

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Daniel Machado La Rosa

**MÉTODOS DE CONTROLE DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM
ESTRUTURAS ENTERRADAS**

Santa Maria, RS
2021

Daniel Machado La Rosa

**MÉTODOS DE CONTROLE DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM ESTRUTURAS
ENTERRADAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Me. Talles Augusto Araujo

Santa Maria, RS
2021

Daniel Machado La Rosa

**MÉTODOS DE CONTROLE DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM ESTRUTURAS
ENTERRADAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Aprovado em 21 de Julho de 2021:

Talles Augusto Araujo, Me. (UFSM)
(Orientador)

José Mario Doleys Soares, Dr. (UFSM)

Carlos Jose Antonio Kummel Felix, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

Por meio deste trabalho, encerro um ciclo de incalculável importância em minha vida, no qual várias pessoas contribuíram de inúmeras maneiras. Agradeço a todos por cada ato de contribuição, em especial:

Em primeiro lugar, a pessoa mais importante em minha vida, minha mãe, vertente das minhas forças e meu escudo. Agradeço a cada ensinamento, conselho, cobrança, carinho e atenção. O esforço realizado para que eu concentrasse em apenas estudar foram pilares fundamentais durante esses cinco difíceis anos de graduação. A ti, guardarei a vida todo meu amor e gratidão. Obrigado por sempre acreditar em mim.

A minha namorada Luísa, que vivenciou de maneira muito presente todo meu período acadêmico, compreendendo minhas ausências por provas, trabalhos e inúmeras tarefas cotidianas dentro da engenharia. Agradeço todas as palavras de carinho, motivação, paciência e ajuda nas mais diferentes situações. Meu muito obrigado, a uma das pessoas que mais acredita em mim.

Ao meu falecido avô, que tenho absoluta certeza que desde o momento de sua partida continuou guiando-me, protegendo e me dando força. Agradeço por cada conselho, conversa e momentos incríveis vividos.

Ao professor Talles Augusto Araujo, pela orientação, confiança e conhecimentos compartilhados, sempre com paciência e dedicação, tornando possível a conclusão deste trabalho.

Agradeço também aos meus colegas de curso, pelas ajudas, trocas de conhecimentos e os mais diferentes momentos vividos, tenho a certeza que vocês são parcela de grande importância dentro de minha formação. Obrigado por toda a parceria e companheirismo.

Por fim, quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram de alguma maneira para a minha formação como engenheiro civil e à realização deste trabalho.

Muito Obrigado.

RESUMO

MÉTODOS DE CONTROLE DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM ESTRUTURAS ENTERRADAS

AUTOR: Daniel Machado La Rosa
ORIENTADOR: Talles Augusto Araujo

Em obras enterradas torna-se essencial realização de estudos geotécnicos com intuito de obter parâmetros do solo, como o nível freático, um dos mais relevantes, com interferência direta na obra e vizinhança. Diante disso, necessita-se soluções com capacidade de barrar esse fluxo, na medida em que intercepta a percolação que emerge nos taludes ou fundo de escavações e atinge as fundações da obra. Os métodos tradicionais utilizados na engenharia dividem-se em dois grandes grupos, baseados em como o fluxo subterrâneo é controlado, sendo basicamente o primeiro pelo princípio da interceptação e remoção da água presente, já o outro grupo caracteriza-se pelo controle através da construção de barreiras físicas com finalidade de exclusão do fluxo da área a ser trabalhada ou utilizada e/ou que se constitua na obra permanente. O presente trabalho faz um estudo dos mais tradicionais métodos do segundo grupo, utilizados para controle de percolação em estruturas enterradas, por meio de revisão sistemática. Após uma explanação sobre cada sistema, partiu-se para apresentação da sequência executiva e materiais. Com vistas a apresentação de avanços tecnológicos nesta área especializada de fundações apresenta-se com maior destaque as soluções de construção de barreiras com uso de hidrofresa e a de congelamento do solo, esta como uma alternativa mais rara e para a fase construtiva de uma obra. Chega-se à conclusão da necessidade de estudo técnico para avaliar cenários de cada obra possibilitando a escolha viável técnica e economicamente do sistema de controle de fluxo subterrâneo.

Palavras chave: Controle de fluxo subterrâneo. Nível freático. Estruturas enterradas.

ABSTRACT

UNDERGROUND FLOW CONTROL METHODS IN BURIAL STRUCTURES

AUTHOR: Daniel Machado La Rosa

ADVISOR: Talles Augusto Araujo

In buried earthworks, it becomes essential the need for knowledge of the implantation site, consequently the doing of geotechnical studies with the objective of obtaining soil parameters. Among these, the groundwater level is one of the most relevant, with direct impact in the construction. With groundwater at a high level, a point of detriment of the execution, it becomes necessary to control the percolation of water, through solutions with the capacity to stop this flow, to the extent that it intercepts the percolation that emerges on the slopes or at the bottom of excavations. The traditional methods used in engineering are divided into two large groups, based on how the underground flow is controlled, being basically the first by the principle of interruption and removal of the present water, already the other group is characterized by control through the construction of physical barriers with stone to exclude the flow from the area to be worked on. The present work studies the most traditional methods used to control percolation in buried structures, through a systematic review carried out through the study of literature and databases of scientific articles, both national and international. It is concluded that there is a need for a complex technical study with analysis of the evaluation of the scenarios for each project and the peculiarities of the soil to be explored, for the most technically and economically viable choice of the underground flow control system.

Keywords: Underground flow control. Groundwater level. Buried structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nível freático principal e suspenso.....	18
Figura 2 - Rede de fluxo estabelecida ilustrando um fluxo padrão por baixo de uma parede de escoramento de uma escavação ou para o interior de um subsolo com escoramento contínuo.....	25
Figura 3 - Paredes de estacas prancha metálicas ou de perfis metálicos com pranchada de madeira e estroncas.....	26
Figura 4 – Seção esquemática (em planta e transversal) de parede diafragma	28
Figura 5 – Hidrofresa posicionada para iniciar escavação.....	29
Figura 6 – Fresas e “dentes” da peça de corte do solo da hidrofresa.....	30
Figura 6b – Esquema mostra uma seção transversal/corte de dois tipos de barreiras físicas ou paredes diafragma (rígidas ou plásticas) verticais, onde fica destacada uma das grandes virtudes da utilização da hidrofresa.....	32
Figura 7 – Esquema de tampão de fundo em colunas de <i>Jet grouting</i> com engastamento nas paredes de contenção.....	34
Figura 8 – Fluxograma evolutivo da técnica do <i>jet grouting</i>	35
Figura 9 – Seção esquemática do parede de estaca secante, possuindo estacas armadas (macho) e não armadas (fêmea).....	37
Figura 10 – Congelamento artificial do terreno utilizado como reforço e estrutura de controle de fluxo d’água para escavação.....	38
Figura 11 – Representação base de sistema de congelamento de solos, através de conduto de resfriamento inserido no solo.....	39
Figura 12 – Representação base de sistema de congelamento de solos, através de conduto de resfriamento inserido no solo.....	43
Figura 13 - Recarga de um aquífero para evitar recalques diferenciais na obra do vizinho, decorrente de um rebaixamento do lençol d’água.....	44
Figura 14 – Execução de parede diafragma atirantada como solução de contenção e fluxo subterrâneo para implantação de níveis de subsolo.....	47
Figura 15 – Mureta guia executada em concreto armado para posterior execução de parede diafragma.....	49
Figura 16 – Penetração máxima da lama bentonítica na parede da escavação e formação do filme protetor responsável por não permitir a perda do restante do fluído presente na vala de escavação.....	51
Figura 17 – Instalações da central de lama responsável pelo tratamento e limpeza do fluído utilizado.....	51
Figura 18 – <i>Clamshell</i> acoplado a guindaste de esteira inserindo sua garra no solo para desagregação do mesmo.....	52
Figura 19 – Hidrofresa.....	53
Figura 20 – Sequência de execução dos painéis.....	54
Figura 21 – Esquema completo de concretagem de parede diafragma rígida.....	55
Figura 22 – Adesão entre colunas <i>jet grouting</i> formando um bloco único com grande adesão e estanque.....	57
Figura 23 – Esquema da utilização de um tampão de fundo em vala ou em um subsolo de edifício com a utilização de <i>jet Grouting</i> ou suas técnicas derivadas do jateamento do solo com aglutinante (calda de cimento).....	58
Figura 24 – Ilustração de execução de laje tampão de fundo, através da execução de colunas <i>jet grouting</i> interconectadas.....	59
Figura 25 – Esquema 3D de tampão de <i>jet grouting</i>	60

Figura 26 – Locação das colunas na malha <i>jet grouting</i> no tampão de fundo com sobreposição de áreas para garantir a estanqueidade.....	60
Figura 27 – Sequência de execução de colunas de <i>jet grouting</i>	61
Figura 28 – bico de injeção utilizados no sistema <i>Jet grouting</i> de jato simples	62
Figura 29 – bico de injeção do sistema <i>Jet grouting</i> de jato duplo.....	62
Figura 30 – bico de injeção do sistema <i>Jet grouting</i> de jato triplo.....	63
Figura 31 – Processo de execução da técnica de <i>jet grouting</i>	64
Figura 32 – Cortina circular de estaca secante.....	65
Figura 33 – Ilustração de cortina estaca secante.....	66
Figura 34 – Execução das formas para mureta guia.....	67
Figura 35 – Sequência executiva sugerida indicada para minimizar possíveis pontos falhos na parede estanque de estacas secantes	68
Figura 36 – Solo congelado para construção de um túnel.....	70
Figura 37 – Esquema de congelamento por Salmoura.....	72
Figura 38 – Esquema de congelamento por Nitrogênio líquido.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão do solo em função de zonas baseando na água infiltrada no mesmo.....	17
Tabela 2 – Valores típicos de Coeficiente de Permeabilidade em cm/s.....	20
Tabela 3 – Aplicabilidade geral dos sistemas de rebaixamento.....	21

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAS	Associação Brasileira de Águas subterrâneas
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
K	Coeficiente de permeabilidade
MMA	Ministério do Meio Ambiente
N ₂	Gás Nitrogênio
PVC	Policloreto de Vinila
NSPT	Índice de Resistência à Penetração do Solo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivo específico	14
2.1 SISTEMA SOLO-ÁGUA-AR	15
2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	15
2.3 SUBSOLO	16
2.4 AQUÍFERO	17
2.5 PERMEABILIDADE	19
2.6 MÉTODOS DE CONTROLE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM SUBSOLOS DE EDIFÍCIOS	22
2.6.1 PERFIS METÁLICOS COM PRANCHÕES DE MADEIRA.....	25
2.6.2 PAREDE DIAFRAGMA	26
2.6.3 Clamshell	28
2.6.4 Hidrofresa	28
2.6.5 Lama Bentonítica	32
2.7 COLUNAS DE SOLO/CIMENTO – CCP, JET GROUTING, ROTOCRETE	33
2.8 ESTACA SECANTE.....	36
2.9 CONGELAMENTO ARTIFICIAL DO SOLO.....	37
3 MÉTODOS DE CONTROLE DE FLUXO SUBTERRÂNEO	41
3.1 REBAIXAMENTO TEMPORÁRIO	41
3.2 PAREDE DIAFRAGMA.....	45
3.2.1 Processo executivo	48
3.3 JET GROUTING	55
3.3.1 Processo executivo.....	60
3.4 ESTACA SECANTE.....	64
3.4.1 Processo executivo	66
3.5 CONGELAMENTO ARTIFICIAL DO SOLO.....	68
3.5.1 Processo executivo	70
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5 OPORTUNIDADES DE TRABALHOS FUTUROS	76
6 BIBLIOGRAFIA	77

1 INTRODUÇÃO

O desenho clássico da evolução humana mostra nossos antepassados em fila, evidenciando mudanças biológicas, por outro lado, de não tão fácil percepção, essas transformações abrangem também no modo de habitação. Com o fim do nomadismo, em pequenos grupos, a sobrevivência em um ambiente hostil passou a ser indispensável, acarretando a necessidade de moradas permanentes, diante disso, as cavernas foram as primeiras a cumprir tal função. Neste cenário, em busca de proteção contra animais, frio e chuva, o homem primitivo refugiou-se, presenciando o nascimento do que vem a ser um dos primeiros e mais complexos problemas da engenharia civil, a água, por meio do fluxo que ascendia nas paredes das cavernas.

Com o passar das eras, o crescimento populacional tornou-se campo de constantes estudos com intuito de criar modelos que possibilitassem entender sua evolução por meio de parâmetros característicos. Por intermédio destes, constatou-se importante mudança no modo de vida no século XX, em virtude não apenas da industrialização, mas também do esvaziamento rural, com as fazendas deixando de ser residência principal, perdendo posto para casa na cidade, recebendo seus donos na maioria das vezes em época do corte e moenda da cana. Diante disso, o crescimento urbano, de maneira paralela acompanhou a evolução populacional, resultando em expansões de seus centros. Consequentemente, valorização de espaço e necessidade de otimiza-lo, tal situação fomentou novas tecnologias construtivas. De acordo com Guimarães (2015), para aproveitamento máximo, estruturas enterradas passaram a ser necessárias, não somente subsolos de garagens, mas túneis, reservatórios de água e outras diversas com inúmeras finalidades.

Estas, trazem consigo desafios complexos e não totalmente previsíveis, uma vez que são relacionados com fatores que incluem, características e condições do solo e, principalmente, presença do lençol freático, fator que oferece limitações construtivas, exigindo de engenheiros expertise para elaboração de soluções técnicas e economicamente viáveis. A padronização de sistemas construtivos sem o devido estudo e consideração ao fluxo subterrâneo contribui para a estatística de graves falhas técnicas dentro da engenharia civil.

A partir disso, no presente trabalho foram estudadas soluções de controle de fluxo subterrâneo, com a finalidade de apresentar métodos efetivos, viáveis e competentes a ser utilizados em estruturas enterradas evitando problemas de percolação para o interior das mesmas. Portanto, como analisa Guimarães (2015), não deve ser admitido que, com a

disponibilidade tecnológica existente, estruturas enterradas apresentem problemas detectados ainda em cavernas pré-históricas, devido a falhas construtivas, negligência ou imperícia.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento acelerado da população, principalmente em centros urbanos, diariamente a engenharia civil é desafiada na grande demanda de obras com finalidade de sanar anseios da sociedade, na tentativa de aumento da qualidade de vida. A maneira de construir foi sendo remodelada, permitindo uma maior eficácia, com projetos baseados em estudos técnicos a fim de aumentar a vida útil das estruturas (MILITITISK, 2016).

A grande densidade populacional dos centros urbanos impõe a necessidade de projetos alinhados ao viés da otimização de espaços, em virtude das áreas ainda não construídas possuírem dimensões reduzidas em comparação a décadas passadas, um dos aspectos responsáveis pelo aumento no uso de estruturas enterradas. Entretanto, essas trazem consigo importantes dificuldades como o controle da percolação d'água, nos períodos construtivos e de operação (permanente ou ao longo da sua vida útil) e de, inclusive, de controlar sua influência nas estruturas vizinhas em todos esses períodos. Segundo Hachich et al. (1998), a falta de conhecimento teórico sobre a mesma, faz com que seja um dos principais problemas a ser resolvido nas construções. Do mesmo modo Ripper (1996), vai além, e aponta aquela como o principal inimigo das construções, seja por falta de conhecimento de soluções adequadas, senso de responsabilidade ou até mesmo negligência na execução.

Simultaneamente a alavancada de demandas construtivas, a exigência do mercado em minimizar erros e acidentes aumentou com o aparecimento de novas tecnologias, abrangendo concepção, análise e técnicas construtivas. Embora todo o ganho tecnológico dentro da engenharia civil nos últimos anos, percebe-se inevitáveis falhas involuntárias e casos de imperícia em controle de fluxo subterrâneo para o interior de estruturas enterradas, ocasionando desempenho insatisfatório, se confrontadas com as finalidades para que são construídas.

Assim sendo, naturalmente ocorre o surgimento de uma pergunta. Como é possível controlar o fluxo subterrâneo em estruturas enterradas com intuito de evitar ou minimizar os efeitos decorrentes da entrada de água no interior das mesmas? Para responder esse questionamento, justifica-se a realização do presente trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é identificar, apresentar e analisar as soluções mais utilizadas no controle do fluxo das águas subterrâneas para o interior de estruturas enterradas, tais como os solos de edifícios, isto, tanto na sua fase construtiva (temporária) como de utilização (permanente).

1.2.2 Objetivo específico

Apresentar, caracterizar e analisar algumas das principais soluções de controle das águas subterrâneas, juntamente com etapas construtivas, mediante duas formas ou métodos convencionais, sendo as seguintes:

- a) interceptação e remoção da água do subsolo por meio de sistemas de rebaixamento do lençol freático temporário;
- b) método de exclusão, dividido em dois grupos amplos, sendo eles: as barreiras discretas de permeabilidade muito baixa, fisicamente inserido ou construído no solo, misturas com rocha ou embutidas na mesma e técnicas que reduzem a permeabilidade do solo *in situ*, caracterizando-se por serem de maneira permanente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMA SOLO-ÁGUA-AR

Vargas (1977), define solo como todo material que oferece baixa resistência a sua remoção, podendo ser escavado sem utilização de técnicas especiais, como explosivos. De modo geral, estabelecido como conjunto de minerais e matéria orgânica.

Ainda o mesmo autor, caracteriza o solo como elemento único, trifásico, existindo em sua composição ar, partículas sólidas e água.

A fração sólida apresenta em sua formação diferentes tamanhos de elementos orgânicos e minerais, a união desses resulta diretamente na forma do solo, sua classificação é feita como argila, silte, areia e pedregulho por meio da dimensão dos grãos e textura (SOARES, 2006).

A parte fluída na maioria das vezes é composta pela mistura de matéria orgânica juntamente com minerais dissolvidos em água, sendo significativa para determinar o grau de saturação (PINTO, 2006). De acordo com Soares (2006), essa parcela preenche a maior parte dos espaços existentes no solo.

Em relação a fase gasosa “é constituída pelo ar livre (mistura de vários gases) e vapor de água, estando presente no espaço poroso não ocupado pela água, uma vez que o solo esteja em um estado não saturado ou “seco”.” (SOARES, 2006 p. 10).

Segundo Pinto (2006), a complexidade do comportamento da água vai além da ideia que sua simples composição química sugere, mantendo constante deslocamento no interior do solo. Esse, tem seu desempenho diretamente relacionado a quantidade de cada uma das três fases existentes (líquida, sólida e gasosa).

2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A Associação Brasileira de Águas subterrâneas (2020), define água subterrânea como toda aquela que ocorre abaixo da superfície da terra, ocupando os vazios das rochas sedimentares ou falha das rochas compactas.

Segundo Chiossi (2013), a composição da terra formada por rochas em seu interior funciona como reservatório subterrâneo, não somente de retenção, mas também movimentação das águas que venham a infiltrar. Na grande maioria das vezes a formação do subsolo possui em sua constituição rochas com significativos interstícios, abrangendo inúmeras dimensões e

características, originando os aquíferos. Ainda que esses vazios e fraturas possam atingir dimensões de cavernas, a maioria restringe-se a pequenos tamanhos.

De acordo com Neto (2018, p. 200),

A forma e as dimensões dos canalículos são decisivas para que este fluxo ocorra com maior ou menor dificuldade. De uma maneira muito aproximada, pode-se admitir que o “diâmetro” dos canalículos seja da mesma ordem de grandeza que o “diâmetro” dos grãos que os formam. Assim, os solos grossos apresentam maior permeabilidade que os solos finos, isto é, menor dificuldade para a passagem da água através de seus vazios e, por isto, formam os aquíferos, onde se movimenta a água subterrânea, de primordial importância para os seres vivos deste planeta.

O entendimento do comportamento da água subsuperficial é de suma importância para a Geologia de engenharia, em virtude dos efeitos que aquela exerce em processos de dinâmica superficial e estabilidade de obras. A primeira condição trata-se da alternância de volume da água presente no solo, instabilizando-o, dando origem a recalques ou colapsos. As situações de instabilidade estão diretamente relacionadas a resistência e deformabilidade do maciço, pela ação da força de escoamento da água, afetando taludes naturais e escavados em muitas vezes provocando erosão interna pela elevação do gradiente hidráulico.

