

Capítulo 2

TERMINOLOGIA E SIMBOLOGIA

Analice Lima
Roger Augusto Rodrigues

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo visa listar as principais grandezas físicas com os respectivos símbolos e unidades normalmente utilizadas na Mecânica dos Solos Não Saturados. O sistema de unidades utilizado é o Sistema Internacional de Unidades (SI), que foi formalmente reconhecido pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) e aprovado na 11ª Reunião realizada em 1960, em Paris, França, adotando-se a abreviação SI. A partir dessa reunião, esse sistema tem sido adotado em muitos países, como Grã-Bretanha, Austrália, Nova Zelândia, Canadá e maioria dos países europeus (Fredlund *et al.*, 2012).

Atualmente, a divulgação do Sistema Internacional de Unidades (SI) está internacionalizada e seu uso é generalizado e obrigatório em muitos lugares, especialmente na área da Engenharia. Desse modo, as Associações Internacionais de Geotecnia vêm persistindo na utilização desse sistema para que se tenha um padrão nos estudos ao redor do mundo, sendo necessário para mais aproveitamento e mais facilidade na leitura dos trabalhos técnico-científicos, acadêmicos e para a orientação dos interessados.

O Brasil foi um dos primeiros países a adotar o sistema SI no ano de 1962, mas, devido à resistência dos usuários quanto à sua utilização, somente foi possível implementar definitivamente esse sistema no ano de 1982, por meio de uma medida obrigatória, pelo Decreto nº 81.621, de 3 de maio de 1978, adotando-se o Quadro Geral de Unidades de Medida, baseado nas Resoluções, Recomendações e Declarações das Conferências Gerais de Pesos e Medidas (Amábile, 2007).

Os símbolos usados neste livro tiveram como base a proposta apresentada no V Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, realizado em Paris em 1961, acrescida de outros símbolos frequentemente utilizados na Mecânica dos Solos Não Saturados.

Este capítulo está dividido em três partes: a primeira relaciona as grandezas definidas no quadro geral de Unidades de Medida; a segunda consta de uma simbologia utilizada na Mecânica dos Solos Não Saturados; e a terceira apresenta considerações da ordem geral sobre o tema, acrescido de uma parte sobre modelagem.

As tabelas a seguir descreverão as unidades de base que abrangem toda a magnitude da ciência e da engenharia, sendo unidades independentes da natureza do processo físico

considerado (Tabela 1). As complementares e derivadas, que são aquelas deduzidas direta ou indiretamente das unidades de base ou complementares, estão descritas nas Tabelas 2 e 3. As terminologias, simbologias e unidades referentes às propriedades físicas e químicas do solo (Tabelas 7 a 10), propriedades hidráulicas e mecânicas dos solos (Tabelas 11 e 12), tensões e deformações (Tabela 13), ensaios de laboratório e campo (Tabelas 14 e 15), aplicações geotécnicas a solos não saturados (Tabela 16) e modelagem (Tabela 17) estão descritas a seguir.

2. UNIDADES DE BASE, COMPLEMENTARES E DERIVADAS

O Sistema Internacional de unidades (SI), ratificado pela 11ª CGPM (1960) e atualizado até a 15ª CGPM (1975), está descrito nas tabelas seguintes.

É importante ressaltar que as unidades do SI são, geralmente, representadas por letras minúsculas, mas, quando a unidade for um nome próprio, sua representação começa por uma letra maiúscula.

2.1 Unidades de base

As unidades SI de base constituem um conjunto de sete unidades bem definidas que, por convenção, são consideradas dimensões independentes. Elas servem de apoio ao desenvolvimento de todo o sistema e satisfazem não somente a ciência e a tecnologia, como também as necessidades diárias da população em geral.

A temperatura pode ser também expressa em graus Celsius (°C), sendo igual à temperatura em Kelvin menos 273,15. A massa pode ser expressa em toneladas (t), bem como o tempo em minutos (min), horas (h) ou dias (d).

Tabela 1 – Unidades de base

Grandeza	Unidade	SI Símbolo	Definição
comprimento	metro	m	Comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299\,792\,458$ de um segundo.
corrente elétrica	ampère	a	Corrente elétrica invariável que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível e situados no vácuo a 1m de distância um do outro, produz, entre esses condutores, uma força igual a 2×10^{-7} newton, por metro de comprimento desses condutores.
intensidade luminosa	candela	cd	Intensidade luminosa, em uma determinada direção, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} hertz e cuja intensidade radiante nessa direção de $1/683$ watt por esterradiano.

Grandeza	Unidade	SI Símbolo	Definição
massa	quilograma	kg	Massa do protótipo internacional do quilograma.
quantidade de matéria	mol	mol	Quantidade de matéria de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos são os átomos contidos em 0,012 quilograma de carbono 12.
temperatura dinâmica	kelvin	k	Fração $1/273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto tríplice da água.
tempo	segundo	s	Duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.

2.2 Unidades complementares

As unidades complementares contêm apenas duas unidades, como é mostrado na Tabela 2, e medem ângulo plano e ângulo sólido. Essas unidades não foram claramente definidas na 11ª CGPM porque o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), em 1980, considerando que o ângulo plano e o ângulo sólido são, geralmente, utilizados como relação entre duas distâncias e entre uma superfície e o quadrado da distância, respectivamente, especificou que as duas magnitudes podem ser consideradas quantidades derivadas adimensionais, podendo ser usadas ou omitidas nas expressões de unidades derivadas (Amábile, 2007).

