fenômeno ocorre por uma combinação do efeito da sobrecarga e do acréscimo do grau de saturação (Vilar, 1979).

Esse fenômeno ocorre devido à perda de estabilidade da estrutura interna do solo, provocando rearranjo das partículas e consequente redução do índice de vazios. Solos colapsíveis são solos não saturados que experimentam um rearranjo radial de partículas seguido de uma redução de volume quando inundado com acréscimo ou não de sobrecarga. (Clemece e Finbarr, 1981).

Segundo Mendonça (1990), o colapso corresponde a uma redução volumétrica rápida quando comparada ao processo convencional de adensamento de solos saturados. Diferentemente do adensamento, cuja deformação ocorre em função da dissipação gradual das pressões neutras, o colapso resulta da destruição de uma estrutura metaestável previamente existente.

Deve-se entender por brusca ou súbita a redução de volume a velocidade muito maior do que a de adensamento de solo argiloso saturado (Mendonça, 1990). A Figura 1 ilustra esse comportamento: a curva evidencia uma primeira etapa de deformação sob carregamento, sem variação do teor de umidade, seguida por uma deformação adicional, mais acentuada, provocada pelo aumento do teor de umidade sem alteração das tensões aplicadas. Essa segunda etapa representa o colapso da estrutura do solo.

Figura 1 - Conceito Básico de Colapso.



Fonte: Mendonça, 1990.

Reginatto e Ferrero (1973), considera dois tipos existentes: os solos verdadeiramente colapsíveis, que não suportam o seu próprio peso quando inundados e colapsam; e os solos condicionados ao colapso, sendo aqueles cuja ocorrência do colapso é função do nível de tensões a que o solo está submetido. Nesse processo, a água atua reduzindo ou eliminando os mecanismos responsáveis pela estabilidade estrutural, desencadeando deformações que podem comprometer o desempenho de fundações, aterros, pavimentos e outras obras geotécnicas.

Os solos colapsíveis podem ocorrer em diferentes contextos geológicos, incluindo depósitos eólicos, aluviais, coluviais e residuais. Esses materiais geralmente apresentam estrutura aberta e porosa, cuja estabilidade pode ser reduzida com o aumento do teor de umidade (Al-Rawas, 2000). Em regiões tropicais, processos de lixiviação também podem contribuir para o desenvolvimento de estruturas porosas e metaestáveis, favorecendo a ocorrência do colapso.

As regiões de clima tropical apresentam condições favoráveis ao desenvolvimento de solos potencialmente colapsíveis, seja pela lixiviação dos finos dos horizontes superficiais em áreas sujeitas à alternância entre estações secas e períodos de precipitação intensa, seja pela deficiência de umidade dos solos desenvolvidos em regiões áridas e semiáridas (Vilar et al., 1981).

No Brasil, há registros de solos colapsíveis em diferentes regiões do país. O levantamento apresentado por Cintra e Aoki (2009) reúne municípios nos quais esse comportamento já havia sido identificado até aquele período, com maior concentração de ocorrências nas regiões Sul e Sudeste. Entretanto, a ausência de registros em determinadas áreas do mapa não deve ser interpretada como inexistência do fenômeno, uma vez que estudos posteriores ampliaram a identificação de solos colapsíveis em outras regiões. A Figura 2 apresenta esse levantamento histórico de ocorrências.

Figura 2 - Solos colapsíveis estudados no Brasil



Fonte: Cintra (2009, p. 14).

2.1.2. Características dos solos colapsíveis

Os solos colapsíveis apresentam características estruturais específicas que os diferenciam dos demais tipos de solo. Existem duas características que configuram um solo colapsível: um elevado índice de vazios (o que determina sua estrutura porosa) e um baixo teor de umidade (menor que o necessário para sua completa saturação) (Benatti, 2010).

Rocha et al. (2024) descrevem esses materiais como geomateriais não convencionais e geralmente caracterizados por elevada porosidade, decorrentes das ligações entre partículas, da estrutura do solo e da sucção. Tais condições conferem resistência aparente ao material em estado não saturado; contudo, essa estabilidade pode ser significativamente reduzida por alterações na umidade ou por deformações que modifiquem sua estrutura interna.

Os solos colapsíveis apresentam um conjunto de características físicas e estruturais que os tornam suscetíveis a deformações significativas quando ocorre a saturação. Nesse sentido, Mendonça (1990) destaca que a forma com que se dá o colapso depende tanto das características inerentes ao solo, quanto do modo de variação da umidade e da carga aplicada.

A compreensão do comportamento dos solos colapsíveis está diretamente relacionada à natureza das forças que mantêm sua estrutura estável em condição não saturada. Nesse contexto os solos colapsíveis são caracterizados por uma estrutura altamente porosa em que as partículas sólidas se mantêm interligadas por meio de vínculos que possuem uma resistência

temporária proveniente de forças capilares ou de adsorção, ou pela presença de algum agente cimentante (Chagas, 2017).

Jennings e Knight (1957) fornecem uma hipótese para o fenômeno do colapso: a estrutura de um solo colapsível ao ser carregada, no seu teor de umidade natural, comprime suavemente, resistindo aos esforços de compressão entre os grãos, sem grandes movimentos relativos entre eles. Porém, quando este solo carregado ganha umidade e alcança um teor de umidade crítico, os vínculos de resistência enfraquecem e a estrutura colapsa.

2.1.3. Estrutura metaestável

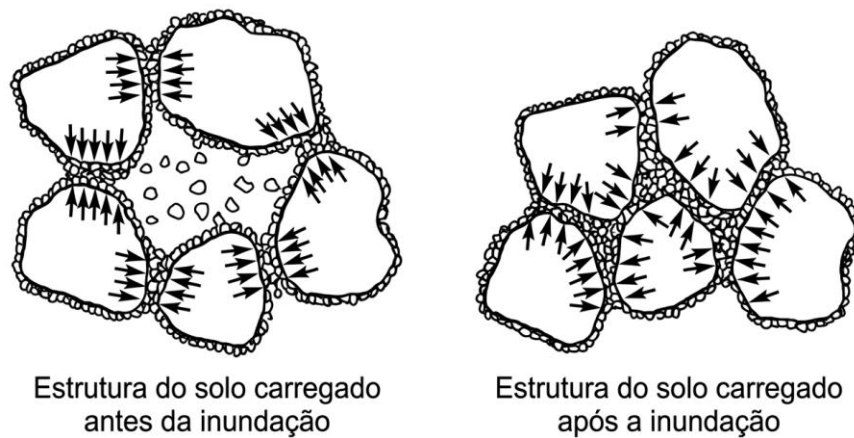
A ocorrência do colapso está diretamente associada à existência de uma estrutura metaestável. Para a ocorrência do colapso é necessário que o solo possua uma estrutura macroporosa com uma situação de equilíbrio metaestável entre suas partículas e alta porosidade (Nuñez, 1975).

Segundo Mendonça (1990), os solos sujeitos ao colapso apresentam uma estrutura macroporosa e metaestável, na qual partículas de maiores dimensões permanecem em suas posições porque vínculos de natureza material e/ou tensional atuam sobre elas. A redução parcial ou total desses mecanismos provoca a perda da resistência que mantém a estrutura em equilíbrio, favorecendo o rearranjo das partículas e o desenvolvimento do colapso.

A estabilidade da estrutura metaestável dos solos colapsíveis tem sido explicada por diferentes mecanismos relacionados às ligações entre partículas. Entre os autores que discutiram esse comportamento destacam-se Casagrande (1932), Jennings e Knight (1957), Holtz e Hilf (1961), Burland (1965), Dudley (1970), Barden et al. (1973) e Mitchell (1993).

Al-Rawas (2000), ao discutir o mecanismo proposto por Casagrande (1932), destaca que a fração fina do solo pode atuar como elemento de ligação entre partículas maiores. Com o aumento do teor de umidade, esses vínculos podem enfraquecer, reduzindo a estabilidade da estrutura e favorecendo o rearranjo das partículas. A Figura 3 ilustra essa mudança estrutural antes e depois da inundação.

Figura 3 - Estrutura do solo carregada antes e depois da inundação



Fonte: Adaptado de Al-Rawas (2000, p. 118).

Al-Rawas (2000) sintetiza diferentes interpretações clássicas para o mecanismo de colapso. Holtz e Hilf (1961) relacionam o fenômeno ao fato de as pressões capilares reduzirem com o aumento do grau de saturação, enquanto Burland (1965) associa o colapso à perda de estabilidade nos pontos de contato entre partículas durante o umedecimento. Dudley (1970), por sua vez, destaca como a sucção atua na resistência aparente do solo, uma vez que a redução das pressões negativas da água nos poros diminui a contribuição dessas forças para a estabilidade da estrutura.

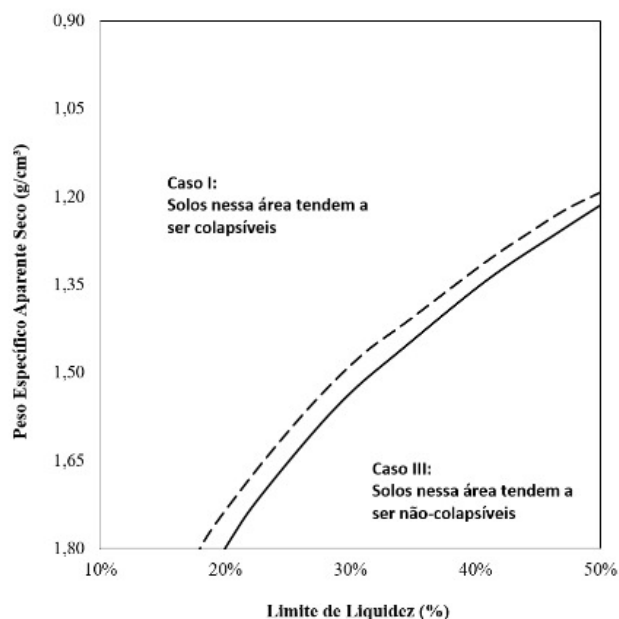
A partir dos estudos apresentados, verifica-se que o fenômeno do colapso é influenciado por diferentes fatores, entre eles a estrutura do solo, o teor de umidade inicial, a densidade seca e as condições de carregamento. Dessa forma, a avaliação do comportamento de solos colapsíveis deve considerar esses fatores de maneira integrada, uma vez que a ocorrência e a magnitude do colapso resultam da interação entre características estruturais, hidráulicas e mecânicas do material.

2.1.4. Critérios de classificação

A classificação dos solos colapsíveis é geralmente realizada com base em parâmetros obtidos por meio de ensaios laboratoriais que avaliam sua deformabilidade quando submetidos ao umedecimento e ao carregamento. Entre os métodos mais utilizados destaca-se o ensaio edométrico, que permite quantificar a magnitude do colapso e estabelecer critérios de classificação quanto à suscetibilidade do solo ao fenômeno.

Bell e Bruyn (1997) relataram um critério sugerido por Gibbs e Bara (1962) baseado no peso específico aparente seco e no limite de liquidez, que distingue entre solos colapsáveis e não colapsáveis, como mostrado na Figura 4. A Figura 4 mostra que os solos acima das curvas estão em condição fofa e, quando totalmente saturados, terão um teor de umidade maior que o limite de liquidez.

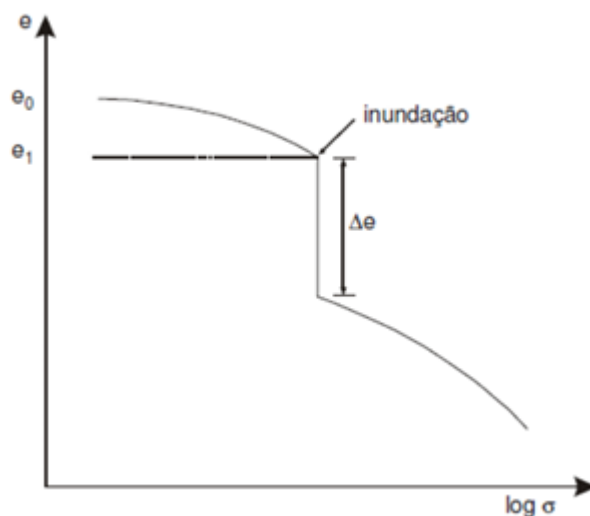
Figura 4 - Classificação de solos colapsáveis (segundo Gibbs e Bara 1962).



Fonte: Adaptado de Al-Rawas, 2000.

No ensaio de compressão edométrica simples, o corpo de prova é submetido inicialmente ao carregamento em sua umidade natural, sendo posteriormente inundado sob uma tensão previamente estabelecida. De acordo com De Jesus Gomes (2006), o ensaio deve ser realizado de maneira convencional até a tensão em estudo, geralmente adotada como 25 kPa, possibilitando a avaliação da deformação provocada pelo colapso após a inundação da amostra. A Figura 5 ilustra esse procedimento, evidenciando a redução do índice de vazios (Δe) após a inundação sob tensão constante. Essa variação corresponde à deformação adicional provocada pelo colapso da estrutura do solo, resultante da perda dos vínculos que mantinham a estabilidade da sua estrutura porosa.

Figura 5 - Ensaio edométrico em laboratório para reprodução do efeito de colapso.



Fonte: Cintra e Aoki, 2009.

O potencial de colapso (I_c) é então calculado pela relação entre a variação do índice de vazios decorrente da inundação e o índice de vazios inicial, conforme Jennings e Knight (1975) definiram o potencial de colapso, sendo dado de acordo com Equação 1.

$$I_c = \frac{|\Delta e|}{1+e_0} * 100 \quad (1)$$

Em que:

I_c = Potencial de colapso, em %;

Δe = Variação do índice de vazios decorrente da inundação;

e_0 = Índice de vazios inicial, antes da inundação.

O critério de Vargas (1978) considera como solos colapsíveis aqueles que apresentam potencial de colapso superior a 2,0%.

De acordo com o critério de Jennings e Knight (1975), os solos podem ser classificados de acordo com a gravidade do problema desencadeado pelo mesmo em: Sem problemas (0% a 1%); Problema Moderado (1% a 5%); Problemático (5% a 10%); Problema Grave (10% a 20%); Problema Muito Grave (>20%).

2.2.MICROMECAÂNICA DOS MATERIAIS GRANULARES

A micromecânica dos materiais granulares busca compreender o comportamento macroscópico do material a partir das interações entre partículas individuais. Nessa perspectiva, propriedades do conjunto granular são fortemente influenciadas pelos contatos interpartículas,

de modo que a análise do número, do tipo e da distribuição geométrica desses contatos contribui para compreender como os empacotamentos granulares se comportam (Isola, 2008).

Estudos sobre materiais granulares indicam que parâmetros micromecânicos, como o número de coordenação e a distribuição dos contatos, estão relacionados à estabilidade e ao comportamento mecânico do conjunto granular (Oda, 1977; Isola, 2008; Ueda et al., 2011). A partir desses fundamentos, o presente trabalho adota a hipótese de que o colapso de solos não saturados pode ser interpretado como uma reorganização da rede de contatos. Esse fenômeno é capaz de produzir redução do índice de vazios e deformações volumétricas.

2.2.1. Estrutura granular

A estrutura granular refere-se ao arranjo espacial das partículas sólidas e dos vazios associados, bem como à forma como os grãos se organizam no empacotamento (Oda, 1977). Essa organização é influenciada por características como tamanho e forma das partículas e distribuição granulométrica (Ueda et al., 2011). Além disso, parâmetros como a densidade de empacotamento e o número de coordenação auxiliam na caracterização da organização interna e da conectividade entre as partículas (Isola, 2008).

