

# RISCOS AMBIENTAIS DE INTERCONEXÃO ENTRE AQUÍFEROS PELA CONSTRUÇÃO DE ESTACAS DE FUNDAÇÃO EM ÁREAS IMPACTADAS

Francisco Augusto Niedzielski Andrea<sup>1</sup>; Maria Claudia Barbosa<sup>2</sup>.

**Resumo** – A recuperação de zonas industriais contaminadas envolve atenção especial em relação aos riscos associados à presença de poluentes no subsolo. Um cenário muitas vezes comum é a presença, nas camadas mais superficiais do solo, de uma contaminação resultante da produção de atividades realizadas no local durante o passado. Em muitos casos, a contaminação pode ser total ou parcialmente confinada a estas camadas superficiais pela presença, a uma dada profundidade, de camadas de solo de baixa permeabilidade, que agem como barreiras naturais à propagação de contaminantes. Como, em geral, estas camadas do solo apresentam baixa capacidade de carga, é necessária a realização de fundação profunda (estacas) para a construção de novos edifícios, instalações e infra-estrutura no local. O estaqueamento levanta, no entanto, um risco de possível criação de caminhos preferenciais de migração de contaminantes provenientes das camadas superficiais em direção ao aquífero mais profundo. Assim, o presente artigo busca auxiliar os profissionais da área ambiental no gerenciamento de áreas impactadas que podem vir a servir de terrenos para a implementação de futuros empreendimentos.

**Abstract** – Recovery of polluted industrial areas involves special attention to the risks associated to the presence of pollutants in the subsurface. A common scenario is often a presence in the most superficial layers of soil from contamination resulting from the production activities on site in the past. In many cases, contamination can be partially or wholly confined to such surface layers by the presence, at a given depth, of soil layers of low permeability, which act as natural barriers against the spread of contaminants. As, in general, these layers of soil have low load capacity, it is necessary to perform the deep foundations (piles) for the construction of new buildings, facilities and infrastructure in this place. The piling up, however, a possible risk of creating preferential pathways for migration of contaminants from the surface layers toward the deeper aquifer. Thus, this paper seeks to assist environmental professionals in the management of impacted areas that may serve as ground for the implementation of future projects.

**Palavras-Chave** – Contaminação cruzada, impacto ambiental do estaqueamento, estaca Omega.

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Instituição: PETROBRAS – Engenheiro de Meio Ambiente. Endereço: Rua Henrique Valadares, 28, Centro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil – CEP: 20231-030. Tel: (21)2166-4172. [francisco.augusto@petrobras.com.br](mailto:francisco.augusto@petrobras.com.br).

<sup>2</sup> Doutora em Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Instituição: COPPE/UFRJ – Professora adjunta. Endereço: Av. Pedro Calmon, Laboratório de Geotecnia, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil – CEP: 21945-970. Tel: (21) 2562-7191. [mclaudia@coc.ufrj.br](mailto:mclaudia@coc.ufrj.br).

## 1 – INTRODUÇÃO

Conforme descrito em Westcott et al (2003) e Manassero (2009), a construção de estacas através de um subsolo estratificado dentro do qual estejam presentes aquíferos separados por camadas de solo de baixa permeabilidade pode facilitar a propagação de um aquífero a outro de um contaminante eventualmente presente no primeiro. A instalação de fundações profundas pode causar uma descontinuidade nos níveis de argila que constituem o aquífero e protegem os aquíferos profundos da contaminação presente nas camadas mais superficiais. A utilização da água para consumo doméstico e industrial pelo bombeamento dos aquíferos profundos pode também estabelecer um gradiente hidráulico, que tende a provocar um movimento de percolação dos aquíferos superiores em direção aos inferiores. Os mecanismos e fenômenos que causam a possível alteração do regime natural de movimento dos fluidos e substâncias em solução são muitos, extremamente complexos e de difícil modelagem. Além disso, estes mecanismos podem acontecer tanto durante a fase de execução das estacas quanto durante a vida útil em longo prazo. O fenômeno de migração de contaminantes é função de muitos parâmetros, incluindo o tipo de estaca utilizada e as características geométricas e o comportamento mecânico destes aquíferos.

Westcott et al (2003) descrevem os riscos ambientais potenciais da execução de estacas e métodos de melhoramento de solo *in situ* em locais contaminados. Neste trabalho, dividem-se as estacas em dois grandes grupos de acordo com o método construtivo: (i) estacas de deslocamento, e (ii) estacas de não-deslocamento.

O primeiro grupo engloba os tipos de estacas que são executadas pelo deslocamento do solo do espaço que será ocupado pelas estacas, sem remoção de solo para a superfície. Este grupo inclui as estacas executadas por cravação e parte das estacas de concreto moldadas *in situ*. O segundo grupo engloba as estacas cuja construção envolve a retirada do solo e sua substituição pela estaca, que também é feita de concreto moldado *in situ*. Este grupo inclui as estacas escavadas.

Westcott et al (2003) identificam os riscos inerentes a cada um dos grupos e apresentam medidas mitigadoras que podem ser tomadas em algumas situações. Manassero (2009) aprofunda a análise de Westcott et al (2003), resumindo os possíveis elementos favoráveis e desfavoráveis em relação aos fenômenos de contaminação cruzada envolvendo os seguintes tipos principais de estacas de fundação:

- Estacas escavadas (moldadas *in situ*);
- Estacas cravadas (pré-moldada, metálica etc).
- Estacas tipo hélice;

- Estacas de tecnologia mista (estaca Soles na Europa).

Para cada tipo Manassero (2009) considera as condições que ocorrem em fase de construção e durante a vida útil, e comenta o efeito do grupo de estacas.

Westcott et al (2003) apresentam um fluxograma de análise de risco ambiental a ser seguido em um projeto de fundação em locais contaminados, de modo a atender as exigências do órgão ambiental competente e minimizar os impactos ambientais em cada caso. Trata-se de um fluxograma de apoio às tomadas de decisão ainda na fase de projeto.

A análise do risco das fundações profundas com relação à propagação de contaminantes tem por objetivo principal avaliar se os fenômenos de aumento das interconexões entre os diferentes aquíferos devido à construção de um tipo particular de estaca de fundação podem ser significativos e, em caso afirmativo, em que circunstâncias e para que condições de contorno e se podem ser tomadas medidas mitigadoras ou se é necessário adotar outra técnica;

Westcott et al (2003) e Manassero (2009) procuram também identificar antecipadamente quais os tipos de estaca que minimizam as interconexões entre os diversos aquíferos presentes no subsolo analisado.

Os estudos já realizados sobre o assunto (Westcott et al, 2003; Boutwell et al., 2004; Kamon et al, 2005; Amatya et al, 2006; APAT, 2008; Manassero, 2009) identificam de modo geral os seguintes fatores potenciais de risco associados à presença de estacas em locais contaminados:

- Criação de um caminho preferencial para passagem de líquidos e gases no espaço lateral entre a estaca e o terreno vizinho;
- Transporte de material contaminado de uma camada para outra durante a construção da estaca, pelos equipamentos e fluidos utilizados no processo;
- Transporte de contaminantes através do próprio corpo da estaca.