Os ângulos planos podem ser também expressos em graus ($^{\circ}$), minutos ($'$) e segundos ($''$).

Tabela 2 – Unidades complementares

Grandeza	Unidade	SI Símbolo	Definição
ângulo plano	radiano	rad	Ângulo central que subtende um arco de círculo de comprimento igual ao do respectivo raio.
ângulo sólido	esterradiano	sr	Ângulo sólido que, tendo vértice no centro de uma esfera, subtende na superfície dela uma área igual ao quadrado do raio da esfera.

2.3 Unidades derivadas

As unidades derivadas são deduzidas diretamente ou indiretamente das unidades de base e complementares. Essas unidades estão definidas como expressões algébricas em forma de produtos de potência de unidades de base ou complementares, com um fator numérico igual a um (exemplos: metro quadrado; quilograma por metro quadrado; newton). Os símbolos das unidades derivadas são obtidos por meio dos modelos matemáticos de

multiplicação, divisão e exponenciação. Os nomes e símbolos de algumas das unidades assim formados podem ser substituídos por nomes e símbolos especiais, que podem ser próprios ou usados para formar expressões e símbolos de outras unidades derivadas. As grandezas mais utilizadas estão descritas na Tabela 3.

O volume, quando referente a fluidos, também pode ser expresso em litros (l).

Tabela 3 – Unidades derivadas

Grandeza	Unidade	SI Símbolo	Definição
aceleração	metro/ segundo quadrado	m/s^2	Aceleração de um corpo sólido em movimento retilíneo uniformemente variado, cuja velocidade varia de 1 metro por segundo em 1 segundo.
área	Metro quadrado	m^2	Área de um quadrado cujo lado tem 1 metro de comprimento.
força	Newton	N	Força que comunica à massa de 1 quilograma a aceleração de 1 metro por segundo, por segundo.
frequência	Hertz	Hz	Frequência de um fenômeno periódico cujo período é de 1 segundo.
massa específica	quilograma/ metro cúbico	kg/m^3	Massa específica de um corpo homogêneo, em que um volume igual a 1 metro cúbico contém massa igual a 1 quilograma.
momento de uma força ou torque	Newton-metro	N.m	Momento de uma força de 1 newton em relação a um ponto distante 1 metro de sua linha de ação.
peso específico	Newton/ metro cúbico	N/m^3	Considerado a razão existente entre a intensidade do seu peso e o volume ocupado.
potência	Watt	W	Potência desenvolvida quando se realiza, de maneira contínua e uniforme, o trabalho de 1 joule em 1 segundo.
pressão	Pascal	Pa	Pressão exercida por uma força de 1 newton, uniformemente distribuída sobre uma superfície plana de 1 metro quadrado de área, perpendicular à direção da força.
tensão	Pascal	Pa	Estado de um corpo submetido à ação de forças opostas que o atraem.
tensão superficial	Newton/ metro	N/m	Efeito físico que ocorre na interface entre a água e o ar. Faz com que a camada superficial de um líquido venha a se comportar como uma membrana elástica.
trabalho	Joule	J	Trabalho realizado por uma força constante de 1 newton, que desloca seu ponto de aplicação de 1 metro na sua direção.

Grandeza	Unidade	SI Símbolo	Definição
vazão	metro cúbico/ segundo	m ³ /s	Vazão de um fluido que, em regime permanente através de uma superfície determinada, escoo o volume de 1 metro cúbico de fluido em 1 segundo.
velocidade	metro/ segundo	m/s	Velocidade de um corpo sólido que, em movimento uniforme, percorre a distância de 1 metro em 1 segundo.
velocidade angular	radiano/ segundo	rad/s	Velocidade angular de um corpo sólido que, em movimento de rotação uniforme, descreve 1 radiano em 1 segundo.
viscosidade	Pascal- segundo	Pa.s	Viscosidade dinâmica de um fluido que se escoo de forma tal que sua velocidade varia de 1 metro por segundo, por metro de afastamento na direção perpendicular ao plano de deslizamento, quando a tensão tangencial ao longo desse plano é constante e igual a 1 pascal.
voltagem	Volts	V	Tensão elétrica entre os terminais de um elemento passivo de circuito que dissipa a potência de 1 watt quando percorrido por uma corrente invariável de 1 ampère.
volume	metro cúbico	m ³	Volume igual a 1000 litros.

2.4 Múltiplos e submúltiplos

Algumas grandezas podem alcançar valores que não são apropriados. Para evitar esse problema, o SI optou por um conjunto de prefixos que permitem criar múltiplos e submúltiplos decimais das unidades de base, complementares e derivadas, conforme descrito na Tabela 4. Verifica-se que os prefixos maiores que quilo são representados por letras maiúsculas e, quando possível, deve-se dar preferência aos prefixos múltiplos de 1000.

