

## 2

### Tipos de Estruturas de Contenção

O comportamento das estruturas de contenção ancoradas depende, em geral, de vários fatores, e seu entendimento pode ser facilitado, em consequência da amplitude do assunto, se as estruturas de contenção forem classificadas em estruturas rígidas e flexíveis (Figura 2.1).

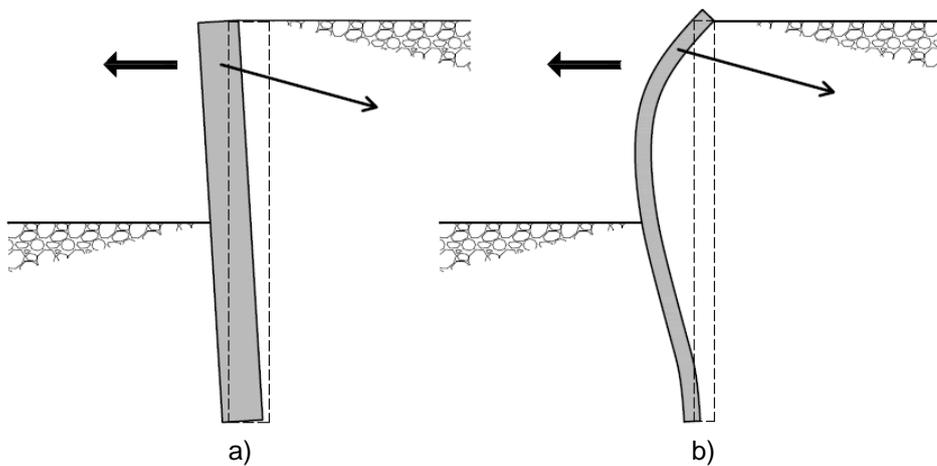


Figura 2.1 – Tipos de estruturas de contenção – a) Estrutura perfeitamente rígida – b) Estrutura flexível.

Essa diferenciação é muito importante, pois as deformações nas estruturas condicionam a distribuição das tensões laterais atuantes sobre a estrutura de contenção (Figura 2.2).

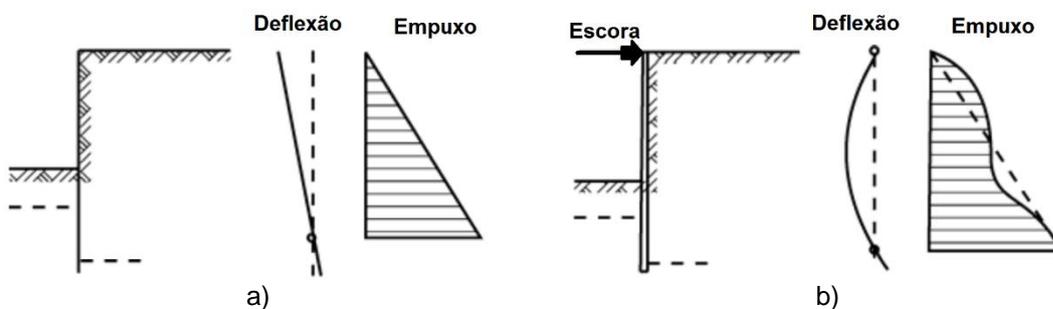


Figura 2.2 – Distribuição das tensões laterais - a) Estrutura rígida em rotação – b) Estrutura Flexível.

## 2.1 Estrutura de Contenção Rígida

As estruturas de contenção rígidas geralmente são estruturas corridas verticais ou quase verticais, geralmente apoiadas sobre uma fundação rasa. Podem ser construídas em alvenaria (tijolos ou pedras) ou em concreto (simples ou armado) ou ainda de elementos especiais (Figura 2.3).

