

CAPÍTULO 8

Segurança das estruturas e fundações

A ponderação sobre segurança em obras de engenharia refere-se em grande parte à probabilidade de ocorrência de um acidente e de sua extensão quanto aos danos que ele pode causar. Esses dois fatores definem, conjuntamente, o grau de risco. Diante do risco de um colapso, por exemplo, deve-se ponderar sobre os fatores intervenientes ao próprio risco, os danos e consequências que causa. Avaliada a extensão do risco e sua probabilidade de ocorrência, entram em análise fatores que consideram a relação custo-benefício, pesando na decisão as possibilidades de eliminar, mitigar, minimizar ou aceitar (desconsiderar) os danos que poderão ser causados pelo risco. Deve-se considerar que para eliminar um risco de acidente, naturalmente eleva-se os custos construtivos da obra. Certamente, esse tipo de análise é realizado em ambiente controlado, geralmente sobre decisões aplicadas ao processo construtivo ou decisões administrativas, quando se pode isolar ou eliminar as possibilidades dos riscos associados, como prejuízos ambientais, danos a terceiros e acidentes pessoais com eventuais perdas de vidas humanas, o que é inadmissível. Essas são conjecturas inerentes às decisões.

8.1 FATORES DE SEGURANÇA

As normas, ao estabelecer orientações à segurança das obras, consideram que os riscos incidem diretamente sobre a obra em questão, mas, podem também tratar-se de riscos associados, como quando interferem em outras obras ou causam danos a terceiros, tomando-se como postura para o projeto o controle ou minimização da incidência do risco, por meio de um fator de segurança. Ao ser aplicado, modifica a probabilidade de ocorrência do risco de uma situação iminente para uma situação considerada aceitável, com a qual é possível conviver.

Como prática, para as obras usuais, sejam as rodoviárias, urbanas, ou que tenham qualquer relação com a engenharia civil, cujos custos de construção sejam condizentes com o uso corrente, impõe-se em projeto, fatores de segurança que reduzem os riscos geológicos ou geotécnicos a níveis de probabilidade aceitáveis, ao se considerar a avaliação da segurança da própria obra.

Há muitos estudos sobre o assunto, de difícil abordagem, tendo em vista todos os aspectos intervenientes com a questão, já que a variabilidade dos parâmetros envolvidos é grande, inclusive, alguns cercados de imponderações. Velloso e Lopes (2011), Cintra, Aoki e Albiero (2011), Albuquerque e Garcia (2020), Budhu (2013), efetuam análises voltadas à segurança das fundações; Lopes (2017), Gerscovich (2012) se referem à segurança das obras de terra, todos abordando o tema conceitualmente e em consonância com as normas brasileiras envolvidas. De forma geral, entram na avaliação do risco geológico/geotécnico:

- interpretação do problema e da natureza do risco;
- abrangência de ação do risco e de suas consequências;
- delimitação da área para investigações e planejamento geotécnico;
- reprodução do perfil topográfico e geológico;
- obtenção das características do solo;
- ação das águas intersticiais e superficiais;
- identificação das forças em ação, solicitantes e resistentes;
- elaboração do modelo de análise;
- método de análise empregado;
- interpretação dos resultados.

Todos esses fatores listados contribuem e intervêm, direta ou indiretamente, na interpretação do risco, seja em sua natureza, probabilidade de ocorrência ou abrangência. No entanto, não se trata de fatores determinísticos, mas sim interpretativos ou probabilísticos, estando cercados por incertezas, inclusive quanto à sua obtenção. Podem ocorrer questões, como: insuficiência e imprecisão dos dados levantados; má

avaliação das ações ou forças atuantes; elaboração incorreta do modelo físico e geométrico; métodos de análise determinísticos não condizentes com o problema. Para a prática das análises, são estabelecidos por normas coeficientes de segurança a serem utilizados na avaliação da segurança das obras ou da configuração geológica natural que constitui um terreno.