2.3 SUBSOLO

A ABAS (2020) divide os perfis do terreno em duas regiões, como mostra a tabela 1, em função da profundidade que a água infiltrada atinge no solo. A primeira zona, não saturada ou de aeração, encontra-se mais próxima da superfície, nível natural do terreno, possuindo vazios parcialmente preenchidos por ar juntamente com água retida pela ação da força de adesão. Já a força da gravidade faz com que outra parcela infiltrada ultrapasse a zona de aeração e atinja maior profundidade, chegando até a região saturada, onde todos os espaços intergranulares encontram-se preenchidos totalmente por água.

Os solos geralmente são divididos pela linha freática em duas zonas: saturada e não saturada. A zona saturada fica situada abaixo do nível d' água e todos os vazios encontram-se preenchidos por água, gerando pressões de água positivas. A zona não saturada encontra-se entre o nível d' água e o nível do terreno, sendo que o grau de saturação pode variar de 100% a zero. Solos não saturados envolvem mais de 2 fases (ar, água, sólidos e membrana contrátil no contato ar-água) e as pressões na água são negativas (GERSCOVICH, 2016, p. 56).

Tabela 1 – Divisão do solo em função de zonas baseando na água infiltrada no mesmo.



ZONA DE	ÁGUA	FASE	PRESSÃO	PROCESSO
AERAÇÃO OU VADOSA	HIGROSCÓPICA (SATURAÇÃO CAPILAR DESCONTÍNUA)	GASOSA	$P = \text{ATMOSFÉRICA}$	INFILTRAÇÃO ↓ FLUXO DESCENDENTE
	PELICULAR (SATURAÇÃO CAPILAR SEMICONTÍNUA)	LÍQUIDA	$P < \text{ATMOSFÉRICA}$	
	CAPILAR (SATURAÇÃO CAPILAR CONTÍNUA)	LÍQUIDA	$P < \text{ATMOSFÉRICA}$	
SATURAÇÃO	 NÍVEL D'ÁGUA ÁGUA SUBTERRÂNEA (CONFINADA OU NÃO-CONFINADA)	LÍQUIDA	$P < \text{ATMOSFÉRICA}$ $P > \text{ATMOSFÉRICA}$	PERCOLAÇÃO  FLUXO LATERAL

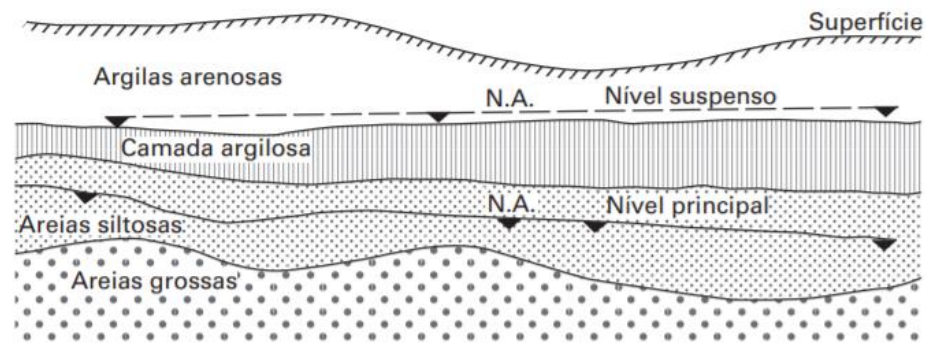
Fonte: Chiossi (2013)

2.4 AQUÍFERO

Conforme Chiossi (2013), os aquíferos são materiais ou rochas com capacidade de armazenamento de volumes de água possibilitando a circulação da mesma. Diante disso, são classificados, abrangendo rochas sedimentares com porosidade granular (arenitos), cárstica (calcários) com porosidade devido a feitos tectônicos ou de alteração e ainda maciços rochosos com grande número de descontinuidades que apresentam porosidade de fraturas. Os aquíferos também são classificados quanto a pressão que a água armazenada está submetida, onde os ditos freáticos ou livres estão sob pressões equivalentes ou inferiores a atmosfera, já nos artesianos ou confinados a água está submetida a pressões maiores que a atmosférica com o nível d'água chamado de piezométrico.

Ainda Chiossi (2013), destaca um caso particular de aquífero freático, chamados de suspensos, com distribuição espacial geralmente restrita e existência não permanente, formando-se em virtude do aprisionamento de porções de água que se infiltra no terreno em leitos impermeáveis, geralmente argilas, formando lençol suspenso com dificuldade de alcançar o lençol freático, como mostra a figura 2.

Figura 1 – Nível freático principal e suspenso.



Fonte: CHIOSSI, p. 197 (2013).

Segundo Azevedo e Albuquerque Filho apud Oliveira et al. (1998), água subterrânea em algumas situações se encontra praticamente estática, ou seja, não havendo circulação. Situação que acontece nos Aquicludes, que são materiais porosos, que contêm água nos seus interstícios, muitas vezes atingindo até o grau de saturação, mas não permitem a sua circulação. São rochas ou materiais essencialmente argilosos, nos quais a água está firmemente fixada em poros de diminutas dimensões, por pressões moleculares e tensões superficiais e a circulação é praticamente nula.

Tratando-se de materiais impermeáveis, como rochas duras, cristalinas, metamórficas e vulcânicas sem fraturamento ou alteração, presentes na natureza de maneira isolada ou formando pacotes de dois ou mais estratos dão origem aos chamados Aquífugos, que tanto não contém como não transmite água. Já os Aquitardos, permitem a circulação daquela, porém de maneira muito lenta, por sua formação ser basicamente de rochas porosas, incluídos neste grupo os materiais como argilas siltsosas ou arenosas.

Os estudos dos aquíferos, suas aplicações e modelagem numérica para a resolução de problemas de engenharia estão inseridos nas áreas especializadas de hidrogeologia e geotecnia. Estas, por sua vez estão inseridas na geologia de engenharia, mecânica dos solos, obras de terra e fundações. Constituindo-se em campos especializados aplicados a soluções de problemas de diversas engenharias, tais como a Engenharia de Minas, Civil, Agrônômica, Agrícola e outras derivadas destas.

Velloso (1988) e Alonso (1999), de forma relativamente simples e objetiva, apresentam a fundamentação teórica para os projetos de rebaixamento e controle do lençol freático de obras subterrâneas, isto tendo como base os tipos de aquíferos e em associação com as formas ou

condições de escoamento para o interior das escavações ou subsolos. Estas abrangendo as condições hidrogeológicas, geotécnicas, de percolação, o tipo de fonte (radial ou linear) para o rebaixamento e as demais condições de contorno de cada problema de obras de terra.

Desta forma, com base nas premissas referidas (tipo de aquífero, fonte e condições de contorno) e as leis de Darcy, Bernoulli e a teoria das redes de fluxo (solução da Equação de Laplace) pode-se obter as equações matemáticas básicas para a determinação da vazão de percolação e a determinação do número de poços e/ou poços necessários para produzir e manter o controle de um rebaixamento do lençol freático – assunto corriqueiro na prática de projetos de sistemas de rebaixamento do lençol freático de escavações de subsolos de edifícios e que estão muito bem apresentados em Velloso (1988) e Alonso (1999).

2.5 PERMEABILIDADE

Propriedade do solo que indica a maior ou menor facilidade em que um fluido passa através de seus poros, expressa numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (k).

Desta maneira Neto (2018), diz que por meio dos canalículos do solo existente entre as partículas acontece a passagem de água, propriedade típica de corpos particulados e denominada de permeabilidade. Do mesmo modo Das (2011), relata a mesma como a passagem de água nos vazios interconectados do solo, dos pontos de maior energia para os de menores.

Dentre os parâmetros geotécnicos, este, apresenta um maior intervalo de variação, como mostra a tabela 2. Torna-se de fácil percepção quando comparado os valores de coeficiente de permeabilidade da areia pura e da misturada com pedregulho, obtendo-se diferença de até 1000 vezes. Caputo (2008), aponta a obtenção do coeficiente de permeabilidade por meio de métodos indiretos, ensaios *in situ* e permeâmetros em laboratório.

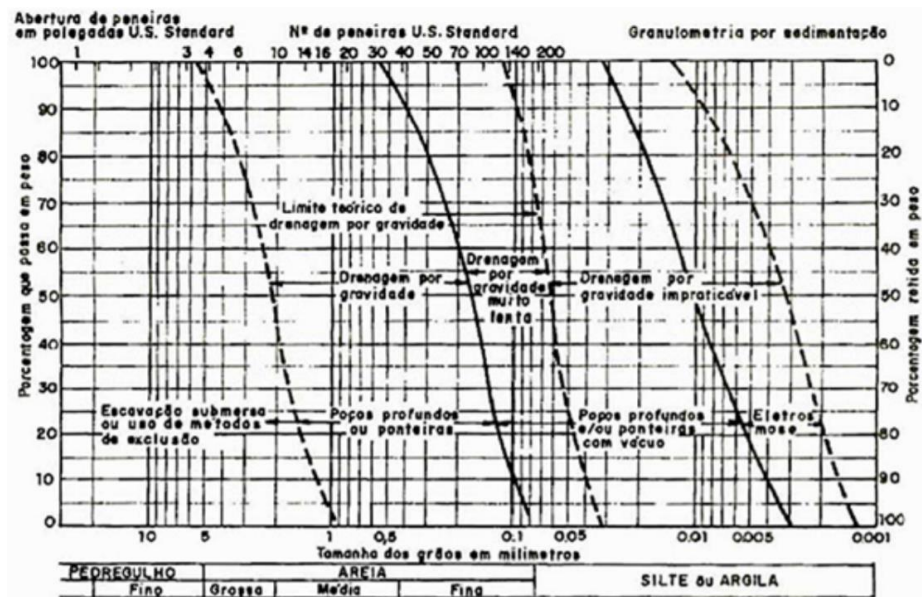
Tabela 2 – Valores típicos de Coeficiente de Permeabilidade em cm/s.

Material	Coeficiente de Permeabilidade (k)
Rochas Maciças	$< 10^{-9}$
Argilas Sedimentares	$10^{-7} - 10^{-8}$
Solos Compactados (k_v)	$10^{-6} - 10^{-7}$
Siltos	10^{-6}
Solos Compactados (k_h)	$10^{-4} - 10^{-6}$
Areias Finas	10^{-3}
Areias Grossas	10^{-2}
Brita	$> 10^{-1}$

Fonte: Caputo (2008).

Para Grandis (1998 apud HACHICH et al., 1998) a permeabilidade e a drenabilidade de um solo ou uma rocha podem definir o sistema de rebaixamento mais adequado tecnicamente a ser utilizado - influenciando diretamente na vazão de saída. Por meio Tabela 3, Grandis (1998 apud HACHICH et al., 1998), destaca a relação entre a granulometria do terreno e o método de rebaixamento a ser executado. Nesta tabela, são indicados o campo (faixas granulométricas) de aplicação de cada sistema de rebaixamento e seus limites, as faixas de facilidade e/ou até o limite da drenagem por gravidade impraticável, que influência no sistema de esgotamento da água (com bombas de recalque e/ou vácuo) e até a faixa das argilas e, no caso, da faixa de sistema de rebaixamento por eletrosmose (sem aplicação corrente no Brasil).

Tabela 3 – Aplicabilidade geral dos sistemas de rebaixamento



Fonte: Grandis (1998).

Grandis (1998 apud HACHICH et al., 1998), ainda na tabela 3, faz referência de que os métodos da exclusão são, convencionalmente, utilizados para terrenos muito permeáveis, tais como areias grossas, misturas de areias grossas e pedregulhos/cascalhos finos e cascalhos grossos. Estes materiais muitas vezes estão associados a grandes fontes de alimentação, tais como rios, lagos ou o mar – o que significaria grandes vazões de rebaixamento, muito comum em obras de saneamento e barragens. Isto torna impraticável o rebaixamento do lençol freático, optando-se pelos métodos da exclusão.

Desta forma, em função da granulometria e drenabilidade, com os métodos da exclusão faz-se a separação da água subterrânea (estática ou dinâmica/submetida ao fluxo) e a escavação através da adoção de uma barreira física que exclua a água da mesma – com isto, tem-se normalmente a manutenção da linha freática na sua posição inicial ou sem rebaixamento.

As barreiras físicas, que impedem o acesso da água subterrânea à escavação, normalmente em solos de edifícios são estruturas estanques verticais e/ou horizontais, tais como as paredes diafragma rígidas (concreto armado) verticais e as lajes de subpressão ou tampões, conforme demonstrado no presente trabalho.

Os métodos da exclusão são muito utilizados em construções de solos de edifícios em perímetros urbanos densamente povoados e quando da ocorrência de solos na vizinhança da obra, tais como as areias fofas e solos argilosos muito moles ou moles e até de argilas médias (onde a variação da tensão efetiva provocada pelo rebaixamento ultrapassa a tensão de pré-adensamento da argila). Tudo com vistas a facilitar os processos construtivos, controlar a

percolação para o interior das obras e não provocar recalques diferenciais nas construções vizinhas.

No tocante as obras de barragens, ensecadeiras e obras de saneamento, como em diques de proteção contra enchentes, os métodos da exclusão com barreiras físicas são diversas e abrangem, principalmente, as faixas granulométricas (tabela 3) das areias, cascalhos e suas misturas, rochas muito fraturadas ou todos os tipos de materiais com alta permeabilidade. Estes tipos de materiais, no geral, estão associados a grandes fontes de água e de vazões de percolação pela fundação dos barramentos referidos. Estas vazões de percolação precisam ser “barradas” ou reduzidas a valores pouco significativos para cada tipo de estrutura e terrenos de fundação.

Então, a rigor, na construção civil a adoção do método da exclusão não se limita as areias grossas e pedregulhos como demonstrado na tabela 3, isto, principalmente decorrente da alta permeabilidade e a grandes vazões de percolação esperadas. Isto se deve ao fato de que nas outras faixas granulométricas dos materiais mais finos, granulares ou não, ganham mais importância outros aspectos geotécnicos como a compactidade e a consistência dos materiais, respectivamente, arenosos e argilosos e, inclusive, a possibilidade de danos as edificações vizinhas produzidas pelo rebaixamento temporário.

Assim, nas práticas atuais da construção civil e/ou para a opção de construção de solos de edifícios, para garagens, as expectativas de dificuldades construtivas, os avanços tecnológicos e as possibilidades de ocorrências de patologias nas edificações vizinhas pelo efeito do rebaixamento temporário do lençol freático em terrenos constituídos de areias fofas e argilas moles, os métodos da exclusão abrangem praticamente todas as faixas granulométricas das areias, siltes e argilas e suas misturas.

2.6 MÉTODOS DE CONTROLE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM SUBSOLOS DE EDIFÍCIOS

A etapa de fundação de uma obra normalmente está diretamente relacionada a execução de estruturas de contenção, como é possível cotidianamente presenciar em obras de saneamento, metrô e, principalmente, em solos de garagem, diretamente relacionado a isso, a atuação da água neste cenário é fator de grande importância para estabilidade e eficiência destas estruturas.

Para Grandis (1998 apud HACHICH et al., 1998) há duas maneiras distintas de controlar a água subterrânea em estruturas enterradas, sendo as seguintes:

- a) através da interceptação e remoção de água de subsuperfície, por bombeamento apropriado. Este, pode ser feito a partir de pontos de coleta localizados à superfície da escavação ou partir de drenos sub-superficiais, ponteiros filtrantes, e/ou poços profundos, conforme é tradição neste tipo de técnicas.
- b) através da separação entre fluxo d'água e escavação, mediante a adoção de uma barreira física que exclua a água da mesma. Também denominados de métodos de exclusão.

Ainda Grandis (1998 apud HACHICH et al., 1998) observa que a diferença básica entre ambas as maneiras é a de que a primeira tem por objetivo alterar a posição do nível d'água (rebaixamento), ao passo que a segunda tem como consequência a manutenção das condições hidrológicas (hidrogeológicas) do local. Obviamente, é possível adotar uma combinação de ambos os sistemas no controle da água subterrânea, tendo aumento da eficiência.

As barreiras físicas que excluem a água freática do interior de uma estrutura enterrada como a de um subsolo de um edifício **são o objeto principal do presente trabalho**. Conforme Milititsky (2016), a efetiva exclusão da água do interior de escavações é uma condição extrema de difícil obtenção, sendo normalmente comum barreiras que excluam e permitam controle da percolação de forma temporária/provisória ou permanente sem comprometer os requisitos funcionais, construtivos, de segurança, econômicos e, inclusive, se for o caso, requisitos estéticos.

Como barreiras físicas que excluem e/ou permitem o controle da água freática para o interior de uma estrutura enterrada destaca-se em obras brasileiras para a construção de subsolos: escoramento metálico-madeira e parede de concreto armado, estacas secantes ou justapostas, paredes diafragma rígidas (ou plásticas como estrutura complementar de vedação), colunas de solo-cimento ou *jet grouting*, congelamento do solo, paredes diafragma com hidrofresa. Deste conjunto, as soluções de congelamento do solo ou até injeções de produtos químicos ou calda de cimento são menos utilizadas. Sendo que o primeiro se constitui, no geral, em uma solução provisória ou temporária de estabilização e vedação do terreno de fundação. Com isto, pode-se implantar as estruturas permanentes de contenção e de subpressão e ao final, com a garantia da vedação e estabilidade geral, proceder-se-ia o desligamento do sistema de congelamento.

Sabe-se que tão logo inicia-se uma escavação na presença do lençol freático estabelece-se, de imediato, uma carga hidráulica (figura 3), a qual induz o fluxo subterrâneo no sentido do nível mais alto para o mais baixo, sendo o mais alto o do terreno adjacente ou dos vizinhos e o mais baixo, via de regra, o interior do subsolo. Tal condição de fluxo subterrâneo não se

estabelece se for incluída, antes da escavação, uma barreira física que exclua ou impeça, de forma efetiva que a água subterrânea percole e atinja o interior da obra.

Então, com enfoque nos aspectos hidrogeológicos da fundação e as questões relativas aos requisitos do projeto (fases provisória e permanente) pode-se atingir o controle da percolação, com soluções tais como a impermeabilização com paredes diafragma, laje de subpressão ou um tampão de fundo de subsolos de edifícios.

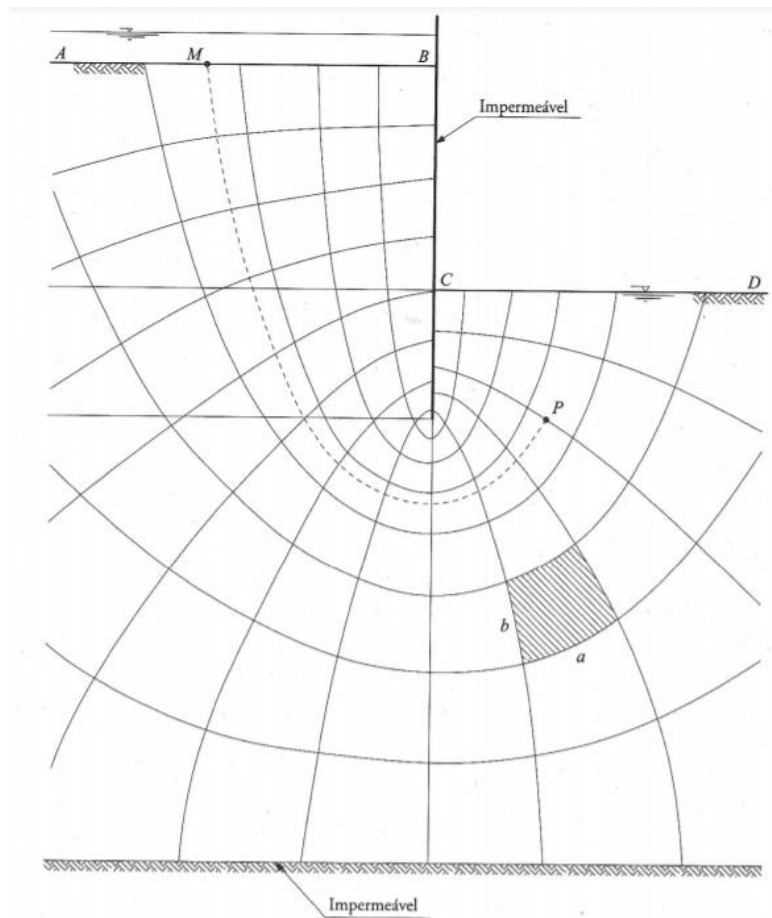
A priori, com a técnica da exclusão o lençol freático adjacente e/ou o subjacente (subsolo ou parte interna e na sua cota mais baixa) não é rebaixado, o que, entre outros efeitos, não causa danos as edificações vizinhas decorrentes de recalques diferenciais e evita ou reduz os riscos de um dos tipos de ruptura de fundo por percolação ascendente (liquefação e/ou levantamento).