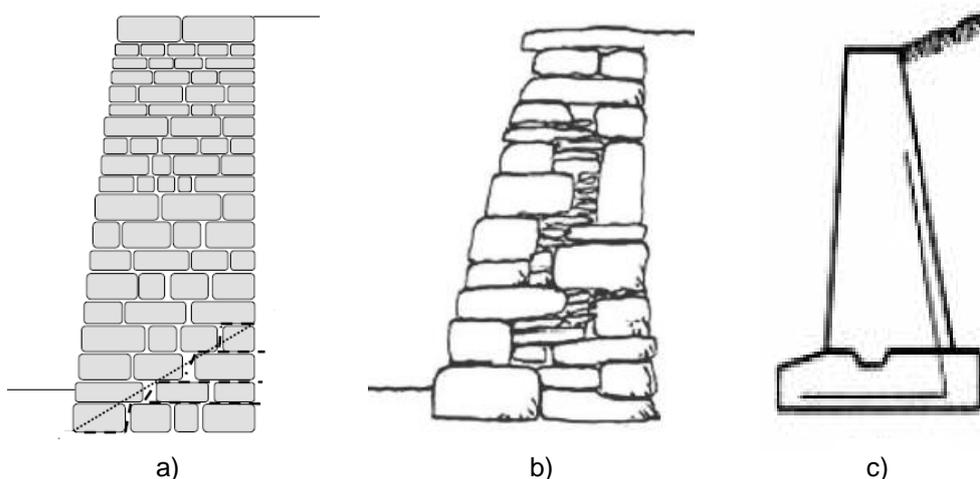


Figura 2.3 – Exemplos de estruturas rígidas – a) Muro de alvenaria – b) Muro de pedra – c) Muro de Concreto armado.

Nesse tipo de estrutura de contenção, o peso próprio do muro exerce uma contribuição significativa para a estabilidade da estrutura, ficando sujeita apenas a deslocamento de translação e de rotação e não apresenta praticamente deformações por flexão, como é o caso dos muros de suporte de gravidade (Figura 2.4).

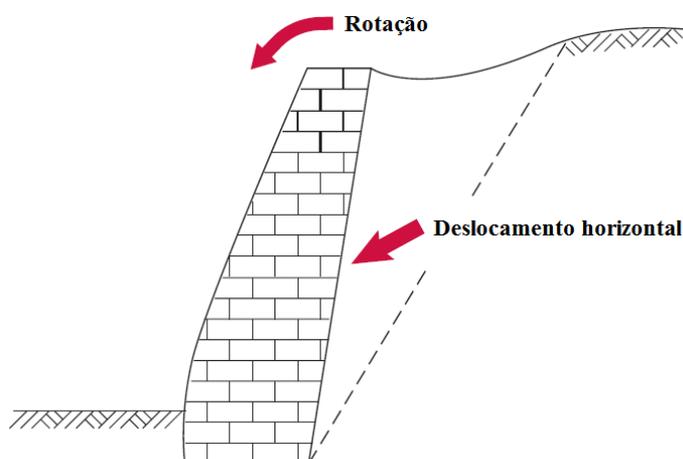


Figura 2.4 – Deslocamentos em um muro gravidade.

Em alguns casos como, por exemplo, em paredes diafragmas, embora o peso próprio da estrutura não exerça uma contribuição significativa para sua estabilidade, devido à elevada rigidez, a cortina praticamente não apresenta deformações por flexão e, portanto, também são consideradas como estruturas rígidas.

A Tabela 2.1 apresenta valores típicos de rigidez ( $E.I$ ) de alguns tipos de estruturas de contenção. As cortinas de estacas pranchas apresentam baixa rigidez, logo permitem deformação por flexão e por isso são consideradas flexíveis. Já as paredes diafragmas e estacas secantes, por apresentarem geralmente uma rigidez elevada, são consideradas estruturas rígidas.