Os coeficientes de segurança são definidos e aplicados segundo dois métodos de análise: método de valores admissíveis, cujo procedimento de análise utiliza um coeficiente de segurança global, que relaciona diretamente os fatores intervenientes estabilizantes (resistências) com os instabilizantes (ações), na avaliação da estabilidade de uma obra; método dos valores de projeto, que avalia isoladamente os fatores estabilizantes e os instabilizantes, atribuindo coeficientes de segurança parciais como ponderação a cada variável independente a incidir na análise da estabilidade da obra. Como fatores instabilizantes, pode-se distinguir as ações permanentes a serem consideradas como invariáveis durante praticamente toda a vida da obra; as ações variáveis, normalmente acidentais, a incidirem de forma intermitente nas envoltórias de esforços; e as ações excepcionais, que devido à baixa probabilidade de incidência, são tratadas com ponderações. Como fatores estabilizantes, enquadram-se as propriedades do solo que conferem reação às solicitações, como a resistência ao cisalhamento dos solos, resistência por ruptura brusca, capacidade de carga das fundações, entre outras.

Na avaliação dos fatores instabilizantes, são consideradas as ações constituídas pelos carregamentos permanentes obtidos em função da construtibilidade da obra e de seus materiais de acabamento; as cargas acidentais e móveis que atuam segundo o uso da construção; os esforços oriundos de efeitos de deslocamentos ou contrações estruturais; de recalques diferenciais nas fundações; ou excepcionais, de rara ocorrência, como abalos sísmicos, efeitos de marés, entre outros. Os valores atribuídos a essas ações devem ser estritamente determinados a partir de curvas de frequência para que se enquadrem dentro de desvios padrão que levem seus valores a níveis probabilísticos que sejam aceitáveis, para que não comprometam as margens de segurança estabelecidas pelas normas brasileiras quando aplicadas às ações. A estas ações se atribui a denominação de ações características.

Para avaliação da segurança das obras que envolvem a engenharia geotécnica e das estruturas, várias normas brasileiras abordam o assunto, algumas o fazem de forma específica. Pode-se citar como mais diretamente aplicáveis ao conteúdo deste trabalho:

1. NBR 6122/2019: projeto de fundações, quanto às definições, nomenclaturas e funcionamento característico dos elementos de fundação e procedimentos a

considerar nas análises para avaliação dos níveis de segurança das fundações, tanto no estado limite último como no de serviço; no que concerne à estabilidade dos elementos de fundação à ação das cargas e às demais ações e efeitos que possam agir nesse sentido, para a avaliação das cargas admissíveis nas fundações. Estabelece os fatores de segurança a adotar;

2. NBR 6118/2014: projeto de estruturas de concreto, quanto às análises a considerar na avaliação da segurança das estruturas de concreto armado, com referência aos estados limites de serviço e último de trabalho, a serem considerados no projeto das estruturas em geral e os respectivos coeficientes de ponderação a serem admitidos às solicitações e às resistências características dos materiais que compõe as estruturas;
3. NBR 8681/2024: ações e segurança nas estruturas, quanto às nomenclaturas, definições, conceitos e classificações a serem assumidas na análise da segurança das estruturas, considerando os estados limites de desempenho último e de serviço, que devem apresentar, no tocante às finalidades e uso da obra;
4. NBR 11682/2009: estabilidade de encostas, quanto aos fatores de segurança globais ao adotar análises da estabilidade de obras de engenharia geotécnica, que envolvam a segurança de obras de contenção ou a acidentes geológicos de ordem natural, considerando níveis de segurança que se referem a danos materiais e ambientais e a vidas humanas que possam ocorrer.

Os fatores de segurança, no caso do trabalho conjunto entre o solo e as estruturas, para garantir a estabilidade da obra, deve-se atender a indicações específicas a cada disciplina em que se enquadram, adequando-se ao que for aplicável ou que cause alguma restrição ao projeto. Assim, no projeto de uma fundação, a capacidade de carga é avaliada atendendo às orientações da NBR 6122 (2019) e, quanto às estruturas da referida fundação, à NBR 6118 (2014). No entanto, há casos de projeto em que a distinção entre solo e estrutura não é facilmente separável, por exemplo, em determinadas estruturas de contenção em que a rigidez do elemento estrutural e do solo trabalham conjuntamente para garantir estabilidade a um escorregamento. Nesses casos, o projetista deve distinguir conceitualmente as funções de cada elemento participante, solo e estrutura, para aplicar os fatores de segurança, conjuntos ou isoladamente, a cada condição de análise.