Com isso, ampliando as questões básicas do controle da percolação nas obras de engenharia civil quando forem feitas escavações que atingem e superem o nível d'água freático cria-se as condições favoráveis para a percolação da água para dentro da cava e tem-se o estabelecimento de um regime de fluxo que pode ser temporário ou definitivo (tempo de vida útil da obra).

A figura 3 mostra, de forma simplificada, uma tradicional rede de fluxo gerada pelo desnível da água entre o nível freático estabelecido no aquífero, a contenção contínua impermeável no perímetro da obra e o fundo da escavação do subsolo. Esta é uma figura tradicional da solução teórica da rede de fluxo para este caso específico de barreiras verticais e como uma forma do controle de percolação e de como se dá, de forma simplificada, o fluxo da água para o interior de uma escavação de um subsolo de um edifício ou de uma vala para a construção de metrô ou para a canalização de um rio ou arroio e outros tipos de problemas de fundação. É, entre outros fins, uma forma de inspirar e reforçar a necessidade da devida atenção para as várias fases de um projeto destes tipos de fundações e na escolha do método mais adequado para o controle da força de percolação, da vazão de percolação, da pressão neutra hidrodinâmica, do gradiente hidráulico e das possibilidades de rupturas hidráulicas.

Figura 2 - Rede de fluxo estabelecida, ilustrando um fluxo subterrâneo padrão ou simplificado por baixo e lateral a uma parede de escoramento ou barreira física de uma escavação, que visa a construção de um subsolo com

escoramento contínuo – na imagem destaca-se a diferença de nível gerada pela presença da linha freática em um aquífero gravitacional e o fluxo estabelecido do nível mais alto para o mais baixo.



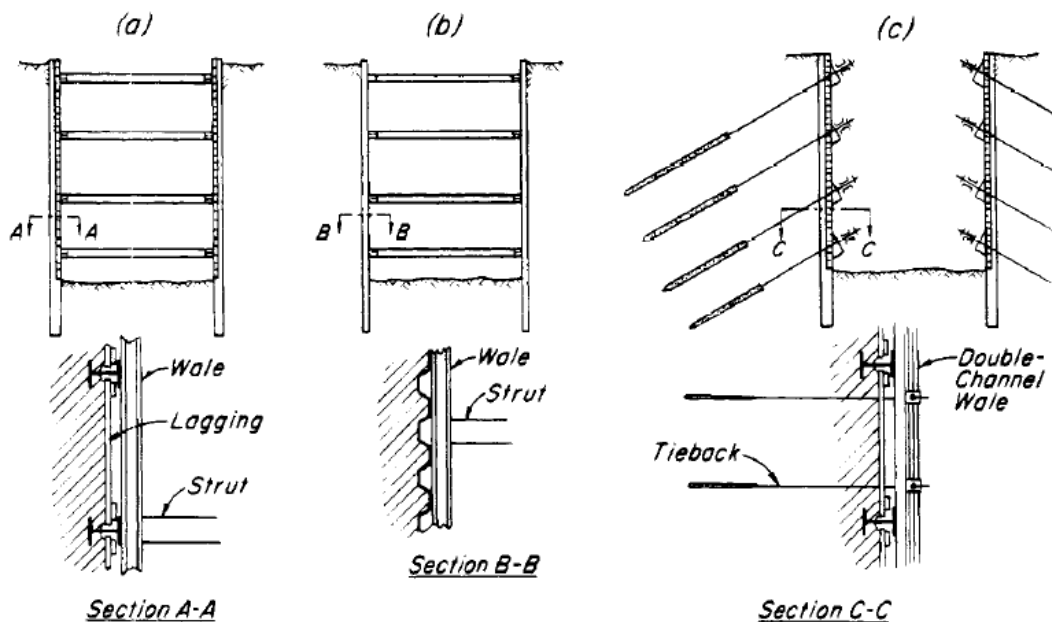
Fonte: Fernandes (2012).

2.6.1 PERFIS METÁLICOS COM PRANCHÕES DE MADEIRA

Uma das formas mais antigas de contenção usadas em escavações profundas, são constituídas de perfis metálicos (H ou U) espaçados geralmente entre 1,0 a 3,0 metros, entre estes utiliza-se pranchas de madeira dispostas na horizontal com finalidade de conter o solo escavado e transmitir os esforços aos elementos verticais. Conforme Saes e Stucchi (1998 apud HACHICH et al., 1998), o uso da solução como contenção acima do nível freático em solos com efeito de arqueamento em caso de areia ou coesão das argilas, permite ao menos escavar de forma temporária o terreno, entre os perfis, para instalações do paramento de madeira. Com isso, o método torna-se economicamente interessante a escavações de até 6 m de profundidade, com uso dos perfis metálicos como armadura integrante da cortina de concreto, podendo também ser utilizada em cenários com o nível freático acima da cota de escavação, entretanto,

necessitando implantação de sistema de rebaixamento provisório. Outro aspecto positivo economicamente torna-se a adoção das pranchas de madeiras como forma para a concretagem, etapa subsequente. Vale ressaltar que o prancheamento com madeira é uma contenção provisória e que precisa da estrutura de concreto armado para ser definitiva, garantindo a formação de uma parede estanque impedindo o fluxo d'água em caso de ocorrência do lençol freático no nível da escavação.

Figura 03 - Paredes de estacas prancha metálicas ou de perfis metálicos com pranchada de madeira e estroncas – após ou concomitantemente com a escavação faz-se a instalação de pranchada de madeira, estroncas e/ou tirantes, colocação da armadura da contenção e a sua concretagem de cima para baixo.



Fonte: Adaptado de Terzaghi Peck e Mesri (1996).

2.6.2 PAREDE DIAFRAGMA

A técnica de parede diafragma nasceu com C. Verder e Marconi, na Itália, década de 30, baseado na utilização de fluidos estabilizantes até então usados apenas na indústria petroléira. O método consiste na construção de um muro vertical enterrado, figura 5, com

profundidas e espessuras variadas, através de lamelas construídas sucessivas ou alternadas, alcançando profundidas de até 50 metros. (HASHIZUME, 2006).

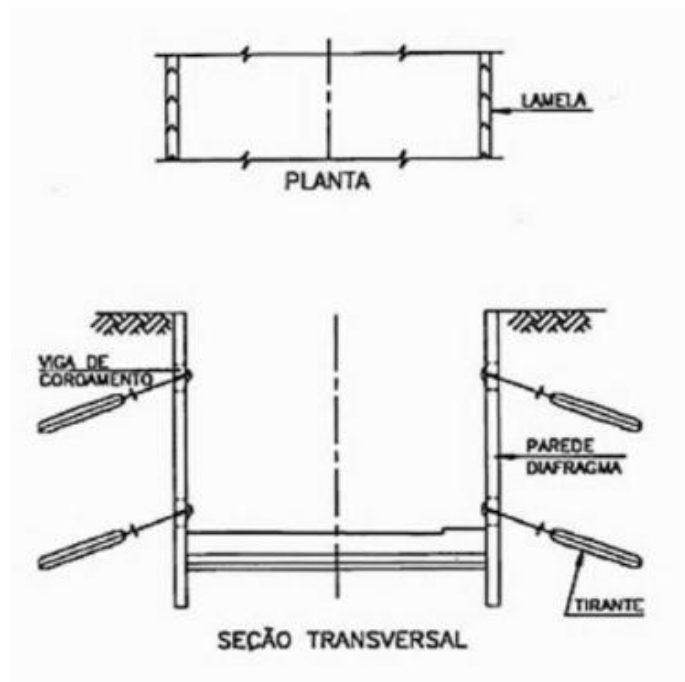
De acordo com Ranzini e Junior (1998 apud HACHICH et al., 1998, p. 507)

São caracterizadas pela concretagem submersa feita com tubo tremonha em trincheiras escavadas, relativamente estreitas, cuja estabilidade, durante a escavação, é obtida pela introdução de uma suspensão de "bentonita" em água. A suspensão estabilizante, denominada "lama bentonítica", permite a introdução da armadura e o enchimento da escavação com concreto. As paredes-diafragma são construídas em trechos contíguos de comprimentos da ordem de 2 a 3 m, os quais são escavados sucessivamente ou alternadamente, conforme as características da obra e do solo.

Hashizume (2006), também diz que, o elemento possui função estática e de barrar passagem da água. Deste modo, inicialmente empregada na construção de *cut-off* de barragens, passou a ser solução para inúmeros problemas, como: construções de galerias, subsolos, reservatórios subterrâneos e canalização de rios.

Milititsky (2016), aponta algumas fases da execução de parede diafragma, como: equipamento de escavação, mureta guia, lamelas, colocação da armadura e concretagem.

Figura 4 – Seção esquemática (em planta e transversal) de parede diafragma



Fonte: Ranzini e Junior (1998 apud HACHICH et al., 1998, p. 507)

2.6.3 Clamshell

A escavação de parede diafragma tradicionalmente é realizada por meio de garra hidráulica (*Clamshell*), podendo executar paredes de 30 a 140 cm, variando largura de 2,5 a 3,8 metros. (MONTEIRO, 2009).

Conforme Hashizume (2006), o *Clamshell* é inserido no solo, executando o processo de corte do mesmo e transporte do material desagregado.

Monteiro (2009), diz que o equipamento é utilizado juntamente com barras Kelly (hastes de metal que suportam a garra), sendo possível acoplar a guindastes para escavação das lamelas, com a abertura e fechamento das conchas ou “mandíbulas” (responsáveis pela remoção da terra) adicionadas de maneira hidráulica ou até mesmo mecânica, por roldanas.

2.6.4 Hidrofresa

Conforme a Geosonda (2020), equipamento consolidado nos Estados Unidos e Europa desde os anos 80, o sistema de Hidrofresa, utilizado em fundações especiais e solos difíceis, é considerado novo no Brasil. Com o avanço tecnológico no tocante a equipamentos de

escavação, em 2010 a empresa Brasfond apresentou ao mercado nacional as Hidrofresas, equipamentos com capacidade de escavar qualquer tipo de terreno. Em primeiro momento seu uso foi associado a *cut-off* de barragens, porém, em curto período de tempo o equipamento não somente foi inserido no âmbito das paredes diafragma, mas também, impulsionou a execução das mesmas visto que propiciam a confecção de juntas com maiores garantias de vedação lateral. Também, a maior efetividade de embutimento dos painéis diafragma em terrenos rochosos e/ou em cascalhos com matriz argilosa (conglomerados).

A Hidrofresa caracteriza-se por ser um equipamento hidráulico de grande porte, como mostra a figura 6, operando através de sistema de circulação reversa, com uso de fluido estabilizante ao longo da escavação. Sua utilização é indicada para escavações profundas, de até 120 m de profundidade, possibilitando o engastamento da parede diafragma na rocha, não apenas seu apoio, em terrenos com solo altamente concrecionados, onde o *clamshell* não consegue vencer a resistência do solo, abrangendo assim obras que exigem o máximo de segurança e confiabilidade na execução.

Figura 5 – Hidrofresa posicionada para iniciar escavação



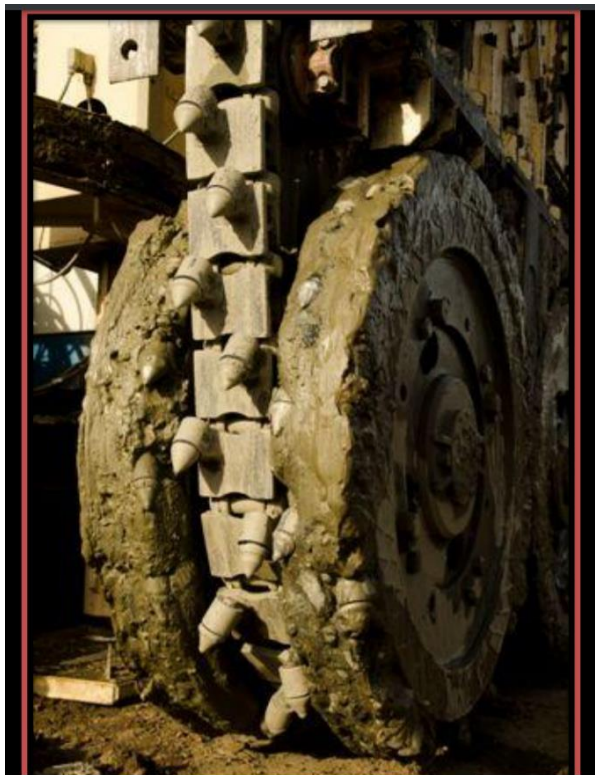
Fonte: Geofix (2020).

A figura 6 mostram a natureza deste tipo de equipamento com uma grande quantidade de recursos mecânicos, hidráulicos, potência e capacidade de desagregar.

De acordo com Costa Fortuna (2020), o equipamento é formado por uma máquina de perfuração alimentada por dois motores de sucção, situados em uma robusta estrutura, trabalhando abaixo do nível do terreno. Essa, possui duas rodas de corte, mantidas por guindaste sobre esteiras de grande porte.

O detalhe dos mais importantes desta técnica é a capacidade da fresa circular (duas rodas de corte) e o potente torque do equipamento. As fresas, como pode-se perceber com base na figura 7, são ferramentas de corte rotativas, constituídas por uma série de “dentes” e gumes, geralmente dispostos simetricamente em torno de um eixo. Os dentes e gumes removem o material da peça bruta de modo intermitente, transformando-a numa peça acabada, isto é, com a forma e dimensões desejadas.

Figura 6 – Fresas e “dentes” da peça de corte do solo da hidrofresa



Fonte: Geofix (2020).

Em geral, em paredes diafragmas o equipamento faz com que seja dispensado o uso de chapas juntas entre as lamelas, algo necessário quando usa-se Clamshell. A não necessidade de utilização dessa solução ocorre em virtude de que o espaço entre as duas primárias tem uma largura menor que a do equipamento, de forma que, quando essa lamela é escavada, a hidrofresa escarifica as laterais das lamelas primárias vizinhas. Obtém-se uma superfície rugosa no contato entre o concreto fresco e o já endurecido. Essas juntas secantes proporcionam melhor desempenho estrutural da parede e maior estanqueidade da escavação. Assim, a Hidrofresa cria uma área estanque impedindo a entrada da água do lençol freático, podendo aliar-se a outros métodos de controle para melhorar ainda mais sua efetividade, eliminando a necessidade de rebaixamento nas áreas externas, minimizando a chance de ocorrência de recalques nas áreas vizinhas.

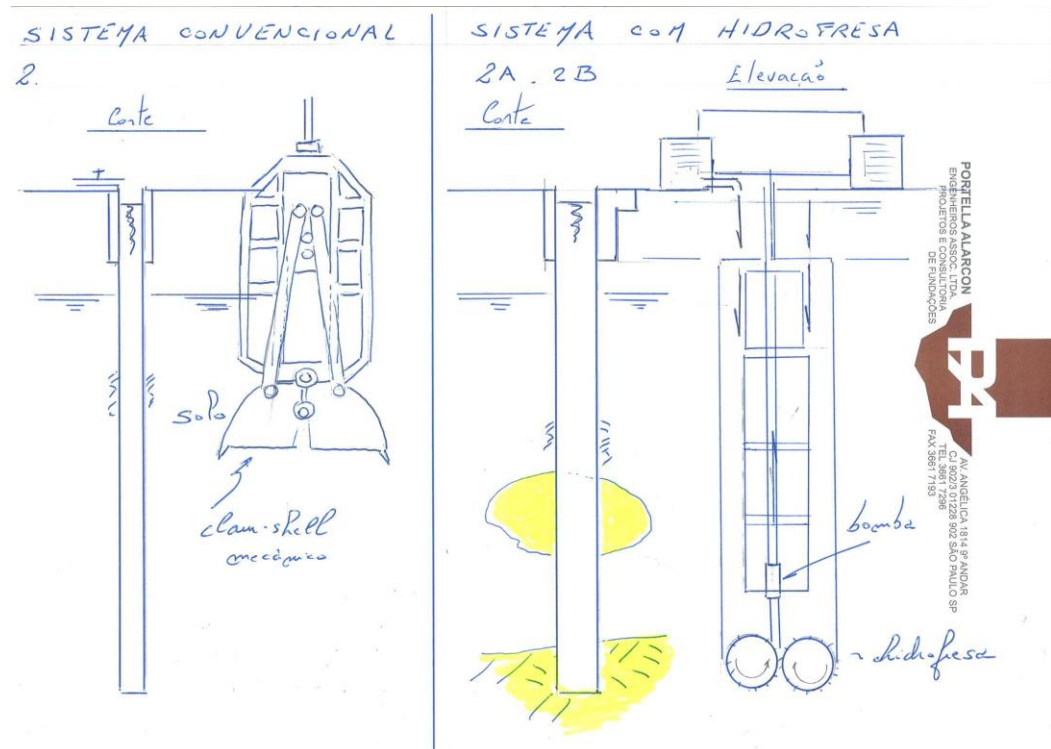
Segundo Brasfond (2020), as rodas de corte giram em sentidos opostos triturando a rocha (ou solo) em combinação com o empuxo vertical da estrutura. O procedimento é iniciado através da pré escavação com um *clamshell*, até chegar ao maciço rochoso.

Para Costa Fortuna (2020) e Brasfond (2020) as vantagens da utilização da Hidrofresa são as seguintes:

- Versatilidade na escavação de solo e rochas de natureza e resistência variadas, sendo necessária apenas substituição dos dentes acoplados às rodas e correntes de corte;
- Alta produtividade associada ao seu sistema de escavação que, aliado à instrumentação, permite um avanço com controle em tempo real de parâmetros e informações importantes para um melhor desempenho do equipamento durante a escavação;
- Sofisticado controle eletrônico que garante uma melhor condição de verticalidade e alinhamento, conferidos e corrigidos em tempo real;
- Melhor acabamento das juntas de concretagem, oferecendo maiores garantias de estanqueidade;
- Melhor embutimento dos painéis em rocha;

Em os “casos especiais”, onde ocorrem rocha sã e/ou matacões e solos altamente concrecionados a utilização de hidrofresa de torna vantajosa sob todos os aspectos geotécnicos de contenção, vedação e rupturas de fundo. Estas são vantagens que associada a alta tecnologia desta técnica possibilitará, aos empreendedores e responsáveis técnicos, adoção, casos especiais, de subsolos em edifícios e, inclusive, propiciando a tendência do aumento do número de níveis de subsolos.

Figura 7b – Esquema mostra uma seção transversal/corte de dois tipos de barreiras físicas ou paredes diafragma (rígidas ou plásticas) verticais, onde fica destacada uma das grandes virtudes da utilização da hidrofresa (2B) em comparação com as tradicionais escavações com *clam-shell* (2A) - que são a escavação de qualquer tipo de material rochoso ou resistente/camadas concrecionadas e o embutimento do paramento vertical na rocha são.



Fonte: Portella (2017)

2.6.5 Lama Bentonítica

No âmbito da geologia e mineralogia, a bentonita é um termo para classificação de uma substância altamente plástica e coloidal que em sua formação predomina argilas e cinzas vulcânicas alteradas.

O uso de lama bentonítica nas perfurações para melhoramento de condições de estabilidade é feito desde a antiguidade, existindo relatos atrelados aos povos egípcios e chineses (BRASFOND, 2020). Entretanto, a utilização em obras de fundações é bem mais recente, de maneira precursora em indústrias petrolíferas por volta de 1900.

Com a amostragem de funcionalidade em perfurações de poços de petróleo, o material coloidal entrou definitivamente nas perfurações de obras civis, simultaneamente ao início do uso de estacas com diâmetros considerados altos.

Segundo Hashizume (2006), a lama bentonítica é constituída basicamente de água e um argilomineral, a bentonita. Utiliza-se tal material no período de escavação da parede diafragma a fim de resistir aos esforços aplicados nas faces da escavação e suspensão das partículas sólidas, não permitindo seu depósito no fundo da escavação.

A formação do *cake* (película impermeável) no fundo e laterais da escavação neutraliza o fluxo de água e atua contra o desmoronamento das faces. Para o mesmo autor, a densidade da lama é fator significativo para execução da parede diafragma, em virtude de que a o deslocamento do concreto no momento da concretagem está diretamente ligado a esse índice físico.

Hashizume (2006, p. 50) diz que, “A coluna de lama exerce sobre as paredes do furo uma pressão hidrostática que impede o desmoronamento, tornando possível a execução de perfurações sem aplicações de revestimento.”.