Tabela 4 – Prefixos SI

Prefixo	SI Símbolo	Fator Multiplicador
zeta	Z	10 ²¹
exa	E	10 ¹⁸
peta	P	10 ¹⁵
tera	T	10 ¹²
giga	G	10 ⁹
mega	M	10 ⁶
quilo	k	10 ³

Prefixo	SI Símbolo	Fator Multiplicador
hecto	h	10^2
deca	da	10^1
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}
zepto	z	10^{-21}

3. TERMINOLOGIA, SIMBOLOGIA E UNIDADES EM GEOTECNIA PARA SOLOS NÃO SATURADOS

A seguir, serão listadas as principais grandezas utilizadas na Mecânica dos Solos Não Saturados, com os respectivos símbolos e as unidades normalmente utilizadas (SI). Algumas grandezas podem ser representadas por mais de um símbolo, nesse caso, aquele que aparece primeiro é o mais adequado.

3.1 Sinais

Tabela 5 – Sinal utilizado nos símbolos

Sinal	Grandeza	Aplicação
'	apóstrofe	Aplica-se a uma tensão efetiva ou a parâmetros referidos a tensões efetivas.
-	barra	Sobre um símbolo, refere-se a um valor médio.
.	ponto	Sobre um símbolo, indica derivada em relação ao tempo.
δ , Δ	delta	Antes de um símbolo, indicam variação ou incremento.

3.2 Geral

Tabela 6 – Unidades gerais

Grandeza	SI Símbolo	Unidade
Aceleração	a	m/s^2
Aceleração da gravidade	g	m/s^2
Altura	H, h	m

Grandeza	SI Símbolo	Unidade
Área	A	m ²
Comprimento	L, l	m
Diâmetro	d, D, ϕ	m
Energia	E	J
Espessura	H, h, d	m
Fator de segurança	F	l
Força	F	kN
Largura	B, b	m
Massa	m	kg
Massa específica	ρ	kg/m ³
Momento	M	kN.m
Peso	W	kN
Peso específico	γ	kN/m ³
Potência	P	W
Pressão	p, P	kPa
Profundidade	D, z	m
Quantidade de calor	Q	J
Raio	r, a	m
Taxa de transferência de calor	q	W
Temperatura	T	K, °C
Tempo	t	s, min, h, d
Tensão	σ	kPa
Torque	T	kN.m
Trabalho	W	J
Velocidade	v	m/s
Volume	V	m ³
Volume de fluidos	v	l

3.3 Propriedades físicas do solo

As propriedades físicas dos solos não saturados são constituídas por: estrutura do solo, textura do solo, porosidade, cor e consistência. Desse modo, a física de solos estuda e define, qualitativa e quantitativamente, as propriedades físicas, bem como sua medição, predição e controle, com o objetivo principal de entender os mecanismos que governam a funcionalidade dos solos. A importância prática de se entender o comportamento físico do solo está associada ao seu uso e manejo apropriado.

3.3.1 Índices físicos

Tabela 7 – Índices físicos do solo

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Densidade relativa (dos sólidos)	D_R	-	Razão entre a massa das partículas sólidas e seu volume.
Grau de saturação	S, S_r	%	Razão entre o volume de água intersticial e o volume de vazios.
Índice de densidade (relativa)	I_D	1, %	Definida por: $(e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$
Índice de vazios	e	-	Razão entre o volume de vazios e o volume de partículas sólidas.
Índice de vazios crítico	e_c	-	Índice de vazios para o qual não há variação de volume total.
Índice de vazios inicial	e_o	-	Índice de vazios no estado natural do solo.
Massa específica	ρ	kg/m^3	Razão entre a massa total e o volume total do solo.
Massa específica aparente seca	ρ_d	kg/m^3	Razão entre a massa das partículas sólidas e o volume total do solo.
Massa específica saturada	ρ_{sat}	kg/m^3	Razão entre a massa total e o volume total do solo completamente saturado.
Massa específica submersa	ρ'	kg/m^3	Diferença entre a massa específica saturada e a massa específica da água
Massa específica dos sólidos	ρ_s	kg/m^3	Razão entre a massa das partículas sólidas e o volume de sólidos.
Massa específica da água	ρ_w	kg/m^3	Razão entre a massa da água e o volume de água.
Massa específica do ar	ρ_a	kg/m^3	Razão entre a massa de ar e o volume de ar.
Porosidade	n	%	Razão entre o volume de vazios e o volume total do solo.
Peso específico	γ	kN/m^3	Razão entre o peso total e o volume total do solo.
Peso específico aparente seco	γ_d	kN/m^3	Razão entre o peso das partículas sólidas e o volume total do solo.
Peso específico solo saturado	γ_{sat}	kN/m^3	Razão entre o peso total e o volume total do solo completamente saturado.
Peso específico submerso	γ'	kN/m^3	Diferença entre o peso específico saturado e o peso específico da água
Peso específico dos sólidos	γ_s	kN/m^3	Razão entre o peso das partículas sólidas e o volume de sólidos.

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Peso específico da água	γ_w	kN/m ³	Razão entre o peso da água e o volume de água.
Peso específico do ar	γ_a	kN/m ³	Razão entre o peso de ar e o volume de ar.
Teor de umidade	w	%	Razão entre o peso da água intersticial e o peso das partículas sólidas.
Teor de umidade volumétrico	θ	%	Razão entre o volume de água intersticial e o volume total do solo.