Tabela 2.1 – Valores de rigidez para cortinas flexíveis e rígidas (adaptado de Strom e Ebeling, 2001)

Rigidez da Cortina	Tipo de Cortina	EI (k-ft/ftx10 <sup>4</sup> )
Flexível	Estaca Prancha	0.3 to 5.0
	Perfil Pranchado	0.1 to 4.0
Rígida	Estacas Secantes	8.0 to 250.0
	Parede Diafragma	30.0 to 150.0

## 2.2 Estrutura de Contenção Flexível

As estruturas de contenção flexíveis são definidas pelo Eurocódigo 7 como estruturas relativamente pouco espessas, que apresentam elevada resistência à flexão, dando o peso próprio da parede uma contribuição insignificante para a estabilidade da estrutura. Já Terzaghi (1943) é mais pragmático, definindo as estruturas de contenção flexíveis como cortinas que experimentam em serviço deformações por flexão e essas deformações são susceptíveis de condicionar a grandeza e a distribuição dos empuxos.

Durante as décadas de 40 e 50 consideráveis esforços foram destinados ao entendimento da flexibilidade em estruturas de contenção e seus efeitos na distribuição dos empuxos laterais sobre a cortina. Dentre os pesquisadores que direcionaram seus estudos a esse problema estão:

- Terzaghi (1943 e 1954);
- Tschebotarioff (1951)
- Rowe (1952, 1955 e 1956)

Os trabalhos deles representam claramente uma mudança na ênfase até então destinada ao dimensionamento de estruturas de contenção, uma vez que as análises foram dirigidas para identificar os empuxos laterais em condições de trabalho (isto é, sob deformações muito pequenas – muito distante da ruptura), um claro contraste com as abordagens até então conhecidas (Coulomb e Rankine), que eram baseadas nos empuxos sob as condições do estado limite último, ou seja, no caso de ruptura.

Os estudos deles comprovaram que, ao contrário da maneira idealizada, onde o empuxo cresce linearmente com a profundidade em condições de trabalho, a flexibilidade da estrutura pode levar à redistribuição do empuxo, como mostrado na Figura 2.5.

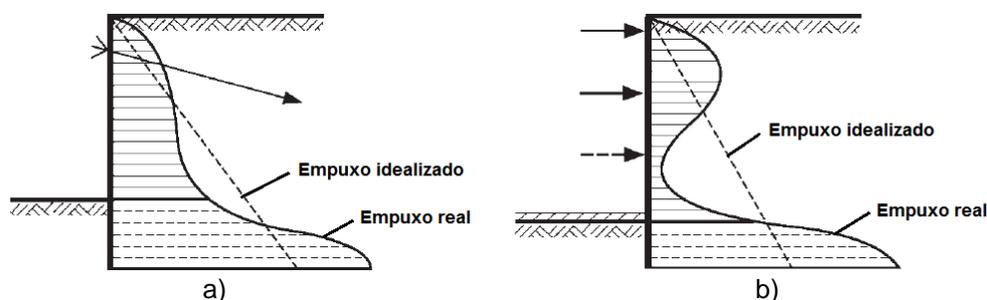


Figura 2.5 – Empuxo idealizado versus o real - a) Cortina ancorada – b) Cortina escorada.

A redistribuição das tensões laterais ocorre devido às deformações por flexão experimentadas pela cortina. Estas deformações provocam deslocamentos relativamente maiores em alguns pontos do que em outros (Figura 2.6).