Em materiais granulares, as forças externas são transmitidas por meio da rede de contatos interpartículas, cuja configuração influencia diretamente a estabilidade e a resposta mecânica do conjunto (Isola, 2008). De forma complementar, Ueda et al. (2011) destacam que o comportamento mecânico desses materiais é governado tanto pelas propriedades dos grãos quanto pela estrutura de empacotamento estabelecida entre eles.

Segundo Oda (1977), diferentes estados de compactação produzem estruturas internas distintas. Arranjos granulares mais densos fazem com que as partículas se contatem mais, proporcionando uma quantidade maior de trajetórias para a transmissão de esforços. Em contrapartida, arranjos mais soltos possuem menor conectividade estrutural, tornando-se mais suscetíveis a rearranjos quando submetidos a carregamentos ou a alterações nas condições hidráulicas.

A estrutura granular pode ser caracterizada por parâmetros macroscópicos, como peso específico aparente seco e o índice de vazios, utilizados na descrição do estado físico do solo (Mendonça, 1990; Benatti, 2010). Em escala micromecânica, podem ser considerados parâmetros como o número de coordenação e a distribuição dos contatos (Oda, 1977; Isola, 2008). Entre esses parâmetros, o número de coordenação destaca-se como um importante

indicador da estabilidade do arranjo granular, por fornecer informações mais diretas sobre a conectividade e a organização das partículas (Oda, 1977; Isola, 2008).

No contexto dos solos colapsíveis, a estrutura granular exerce papel fundamental no desenvolvimento do colapso, uma vez que esses solos apresentam, inicialmente, uma estrutura porosa e metaestável, mantida por vínculos suscetíveis à perda de resistência (Mendonça, 1990; Benatti, 2010). Com a ruptura ou o enfraquecimento desses vínculos, ocorre a reorganização das partículas e o fechamento dos vazios, conduzindo a uma configuração interna mais compacta e estruturalmente mais estável (Mendonça, 1990; Pereira, 2018; Benatti, 2010).

2.2.2. Número de coordenação

O número de coordenação (N_c) corresponde ao número médio de contatos estabelecidos por partícula em um arranjo granular. Oda (1977) destaca que esse parâmetro oferece uma medida mais direta da proximidade entre as partículas e da estabilidade do arranjo estrutural. De forma complementar, Isola (2008) ressalta que o número de coordenação fornece informações cruciais sobre as configurações locais e a estabilidade da estrutura granular.

O aumento do número de coordenação implica maior quantidade de contatos entre as partículas e, conseqüentemente, maior número de possibilidades para a transmissão dos esforços no interior do arranjo granular. Isola (2008) mostra que configurações com maior número de coordenação tendem a apresentar maior estabilidade local, enquanto Oda (1977) relaciona valores reduzidos de N_c ao aumento da quantidade de partículas instáveis. Dessa forma, estruturas com menor conectividade tendem a apresentar maior suscetibilidade a rearranjos internos e à instabilidade local.

Oda (1977) demonstrou que a resistência de materiais granulares está fortemente associada ao número de coordenação e à distribuição espacial dos contatos. Em seus estudos, observou que a redução do número médio de contatos provoca aumento da fração de partículas estruturalmente instáveis e diminuição da resistência global do material.

Isola (2008) analisou a estabilidade geométrica de agrupamentos de partículas por meio do conceito de número de enclausuramento, obtendo para esferas de mesmo tamanho um valor médio mínimo de aproximadamente 4,63 partículas vizinhas para restringir os movimentos translacionais da partícula central. Esse resultado não deve ser confundido diretamente com um número crítico universal de coordenação, embora ambos os parâmetros estejam relacionados à configuração local e à estabilidade do arranjo granular.

Na análise do número de coordenação, Isola (2008) verificou ainda que configurações com $N_c = 4$ apresentaram 52% de casos instáveis, enquanto para $N_c = 5$ essa proporção caiu para 10,36% e, para $N_c = 6$, para 0,39%, evidenciando a redução da probabilidade de instabilidade com o aumento do número de contatos.

Para relacionar o número de coordenação ao índice de vazios, Ueda et al. (2011) utilizaram o modelo de Smith, baseado em uma relação linear entre essas duas variáveis. No estudo, a expressão é apresentada pela Equação 2:

$$N_c = 15,75 - 10,74e \quad (2)$$

Em que:

- N_c = número médio de coordenação;
- e = índice de vazios.

Essa correlação permite estimar parâmetros micromecânicos a partir de propriedades geotécnicas convencionais, constituindo um dos fundamentos do modelo desenvolvido neste trabalho.

2.2.3. Rede de contatos

A rede de contatos corresponde ao conjunto de interações mecânicas estabelecidas entre as partículas de um material granular. Por meio desses contatos, os esforços são transmitidos entre os grãos e contribuem para o equilíbrio mecânico do conjunto, de modo que a configuração da rede influencia diretamente a resposta do material (Isola, 2008).

Embora diferentes partículas possam estabelecer contatos físicos, nem todas participam da mesma forma do mecanismo de suporte de cargas. Oda (1977) identifica como instáveis as partículas com reduzido número de contatos, que apresentam menor participação efetiva na sustentação dos esforços aplicados. De forma complementar, Isola (2008) mostra que configurações localmente instáveis podem não participar efetivamente do mecanismo global de suporte de carga.

A estabilidade do arranjo granular está relacionada à conectividade da rede de contatos. Isola (2008) demonstra que a probabilidade de instabilidade local diminui significativamente com o aumento do número de coordenação, enquanto Oda (1977) associa menores níveis de conectividade à maior ocorrência de partículas instáveis e à possibilidade de rearranjos estruturais. No caso dos solos colapsíveis, a perda dos vínculos que sustentam a estrutura

metaestável pode desencadear o rearranjo das partículas e o consequente fechamento estrutural (Mendonça, 1990).

Segundo Oda (1977), partículas com número de coordenação inferior a quatro são consideradas instáveis, possuem participação reduzida no suporte das tensões aplicadas e podem ser facilmente rearranjadas durante a deformação. Isola (2008) complementa essa interpretação ao mostrar que configurações com baixos valores de N_c apresentam maior probabilidade de instabilidade e menor participação no mecanismo global de suporte de carga.

No caso dos solos colapsíveis, a estrutura de contatos entre as partículas desempenha papel importante na estabilidade do material. Mendonça (1990) descreve esses solos como dotados de uma estrutura metaestável mantida por vínculos suscetíveis à perda de resistência. De forma complementar, Benatti (2010) destaca a contribuição da sucção e de agentes cimentantes para a manutenção dessa estrutura em condição não saturada.

Com o aumento do teor de umidade, a redução da sucção pode provocar perda de estabilidade dos vínculos entre as partículas (Mendonça, 1990). Benatti (2010) associa esse processo ao rompimento das ligações e ao rearranjo dos agregados, enquanto Pereira (2018) descreve a reestruturação do solo em direção a um novo estado de equilíbrio, acompanhada pelo fechamento dos vazios e pela redução volumétrica.

Sob essa perspectiva, o colapso pode ser compreendido como a transição de uma estrutura inicialmente macroporosa e metaestável para uma configuração mais fechada e densa após a perda dos mecanismos que sustentavam o estado inicial (Mendonça, 1990). Benatti (2010) relaciona esse processo ao rearranjo das partículas e ao fechamento dos vazios, enquanto Pereira (2018) destaca a reorganização estrutural decorrente da busca por um novo estado de equilíbrio.

No âmbito micromecânico, Oda (1977) destaca que o número médio de coordenação e sua distribuição estão relacionados à organização e à estabilidade do arranjo granular. Isola (2008), por sua vez, ressalta que o número de coordenação fornece informações importantes sobre as configurações locais e a estabilidade estrutural. A partir desses fundamentos, o presente trabalho utiliza o número de coordenação e a distribuição estatística dos contatos como indicadores associados ao potencial de reorganização estrutural de solos não saturados.

2.3.MODELO DE ODA (1977)

O trabalho de Oda (1977) estabelece uma relação entre características da estrutura interna de materiais granulares e sua resistência ao cisalhamento. O autor demonstra que essa resistência está associada tanto ao valor médio do número de coordenação quanto à sua dispersão, utilizada como indicador da heterogeneidade da estrutura granular.

Oda (1977) analisa a estrutura granular a partir do arranjo espacial das partículas e dos vazios associados, considerando aspectos como a orientação das partículas, a distribuição das direções dos contatos e o número de coordenação. Essa abordagem permite relacionar características da organização interna do material a propriedades mecânicas observadas em escala macroscópica.

Oda (1977) ressalta que o índice de vazios, isoladamente, fornece apenas uma medida indireta da estabilidade do arranjo granular, enquanto o número de coordenação oferece uma informação mais direta sobre a proximidade entre as partículas e sua organização estrutural. De forma complementar, Isola (2008) mostra que alterações no número e na configuração dos contatos influenciam a distribuição dos esforços entre as partículas e a estabilidade das configurações locais.

Nesse contexto, Oda (1977) define como partículas instáveis aquelas que apresentam número de coordenação inferior a quatro, destacando que essas partículas possuem participação reduzida no suporte das tensões aplicadas e podem ser facilmente rearranjadas durante a deformação. O autor utiliza ainda a fração dessas partículas como indicador da instabilidade do arranjo granular. Esse conceito constitui um dos fundamentos micromecânicos adotados no modelo desenvolvido neste trabalho.

2.3.1. Conceito de partículas instáveis

Oda (1977) observou que nem todas as partículas presentes em um arranjo granular participam efetivamente do suporte das tensões aplicadas. O autor considera instáveis as partículas que apresentam número de coordenação inferior a quatro, destacando que elas não desempenham papel efetivo na sustentação dos esforços e podem ser facilmente rearranjadas durante o processo de deformação. De forma complementar, Isola (2008) ressalta que configurações com baixo número de coordenação apresentam maior probabilidade de instabilidade e podem não participar do mecanismo global de suporte de carga.

Essas partículas são denominadas por Oda (1977) como partículas instáveis. Sua presença está associada a arranjos com menor conectividade entre os grãos e maior

variabilidade da estabilidade estrutural, favorecendo a ocorrência de rearranjos internos. Isola (2008) complementa essa interpretação ao demonstrar que configurações com menor número de contatos apresentam maior probabilidade de instabilidade local.

Conforme discutido anteriormente, a estabilidade do arranjo granular está relacionada à quantidade e à configuração dos contatos entre as partículas, sendo o número de coordenação um parâmetro diretamente associado à organização e à estabilidade estrutural (Oda, 1977; Isola, 2008). Nesse contexto, Oda (1977) define como partículas instáveis aquelas que apresentam número de coordenação inferior a quatro, destacando que elas possuem participação reduzida no suporte das tensões aplicadas e podem ser facilmente rearranjadas durante o processo de deformação. Isola (2008) complementa essa interpretação ao mostrar que configurações com baixos valores de número de coordenação apresentam maior probabilidade de instabilidade local.

Oda (1977) considera instáveis as partículas com número de coordenação inferior a quatro, por apresentarem participação reduzida no suporte das tensões aplicadas e maior facilidade de rearranjo. De forma complementar, Isola (2008), ao analisar o enclausuramento geométrico de partículas, obteve um número médio de enclausuramento de aproximadamente 4,63, associado à restrição dos movimentos translacionais da partícula central.

Com base na análise de enclausuramento apresentada por Isola (2008), o presente trabalho adota, como critério aproximado para fins de modelagem, o valor 4,63 como limite de referência para a identificação de configurações potencialmente instáveis:

$$N_c < 4,63$$

Em que:

- (N_c) = número de coordenação da partícula.

Ressalta-se que esse valor corresponde originalmente ao número médio de enclausuramento obtido por Isola (2008), sendo empregado neste trabalho como uma adaptação para a análise do número de coordenação.

Segundo Oda (1977), o aumento da fração de partículas instáveis está associado à redução da resistência global do empacotamento e ao aumento da suscetibilidade a deformações e rearranjos estruturais.

2.3.2. Critério estrutural de estabilidade

O conceito de partículas instáveis permite estabelecer um critério micromecânico para a avaliação da estabilidade de materiais granulares. Oda (1977) destaca que o índice de vazios constitui uma medida indireta da estabilidade do arranjo, enquanto o número de coordenação fornece uma informação mais direta sobre a proximidade entre as partículas e a estabilidade da estrutura. De forma complementar, Isola (2008) ressalta que o número de coordenação fornece informações relevantes sobre as configurações locais e sobre a estabilidade do arranjo granular.

A estabilidade do arranjo granular está relacionada à proporção de partículas capazes de participar efetivamente do suporte das tensões aplicadas. Oda (1977) mostra que partículas com baixo número de coordenação podem não desempenhar papel efetivo na sustentação dos esforços. Isola (2008), por sua vez, demonstra que a probabilidade de instabilidade local diminui com o aumento do número de coordenação, indicando maior estabilidade para configurações com maior número de contatos.

Em contrapartida, arranjos com maior proporção de partículas instáveis apresentam menor participação efetiva no mecanismo global de suporte de carga e maior suscetibilidade a rearranjos durante a deformação. Oda (1977) associa a presença dessas partículas à maior variabilidade da estabilidade estrutural, enquanto Isola (2008) mostra que configurações com baixo número de coordenação podem não participar efetivamente do mecanismo global de resistência.

Do ponto de vista probabilístico, o presente trabalho representa essa condição por meio da fração de partículas instáveis P_i , definida como a probabilidade de ocorrência de partículas com número de coordenação inferior ao limite adotado no modelo. A formulação é inspirada na abordagem probabilística de Isola (2008), que relaciona a instabilidade à ocorrência de configurações não enclausuradas e obtém valor médio de enclausuramento de aproximadamente 4,63 para esferas de mesmo tamanho. Assim, no presente trabalho, adota-se Equação 3:

$$P_i = P(N_c < 4,63) \quad (3)$$

Em que:

- P_i = fração de partículas instáveis;
- P = probabilidade de ocorrência.
- N_c = número de coordenação.

A variável P_i é, portanto, uma formulação adotada neste trabalho para quantificar a fração estimada de partículas em condição de instabilidade estrutural. Essa abordagem se apoia no conceito de partículas instáveis apresentado por Oda (1977) e na análise probabilística de

estabilidade desenvolvida por Isola (2008), constituindo uma das principais variáveis do modelo proposto.

2.3.3. Aplicações do modelo de Oda ao estudo do colapso

Embora o trabalho de Oda (1977) tenha sido desenvolvido para a análise da resistência e da estabilidade de materiais granulares, seus conceitos de número de coordenação, distribuição de contatos e partículas instáveis fornecem uma base micromecânica que pode ser aplicada à interpretação da estabilidade estrutural de solos colapsíveis.

Em solos não saturados, a estabilidade da estrutura metaestável pode ser mantida pela atuação conjunta dos contatos entre partículas, da sucção e de agentes cimentantes (Mendonça, 1990; Benatti, 2010). Com o aumento do teor de umidade, a redução da sucção e o enfraquecimento desses vínculos podem favorecer a perda de estabilidade e o rearranjo interno das partículas (Mendonça, 1990; Benatti, 2010; Pereira, 2018).

Sob a perspectiva micromecânica adotada neste trabalho, esse processo é interpretado como uma reorganização da rede de contatos. Oda (1977) demonstra que partículas com baixo número de coordenação apresentam maior suscetibilidade a rearranjos, enquanto estudos sobre solos colapsíveis descrevem a reestruturação do material em direção a uma configuração mais fechada após a perda dos vínculos que mantinham o estado metaestável (Mendonça, 1990; Benatti, 2010; Pereira, 2018). Como consequência, ocorre redução do índice de vazios e desenvolvimento de deformações volumétricas.

