

CAPÍTULO 7

Método da evolução das tensões

Refere-se à avaliação da evolução das *tensões normais* que atuam em um elemento solo ou, mais especificamente, referindo-se ao método, às tensões horizontais e suas progressões a partir do estado neutro de tensões, em repouso. Quando aplicado à análise das tensões horizontais que se desenvolvem no solo, o método pressupõe que um elemento solo transita entre os limites dos estados ativo de tensões e passivo, mantendo as características elásticas do solo, após ciclos em que tenha atingido a plastificação, quando se supõe total recuperação elástica. O objetivo desse método é estudar modelos de interação solo-estrutura em que ocorram ciclos de deformações do elemento estrutural, com alternância dos sentidos das curvaturas da linha elástica.

As tensões internas no solo somente estarão em equilíbrio estático natural, como já visto no Capítulo 2, seção 2.2 – Estado de tensões em repouso –, quando em repouso, recebendo a denominação de tensões de confinamento ou de repouso. Esse estado de tensões pode ser alterado pela aplicação de deformações impostas ou variações das próprias tensões, por carregamentos induzidos, que introduzem na massa de solo, parcelas de compressão ou descompressão. Partindo-se, como referência, de um elemento solo solicitado a tensões de confinamento σ_o , estando assim a massa de solo pré-comprimida, o referido elemento poderá receber incrementos específicos de deformação, que correspondem a acréscimos de tenção $\Delta\sigma$, até atingir o estado de plastificação passivo ep , mantendo, então, o mesmo nível de tensões para defor-

mações maiores. Em sentido oposto, por decompressão, atingiria o estado de tensão ativo *ea*. Verifica-se que, nesse percurso, há uma evolução contínua das tensões, como pode ser observado no gráfico da Figura 7.1, que mostra a evolução das tensões internas para um solo ideal, linear elástico, com os patamares de escoamento perfeitamente definidos nos estados passivo e ativo. O estado neutro de tensões corresponde aos empuxos de repouso.

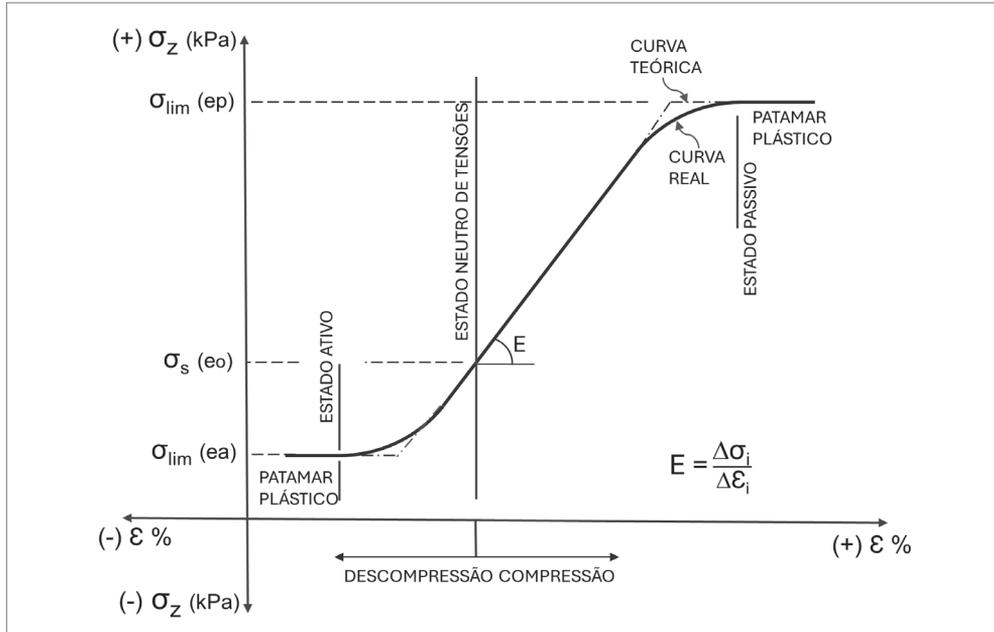


Figura 7.1 Esquema genérico da curva de evolução tensão-deformação entre os limites de plastificação do solo.