Os índices físicos denominados teor de umidade e índice de vazios são apresentadas na literatura em casos específicos, como: teor de umidade global, índice de vazios global, teor de umidade efetivo, índice de vazios efetivo, teor de umidade intra-agregado, teor de umidade interagregado, índice de vazios intra-agregado e índice de vazios interagregado.

O índice de vazios e o teor de umidade efetivos são usados para solos constituídos por argilominerais expansivos, pois tanto o peso da água de expansão do mineral não compõe a umidade efetiva do solo quanto o seu volume não integra o volume de vazios, visto que não contribuem efetivamente para as propriedades como plasticidade nem para o comportamento geotécnico.

Os termos intra-agregado e interagregado referem-se aos microporos e mesoporos, respectivamente.

3.3.2 Consistência e compactidade

Um solo argiloso pode se apresentar em um estado líquido, plástico, semissólido ou sólido, dependendo do seu teor de umidade. A esse estado físico do solo chama-se consistência. Por outro lado, os solos arenosos podem variar seu estado de fofo a compacto, e a esse estado físico chama-se compactidade.

O termo “densidade relativa” (D_R) foi substituído por “índice de densidade” (I_D), e densidade relativa passa a definir gravidade específica.

Tabela 8 – Grandezas, símbolos e unidades de consistência e compactidade dos solos

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Índice de consistência	I_C	-	Definido por: $(w_L - w) / I_P$
Índice de densidade (relativa)	I_D	-, %	Definida por: $(e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$
Índice de liquidez	I_L	-	Definido por: $(w - w_P) / I_P$
Índice de plasticidade	I_P	%	Diferença entre os limites líquido e plástico.
Índice de vazios máximo	$e_{\max}$	-	Índice de vazios de um solo no estado menos compacto (estado fofo).

Índice de vazios mínimo	$e_{\min}$	-	Índice de vazios de um solo no estado mais compacto (estado compacto).
Limite de contração	w_s	%	Umidade máxima de um solo, em que uma redução da umidade não causa diminuição do volume do solo.
Limite de liquidez	w_L	%	Umidade de um solo remoldado no limite entre os estados líquido e plástico.
Limite de plasticidade	w_P	%	Umidade de um solo remoldado no limite entre os estados plástico e semissólido.

3.3.3 Granulometria

Os solos recebem designações segundo as dimensões das partículas compreendidas entre determinados limites convencionais, conforme classificações adotadas. Assim, a medição do diâmetro das diferentes partículas que compõe o solo é chamada de granulometria. Esses diâmetros podem variar desde intervalos de micra até centímetros.

Tabela 9 – Grandezas, símbolos e unidades de granulometria

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Coefficiente de curvatura	C_C	-	Definido por: $D_{30}^2/(D_{60} \times D_{10})$
Coefficiente de não-uniformidade	C_U	-	Definido por: D_{60}/D_{10}
Diâmetro de n % passando	d_n, D_n	mm	Tamanho correspondente a uma peneira de n% na curva granulométrica.
Diâmetro dos grãos	d, D	mm	Tamanho do grão (partícula) determinado na análise granulométrica por peneiras e sedimentação.
Diâmetro efetivo	D_e, D_{10}	mm	Diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 10%.

3.4 Propriedades químicas e mineralógicas do solo

As propriedades químicas e mineralógicas dos solos são abrangentes. Neste item, são apresentados o nome e a fórmula química de alguns dos principais minerais, argilo-minerais, óxidos e hidróxidos constituintes dos solos.

Tabela 10 – Nome e fórmula química de minerais primários, argilominerais, óxidos e hidróxidos

Nome	Fórmula Química
Brucita	$(\text{Mg}, \text{Al})_6(\text{OH})_{12}$
Calcita	CaCO_3
Caulinita	$\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Clorita	$(\text{Si}, \text{Al})_8(\text{Mg}, \text{Fe})_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
Dolomita	$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$
Esmectita	$\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4.n\text{H}_2\text{O}$
Feldspatos	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}) (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_8$
Ferrihidrita	$(\text{Fe})_{4-5}(\text{OH}, \text{O})_{12}$
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Hematita	Fe_2O_3
Ilita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$
Magnetita	Fe_3O_4
Mica (Biotita)	$\text{K}_2\text{Al}_2\text{O}_5[\text{SiO}_5]_3(\text{Mg}, \text{Fe})_6(\text{OH})_4$
Mica (Muscovita)	$\text{K}_2\text{Al}_2\text{O}_5[\text{SiO}_5]_3\text{Al}_4(\text{OH})_4$
Montmorilonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$
Paligorsquita	$\text{Mg}_5\text{Si}_8 \text{O}_{20}(\text{OH})_2(\text{OH}_2)_4.4\text{H}_2\text{O}$
Quartzo	SiO_2
Sepiolita	$\text{Mg}_8\text{Si}_{12}\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{OH}_2)_4.8\text{H}_2\text{O}$
Vermiculita	$\text{Mg}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})_6(\text{SiAl})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4.n(\text{H}_2\text{O})$

3.5 Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas são referentes às diferentes características que o solo apresenta ao ser percolado por um fluido ou simplesmente pela água constituinte da sua fase líquida. Recomenda-se empregar o termo condutividade hidráulica ao coeficiente de permeabilidade.