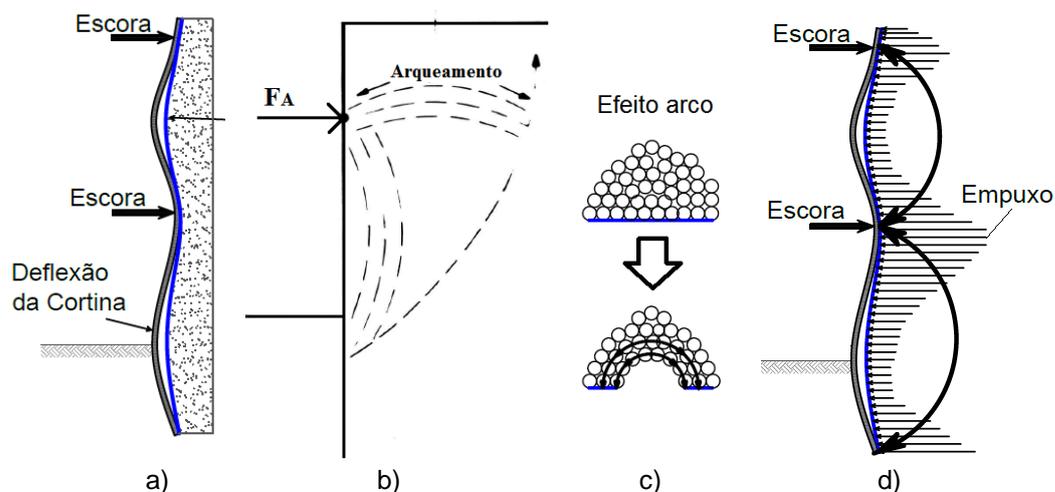


Figura 2.6 – Mecanismos da redistribuição das tensões laterais – a) Deformação da estrutura – b) Arqueamento do solo – c) Efeito arco – d) Concentração de tensões próximo às ancoragens.

Essas diferenças de deslocamentos ao longo da altura da parede induzem ao mecanismo de arqueamento do solo (Figura 2.7) e este mecanismo aumenta as pressões de terras nas zonas com menores deslocamentos e reduz as mesmas nas zonas com maiores deslocamentos.

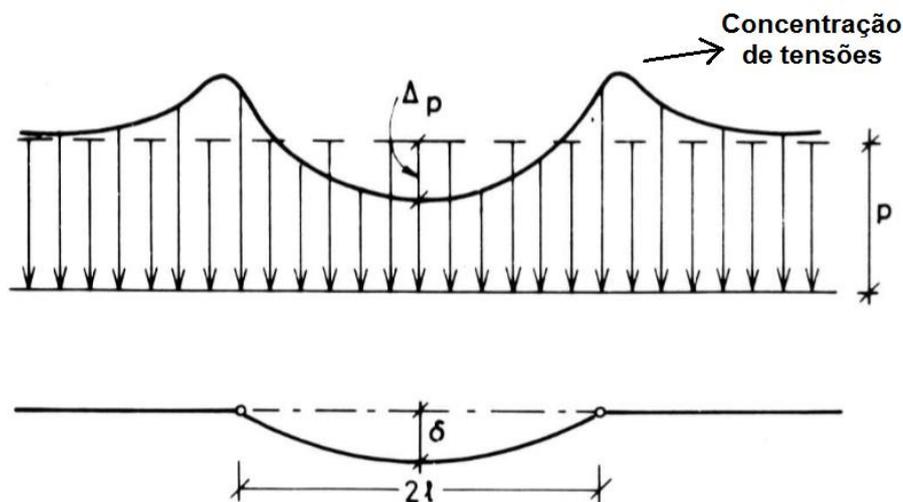


Figura 2.7 – Efeito Arco.

Os efeitos deste fenômeno em contenções causam aumento das cargas nos apoios (tirantes ou escoras) e redução do momento fletor na cortina. Embora este fenômeno seja muito presente no início da operação da cortina, a tendência é que as tensões laterais voltem para o estado de tensão natural do terreno, ou seja, onde a distribuição das tensões cresce linearmente com a profundidade.

Terzaghi (1954), apesar de admitir que existe a redistribuição do empuxo ativo, pondera que “não parece justificável confiar nos benefícios a serem obtidos a partir de uma diferença entre a real distribuição do empuxo e a distribuição calculada com base na teoria de Coulomb”, já que, mesmo os deslocamentos muito pequenos nos apoios causados, por exemplos, por vibrações, recalque de uma fundação superficial etc, poderiam levar ao retorno dos empuxos linearmente distribuídos.