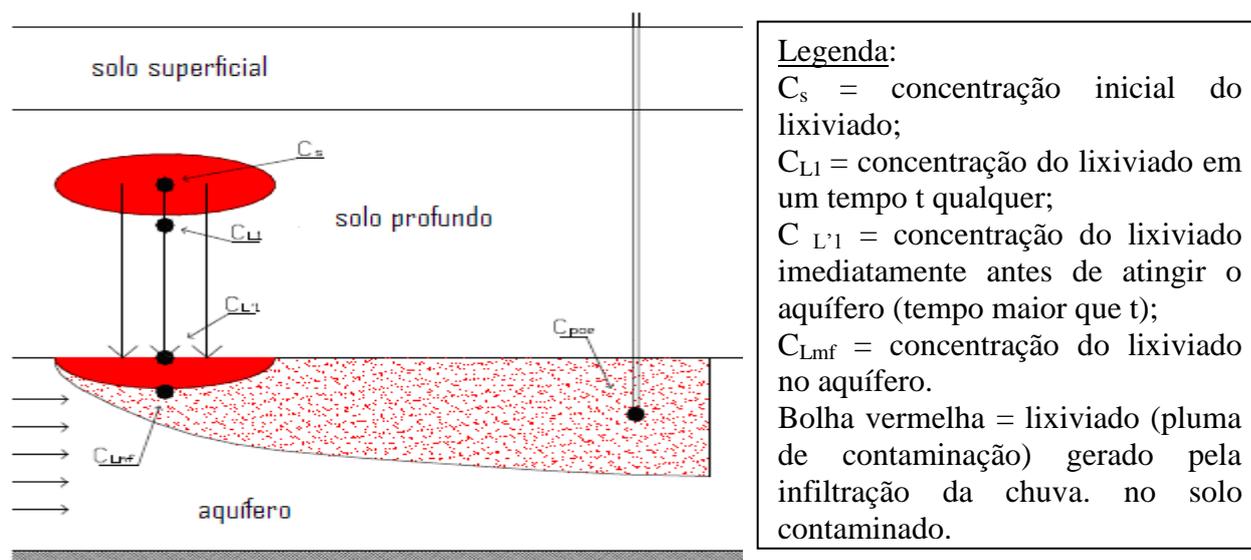
Cada um destes fatores atua de forma distinta de acordo com o tipo de estaca e com o método construtivo, e os riscos envolvidos dependem do tipo de contaminação presente, da estratigrafia e das condições de contorno em cada caso. Nos itens seguintes são resumidos as principais rotas de migração de contaminantes entre o subsolo e a superfície do terreno e os riscos ambientais associados a diferentes tipologias de estaca.

## 2 – ROTAS DE MIGRAÇÃO

### 2.1 – Lixiviação e Dispersão em Aquífero

A lixiviação consiste na infiltração da água da chuva dentro do solo que, em contato com o contaminante, dá origem à formação de um lixiviado que percola a camada não-saturada (zona vadosa) até atingir o aquífero, onde depois ocorrem fenômenos de diluição, transporte e dispersão.

Na **Figura 1** é esquematizado, a título ilustrativo, o mecanismo de transporte no caso de contaminação do solo profundo.



**Figura 1.** Lixiviação e dispersão na água subterrânea (adaptado de APAT, 2008)

Para a APAT o solo superficial é aquele compreendido entre a superfície do terreno e 1m de profundidade, enquanto solo profundo é aquele situado a uma profundidade maior do que 1m.

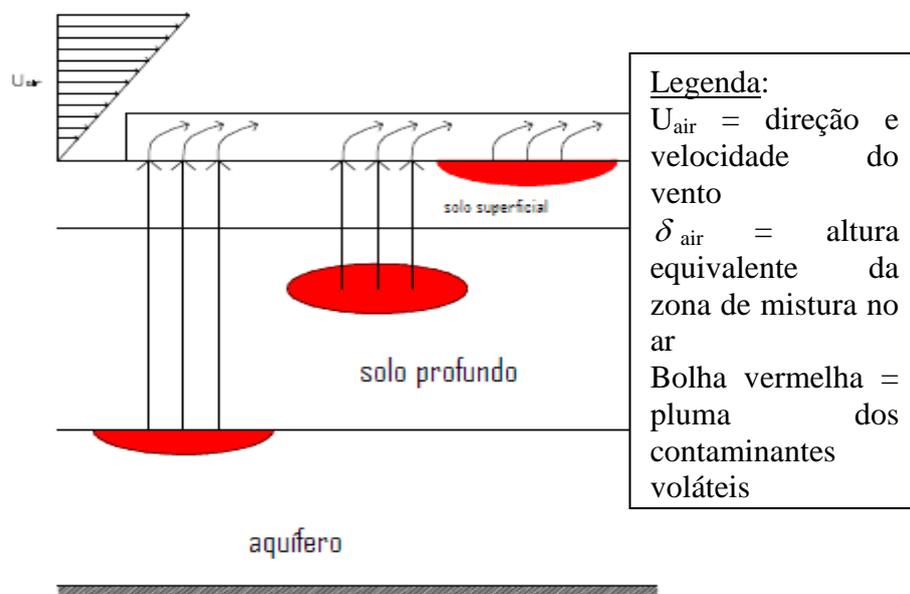
As estacas podem contribuir para esta rota de contaminação por um dos processos mencionados anteriormente. De acordo com Westcott et al (2003), essa lixiviação pode ser provocada pela perfuração de um aquífero acima do aquífero ou pela perfuração de uma camada de cobertura impermeável.

### 2.2 – Volatilização em Ambiente Aberto

Podem ocorrer também os fatores de transporte ligados à volatilidade do contaminante que, presente no solo ou no aquífero, pode ser encontrado em parte na fase de vapor e migrar em direção à superfície.

Segundo APAT (2008), para a estimativa dos mecanismos de transporte, é necessário definir a zona de mistura, ou seja, o volume dentro do qual se supõe haver a mistura entre os contaminantes voláteis presentes no solo e o próprio ar. Seguem na **Figura 2** os esquemas de transporte considerados, para a fonte dos voláteis no aquífero, na camada de solo profundo ou no solo superficial

Novamente as estacas podem contribuir para esta rota de migração.



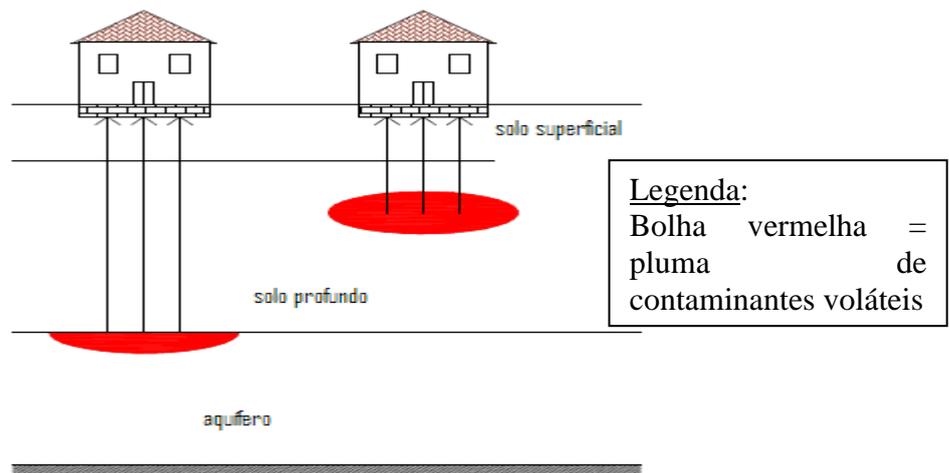
**Figura 2.** Volatilização de vapor em ambiente aberto (adaptado de APAT 2008)

### 2.3 – Volatilização em Ambiente Fechado

Essa rota é verificada no caso de uma construção na superfície da área contaminada na qual, devido a eventuais fissuras nas fundações ou nas paredes do subsolo escavado, se verifique a infiltração da fase volátil dos contaminantes.