8.1.1 Método dos valores admissíveis

O método dos valores admissíveis, tendo em vista as obras estruturais, solo-estrutura e as que envolvem unicamente os solos, tem sido normalmente aplicado às fundações e obras de terra, considerando na ponderação da segurança da obra, um coeficiente

ou fator de segurança global. Esse método é de uso frequente nas análises geotécnicas, em especial, quando aplicados à verificação da estabilidade de taludes ou de obras de contenção, como também, quando aplicado à segurança de fundações. Como procedimento para a aplicação do método, atribui-se ao elemento resistente estabilizante, responsável pela estabilidade da obra R_u , uma minoração de seu valor, aplicando-se um fator de segurança global FS, que estabelece um valor admissível para a contraposição do elemento instabilizante Q_K , cujo valor é denominado de característico.

$$Q_K \leq \frac{R_u}{FS} \quad (\text{ou}) \quad R_u \geq FS \cdot Q_K \quad (8.1.1.1)$$

Por exemplo, na análise da estabilidade de um talude, Q_K corresponde às tensões tangenciais à superfície crítica de ruptura, e R_u às tensões resistentes do solo ao cisalhamento. Poderiam-se aplicar coeficientes de segurança parciais, ponderando-se de forma independente cada fator interveniente na estabilidade do caso exemplificado, no entanto, isso traria às análises uma complexidade desnecessária, tendo em vista as poucas referências de confiabilidade na obtenção de cada parâmetro envolvido. No caso de uma fundação direta, Q_K poderia se referir à carga característica aplicada, e R_u à carga de ruptura.

Segundo a NBR 11682 (2009), quanto aos fatores de segurança a adotar, em se tratando de segurança contra acidentes geológicos naturais, os valores variam de FS = 1,2, para obras destinadas a uso em que há pouca incidência de riscos materiais e a vidas humanas, até FS = 1,5, em caso extremo oposto. Na prática, nos casos em que os riscos envolvidos acarretam custos pouco representativos relativamente ao contexto da obra como um todo, nos casos de correção geométrica de taludes, ou outras de menor porte e curriqueiras, adota-se como fator de segurança global FS = 1,5, indistintamente ao caso. Em se tratando de etapas construtivas dessas obras, ou quando sua vida útil é limitada a eventos temporais, é de prática reduzir esse valor para FS = 1,3. Nessas situações, têm-se como alternativa o controle sobre seu uso durante a exposição aos riscos considerados. Para análise de obras de contenção, indica-se a análise de tombamento, FS = 2,0; ao deslizamento, FS = 1,5; e quanto à capacidade de carga das fundações atender às orientações da NBR 6122.

Segundo a NBR 6122 (2019), os fatores de segurança globais a adotar, aplicados aos elementos de fundação, são FS = 3,0 para fundações superficiais, e de 2,0 para as profundas, quando avaliadas por método analítico ou semiempírico; ou 2,0 quando superficiais e 1,6 quando profundas, com a realização de provas de carga, havendo

ponderações para sua redução, ou mesmo considerações para os casos em que deva ser maior que os valores recomendados; para mais detalhes, consultar a própria norma.

8.1.2 Método de valores de projeto

De uso irrestrito em obras estruturais e servindo como orientação geral para o projeto, conforme as normas de estruturas, e de implementação mais recente em fundações, o método é usado com mais frequência em obras que envolve análises estruturais, recaindo especialmente sobre o dimensionamento das estruturas, ou em casos de interação solo-estrutura, quando o solo interferir na determinação dos esforços de dimensionamento estrutural. Na avaliação da capacidade de carga de elementos de fundação, os *fatores de segurança parciais ou de ponderação* têm sido aplicados isoladamente a casos que exigem ponderações não previstas pelos métodos usualmente utilizados, seja para a avaliação da capacidade de carga nas fundações, ou em outras aplicações que envolvem a obtenção analítica dimensional dos elementos de fundação.