Deve-se observar, em primeiro lugar, que o domínio de trabalho para os solos é representado por um estado de compressão. As principais premissas para a validade da teoria da elasticidade, quando aplicada aos solos, pressupõem um estado de compressão contínuo e homogêneo. Para solos coesivos, pode-se até mesmo admitir que ocorra estabilidade da massa solo, diante de efeitos de tração, por decompressão, mas dentro dos limites estabelecidos pelo próprio valor da coesão e atendo-se a questões de fluência. De forma geral, os modelos de cálculo por métodos analíticos ou numéricos não preveem a resistência à tração do solo, admitindo que ocorra o descolamento entre elementos ao se anularem as tensões de compressão.

A evolução de tensões, como representada na Figura 7.1, raramente é reproduzida na prática, devendo sempre haver ajustes de projeto. Em especial, o comportamento do solo não é elástico linear, mas sim, muito mais próximo de uma curva hiperbólica, devendo-se, na região prevista para a proporcionalidade das tensões, estabelecer um

módulo secante de deformações equivalente. A transição para o patamar de escoamento também deve receber ajustes. Os principais ajustes, no entanto, devem-se ao estado de descompressão, mediante tensões de desconfinamento, situação que merece as maiores considerações. A dificuldade em se estabelecer um módulo secante de deformações no desconfinamento decorre do comportamento atípico que muitos solos apresentam em estado de descompressão, como perda total da elasticidade, ruptura brusca ou fluência, entre algumas das possibilidades. Em argilas sobreadensadas, por exemplo, abaixo da tensão referencial de pré-adensamento, o modelo é razoavelmente previsível, assemelhando-se ao da Figura 7.1, podendo, no entanto, ocorrer expansões na evolução das compressões e rompimentos localizados na descompressão, como decorrência da ação da coesão.

Assim, importa aos estudos o gráfico de evolução de *tensões normais*, em função das deformações, também denominado de curva p-y, que representa a evolução da curva tensão-deformação em progressão não elástica das deformações, podendo ser elaborado a partir de ensaios em laboratório ou de referências conhecidas sobre o solo, para que se obtenha uma previsão do comportamento do solo em compressão ou descompressão. Desse resultado, pode-se, por exemplo, idealizar um modelo em que a região de serviço se enquadre convenientemente em um trecho mais homogêneo e previsível, relativamente à relação tensões-deformações, quanto à mobilização do solo às solicitações de projeto. Tomando-se como exemplo um projeto de uma parede de contenção vinculada por tirantes protendidos, pode-se decidir por trabalhar unicamente com tensões de compressão acima do estado de serviço, mesmo nas etapas construtivas distintas ou, ao contrário, diante de propriedades favoráveis do solo, permitir que as pressões finais do solo contra a parede resultem inteiramente no estado ativo, por economia de projeto.

Cabe ressaltar que em modelos numéricos de cálculo, como o MEF, o módulo de deformação a ser assumido refere-se à relação tensão-deformação, na compressão simples, sem a inserção de qualquer tensão de confinamento para sua obtenção, visto que por este método, naturalmente se impõe ao modelo um estado inicial de confinamento do solo, segundo suas características físicas e relações geométricas do modelo em análise. Na inviabilidade de realizar um ensaio de compressão simples, pelas razões já conhecidas, como é o caso das areias, pode-se proceder à realização do ensaio *triaxial CD*, efetuando-se a correção do módulo de deformação e do coeficiente de Poisson, resultantes, a partir de formulações da teoria da elasticidade. Elimina-se, dessa forma, a influência da tensão confinante σ_3 sobre o resultado obtido para o módulo de deformação. Cabe ressaltar que, na realidade, com o confinamento, são as deformações que são reduzidas, ficando o módulo de deformação invariável. O aumento do módulo de deformação com o confinamento é um recurso utilizado