Já Rowe, em sua série de publicações na década de 50, formulou um método cujo objetivo era obter vantagem da redução do momento fletor causado pela redistribuição do empuxo ativo. Esse método relaciona a flexibilidade da estrutura e a redução em porcentagem do momento máximo atuante na cortina (Figura 2.8).

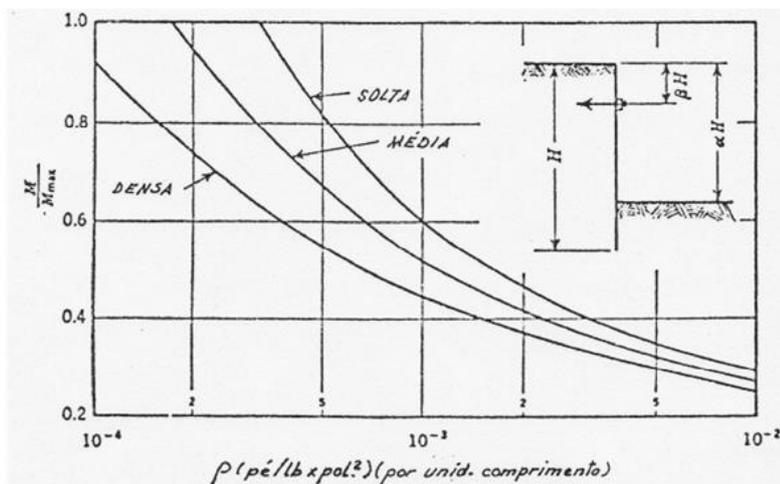


Figura 2.8 – Relação entre a porcentagem do momento fletor máximo atuante na cortina e a sua flexibilidade para três densidade distintas de areias (adaptado de Rowe, 1952).

O parâmetro  $\rho$  representa a flexibilidade da estrutura de contenção e é definido pela Equação:

$$\rho = H^4 / (E_E \cdot I) \quad (2.1)$$

Onde:

- $H$ : altura da estrutura,
- $E_E$ : módulo de Young, e
- $I$ : momento de inércia da cortina.

Mais tarde Rowe (1956) admite que pequenas deformações na cortina podem restabelecer a forma triangular (forma de Coulomb) de distribuição das tensões laterais e, por isso, a redução do momento fletor não deveria ser considerada no dimensionamento.

Já em relação às ancoragens, Rowe (1956) considera que a carga na ancoragem deve ser majorada em até 25% da carga obtida no método Free Earth Support, isto porque reconheceu que há uma concentração de tensões na parte superior da cortina, principalmente no nível do apoio.

Bjerrum *et al* (1972) prepararam um estado da arte sobre “empuxo de terra em estruturas flexíveis” para a 5ª (quinta) conferência europeia de mecânica dos solos e engenharia de fundações, realizada em Madri, que teve o tema “estruturas sujeitas a forças laterais”. O estado da arte considerou tanto cortinas ancoradas (grampos e tirantes) como cortinas escoradas e a questão da redistribuição do empuxo foi o tema principal.

O trabalho concluiu que para estruturas ancoradas por grampos ou tirantes a redistribuição das tensões laterais não devem ser utilizadas como vantagem no dimensionamento, pois os elementos de ancoragem não são rígidos o suficiente para garantir que a redistribuição do empuxo seja permanente.

Já para as estruturas de contenção escoradas, o trabalho antecipa claramente que os efeitos da redistribuição das tensões ocorrerão, apresentando uma concentração de tensões ao nível das escoras e um empuxo menor entre a escora e o nível da escavação. No entanto, a principal ênfase do trabalho se dá ao aumento da carga nas escoras causado pela da redistribuição das tensões em vez da redução dos momentos fletores.