Dentre os vários fatores interdependentes que levam à análise da segurança das obras estruturais e geotécnicas, quanto à sua estabilidade e dimensionamento dos elementos estruturais, e que são utilizados como ponderações no *método dos fatores de segurança parciais*, pode-se citar: ações e solicitações frequentes e excepcionais, deformações impostas, parâmetros e características físico-mecânicas dos materiais, parâmetros geotécnicos, entre outros. Para sua aplicação, exige-se referências estatísticas sobre a dispersão de resultados que envolvem o parâmetro a ser utilizado, por exemplo: a existência de compilação estatística sobre a confiabilidade de resultados obtidos para as resistências do concreto e do aço, quando aplicados às estruturas de concreto; ou, quando aplicado aos solos, ensaios de *cisalhamento direto e triaxiais*, por exemplo, adotando-se, como coeficiente de segurança parcial, o desvio padrão reconhecido como média para esses ensaios. Não havendo confiabilidade nas referências estatísticas aplicadas a cada parâmetro individualmente, ou pelo menos com boa aproximação, é preferível utilizar o método dos valores admissíveis, em que há naturalmente uma compensação entre os desvios dos vários fatores de ponderação envolvidos, tendo em vista a avaliação conjunta.

O método apresenta boa aplicabilidade, em várias situações, por exemplo:

- Nas situações em que determinado parâmetro interfere na estabilidade global da obra, de forma não direta, no processo de verificação.
- No caso de variabilidade distinta sobre a confiabilidade de resultados de diversos parâmetros independentes.

- No caso de haver incidência de diversas ações sobre o resultado, mas cada uma com probabilidade de ocorrência discrepante umas das outras, situação típica em que há incidência de ações excepcionais. Nessas situações, as normas de estrutura indicam fatores de concomitância, com minorações ponderadas a cada coeficiente de segurança parcial, segundo cada caso de incidência que se sobreponha ao conjunto de ações.
- No caso de dimensionamento de sistemas de contenção ou fundação, que implique em análises solo-estrutura, e que resulte na incidência, quantidade e capacidade resistente de elementos de reforço do solo ou de sua própria dimensão.
- Indistintamente no dimensionamento das estruturas.

Definem-se, como aplicação do método, dois grupos distintos para definição dos coeficientes de segurança parcial: Y_f – coeficiente de majoração das ações características instabilizantes Q_k ; e Y_m – coeficiente de minoração dos elementos resistentes R_u , podendo ambos assumirem valores distintos na incidência sobre eventos diferentes. As ações características Q_k , ao serem majoradas por Y_f , recebem a denominação de ações de projeto, passando a ser representadas pelo símbolo Q_d , assim como os elementos resistentes R_u recebem a denominação de elementos resistentes de projeto, com o símbolo R_d . Assim, em uma relação direta de verificação:

$$Q_k \cdot Y_f \leq \frac{R_u}{\Delta_m} \quad (\text{ou}) \quad Q_d \leq R_d \quad (8.1.1.2)$$

Nos casos de verificação da estabilidade em que há uma relação direta entre os esforços instabilizantes e os resistentes, como no caso de deslizamento de taludes infinitos, tendo como instabilizantes as tensões tangenciais e resistentes, as de cisalhamento limite do solo, a verificação pode ser efetuada de modo semelhante ao método das tensões admissíveis, adotando-se para o fator de segurança global FS o produto entre os coeficientes parciais, relativos às forças instabilizantes e às de resistência ao cisalhamento, como demonstrado em (8.1.1 – 3).

$$Q_k \cdot Y_f \leq \frac{R_u}{\Delta_m} \quad (\text{ou}) \quad \frac{R_u}{Q_k} \geq Y_f \cdot \Delta_m \quad (\text{ou}) \quad \frac{R_u}{Q_k} \cdot \Delta_f \cdot \Delta_m \geq 1,0 \quad (8.1.1.3)$$

Para a análise da estabilidade de taludes, parece mais claro interpretar o problema de forma global pelo método dos valores admissíveis, como preconiza a NBR 11682 (1991).