Na **Figura 3** é mostrado o esquema relativo ao fenômeno de volatilização em ambientes fechados nos casos de fonte de contaminação no solo profundo e no aquífero.

Caso esta construção seja apoiada em fundação profunda, as estacas podem contribuir para a passagem dos voláteis em direção ao piso da construção, aumentando a concentração dos voláteis na sua base e eventualmente gerando pressão.



**Figura 3.** Volatilização de vapores em ambientes fechados (adaptado de APAT, 2008)

## 2.4 – Emissão de Particulado do Solo Superficial

O fenômeno de emissão de particulado do solo superficial é um processo no qual ocorre o soerguimento de partículas do solo superficial contaminado, após fenômenos de erosão, e a mistura (e conseqüente diluição destas partículas) com o ar acima da fonte de contaminação. A inalação de tal particulado pode ocorrer tanto em ambiente aberto como fechado.

As estacas não contribuem para esta rota de migração, com exceção das estacas escavadas devido à remoção de solo contaminado para a superfície. Mas, neste caso, deve ser prevista a destinação final correta do material proveniente da escavação, que passa a ser classificado como rejeito, devendo ser analisado no Brasil pela NBR 10.004.

## 3 – TIPOLOGIAS DE ESTACAS E RISCOS AMBIENTAIS

Discute-se a seguir a relação entre o tipo de estaca e método construtivo e os riscos ambientais mais relevantes. Foram utilizadas as discussões apresentadas em Westcott et al (2003), Boutwell et al (2004) e Manassero (2009), ajustando-as às tipologias de estacas utilizadas no Brasil e descritas em Velloso e Lopes (2010).

### 3.1 – Estacas Escavadas (de Não-Deslocamento ou Substituição)

As estacas escavadas são construídas em duas etapas:

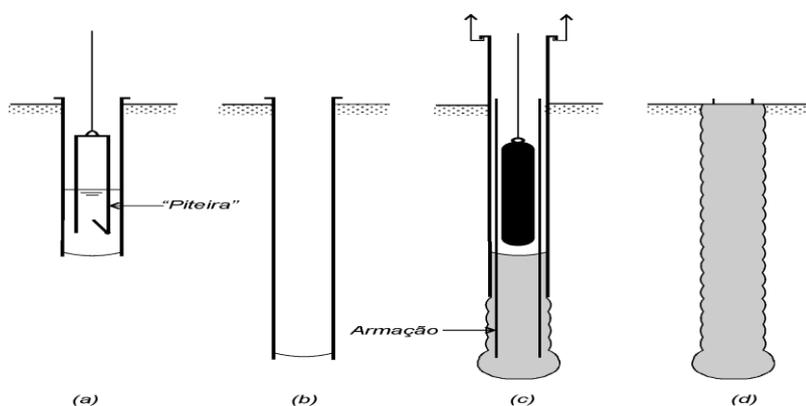
- 1) perfuração e retirada do solo no diâmetro desejado e até a profundidade de projeto;
- 2) enchimento da escavação com concreto fluido para cura *in situ*.

A etapa de escavação pode ser realizada com o auxílio de um fluido estabilizante (lama bentonítica) ou de um tubo de revestimento para dar suporte às paredes da escavação. Este revestimento pode ser retirado posteriormente durante a concretagem ou pode ser deixado no furo (revestimento perdido). A etapa de concretagem é realizada por lançamento pelo topo de um tubo tremonha, com saída do concreto na base do furo. Velloso e Lopes (2010) comentam que existe um risco de formação de cavidades atrás das paredes do revestimento durante a escavação, que pode ser minimizada pela cravação do tubo (por percussão ou vibração) até a profundidade final antes de iniciar a escavação por meio de perfuratriz.

Uma variante deste processo executivo utilizada no Brasil são as estacas tipo Strauss (Velloso e Lopes, 2010), em que o concreto vai sendo lançado em alturas de 75 cm no fundo do furo e em seguida é apiloado enquanto o tubo de revestimento é subido, sendo o procedimento repetido até alcançar uma cota pouco acima da cota de coroamento da estaca (**Figura 4**). Segundo Velloso e Lopes (2010) este tipo de estaca é desaconselhável para utilização abaixo do nível d'água por razões mecânicas, então é menos relevante para o efeito de contaminação do aquífero profundo.

Outra variante é representada pela estaca-raiz, cuja execução envolve uma etapa inicial de perfuração por rotativa com circulação de água ou lama bentonítica, no interior de um revestimento provisório, em seguida a colocação da armadura, e a etapa de injeção de argamassa de areia, cimento e água com aplicação concomitante de golpes de ar comprimido para adensar a argamassa e aumentar o contato com o solo em toda a superfície lateral. Este tipo de estaca foi desenvolvido inicialmente para reforço de encostas, sendo depois utilizada em reforço de fundações e, mais recentemente, como fundações normais (Velloso e Lopes, 2010).

Este método construtivo de estaca de não-deslocamento apresenta uma grande desvantagem inicial para realização em sítios contaminados: a retirada de solo contaminado para a superfície, onde terá que ser acondicionado de forma correta e transportado para destinação final como rejeito.



**Figura 4.** Seqüência executiva de uma estaca tipo Strauss (reproduzido de Velloso e Lopes, 2010)

De forma geral, a estaca escavada parece ser o tipo que mais promove a comunicação entre os vários aquíferos eventualmente presentes em um subsolo estratificado.

A fase crítica é a de construção. Conforme a análise de Manassero (2009), no contexto da operação de escavação é muito provável colocar em comunicação os fluidos intersticiais presentes nos vários estratos de solo, independentemente da ferramenta utilizada para a escavação e do método utilizado para garantir a estabilidade das paredes do furo.

Com as operações de escavação, é muito difícil evitar uma distribuição ao longo das paredes do furo de materiais eventualmente presentes em alguns estratos do subsolo após o progressivo afundamento do revestimento. Além disso, os fluidos presentes no furo (água ou lama bentonítica) podem incorporar e depois transmitir em profundidade o material eventualmente presente pelo efeito que as operações repetitivas de inserção e extração do equipamento de escavação provocam no nível do fluido no interior do furo, podendo alcançar o aquífero mais profundo.

Após a concretagem, os caminhos de fluxo preferenciais presentes no solo deverão estar eliminados. Segundo Manassero (2009), em geral, nas estacas escavadas se obtém um bom contato entre o concreto e as paredes da escavação, desde que o concreto esteja suficientemente fluido no momento de sua introdução. Assim sendo, a interface estaca/terreno não parece representar, em fase de operação, uma via de propagação preferencial do contaminante, mesmo na presença de esforços cíclicos e/ou transversais ao eixo da estaca devido à estrutura suportada.