para obter a redução das deformações, em caso de modelos simplificados de resolução, como os unidimensionais. Em caminho inverso, no caso de métodos semiempíricos que estimam o valor do módulo de deformação do solo por correlações, pode-se recorrer à correção do módulo de deformação em função dos efeitos favoráveis do confinamento, utilizando-se as mesmas formulações da teoria da elasticidade. Há também correlações de valores com resultados de sondagens e ensaios *in situ*, como o N_{SPT} , que, de certa forma, fornecem uma relação para se estimar o módulo de deformação com relativa coerência ao que o solo está submetido a determinada profundidade, especialmente em areias, como apresentam Cintra e Aoki (2011).

Para a determinação das tensões no solo, o método de cálculo numérico mais difundido e utilizado como base para os problemas que envolve uma massa de solo é o MEF – método dos elementos finitos. Também são utilizados outros métodos, como o MDF – método das diferenças finitas – e o MEC – método dos elementos de contorno –, cada um aplicado diante das facilidades que proporciona na resolução de cada problema específico e do nível de precisão que se deseja impor à solução do problema. Segundo Rosa (2013), o MDF foi o primeiro a surgir, que consta da discretização do meio contínuo, que transforma um sistema de equações diferenciais em um sistema algébrico utilizando-se os valores de domínio. Seguiu-se com o MEF, que consiste em discretizar todo o meio contínuo em elementos que interagem entre si pelos seus nós de vinculação. Cada elemento é equacionado isoladamente, mediante variáveis que representam seus campos de deformação, mas, no conjunto, considera a energia total da deformação imposta ao sistema e o equilíbrio das forças nos nós. Nos casos de aplicação em solo, normalmente, tem-se utilizado modelos que simulam o comportamento de vigas ou pilares (unidimensionais), paredes (planos), ou axisimétrico (sólidos). Pappalardo (2023) efetua considerações sobre as equações de resolução aplicadas a cada caso, resultando, para sua resolução, na formação de sistemas com n equações a n incógnitas, sendo n o número de vinculações (nós), obtendo-se maior precisão nos resultados, quanto maior o número de nós. O MEC, mais recente, é considerado de melhor desempenho quando aplicado em meio infinito ou, no caso particular do solo, em meio semi-infinito. Consiste em uma representação integral envolvendo dois problemas: o primeiro considera o meio infinito, cuja resolução exige a interpretação e discretização da vinculação do contorno, de modo a simular os efeitos da propagação das deformações em meio infinito; o segundo representa o problema em questão, inserido no primeiro, com maior precisão no detalhamento, caracterizado também pela compatibilidade obtida por condições de contorno.

A análise do comportamento da relação estaca-solo, por quaisquer dos métodos, é feita por meio da compatibilidade dos deslocamentos dos nós e equilíbrio das forças

de interação ao longo da interface estaca-solo. Normalmente, as estacas são tratadas como elementos estruturais unidimensionais de comportamento linear-elástico. No entanto, tratando-se de estacas de concreto, o modelo com comportamento linear-elástico pode não corresponder a um estado realista das deformações que ocorrem no concreto armado, o qual, dependendo do domínio de trabalho, pode apresentar perda da rigidez flexional devido ao efeito de propagação de fissuras, o que leva as peças de concreto armado à condição de não-linearidades físicas e geométricas, como apresenta Khouri (2001). Para se levar em conta esse efeito, pode-se recorrer ao desenvolvimento teórico que considera a relação momento-curvatura para avaliar e prever nas análises, mediante flexão do elemento estrutural, a perda progressiva da rigidez da seção pelo efeito da fissuração, mas isso implica em um rebuscamento elevado ao processo de análise.