De acordo com Brasfond (2020), as principais propriedades do material são as seguintes:

- Estabilidade por um longo período de tempo, que é uma virtude da bentonita em não decantar suas partículas;
- Película impermeável denominada *cake* que é formada rapidamente em superfícies porosas, neste estudo, os solos.

2.7 COLUNAS DE SOLO/CIMENTO – CCP, JET GROUTING, ROTOCRETE

De acordo com Rodrigues (2009), a técnica do *jet grouting* é definida como injeções de calda de cimento no solo a pressões que podem ser baixas ou altas, com intuito de alterar propriedades do mesmo, destacando-se o aumento de resistência e diminuição de permeabilidade. Necessitando comprimir pelo menos uma das seguintes funções:

- Dificultar o fluxo de água no maciço pela diminuição de permeabilidade;
- Melhorar capacidade resistente;
- Melhorar fatores de estabilidade.

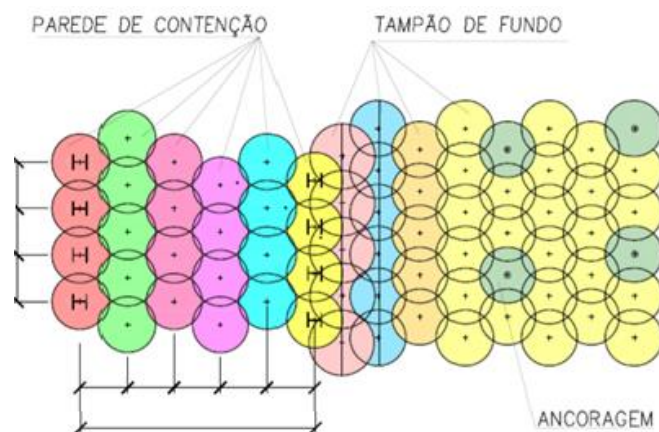
Carreto (1999), define de maneira semelhante, como técnica realizada diretamente no solo, sem escavação prévia, utilizando jatos de grande velocidade aplicando elevada energia cinética na desagregação do terreno natural, misturando calda de cimento com as partículas desagregadas, incremento características mecânicas e diminuído a permeabilidade do solo.

Em relação a controle de fluxo Rodrigues (2009, p. 23), diz que “Podem também ser executadas cortinas “impermeabilizantes” de *jet grouting* em túneis, barragens e outras construções, com o objetivo de controlar o fluxo de água, permitindo o aumento da estanqueidade do solo.”.

Além do ganho de estanqueidade nas laterais com o uso da técnica nas paredes da escavação, o fundo da mesma também pode ser tratado com o método, por meio da utilização na base da escavação, como tampão, figura 8. Assim, não somente serve de estroncamento das contenções, mas também tem objetivo de limitar a afluência da água (fluxo ascensional para o interior da obra), em razão de nível freático situar-se acima da cota da base da escavação em solos de permeabilidade elevada.

Conforme mostrado na figura 23 o tampão com uso de colunas de solo cimento são usados em subsolos em substituição de lajes de subpressão. Esta é uma relativamente nova solução tecnológica em franca evolução de barreira física no controle da percolação para o interior de subsolos e, ainda, como solução para o equilíbrio da subpressão com o peso e a aderência com o paramento vertical do diafragma rígido.

Figura 7 – Esquema de tampão de fundo em colunas de *Jet grouting* com engastamento nas paredes de contenção



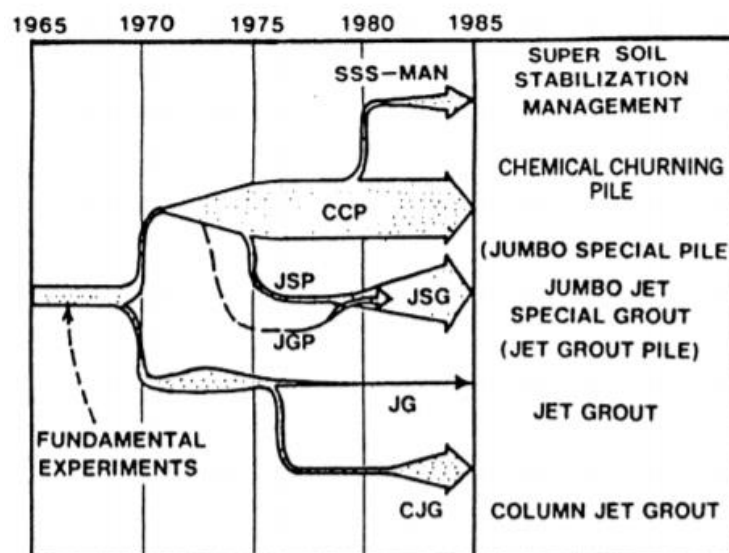
Fonte: Brasfond (2020).

A técnica de injeções com pressões elevadas teve primeira utilização nos Estados Unidos da América na década de 60, com jatos de água para desagregação de materiais utilizados em minas de carvão. Segundo Roberto (2012), na mesma década, desenvolveu-se um método para construção de cortina estanque por uma empresa britânica, de maneira muito similar a técnica utilizada nos Estados Unidos, inserindo jatos de água verticais e radiais no

solo para sua desagregação, através de uma vara. Com a profundidade requerida atingida, os jatos de água eram substituídos por calda fina de cimento, formando colunas no terreno com permeabilidade de 100 a 1000 vezes menor que o solo original.

Roberto (2012, p. 5) diz que “Em meados da década de 60, técnicos japoneses, aplicaram os mesmos princípios na tentativa de desenvolver as técnicas de melhoria de terrenos por injeção, tendo sido desenvolvidos na década de 70 os primeiros sistemas de *jet grouting*”, como mostra a figura 9.

Figura 8 – Fluxograma evolutivo da técnica do *jet grouting*



Fonte: Roberto (2012).

A evolução e consolidação de eficácia da técnica resultou em três sistemas considerados base, que diferem na maneira de executar a desagregação do solo e mistura da calda de cimento com o mesmo.

Não somente Brasfond (2020), mas também Roberto (2012) apontam os seguintes sistemas como base:

Método CCP (*Cement Churning Pile*) - Neste método a calda de cimento é injetada diretamente em um grupo de bicos situados acima da ponta de perfuração de uma haste, o jateamento ocorre sem emprego de ar comprimido. O solo ao redor da mesma é demolido e

prensado na lateral pela alta pressão de injeção da calda e taxa de rotação. Com a consolidação da mistura são formadas colunas de pequenos diâmetros, variando de 40 a 80 cm.

Método JSG (*Jumbo Special Grout*) ou JG (*Jumbo Grout*) - O sistema baseia-se no mesmo princípio da técnica anteriormente citada, entretanto, faz uso de injetores de ar comprimido, aumentando não somente o alcance do jato, mas também poder de adesão possibilitando a formação de colunas com maiores dimensões, variando de 80 a 180 cm. São utilizadas duas hastes coaxiais por onde circulam separadamente o ar comprimido e a calda de cimento, dando-se a mistura dos elementos no bico de comum saída.

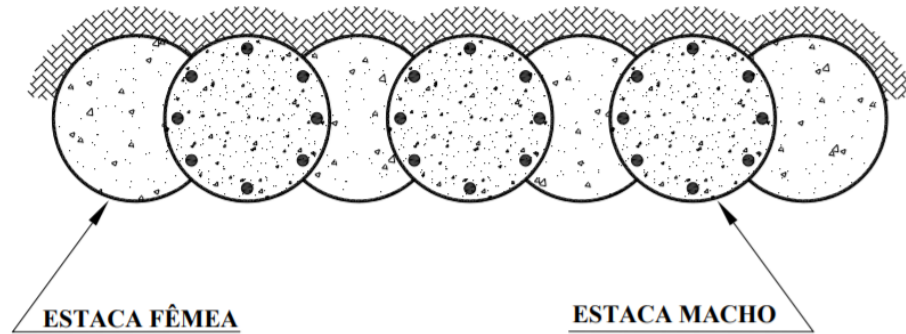
Método GJG (*Triplo Grouting*) - Considerado o sistema mais complexo dos três, o triplo *grouting* separa o processo de desagregação do preenchimento e mistura da calda com o solo. Usa-se três hastes coaxiais diferentes, por onde circulam separadamente água, ar e calda e dois bicos de injeção em níveis diferentes. A nível superior tem função de erodir o solo através de um jato de água envolto por um ar, evitando dispersão e aumentando a ação da água. O bico inferior injeta calda no terreno após o mesmo ter sido erodido, dando origem a coluna, que pode chegar a diâmetros de até 2 m.

2.8 ESTACA SECANTE

Conforme Mota (2018), o sistema de estacas secantes baseia-se na execução da técnica da Hélice contínua. Originária nos Estados Unidos, na década de 1950, com o incremento de equipamentos, possibilitando maior torque disponíveis em novos diâmetros, a técnica foi difundida.

Segundo Meireles e Martins (2006), a intersecção de uma estaca com outra é a principal característica construtiva e de melhor definição do sistema. A intersecção é a realizada por meio de dois tipos de estacas, sendo as seguintes: macho e fêmea, como mostra a figura 10.

Figura 9 – Seção esquemática do parede de estaca secante, possuindo estacas armadas (macho) e não armadas (fêmea)



Fonte: Meireles e Martins (2006).

A execução da cortina é iniciada pelas estacas primárias (fêmeas), as quais usualmente não são armadas e são executadas com concreto de menor resistência, facilitando assim o seu corte quando são construídas as estacas secundárias. (MEIRELES e MARTINS, 2006).

Mota (2018) aponta as principais etapas construtivas do método, sendo as seguintes:

- Execução da mureta-guia
- Escavação e Concretagem das estacas
- Lançamento da armadura em barras de aço ou em perfis metálicos
- Execução da viga de coroamento

As cortinas de estacas tornam-se soluções interessantes por caracterizarem soluções simples e com baixo custo, além disso, processo executivo relativamente limpo e possível de ser executado ao nível freático, mantendo boa estanqueidade. (MEIRELES E MARTINS, 2006).

2.9 CONGELAMENTO ARTIFICIAL DO SOLO

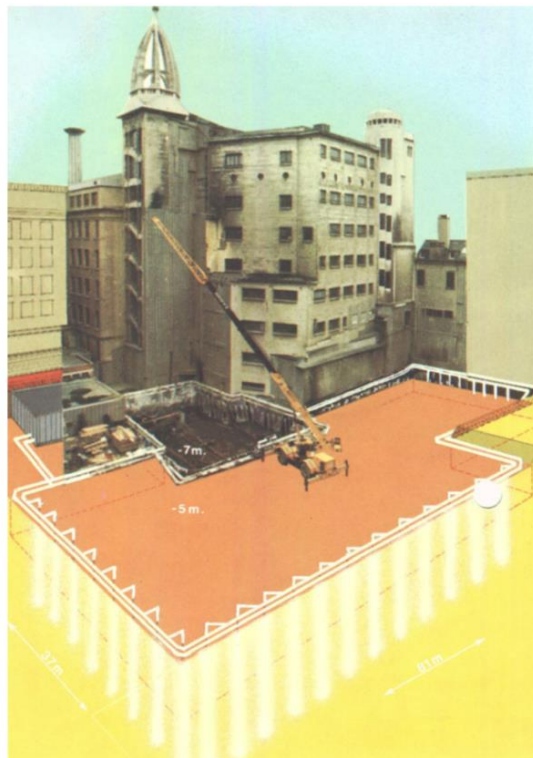
De acordo com Marcos (2011), cotidianamente dentro da engenharia encontram-se solos com características pouco favoráveis a realização de obras, necessitando soluções construtivas de maior complexidade, como o congelamento artificial de solo, aplicado na grande maioria das vezes em países com temperaturas baixas, todavia, não sendo de exclusividade desses.

Salvado (2012), define congelamento artificial como solução provisória que converte a água intersticial em gelo, incrementando propriedades hidromecânicas do solo (permeabilidade, rigidez e resistência) chegando a torna-lo impermeável, como ilustrado na figura 11.

O processo implica remover o calor do maciço, para causar uma queda de temperatura do subsolo abaixo do ponto de congelamento da humidade dos poros intersticiais. Esta humidade comporta-se como agente de cimentação, ligando as partículas do solo entre si, propiciando uma rede estrutural de apoio à massa de solo. O calor é removido para a atmosfera por arrefecimento, circulando em tubos colocados entre a superfície e a zona a congelar. Os materiais que permitem a concretização desta técnica são o azoto líquido, a salmoura e o dióxido de carbono. (SALVADO, 2012, p. 5).

De maneira similar, Almeida (2003, p. 1) salienta que “[...] a técnica baseia-se na conversão da água intersticial em gelo que, sendo um elemento de união entre as partículas do solo, dá lugar a um “sólido” resistente e impermeável.”

Figura 10 – Congelamento artificial do terreno utilizado como reforço e estrutura de controle de fluxo d’água para escavação

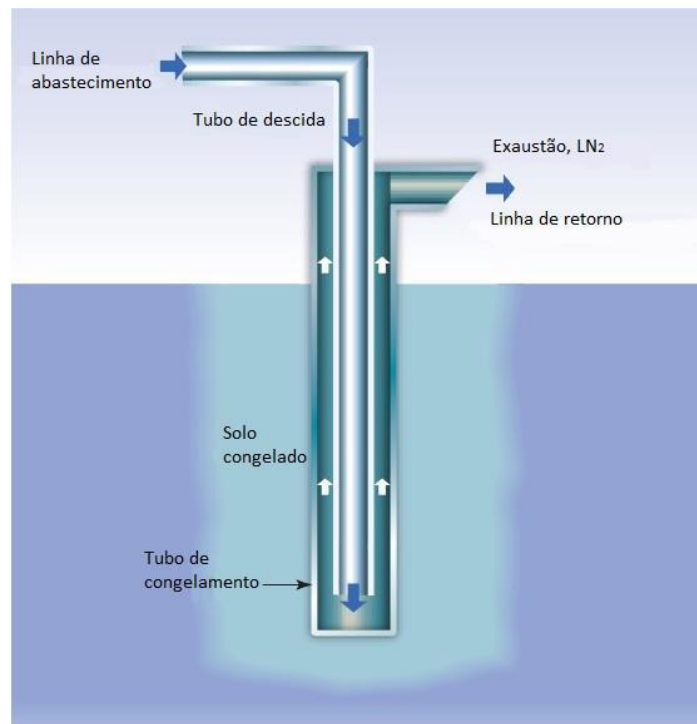


Fonte: Almeida (2003).

O método realiza-se com a colocação de condutos fechados, ilustrado na figura 12, (tubulação principal) de congelamento no solo, com diferentes espaçamentos, os quais no seguimento da execução são resfriados pela circulação de solução refrigerante. Tubos horizontais ou verticais (tubulação de abastecimento), com extremidades livres e diâmetros menores aos primeiros citados são inseridos nesses, com a finalidade de levar o material de refrigeração, que mais tarde é retirado. (MARCOS, 2011)

Conforme Salvado (2012), os materiais mais utilizados para arrefecimento são: cloreto de cálcio, usualmente conhecido como Salmoura e Nitrogênio líquido.

Figura 11 – Representação base de sistema de congelamento de solos, através de conduto de resfriamento inserido no solo



Fonte: Marcos (2011).

De acordo com Salvado (2012) o congelamento artificial do solo divide-se em três tipos, sendo eles: procedimento de circuito fechado, aberto e misto.

- Procedimento de circuito aberto - Salmoura utilizada como fluido de refrigeração, método de menor custo (em comparação aos outros dois mencionados) e considerado

indireto, em razão da retirada de energia do fluido pelo equipamento, congelando a área ao redor de cada tubulação, de maneira lenta, até formar uma parede de gelo.

- Procedimento de circuito fechado - O nitrogênio líquido é usado no processo, em razão de possuir maior capacidade de diminuir a temperatura do solo, possibilitando a construção da barreira impermeável em um menor período de tempo.
- Procedimento misto - Procedimento que simultaneamente comporta a presença dos dois materiais de resfriamento, utiliza as principais virtudes dos sistemas citados, do circuito fechado a maior capacidade de refrigeração do nitrogênio, do aberto, economia de custos com o uso de salmoura na execução do congelamento do solo.

Marcos (2011), ressalta que a técnica de congelamento, quando executada de maneira correta, torna-se uma das únicas a conseguir formar uma barreira a água com impermeabilização muito próxima a 100 % de eficácia.

A concepção e o projeto de sistemas de congelamento em substituição das paredes diafragma é muito rara na construção civil brasileira. No entanto, pode ganhar mais importância no caso de obras de saneamento, como estações de bombeamento de esgoto ou de água, próximos de centros urbanos densamente povoados e fundação constituída de solos arenosos fofos ou argilas muito moles.

3 MÉTODOS DE CONTROLE DE FLUXO SUBTERRÂNEO

A elaboração do presente trabalho desenvolveu-se por meio de uma pesquisa bibliográfica. Essa, é elaborada através de materiais consolidados, com base principal em livros e artigos científicos, possibilitando abordagem ampla, analisando e avaliando diferentes cenários e fatos descritos por inúmeros autores e situações pesquisadas.

Ademais, no tocante a utilização de técnicas construtivas fez-se uso de materiais publicados por empresas de engenharia que utilizam técnicas inovadoras, a exemplo da hidrofresa.

3.1 REBAIXAMENTO TEMPORÁRIO

Na engenharia de fundações são muitas as necessidades e formas de controle da água subterrânea para o interior das estruturas enterradas, tais como obras de mêtros, estações de bombeamentos de esgoto ou água (bruta ou tratada), solos de edifícios, casas de força em hidrelétricas e outros casos mais específicos como as moegas.

Via de regra nas fases iniciais de projeto ou na fase de estudos de viabilidade técnica e econômica a questão da escolha do(s) método(s) a ser(em) adotado(s) no controle da água subterrânea (percolação) e da necessidade de rebaixamento do lençol freático se torna de grande relevância. Isto tendo em vista as suas várias demandas, tais como a escolha do método mais adequado, o necessário entendimento das condicionantes hidrogeológicas da fundação (permeabilidade dos solos na condição *in situ*), a natureza da obra, as condições das estruturais das obras vizinhas e das fases de construção para sua instalação, operação e desligamento – não esquecendo de seu desempenho e monitoramento).

Este requisito de projetos geotécnicos de fundações e obras de terra tem como pressuposto uma adequada investigações e análises da natureza geológica e geotécnica do terreno local e, inclusive, as verificações das condições das fundações das obras vizinhas.

No entanto, normalmente, na construção de obras públicas tais como os mêtros sabe-se que as questões relacionadas aos aspectos hidrogeotécnicos da fundação da obra e sua influência na vizinhança não tem trégua, isto, a partir do início da obra, com a instalação do canteiro de obras, escavações, escoramentos e prosseguindo com as estruturas em operação permanente. Neste cenário os planos e serviços de inspeções de todos os tipos de condições das obras vizinhas, com o permanente monitoramento de deformações (recalques), variações do lençol freático e de medidas de pressões piezométricas, de tensões e deformações e outros

requisitos para a coleta de elementos de projeto, verificação de desempenho e que estão muito além do escopo deste trabalho.

Na grande maioria das obras de pequeno e médio porte com a necessidade de controle do fluxo subterrâneo, adota-se o rebaixamento temporário do lençol freático, com soluções atuantes durante o período de escavação, construção do subsolo. Os sistemas de rebaixamentos do lençol freático, com ponteiros drenantes e/ou poços profundos, devem operar durante 24h/dia e somente são desativados, com muito cuidado, após o término da construção das estruturas enterradas (incluindo, se for o caso, os reaterros) – a interrupção do rebaixamento, a qualquer tempo, pode produzir rupturas hidráulicas (erosão interna e liquefação de areias), ruptura de fundo e instabilidade de taludes ou de estruturas de arrimo ou de escoramentos.

Entretanto, em algumas situações, os sistemas de rebaixamentos do lençol freático, são adaptados de maneira a exercer funcionamento intermitentes, como é o caso de poços de captação adotados para alguns subsolos. Este tipo é adotado, de forma permanente, em terrenos argilosos resistentes e com baixa permeabilidade, com a utilização de trincheiras drenantes em rede e poços rasos de bombeamento, estes localizados no último nível do subsolo.