O conceito de partículas instáveis fornece, portanto, uma interpretação física para o fenômeno do colapso. Em vez de considerar apenas a deformação observada experimentalmente, torna-se possível analisar a evolução da estabilidade estrutural do material a partir da conectividade da rede de contatos.

Dessa forma, o número de coordenação e a ocorrência de partículas instáveis constituem parâmetros micromecânicos relacionados à conectividade e à estabilidade do arranjo granular, fornecendo uma base conceitual para a análise da reorganização estrutural do material (Oda, 1977; Isola, 2008).

2.4.MODELO DE ISOLA (2008)

O trabalho de Isola (2008) contribui para a compreensão da estrutura interna de materiais granulares sob uma perspectiva estatística. O autor demonstra que a caracterização do número de coordenação não deve se restringir apenas ao seu valor médio, sendo também necessário considerar os parâmetros que descrevem sua distribuição. Em suas análises, Isola (2008) utiliza distribuições estatísticas caracterizadas por valores médios e desvios padrão, destacando que esses parâmetros devem receber importância equivalente para uma avaliação mais completa da distribuição dos contatos. No presente trabalho, esses fundamentos estatísticos são utilizados como base para a construção da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC).

Essa abordagem possibilita uma interpretação probabilística da estrutura granular, considerando não apenas o número médio de contatos, mas também a forma como esses contatos se distribui entre as partículas (Isola, 2008). O autor analisa a probabilidade de instabilidade de diferentes configurações em função do número de coordenação e mostra que configurações com menores valores de N_c apresentam maior probabilidade de serem instáveis. Isola (2008) também associa configurações não enclausuradas (*uncaged*) à menor participação no mecanismo global de suporte de carga, relacionando a distribuição dos contatos à estabilidade das configurações locais.

Com base nesses conceitos, o presente trabalho utiliza a distribuição estatística do número de coordenação para estimar a fração de partículas potencialmente instáveis. Essa interpretação constitui a base probabilística adotada na construção da CDPC e na avaliação micromecânica da condição estrutural do solo.

2.4.1. Distribuição estatística do número de contatos

Em um arranjo granular, o número de contatos não é uniforme entre todas as partículas. Isola (2008) descreve distribuições estatísticas do número de coordenação, indicando que diferentes partículas podem apresentar diferentes quantidades de contatos. Essa variabilidade influencia a condição mecânica local, uma vez que configurações com menor número de coordenação apresentam maior probabilidade de instabilidade e menor participação no mecanismo global de suporte de carga.

Isola (2008) demonstra que essa variabilidade pode ser representada por distribuições estatísticas caracterizadas por um valor médio e por um desvio padrão. Em suas análises, distribuições normais são utilizadas para representar a frequência associada aos diferentes números de contatos observados nas partículas.

Com base nessa abordagem, no presente trabalho o número de coordenação de uma partícula é tratado como uma variável aleatória representada por Equação 4:

$$N_c \sim N(n, \sigma) \quad (4)$$

Em que:

- I. N_c = número de coordenação de uma partícula individual;
- II. n = número médio de coordenação do empacotamento;
- III. σ = desvio padrão da distribuição.

Essa representação permite considerar simultaneamente o valor médio do número de contatos e sua dispersão em torno da média. Isola (2008) destaca que tanto a média quanto os parâmetros associados à distribuição devem ser considerados na caracterização do estado de coordenação. De forma complementar, Oda (1977) relaciona o valor médio do número de coordenação à proximidade entre as partículas e o seu desvio padrão à heterogeneidade da estrutura granular.

2.4.2. Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC)

No presente trabalho, a representação gráfica da distribuição estatística do número de contatos é denominada Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC). Essa curva representa a frequência relativa das partículas em função do número de contatos estabelecidos, com base nas distribuições estatísticas do número de coordenação discutidas por Isola (2008) e nas curvas de frequência apresentadas por Oda (1977).

A utilização da distribuição completa permite complementar a informação fornecida pelo número médio de coordenação. Isola (2008) destaca que o valor médio e os parâmetros de distribuição devem ser considerados conjuntamente para uma avaliação mais completa do estado de coordenação. De forma complementar, Oda (1977) relaciona o valor médio do número de coordenação à proximidade entre as partículas e o desvio padrão à heterogeneidade da estrutura granular. Assim, a CDPC é empregada neste trabalho para representar o valor médio de N_c , sua dispersão, a fração de partículas com baixa coordenação e o grau de heterogeneidade estrutural do sistema.

Sob essa perspectiva, dois materiais podem apresentar o mesmo número médio de coordenação e, ainda assim, possuir distribuições distintas dos contatos. Oda (1977) mostra que a resistência do material está associada não apenas ao valor médio do número de coordenação,

mas também à sua dispersão, enquanto Isola (2008) evidencia que estruturas com características globais semelhantes podem apresentar diferentes distribuições internas de contatos. Dessa forma, a análise da distribuição fornece informações adicionais que não são representadas apenas pelo valor médio de N_c .

A Figura 6 apresenta uma representação conceitual da CDPC, modelada neste trabalho por uma distribuição aproximadamente normal com base nas abordagens estatísticas de Isola (2008) e Oda (1977). A região situada à esquerda do limite adotado no modelo representa a probabilidade acumulada de ocorrência de partículas potencialmente instáveis. No presente estudo, essa área é utilizada para estimar a fração de partículas instáveis e como indicador da condição estrutural do solo ao longo da análise do colapso.

2.4.3. Desvio padrão e heterogeneidade estrutural

Além do número médio de coordenação, Isola (2008) destaca a importância dos parâmetros que caracterizam a distribuição dos contatos, entre eles o desvio padrão. Esse parâmetro representa a dispersão dos valores de coordenação em torno da média e deve ser considerado conjuntamente com o valor médio para uma avaliação mais completa da distribuição dos contatos. De forma complementar, Oda (1977) interpreta o desvio padrão do número de coordenação como um indicador da heterogeneidade da estrutura granular.

Valores reduzidos de σ indicam menor dispersão dos números de coordenação em torno da média, enquanto valores mais elevados representam maior variabilidade entre as configurações locais. Isola (2008) mostra que distribuições do número de coordenação podem ser representadas por funções normais caracterizadas por média e desvio padrão, ao passo que Oda (1977) associa maiores dispersões a estruturas com maior heterogeneidade e variabilidade de estabilidade.

A estabilidade do material não depende exclusivamente do valor médio do número de coordenação, mas também da forma como esses valores se distribuem entre as partículas. Oda (1977) destaca que tanto o valor médio quanto o desvio padrão do número de coordenação são essenciais para caracterizar o arranjo granular, enquanto Isola (2008) ressalta que esses parâmetros devem ser considerados conjuntamente para uma avaliação mais completa da distribuição dos contatos.

No modelo desenvolvido neste trabalho, o desvio padrão é utilizado como parâmetro de dispersão da distribuição estatística do número de coordenação. Oda (1977) interpreta esse

parâmetro como um indicador da heterogeneidade da estrutura granular, enquanto Isola (2008) o utiliza na caracterização matemática das distribuições de contatos. Dessa forma, o desvio padrão é empregado no modelo para representar a variabilidade estrutural em torno do número médio de coordenação.

2.4.4. Fração de partículas instáveis

A abordagem estatística discutida por Isola (2008) permite representar a variabilidade do número de coordenação por meio de distribuições probabilísticas e estimar a ocorrência de configurações não enclausuradas. Oda (1977), por sua vez, define como partículas instáveis aquelas que apresentam número de coordenação inferior a quatro e participação reduzida no suporte das tensões aplicadas. No presente trabalho, esses fundamentos são combinados para estimar a fração de partículas potencialmente instáveis a partir da área acumulada da distribuição de contatos situada abaixo do limite adotado no modelo.

Considerando a distribuição normal do número de coordenação, adota-se neste trabalho o valor de 4,63 como limite de referência, com base no número médio de enclausuramento obtido por Isola (2008). Assim, a fração estimada de partículas instáveis é expressa pela Equação 5:

$$Pi = P(Nc < 4,63) \quad (5)$$

Ou, de forma equivalente (Equação 6):

$$Pi = \Phi \left(\frac{4,63 - n}{\sigma} \right) \quad (6)$$

Em que:

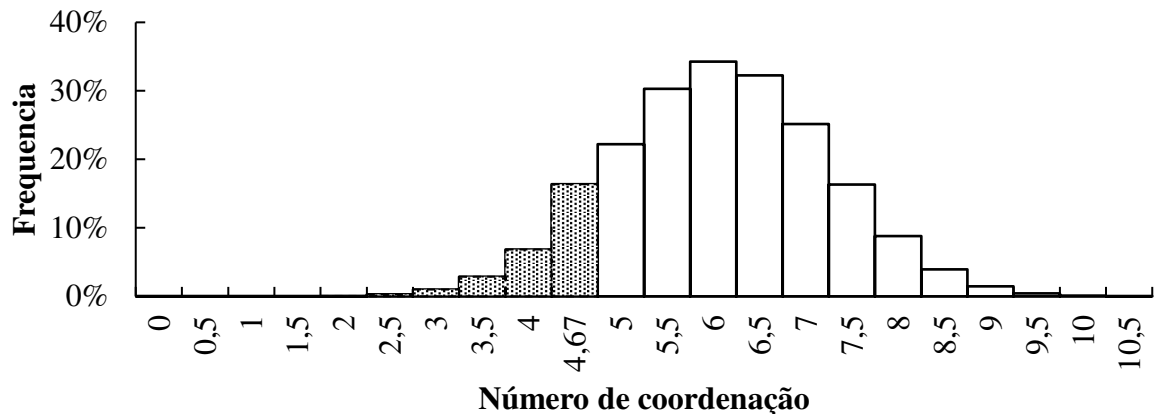
Pi = fração de partículas instáveis;

Φ = função distribuição acumulada da normal padrão;

n = número médio de coordenação;

σ = desvio padrão.

Ressalta-se que o valor 4,63 corresponde originalmente ao número médio de enclausuramento discutido por Isola (2008), sendo utilizado neste trabalho como limite de referência para a estimativa probabilística da fração de partículas potencialmente instáveis. A Figura 6 ilustra uma curva de distribuição de probabilidade de contatos com as colunas destacadas representando a fração de partículas instáveis.

Figura 6 - CPDC com representação de partículas instáveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base nos conceitos de Oda (1977) e Isola (2008).

O parâmetro P_i constitui uma medida quantitativa da instabilidade estrutural do material. Quanto maior seu valor, maior tende a ser a suscetibilidade ao colapso.

2.4.5. Aplicação da abordagem micromecânica ao modelo de colapso

No modelo proposto neste trabalho, adota-se como hipótese que o processo de inundação provoca reorganização da rede de contatos entre as partículas. Esse processo é compatível com os mecanismos de perda de sucção, enfraquecimento de vínculos e rearranjo estrutural descritos para solos colapsíveis. No presente estudo, essa reorganização é representada por alterações na Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC), construída a partir da distribuição estatística dos números de coordenação.

Admite-se ainda que a composição granulométrica do material permaneça essencialmente constante durante o processo de colapso, de modo que a principal alteração considerada pelo modelo esteja associada à reorganização estrutural. O número médio de coordenação é utilizado como indicador da conectividade entre as partículas, enquanto o desvio padrão da distribuição é tratado como aproximadamente constante, hipótese apoiada na relação entre dispersão dos contatos e características granulométricas discutida por Oda (1977).

A partir dessas hipóteses, o colapso é representado como uma transição entre dois estados estruturais. O estado inicial é associado a uma configuração mais porosa e metaestável, com maior fração estimada de partículas potencialmente instáveis. O estado final corresponde a uma configuração mais fechada, com redução dos vazios e menor proporção de partículas abaixo do limite de referência adotado no modelo. Essa interpretação combina os mecanismos

de reorganização estrutural descritos para solos colapsíveis com os conceitos de partículas instáveis e conectividade apresentados por Oda (1977) e Isola (2008).

Dessa forma, a evolução da fração de partículas potencialmente instáveis é adotada, no presente trabalho, como indicador micromecânico da reorganização estrutural associada ao colapso. A formulação estatística utilizada baseia-se na distribuição do número de coordenação e nos conceitos de estabilidade de configurações granulares discutidos por Oda (1977) e Isola (2008).

2.5. MODELO DE UEDA *ET AL.* (2011)

O índice de vazios é um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar o estado de compactação de um solo. Esse parâmetro representa a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos presentes em uma amostra, refletindo diretamente o grau de empacotamento das partículas.

Oda (1977) destaca a importância do número de coordenação para a avaliação da estabilidade do arranjo granular, enquanto Isola (2008) explora a distribuição estatística dos contatos e a probabilidade de estabilidade de configurações locais. De forma complementar, Ueda et al. (2011) utilizam relações entre índice de vazios e número de coordenação para estimar o número médio de contatos a partir de parâmetros físicos mais facilmente obtidos. Essa abordagem permite utilizar o índice de vazios como ponto de partida para a caracterização micromecânica da estrutura granular.

No contexto deste trabalho, a relação utilizada por Ueda et al. (2011) é empregada para estimar o número médio de coordenação a partir do índice de vazios. Esse valor é utilizado como parâmetro de entrada na construção da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC), definida neste estudo como a representação estatística da distribuição dos números de contatos por partícula no arranjo granular. A partir dessa distribuição, torna-se possível estimar a probabilidade de ocorrência de partículas com número de coordenação inferior ao limite adotado no modelo, utilizadas como indicador da condição de instabilidade estrutural.

2.5.1. Relação entre índice de vazios e número de coordenação

O índice de vazios é um parâmetro físico utilizado na caracterização do estado do solo, sendo definido pela relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos presentes no material (Benatti, 2010). Em materiais granulares, esse parâmetro está relacionado à organização espacial das partículas e ao grau de densificação da estrutura, uma vez que menores valores de índice de vazios correspondem a arranjos com menor proporção de espaços vazios (Isola, 2008).

Sob uma perspectiva micromecânica, o índice de vazios apresenta relação com a quantidade de contatos estabelecidos entre as partículas. Oda (1977) relaciona o número médio de coordenação ao índice de vazios e à proximidade entre os grãos constituintes. De forma complementar, Ueda et al. (2011) mostram que, em geral, o número de coordenação aumenta à medida que o índice de vazios diminui. Assim, arranjos mais densos tendem a apresentar maior número médio de contatos, enquanto estruturas mais abertas e porosas apresentam menor conectividade e menores valores de número de coordenação (Oda, 1977; Isola, 2008).

Ueda et al. (2011) utilizaram uma relação linear atribuída ao modelo de Smith para estimar o número médio de coordenação a partir do índice de vazios. Adotando-se a notação empregada neste trabalho, a relação pode ser expressa pela Equação 2:

$$N_c = 15,75 - 10,74e \quad (2)$$

Em que:

- N_c = número médio de coordenação;
- e = índice de vazios.

A relação indica que maiores valores de índice de vazios estão associados a menores valores de número médio de coordenação. Oda (1977) mostra que o número de coordenação está diretamente relacionado à proximidade entre as partículas e que arranjos mais porosos apresentam maior ocorrência de partículas instáveis, suscetíveis a rearranjos durante a deformação. De forma complementar, Isola (2008) destaca que a estabilidade das configurações locais depende da quantidade e da organização dos contatos entre as partículas.

Fisicamente, a distribuição do número de contatos reflete a heterogeneidade estrutural do material. Quanto mais uniforme for o empacotamento, menor será a dispersão observada.