### **2.2.1 Escolha do Tipo de Estruturas de Contenção Flexíveis**

As estruturas de suporte flexíveis distinguem-se pelos elementos que asseguram a sua estabilidade, pelos materiais empregues e pelo processo construtivo. As estruturas de contenção podem ser designadas por autoportantes, monoapoiadas e multiapoiadas.

As cortinas autoportantes são enterradas no solo e, devido à mobilização do empuxo passivo à frente da cortina, é dispensado qualquer outro elemento de apoio. As cortinas monoapoiadas caracterizam-se pela presença de um nível de apoio junto ao topo, seja por escoras ou ancoragens. Por último, as cortinas multiapoiadas possuem vários níveis de apoio ao longo da sua altura, igualmente por escoras ou ancoragens.

Os materiais correntes neste tipo de estruturas são aço, madeira e concreto armado. Os perfis metálicos são um exemplo da aplicação do aço, no entanto, apresentam uma menor rigidez e capacidade de resistir a esforços quando comparados com soluções de concreto armado, como, por exemplo, as paredes diafragmas de grandes espessuras. Já a madeira normalmente é utilizada em pranchas entre perfis metálicos, tem como vantagens a sua fácil aplicação e adaptação às condições de instalação.

O processo de construção apresenta essencialmente duas variantes, isto é, a cortina pode ser construída antes de se proceder à escavação ou à medida que esta decorre.

A escolha do tipo de estrutura de contenção flexível a utilizar é feita com base em diversos fatores tais como:

- A altura de escavação.

- As características geológico-geotécnicas do solo a escavar, (especialmente coesão e ângulo de atrito).
- A posição do nível freático.
- O carácter temporário ou definitivo da solução estrutural.
- A distância entre a estrutura e os edifícios ou propriedades vizinhas.
- A magnitude dos deslocamentos permitidos.
- O espaço livre existente na obra para movimentação de máquinas.
- O processo de avanço da escavação.
- O tempo disponível para a realização da escavação.
- Os materiais e equipamentos disponíveis.
- A relação entre custo de desmobilização dos equipamentos e a quantidade de trabalhos a realizar.

A cortina escolhida no presente trabalho para estabilizar a escavação apresentada no Capítulo 5 foi a cortina do tipo Perfil Pranchado.

### 2.2.2 Perfil Pranchado

Estruturas de contenção de perfis metálicos com pranchas pré-moldadas, conhecido internacionalmente como Soldier Pile Wall, King Post Wall, Muro tipo Berlim ou regionalmente como Perfil Pranchado, são constituídas de perfis metálicos espaçados geralmente entre 1,0 a 3,0 metros e entre eles são utilizados pranchas de madeira ou concreto pré fabricado.

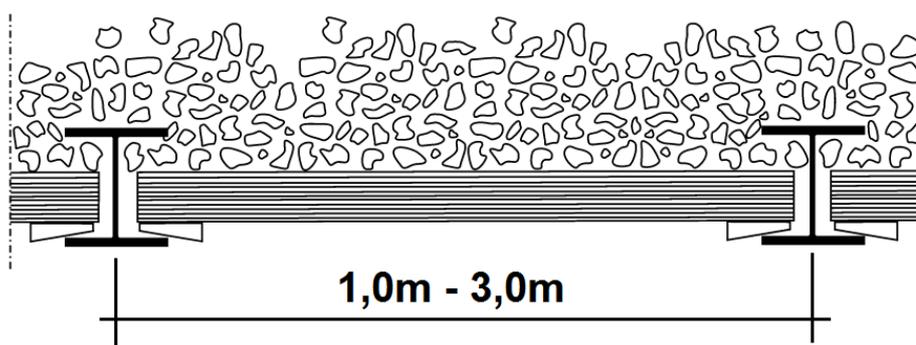


Figura 2.9 – Corte transversal de uma cortina do tipo perfil pranchado.

As cortinas tipo perfil pranchado são uma das formas mais antigas de estruturas de contenção usadas em escavações profundas. Surgiram em obras de construção do metrô de cidades como Berlim, Nova Iorque ou Londres (Figura 2.10).