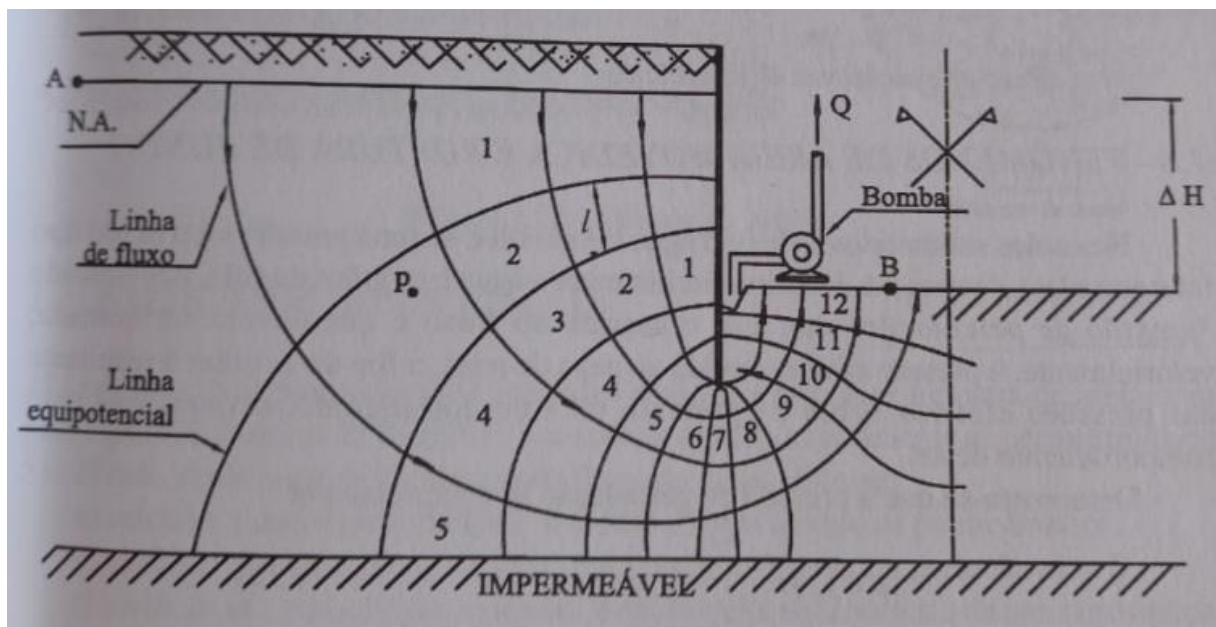
Esta forma, a mais simples, de controle permanente da água subterrânea em subsolos de edifícios, via de regra, são muito problemáticos em obras da construção civil. Neste tipo, o sistema é instalado no último nível do subsolo, abaixo do contrapiso, e dotado de trincheiras drenantes dispostas na forma de rede. A água subterrânea é interceptada e drenada através das trincheiras drenantes rasas (com em torno de 1,0m de profundidade) e conduzidas para poços de bombeamento. Estes, por sua vez, são dotados de bombas de recalque com sistema automático de acionamento. Neste tipo mais simples de controle permanente das águas subterrâneas os maiores problemas decorrem da falta de manutenção geral do sistema e, sendo mais grave, quando ocorre a suspensão do fornecimento de energia elétrica por um período prolongado e o poço(s) de bombeamento não dispõem de sistema de energia reserva (bombas a gasolina ou baterias) – neste caso, veículos e/ou equipamentos que se encontram no subsolo podem ficar submersos. Em certas situações, por falta de manutenção e/ou a colmatação do sistema de drenagem (falta de critérios de filtro dos materiais drenantes), as águas freáticas infiltradas em excesso e/ou em períodos prolongados de chuva acumulam nos poços de elevadores ou provocam outras ocorrências que causam danos aos condôminos de edifícios.

A figura 13 mostra o sistema de rebaixamento por bombeamento direto superficial, típico para o caso de terrenos de boa qualidade geotécnica e baixa permeabilidade.

Em escavações sem escoramento e forma de talude frequentemente o fundo da cava atinge profundidades superiores ao nível freático, assim cria-se uma condição de fluxo, onde

na medida em que o material é removido, a água das massas vizinhas flui para o interior da escavação e as forças de percolação deste fluxo interno tendem a arrastar as partículas do solo, proporcionando aumento de pressão de percolação, instabilizando os taludes ou o fundo da obra. No sentido de viabilizar tecnicamente ou melhorar as condições de segurança de escavações ou de obras e/ou escavações abaixo do lençol freático utiliza-se, freqüentemente, processos de rebaixamento do nível d'água.

Figura 12 – Representação base de um sistema de rebaixamento por bombeamento direto superficial – este poderia ser um sistema inicial antes da instalação da rede de trincheiras drenantes e o(s) poço(s) de bombeamento permanentes.



Fonte: Alonso (1999)

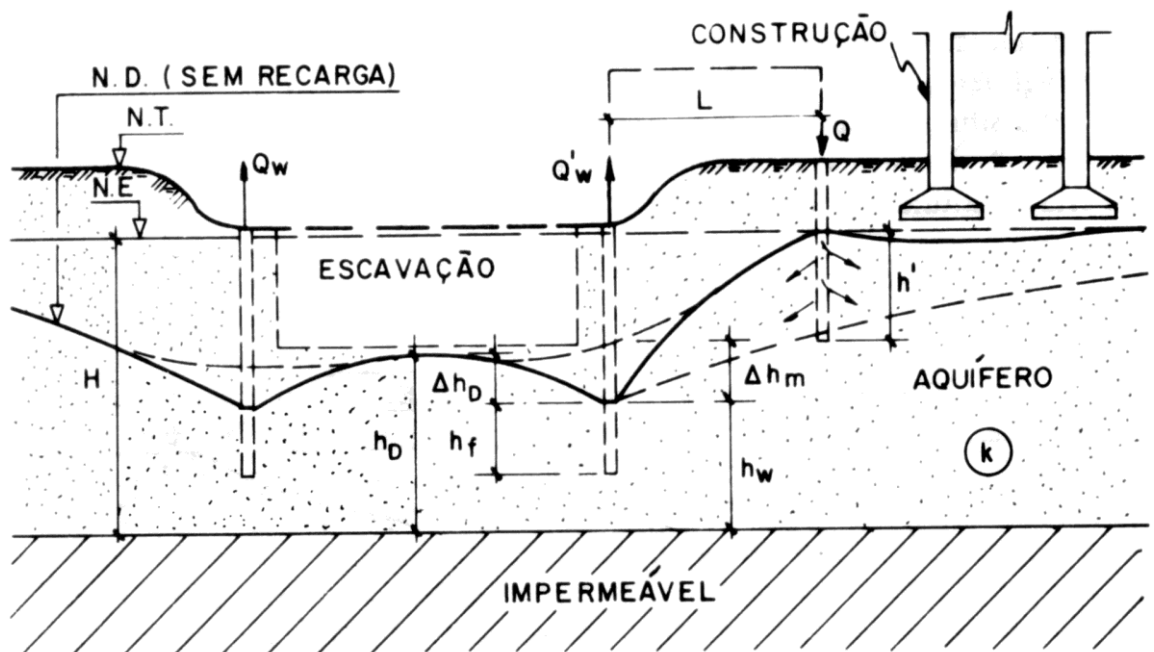
Velloso (1988) e Grandis (1998), apresentam de forma convincente como se dá a influência do rebaixamento do lençol freático nas edificações vizinhas. Com base na figura 14, o primeiro autor observa que cabe mencionar o problema eventual de deformações (recalques) de construções próximas (vizinhos), decorrentes de um rebaixamento do lençol d'água. Essa situação se faz sentir em zonas onde é significativo o abaixamento do lençol d'água pretendido e onde o solo do aquífero é muito fofo, ou a camada impermeável subjacente é constituída também por solos muito compressíveis (argilas moles, por exemplo).

Grandis (1998), de maneira similar aborda o cenário de recalque nas edificações vizinhas em virtude do efeito do rebaixamento na diminuição das pressões neutras, aumentando

as pressões efetivas, apresentando como solução a esse fenômeno a técnica de recarga de aquífero com intuito de minimizar os recalques diferenciais em construções próximas, como ilustra a figura 14.

A solução de recarga artesiana de aquífero é típica para o caso de areias. Nesta solução, deve-se ter a máxima atenção para que a pressão de injeção de água, para a manutenção da linha freática próxima da original (figura 14), não iguale a pressão total do solo. Caso isto aconteça o solo do terreno do vizinho pode se liquefazer, visto que a pressão efetiva cai para zero e o terreno perde totalmente sua resistência ao cisalhamento.

Figura 13 - Recarga de um aquífero para evitar recalques diferenciais na obra do vizinho, decorrente de um rebaixamento do lençol d'água.



Fonte: Velloso (1988)

Dentre os métodos de rebaixamento de lençol freático, segundo Velloso (1988), Alonso (1999) e Grandis (1998), os mais utilizados são: bombeamento direto superficial, ponteiros drenantes/filtrantes (*wellpoint*) e poços profundos. Os sistemas mais comuns de esgotamento da água freática são com bombas de recalque e/ou de vácuo ou injetores ou bombas submersas.

Sistema com ponteiros filtrantes consistem em um método de retirada de água do solo por meio não gravitacional, mas sim de maneira induzida, através de pontos de captação, com tubos com ponteiros drenantes e filtrantes de pequenos diâmetros. Sua atuação torna-se eficaz em vários tipos de solos arenosos, porém seu melhor desempenho acontece em aquíferos rasos

(areias) em situações que não necessitem rebaixamento maiores do que três estágios da ordem de 5m (VELLOSO, 1998).

Para Velloso (1988), o sistema de injetores consiste em poços recalçados por uma única bomba localizada em uma central de recalque. O injetor é um arranjo de bocal e um dispositivo Venturi, usado para sugar água de poços com variadas profundidades, trabalhando como um circuito semifechado, no qual a água é impulsionada através de uma tubulação horizontal de injeção. Esse dispositivo é utilizado para rebaixamento de lençol freático a profundidades superiores a 5m, algo que as ponteiros filtrantes em um único estágio não são funcionais.

Poços injetores possuem vantagens sobre outros métodos de rebaixamento, de maneira mais clara ao sistema de ponteiros, mostrando-se viáveis sem a necessidade de execução em mais de um estágio. Conforme Velloso (1988), o sistema de poços profundos com bomba vertical é adotado para rebaixamento de nível freático a grandes profundidades, especialmente em solos de alta condutividade hidráulica, rebaixamento com significativa capacidade de bombeamento. Este método pode rebaixar em níveis de até 50 m de profundidade. Normalmente, são executados fora da área de escavação, entretanto, em situações peculiares, há possibilidade do método de ser instalado próximo a obra.

Independentemente do tipo de sistema de rebaixamento adotado, o solo sofre uma diminuição das pressões neutras em virtude da retirada da água do mesmo, com isso, o aumento nas pressões efetivas possibilita a ocorrência de recalques, em razão do adensamento do solo, nas estruturas situadas no raio de atuação do rebaixamento. Para Caputo (2008), a intensidade destes recalques tem relação direta com o tipo de solo em questão, tornando-se mais intensos em argilas moles ou areia fofa. Caputo (2008, p. 233) diz que, “Se o solo é constituído por camada de areia ou pedregulho, o recalque se produz simultaneamente com o rebaixamento do nível d’água e é, em geral, de pouca importância”.

O presente trabalho tem foco em apresentar as soluções de controle de fluxo subterrâneo por meio de métodos de exclusão, não sendo abordados de maneira mais aprofundada os sistemas de rebaixamento citados. Mas destaca-se que estes métodos, para estudos e projetos de obras convencionais, podem ser aplicados a partir da base teórica e exercícios resolvidos das referidas bibliografias do presente subitem. Para o caso de ponteiros e ou poços os referidos autores apresentam, com base em exercícios resolvidos a determinação do raio de influência do rebaixamento, da vazão total de projeto, a vazão específica máxima de ponteiros drenantes e seu espaçamento, elementos os quais se constituem na base deste tipo de projeto.

3.2 PAREDE DIAFRAGMA

Em muitas das médias e grandes cidades brasileiras, indicadores como crescimento populacional, juntamente à significativa ocupação demográfica já existente, à maneira facilitada de aquisição de automóvel próprio e à ausência de projetos por parte de seus gestores tem sido responsável pela problemática vista na mobilidade urbana. Desta maneira, todos esses aspectos acarretam em perda de tempo e conseqüentemente decréscimo de qualidade de vida.

As intervenções realizadas nos centros urbanos precisam visar o cenário apresentado diariamente, isto é, o pouco espaço disponível. Com isso, a procura pela sua máxima utilização traz alternativas variadas, como corredores exclusivos para transporte público, veículos leves sobre trilhos, metrô, galeria e passagens inferiores.

A melhoria urbana por meio de obras de infraestrutura normalmente requer grandes espaços, algo já inexistente. Com a densidade populacional a desapropriação de áreas habitadas acaba por ser fator oneroso, chegando até mesmo a inviabilizar as intervenções necessárias.

De tal forma, com finalidade de mitigação de custos de implantação, a utilização de obras enterradas se apresenta como solução pertinente, de modo que as paredes diafragma tornam-se importantes meios de viabilização, não somente como contenção, mas também controlando a percolação da água.

As soluções de controle de fluxo subterrâneo não devem ser analisadas apenas pelo âmbito econômico, visto que, após a finalização de estruturas em níveis inferiores, os elementos ficam em situações com impeditivos técnicos e operacionais para possíveis correções de falhas. Desta maneira, a solução optada deve obviamente ser orçada e analisada, entretanto, os ganhos imediato e futuros por sua eficiência precisam ser postos em primeiro plano. Assim sendo, o uso de paredes diafragma em construções de subsolos, como mostra figura 13, como barreira para fluxo d'água representa um custo significativo, porém sua eficiência e resultados "falam" mais alto.

Figura 14 – Execução de parede diafragma rígida atirantada como solução de contenção e fluxo subterrâneo para implantação de níveis de subsolo



Fonte: Frank (2020).

O trabalho da indústria de perfuração petrolífera é tratado como fator de impulsão da técnica de paredes diafragmas. Ainda que fosse de conhecimento o efeito de estabilização das lamas em perfurações de poços de petróleo desde 1900, a bentonita foi introduzida nos sistemas de lama em 1929. Significativas evoluções ocorreram nos anos 30, com o surgimento dos primeiros diafragmas rígidos de concreto armado usados com função de impermeabilização, tentativa de estanqueidade (HASHIZUME, 2006). Com o aprimoramento da técnica ao longo dos anos, aliado a necessidade de elaborar soluções de controle de fluxo de água, as diafragma começaram a ser pensadas como barreiras estanques, em virtude de sua estrutura não permitir a percolação.

Conforme Milititsky (2016), a obtenção de sucesso na execução de estruturas estanques está diretamente relacionado com pelo menos dois conceitos: o primeiro com ligação direta ao material utilizado, devendo ser homogêneo e apresentar resistência ao meio que será exposto; o segundo conceito trata dos cuidados e procedimentos que constituem as técnicas de bem construir para se obter um elemento estanque ao longo de toda sua vida útil

3.2.1 Processo executivo

Para Ranzini e Junior (1998 apud HACHICH et al., 1998) a parede diafragma consiste em realizar, no subsolo, um muro vertical de profundidade e espessura variável, constituídos de painéis elementares alternados ou sucessivos, e aptos a absorver esforços e barrar a percolação d'água.

De maneira similar Hashizume (2006), também afirma a função estática ou de interceptação hidráulica, podendo ser constituída de concreto simples ou armado, moldada *in loco*, pré-moldada e plástico.

A estanqueidade do sistema é obtida em virtude da parede de concreto que pode ou não conter aditivos com componentes ativos, com funções de permitir a formação de reação com a umidade conduzida pelo fluxo interrompido, dando origem a uma estrutura cristalina insolúvel e com poder de vedação. Quando diafragma é executada com uso de concreto chamado de tradicional, sem aditivos para fechar poros, a estanqueidade é garantida pela baixa permeabilidade da parede, em razão de seu material e significativa espessura. Ademais, quando a solução tem seu principal foco em controle de percolação, estando em segundo plano a contenção do solo, a parede diafragma plástica pode ser utilizada, sendo executada com um elemento com permeabilidade muito baixa, “coulis” (mistura de cimento e bentonita), impedindo o fluxo (GEOFUND, 2021).

No presente item será dado destaque as paredes diafragmas moldadas *in loco* em função do seu maior uso no país. Com isso, todas as explicações posteriores estão relacionadas a este tipo.

Hashizume (2006) e Milititsky (2016), destacam a importância de planejamento das etapas executivas na execução de paredes diafragmas, ressaltando a interdependência de todos os processos relacionados. Evidenciam-se as seguintes etapas:

- a) Execução das muretas guia;
- b) Fabricação da lama;
- c) Escavação;
- d) Troca da lama
- e) Colocação das chapas junta;
- f) Colocação da armadura;
- g) Concretagem;

De acordo com Geofix (2020), antes da escavação propriamente dita, são executadas as muretas guia. Estas, são pequenas paredes feitas de concreto armado em todo o perímetro onde haverá a diafragma, ilustrado na figura 14. Segundo Hashizume (2006), exercem as seguintes funções:

- Definir o caminho da parede, funcionando como “gabarito” para ferramenta de escavação *clamshell* ou hidrofresa;
- Impedir o desmoronamento do terreno próximo à superfície em virtude da variação do nível de lama provocado pela operação da máquina de escavação;
- Garantir a altura adequada do fluído estabilizante acima do lençol freático;

Figura 15 – Mureta guia executada em concreto armado para posterior execução de parede diafragma



Fonte: Hashizume (2006).

Com a mureta executada, inicia-se a escavação do solo onde a parede diafragma será realizada. Entretanto, esse processo de elaboração da vala é feito com a necessidade de utilização de fluído estabilizante, com finalidade de impedir o desmoronamento em seu período de escavação (BRASFOND, 2020). Os materiais empregados para tal função são lama

bentonítica e polímeros adicionados em água, no presente trabalho abordaremos o primeiro fluído, visto sua maior utilização.

Segundo Hashizume (2006), a lama bentonítica é formada pelo argilomineral bentonita e água. A primeira, argila, é obtida em depósitos naturais, com elevado poder de inchamento, podendo ser sódicas ou cálcicas. Porém, somente as bentoníticas sódicas quando misturas em água formam solução estável.

A estabilização da lama bentonítica ocorre da sua estrutura formada pelas partículas de argilomineral em contato com a água, hidratando-se e posteriormente aumentando seu tamanho (ANSON, 2020).

Destacam-se três características importantes da lama que possibilitam seu uso como material estabilizante:

- Não decantação das partículas de bentonita mesmo por longo período de tempo;
- Formação rápida do “*cake*”, película impermeabilizante, sobre uma superfície porosa, na qual as partículas porosas vão colmatando os vazios do solo rapidamente;
- Comportamento tixotrópico: capacidade reversível de se tornar líquida quando agitada ou bombeada, e de formar um gel quando em repouso. Com resistência do gel aliada a densidade da lama ser maior que a da água, o “*cake*” permanece aderido as paredes impedindo sua remoção na escavação;

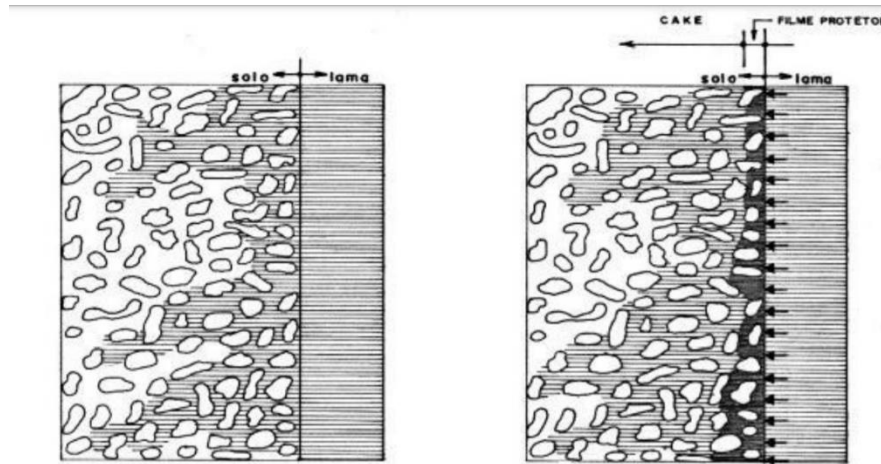
De acordo com Hashizume (2006), durante a escavação a lama exerce as seguintes funções:

- Suportar as faces da escavação, exercendo uma pressão hidrostática sobre as mesmas;
- Formar um sele para impedir a perda da lama no solo;
- Deixar em suspensão partículas sólidas do solo escavado, evitando que elas se depositem no fundo da escavação;

No trecho próximo ao nível do terreno a ação estabilizadora da lama não é muito eficaz, devido a grande e constante variação do seu nível, bem como devido ao peso dos equipamentos de escavação; por isto deve-se usar a mureta guia como estrutura de sustentação do solo (HASHIZUME, 2006, p. 52).