Especificamente para as fundações, a NBR 6122 (2019) recomenda coeficientes de minoração parciais aplicados diretamente à capacidade resistente do elemento de fundação, adotando-se como valores mínimos: $\Delta_m = 2,15$, para fundações superficiais e de 1,4 para as profundas, quando avaliadas por método analítico ou semiempírico; ou 1,4 para fundações superficiais e 1,14 para fundações profundas, com a realização de provas de carga, havendo ponderações para sua redução ou mesmo considerações para os casos em que deva ser maior que os valores recomendados, para detalhes, consultar a própria norma.

Em compatibilização entre os dois métodos: método de valores admissíveis e método de valores de projeto, intui-se que o valor do coeficiente de majoração das ações deverá ser $Y_f \geq 1,4$, que se multiplicado pelo valor de Δ_m , em cada caso, obtém-se o mesmo valor do FS global, na análise pelo método de valores admissíveis.

Para o caso da análise da segurança das fundações, o método de valores de projeto apresenta coerência com os procedimentos usuais de verificação, ou seja, havendo proporcionalidade nos resultados da avaliação da relação entre as ações e capacidade resistente das fundações.

Para as obras de concreto armado, o método é utilizado indistintamente, como orientação geral para o dimensionamento dos elementos estruturais, fazendo parte das próprias definições dos procedimentos. Para Y_f – coeficiente de majoração das ações características instabilizantes Q_k , a norma NBR 6188 (ABNT 2014) adota o valor de 1,4; para Y_m – coeficiente de minoração dos elementos resistentes R_u , adota 1,4 para o concreto e 1,15 para o aço, utilizando-se os valores de projeto assim obtidos, instabilizantes ou resistentes, no processo de dimensionamento.

Como vantagem na utilização do método, pode-se aplicar valores distintos de Y_f , distinguindo-se as ações características frequentes, permanentes ou acidentais, das raras e excepcionais, ponderando-se cada parcela que compõe a solicitação, como a seguir:

$$Y_f = N_{k1} \cdot Y_{f1} + N_{k2} \cdot Y_{f2} \cdot N_{k3} \cdot Y_{f3} + \dots$$

O mesmo procedimento pode ser aplicado, por exemplo, à capacidade resistente das fundações profundas, distinguindo-se, para a avaliação da segurança das estacas, a resistência por atrito e de ponta, atribuindo a cada parcela, ponderações distintas, podendo adequar-se aos vários métodos específicos de avaliação da capacidade de carga.

8.2 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

O *estado limite de serviço* pode ser interpretado como o limite superior viável para atuação das cargas de trabalho ou ações em geral, que, em concomitância com as resistências mínimas admitidas dos elementos resistentes, produzam deformações em situação de razoável trabalho elástico, que, após descarregamento, não comprometam suas estruturas e fundações ou os solos superficiais que porventura compõem o perfil natural do terreno, diante de novos ciclos de carregamento ou ações que venham a ocorrer ainda dentro dos limites impostos. Pode-se considerar que no *estado limite de serviço*, não ocorram deformações, desagregações ou efeitos de fluência, que causem danos e efeitos de degradação irreversíveis às estruturas, fundações ou ao próprio solo, assim como, não reduzam sua capacidade resistente. Limitam-se, assim, para enquadramento no *estado limite de serviço*, valores de carregamentos ou intensidade de ações, recalques causados por adensamento do solo, variações térmicas advindas da superestrutura, vento, ações sísmicas, de maré, entre outras, que causem a degradação dos elementos resistentes da obra ou comprometam a sua função.

São, assim, também, considerados na definição do *estado limite de serviço*, os danos associados a outras partes de uma obra de engenharia, vinculadas às estruturas e fundações em análise ou à ocupação do solo em situações de risco, devido à instabilidade da estrutura geológica natural do terreno. Nesses casos, os limites também são estabelecidos em função da não degradação da obra pelo uso e ocupação da superfície do terreno, realização de obras subterrâneas ou outras que possam acarretar a instabilidade do solo, considerando: variação da linha freática, ocorrência de poropressão mediante aplicação de cargas induzidas, cortes do terreno, supressão vegetal, entre outras.