Tabela 11 – Grandezas, símbolos e unidades das propriedades hidráulicas do solo

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Carga altimétrica	z	m	Diferença de cota entre o ponto considerado e qualquer cota definida como referência.
Carga hidráulica	h	m	Soma da carga altimétrica, da carga piezométrica (u/γ_w) e da carga cinética. Como as velocidades são baixas, despreza-se a carga cinética.
Carga piezométrica	h_p	m	Pressão neutra no ponto, expressa em altura de coluna d'água. Definido por: u/γ_w
Coefficiente de permeabilidade	k	m/s	Razão entre a velocidade de descarga e o gradiente hidráulico correspondente (v/i).
Coefficiente de permeabilidade a 20°C	k_{20}	m/s	Razão entre a velocidade de descarga e o gradiente hidráulico correspondente à temperatura de 20°C.
Coefficiente de permeabilidade horizontal	k_h	m/s	Coefficiente de permeabilidade medido horizontalmente à estratificação do solo (sentido do fluxo paralelo à estratificação).
Coefficiente de permeabilidade vertical	k_v	m/s	Coefficiente de permeabilidade medido verticalmente à estratificação do solo (sentido do fluxo perpendicular à estratificação).
Força de percolação (por volume)	j	kN/m ³	Força devida ao fluxo com o qual a água que infiltra atua sobre as partículas sólidas contidas em uma unidade volumétrica do solo ($j = i \cdot \gamma_w$).
Gradiente hidráulico	i	-	Perda de carga hidráulica por unidade de comprimento na direção do fluxo.
Gradiente hidráulico crítico	i_c	-	Gradiente hidráulico em que a tensão efetiva pode ser nula.
Número de canais de fluxo	n_f	-	Número de linhas de fluxo.
Número de equipotenciais	n_q	-	Número de equipotenciais.
Vazão	Q, q	m ³ /s, l/s	Volume de água que percola através de uma seção do solo dada por unidade de tempo.
Velocidade de descarga	v	m/s	Razão entre a vazão e a área da seção do fluxo.
Velocidade de percolação	v_p	m/s	Velocidade com que a água escoar nos vazios do solo, considerando a área efetiva de escoamento.

3.6 Resistência ao cisalhamento

Tabela 12 – Grandezas, símbolos e unidades das propriedades de resistência ao cisalhamento

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Ângulo de atrito	ϕ	°	Ângulo formado com o eixo das tensões normais pela tangente ao círculo de Mohr. Parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo em relação à tensão total, definido pela equação: $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$
Ângulo de atrito efetivo	ϕ'	°	Ângulo formado com o eixo das tensões normais pela tangente ao círculo de Mohr. Parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo em relação à tensão efetiva, definido pela equação: $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$
Ângulo de atrito residual	ϕ'_R	°	
Coesão	c	kPa	Parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo em relação à tensão total, definido pela equação: $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$
Coesão efetiva	c'	kPa	Parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo em relação a tensões efetivas, definido pela equação: $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$
Coesão remoldada	c_r	kPa	
Coesão residual	c'_R	kPa	
Resistência ao cisalhamento de pico	τ_f	kPa	Tensão cisalhante máxima na ruptura, no plano de ruptura em um determinado ponto.
Resistência ao cisalhamento remoldada	τ_r	kPa	Tensão cisalhante de solos remoldados.
Resistência ao cisalhamento residual	τ_R	kPa	Tensão cisalhante a grandes deslocamentos. Resistência ao cisalhamento que o solo mantém para grandes deslocamentos.
Resistência à compressão simples	σ_c	kPa	Tensão cisalhante máxima na ruptura durante o ensaio de compressão simples ($\sigma_3 = 0$).
Resistência à tração	σ_t	kPa	Tensão cisalhante máxima na ruptura do ensaio de compressão diametral (ensaio brasileiro).

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Resistência não drenada	S_u	kPa	Resistência ao cisalhamento para solos de baixa permeabilidade, em que ocorre pouca dissipação durante a aplicação da carga.
Sensibilidade	S_t	-	Razão entre as resistências ao cisalhamento de um solo indeformado e um solo amolgado.

3.7 Tensões e deformações

Tabela 13 – Grandezas, símbolos e unidades de tensões e deformações

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Coefficiente de atrito	μ	-	Relação entre a força cisalhante e força normal no ponto de contato entre dois corpos sólidos.
Coefficiente de Poisson	ν	-	Relação entre as deformações radiais e deformações axiais.
Coefficiente de viscosidade	η	kPa.s	Tensão cisalhante necessária para manter certa diferença de velocidade de fluxo entre dois planos paralelos em um fluido.
Componentes do deslocamento	u, v, w	m	
Deformação axial	ϵ_a	%	Variação volumétrica por unidade de volume na direção longitudinal.
Deformação cisalhante	γ	%	Variação angular entre dois planos originalmente perpendiculares entre si.
Deformações em coord. retangulares	$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	%	
Deformações em coord. polares	$\epsilon_r, \epsilon_\theta$	%	
Deformação linear	ϵ	%	Variação volumétrica por unidade de volume em uma determinada direção.
Deformações principais	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	%	Deformações correspondentes a cada uma das três direções ortogonais para as quais a distorção angular é nula.
Deformação volumétrica	ϵ_v	%	Variação volumétrica por unidade de volume na direção longitudinal.
Módulo de compressibilidade volumétrica	K	kPa	Relação entre a variação da tensão isotrópica e a variação volumétrica correspondente.