2.5.2. Interpretação física da conectividade estrutural

O número médio de coordenação pode ser interpretado como um indicador da conectividade e da estabilidade do arranjo granular. Isola (2008) destaca que esse parâmetro

fornece informações sobre as configurações locais e a estabilidade do conjunto. Oda (1977), por sua vez, relaciona o número de coordenação à proximidade entre as partículas e à participação dos grãos no suporte das tensões aplicadas. Dessa forma, maiores valores de N_c tendem a estar associados a configurações mais conectadas e estruturalmente mais estáveis.

Por outro lado, baixos valores de número de coordenação estão associados a estruturas menos conectadas e a maior ocorrência de partículas instáveis. Oda (1977) define como instáveis as partículas com $N_c < 4$, destacando que elas apresentam participação reduzida no suporte das tensões e podem ser facilmente rearranjadas durante a deformação. Isola (2008) complementa essa interpretação ao mostrar que configurações com baixos valores de N_c apresentam maior probabilidade de instabilidade local. No caso dos solos colapsíveis, a perda de mecanismos estabilizadores, como a sucção e os vínculos cimentantes, pode favorecer esses rearranjos estruturais (Mendonça, 1990; Benatti, 2010).

Sob essa perspectiva, o índice de vazios pode ser utilizado como um parâmetro indireto associado ao grau de conectividade da estrutura granular. Oda (1977) mostra que o número médio de coordenação está relacionado ao índice de vazios, enquanto Ueda et al. (2011) utilizam uma relação que permite estimar o número de coordenação a partir desse parâmetro físico. Assim, menores valores de índice de vazios tendem a estar associados a maiores valores de N_c , indicando maior quantidade média de contatos entre as partículas.

2.5.3. Aplicação do modelo de Ueda ao estudo do colapso

O número médio de coordenação estimado a partir da relação utilizada por Ueda et al. (2011) é empregado, neste trabalho, como parâmetro de entrada para a construção da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC). Essa representação estatística é fundamentada nas distribuições de números de coordenação discutidas por Isola (2008) e nas distribuições de frequência de contatos apresentadas por Oda (1977). No presente estudo, a CDPC é utilizada para representar a distribuição dos números de contatos por partícula no arranjo granular.

A partir dessa distribuição, estima-se a fração de partículas consideradas instáveis segundo o critério adotado no modelo. Oda (1977) define como instáveis as partículas com baixo número de coordenação, enquanto Isola (2008) destaca que o número de coordenação fornece informações relevantes sobre as configurações locais e a estabilidade do arranjo

granular. Dessa forma, N_c é utilizado neste trabalho como variável micromecânica associada à conectividade estrutural do material.

No modelo proposto, a relação entre índice de vazios e número médio de coordenação permite converter um parâmetro físico convencional em uma informação de natureza micromecânica (Ueda et al., 2011). A partir dessa estimativa e da distribuição estatística dos contatos, obtém-se a fração de partículas instáveis utilizada na análise da condição estrutural do solo, com base nos conceitos de estabilidade e distribuição de contatos discutidos por Oda (1977) e Isola (2008). Essa integração entre parâmetros macroscópicos e micromecânicos constitui a base da abordagem empregada neste trabalho para a avaliação do potencial de colapso.

2.6. INTEGRAÇÃO CONCEITUAL DOS MODELOS DE ODA (1977), ISOLA (2008) E UEDA ET AL. (2011)

Os modelos de Oda (1977), Isola (2008) e Ueda *et al.* (2011) foram desenvolvidos em contextos distintos, porém apresentam elevada complementaridade quando analisados sob a perspectiva da estabilidade estrutural de materiais granulares. A integração desses três modelos constitui a base conceitual do procedimento simplificado proposto neste trabalho para estimativa preliminar do potencial de colapso em solos.

O modelo de Oda (1977) fornece o fundamento micromecânico da análise ao introduzir o conceito de partículas estruturalmente instáveis. Segundo essa abordagem, a estabilidade de um empacotamento granular depende da quantidade e da distribuição dos contatos entre partículas. Grãos com número insuficiente de contatos não participam efetivamente da transmissão de esforços e apresentam maior probabilidade de deslocamento quando submetidos a perturbações mecânicas ou hidráulicas.

Entretanto, a aplicação direta do conceito de partículas instáveis requer o conhecimento do número de coordenação de cada partícula do sistema, informação normalmente indisponível em estudos geotécnicos convencionais. Nesse contexto, o modelo de Ueda *et al.* (2011) desempenha papel fundamental ao estabelecer uma relação entre o índice de vazios e o número médio de coordenação do empacotamento granular. Essa correlação permite estimar a conectividade estrutural do material a partir de parâmetros físicos facilmente obtidos em laboratório, como o peso específico aparente seco e a massa específica dos sólidos.

Uma vez estimado o número médio de coordenação, torna-se necessário avaliar como os contatos estão distribuídos entre as partículas. Essa etapa é contemplada pelo modelo de Isola (2008), que introduz uma abordagem estatística baseada na Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC). Por meio dessa distribuição, torna-se possível determinar a probabilidade de ocorrência de partículas com número de coordenação inferior ao valor crítico de estabilidade.

A integração dos três modelos pode ser interpretada como uma sequência lógica de transformação de parâmetros físicos em indicadores micromecânicos. Inicialmente, o peso específico aparente seco do solo é utilizada para determinar o índice de vazios. Em seguida, a relação proposta por Ueda *et al.* (2011) permite estimar o número médio de coordenação correspondente à estrutura granular analisada. Esse valor é então utilizado para construir a distribuição estatística de contatos segundo a abordagem de Isola (2008), possibilitando o cálculo da fração de partículas estruturalmente instáveis conforme o conceito introduzido por Oda (1977).

O fluxo conceitual do modelo pode ser representado pela seguinte sequência (Equação 7):

$$e \rightarrow N_c \rightarrow CDPC \rightarrow P_i \quad (7)$$

Em que:

e = índice de vazios;

N_c = número médio de coordenação;

CDPC = Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos;

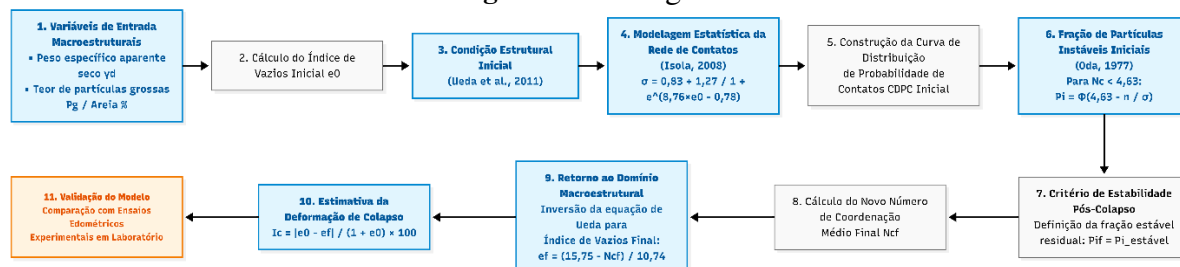
P_i = fração de partículas instáveis.

No presente trabalho, adota-se como hipótese que o colapso esteja associado à reorganização da rede de contatos entre as partículas. Durante o umedecimento, a redução da sucção matricial e o enfraquecimento dos mecanismos que contribuem para a estabilidade da estrutura favorecem o rearranjo das partículas no arranjo granular. No modelo proposto, esse processo é representado por alterações no número médio de coordenação, na fração estimada de partículas potencialmente instáveis e no índice de vazios.

Dessa forma, o colapso é interpretado como uma reorganização micromecânica da estrutura granular, expressa por mudanças na conectividade entre as partículas. A integração dos conceitos discutidos por Oda (1977) e Isola (2008), juntamente com a relação utilizada por Ueda *et al.* (2011), fornece a base conceitual para essa interpretação e para a formulação do modelo simplificado desenvolvido neste trabalho.

3. MATERIAIS E METODOS

Figura 7 - Fluxograma



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A presente pesquisa teve como objetivo desenvolver e avaliar um modelo simplificado para a estimativa preliminar do potencial de colapso de solos não saturados a partir de parâmetros físicos de fácil obtenção. O procedimento metodológico foi estruturado em quatro etapas principais: levantamento bibliográfico, desenvolvimento da formulação do modelo, implementação computacional e verificação experimental preliminar por meio de ensaios laboratoriais de colapso.

A formulação proposta baseia-se na integração dos conceitos de partículas instáveis introduzidos por Oda (1977), da distribuição estatística dos contatos apresentada por Isola (2008) e da correlação entre índice de vazios e número médio de coordenação proposta por Ueda *et al.* (2011). O procedimento busca representar o colapso como consequência da reorganização estrutural da rede de contatos entre partículas após a saturação.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais temas relacionados ao comportamento de solos colapsíveis e à micromecânica dos materiais granulares. A revisão bibliográfica permitiu estabelecer a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do modelo proposto e para a interpretação dos resultados experimentais.

Para o desenvolvimento das correlações matemáticas, foi utilizado um conjunto de dados provenientes de ensaios de colapso realizados em amostras de solo estudadas na Universidade Federal do Rio Grande do Norte entre 2019 e 2023. O conjunto utilizado na formulação do modelo foi composto por 29 amostras.

O modelo desenvolvido foi validado utilizando 5 exemplares de uma amostra de solo remoldada submetidas a ensaios laboratoriais de caracterização física e de colapso no laboratório de mecânica dos solos do IFPB-Campus Patos. Para a amostra, foram determinados os seguintes parâmetros geotécnicos: granulometria; teor de partículas grossas; massa

específica dos sólidos; umidade de moldagem; peso específico aparente seco; índice de vazios inicial.

Esses parâmetros constituem as informações de entrada necessárias para a aplicação do modelo simplificado

3.1. ESTIMATIVA DA CONDIÇÃO PÓS-COLAPSO

Para a estimativa da condição pós-colapso, adotou-se uma fração residual de partículas potencialmente instáveis como referência para representar uma condição estrutural mais estável. A partir desse valor residual, determinou-se o número médio de coordenação correspondente ao estado final considerado no modelo. Para a estimativa da condição pós-colapso, adotou-se uma fração residual de partículas potencialmente instáveis de aproximadamente 30% como referência para representar uma condição estrutural mais estável. A partir desse valor, determinou-se o novo número médio de coordenação correspondente à condição pós-colapso adotada no modelo.

Posteriormente, o índice de vazios final foi calculado pela inversão da correlação proposta por Ueda *et al.* (2011) (Equação 8):

$$ef = \frac{15,75 - Ncf}{10,74} \quad (8)$$

Em que:

ef = índice de vazios final

Ncf = número médio de coordenação após o colapso.

3.2. ESTIMATIVA DA DEFORMAÇÃO DE COLAPSO

A deformação volumétrica associada ao colapso foi calculada pela relação entre o módulo da variação do índice de vazios inicial e final e do índice de vazios inicial (Equação 1):

$$Ic = \frac{|e0 - ef|}{1 + e0} * 100 \quad (1)$$

Em que:

Ic = índice de colapso estimado (%);

$e0$ = índice de vazios inicial;

ef = índice de vazios final.

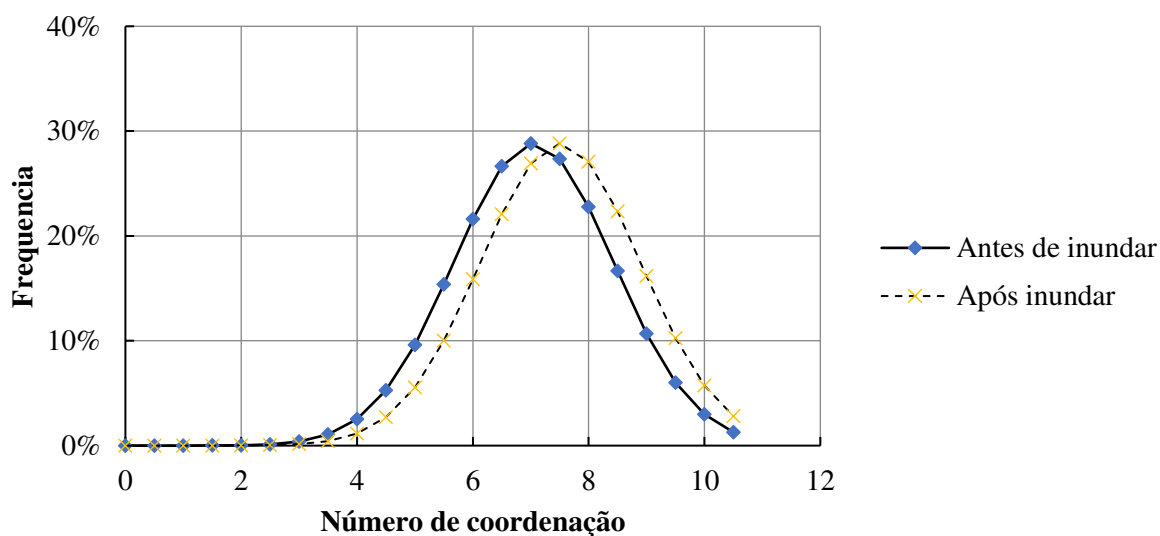
O valor obtido representa a estimativa preliminar do potencial de colapso fornecida pelo modelo

3.3.IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Com o objetivo de automatizar os cálculos foi desenvolvida uma planilha eletrônica em Microsoft Excel® contendo todas as etapas da metodologia.

A ferramenta permite calcular automaticamente: número médio de coordenação; desvio padrão da distribuição; fração de partículas instáveis; coordenação média pós-colapso; índice de vazios final; índice de colapso estimado. Além dos cálculos numéricos, a planilha possibilita a visualização gráfica da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos antes e após o processo de colapso, Figura 8.

Figura 8 – CDPCs teóricas antes e após colapso



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.4.PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a avaliação do modelo, foram realizados ensaios laboratoriais de colapso em amostras compactadas. Inicialmente, as amostras foram caracterizadas geotecnicamente e, posteriormente, submetidas a ensaios edométricos com inundação na tensão de 25 kPa.

Os ensaios edométricos foram executados com base nos procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16853 (2020). Os resultados experimentais foram utilizados como referência para a análise da coerência física do modelo desenvolvido.

O ensaio de colapso foi realizado em amostras reconstituídas do solo estudado, moldadas em anéis metálicos e submetidas a carregamento vertical constante em equipamento edométrico. O procedimento experimental envolveu preparação do material, controle da umidade, compactação das amostras, determinação da massa específica aparente seca e posterior inundação sob tensão vertical constante para determinação do potencial de colapso.

Inicialmente, o solo foi seco ao ar, destorroado manualmente e homogeneizado, conforme mostrado na Figura 8. Em seguida, foi realizada a pesagem do material necessário para obtenção das condições de densidade e índice de vazios previamente definidos, Figura 9.

Figura 9 - Destorroamento e homogeneização da amostra de solo.



Fonte: Acervo do autor, 2026.

Posteriormente, foram determinadas as massas de solo e de água necessárias à moldagem dos corpos de prova. Para cada corpo de prova, utilizaram-se 120,42 g de solo e aproximadamente 7,23 g de água, correspondentes a uma umidade de moldagem de 6%. A moldagem foi realizada visando à obtenção de corpos de prova com massa específica aparente seca de $1,50 \text{ g/cm}^3$.

Figura 10 - Determinação das massas de solo e de água utilizadas na moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Acervo do autor, 2026.

Os corpos de prova foram moldados em anéis metálicos com 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura, conforme apresentado na Figura 11. A moldagem foi realizada por compactação estática, utilizando-se a prensa apresentada na Figura 12, até a obtenção das condições de umidade e massa específica aparente seca previamente estabelecidas.