Havendo predominância das solicitações de flexão, de forma mais simplista, para a avaliação da deformabilidade lateral da estaca, pode-se utilizar parâmetros de rigidez aplicados a uma seção estrutural fissurada, como preconiza a NBR 6118 (ABNT, 2014). No entanto, na maioria dos casos da prática, a consideração de comportamento linear-elástico para os problemas de estaca-solo é aceita e traz suficiente precisão.

Em casos em que se requer maior precisão de análise, tem sido aceito o modelo denominado de “dano plástico” ou *concrete damaged plasticity*. González (2014) descreve os princípios básicos que norteiam as análises. Esse modelo pode ser utilizado no intuito de avaliar os efeitos de danos irreversíveis a que as estruturas podem estar submetidas, ao se considerar nas análises, especialmente em peças de concreto armado, os mecanismos que levam ao estado de fissuração e degradação da rigidez dos materiais constituintes da peça estrutural, com registro histórico relacionado ao nível das solicitações.

7.1 MÉTODO EVOLUTIVO DE TENSÕES APLICADO A MODELOS PLANOS

No caso de as análises serem efetuadas no estado plano de tensões, normalmente a seção no plano YZ em estudo é replicada ao longo do eixo ortogonal X , ou seja, por meio de sucessivos planos paralelos YZ , analisados de forma independente, mas cujas deformações orientadas ao eixo X , decorrentes do efeito de Poisson, anulam-se, por se contraporem em cada seção. A simulação, assim, admite a ação do confinamento lateral ao plano YZ (em X), dos elementos quando solicitados por compressão ao longo dos eixos Y e Z . Ver Figura 7.2. Nesse caso, pode-se efetuar a consideração de que os planos YZ sucessivos sejam indeslocáveis na direção X , o que irá gerar, como decorrência, tensões de confinamento ortogonais ao plano em análise. Se os carregamentos P_y aplicados ao longo de Z forem contínuos e uniformes, o modelo repre-

sentaria um ensaio *triaxial* edométrico, em que as laterais dos elementos são confinadas, respondendo ao equilíbrio diretamente pelo efeito de Poisson.

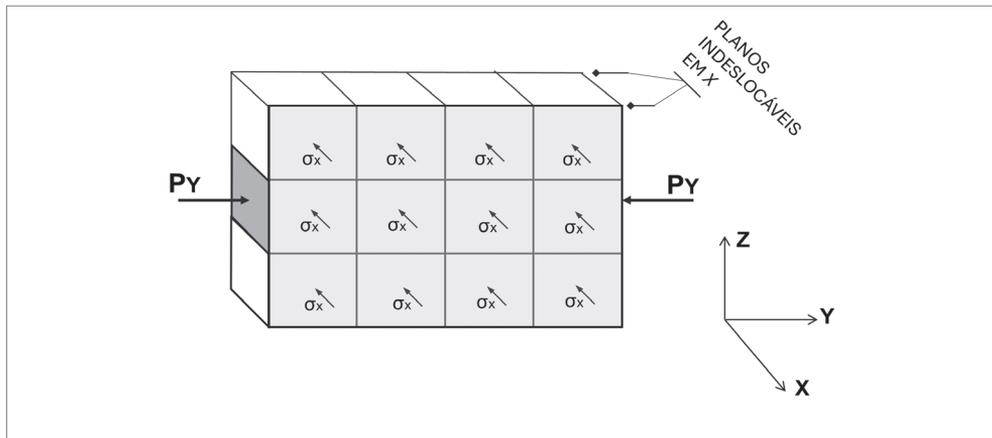


Figura 7.2 Representação de modelagem de malha para processamento em MEF.

Fonte: adaptado de Tamoio, 2015.

Os estudos e análises de interação solo-estrutura voltados a elementos estruturais carregados lateralmente, que envolvem a evolução de tensões, são normalmente efetuados pelo MEF. Tratando-se de paredes contínuas, utilizam-se, em especial, os modelos em estado plano de tensões, fatiando-se a massa de solo em sucessivos planos *YZ*. No caso de estacas isoladas, os modelos sólidos representam melhor a discretização do solo, segundo a orientação axissimétrica, por considerarem o equilíbrio do elemento estrutural com a contribuição das interações ortogonais à direção de deslocamento principal, com resposta mediante tensões radiais à superfície da estaca, obtendo-se de forma mais realista os efeitos das reações de confinamento, no entanto, geram um trabalho de elaboração e processamento do modelo bem mais complexo.