### **3.2 – Estacas de Deslocamento**

Conforme descrito em Velloso e Lopes (2010) existe uma grande diversidade de estacas e processos construtivos que podem ser incluídos neste grupo:

- Estacas cravadas – estacas de madeira, estacas metálicas (perfis metálicos), estacas de concreto pré-moldado.
- Estacas tipo Franki (diferentes variantes de construção)

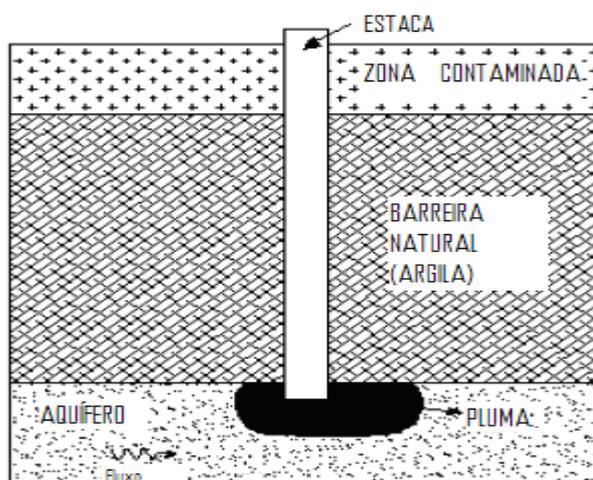
No caso de estacas cravadas, exclui-se o caminho preferencial dos contaminantes através de fluidos presentes na escavação. A cravação é feita por percussão através da queda livre de um martelo de peso conhecido. O equipamento de cravação é conhecido como bate-estaca.

Segundo a literatura, é possível identificar quatro principais mecanismos de transporte de contaminantes no caso das estacas cravadas com grandes deslocamentos de solo (Boutwell et al., 2004, 2005; Manassero 2009):

- (1) O material da estaca como a própria fonte de contaminantes.
- (2) Transferência através de estacas porosas;
- (3) Arraste em profundidade pela ponta ou pela superfície lateral da estaca de uma porção de solo contaminado das camadas superficiais;
- (4) Fluxo na interface estaca/solo ou nos arredores da estaca.

O mecanismo de transporte (1) é geralmente notado em presença de estacas de madeira, que são tratadas com substâncias químicas tóxicas (creosoto). Os produtos químicos presentes na porção da estaca em contato com o aquífero podem ser liberados na água subterrânea (**Figura 5**).

Velloso e Lopes (2010) observam que as estacas de madeira só são utilizadas atualmente em obras provisórias, mas no passado já foram utilizadas em obras permanentes. Estas estacas apresentam problemas quando presentes acima ou na zona de flutuação do nível d'água.



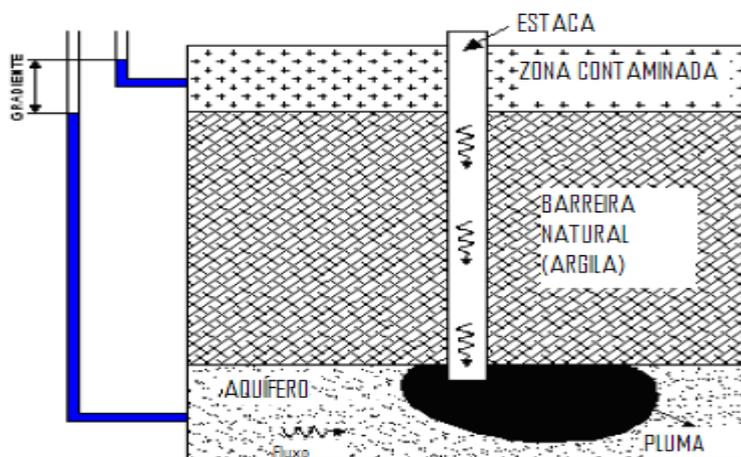
**Figura 5.** Contaminação após a cravação de estaca tratada quimicamente (adaptado de Boutwell, G. P. et al, 2005)

Este impacto também pode ocorrer no caso de estacas metálicas devido a problemas de corrosão, sobretudo em locais contaminados, onde o ambiente pode ser mais agressivo. No entanto, medidas de proteção podem ser adotadas se necessário, e estacas de aço total e permanentemente enterradas têm apresentado pouca corrosão segundo investigações realizadas por diferentes autores citados em Velloso e Lopes (2010). A corrosão é maior na zona de flutuação do nível d'água, em solos de maior salinidade e pH mais ácido. A norma brasileira permite dispensar tratamento anti-corrosão no caso de estacas total e permanentemente enterradas, admitindo uma espessura adicional de sacrifício em relação às dimensões de projeto (Velloso e Lopes, 2010). Por exemplo, para solos turfosos deve-se considerar um acréscimo de 3,0 mm e para solos contaminados no mínimo 3,2

mm, devendo-se fazer um estudo específico para o local. A corrosão do aço libera metais pesados para a água do solo, em particular Cu e Ni.

Assim, este impacto é geralmente baixo, mas a propagação do contaminante ocorre durante um longo período de tempo.

O mecanismo (2) refere-se ao fluxo que pode surgir dentro do material que constitui a estaca, quando este é mais permeável do que a camada de solo que o rodeia (**Figura 6**). Segundo Boutwell et al (2004), o concreto e a madeira podem se mostrar mais permeáveis do que a maioria das argilas que constituem a principal formação dos aquíferos presentes em locais contaminados em processo de reocupação e construção. Para isso é preciso que os contaminantes consigam penetrar na estaca, seja por difusão molecular (gradiente de concentração), seja por fluxo advectivo (gradiente hidráulico). No entanto, como a difusão molecular é um processo naturalmente muito lento, e os coeficientes de difusão variam muito pouco entre os mais diversos materiais (como, por exemplo, entre a argila e o concreto), esse componente pode ser desprezado. Assim, um transporte advectivo significativo de contaminante pode ocorrer somente na presença de um gradiente hidráulico positivo para baixo (ou seja, a carga hidráulica total em relação à ponta da estaca deve ser menor do que a carga total na área contaminada). Trata-se, como no caso anterior, de um mecanismo de transferência em longo prazo.