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Módulo de elasticidade	E	kPa	Relação entre a variação da tensão normal e a variação das deformações em uma mesma direção.
Módulo de elasticidade transversal	G	kPa	Relação entre a variação da tensão cisalhante e a variação das deformações cisalhantes.
Poropressão	u	kPa	Pressão de água, superior à pressão atmosférica, existente nos vazios de um solo saturado.
Poropressão da água	u_w	kPa	Pressão de água existente nos vazios de um solo não saturado.
Poropressão do ar	u_a	kPa	Pressão de ar existente nos vazios de um solo não saturado.
Pressão	P	kPa	Relação entre uma determinada força por unidade de área.
Pressão externa	p_o	kPa	
Pressão interna	p_i	kPa	
Sucção matricial	$s, (u_a - u_w)$	kPa	Parcela de sucção referente à pressão isotrópica negativa da água intersticial do solo devida às forças de capilaridade e de adsorção e que depende da matriz do solo.
Sucção osmótica	π	kPa	Parcela de sucção relacionada à diferença de concentração química de solutos da água no solo.
Sucção total	ψ	kPa	Representa a soma de duas parcelas de sucção, a sucção matricial e a sucção osmótica.
Tensão axial	σ_a	kPa	Tensão normal atuante na direção longitudinal.
Tensão cisalhante	τ	kPa	Tensão que atua tangencialmente a um determinado um plano.
Tensão cisalhante octaédrica	τ_{oct}	kPa	Tensão que atua tangencialmente em um plano octaédrico.
Tensão confinante	σ_c	kPa	
Tensão normal efetiva	σ'	kPa	Tensão transferida por meio de contato intergranular, definida como $\sigma' = \sigma - u$, para solos saturados.
Tensões normais em coord. retangulares	$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	kPa	
Tensões normais em coord. polares	σ_r, σ_q	kPa	

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Tensão normal líquida	$\sigma - u_a$	kPa	Tensão que atua perpendicularmente em um determinado plano menos a pressão de ar existente nos vazios do solo.
Tensão normal octaédrica	σ_{oct}	kPa	Tensão que atua perpendicularmente em um plano octaédrico.
Tensão normal total	σ	kPa	Tensão, superior a pressão atmosférica, que atua perpendicularmente em um determinado plano.
Tensões principais	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	kPa	Tensões máximas que atuam sobre cada um dos três planos ortogonais onde as tensões cisalhantes são nulas.
Tensão superficial	σ_s	kN/m	Pressão resultante do efeito de forças intermoleculares na interface ar-água.

3.8 Ensaios de laboratório e campo

3.8.1 Ensaios de laboratório

Tabela 14 – Grandezas, símbolos e unidades de ensaios de laboratório mais usuais

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Ângulo de atrito	ϕ	°	Ângulo formado com o eixo das tensões normais pela tangente ao círculo de Mohr. Parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo em relação à tensão total, definido pela equação: $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$
Ângulo de atrito efetivo	ϕ'	°	Ângulo formado com o eixo das tensões normais pela tangente ao círculo de Mohr. Parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo em relação à tensão efetiva, definido pela equação: $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$
Ângulo da razão de coesão e sucção	ϕ^b	°	Ângulo que indica o acréscimo de resistência ao cisalhamento com o aumento da sucção.
Ângulo de atrito residual	ϕ'_R	°	
Carga altimétrica	z	m	Diferença de cota entre o ponto considerado e qualquer cota definida como referência.
Carga hidráulica	h	m	Soma da carga altimétrica, da carga piezométrica (u/γ_w) e da carga cinética. Como as velocidades são baixas, despreza-se a carga cinética.

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Carga piezométrica	h_p	m	Pressão neutra no ponto, expressa em altura de coluna d'água. Definido por: u/γ_w
Coefficiente de permeabilidade	k	m/s	Razão entre a velocidade de descarga e o gradiente hidráulico correspondente (v/i).
Coefficiente de permeabilidade à 20°	k_{20}	m/s	Razão entre a velocidade de descarga e o gradiente hidráulico correspondente à temperatura de 20°C.
Coefficiente de permeabilidade horizontal	k_h	m/s	Coefficiente de permeabilidade medido horizontalmente à estratificação do solo (sentido do fluxo paralelo à estratificação).
Coefficiente de permeabilidade na fase gasosa	k_a	m/s	Velocidade de descarga contínua que se desenvolve em meio à fase gasosa.
Coefficiente de permeabilidade na fase líquida	k_w	m/s	Velocidade de descarga contínua que se desenvolve em meio à fase líquida.
Coefficiente de permeabilidade não saturada	$k(s)$	m/s	Velocidade da descarga de água em meio poroso não saturado.
Coefficiente de permeabilidade saturada	k	m/s	Velocidade da descarga de água em meio poroso saturado.
Coefficiente de permeabilidade vertical	k_v	m/s	Coefficiente de permeabilidade medido verticalmente à estratificação do solo (sentido do fluxo perpendicular à estratificação).
Coesão	c	kPa	Parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo em relação à tensão total, definido pela equação: $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$
Coesão efetiva	c'	kPa	Parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo em relação a tensões efetivas, definido pela equação: $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$
Coesão remoldada	c_r	kPa	
Coesão residual	c_R'	kPa	
Constante universal dos gases	R	J/mol.K	
Densidade do ar	ρ_a	g/cm ³	
Gradiente hidráulico	i, i_w	-	Perda de carga hidráulica por unidade de comprimento na direção do fluxo.