Após a formação do “*cake*”, ocorre a cobertura das faces da escavação por uma fina camada de partículas de bentonita, chamada de filme protetor, evitando também a perda de lama através da absorção do solo, ilustrado na figura 15.

Figura 16 – Penetração máxima da lama bentonítica na parede da escavação e formação do filme protetor responsável por não permitir a perda do restante do fluido presente na vala de escavação



Fonte: Brasfond (2020).

Conforme Anson (2020), a preparação da lama bentonítica acontece na central de lama, figura 16, instalação constituída com misturador de alta turbulência, responsável por manter a substância agitada em seu período de maturação, pelo menos 12 horas, até atingir o inchamento necessário. Posterior a esse processo, a lama é levada até o local da escavação por tubulações metálicas com engate rápido ou mangueira de plásticos rígidos.

Figura 17 – Instalações da central de lama responsável pelo tratamento e limpeza do fluido utilizado



Fonte: Anson (2020).

Hashizume (2006), aponta a necessidade de troca da lama após a finalização do processo de escavação, em razão dessa etapa acarretar em uma grande quantidade de sólidos em suspensão. O mesmo autor destaca as duas maneiras de elaborar a troca:

- Com substituição: a lama já utilizada na escavação vai sendo retirada pela parte inferior com uso de bombas de recalque, já a lama nova é posta na escavação pela parte superior.
- Com circulação: a lama utilizada vai sendo retirada pela parte inferior passando por processo de desarenação, retirando as partículas de areia suspensas, para mais tarde o fluído voltar a ser utilizado na cava.

Existem dois equipamentos utilizados para realizar a escavação do terreno para implantação da parede diafragma, sendo: *clamshell* e hidrofresa.

O primeiro, conforme Anson (2020), executa a escavação pela penetração no solo cortando o mesmo como um todo, posteriormente transportando-o para fora da cava. O mesmo autor destaca a importância de haver controle da velocidade de descida do equipamento, para haver tempo de formação do *cake*. Hashizume (2006), ainda acrescenta que os “*clamshells*” são os equipamentos mais utilizados na execução de paredes diafragmas, figura 17, visto que se adaptam de maneira total aos serviços exigidos e acarretam em menor custo. Podem estar suspensos a barras “Kelly”, hastes que os suportam ou acoplados a guindastes de esteiras.

Figura 18 – *Clamshell* acoplado a guindaste de esteira inserindo sua garra no solo para desagregação do mesmo



Fonte: Geofix (2020).

O outro equipamento utilizado nas escavações de paredes diafragmas é a hidrofresa, como mostra a figura 18, com maior sofisticação, desfaz a estrutura do solo em fragmentos de tamanhos reduzidos, que são retirados da cava juntamente com o fluído estabilizante,

necessitando técnicas de maior custo para recuperação da lama bentonítica. Assim, normalmente o uso das hidrofresas restringem-se a obras profundas e terrenos rochosos, onde outro equipamento não teria capacidade de dar uma continuidade estrutural da parede diafragma em execução.

Figura 19 – Hidrofresa



Fonte: Brasfond (2020).

Conforme Anson (2020), a escavação tem início por uma lamela chamada de primária, com a profundidade de 1 metro atingida a lama bentonítica e bombeada para o interior da cava, estabilizando suas paredes. Para Ranzini e Junior (1998 apud HACHICH et al., 1998) o preenchimento da lamela com o fluido estabilizante deve ser simultâneo a escavação.

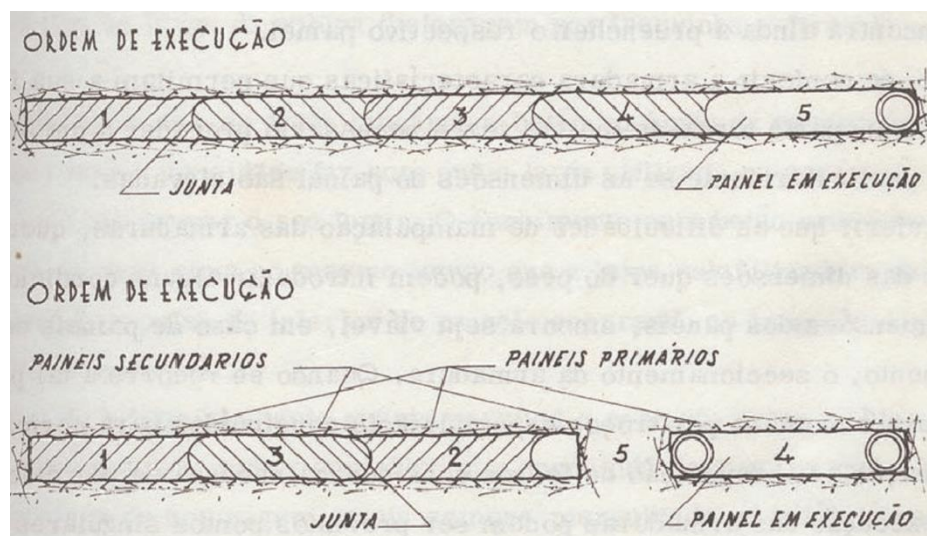
Segundo Hashizume (2006), a perfeita escavação está ligada aos processos realizados e equipamentos usados. O mesmo autor destaca três aspectos importantes:

- *Verticalidade*: depende do posicionamento do equipamento em relação a lamela a ser escavada e do prumo das muretas guia.
- *Alinhamento*: a falta de alinhamento é causada pela tendência do “clamshell” em girar em torno de seu eixo e pelo desalinhamento das muretas guia.
- *Overbreak*: presença de protuberância na parede diafragma acabada e depende muito das características das camadas de solo atravessadas e principalmente da qualidade da lama bentonítica.

O processo anterior a concretagem é a colocação das chapas junta. Coloca-se moldes nas laterais dos painéis de modo a criar juntas “secas” do tipo macho-fêmea. Usam-se tubos metálicos de diâmetros equivalentes as laterais dos painéis, após o início da cura do concreto, os mesmos são retirados, resultando em superfícies semicilíndricas nas extremidades (BRASFOND, 2020). Outra maneira de executar as chapas junta e normalmente mais utilizada é o uso de chapas trapezoidais, inseridas na vertical com sua base menor voltada para dentro do painel, assim, na sua retirada ocorre a formação de junta fêmea, acarretando que no painel posto na sequencia o concreto preencherá o espaço da junta fêmea, solidarizando-se. (GEOSONDA, 2020)

Para Anson (2020), a execução dos painéis acontece de maneira contínua ou alternada, figura 21. Continuamente, o tubo junta é utilizado na face de ligação com o painel seguinte, já de maneira alternada dois tubos juntas são postos um em cada extremidade do painel sendo chamados de primários, já os painéis intermediários conhecidos como secundários.

Figura 20 – Sequência de execução dos painéis



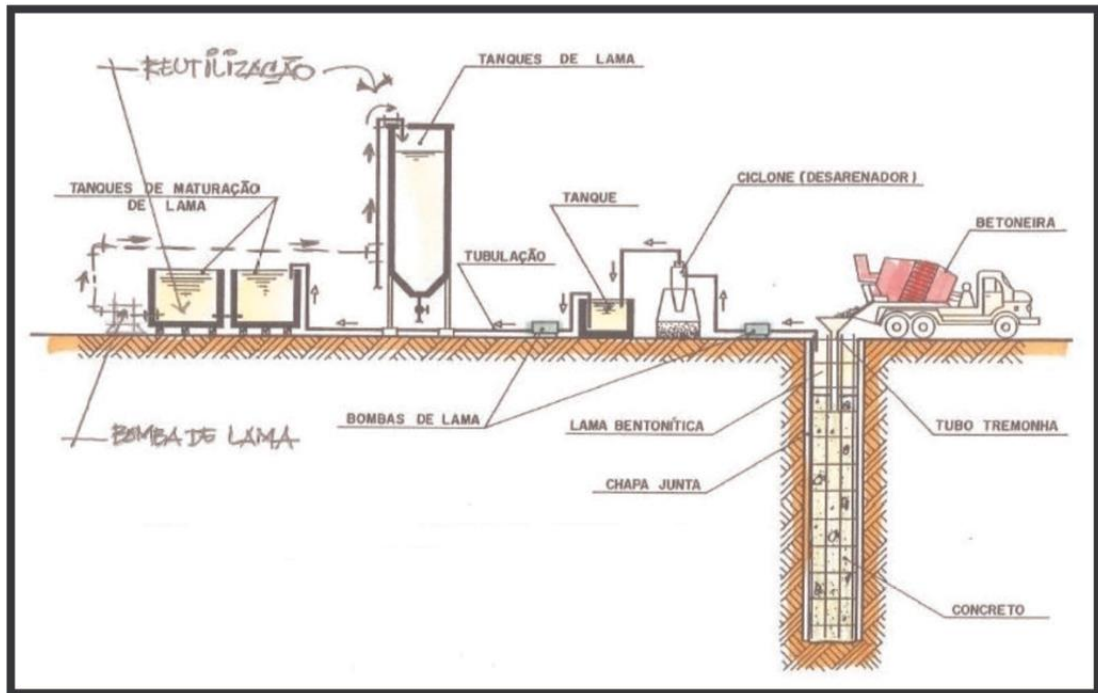
Fonte: Franki (2020).

A concretagem da parede diafragma é executada de maneira inversa, ou seja, da parte inferior da cava a superior, de modo contínuo. Para realização desse processo se faz uso de um tubo tremonha, constituído de elementos com diâmetros de 20 cm e comprimento de 1 a 5 metros, emendados até atingir altura próxima ao fundo da lamela.

O concreto é depositado diretamente do caminhão betoneira para um funil com saída para o tubo tremonha. Possuindo densidade maior que o fluido estabilizante, o concreto faz com

que a lama seja retirada da cava, sem ocorrer a mistura, pela ocupação do espaço anteriormente ocupada pela mesma.

Figura 21 – Esquema completo de concretagem de parede diafragma rígida



Fonte: Franki (2020).

Conforme a lamela vai sendo preenchida o tubo tremonha também eleva-se, entretanto, continuando com sua extremidade inferior cerca de 1,5 m abaixo da linha de concreto, não permitindo assim formação de juntas frias ao longo da concretagem, situação a qual pode atenuar infiltrações, prejudicando a estanqueidade da técnica.

3.3 JET GROUTING

As técnicas de injeções aplicadas no solo com finalidade de melhoramento de suas propriedades físicas e também mecânicas, apresentam grande versatilidade e flexibilidade de aplicação em diferentes cenários geotécnicos.

A disponibilidade de solos com propriedades naturais adequadas a receber obras é cada vez mais difícil de encontrar, em especial, no meio urbano, com essas condições o tratamento de solo mostra-se solução pertinente dentro da geotecnia, devido sua evolução e aumento de exigência, tanto em aspectos técnicos e de segurança. Neste sentido, em especial o *jet grouting*

apresenta-se como solução de grande potencial e atrativo em comparação a outros métodos de melhoramento (RODRIGUES, 2018).

Para Roberto (2012), o pioneirismo da técnica é dividido entre dois países, nos Estados Unidos na década de 60, a desagregação do solo em minas de carvão era realizada por meio jactos de água a pressões elevadas no terreno. No mesmo período, no Japão, os mesmos princípios foram aplicados, entretanto, com finalidade de incremento nas propriedades do solo, não somente obter sua desagregação. Assim, nos anos 70 nasciam os primeiros sistemas *jet grouting*.

Na Inglaterra, em 1962, ocorreu o primeiro uso da técnica de *jet grouting* com intuito de diminuição de permeabilidade do solo e formação de barreira estanque, possibilitando a percepção que o método poderia ser usado em qualquer tipo de solo, sem restrições de granulometria, geologia e até mesmo presença de água (CARLETTO, 2009). Com isso, conforme o mesmo autor, tornou-se possível o controle de percolação com o uso do método de injeção no solo, através de colunas interpenetrantes com adesão no contato entre as mesmas.

O jet grouting não objetiva preencher os vazios do material permeável e com isso diminuir sua permeabilidade. O que acontece é a formação de um novo material rígido, com dimensões controladas, proveniente da mistura da calda com o solo desagregado. Este novo material tem, comparativamente com o solo que o circunda, um coeficiente de permeabilidade mais baixo. Sendo assim, ao executar várias colunas em distâncias próximas e predefinidas, forma-se uma barreira sub-vertical de colunas aglomeradas, realizando o controle da percolação pelo solo (GÓIS, 2015, p. 22).

De acordo com Gois (2015), executar uma estrutura capaz de barrar a passagem d'água com colunas de *jet grouting* em forma de cortina é possível em virtude do comportamento das colunas, com as mesmas inseridas umas nas outras, como ilustra a figura 21, dando origem um bloco uniforme e único, com grande adesão e contato.

Figura 22 – Adesão entre colunas *jet grouting* formando um bloco único com grande adesão nas juntas construtivas e estanqueidade



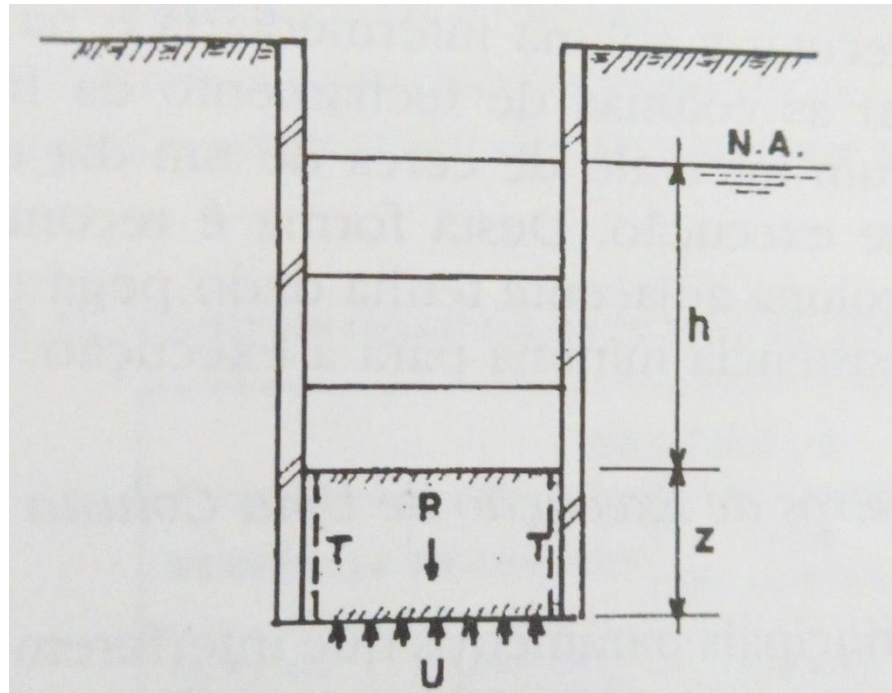
Fonte: Góis (2015).

Quando ocorre encontro de um jato com um obstáculo, podendo ser outra coluna já executada, forma-se efeito similar ao produzido pelo vento: os filetes de calda mudam o seu caminho, acarretando em um desvio, criando redemoinho envolvendo o obstáculo dando origem uma única peça. Com isso, o uso da técnica visando controle de fluxo subterrâneo é feito com execução de colunas interpenetrantes, formando uma barreira com permeabilidade extremamente baixa.

Com finalidade de barrar a fluxo ascensional em estruturais enterradas o *jet grouting* executado em escavação profundas com nível freático, torna-se cada vez mais frequente, como laje tampão de fundo, trabalhando como uma laje estanque, apta a garantir estanqueidade e resistir a pressão hidráulica exercida no fundo da escavação.

Carletto (2009), destaca a utilização da técnica de reforço do solo com *jet grouting* para projeto e implantação de um tampão de fundo, conforme figura 22. O uso do *jet Grouting* e o jateamento do solo com aglutinante (calda de cimento) pode-se formar uma laje impermeável, que com sua robustez, massa e adesão permite combater a subpressão na base do último nível do subsolo, entre as paredes diafragma e contra a ruptura de fundo do conjunto.

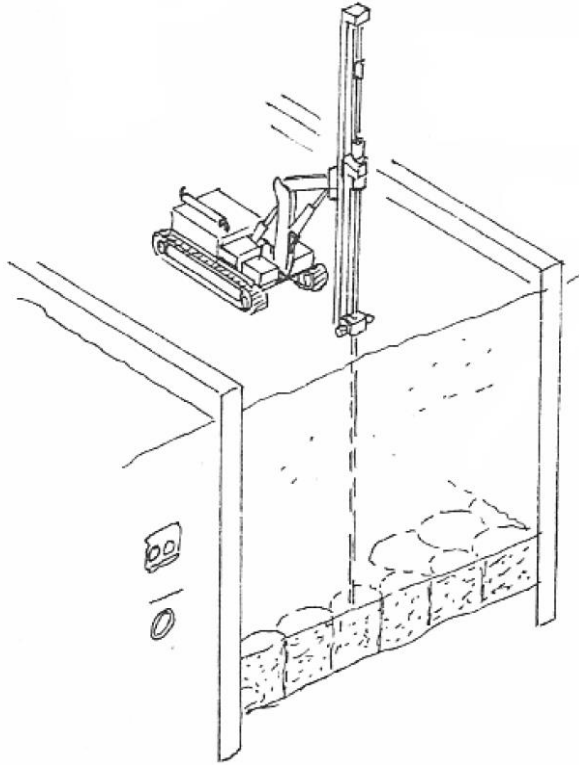
Figura 23 – Esquema da utilização de um tampão de fundo em vala ou em um subsolo de edifício com a utilização de *jet Grouting* ou suas técnicas derivadas do jateamento do solo com aglutinante (calda de cimento).



Fonte: Hachich et al (1998)

A técnica consiste em formar uma malha de colunas no fundo da escavação, em primeiro momento com as mesmas distantes uma das outras, chamadas de colunas primárias até ocorrer o fechamento gradual do fundo da escavação em alternância, conforme mostrado na figura 08 em associação com as figuras 23, 24, 25 e 26.

Figura 24 – Ilustração de execução de laje tampão de fundo, através da execução de colunas *jet grouting* interconectadas

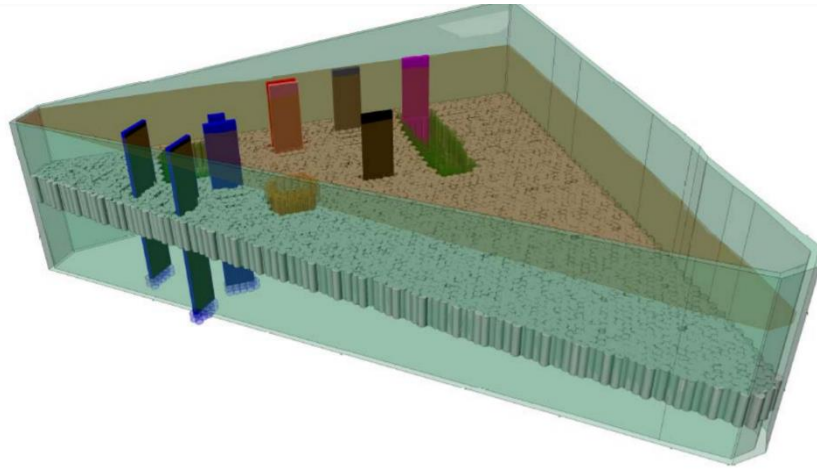


Fonte: Novatecna (2020).

Conforme a Novatecna (2020), o controle de diâmetros das colunas deve ser controlado no momento da execução, com finalidade de manter o sistema homogêneo sem pontos falhos. Ainda, ressalta a necessidade de acompanhamento e controle de locação das colunas já executadas para minimizar possíveis erros, acarretando ineficiência no controle de percolação do tampão de fundo.