Figura 11 - Moldagem do corpo de prova em anel metálico



Fonte: Acervo do autor, 2026.

Figura 12 - Prensa utilizada na compactação estática dos corpos de prova.



Fonte: Acervo do autor, 2026.

Após a moldagem, os corpos de prova foram cuidadosamente nivelados e preparados para montagem no equipamento de adensamento, Figura 12.

Figura 13 - Montagem do corpo de prova no equipamento de adensamento



Fonte: Acervo do autor, 2026.

Os deslocamentos verticais foram monitorados por meio de relógio comparador, permitindo determinar a deformação específica de colapso segundo a metodologia convencional de ensaio edométrico para solos não saturados.

As amostras foram inicialmente carregadas em condição não saturada até a tensão previamente definida para o ensaio, 25 kPa. Após estabilização das deformações, procedeu-se à inundação mantendo constante a tensão vertical aplicada. A deformação provocada pela saturação foi monitorada ao longo do tempo até a estabilização das leituras, permitindo a determinação experimental do índice de colapso.

3.5.DESENVOLVIMENTO DO MODELO SIMPLIFICADO

O modelo proposto foi desenvolvido com o objetivo de estimar preliminarmente o potencial de colapso a partir de parâmetros físicos obtidos em ensaios de caracterização. Essa abordagem apoia-se na possibilidade de relacionar propriedades macroscópicas, como o índice de vazios, a parâmetros micromecânicos, como o número de coordenação, conforme discutido por Ueda et al. (2011).

A formulação foi baseada nas seguintes premissas:

- I. Para fins de modelagem, o solo é representado por um arranjo granular equivalente, considerando-se o comportamento dos agregados e concreções de forma análoga ao de partículas granulares, conforme discutido por Benatti (2010);
- II. A estabilidade da estrutura granular está relacionada à quantidade, à distribuição e à conectividade dos contatos entre as partículas, sendo o número de coordenação um parâmetro associado à estabilidade do arranjo (Oda, 1977; Isola, 2008);
- III. Partículas com baixos valores de número de coordenação apresentam maior tendência à instabilidade. Oda (1977) define como instáveis as partículas com número de coordenação inferior a quatro, enquanto Isola (2008) demonstra que a probabilidade de instabilidade diminui com o aumento do número de contatos;
- IV. A distribuição dos números de coordenação pode ser representada estatisticamente por uma distribuição aproximadamente normal, caracterizada por um valor médio e por um desvio padrão, conforme observado por Oda (1977) e discutido por Isola (2008).;
- V. O aumento do teor de umidade e a consequente redução da sucção e dos mecanismos que mantêm a estrutura metaestável podem provocar rearranjo das partículas e redução dos vazios, conforme descrito para solos colapsíveis por Benatti (2010).;

- VI. Admite-se que a composição granulométrica do material permaneça essencialmente constante durante o processo de colapso, ocorrendo predominantemente reorganização estrutural das partículas e dos agregados, sem alteração significativa da composição granulométrica inicial (Benatti, 2010).

3.5.1. Hipótese estrutural do colapso

A hipótese central do modelo consiste em interpretar o colapso como um processo de reorganização da rede de contatos entre as partículas. Em condição não saturada, a estabilidade da estrutura metaestável pode ser parcialmente mantida pela sucção matricial e pela atuação de agentes cimentantes, que contribuem para a manutenção dos vínculos entre as partículas (Mendonça, 1990; Benatti, 2010).

Com o aumento do teor de umidade, a redução da sucção e o enfraquecimento desses vínculos podem favorecer a perda de estabilidade e o rearranjo das partículas para novas posições estruturais. Esse processo está associado ao fechamento dos vazios e ao desenvolvimento das deformações volumétricas características do colapso (Mendonça, 1990; Benatti, 2010; Pereira, 2018).

No presente modelo assume-se que esse processo pode ser representado por um deslocamento da média da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC), mantendo-se constante o desvio padrão da distribuição. Essa hipótese baseia-se no fato de que a composição granulométrica do material permanece praticamente inalterada durante a inundação, modificando-se predominantemente a organização dos contatos entre partículas.

3.5.2. Variáveis de entrada

O modelo utiliza apenas dois parâmetros físicos como variáveis principais de entrada: peso específico aparente seco do solo (γ_d) e teor de partículas grossas (P_g).

A escolha dessas variáveis foi motivada pela possibilidade de obtê-las por meio de ensaios de caracterização e por sua relação com aspectos físicos e estruturais relevantes ao comportamento do solo. Estudos de previsão de colapso baseados em propriedades físicas simples destacam a importância de parâmetros como o peso específico seco inicial na caracterização da suscetibilidade ao colapso.

O peso específico aparente seco está relacionado ao estado de densificação e ao índice de vazios do material. Oda (1977) mostra que o índice de vazios apresenta relação com o número médio de coordenação, parâmetro associado à proximidade entre as partículas e à organização estrutural do conjunto granular. Dessa forma, no modelo proposto, γ_d é utilizado como variável associada ao estado físico inicial do solo.

A distribuição granulométrica também influencia a organização dos contatos entre as partículas. Oda (1977) relaciona as características da distribuição do número de coordenação à granulometria do material, enquanto Isola (2008) mostra que alterações na distribuição de tamanhos e na composição dos arranjos granulares afetam o número de coordenação e sua distribuição. De forma complementar, Ueda et al. (2011) demonstram que a razão entre tamanhos e a fração volumétrica das partículas influenciam a estrutura e a coordenação de misturas granulares. Com base nesses fundamentos, o teor de partículas grossas (P_g) é adotado neste trabalho como variável representativa da composição granulométrica do solo.

3.5.3. Determinação da condição estrutural inicial

A primeira etapa do modelo consiste na determinação do número médio de coordenação é estimado utilizando a correlação proposta por Ueda et al. (2011) (Equação 2):

$$N_{c_0} = 15,75 - 10,74e_0 \quad (2)$$

Essa etapa permite converter um parâmetro geotécnico convencional em um indicador da conectividade estrutural do empacotamento granular.

3.5.4. Determinação da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos

Após a determinação da coordenação média inicial, a estrutura granular é representada pela Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC), conforme a abordagem proposta por Isola (2008).

Assume-se que o número de contatos segue uma distribuição normal:

$$N_c \sim N(n, \sigma) \quad (4)$$

O desvio padrão é utilizado para representar a heterogeneidade estrutural do arranjo granular. A CDPC permite descrever não apenas o número médio de coordenação do sistema, mas também a proporção de partículas que apresentam baixa conectividade estrutural. No

modelo proposto, o desvio padrão é empregado como parâmetro de dispersão da distribuição dos contatos, com base nas abordagens estatísticas discutidas por Oda (1977) e Isola (2008).

3.5.5. Determinação da fração de partículas instáveis

Com base no critério de estabilidade estrutural adotado por Oda (1977), considera-se que partículas com número de coordenação inferior a 4,63 apresentam estabilidade insuficiente para participar efetivamente da rede resistente do material. A fração de partículas instáveis é determinada pela área da distribuição situada à esquerda desse limite crítico:

$$P_i = \Phi \left(\frac{4,63 - n}{\sigma} \right) \quad (6)$$

Esse parâmetro é utilizado como indicador quantitativo da condição estrutural do solo. Quanto maior o valor de P_i , maior a proporção de partículas suscetíveis a rearranjos internos e, conseqüentemente, maior o potencial de colapso.

3.5.6. Critério de estabilidade pós-colapso

Uma das premissas fundamentais do modelo consiste em admitir que o processo de colapso prossegue até que a estrutura atinja uma condição residual de estabilidade. A partir da análise do banco de dados utilizado nesta pesquisa, verificou-se que a condição pós-colapso pode ser representada por uma fração residual de partículas instáveis, denominada $P_{i\text{estável}}$. Assim, o modelo busca determinar qual deve ser a nova média da CDPC para que a proporção de partículas instáveis seja reduzida até esse valor residual. Matematicamente, essa condição é representada pela Equação 9:

$$P_{if} = P_{i\text{estável}} \quad (9)$$

Em que:

P_{if} = fração de partículas instáveis após o colapso.

A partir desse critério, calcula-se a nova coordenação média da estrutura após a reorganização provocada pela saturação.

3.5.7. Determinação da coordenação pós-colapso

Conhecendo-se o valor de $P_{iestável}$ e assumindo constante o desvio padrão da distribuição, determina-se a nova média da CDPC correspondente à condição de estabilidade estrutural pós-colapso. Esse valor corresponde ao número médio de coordenação final (Equação 10):

$$N_{cf} \quad (10)$$

Onde:

N_{cf} = número médio de coordenação após o colapso.

Fisicamente, N_{cf} representa a conectividade média da rede de contatos após o rearranjo estrutural provocado pela saturação.

3.5.8. Determinação do índice de vazios pós-colapso

Uma vez obtido o valor de N_{cf} , calcula-se o índice de vazios correspondente por meio da inversão da equação proposta por Ueda *et al.* (2011) (Equação 11):

$$ef = \frac{15,75 - N_{cf}}{10,74} \quad (11)$$

Essa etapa permite converter novamente o parâmetro micromecânico em um parâmetro geotécnico convencional.

Tal artifício consiste em uma mudança de domínio de variáveis (especificamente, do domínio macroestrutural/volumétrico para o domínio microestrutural/estatístico) cujas funções de transferência são ancoradas nos modelos teóricos já apresentados.

O domínio microestrutural é um domínio geométrico-estatístico que descreve o arranjo físico real e a heterogeneidade da estrutura interna do solo que possibilita calcular com mais facilidade a condição estável do solo.

3.5.9. Estimativa da deformação de colapso

A deformação volumétrica associada ao colapso é calculada pela diferença entre os estados inicial e final da estrutura.

$$I_c = \frac{e_0 - ef}{1 + e_0} * 100 \quad (1)$$

O valor obtido representa a estimativa preliminar do potencial de colapso fornecida pelo modelo.

3.6.COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS

Os resultados obtidos pelo modelo simplificado foram comparados aos valores determinados experimentalmente. Para cada amostra foram analisados: índice de colapso experimental; índice de colapso estimado; erro absoluto; erro relativo.

Essa comparação permitiu avaliar a capacidade do modelo em representar o comportamento estrutural dos solos estudados e verificar sua aplicabilidade como ferramenta preliminar de identificação de materiais potencialmente colapsíveis. Ressalta-se que o modelo desenvolvido não substitui os ensaios laboratoriais convencionais, devendo ser utilizado como instrumento complementar de triagem geotécnica em fases iniciais de investigação.

Sua principal contribuição consiste em interpretar o colapso como consequência da evolução da rede de contatos intergranulares, relacionando propriedades geotécnicas convencionais a parâmetros micromecânicos que representam a estabilidade estrutural do material. Essa abordagem permite compreender o fenômeno do colapso não apenas como uma deformação volumétrica observada experimentalmente, mas como resultado da reorganização progressiva da estrutura granular após a saturação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS ANALISADAS

O solo utilizado nos ensaios de colapso para a verificação experimental do modelo foi previamente caracterizado quanto à granulometria, aos limites de consistência e à classificação geotécnica, conforme os procedimentos descritos na metodologia. A análise granulométrica indicou predominância da fração arenosa, com aproximadamente 68,55% de areia, 29,53% de finos e 1,93% de pedregulho.

Os limites de consistência obtidos: foram limite de liquidez de 21,65%, limite de plasticidade de 19,06% e índice de plasticidade de 2,59%, indicando baixa plasticidade do material. Com base no Sistema Unificado de Classificação dos Solos, o material foi classificado como SM, correspondente a uma areia siltosa. Pela classificação HRB, o solo foi enquadrado como A-2-4, com índice de grupo igual a zero. A classificação textural indicou material franco arenoso.

Essas características físicas são compatíveis com condições de suscetibilidade ao colapso, especialmente quando associadas a uma estrutura macroporosa, baixa massa específica aparente seca e presença de vínculos estruturais suscetíveis ao enfraquecimento com o aumento do teor de umidade (Mendonça, 1990; Benatti, 2010). Entretanto, o comportamento colapsível não depende exclusivamente da granulometria e dos índices físicos, podendo também ser influenciado pela mineralogia do solo e pela presença de agentes cimentantes, como óxidos de ferro, hidróxidos, carbonatos e sais, que contribuem para a estabilidade da estrutura metaestável (Benatti, 2010).

No presente estudo, a mineralogia não foi determinada experimentalmente, de modo que sua influência é considerada apenas com base na literatura. Do ponto de vista do modelo proposto, o teor de areia de aproximadamente 68,55% posiciona a amostra próxima à faixa crítica adotada na função corretiva do teor de partículas grossas, centrada em torno de 70%, aspecto considerado na avaliação do comportamento colapsível do material.

Inicialmente foram determinadas as propriedades físicas dos exemplares utilizados nos ensaios experimentais para validação do modelo. Os parâmetros obtidos incluíram peso específico aparente seco, massa específica dos sólidos, índice de vazios inicial e teor de partículas grossas.

A Tabela 1 apresenta um resumo das características das amostras analisadas.

Tabela 1 - Caracterização física das amostras

Amostra	γ_g (g/cm³)	γ_d (g/cm³)	e_0	Partículas Grossas (%)
CP01	2,705	1,50	0,81	68,55
CP02	2,705	1,50	0,80	68,55
CP03	2,705	1,49	0,82	68,55
CP04	2,705	1,49	0,81	68,55
CP05	2,705	1,50	0,80	68,55

Fonte: Autor, 2026.

4.2.RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COLAPSO

Com o objetivo de avaliar experimentalmente a suscetibilidade ao colapso do solo estudado, foram realizados ensaios edométricos com inundação em cinco corpos de prova moldados a partir do material coletado na cidade de Areia PB. Os ensaios foram conduzidos sob condições controladas de laboratório, com base nos procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16853 (2020). Os resultados obtidos para os cinco corpos de prova são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Potencial de colapso obtido nos ensaios laboratoriais.

Corpo de Prova	Potencial de Colapso (%)
CP01	1,19
CP05	1,21
CP02	2,16
CP04	2,34
CP03	3,01

Fonte: Autor, 2026.

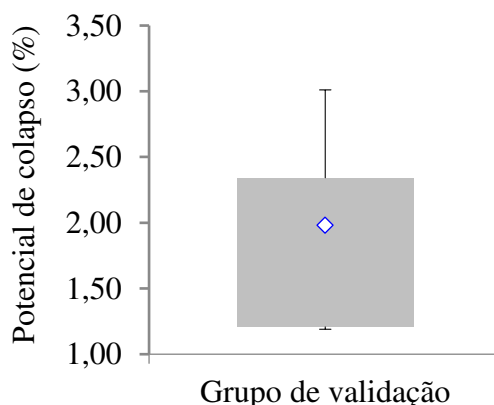
A análise dos resultados evidenciou a ocorrência de deformações volumétricas após a inundação em todos os corpos de prova ensaiados. Os valores de potencial de colapso variaram entre 1,19% e 3,01%, com média de 1,98% e desvio padrão amostral de 0,79%. Esses resultados indicam variabilidade entre os corpos de prova avaliados.

A dispersão observada nos resultados pode estar associada à heterogeneidade da estrutura do solo, incluindo diferenças na organização dos vazios e no arranjo das partículas. Oda (1977) relaciona a dispersão do número de coordenação à heterogeneidade da estrutura granular, enquanto Isola (2008) destaca que a análise da distribuição dos contatos deve considerar não apenas o valor médio, mas também sua variabilidade. Em solos não saturados com estrutura metaestável, diferenças locais da estrutura podem resultar em respostas distintas

durante o umedecimento. Mendonça (1990) associa o colapso à perda dos mecanismos que mantêm a estrutura em equilíbrio, especialmente pela redução da sucção, enquanto Benatti (2010) destaca o enfraquecimento dos vínculos estruturais e a influência de agentes cimentantes sobre a resposta do material.