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Gradiente hidráulico crítico	i_c	-	Gradiente hidráulico em que a tensão efetiva pode ser nula.
Índice de compressão do solo	C_c	-	Relação entre a variação do índice de vazios e a variação das tensões efetivas no trecho de compressão virgem de carregamento.
Índice de expansão	C_s	-	Relação entre a variação do índice de vazios e a variação das tensões efetivas no trecho de expansão ou descarregamento.
Índice de recompressão do solo	C_r	-	Relação entre a variação do índice de vazios e a variação das tensões efetivas no trecho de recompressão de carregamento.
Índice de resistência à carga puntiforme	I_s	-	
Resistência à compressão simples	σ_c	kPa	Tensão cisalhante máxima na ruptura durante o ensaio de compressão simples ($\sigma_3 = 0$).
Resistência à tração	σ_t	kPa	Tensão cisalhante máxima na ruptura do ensaio de compressão diametral (ensaio brasileiro).
Resistência ao cisalhamento de pico	τ_f	kPa	Tensão cisalhante máxima na ruptura, no plano de ruptura em um determinado ponto.
Resistência ao cisalhamento remoldada	τ_r	kPa	Tensão cisalhante de solos remoldados.
Resistência ao cisalhamento residual	τ_R	kPa	Tensão cisalhante a grandes deslocamentos. Resistência ao cisalhamento que o solo mantém para grandes deslocamentos.
Resistência não drenada	S_u	kPa	Resistência ao cisalhamento para solos de baixa permeabilidade, onde ocorre pouca dissipação durante a aplicação da carga.
Temperatura	T	°C	
Tensão de pré-adensamento	σ'_p	kPa	Tensão vertical efetiva máxima que está relacionada ao histórico de carregamento a que um solo foi submetido no passado.
Tensão normal líquida	$\sigma - u_a$	kPa	Tensão que atua perpendicularmente em um determinado plano menos a pressão de ar existente nos vazios do solo.
Tensão principal maior líquida	$\sigma_1 - u_a$	kPa	Tensão que atua sobre o plano principal maior, menos a pressão de ar existente nos vazios do solo.

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Tensão principal menor líquida	$\sigma_3 - u_a$	kPa	Tensão que atua sobre o plano principal menor, menos a pressão de ar existente nos vazios do solo.
Sucção matricial	$s, (u_a - u_w)$	kPa	Parcela de sucção referente à pressão isotrópica negativa da água intersticial do solo devido às forças de capilaridade e de adsorção e que depende da matriz do solo.
Sucção osmótica	π	kPa	Parcela de sucção relacionada à diferença de concentração química de solutos da água no solo.
Sucção total	ψ	kPa	Representa a soma de duas parcelas de sucção, a sucção matricial e a sucção osmótica.
Vazão	Q, q	m ³ /s, l/s	Volume de água que percola através de uma seção do solo dada por unidade de tempo.
Velocidade de descarga	v	m/s	Razão entre a vazão e a área da seção do fluxo.
Velocidade de percolação	v_p	m/s	Velocidade com que a água escoar nos vazios do solo, considerando a área efetiva de escoamento.
Umidade relativa	UR	%	Relação entre a pressão de vapor e a pressão de vapor de saturação do ar.

3.8.2 Ensaios de campo

Algumas grandezas, símbolos e unidades com descrições similares às apresentadas na Tabela 14 para os ensaios de laboratório, como as que se referem à sucção, são, muitas vezes, usadas em ensaios de campo.

Tabela 15 – Grandezas, símbolos e unidades de ensaios de campo

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Altura total de penetração do amostrador	h	cm	
Índice de área de um amostrador	C_a	%	
Índice de classificação do material	I_D	-	
Índice de tensão horizontal	K_D	-	
Módulo confinado determinado pelo ensaio DMT	M_{DMT}	kPa	

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Módulo dilatométrico	E_D	kPa	
Módulo pressiométrico	E_M	kPa	
Número de golpes para o cone dinâmico	N_{dc}	-	
Número de golpes para 0,2 m	N_d	-	
Número de golpes SPT	N	-	Índice determinado a partir da contagem do número de golpes necessários para cravação de um amostrador padrão no solo em ensaio SPT.
Número de meia-voltas para 0,2 m	N_{ht}	-	
Porcentagem de recuperação	R	%	
Poropressão hidrostática no equilíbrio	u_o	kPa	
Pressão limite do pressiômetro	P_l	kPa	
Profundidade do nível d'água	NA	m	
Razão de atrito	R_f	-	Atrito lateral dividido pela resistência de ponta, f_s/q_c , do CPT
Razão de atrito normalizada	F_r	-	
Relação de folga externa	C_o	%	
Relação de folga interna	C_i	%	
Resistência de ponta estática ou resistência de ponta	q_c	kPa	Parcela de resistência referente à tensão média que atua sobre a ponta cônica em ensaio de penetração estática do cone.
Resistência de ponta dinâmica	q_d	kPa	Parcela de resistência referente à tensão média que atua sobre a ponta cônica em ensaio de penetração dinâmica.
Resistência de ponta normalizada	Q_{tn}	-	
Resistência dinâmica	r_d	kPa	
Resistência lateral ou atrito lateral	f_s	kPa	
Resistência real mobilizada	q_t	kPa	
Tensão de atrito lateral	f_T	kPa	