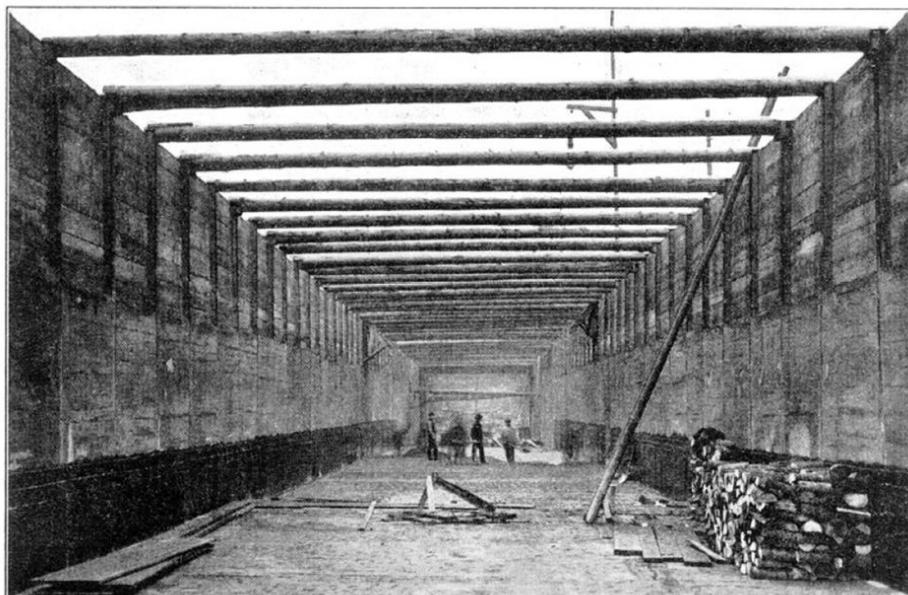


Figura 2.10 – Cortina do tipo perfil pranchado monoapoiada (Berlim, 1958)

A estrutura é composta por perfis metálicos verticais, nos quais se apoiam pranchas de concreto pré-moldado ou madeira. Os perfis, usualmente do tipo H ou I, são cravados no solo com as abas paralelas à face da escavação, com um afastamento entre 1,0 m e 3,0 m, como se apresenta na Figura 2.9.

Dispostas na horizontal entre os perfis são colocadas pranchas de madeira ou concreto com a função de conter o solo escavado e transmitir as pressões do solo para os perfis metálicos (Figura 2.9).

A Figura 2.11 mostra uma cortina tipo perfil pranchado em construção. Já a Figura 2.12 mostra uma cortina do mesmo tipo, mas multiapoiada por tirantes.



Figura 2.11 – Estrutura do tipo perfil pranchado em construção.



Figura 2.12 – Cortina atirantada do tipo perfil pranchado.

As vantagens da cortina do tipo perfil pranchado são:

- Trata-se de uma solução relativamente econômica dada a facilidade de construção, os bons rendimentos diários por área de parede e o fato de não exigir grande área para a instalação nem pessoal e tecnologia muito especializados.
- Permitem simultaneamente a execução da contenção e a realização da escavação (Figura 2.11).

Como desvantagens da sua utilização realçam-se os seguintes aspectos:

- Têm mau desempenho para níveis freáticos elevados devido ao arrastamento dos finos por percolação e à erosão interna do solo pois a água passa livremente entre pranchas.
- Exigem terrenos com importante componente coesiva para que se auto sustentem enquanto se colocam as pranchas de madeira em cada fase da escavação (Figura 2.11).
- Estão relativamente limitadas em termos de profundidade.
- A cravação dos perfis metálicos pode produzir vibrações indesejáveis.
- Têm menor rigidez face a outros tipos de estruturas de contenção.
- Podem ser afetadas por imprecisão da verticalidade na cravação dos perfis metálicos.