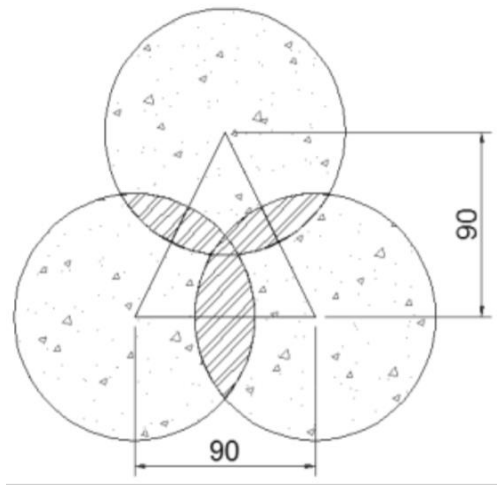
De maneira similar Góis (2015), acrescenta que conforme maior a profundidade dessa cortina, menor a garantia de estanqueidade plena, em virtude de possíveis desvios nas perfurações em grandes profundidades podendo formar falhas entre colunas, originando zonas de baixa eficiência, evidenciando a necessidade de controle executivo rigoroso.

Figura 25 – Esquema 3D de um tampão de colunas *jet grouting* envolvendo os pilares e no perímetro do subsolo a parede diafragma rígida, estruturas que controlam a percolação da água freática.



Fonte: Novatécna (2016).

Figura 26 – Detalhes da locação das colunas na malha *jet grouting* no tampão de fundo com sobreposição de áreas para garantir a estanqueidade.



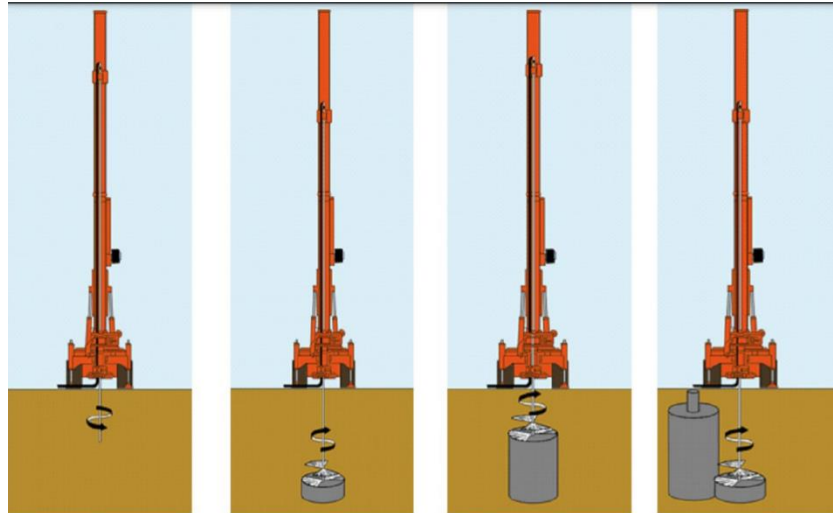
Fonte: Carletto (2009).

3.3.1 Processo executivo

Carletto (2009), explica o funcionamento do *jet grouting* como um jateamento de calda (normalmente de cimento) no solo, por meio de bicos com diâmetros extremamente pequenos, sob velocidade e pressão elevadas. Conforme Góis (2015), a haste é inserida no solo, iniciando

o processo de jateamento, a mesma é retirada com movimentos rotacionais e velocidade constante formando colunas de dimensões definidas, como mostra a figura 26.

Figura 27 – Sequência de execução de colunas de *jet grouting*



Fonte: Carletto (2009).

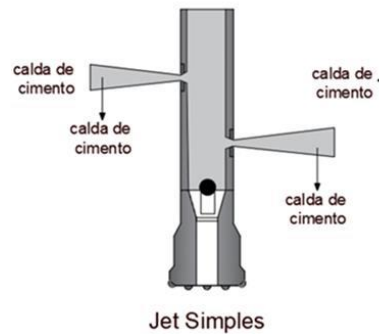
Ainda Góis (2015), classifica os sistemas *jet grouting* conforme os fluídos injetados (calda de cimento, ar comprimido e água) em mono, bi ou tri fluído.

Para Roberto (2012), com a expansão da técnica e estudos mais específicos, o método ramificou-se e foi aperfeiçoado. Ainda na Ásia, o sistema criado com nome de *Chemical Churning Pile* – CCP que utilizava caldas químicas, prejudiciais ao meio ambiente foi reformulado na Itália, com a substituição por água e cimento, passando a chamar-se de *Cement Churning Pile* e atualmente conhecido como jato simples, figura 27.

Rodrigues (2018), considera esse sistema o mais básico, constituído pela injeção de calda de cimento no solo, por meio de bicos injetores. A inserção da calma no solo é feita em altas pressões e velocidades elevadas, desagregando o maciço e a sua aglutinação.

A escolha do sistema de jato simples normalmente é restrita a solos coesivos com N_{spt} entre 5 e 10, em razão da resistência dos solos de maior resistência ou mais densos ao jato do sistema. O mesmo, permite a execução de cortinas de impermeabilização com diâmetros menores que 80 cm.

Figura 28 – bico de injeção utilizados no sistema *Jet grouting* de jato simples



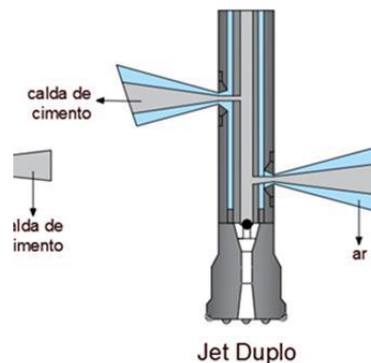
Fonte: Rodrigues (2018).

Conforme Roberto (2012), atualmente chamado de jato duplo ou bifluído (JG, JGS double System), o sistema *jumbo jet special grouting* foi desenvolvido em 1970 com a fusão de outros dois, o *jumbo special pile* e o *jet grout pile*, utiliza ar comprimido envolvendo o jato de calda com finalidade de obtenção de maiores diâmetros das colunas, figura 28.

Para Rodrigues (2018), o sistema difere do descrito anterior justamente pelo uso de ar comprimido, desempenhando a função de aumento no potencial erosivo do jateamento, principalmente em nível abaixo do lençol freático, onde a calda de cimento sozinha tem sua eficiência de desagregação diminuída pela água presente.

Por possuir maior capacidade de desagregação consegue-se obter diâmetros maiores, chegando até 180 cm. Sua utilização abrange uma maior gama de solos, desde areia, argilas e cascalhos. Porém, limita-se a solos coesivos com N_{spt} inferior a 10.

Figura 29 – Detalhes de um bico de injeção do sistema *Jet grouting* de jato duplo

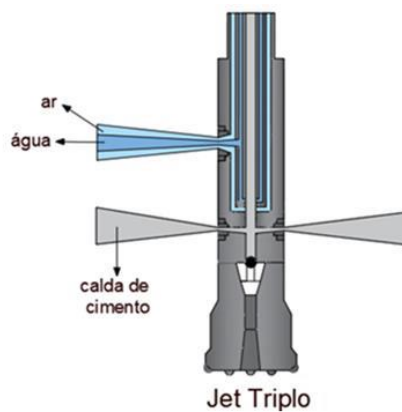


Fonte: Rodrigues (2018).

De acordo com Rodrigues (2018), o sistema mais complexo dos três, é denominado jato Triplo, constituído de jatos de água, ar e calda, como mostra a figura 29. Caracterizado por maior potência, esse sistema desagrega o solo por meio do jato d'água, o qual é envolvido por jato de ar comprimido, através de bicos injetores superiores comum, acarretando em ganho de penetração da calda de cimento no solo, injetada por meio de bicos inferiores presente numa vara coaxial tripla.

Em razão dessa complexidade, o sistema pode ser utilizado em qualquer tipo de solo, dando origem a colunas de significativos diâmetros, superiores a 200 cm.

Figura 30 – Detalhes de um bico de injeção do sistema *Jet grouting* de jato triplo



Fonte: Rodrigues (2018).

Para Rodrigues (2018) e Carletto (2009), este tratamento de solo recorre a equipamentos específicos, como:

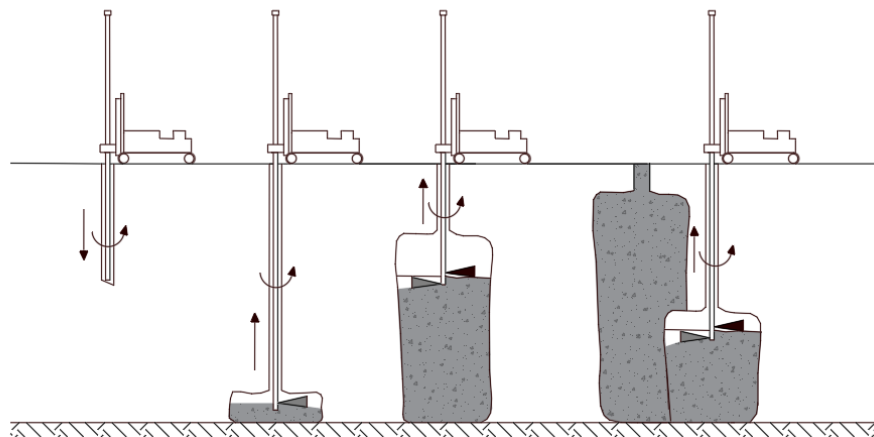
- Central misturadora, constituída por um reservatório de água, uma misturadora e um agitador;
- Sistema de bombagem a alta pressão, com a capacidade de bombear de forma contínua;
- Dispositivo de furação e injeção;
- Mangueiras flexíveis que transportam, em separado, a calda de cimento, ar e água, até a vara do dispositivo de furação/ injeção;
- Compressor de ar, no caso de se utilizar os sistemas de *jet* duplo e triplo;
- Equipamento de registo contínuo, que permita durante a execução da técnica, monitorar os parâmetros de execução.
- E se necessário, bomba de refluxo e depósito, para onde o refluxo de calda é encaminhado e depositado, e/ou transportado para local adequado.

Para Rodrigues (2018), inicia-se o processo executivo do *Jet Grouting* com o posicionamento do equipamento de furação, com a colação da sonda nivelada com o eixo da vara de furação e injeção, coincidente com o eixo da coluna ou em segundo momento, a vara é inserida no solo, e inicia-se a perfuração com jato de água e ou ar. Com a profundidade requerida o jato de água termina seu funcionamento para iniciar a injeção da calda, normalmente de cimento.

A inserção da calda no solo acontece por meio de bicos injetores presentes na extremidade inferior da vara de perfuração, com isso conforme o movimento exercido pela mesma são obtidas colunas com diâmetros com certa variação e geometrias. Com a finalização desta etapa, a vara é retirada e simultaneamente a coluna é preenchida com calda até o topo do terreno, figura 30.

Com o término da etapa de injeção, ocorre a selagem do furo, para que seja iniciado o novo ciclo do processo.

Figura 31 – Processo de execução da técnica de *jet grouting*



Fonte: Rodrigues. (2018).

3.4 ESTACA SECANTE

Conforme Meireles e Martins (2006), a alternativa de barrar o fluxo subterrâneo por meio de contenções formadas por elementos lineares vem ganhando força no mercado. Essa opção, conquistou espaço na construção civil em virtude do meio urbano disponibilizar locais reduzidos para elaboração de obras, demandando em muitas vezes uso de equipamentos de pequeno porte e necessidade de métodos construtivos limpos, diferente de alguns

tradicionalmente conhecidos. Com a modernização de equipamentos utilizados para execução dessas estruturas, consolidou-se ainda mais o uso de estacas secantes como técnicas de controle de percolação.

Nos Estados Unidos, desenvolveu-se na década de 50 a tecnologia da Hélice contínua, formada por guindastes de torre acoplada, com equipamento de perfuração com diâmetros variados. Possuindo baixas potências nos primeiros anos da técnica, o trado retirava o solo, e quando executada em solos mais resistentes, aliava aqueles, provocando descompressão excessiva na área em contato com a estaca. Com isso, focou-se em buscar desenvolvimento e aperfeiçoamento da técnica, algo que ocorreu em meados dos anos 80 nos Estados Unidos e Japão, expandindo-se para o restante do mundo, devido ao seu custo relativamente baixo.

Com a modernização, nasceram as estacas secantes, derivando do método convencional de Hélice Contínua com acréscimo de um acessório na torre de perfuração chamada “cabeça dupla” (MOTA, 2018). A cortina de estacas secantes com sua versatilidade forma uma estrutura rígida de concreto com elevada resistência e praticamente impermeável, visto que o procedimento resulta em uma parede estanque, formada por estacas que se intersectam umas nas outras, como mostra a figura 31, não permitindo a passagem d’água presente no solo em contato (FLEURY, 2012).

Figura 32 – Cortina circular de estaca secante



Fonte: Fleury (2012).

A estanqueidade da parede ocorre conforme a forma de execução, com as estacas secundárias fundidas com as primárias. Desta maneira, a cortina de estacas secantes desponta

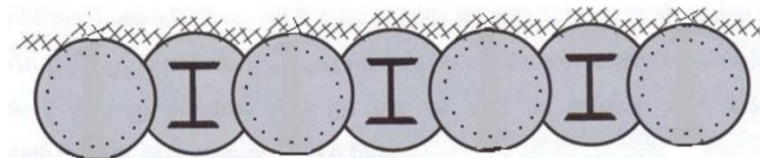
dentro da engenharia como importante solução de custo inferior aos tradicionais métodos de controle de fluxo subterrâneo. Com isso, tem função importante em estruturas enterradas abaixo do nível freático, como vias de comunicação, solos de médio porte e tanques submersos.

3.4.1 Processo executivo

De acordo com Mota (2018), o funcionamento da cortina ou parede de estaca secante está relacionado ao espaçamento existente entre as estacas, tornando-se praticamente impermeáveis. Constitui-se basicamente através da interceptação existente, por meio de dois tipos de estacas:

- As estacas macho, armadas tradicionalmente ou com perfis metálicos, caracterizando-se por serem intermédias das estacas fêmeas.
- Estacas fêmea, que seguem o alinhamento para que foi a parede dimensionada e armada.

Figura 33 – Ilustração de cortina estaca secante, com perfis metálicos



Fonte: MEIRELES E MARTINS (2006).

Mota (2018), destaca que a execução da parede ou cortina de estaca secante, acontece de maneira similar a execução da técnica de estaca hélice contínua. Com as principais etapas, sendo essas:

- Execução da mureta-guia
- Escavação e Concretagem das estacas
- Lançamento da armadura em barras de aço ou em perfis metálicos
- Execução da viga de coroamento

Segundo Fleury (2012), é realizada para definir o local exato de locação das estacas em todo o perímetro da cortina, a mureta-guia é executada com altura aproximada de 20 cm, com largura variável em função do diâmetro da estaca utilizada, possuindo de 15 a 20 cm para cada

lado. De maneira diferente ao admitido na execução de Hélice contínua, em obras com estacas secantes excentricidades não são permitidas, necessitando respeitar o alinhamento e locação de projeto, visto que algo diferente disso, pode causar falha na estanqueidade do elemento.

Para Mota (2018), a construção da mureta se constitui na realização de uma cava onde são posicionadas as formas das estacas, colocação de armaduras quando necessárias e lançamento de concreto nas suas laterais, como ilustrado na figura 33.

Figura 34 – Execução das formas para mureta guia, estas com as dimensões do diâmetro das estacas.



Fonte: MEIRELES E MARTINS (2006).

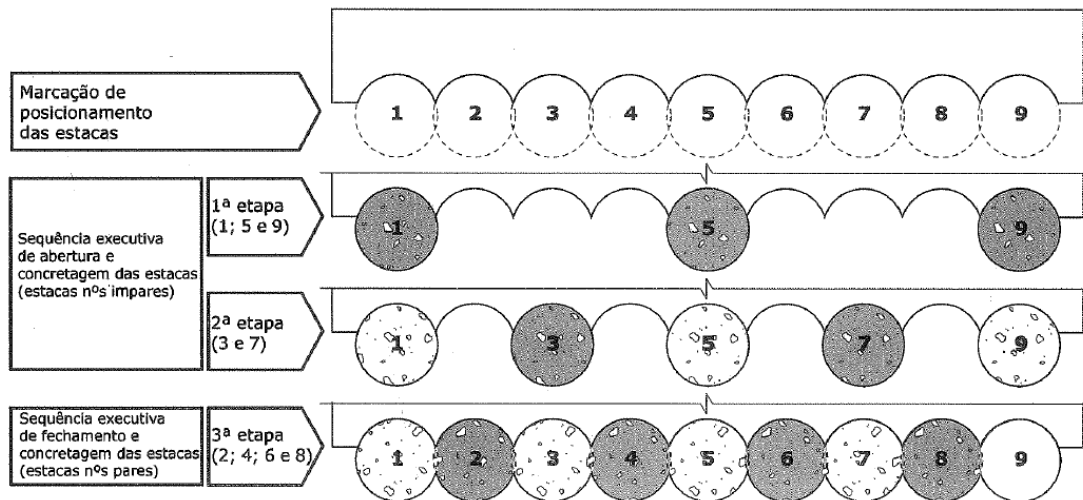
As perfuratrizes utilizadas possuem haste de perfuração em hélice espiral ao redor de um tubo central por onde é feita a concretagem das estacas (MOTA, 2018). Estes equipamentos contam com tubo metálico, proporcionando não somente um acabamento de maior qualidade, mas também corte na estaca primária para garantir a adesão entre essa e as secundárias. A tubulação metálica tem sua ponta formada por material usado na fabricação de brocas e equipamentos de corte, permitindo o corte do concreto.

Iniciada a perfuração, a mesma deve ocorrer sem interrupções, isto é, de maneira contínua para retirada do material. O trado gira no sentido contrário ao tubo que transporta o solo até a superfície, fazendo com que a medida que a perfuração ocorra a limpeza no interior da escavação também aconteça.

Com a profundidade requerida atingida, a concretagem é iniciada por meio de bombeamento direto pelo trado helicoidal vazado. O processo desenvolve-se de maneira simultânea a retirada do conjunto (trado helicoidal e tudo de revestimento), necessitando

controle de volume lançado para evitar pontos falhos, comprometendo a estanqueidade do elemento (MEIRELES E MARTINS, 2006).

Figura 35 – Sequência executiva sugerida indicada para minimizar possíveis pontos falhos na parede estanque de estacas secantes



Fonte: Brasfond (2020).

3.5 CONGELAMENTO ARTIFICIAL DO SOLO

A exigência cotidiana de vias de comunicação, com a finalidade de ligar regiões foi fator de impulsão ao aumento na escolha por uso de túneis como solução construtiva, ademais, a ocupação de áreas anteriormente não habitáveis haja vista características do terreno influi de maneira direta na escolha da técnica como a apropriada em comparação a outros métodos. Por certo, essas estruturas tornaram-se eficientes, quer seja na redução do tempo de deslocamento diário ou para redes de serviços.

Conforme Martins (2016), pela utilização do subsolo, a presença da água exige constante atenção dado a seu potencial de efeitos negativos, seja em fase de exploração ou construção dos tuneis. Para o mesmo autor, os impactos ocasionados pela atuação daquela se prendem principalmente por sua afluência no interior da estrutura, frente de escavação ou nos hasteais.

Quando se trata de construir um túnel, a água em muitos casos já lá está, no maciço a escavar, porque pertence àquele meio natural, daí que seja necessário construir o túnel tendo de saber como afastá-la do local de construção sem que esta cause problemas ou acidentes durante a construção ou futuramente ao longo da sua exploração. Desde quando se começa a planear a construção até ao momento em que o túnel se encontra em exploração, a água é sempre um elemento cuja presença deve ser muito bem estudada e controlada, para que se possam evitar problemas e acidentes. (MARTINS, 2016, p. 24)

Diante desse condicionante na execução e utilização de tuneis, figura 35, desenvolveu-se no continente Europeu (Alemanha em 1890) a técnica de congelamento artificial do solo, vindo mais tarde a ser utilizada como maneira de mitigação do problema de controle de fluxo para interior dessas estruturas. Em primeiro momento, o método foi pensado para solucionar dificuldades encontradas relacionadas a resistência do solo em minas de carvão, haja vista o incremento de resistência com seu uso, ainda nos primeiros anos da técnica constatou-se a capacidade de impermeabilização do solo em virtude do congelamento, resultando em uma barreira à prova de água com permeabilidade extremamente baixa, impermeabilização perto de 100% (SALVADO, 2012).

Conforme Marcos (2011, apud SCHULTZ et al., 2008), sabendo “*à priori*” da necessidade de novas soluções dentro da engenharia, inevitavelmente o congelamento artificial do solo passou a ser utilizados em diferentes cenários construtivos, tornando-se importante método provisório de controle de fluxo subterrâneo em construções de tuneis.

Para Marcos (2011), a opção pela técnica traz consigo necessidade de elevada especialização juntamente com custos significativos, entretanto, de extrema eficiência em escavações abaixo do nível freático, cortinas de impermeabilização e tuneis em geral.