Nas análises em modelos planos, mais usuais, inicialmente, o solo encontra-se pré-comprimido, gerando um estado de tensões que corresponde ao estado de repouso. Ao se aplicarem os carregamentos externos, o solo estará submetido a um acréscimo de compressão no sentido do deslocamento e, em sentido oposto, à descompressão (decréscimo da compressão inicial correspondente ao repouso), tendo, em ambos os casos, como estado inicial de tensões, o de repouso. Assim, as tensões iniciais de confinamento (repouso) serão acrescidas das tensões de compressão causadas pelo deslocamento do elemento estrutural, até um limite estabelecido como o de plastificação, normalmente os empuxos passivos de Rankine. Em sentido oposto, as tensões iniciais de repouso serão reduzidas pela descompressão do solo até o limite

mínimo, em que ocorre a plastificação, estabelecendo-se, normalmente, para esse limite, os empuxos ativos, como mostra a Figura 7.3.

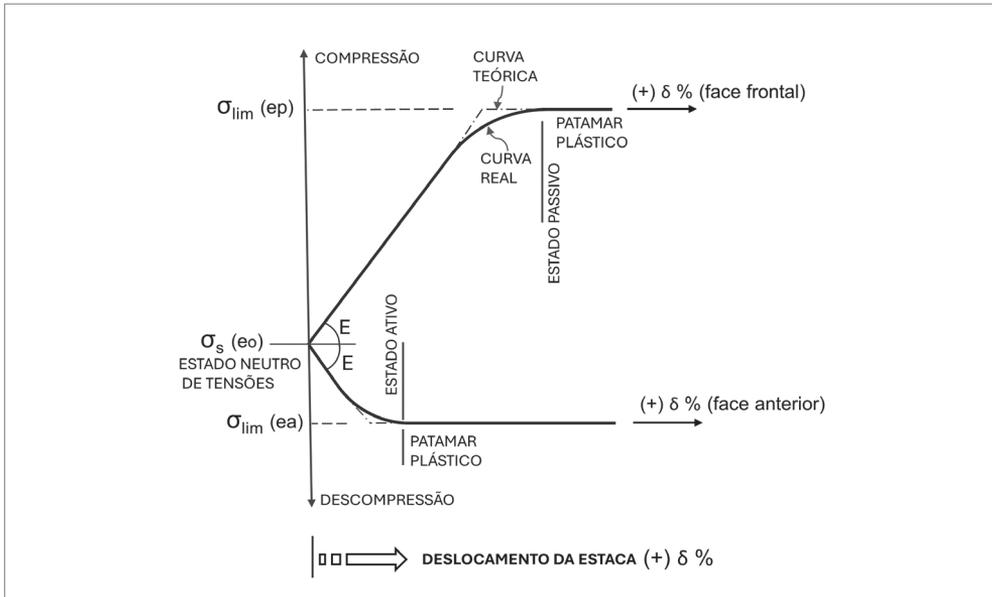


Figura 7.3 Efeito sobre a compressão e descompressão do meio devido ao deslocamento horizontal de um elemento estrutural no solo.

O método evolutivo de tensões tem sua maior aplicação nos modelos de contenção de escavações, como nos escoramentos com paramento vertical contínuo. Em especial, quando atirantados em vários níveis, a evolução das etapas construtivas, envolvendo a escavação e protensão dos tirantes, faz com que, nas duas faces da estrutura, ocorra uma inversão de esforços, com flutuação das tensões, podendo inclusive levar à inversão das tensões limites de ativas para passivas, assim como o inverso. Nesse tipo de sistema construtivo, cujas deformações ocorrem de forma significativa, prepondera a mobilização dos empuxos, passivos e ativos, de forma mais significativa em profundidades intermediárias, prevalecendo, no entanto, a restituição dos níveis de tensão, ao se estabilizarem as deformações após escavação. Essa configuração, para simular a oscilação das tensões no solo nas etapas de evolução do método construtivo, mesmo com muitas aproximações, leva a envoltórias que se aproximam bem a resultados reais.