A Figura 13 apresenta os valores de potencial de colapso obtidos experimentalmente.

Figura 14 – Resultado da análise de Boxplot realizada



Fonte: Autor, 2026.

O maior valor de potencial de colapso foi registrado no corpo de prova CP03, com 3,01%, enquanto o menor foi observado no CP01, com 1,19%. Os resultados apresentaram média de 1,98% e desvio padrão amostral de 0,79%, evidenciando variabilidade entre os corpos de prova ensaiados. Essa dispersão pode estar associada à heterogeneidade estrutural do material, conforme discutido anteriormente.

Considerando o critério de Vargas (1978), segundo o qual potenciais de colapso superiores a 2,0% caracterizam solos colapsíveis, observa-se que os corpos de prova que ultrapassaram esse limite apresentaram comportamento compatível com a condição de colapsibilidade. Os valores obtidos variaram entre 1,19% e 3,01%, com média de 1,98%, evidenciando variabilidade na resposta dos corpos de prova submetidos à inundação.

Os ensaios laboratoriais foram realizados com inundação sob tensão vertical de 25 kPa. Nessas condições, as deformações observadas refletem a resposta do solo ao efeito combinado do carregamento aplicado e do umedecimento. A magnitude do colapso pode variar em função do estado de tensões e da condição estrutural inicial do material, especialmente em solos com estrutura porosa e metaestável.

4.3. INFLUÊNCIA DO TEOR DE PARTÍCULAS GROSSAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

A análise da função corretiva proposta em função do teor de partículas grossas mostrou comportamento compatível com a influência da composição granulométrica sobre a organização estrutural dos materiais granulares. Oda (1977) relaciona a distribuição granulométrica às características da distribuição do número de coordenação, enquanto Isola (2008) demonstra que alterações na proporção e no tamanho relativo das partículas modificam a quantidade e a distribuição dos contatos. De forma complementar, Ueda et al. (2011) mostram que a fração volumétrica e a razão entre tamanhos das partículas influenciam o arranjo granular e o número de coordenação.

No modelo desenvolvido neste trabalho, essa influência é representada por uma função gaussiana centrada em aproximadamente 70% de partículas grossas. Esse valor corresponde à condição de máxima influência do fator corretivo adotado no modelo e foi definido a partir da formulação desenvolvida nesta pesquisa, não constituindo um limite granulométrico universal estabelecido pela literatura (Equação 12).

$$f(Pg) = e^{-0,00015(Pg-70)^2} \quad (12)$$

Em que:

$f(Pg)$ = fator corretivo estrutural;

Pg = teor de partículas grossas (%).

Do ponto de vista físico, a curva correspondente à função corretiva $f(Pg)$, definida em função do teor de partículas grossas, indica aumento do fator corretivo à medida que Pg se aproxima de aproximadamente 70%, com redução para composições mais afastadas desse valor. No modelo proposto, esse comportamento é interpretado como indicativo de uma faixa intermediária de composição granulométrica associada a maior influência do teor de partículas grossas sobre a resposta estrutural do material.

Nos solos com baixos teores de areia, o comportamento tende a ser controlado pela matriz fina, caracterizada por maior continuidade estrutural, predominância de microporos e deformações associadas principalmente à plasticidade e ao adensamento. Nessas condições, embora a variação volumétrica possa ser significativa, a ocorrência de colapso abrupto tende a ser limitada em virtude da menor presença de macroporos metastáveis.

Em materiais predominantemente arenosos, a resistência tende a estar mais diretamente associada aos contatos grão-grão e ao atrito interparticular. Benatti (2010) descreve que, em

determinadas condições, os agregados podem apresentar comportamento semelhante ao de partículas de um material granular, cuja estabilidade depende da interação e do atrito entre os grãos.

A predominância da fração arenosa, entretanto, não é suficiente, por si só, para caracterizar ou excluir a suscetibilidade ao colapso. O mecanismo de colapso está associado à existência de uma estrutura aberta e metaestável, mantida por vínculos suscetíveis à redução de resistência com o aumento do teor de umidade (Mendonça, 1990; Benatti, 2010). Assim, a resposta ao umedecimento deve ser analisada em conjunto com a estrutura do solo, a presença de finos, a sucção e eventuais agentes cimentantes.

A região intermediária identificada pela função corresponde, portanto, a uma condição microestrutural crítica na qual coexistem macroporos intergranulares e frações finas capazes de atuar como agentes temporários de estabilização estrutural, (THEVANAYAGAM, 1998). Nessa configuração, os finos ainda contribuem para a formação de pontes capilares e ligações metastáveis, enquanto a fração arenosa já é suficientemente elevada para produzir uma estrutura aberta e heterogênea. O resultado é um sistema mais suscetível à reorganização interna quando submetido ao molhamento.

Essa interpretação é coerente com os conceitos modernos aplicados aos solos transicionais, particularmente aqueles relacionados à mudança de dominância entre matriz fina e esqueleto granular, discutidos por Coop & Atkison (1993) e Coop (1995) e posteriormente aprofundados por pesquisadores que investigaram o chamado teor de finos de transição como Coop *et al.* (2005) e os próprios Ueda *et al.* (2011). Nessas pesquisas, demonstra-se que determinadas proporções entre areia e finos produzem estados estruturais caracterizados por elevada heterogeneidade e máxima instabilidade mecânica.

Sob uma perspectiva topológica, o comportamento observado pode ainda estar relacionado a um processo de transição entre fases estruturais distintas. Em baixos teores de areia, a fase argilosa constitui o meio contínuo predominante. À medida que o teor arenoso aumenta, ocorre progressivamente a formação de caminhos granulares interconectados até que o esqueleto granular se torne dominante. A região de transição entre essas duas condições tende a maximizar a instabilidade da rede de vazios, favorecendo concentrações localizadas de tensões e rearranjos estruturais abruptos.

Nesse contexto, a função proposta, apesar de ser um ajuste empírico de dados experimentais, representa uma configuração fenomenológica compatível com os mecanismos físicos associados ao comportamento de solos transicionais colapsíveis. A formulação

incorpora efeitos relacionados à microestrutura, heterogeneidade granulométrica e transição entre regimes mecânicos distintos, apresentando coerência com observações experimentais reportadas na literatura geotécnica.

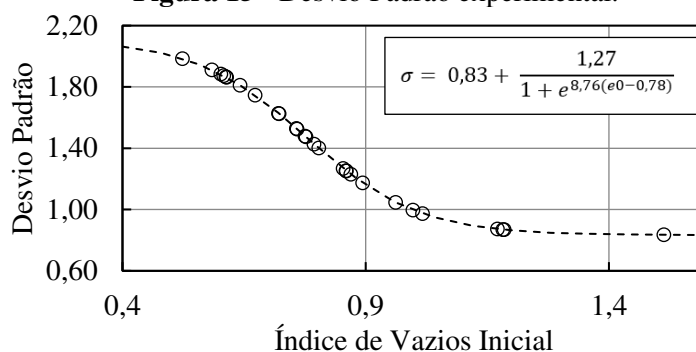
4.4.RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE VAZIOS E DESVIO PADRÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CONTATOS

O número médio de coordenação constitui um parâmetro importante para a caracterização da organização e da estabilidade de materiais granulares. Oda (1977) relaciona o valor médio do número de coordenação à proximidade entre as partículas e destaca que o desvio padrão dessa distribuição fornece informações sobre a heterogeneidade da estrutura granular. De forma complementar, Isola (2008) ressalta que a caracterização da distribuição dos contatos não deve se restringir ao valor médio, sendo necessário considerar também os parâmetros de dispersão para uma avaliação mais completa da estrutura interna do material.

Com base nos dados utilizados no desenvolvimento do modelo, foi investigada a relação entre o índice de vazios inicial e o desvio padrão da distribuição de contatos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 14. A análise dessa relação busca verificar se alterações no estado inicial de porosidade do material estão associadas a modificações na dispersão estatística dos números de coordenação.

A relação observada encontra suporte conceitual nos estudos de Oda (1977), que associa o índice de vazios ao estado de organização das partículas e o desvio padrão do número de coordenação à heterogeneidade da estrutura granular. Isola (2008) também demonstra que diferentes condições estruturais e densidades podem apresentar distribuições distintas dos números de contatos, caracterizadas por diferentes valores de média e dispersão. Ueda et al. (2011), por sua vez, mostram que o número de coordenação varia em função do índice de vazios, reforçando a existência de uma conexão entre parâmetros macroscópicos de densidade e características micromecânicas da rede de contatos.

Dessa forma, a tendência identificada nos dados deste trabalho pode ser interpretada como evidência de que a condição inicial de porosidade influencia não apenas o número médio de contatos, mas também a heterogeneidade da distribuição de coordenação. Essa interpretação deve, contudo, ser considerada no contexto do conjunto de dados empregado na formulação do modelo, não constituindo uma relação universal para todos os tipos de solo.

Figura 15 - Desvio Padrão experimental.

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados apresentados na Figura 14 evidenciam uma relação inversa e não linear entre o índice de vazios inicial e o desvio padrão da distribuição dos contatos. Para menores valores de índice de vazios, foram observados valores mais elevados de σ , enquanto o aumento de e esteve associado à redução progressiva da dispersão, com tendência de estabilização para os maiores índices de vazios analisados. Esse comportamento indica, para o conjunto de dados empregado no desenvolvimento do modelo, que diferentes condições iniciais de porosidade estão associadas a diferentes níveis de heterogeneidade da distribuição dos contatos.

Essa interpretação encontra suporte conceitual em Oda (1977), que relaciona o desvio padrão do número de coordenação à heterogeneidade da estrutura granular e destaca que tanto o valor médio quanto sua dispersão são relevantes para a caracterização do arranjo de partículas. Isola (2008) também demonstra que a distribuição estatística dos contatos pode ser caracterizada conjuntamente por média e desvio padrão, podendo apresentar diferentes configurações em função das características estruturais do material.

De forma complementar, Ueda et al. (2011) mostram que o índice de vazios está relacionado ao número de coordenação, evidenciando uma conexão entre o estado físico do arranjo granular e parâmetros micromecânicos associados à rede de contatos. Entretanto, a relação específica entre o índice de vazios e o desvio padrão apresentada na Figura 14 foi obtida a partir dos dados utilizados neste trabalho e, portanto, deve ser interpretada como uma correlação empírica do modelo proposto, não como uma relação universal aplicável a todos os solos.

Observa-se que o desvio padrão diminui progressivamente à medida que o índice de vazios aumenta. Para valores reduzidos de índice de vazios, correspondentes a estruturas mais compactas, são observados maiores valores de dispersão do número de contatos. Em

contrapartida, para estruturas mais abertas, o desvio padrão tende a se estabilizar em valores próximos de 0,83. A Equação 13 descreve a relação entre os parâmetros:

$$\sigma = 0,83 + \frac{1,27}{1 + e^{8,76(e_0 - 0,78)}} \quad (13)$$

Em que:

σ = desvio padrão da distribuição d e contatos;

e_0 = índice de vazios inicial.

O ajuste obtido indica que o índice de vazios constitui um parâmetro capaz de representar indiretamente a heterogeneidade estrutural do empacotamento granular.

O ajuste obtido indica, para o conjunto de dados analisado, a existência de uma relação entre o índice de vazios inicial e o desvio padrão da distribuição dos números de coordenação. Dessa forma, o índice de vazios pode ser utilizado no modelo como parâmetro indireto associado à estimativa da dispersão dos contatos, sem que isso implique considerá-lo, isoladamente, uma medida da heterogeneidade estrutural.

Do ponto de vista estatístico, o desvio padrão representa a dispersão dos números de coordenação em torno do valor médio. Oda (1977) relaciona esse parâmetro à heterogeneidade da estrutura granular, enquanto Isola (2008) destaca a importância de considerar conjuntamente a média e a dispersão da distribuição dos contatos. Assim, maiores valores de σ indicam maior variabilidade dos números de coordenação, enquanto menores valores correspondem a distribuições mais concentradas em torno da média.

Os resultados obtidos sugerem que estruturas mais compactadas tendem a apresentar maior heterogeneidade na rede de contatos. Embora essas condições estejam associadas a menores índices de vazios, a proximidade entre partículas favorece a formação simultânea de regiões com elevada conectividade e regiões com menor número de contatos, aumentando a dispersão da distribuição. Em contraste, estruturas mais abertas apresentam distribuição mais homogênea, resultando em menores valores de desvio padrão.

Essa observação possui importante significado para o modelo proposto, uma vez que o desvio padrão controla diretamente a forma da CDPC e, conseqüentemente, a estimativa da fração de partículas instáveis. Assim, a incorporação da relação entre índice de vazios e desvio padrão permite considerar não apenas a condição média do empacotamento, mas também seu grau de heterogeneidade estrutural.

Além disso, os resultados reforçam a abordagem estatística proposta por Isola (2008), segundo a qual a estabilidade de um material granular não depende exclusivamente do número

médio de coordenação, mas também da distribuição dos contatos entre as partículas. Dessa forma, a utilização conjunta do número médio de coordenação e do desvio padrão fornece uma representação mais completa da estrutura interna do solo.

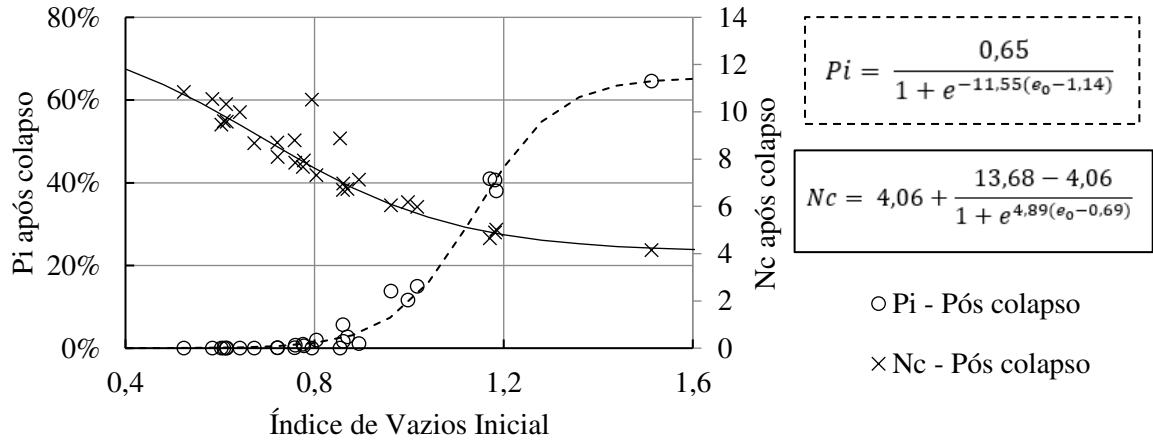
No contexto deste trabalho, a equação ajustada para o desvio padrão constitui uma etapa importante da metodologia, pois fornece o parâmetro de dispersão necessário à construção da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC). Oda (1977) destaca que o valor médio do número de coordenação e o seu desvio padrão deve ser considerados conjuntamente na caracterização da estrutura granular, enquanto Isola (2008) demonstra que a distribuição dos contatos pode ser representada estatisticamente por distribuições caracterizadas por média e desvio padrão.

4.5.RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE VAZIOS, P_i E N_c APÓS COLAPSO.