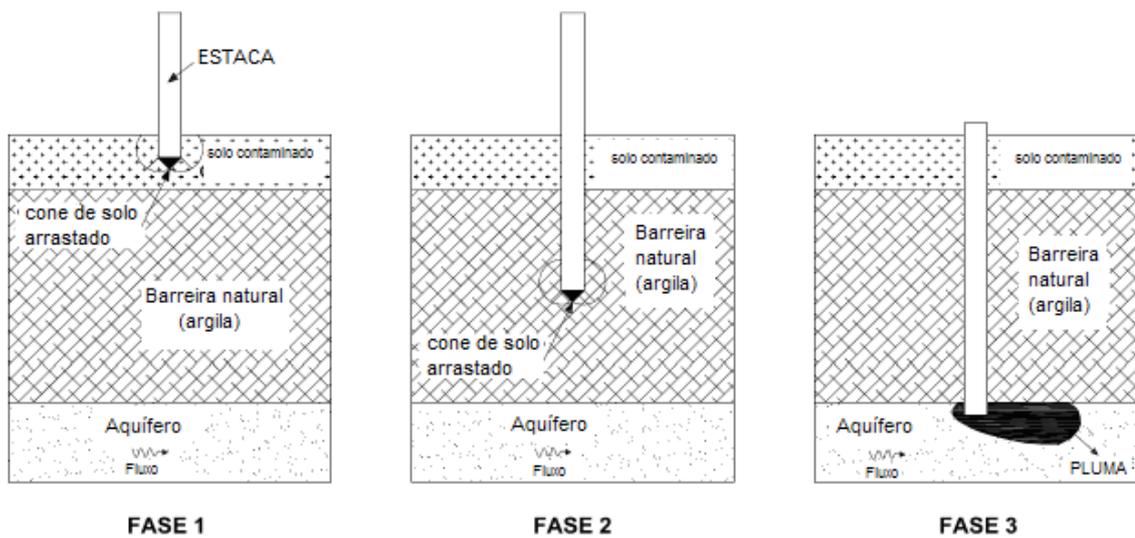


**Figura 6.** Fluxo de contaminante dentro do material que constitui a estaca (adaptado de Botwell et al, 2005)

O mecanismo de migração (3) (i.e., transferência direta), pode ocorrer devido ao arraste de solo nas proximidades da ponta da estaca durante a fase de cravação (**Figura 7**).

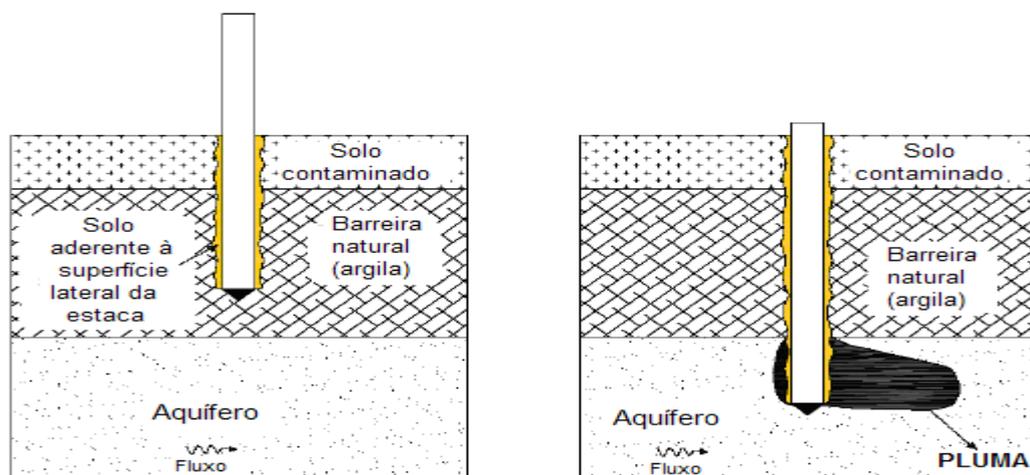
Sabe-se, com base na mecânica dos solos clássica, que embaixo da ponta de uma estaca cravada se cria um volume de solo em forma de cone durante o movimento da estaca de translação

para baixo (Salgado et al., 1998). É possível evitar este fenômeno de arraste usando estacas com forma cônica na base substituindo fisicamente a parcela de solo acoplada às próprias estacas. Desta forma, quando a estaca penetra a camada contaminada, o solo contaminado é empurrado para os lados da ponta, evitando arrastes em profundidade.



**Figura 7.** Migração de contaminante por transferência direta pela ponta da estaca (adaptado de Boutwell et al, 2005)

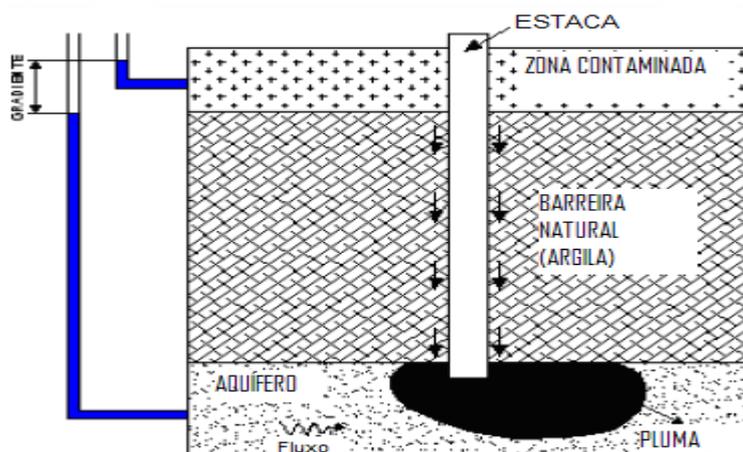
A superfície lateral da estaca pode arrastar durante a cravação uma porção de solo contaminado com os fluidos intersticiais para os aquíferos mais profundos (**Figura 8**).



**Figura 8.** Migração de contaminante por transferência direta ao longo da superfície lateral da estaca (modificado de Botwell et al, 2005)

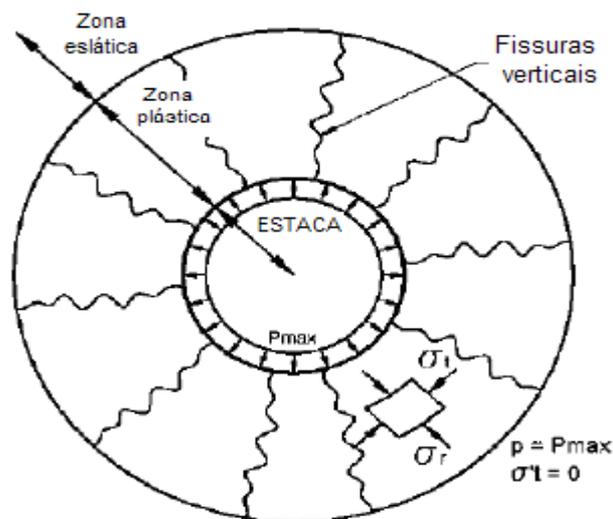
Este mecanismo é analisado com mais detalhes por Manassero (2009), a fim de fazer comparações em termos de impacto ambiental no subsolo, entre as estacas cravadas clássicas e as estacas de tecnologia mista do tipo Soles.

O último mecanismo de transporte (4) de contaminantes se refere ao fluxo que pode se estabelecer dentro de um contexto de plastificação ou de fissuração predominantemente radial em torno da estaca (**Figura 9**).



**Figura 9.** Migração de contaminante após o fluxo na interface estaca/terreno (adaptado de Boutwell et al., 2005)

Segundo Manassero (2009), este fluxo pode envolver uma porção de solo, chamada zona plástica, que é perturbada devido à operação de cravação das estacas. Quando a estaca é cravada, o solo em contato com a ponta da estaca é deslocado lateralmente a uma distância que pode ser ainda maior do que o raio da estaca ( $r_u$ ). Isto pode causar fissuras no solo e/ou discontinuidades de contato na interface estaca/solo. A uma certa distância da estaca ( $R_p > r_u$ ), as tensões provocadas pela cravação da estaca são reduzidas e não conseguem mais propagar uma discontinuidade. Assim, o solo responde de uma maneira quase-elástica exercendo tensões principalmente de compressão na zona plástica (**Figura 10**).