O método evolutivo é, em geral, aplicado por softwares específicos para solos, que apresentam sub-rotinas para acumular de modo automático os resultados das várias iterações, consideradas as etapas de escavação, aplicação de vínculos provisórios, ou definitivos, variação das cargas acidentais, entre outros. Também deve ser

intrínseca a lei de plastificação do solo adotada. Dinis (1988) apresenta uma aplicação para parede com um único travamento fixo, pelo MEF modelo plano e software específico para solos, com considerações para análise plástica de cada elemento pelo critério Mohr-Coulomb. O confinamento do solo foi aplicado diretamente, cuja variação de seus valores foi efetuada mediante evolução por meio de empuxos de repouso aplicados diretamente, com a correção automática de seus valores a partir das etapas de escavação. Os resultados reproduziram com boa coerência o comportamento do solo, em especial para cargas verticais de grande magnitude aplicadas parcialmente no terrapleno. Na Figura 7.4, é exemplificada a aplicação do método evolutivo de tensões para uma contenção em paramento contínuo atirantado, com um único nível de tirantes protendidos.

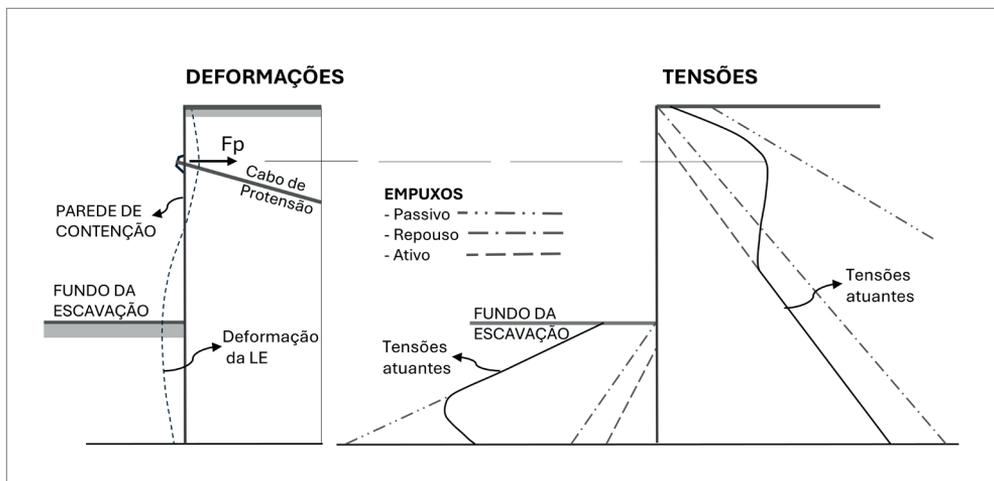


Figura 7.4 Estado final de tensões horizontais no solo em uma parede de contenção obtido pela evolução das tensões.

Para escavações com vários níveis de escavação e atirantamento, o modelo de processamento exige sucessivas alterações na matriz inicial, tendo em conta a desabilitação da rigidez dos elementos solo a cada etapa de escavação e inserção de novos tirantes. O cálculo da parede refere-se a uma somatória acumulativa de esforços e de envoltórias com os resultados das etapas anteriores, seguindo fielmente o esquema estabelecido para a execução. Ver Figura 7.5.