Em especial, os danos associados a serem avaliados ocorrem por avarias da superestrutura que compõe a obra como um todo, como exemplo, mediante a ocorrência de recalques elevados, que gerem o afundamento da construção abaixo das cotas estabelecidas para a função e uso da obra ou de recalques diferenciais inadmissíveis ao tipo de construção, que podem causar trincas nas alvenarias e deficiência no desempenho de suas instalações, ou a inclinação inaceitável do prumo do edifício, ou degradação dos elementos de fundação que venham a limitar as cargas de serviço do edifício.

Para os limites de recalques diferenciais, devem ser consultadas as normas de projeto de estruturas, como: concreto, metálicas, de madeira, pré-moldados ou outras mais específicas. Os recalques diferenciais, em estruturas, geram esforços de flexão adicionais nos elementos estruturais, logo devem atender a limites condizentes à sua capacidade resistente. De forma geral, quanto mais esbeltos forem os elementos es-

truturais, maior a capacidade de absorver recalques diferenciais, sem que venham a comprometer sua capacidade resistente. Contudo, sendo a estrutura, como um todo, muito rígida, ela interfere na própria ocorrência de recalque diferenciais entre elementos de fundação isolados, minimizando o efeito, porém, gerando esforços elevados na estrutura. Como caso extremo de rigidez estrutural, pode-se citar os edifícios de alvenaria estrutural, ou aqueles cuja estrutura é metálica contraventada. Nesses casos, o edifício trabalha como um bloco monolítico, fazendo com que os recalques diferenciais ocasionem o desaprumo do edifício. Assim, casos de recalques diferenciais significativos devem ser avaliados em consonância com o projeto das estruturas, de forma a estabelecer os níveis limites de serviço. Como referência básica de ordem de grandeza para recalque diferencial inadmissível δ_{lim} , considerando unicamente os danos estruturais, pode-se utilizar a relação indicada em (8.2.1), sendo ℓ a distância entre pilares com fundações isoladas.

$$\delta_{lim} \leq \frac{\ell}{300} \quad (8.2.1)$$

Já os danos associados ao uso e ocupação do terreno podem referir-se, por exemplo, a recalques, trincas e deslocamentos horizontais na superfície do terreno que causem sua deterioração ou impossibilitem o uso de sua ocupação; rebaixamento do lençol freático a níveis aquém dos limites que garantam a manutenção da umidade natural das camadas do solo junto à superfície; erosões superficiais ou por deslocamento, entre outras.

Atenção especial deve ser dada aos efeitos de deformações diferidas no tempo, como a fluência do concreto, que causa trincas e avarias nos elementos de vedação, esquadrias e outros. Há também que se considerar os casos com consequência devido ao adensamento, em se tratando de solos argilosos, ou de acomodação, no caso das areias; também, deslizamentos por rastejo (*creep*) em encostas, que podem interferir na estabilidade das fundações; efeitos de erosão, que podem descalçar as fundações; deslocamento de margens de córregos, colocando em risco edificações lindeiras. Não sendo possível conter ou evitar tais danos, deve-se minimizar os efeitos, seja pela redução dos carregamentos, o que significa elevar os coeficientes de segurança, ou mitigar os impactos, efetuando-se melhoria nas propriedades dos materiais ou dos solos envolvidos pelas fundações. Podem também serem realizadas obras estruturais de reforço, de fundação ou contenção, de modo a garantir o nível de serviço ao longo da vida útil da obra. Como exemplo de danos associados a deformações diferidas no tempo, pode-se citar: afundamento de cotas de soleiras; rompimento de

instalações de serviços público enterradas; desnivelamento de pisos; desaprumo de postes, muros, ou mesmo de edifícios; entre outros.

Em suma, o *estado limite de serviço* estabelece o limite superior às solicitações que atuam nas fundações ou contenções, de forma a não causar danos inadmissíveis à própria fundação ou contenção, ou provocar danos associados. Trata-se, assim, de uma análise da obra em serviço, que pode, inclusive, acarretar no aumento dos coeficientes de segurança estabelecidos por normas, ou mesmo, na decisão pela não realização da obra segundo o projeto.