**Figura 10.** Estado de tensão no entorno da estaca (adaptado de Boutwell et al, 2005, em Manassero, 2009)

Manassero (2009) observa que o fenômeno da fratura hidráulica pode assumir um papel negativo em termos de fissuração e propagação de contaminantes em torno da estaca em fase de cravação. A fratura hidráulica está relacionada à geração de poropressões elevadas durante o processo de cravação da estaca, e poderia propagar fissuras verticais que aumentariam a permeabilidade do meio. No entanto, segundo o autor, em geral a elevada poro-pressão desenvolvida durante a cravação tende a se dissipar rapidamente e, portanto, as discontinuidades verticais tendem a se reduzir e a se selarem em um período de tempo muito curto.

Dependendo da resposta do solo à combinação dos dois processos, de dissipação do excesso de poropressões e de plastificação, pode tanto se formar uma região fissurada quanto uma densificação do solo na região ao redor da seção da estaca. A primeira condição favorece a formação de caminhos preferenciais de fluxo, enquanto a segunda condição produz uma zona de selagem ao redor da estaca que é desfavorável ao mecanismo de transporte da contaminação ao longo do fuste da estaca.

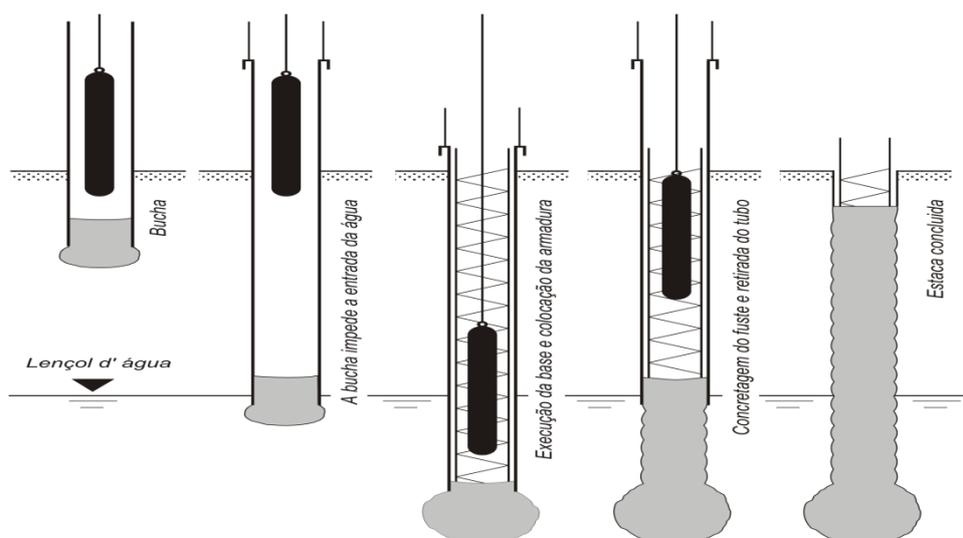
Ainda dentro deste grupo de estacas de deslocamento, podem-se incluir as estacas tipo Franki.

Velloso e Lopes (2010) descrevem várias modalidades da estaca tipo Franki: a *Standard*, a Tubada (para fundações de pontes e obras marítimas), a Mista, a com Fuste Vibrado, a Cravada e com Fuste Vibrado, e a Cravada com Ponta Aberta. Para este trabalho será abordada apenas a estaca Franki tipo *Standard*.

Como mostrado na **Figura 11**, reproduzida de Velloso e Lopes (2010), a execução deste tipo de estaca envolve as seguintes operações:

- Cravação do tubo com uma “bucha” estanque na ponta, feita de uma mistura de brita e areia que é socada contra o terreno pela queda de um pilão de 1 ou mais toneladas. O tubo é arrastado para baixo pelo atrito entre a parede do tubo e a “bucha”.
- Ao atingir a profundidade de projeto da estaca, inicia-se a etapa de expulsão da “bucha” e execução da base alargada de concreto da estaca. Isto é feito elevando um pouco o tubo de revestimento, expulsando a “bucha” por golpes do pilão, lançamento do concreto seco e sua introdução progressiva no terreno também por golpes do pilão.
- Colocação da armadura e concretagem. Conforme o concreto vai sendo lançado em camadas e apilado, o revestimento vai sendo retirado concomitantemente.

Velloso e Lopes (2010) observam que, em caso de precisar evitar vibrações excessivas ou problemas de levantamento de outras estacas pela compressão do terreno, o processo executivo é modificado para uma seqüência semelhante à das estacas escavadas, com remoção de solo para a superfície.



**Figura 11.** Esquema da seqüência construtiva da estaca Franki tipo *Standard* (reproduzido de Velloso e Lopes, 2010)

Pelas características do processo construtivo, valem para as estacas Franki do tipo *Standard* os mesmos mecanismos potenciais de transferência de contaminação (2), (3) e (4) já descritos para as estacas cravadas. Observando-se que a penetração progressiva da “bucha” apresenta o mesmo tipo de risco de transferência de solo contaminado que foi associado à penetração em profundidade da ponta da estaca cravada.

### 3.3 – Estacas Tipo Hélice Contínua

Conforme descrito em Velloso e Lopes (2010), existem diferentes modalidades de execução deste tipo de estaca, algumas envolvendo remoção total ou parcial do solo, e outras nenhuma remoção. Os impactos potenciais irão variar, portanto, com o processo executivo.

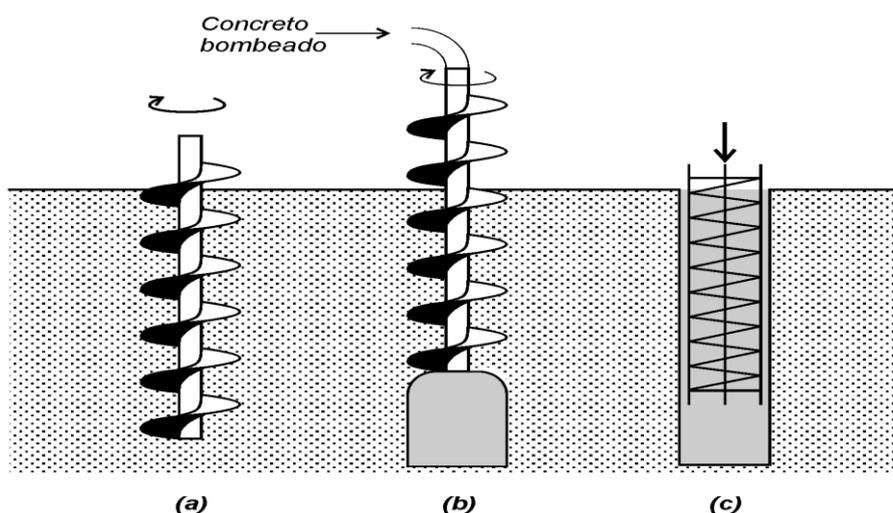
Segundo Velloso e Lopes (2010): *“A norma NBR 6122 descreve esse tipo de estaca como estaca de concreto moldada in loco, executada mediante a introdução no terreno, por rotação, de um trado helicoidal contínuo e injeção de concreto pela própria haste central do trado, simultaneamente à sua retirada. A armação sempre é colocada após a concretagem da estaca.”* (Figura 12).