A cada nova etapa, os resultados do processamento são acumulados e envoltos aos das etapas anteriores. Como sequência das etapas construtivas, inicia-se com a inserção da parede no subsolo, introduzindo-se a ação dos empuxos de repouso, hidrostáticos e decorrentes de sobrecargas, por exemplo. Segue-se com a remoção dos elementos de solo referentes ao primeiro nível de escavação, efetuando-se o processamento dessa etapa. Na sequência, introduz-se a força de protensão do pri-

meio nível de tirantes, efetua-se o processamento, acumulando-se os resultados e seguindo-se, então, às etapas seguintes.

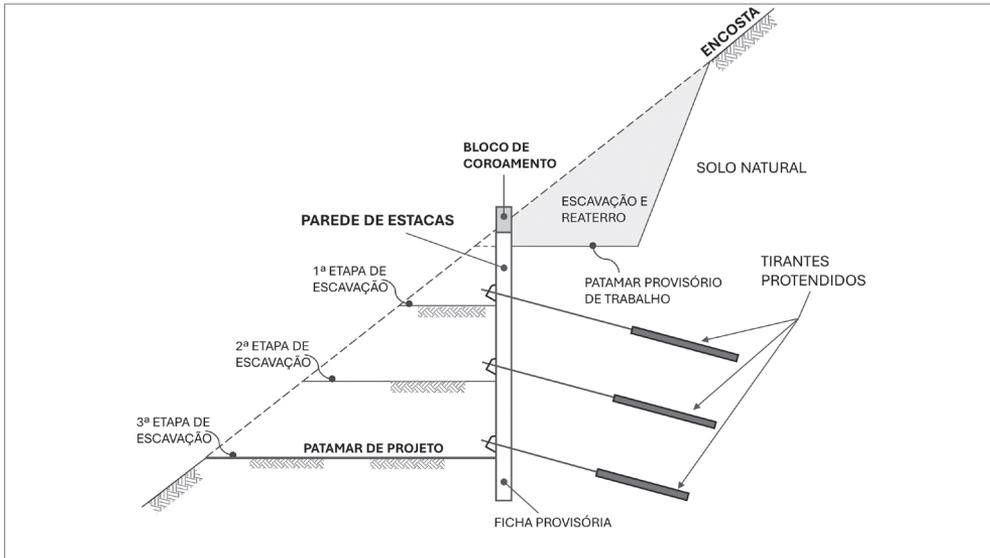


Figura 7.5 Execução de paredes de contenção com vários níveis de atirantamento.

7.2 MÉTODO EVOLUTIVO DE TENSÕES APLICADO A ESTACAS ISOLADAS

Em caso de estacas isoladas, quando submetidas a carregamentos laterais, a restituição das tensões ao estado inicial de deformação do solo, na curva tensão-deformação, após carregamentos e descarregamentos cíclicos, pode não ocorrer, restando deformações residuais no solo, ao descarregamento. Nesse caso, as tensões correspondentes ao limite de plastificação ativo, característico da descompressão, podem não ser mobilizadas, em função do arqueamento do solo na horizontal em torno da estaca.

Esse comportamento depende de muitos fatores, variando de caso para caso, porém, é mais nítido em estacas de menor diâmetro. Para as estacas de maior diâmetro, especialmente em solos não coesivos, pode ocorrer o deslocamento do solo após o arqueamento, o que leva à ruptura local e, conseqüentemente, à plastificação pelos limites ativos. O fenômeno apresenta outras feições, em se tratando de outros tipos de solo, como em argilas moles saturadas, em que prevalece a manutenção do efeito de confinamento, não ficando nítida a formação dos limites de plastificação. Interessante, quanto à questão da restituição ao estado de deformação inicial no solo pelo descarregamento, o trabalho de Figueiredo *et al.* (2017), referindo-se a uma obra executada em Cuiabá, em solo caracterizado como silte argiloso, no qual foram realizadas provas de carga em estacas mediante aplicação de deformação horizontal

imposta na extremidade, em pares de reação e que, na média dos resultados, apresentaram um índice de restituição aos deslocamentos horizontais, medidos no topo das estacas, em torno de 55% relativamente às deformações máximas impostas.