Com o objetivo de analisar a influência da estrutura inicial do solo sobre a condição estimada após o colapso, foram avaliadas as relações entre o índice de vazios inicial (e_0), a fração de partículas instáveis P_i e o número médio de coordenação N_c correspondente à condição pós-colapso. Para essa análise, foram utilizadas as 29 amostras empregadas no desenvolvimento do modelo. Para isso, foram avaliadas 29 amostras experimentais, permitindo estabelecer correlações entre os parâmetros micromecânicos e o estado final de compactação do material.

A interpretação dessas relações encontra suporte nos conceitos micromecânicos discutidos por Oda (1977), que associa o número de coordenação à proximidade entre as partículas e à estabilidade do arranjo granular. Isola (2008) complementa essa interpretação ao mostrar que a estabilidade das configurações locais depende não apenas do número médio de contatos, mas também da distribuição desses contatos entre as partículas. Além disso, Ueda et al. (2011) evidenciam a relação entre índice de vazios e número de coordenação, mostrando que menores valores de índice de vazios tendem a estar associados a maiores valores de N_c .

Os resultados apresentados na Figura 16 permitem verificar como essas relações se manifestam no conjunto de dados utilizado neste trabalho. A partir delas, torna-se possível discutir se a redução do índice de vazios está associada, no modelo, a maior conectividade entre as partículas e a menor fração estimada de partículas potencialmente instáveis.

Figura 16 – Correlação entre e_0 e parâmetros microestruturais pós-colapso.

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que a fração estimada de partículas potencialmente instáveis aumenta progressivamente com o aumento do índice de vazios inicial. Em contrapartida, o número médio de coordenação apresenta comportamento inverso, diminuindo à medida que a estrutura inicial se torna mais aberta. Essa tendência é compatível com Oda (1977), que relaciona estruturas mais porosas à maior ocorrência de partículas instáveis, e com Ueda et al. (2011), que mostram a redução do número de coordenação com o aumento do índice de vazios. No contexto do modelo proposto, esses resultados indicam que maiores valores de índice de vazios inicial estão associados a menor conectividade média e maior fração estimada de partículas potencialmente instáveis. A relação entre o índice de vazios inicial e a fração estimada de partículas potencialmente instáveis foi representada, para o conjunto de dados analisado, pela seguinte equação Equação 14:

$$Pi = \frac{0,65}{1 + e^{-11,55(e_0 - 1,14)}} \quad (14)$$

Em que:

Pi = fração estimada de partículas potencialmente instáveis;

e_0 = índice de vazios inicial.

A curva ajustada indica que, para elevados valores de índice de vazios inicial, a fração estimada de partículas potencialmente instáveis tende a se aproximar de 65%. No contexto do modelo proposto, esse comportamento representa uma condição estrutural limite, na qual permanece uma parcela elevada de partículas com baixa conectividade. Essa tendência pode ser associada à maior heterogeneidade estrutural de arranjos mais abertos, conforme discutido por Oda (1977) e Isola (2008).

O ponto de inflexão da curva ocorre em torno de $e_0=1,14$, valor que representa uma condição crítica de transição estrutural. Próximo a esse ponto, pequenas variações no índice de vazios resultam em alterações significativas na fração de partículas instáveis remanescentes. Essa sensibilidade sugere que solos com índices de vazios próximos a esse limite podem apresentar comportamento particularmente suscetível a rearranjos estruturais induzidos pelo molhamento.

De forma complementar, o número médio de coordenação após o colapso foi correlacionado ao índice de vazios inicial por meio da expressão (Equação 15):

$$N_c = 4,06 + \frac{9,62}{1 + e^{4,89(e_0 - 0,69)}} \quad (15)$$

Em que:

N_c = número médio de coordenação estimado para a condição pós-colapso;

e_0 = índice de vazios inicial.

Os resultados demonstram que estruturas inicialmente mais densas tendem a apresentar maiores valores de coordenação após o colapso, indicando uma rede de contatos mais eficiente para transmissão de esforços. Por outro lado, amostras com índices de vazios elevados mantêm valores reduzidos de coordenação mesmo após a reorganização estrutural, evidenciando menor conectividade entre partículas.

Sob a perspectiva micromecânica, as tendências observadas reforçam a interpretação do colapso como um processo de reorganização da rede de contatos entre as partículas. Mendonça (1990) associa o fenômeno à quebra de contatos e ao consequente rearranjo estrutural, enquanto Benatti (2010) descreve a reorganização dos agregados com fechamento dos vazios. Durante o umedecimento, a redução da sucção matricial e o enfraquecimento de vínculos cimentantes favorecem a perda de estabilidade e o rearranjo das partículas, conduzindo à redução do índice de vazios (Mendonça, 1990; Benatti, 2010).

No âmbito do modelo proposto, essa redução é associada ao aumento do número médio de coordenação, em consonância com a relação entre índice de vazios e coordenação discutida por Ueda et al. (2011). Entretanto, a reorganização estrutural não implica necessariamente a eliminação completa de regiões mais porosas ou menos conectadas, podendo persistir heterogeneidades estruturais após o colapso, conforme observado por Gutierrez (2005).

Outro aspecto relevante refere-se à coerência entre as duas correlações apresentadas. À medida que o número médio de coordenação aumenta, verifica-se redução da fração de partículas instáveis, comportamento compatível com o critério de estabilidade proposto por Oda (1977). Dessa forma, os resultados obtidos fornecem suporte experimental à interpretação de

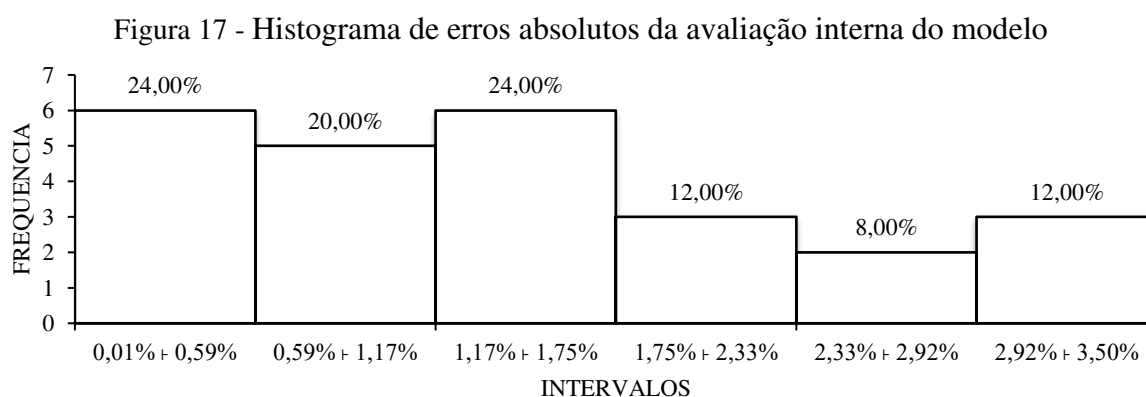
que a estabilidade estrutural do solo está diretamente associada à conectividade da rede granular.

Cabe destacar que as correlações apresentadas foram obtidas sem considerar explicitamente o efeito da tensão aplicada durante a inundação. Embora o carregamento exerça influência sobre a magnitude das deformações observadas, os resultados sugerem que o índice de vazios inicial constitui um parâmetro estrutural capaz de capturar parcela significativa do comportamento pós-colapso. Investigações futuras poderão incorporar o efeito da tensão vertical às equações propostas, ampliando a capacidade preditiva do modelo.

4.6.COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS

Para a validação preliminar do modelo de previsão de colapso do solo, realizou-se uma avaliação interna (*in-sample assessment*) aplicando as equações calibradas sobre o próprio conjunto de dados original, composto por 29 amostras. Essa etapa teve como objetivo quantificar o ajuste interno (*resubstitution error*) e verificar a aderência inicial do modelo aos parâmetros ensaiados, servindo de base para as análises subsequentes de capacidade preditiva. O erro foi calculado como a diferença absoluta entre o valor teórico e o valor real.

Dos erros encontrados para as 29 amostras apenas 4 foram classificados como discrepantes a partir de análise de *boxplot*. Seus valores foram de 14,7%; 9,1%; 7,2% e 4,8%. O restante dos erros foi inserido em um gráfico do tipo histograma. Os erros obtidos estão ilustrados na Figura 16



Fonte: Autor, 2026.

Posteriormente, os valores de índice de colapso obtidos pelo modelo foram comparados aos resultados determinados experimentalmente nos ensaios edométricos. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3 - Comparação entre resultados experimentais e estimados

Amostra	Ic Experimental (%)	Ic Modelo (%)	Erro (%)
CP01	1,19	2,38	1,19
CP02	2,16	2,39	0,23
CP03	3,01	2,36	0,65
CP04	2,34	2,37	0,03
CP05	1,21	2,38	1,17

Fonte: Autor, 2026

Posteriormente, os valores de potencial de colapso estimados pelo modelo foram comparados aos resultados obtidos experimentalmente nos ensaios edométricos realizados com os cinco corpos de prova. A Tabela 3 apresenta os valores experimentais, os valores estimados pelo modelo e os respectivos erros absolutos.

Observa-se que os menores erros ocorreram para os corpos de prova CP04 e CP02, com diferenças de 0,03 e 0,23 ponto percentual, respectivamente. Em contrapartida, os maiores desvios foram observados nos corpos de prova CP01 e CP05, com erros de 1,19 e 1,17 ponto percentual. O corpo de prova CP03 apresentou erro intermediário de 0,65 ponto percentual.

De modo geral, o modelo apresentou valores estimados concentrados em uma faixa estreita, entre 2,36% e 2,39%, enquanto os resultados experimentais apresentaram maior variabilidade, entre 1,19% e 3,01%. Esse comportamento indica que, para o conjunto analisado, o modelo foi capaz de representar aproximadamente a ordem de grandeza do potencial de colapso, porém apresentou menor sensibilidade à variabilidade observada experimentalmente entre os corpos de prova.

4.7.VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DO MODELO PROPOSTO

Com o objetivo de realizar uma verificação preliminar da aderência do modelo aos resultados experimentais, comparou-se o valor médio estimado pelo modelo com a média obtida nos cinco corpos de prova ensaiados. A média experimental foi de 1,98%, com desvio padrão amostral de 0,79%, enquanto o modelo estimou valor médio de 2,37%. A diferença absoluta entre as médias foi, portanto, de 0,39 ponto percentual. Considerando o número

reduzido de observações ($n=5$), esses resultados devem ser interpretados como uma verificação experimental preliminar do comportamento do modelo, não sendo suficientes para estabelecer sua representatividade estatística ou capacidade de generalização.

Para explorar se a diferença entre os valores estimados e experimentais apresentava evidência estatística, foi aplicado o teste t para uma amostra, adotando-se nível de significância de 5%. O teste resultou em $t = -1,10$ e valor- p de aproximadamente 0,33. Como o valor- p foi superior a 0,05, não foi identificada diferença estatisticamente significativa entre a média estimada pelo modelo e a média experimental. Entretanto, considerando o reduzido número de observações ($n=5$), esse resultado deve ser interpretado com cautela, não sendo suficiente para demonstrar equivalência, representatividade estatística ou capacidade de generalização do modelo.

Adicionalmente, o intervalo de confiança de 95% para a média experimental foi estimado entre 1,00% e 2,96%. O valor médio previsto pelo modelo, de 2,37%, encontra-se dentro desse intervalo. Entretanto, considerando o reduzido número de observações ($n=5$) e a amplitude do intervalo de confiança, esse resultado deve ser interpretado apenas como uma indicação preliminar de proximidade entre a estimativa média do modelo e os valores experimentais.

Dessa forma, os resultados obtidos não permitem afirmar equivalência estatística nem desempenho satisfatório de forma conclusiva. Para a condição analisada, o modelo apresentou estimativa média próxima à média experimental, mas sua capacidade de generalização deve ser avaliada com um conjunto maior e mais diversificado de amostras.

4.8.INTERPRETAÇÃO MICROMECAÂNICA DOS RESULTADOS

A interpretação tradicional do colapso em solos não saturados baseia-se na observação das deformações volumétricas induzidas pela inundação da amostra sob carregamento constante. Entretanto, embora essa abordagem permita quantificar a magnitude do fenômeno, ela não descreve diretamente os mecanismos internos responsáveis pela perda de estabilidade estrutural. Nesse contexto, a análise micromecânica desenvolvida neste trabalho busca interpretar o colapso a partir da evolução da rede de contatos entre partículas.

Segundo Oda (1977), a estabilidade de um empacotamento granular está diretamente relacionada ao número de contatos estabelecidos entre os grãos. Partículas com reduzido número de contatos apresentam menor capacidade de transmitir esforços e, consequentemente,

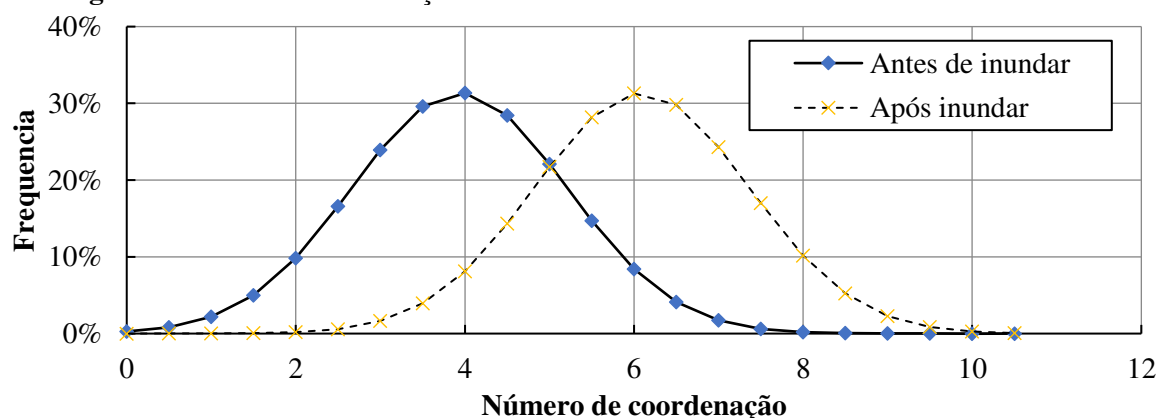
maior probabilidade de sofrer deslocamentos quando ocorre alguma perturbação na estrutura. Dessa forma, a fração de partículas instáveis pode ser utilizada como um indicador da suscetibilidade do solo a rearranjos internos.

Na condição inicial, antes da inundação, o solo apresenta uma estrutura metaestável caracterizada por elevado índice de vazios, presença de macroporos e significativa proporção de partículas com baixa coordenação. Nessa situação, parte da resistência do material é proporcionada pela sucção matricial e pelas ligações temporárias existentes entre os grãos. Embora a estrutura aparente estar em equilíbrio, esse estado é apenas condicional e depende da manutenção das condições de umidade existentes.

Com a infiltração de água, ocorre redução da sucção matricial e enfraquecimento dos mecanismos responsáveis pela estabilidade da estrutura. A perda dessas forças permite que partículas anteriormente sustentadas em posições instáveis passem a se deslocar, promovendo rearranjos internos do empacotamento. Como consequência, os vazios maiores tendem a ser parcialmente preenchidos, reduzindo o volume total ocupado pela estrutura.

Sob a ótica do modelo proposto, esse processo pode ser representado pelo deslocamento da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC) para valores mais elevados de coordenação. A Figura 18 apresenta, de forma comparativa, as distribuições estimadas do número de contatos para as condições anterior e posterior à inundação. Observa-se um deslocamento da distribuição associado à alteração do número médio de coordenação, representando, no modelo proposto, a reorganização da estrutura de contatos decorrente do colapso.

Figura 18 - Curva de distribuição de Probabilidade de contatos de uma amostra de solo.



Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que a distribuição correspondente à condição inicial apresenta maior concentração em menores valores de número de coordenação, indicando maior frequência de

partículas com baixa conectividade. Após o umedecimento, a distribuição estimada pelo modelo desloca-se para maiores valores de N_c , representando aumento da conectividade média e redução da fração estimada de partículas potencialmente instáveis. Essa tendência é compatível com Oda (1977), que relaciona baixos valores de número de coordenação à maior ocorrência de partículas instáveis, e com Isola (2008), que associa o aumento da coordenação à maior estabilidade das configurações locais. De forma complementar, Ueda et al. (2011) mostram que a redução do índice de vazios está associada ao aumento do número médio de coordenação.

Do ponto de vista físico, essa reorganização pode ser associada ao fechamento dos vazios decorrente do colapso. Mendonça (1990) descreve o fenômeno como um rearranjo estrutural relacionado à perda dos mecanismos que mantêm a estrutura metaestável, enquanto Benatti (2010) destaca o rearranjo das partículas e o fechamento dos vazios após o enfraquecimento dos vínculos estruturais. No âmbito do modelo proposto, a redução do índice de vazios é representada pelo aumento do número médio de coordenação, em consonância com a relação entre essas variáveis discutida por Ueda et al. (2011).

Assim, a comparação entre as distribuições permite interpretar o colapso, no contexto do modelo, como uma reorganização da estrutura granular acompanhada por alterações na conectividade entre as partículas. Essa interpretação se apoia nas abordagens estatísticas da distribuição dos contatos discutidas por Oda (1977) e Isola (2008), mas deve ser entendida como uma representação micromecânica estimada pelo modelo, e não como uma observação direta da rede de contatos nos corpos de prova ensaiados.

A interpretação proposta permite compreender o colapso não apenas como uma redução volumétrica, mas também como uma reorganização da estrutura interna do solo. Nesse sentido, a deformação observada experimentalmente pode ser associada, no âmbito do modelo desenvolvido, a alterações na conectividade da rede de contatos e na condição estrutural do material.

Os resultados apresentados nas seções anteriores são compatíveis com essa interpretação. Observou-se que maiores valores de índice de vazios inicial estão associados a menores números médios de coordenação e a maiores frações estimadas de partículas potencialmente instáveis. De forma complementar, o aumento do número médio de coordenação esteve associado, no modelo, à redução da fração estimada de partículas instáveis. Essas tendências são coerentes com Oda (1977), que relaciona baixos valores de coordenação à maior ocorrência de partículas instáveis, com Isola (2008), que associa o número de

coordenação à estabilidade das configurações locais, e com Ueda et al. (2011), que relacionam menores índices de vazios a maiores valores de número de coordenação.

A correlação observada entre o comportamento mecânico do solo e seus parâmetros microestruturais permite estabelecer uma analogia conceitual com os princípios da análise estrutural clássica, particularmente com os conceitos de isostaticidade e hiperestaticidade. Em escala microscópica, o número médio de coordenação e a conectividade da rede de contatos desempenham papel análogo ao grau de redundância estrutural presente em sistemas resistentes. Solos caracterizados por baixos números de coordenação e elevados índices de vazios apresentam uma rede de contatos pouco redundante, na qual a transmissão das tensões ocorre por um número reduzido de cadeias de força. Nessas condições, perturbações locais, como a ruptura ou perda de contatos entre partículas, tendem a desencadear rearranjos progressivos da microestrutura, favorecendo o desenvolvimento do colapso. Em contrapartida, o aumento do número de coordenação amplia a redundância da rede de contatos, oferecendo múltiplos caminhos para a redistribuição das forças internas e aumentando a robustez mecânica do esqueleto granular. Embora essa analogia não implique equivalência direta com os conceitos formais de isostaticidade e hiperestaticidade da mecânica estrutural, ela fornece uma interpretação física consistente para compreender como a conectividade microestrutural influencia a estabilidade do material frente ao colapso induzido por umedecimento ou carregamento.

Outro aspecto relevante refere-se ao papel do desvio padrão da distribuição de contatos. Conforme discutido anteriormente, esse parâmetro representa a heterogeneidade estrutural do empacotamento. Assim, a estabilidade do solo não depende exclusivamente do número médio de contatos, mas também da forma como esses contatos estão distribuídos entre as partículas. Estruturas com elevada dispersão podem apresentar simultaneamente regiões altamente conectadas e regiões estruturalmente frágeis, influenciando a resposta do material ao molhamento.

Dessa forma, o modelo desenvolvido neste trabalho estabelece uma relação entre parâmetros geotécnicos convencionais, como o peso específico aparente seco e o índice de vazios, e parâmetros micromecânicos associados à conectividade da rede de contatos entre as partículas. Essa interpretação fundamenta-se nos conceitos de número de coordenação e estabilidade estrutural discutidos por Oda (1977) e Isola (2008), bem como na relação entre índice de vazios e número de coordenação utilizada por Ueda et al. (2011). Essa abordagem permite interpretar o colapso sob uma perspectiva micromecânica, relacionando a deformação

volumétrica observada experimentalmente às alterações estimadas na organização e na conectividade da estrutura granular.

Em síntese, o colapso pode ser entendido como um processo de reorganização estrutural desencadeado pela perda das forças que mantêm o equilíbrio metaestável do solo. A redução da sucção matricial e/ou cimentações permite o rearranjo das partículas, promovendo aumento da coordenação média, redução dos vazios e diminuição da fração de partículas instáveis. A deformação volumétrica medida nos ensaios de laboratório constitui, portanto, a manifestação macroscópica dessa evolução micromecânica da estrutura granular.

A integração dos conceitos de Oda (1977), Isola (2008) e Ueda *et al.* (2011) permitiu relacionar parâmetros geotécnicos convencionais a indicadores micromecânicos capazes de representar a suscetibilidade ao colapso.

O modelo proposto mostrou-se capaz de reproduzir tendências observadas experimentalmente, indicando que o índice de vazios, o teor de partículas grossas e a distribuição dos contatos constituem parâmetros relevantes para avaliação preliminar do potencial de colapso.

4.9.IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO PROPOSTO

Com o objetivo de facilitar a aplicação prática da metodologia desenvolvida, foi elaborada uma planilha eletrônica automatizada em ambiente Microsoft Excel®. A ferramenta incorpora todas as equações propostas neste trabalho, permitindo a estimativa preliminar do potencial de colapso a partir de parâmetros geotécnicos de fácil obtenção, como peso específico aparente seco, índice de vazios e teor de partículas grossas.

A planilha executa automaticamente o cálculo do número médio de coordenação, do desvio padrão da Curva de Distribuição de Probabilidade de Contatos (CDPC), da fração de partículas instáveis e da deformação volumétrica estimada após o colapso. Dessa forma, o usuário pode realizar análises preliminares sem a necessidade de processamento matemático manual.

Os resultados obtidos com a ferramenta apresentaram boa concordância com os valores experimentais observados nos ensaios realizados, demonstrando a viabilidade da metodologia para aplicações de triagem geotécnica. O arquivo eletrônico desenvolvido pode ser acessado por meio do endereço disponibilizado no QR Code apresentado na Figura 18.

Figura 19 - QR code para download da planilha automatizada.



Fonte: Autor, 2026.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um modelo simplificado para a estimativa preliminar do potencial de colapso de solos não saturados, utilizando como variáveis de entrada o teor de partículas grossas e a massa específica aparente seca. A partir dos resultados obtidos, considera-se que o objetivo geral foi alcançado, uma vez que foi possível estabelecer uma formulação capaz de relacionar parâmetros geotécnicos convencionais a indicadores micromecânicos associados à estrutura granular.

Em relação à caracterização micromecânica, verificou-se que o índice de vazios apresenta relação inversa com o número médio de coordenação, de modo que maiores valores de índice de vazios estão associados a menores valores de coordenação e a maiores frações estimadas de partículas potencialmente instáveis. Também foi estabelecida uma relação empírica entre o índice de vazios inicial e o desvio padrão da distribuição dos números de coordenação, permitindo incorporar ao modelo uma medida associada à dispersão e à heterogeneidade estrutural.

Quanto à influência da composição granulométrica, o teor de partículas grossas foi incorporado ao modelo por meio de uma função corretiva. Para o conjunto de dados utilizado no desenvolvimento da formulação, essa função apresentou maior influência em torno de 70% de partículas grossas. Esse valor deve ser interpretado como característica do ajuste realizado nesta pesquisa, e não como limite granulométrico universal para solos colapsíveis.

A formulação permitiu ainda estimar a condição estrutural associada ao pós-colapso por meio da alteração do número médio de coordenação e da fração de partículas potencialmente instáveis. Dessa forma, o procedimento proposto possibilitou representar o colapso, no âmbito das hipóteses adotadas, como uma reorganização da estrutura granular acompanhada pela redução do índice de vazios e por alterações na conectividade estimada entre as partículas.

A avaliação interna realizada com as 29 amostras empregadas no desenvolvimento das equações indicou aderência entre os valores calculados e os dados utilizados no ajuste, embora essa análise não constitua validação independente do modelo. Na verificação experimental preliminar realizada com cinco corpos de prova, o potencial de colapso experimental variou entre 1,19% e 3,01%, com média de 1,98%, enquanto o modelo apresentou valor médio estimado de aproximadamente 2,37%. A proximidade entre as médias indica desempenho promissor para a condição analisada; entretanto, o número reduzido de corpos de prova não permite estabelecer representatividade estatística nem capacidade de generalização.

Como resultado adicional, foi desenvolvida uma planilha eletrônica para aplicação automatizada do procedimento, permitindo utilizar os parâmetros de entrada e executar as etapas de cálculo do modelo de forma simplificada. A ferramenta pode ser empregada como apoio em análises preliminares e na triagem de situações que justifiquem investigações laboratoriais específicas.

Conclui-se, portanto, que o modelo desenvolvido apresenta potencial para utilização como ferramenta preliminar de triagem do comportamento colapsável, mas não substitui os ensaios edométricos ou outros procedimentos específicos de investigação geotécnica. Entre as principais limitações do estudo destacam-se o conjunto restrito utilizado na verificação experimental, a adoção de hipóteses simplificadoras para representar a estrutura granular, a ausência de consideração explícita da tensão de inundação nas correlações propostas e a necessidade de ampliar a diversidade de solos avaliados. Como continuidade da pesquisa, recomenda-se expandir a base experimental, incluir diferentes composições granulométricas, estados de compactação e níveis de tensão, além de realizar verificações independentes com solos distintos daqueles empregados no desenvolvimento do modelo.

REFERÊNCIAS

- AL-RAWAS, Amer Ali. State-of-the-art-review of collapsible soils. Sultan Qaboos University Journal for Science, v. 5, n. 2, p. 115-135, 2000.
- ASTE, T. Variations around disordered close packing. Journal Of Physics: Condensed Matter, [S.L.], v. 17, n. 24, p. 2361-2390, 3 jun. 2005. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/17/24/001>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16853 (2020): Solo — Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 2020
- BENATTI, Julio César Beltrame. Colapsibilidade com sucção controlada de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP. **Faculdade de Engenharia Civil–UNICAMP**, 2010.
- CINTRA, José Carlos Ângelo. Fundações em Solos Colapsíveis. 1ed. São Carlos: EESC USP, 1998. 106. p.
- CINTRA, José Carlos Angelo; AOKI, Nelson. Projeto de fundações em solos colapsíveis. 2009.
- CLEMENCE, Samuel P.; FINBARR, Albert O. Considerações de projeto para solos colapsíveis. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 107, n. 3, p. 305-317, 1981.
- COOP, M. R.; ATKINSON, J. H. The mechanics of cemented carbonate sands. Géotechnique, Londres, v. 43, n. 1, p. 53–67, 1993.
- COOP, M. R.; COTECCHIA, F. Structure and subloading yield surface in structured soils. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v. 32, n. 5, p. 828–842, 1995.
- COOP, M. R.; WILLSON, S. M.; ATMANI, A.; GHAFOOR, K. Behaviour of transitional soils. Géotechnique, Londres, v. 55, n. 6, p. 445–456, 2005.
- DA SILVA CHAGAS, Gleiber; MOURA, Alfran Sampaio; DE ARAUJO CARNEIRO, Andressa. Utilização da compactação para redução do potencial de colapso/expansão de um solo silto argiloso de massapê da cidade de Icó–CE. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 1, 2017.
- DE JESUS GOMES, Ribamar. Estudo geotécnico de um solo superficial da cidade de Bragança Paulista–SP. 2006. Tese de Doutorado. [sn].
- FREITAS, Milena Cardoso de. Avaliação de técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ISOLA, Riccardo. PACKING OF GRANULAR MATERIALS. 2008. 350 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Nottingham, Nottingham, 2008.
- JENNINGS, J. E. The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting. In: Proc. 4th Int. Conf. on SMFE. 1957. p. 316-319.

JENNINGS, J. E. & KNIGHT, K. (1975). A Guide to Construction on or with Materials Exhibiting Additional Settlement Due to a Collapse of Grain Structure. Proceedings IV Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Durban, p. 99-105.

MENDONÇA, Marcos Barreto de. Comportamento de solos colapsíveis da região de Bom Jesus da Lapa-Bahia. 1990.

NUÑES, E. Suelos especiales: colapsibles, expansivos, preconsolidados por desecación. In: Spanish.] In Proc., Congreso Panamericano De Mecanica De Suelos E ingeniería De Fundaciones. 1975. p. 43-73.

ODA, Masanobu. Co-Ordination Number and its Relation to Shear Strength of Granular Material. Soils And Foundations, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 29-42, jun. 1977. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.3208/sandf1972.17.2_29.

PINTO, C. Souza. Curso Básico de Mecânica dos Solos, Ed. Oficina de Textos. 3ª edição. 2006.

ROCHA, Breno Padovezi et al. Identificação de solos colapsíveis por meio de Ensaio SCPT e SDMT. 2023.

ROCHA, Breno Padovezi; RODRIGUES, Roger Augusto; GIACHETI, Heraldo Luiz. Considerações sobre a Identificação de Solos Colapsíveis. 2024.

RODRIGUES, Roger Augusto. A influência do esgoto doméstico como fluido de saturação no colapso de um solo arenoso. 2003.

SOUZA NETO, J. B.; MARTINS P. A.; PEREZ, E. N. P.; SANTOS, M. V. F.. Avaliação da Colapsibilidade do Solo de um Trecho do Projeto de Integração do Rio São Francisco por meio de Ensaio de Laboratório e de Campo. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Porto de Galinhas-PE, Setembro de 2012.

THEVANAYAGAM, S. Intergrain contact density indices for granular mixes—I: Framework. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Londres, v. 27, n. 3, p. 297–318, 1998.

UEDA, T., MATSUSHIMA, T., YAMADA, Y.: Effect of grain size distribution on mechanical properties of lunar soil. Proceedings of the 12th International Conference Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, pp. 49–56. Honolulu HI (2010).

VARGAS, M.: Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1978.

VILAR, O.M. (1979). Estudo da Compressão Unidirecional do Sedimento Moderno (Solo Superficial) da Cidade de São Carlos. São Carlo, 105p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). EESC/USP.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Patos - Código INEP: 25281925
	Br 110, S/N, Alto da Tubiba, CEP 58700-000, Patos (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0006-80 - Telefone: None

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega do Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto:	Entrega do Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por:	Joao Cavalcante
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:
■ João Victor Fontes Cavalcante, DISCENTE (202026550055) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - PATOS, em 24/08/2026 11:19:04.

Este documento foi armazenado no SUAP em 24/08/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1962728
Código de Autenticação: abf331c79e