Segundo Manassero (2009) a tipologia de estaca em hélice contínua é uma das mais benéficas para minimizar o fenômeno da propagação preferencial de solutos em estacas. Mas a análise do impacto depende do tipo de trado utilizado (convencional ou especial) e do procedimento de operação no caso da utilização do trado convencional. As estacas do tipo hélice contínua que utilizam trados especiais serão abordadas nos próximos itens, referentes às “estacas com tecnologia mista”, conforme Manassero (2009), e às “estacas tipo hélice contínua com deslocamento de solo”, adotando a terminologia da norma brasileira.

No caso de utilização do trado convencional, a estaca é construída pela introdução no solo de uma hélice com haste central oca e fechada na base, com um comprimento igual à profundidade da estaca e sem aporte de fluidos. Portanto, pela análise de Manassero (2009), a fase de construção da estaca em questão é certamente aquela que causa a menor perturbação hidráulica nas camadas de solo circundantes, quando comparada com as fases de construção de outros tipos de estaca descritos. O efeito de arraste (mecanismo (3)) pode ser verificado ao longo das espirais da hélice. Porém, ao final da operação de rotação se bombeia o concreto sob pressão através da haste central oca, extraindo simultaneamente a hélice sem girá-la e, portanto, arrastando parte do solo acumulado nas espirais de volta de baixo para cima.

No que diz respeito à fase de operação, valem as considerações feitas em relação às estacas escavadas por Manassero (2009), porém sem transferência de material contaminado pela ponta da estaca (inexistente). Além disso, nas fases de instalação das estacas e nas subseqüentes, a pressão adotada para o lançamento de concreto pode reforçar mais a vedação no contato estaca-solo do que no caso de estacas escavadas, de forma semelhante ao que foi descrito para a estaca tipo Strauss, porém com a pressão de injeção ao invés do apiloamento. O reforço desta vedação minimiza ou impede a formação de caminhos preferenciais ao longo do fuste da estaca - mecanismo (4).

Conforme descrito em Velloso e Lopes (2010), a quantidade de solo removido é função da relação entre as velocidades (i) de rotação e (ii) de avanço vertical do trado: se o avanço vertical for realizado a uma velocidade equivalente ao produto da velocidade de rotação pelo passo da hélice, o volume de solo removido será praticamente nulo. Se a velocidade de avanço vertical for menor do que este produto (mais lenta), o solo entrará mais facilmente dentro do trado, aumentando o volume de solo retirado e causando o desconfinamento do solo ao redor da escavação.



**Figura 12.** Esquema da seqüência construtiva da estaca tipo hélice contínua com trado convencional (reproduzido de Velloso e Lopes, 2010)

Velloso e Lopes (2010) observam que a velocidade de retirada do trado durante a etapa de concretagem deve ser suficientemente lenta para manter a pressão positiva no concreto injetado. É essa pressão que irá garantir que o concreto preencha todos os vazios deixados pela extração da hélice.

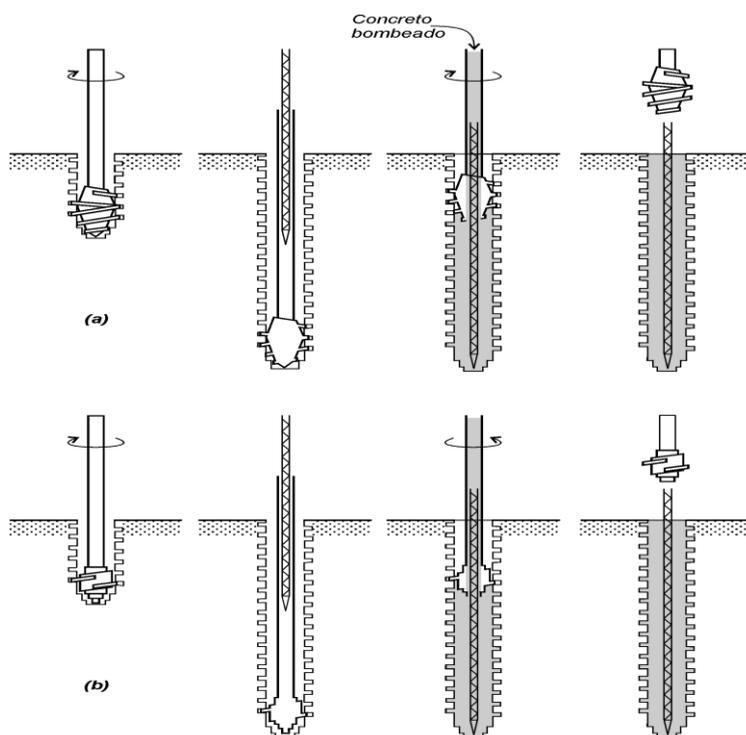
Velloso e Lopes (2010) mencionam que este tipo de estaca deve ter sua construção monitorada eletronicamente. E Manassero (2009) observa que os melhores resultados para um contato eficiente do fuste da estaca com o solo são obtidos com as estacas escavadas em hélice contínua e concretadas sob pressão, com controle automático dos volumes e das pressões de lançamento em função da velocidade de extração da hélice.

### 3.4 – Estacas Tipo Hélice com Deslocamento – Estacas Omega e Atlas

A ferramenta helicoidal (ou trado) que penetra o terreno é concebida de maneira a afastar o solo lateralmente na hora em que a ferramenta é introduzida ou extraída.

As estacas Omega podem ser executadas com diâmetros de 30 cm até 60 cm, e comprimentos de até 35m. A carga admissível pode chegar a 2000 kN (Velloso e Lopes, 2010). Como mostrado na **Figura 13 (a)**, as fases de execução dessa estaca são:

- (a) Penetração do trado por movimento de rotação e, eventualmente, auxiliada por uma força de compressão. O tubo central é fechado por uma ponta metálica que será perdida.
- (b) A penetração é levada até a profundidade prevista. Introdução da armadura no tubo (em todo o comprimento da estaca).
- (c) Enchimento do tubo com concreto plástico.
- (d) Retirada do tubo por movimento de rotação no mesmo sentido e, eventualmente, sob esforço de tração. Simultaneamente, o concreto é bombeado.