Em vista dessas questões, em estacas isoladas, havendo preponderância na atuação de cargas horizontais cíclicas, de intensidade significativa, como em pontes e estruturas marítimas, com riscos de formação de danos plásticos nas estruturas, é de boa prática se efetuar envoltórias de máximos e mínimos esforços, mediante as várias possibilidades de comportamento que podem ocorrer para o solo.

7.3 SIMPLIFICAÇÕES VOLTADAS A MODELOS UNIDIMENSIONAIS

Nos modelos unidimensionais, em se querendo aplicar o método evolutivo de tensões, deve-se prever molas nas duas faces do elemento estrutural, o que pode ser conseguido com barras transversais em cada nó. A pré-compressão do modelo, representando o estado de repouso, pode ser simulada por meio de adaptações diretamente nos valores limites de plastificação ativo e passivo, ajustando-se esses limites à pré-existência de um estado de compressão no solo. Normalmente, esse modelo é aplicado a estacas isoladas totalmente embutidas no solo e carregadas unicamente no topo, podendo ser vantajoso, a despeito de ser trabalhoso, em casos específicos de análise que envolvam sistemas estruturais estaca-pilar, em que ocorra uma altura expressiva da estaca acima do solo, desconfinada, sendo de interesse na verificação da segurança à flambagem.

Em caso da análise de escoramentos para contenção de escavações, com um único nível de travamento, tendo em vista as limitações de processamento do modelo unidimensional, pode-se proceder, de forma simplificada, mas com boa aproximação, à aplicação direta dos empuxos ativos na face desconfinada do elemento estrutural, em toda sua profundidade. Na face oposta comprimida, que corresponde à ficha, ao ultrapassar o limite de plastificação do solo, a cada profundidade, utilizar o critério de se desativar o vínculo elástico e substituir por uma força simulando a ação do empuxo passivo. A pré-compressão do modelo, expressando o estado de repouso, pode ser simulada por meio de adaptações com correções no limite de plastificação passivo, prevendo-se a ação das tensões de pré-compressão sobre esse limite. Nesse tipo de análise, o fator de segurança quanto à estabilidade da estaca no trecho de ficha pode ser aplicado diretamente à relação entre a resultante das reações de compressão no trecho comprimido, a partir da superfície, obtida pelo processamento, com a correspondente resultante dos empuxos passivos nesse mesmo trecho.¹

1 Ver aplicação numérica: Capítulo 6, Exemplo 6.6 – Estaca isolada carregada lateralmente.

Em casos de estacas carregadas lateralmente no topo, mediante pequenas deformações horizontais, em que se assume a restituição do solo ao seu estado inicial de deformação, após descarregamento, pode-se, como simplificação, prescindir da análise da evolução das tensões, a partir do estado de repouso, dispensando-se a mobilização dos empuxos ativos na profundidade desconfinada da estaca. Na face oposta, comprimida, avalia-se a plastificação do solo por compressão, respeitando-se os limites estabelecidos na plastificação, unicamente pela ação dos empuxos passivos, desconsiderando-se o estado inicial de repouso.

Em escoramentos de escavação com um único nível de contraventamento, é usual se utilizar de métodos semiempíricos, em que se aplicam os empuxos ativos em toda a profundidade da face desconfinada do elemento estrutural e, na ficha, em contraoposição, os empuxos passivos, diretamente. Por meio de cálculo analítico, a partir da atuação dos empuxos ativos, obtém-se a reação no centro da ficha e, relacionando-se esse valor com a resultante dos empuxos passivos, alcança-se o fator de segurança FS. Para a determinação dos esforços no elemento estrutural, reaplicam-se os empuxos ativos e, ainda, também os passivos, mas minorados pelo FS encontrado; e a resolução da estrutura é efetuada segundo as formulações da resistência dos materiais. Apesar das várias aproximações, em casos que envolvem menores riscos, esse tipo de procedimento é aplicado, havendo, nesse contexto analítico, métodos propostos por vários autores, com algumas variações entre eles.