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Torque	T	kgf.m	
Velocidade de propagação da onda cisalhante	V _s	m/s	

3.9 Aplicações Geotécnicas a Solos Não Saturados

Tabela 16 – Grandezas, símbolos e unidades de aplicações geotécnicas a solos não saturados

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Aderência solo-muro	a	kPa	
Altura de ascensão capilar	h _c	m	
Altura do talude	H	m	
Ângulo de atrito solo-muro	δ	°	
Ângulo de mergulho da descontinuidade	ψ	°	
Ângulo do talude com a horizontal	β	°	
Carga axial aplicada	Q	kN	
Coefficientes de correção de forma	S _c , S _q , S _g	-	
Coefficientes de correção de inclinação	i _c , i _q , i _g	-	
Coefficiente de empuxo ativo	K _a	-	
Coefficiente de empuxo em repouso	K _o	-	
Coefficiente de empuxo passivo	K _p	-	
Coefficiente de poropressão	B, r _u	-	
Comprimento da fundação	L	m	
Empuxo passivo	E _p	kN/m	
Excentricidade	e	m	
Fatores de capacidade de carga	N _c , N _q , N _g	-	
Fator de resistência residual	R	-	
Força de resistência de ponta	Q _p	kN	
Força lateral aplicada	H	kN	
Inclinação do terrapleno	i	°	
Largura da fundação	B	m	

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Módulo de reação	k_s	kN/m^3	
Pressão axial aplicada	q	kPa	
Pressão limite	q_l	kPa	
Profundidade da camada resistente	D	m	
Profundidade das fendas de tração	z	m	
Profundidade da fundação	D	m	
Profundidade do nível freático	z_w	m	
Recalque	s	m	
Relação entre tensões σ'_h e σ'_v	K	-	
Resistência ao cisalhamento mobilizada	τ	kPa	
Resistência lateral total	Q_s	kN	
Resistência lateral unitária	q_s	kPa	

3.10 Modelagem

A Tabela 17 lista as grandezas, unidades e símbolos mais utilizados nos modelos constitutivos empregados na Mecânica dos Solos Não Saturados.

Tabela 17 – Grandezas, unidades e símbolos utilizados nos modelos empregados na Mecânica dos Solos Não Saturados

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Volume específico para $p = p^c$	$N(s)$	-	
Volume específico para $p = p^c$ com o solo na condição saturada	$N(0)$	-	
Parâmetro de compressão elastoplástico do solo dependente da sucção	$\lambda(s)$	-	
Parâmetro de compressão elastoplástico do solo na condição saturada	$\lambda(0)$	-	
Parâmetro de compressão elástico do solo para variações de sucção	κ_s	-	

Grandeza	SI Símbolo	Unidade	Definição
Parâmetro de compressão elástico do solo para variações de tensões	κ	-	
Parâmetro de compressão plástico do solo para variações de sucção	λ_s	-	
Parâmetro de forma da curva de retenção de van Genuchten (1980)	α	kPa^{-1}	
Parâmetros de forma da curva de retenção de van Genuchten (1980)	m e n	-	
Parâmetro de máxima rigidez do solo para o modelo BBM	r	-	
Parâmetro que controla a lei de fluxo no modelo BBM	α	-	
Parâmetro que controla a taxa de aumento da rigidez do solo com a sucção	β	kPa^{-1}	
Projeção da linha de estados críticos	M	-	
Tensão cisalhante	$q, (\sigma_1 - \sigma_3)$	kPa	
Tensão cisalhante referente à trajetória K_o	q_{K_o}	kPa	
Tensão de cedência isotrópica do solo não saturado	p_o	kPa	
Tensão de cedência isotrópica do solo saturado	p_o^*	kPa	
Tensão de referência para $v = N(s)$	p^c	kPa	
Tensão média	p	kPa	
Tensão média referente à trajetória K_o	p_{K_o}	kPa	
Tensão que descreve o aumento da coesão do solo com a sucção	p_s	kPa	

REFERÊNCIAS

AMÁBILE, L.F. (2007). “Sistema internacional de unidades y Simbología de mecánica de suelos”. I Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Asunción - 2007. <http://www.ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/71ge-ia71.pdf>.

ASTM Des. E-380-70, Filadelfia, (Metric Practice Guide). A Guide to the Use of SI, the International System of Units.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. & FREDLUND, M. D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New Jersey, 926 p.

NCH179 (2008). Mecánica de Suelos. Símbolos, Unidades y Definiciones. NCh179. Of80. Santiago, Chile, 13 p.