**Figura 13.** Sequência de construção das estacas (a) Omega e (b) Atlas (reproduzido de Velloso e Lopes, 2010)

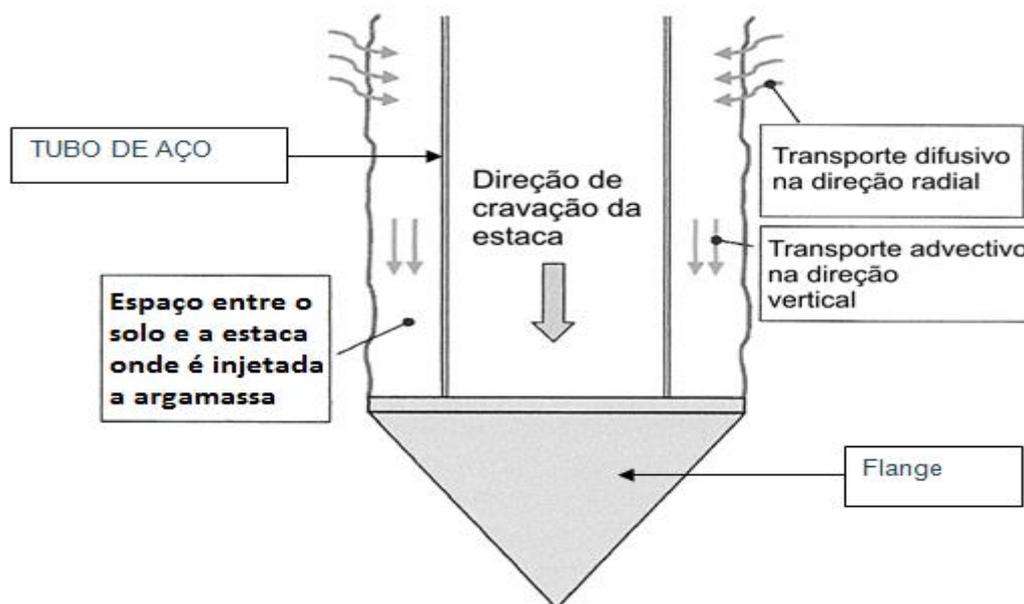
A execução da estaca Atlas, conforme mostrado na **Figura 13 (b)**, difere da Omega apenas no sentido de rotação do trado na etapa de retirada: enquanto na estaca Omega o trado deve ser girado no mesmo sentido em que foi inserido inicialmente, na Atlas o trado deve ser girado no sentido contrário.

### 3.5 – Estacas a Tecnologia Mista – Estaca Soles

Segundo Manassero (2009), as técnicas descritas anteriormente podem ser combinadas de diversas maneiras para produzir estacas que, dependendo das características específicas do solo, somam as vantagens e minimizam as desvantagens de cada tecnologia.

Assim, por exemplo, pode-se escavar a parte superior de uma estaca utilizando um revestimento provisório e continuar a perfuração com o emprego de lama bentonítica, ou então, instalar uma estaca pré-moldada cravando-a por golpes ou vibrando-a dentro de um furo escavado correspondente a sua parte superior.

Manassero (2009) descreve a estaca Soles como um tipo de estaca mista. A construção desta tipologia de estaca consiste na cravação sob pressão de um tubo de aço dotado de uma flange em sua base de diâmetro maior do que o do tubo, bombeando simultaneamente uma argamassa de alta trabalhabilidade e baixa relação água/cimento no espaço entre o tubo e a perfuração gerada pela flange (**Figura 14**).



**Figura 14.** Esquema da ponta de cravação da estaca Soles (adaptado de Manassero, 2009)

A cravação da estaca é feita através de macacos hidráulicos e junto à flange é colocada uma ponta cônica que permite reduzir o arraste junto à base. Comparado às estacas cravadas pré-moldadas, este tipo de estaca tem a vantagem de reduzir o arraste lateral na fase de construção porque em contato com o solo se encontra um material fluido (argamassa) ao invés do corpo sólido da estaca pré-moldada. Segundo Manassero (2009), o lançamento sob pressão da argamassa garante os benefícios em fase de operação iguais aos das estacas escavadas, graças a um ótimo contato

estaca-solo. Além disso, a cravação sob pressão do tipo quase-estático pode evitar, em casos particulares (i.e., atravessamento de depósitos de resíduos sólidos), a mobilização de compostos contaminantes localizados na vizinhança do grupo de estacas como poderia ocorrer devido às vibrações induzidas pelas estacas cravadas tradicionais na fase de cravação por percussão.

Este tipo de estaca, no entanto, não se encontra disponível no mercado brasileiro.

### **3.6 – Efeito Grupo segundo Manassero (2009)**

Um efeito de grupo além do somatório dos efeitos individuais das estacas só deve ocorrer se a construção de cada estaca aumentar o impacto das estacas já instaladas.

Pela análise de Manassero (2009), este efeito adicional não é esperado no caso das estacas escavadas e do tipo hélice contínua.

Tanto em fase de construção quanto em operação, não se verificam deformações dos estratos menos permeáveis a ponto de provocar a formação de descontinuidades verticais nesses estratos por causa da ação conjunta das cargas atuantes sobre todas as estacas.

Na fase de operação, a subsidência esperada de um grupo de estacas é da ordem de milímetros ou, no máximo, de poucos centímetros e tais deslocamentos, em geral, não são capazes de criar fissuras significativas em camadas de espessura superior a um metro.

Quanto às estacas cravadas, um dano adicional por efeito do grupo não pode ser descartado a priori, principalmente se as estacas têm que atravessar um estrato impermeável com comportamento mecânico frágil com amolecimento em fase de cravação.

Em cada caso, o fenômeno também é influenciado pela relativa rigidez da camada considerada e do solo abaixo, bem como pelas tensões de confinamento geostáticas atuantes na profundidade considerada. Quanto maior o confinamento, menor deve ser o impacto da cravação.

## **4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMATYA, B.L., TAKEMURA, J., KHAN, M.R.A., KUSAKABE, O. (2006a). *Centrifuge Study of Assessment of Soft Geological Barrier Subjected to Massive Pile*. Physical Modelling in Geotechnics, 6<sup>th</sup> ICPMG 2006, Ng, Zhang & Wang (Eds.), Taylor & Francis Group, London, UK, p.1203-1209.

AMATYA, B.L., TAKEMURA, J., KHAN, M.R.A., KUSAKABE, O. (2006b). *Centrifuge tests to evaluate effects of pile construction on post closure landfill sites with geological barrier*. 5<sup>th</sup> ICEG Environmental Geotechnics, London, 2006, UK, p.353-360. (*consultado o original*)

APAT (Agenzia per La Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici) (2008), *Criteri Metodologici per l'applicazione dell'analisi Assoluta di Rischio ai Siti Contaminati*. Roma.

BOUTWELL, G.P., MCMANIS, K.L., NATARAJ, M.S. (2005). *Installation of driven piles in Brownfield sites*. 2005 PDCA Winter Roundtable, 19 February 2005, Charleston, SC, USA, p.1-15.

BOUTWELL, G.P., NATARAJ, M.S., MCMANIS, K.L. (2004). *Pile Foundations – An Environmental Problem?* PileDriver (PDCA – Pile Driving Contractors Association), Boulder, CO, USA, Fall 2004, Vol.1, No 4, p. 21-30. (*consultado o original*)

KAMON, M., KATSUMI, T., INUI, T., HAMADA, S. (2005). *Environmental Acceptability of the Installation of Piles through the Bottom Clay Barrier at Coastal Landfill Sites*. Waste Containment and Remediation (ASCE Geotechnical Special Publication No. 142), ASCE, Reston, VA, USA (CD).

MANASSERO, M. (2009), *Esecuzione di Pali Soles Attraverso Falde e Terreni Contaminati*. Torino, Italia.

VELLOSO, D. A. e LOPES F. R., *Fundações Profundas – Volume 2 – Capítulo 11: Principais tipos de Fundações Profundas*. São Paulo: Ed. Oficina de textos, 2010.

WESTCOTT, F. J., SMITH, J. W. N. e LEAN, C. M. B. (2003). *Pilling in contaminated ground: environmental impacts, regulatory concerns and effective solutions*. Engineering Geology, 70, p. 259-268, UK.