Figura 36 – Solo congelado para construção de um túnel



Fonte: PET Engenharia Civil – UFJF (2013).

3.5.1 Processo executivo

A água normalmente tratada como inimiga pelos engenheiros em primeiro momento, faz-se peça chave para possibilitar a realização do método de congelamento artificial, sua presença se torna indubitavelmente indispensável para criação do gelo.

Segundo Salvado (2012), o método implica na necessidade de remover o calor do subsolo, de modo que a temperatura atinja o ponto de congelamento da água presente nos poros intersticiais. Essa, considerada agente de cimentação, faz a união das partículas de solo, consequentemente incrementando não só a resistência daquele, mas também, aumentando a estanqueidade do mesmo, criando uma parede de gelo com função de barrar o fluxo d'água.

Por tratar-se de método de melhoramento das características do solo, a análise morfológica é considerada indispensável para escolha do melhor método de congelamento e formação de boa matriz uniforme de solo congelado (SALVADO, 2012).

Salvado (2012) e Marcos (2011) apontam a possibilidade de redução na energia utilizada no processo após o congelamento inicial, necessitando manter a temperatura constante.

Conforme ALMEIDA (2003), os principais aspectos considerados na execução do congelamento artificial do solo são os seguintes:

- Tempo de congelamento e temperatura inicial do solo

- Condições hidrológicas da zona a ser tratada
- Quantidade de água presente no solo
- Temperatura e velocidade de percolação da água

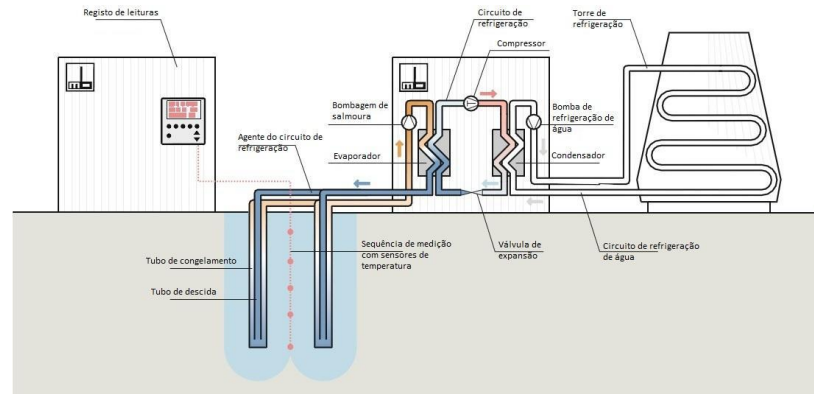
Almeida (2003) cita os seguintes equipamentos utilizados no congelamento artificial do solo:

- Equipamento de refrigeração composto por evaporador, compressor e condensador atuante sobre um fluido de refrigeração;
- Tubagem de circulação de fluido em circuito fechado, aberto ou misto que percorre os tubos de congelamento instalados no terreno;
- Material para isolamento térmico do circuito e solo tratado;
- Equipamento de colocação das sondas e tubos;

A salmoura, solução saturada de água com sal tradicional, CaCl_2 , quando aplicada como substância de refrigeração atinge temperatura entre -20°C e -40°C (SALVADO, 2012). Essa, para ser utilizada necessita-se de aparelhos de refrigeração, a circulação da solução é realizada através de sistema de resfriamento, como ilustra a figura 36, composto por tubos de congelamento inseridos no terreno.

O cloreto de sódio, usual salmoura, é bombeada através dos condutos colocados solo, esses constituem um circuito fechado onde a solução não entra em contato direto com o local a ser tratado. Conforme Salvado (2012), o fluido refrigerante diminui a temperatura da tubulação e por sua vez aquece, em virtude do calor presente no solo. A solução retorna a central de resfriamento para ser arrefecida e realimentar todo o sistema de congelamento do solo.

Figura 37 – Esquema de congelamento por Salmoura

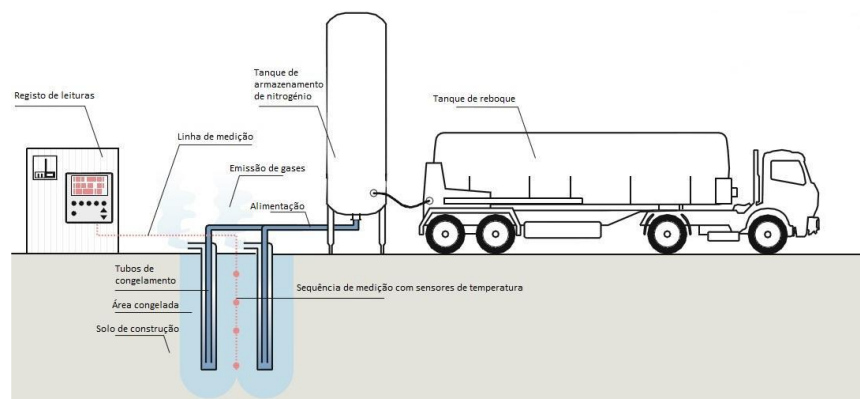


Fonte: Adaptado de BAYER et al., (2010).

O nitrogênio é um gás não inflamável, presente no ar, sua utilização como solução refrigerante, por meio de caminhão tanque ou armazenamento *in situ*, baseia-se no princípio chamado de congelamento por “choque” (BAYER et al., 2010). Conforme Marcos (2011), em virtude de a temperatura inicial dos tubos de refrigeração ser elevada quando comparada ao N_2 , o mesmo evapora a $-196^\circ C$, liberando-se do conduto, assim absorvendo energia presente no solo ao redor da tubulação, resultando no congelamento.

O processo se caracteriza por ser circuito aberto, ocorrendo o contato direto do fluido de resfriamento com o solo a ser tratado, figura 37. O método caracteriza-se não somente por ser mais rápido que o congelamento com salmoura como solução de arrefecimento, mas também, mais econômico que a mesma.

Figura 38 – Esquema de congelamento por Nitrogênio líquido



Fonte: adaptado de BAYER et al., (2010).

O início do processo executivo da técnica de congelamento artificial do solo é realizado com a escolha do material refrigerante e conseqüentemente procedimento mais adequado a ser adotado, entre circuito misto, aberto e fechado. Pautado em estudo geotécnicos instala-se os equipamentos no terreno, agregado a isso, as tubulações de arrefecimento, responsáveis por formar a parede impermeável de gelo, são inseridas no solo.

Para possibilitar monitoramento da técnica, em caso de possíveis variações térmicas, parâmetros mecânicos e hidráulicos é acoplado no solo outro sistema, chamado de segurança, formado por sondas ou sensores colocados ao redor da área de congelamento.

Com o sistema de refrigeração pronto, promove-se a circulação da solução de resfriamento (Salmoura ou Nitrogênio) a baixa temperatura, dando início ao congelamento do solo, aumentando sua área de maneira gradativa até atingir o espaço requerido.

Por fim, com o terreno já congelado, resistência elevada e a barreira impermeável consolidada, formada pela camada de gelo, dá-se início ao processo executivo da obra. Com essa realizada, a circulação do fluido de arrefecimento é interrompida iniciando descongelamento do solo, com as condições originais estabelecidas o sistema de tubulação é desativado por completo e posteriormente retirado.

Apesar de ser uma solução muito antiga, aplicada na prática de recuperação e/ou reforço de obras de edifícios da construção civil – estruturas com recalques diferenciais, com desaprumo significativo. Na atualidade, esta técnica tem sido pouco utilizada neste ramo da engenharia civil, mas vem ganhando importância na área de saneamento. É mais utilizada na construção de túneis, tais como para metrô ou vias rododiferroviárias com traçado por baixo de leitos de rios, lagos ou mares.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Torna-se facilmente notório a evolução tecnológica ao longo dos últimos anos, nomeadamente no que diz respeito ao controle de fluxo de água em estruturas enterradas, em solos com nível freático elevado, possibilitando que o mercado disponibilize, nos dias atuais, uma gama de soluções de qualidade e viáveis, quando corretamente escolhidas, estudadas, projetadas e executadas. Esses aspectos ficam sobre responsabilidade do engenheiro, que deverá possuir atribuição e capacidade de escolha pela melhor solução, sempre buscando o equilíbrio entre custo e desempenho.

Salientando-se que o projeto e a construção de obras desta natureza (subterrâneas e/ou de fundação) e relevância são necessárias boas investigações geológicas e geotécnicas e a sua qualificada interpretação, por geólogos de engenharia, em especial, com relação aos aspectos hidrogeológicos e geomecânicos do meio físico local. Portanto, recomenda-se para estas atividades de investigações, análises e o estabelecimento de condicionantes hidrogeológicos e os demais elementos geotécnicos de projetos de fundação uma equipe de profissionais, no mínimo, recomendando um geólogo de engenharia para a importante tarefa de interpretar a natureza geológica e fornecer os recursos necessários para um bom projeto e obra.

Por meio da elaboração deste trabalho foi possível não somente constatar a quantidade significativa de soluções, mas também, tornou-se de fácil percepção a necessidade de estudos para compreensão das características do solo em questão, sejam elas: física, química ou hidrológica do maciço. Através de documentos geológico-geotécnico relacionados ao local a intervir.

Ademais, tal como acontece com os métodos de exclusão, os sistemas de captação e bombeamento receberam incremento tecnológico ao longo dos anos com a finalidade de atuarem em obras com fluxos mais intensos e profundidades mais elevadas, disponibilizando hoje alternativas em diversos solos. De acordo com isso, foi observado que o uso de rebaixamento por ponteiras devido sua praticidade de instalação em custo relativamente baixo se mostra como excelente opção para rebaixamentos pequenos. Para alturas mais elevadas, analisa-se como interessante o uso de injetores ou poços profundos com bombas verticais, em razão de suas potências elevadas, entretanto, envolvendo custos maiores do que os despendidos nas ponteiras.

Nos métodos que não alteram a posição do nível freático, chamados de sistemas de exclusão, os condicionantes da obra e do meio inseridos também determinam suas aplicações. Nestes, o *jet grouting* e o congelamento artificial do solo caracterizam-se pelo funcionamento

através da mudança das propriedades do terreno, acarretando diminuição de sua permeabilidade, mostrando-se funcionais em uma gama de solos, além disso, o primeiro tem destaque também pelo viés ecológico, visto que sua execução é considerada limpa. Já o congelamento, apresenta-se como uma técnica com pouca difusão no país, em virtude de seu alto grau de investimento em equipamento e em razão da temperatura de tropical presente. Diante disso, suas execuções necessitam um controle técnico elevado e com grande rigor, possibilitando o alcance de resultados esperados no controle d'água.

O mais tradicional método de controle de percolação através de barreiras realizadas *in loco*, as paredes diafragma, também receberam incremento tecnológico no modo de execução, pela entrada no mercado das máquinas hidrofresas, possibilitando o uso da técnica em terrenos anteriormente não aplicáveis. O aumento de seu custo foi compensado com base no chamado “tripé da produtividade”, resultando em ganho de tempo e qualidade executiva. Diante disso, a técnica destaca-se pela pouca interferência no meio, grande desempenho estanque, sendo uma das mais optadas para controle de percolação em estruturas enterradas de grande escala, presentes em áreas urbanas. A utilização de cortinas secantes aparece como importante solução de substituição de paredes diafragma escavadas com lama bentonítica, visto que sua execução é um processo limpo, a seco e com menor quantidade de equipamentos, formando de uma parede com desempenho similar em relação ao controle de percolação a realizada pela Hidrofresa ou *Clamshell*, com menor custo e executável em áreas de pequeno espaço.

Assim, com a observação das peculiaridades de cada situação, nota-se a importância na escolha de um método final adequado. Todavia, é necessário a compreensão que essa ação não deve ser tomada baseada em um único aspecto, devendo ser levado em conta custo da solução, tempo de execução, condições do meio, disponibilidade de equipamentos e materiais, ressaltando a importância de um planejamento e acompanhamento de engenheiros, técnicos experientes e capacitados na execução dos métodos, pois tratam-se de processos dinâmicos, com tomadas de decisões rápidas, planejadas e técnicas.

Por fim, com as informações apresentadas no presente trabalho espera-se contribuir para análises mais completas de sistema de controle de fluxo subterrâneos, visando uma maior viabilidade técnica e econômica, fornecendo elementos para proporcionar comparações em escolhas de métodos a ser executados em estruturas enterradas.

5 OPORTUNIDADES DE TRABALHOS FUTUROS

Frente ao cenário encontrado neste trabalho, sugerem-se novos estudos abordando os seguintes temas:

No tocante as obras de médio porte ou de um subsolo, realizar uma pesquisa buscando a comparação da execução das paredes diafragmas e de cortinas estanques de estacas secantes, baseado no “tripé da produtividade” (custo, tempo e qualidade) em relação ao controle de fluxo subterrâneo destes métodos;

Considerando o grande potencial da aplicação das altas tecnologias associadas as hidrofresas, os cursos de graduação e/ou pós-graduação poderiam estabelecer parcerias com as empresas para a transferência e desenvolvimento de tecnologias, e a ampliação do conhecimento e/ou apoio técnico para a verificação do desempenho deste tipo de técnica em obras com subsolos em ambientes constituídos de perfis de solos residuais brasileiros com concreções ou com blocos rochosos e fundações com cascalhos.

6 BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, N.M. **Tratamentos térmicos – congelação artificial do terreno**. Porto Salvo - Portugal: Construlink Press, 2013. 18 p.
- ALONSO, U. R. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. [S.I.]: Oficina de Textos, 1999.
- ALONSO, U.R. **Exercícios de Fundações**. 2 ed., Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, 2010. 206 p.
- AMBIENTE, M. D. M. **Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido**. [S.I.]: Ministério do Meio Ambiente Brasília, 2020.
- ANSOS. **Paredes Diafragma e Estacas Escavadas**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.anson.com.br/fotos/catalogo_scan.pdf>. Acesso em 07 dez. 2020.
- AZEVEDO, Adalberto Aurélio; ALBUQUERQUE FILHO, José Luiz. Águas subterrâneas. In: OLIVEIRA, Manoel dos Santos; DE BRITO, Sérgio Nertan Alves. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- BRASFOND. **Fundações Especiais**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.brasfond.com/jgrouting.html>>. Acessado em: 08 dez. 2020.
- BRASFOND. **Fundações Especiais**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.brasfond.com/pdiafragma.html>>. Acessado em: 04 dez. 2020.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Cengage Learning, v. 8, 2011.
- BAYER, F. et al. – **Infraestrutura Ground Freezing Technology**, 2010.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. [S.I.]: Livros Técnicos e científicos, 2008.
- CARLETTO, M. F. W. **Jet grouting (sistema monofluido): um método teórico simplificado para a previsão do diâmetro das colunas**. Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil, Agosto, 2009.
- CARRETO, J. M. R. **Jet Grouting: a problemática do dimensionamento e do controle de qualidade**. [S.I.: s.n.], 1999.
- CHIOSSI, N.J. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. v. 3.
- CRUZ, P.T. DA (1998), **100 Barragens: Casos históricos, materiais de construção, projeto**; Editora Oficina de Textos, São Paulo.
- COSTA FORTUNA. **Serviços de Contencões**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.costafortuna.com.br/svc_contencoes.html>. Acesso em 08 dez. 2020.
- FEITOSA, F. Filho, **jm hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza, CPRM, LABHID-

Universidade Federal de Pernambuco, 1997.

FERNANDES, M. **Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais**. Porto, Portugal, FEUP Edições, 2012, Vol. 1.

FLEURY, G. V.. **Material didático da disciplina Fundações**. Escola Politécnica UFRJ. Engenharia. 2012.

FRANKI, **Parede Diafragma**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.franki.com.br/parede_diafragma.html>. Acesso em 15 dez. 2020.

GEOFIX. **Paredes Diafragma com Clamshell e/ou Hidrofresa**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.geofix.com.br/servico-paredes-hidrofresa.php>>. Acesso em 10 dez. 2020.

GEOFUND. **Parede Diafragma e Estacas Barrete**. São Paulo, 2021. Disponível em: <<http://www.geofund.com.br/portifolio-item/parede-diafragma-e-estacas-barrete/>>. Acesso em 10 jan. 2021.

GEOSONDA S.A. **Parede de Diafragma - Estaca Barrete**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.geosonda.com.br/parede-de-diafragma-estaca-barrete.html>>. Acessado em: 05 dez. 2020.

GERSCOVICH, D. M. **Estabilidade de Taludes** (2ª edição). [S.I.]: Oficina de textos, 2016.

GÓIS, F.M.B. **Sistemas de controle de percolação em maciços permeáveis, com ênfase em soluções de jet grouting**. Orientador: André Pacheco de Assis. 2015. 120 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

GRANDIS I., **Rebaixamento e Drenagem em Fundações – Teoria e Prática**, 2º edição, Pini., São Paulo, 1998.

GUIMARÃES, J.Z. **Estruturas enterradas sujeitas a ação de lençol freático: o desafio de torna-las estanques**. 14º Simpósio Brasileiro de Impermeabilização, São Paulo, p. 1-13, 15 jul. 2015.

HASHIZUME, S.H. **Caracterização técnica e indicadores de custos de sistemas de contenção do solo na construção de edifícios**. 2006. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, 2006.

TERZAGHI, K., PECK, R.B., MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3rd ed. ed. John Wiley & Sons, 1996.

MARCOS, A.P. **Estabilização Temporária de Areias por Congelamento**. Orientador: Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta. 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Aveiro, Aveiro - Portugal, 2011.

MARTINS, R.N.J. **Efeito da água subterrânea no projeto, escavação e exploração de**

túneis. Orientador: João Paulo Bilé Serra. 2016. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

MEIRELES, A. B.; MARTINS, J. **Fundações e contenção lateral de solos—execução de cortinas de estacas**. Série estruturas, 1ª edição, 2006.

MILITITSKY, J. **Grandes escavações em perímetro urbano**. [S.I.]: Oficina de Textos, 2016.

MONTEIRO, F. **Parede diafragma atirantada e moldada in loco**. Monografia- Universidade Anhembí, São Paulo, 2009.

MOTA, A.M. **Avaliação do Desempenho de Estrutura de Contenção em Balanço Executado em Estacas Secantes**. 2018. 229 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

NETO, P. M. S. **Mecânica dos solos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 376 p.

NOVATECNA. **Soluções em Jet Grouting**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.novatec.com.br>>. Acesso em 28 dez. 2020.

AZEVEDO, A. A. ; FILHO, J. L. A. Águas Subterrâneas. apud OLIVEIRA, M. DOS S. et. al. (1998); **Geologia de Engenharia**; ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia), Oficina de Textos, São Paulo, SP.

PET E. C. UFJF. **Congelamento de Solos**. Juiz de Fora, 2013. Disponível em:<<https://petcivilufjf.wordpress.com/2013/04/19/congelamento-de-solos/>>. Acesso em 10 dez. 2020

PINTO, C. d. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, v. 3, 2006.

PORTELLA, C. **Projeto e Consultoria de Fundações**. São Paulo, 2017. Disponível em:<<https://docplayer.com.br/12337517-Eduardo-jose-portella-da-costa.html>>. Acesso em 09 de Jul. 2021.

RIPPER, E. **Como evitar erros na construção**. [S.I.]: Pini, 1996.

ROBERTO, I. M. **Colunas de jet-grouting na construção de túneis**. 2012. Tese (Doutorado), 2012.

RODRIGUES, A.R.D. **Técnicas de Injeção. Jet Grouting, Aplicações e Regras de Dimensionamento**. Orientador: João Paulo Veludo Vieira Pereira. 2018. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2018.

RODRIGUES, D. F. N. **Jet Grouting-controllo de qualidade em terrenos do miocénio de Lisboa**. 2009. Tese (Doutorado) — FCT-UNL, 2009.

SALVADO, J.A. **Congelamento de solos - Estudo dos efeitos da salinidade**. Orientador:

Agostinho Benta. 2012. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Aveiro, Aveiro - Portugal, 2012.

SOARES, A. Fluxo de água em talude arenoso: modelagem física e numérica. 2006. Tese (Doutorado) — Tese, 2006.

SOLOTRAT. Rebaixamento de Lençol Freático. São Paulo, 2021. Disponível em: <<http://www.solotrat.com.br/rebaixamento-do-lencol-freatico-solotrat>>. Acesso em 17 jan. 2021.

VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. [S.I.]: Mcgraw-Hill, Editora da Universidade de Sao Paulo, 1977.

VELLOSO, P.P.C. Teoria e prática de rebaixamento do lençol freático. Rio de Janeiro: LTC, 1988.