

MAURÍCIO MASSAROPPI RATTICHERI

METODOLOGIA CONSTRUTIVA DE PAREDES DIAFRAGMA

Guaratinguetá
2015

MAURÍCIO MASSAROPPI RATTICHERI

METODOLOGIA CONSTRUTIVA DE PAREDES DIAFRAGMA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Bento Ferreira

**Guaratinguetá
2015**

R237m Rattichieri, Maurício Massaroppi
Metodologia construtiva de paredes diafragma / Maurício Massaroppi
Rattichieri – Guaratinguetá : [s.n], 2015.
56 f. : il.
Bibliografia : f. 60-63

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.
Orientador: Prof. Dr. José Bento Ferreira

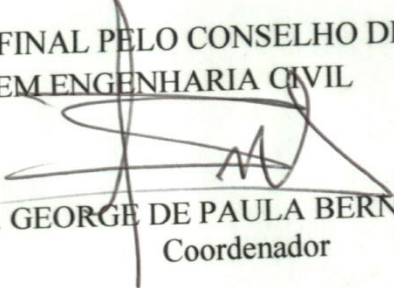
1. Mecânica do solo 2. Escavação 3. Fundações (Engenharia) I. Título

CDU 624.431

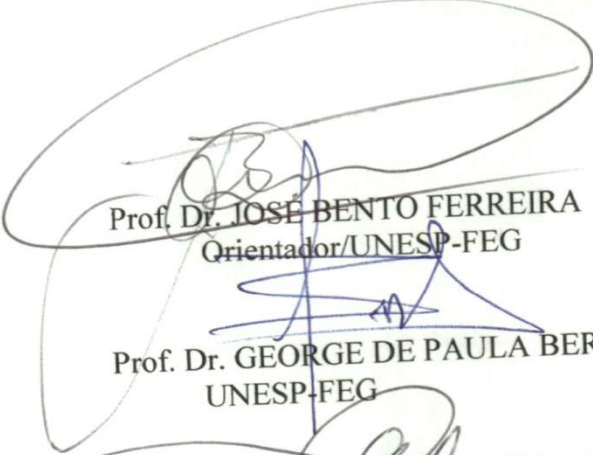
MAURÍCIO MASSAROPPI RATTICHERI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO
EM ENGENHARIA CIVIL"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ BENTO FERREIRA
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES
UNESP-FEG

Prof. Dr. ANTONIO WANDERLEY TERNI
UNESP-FEG

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente por aqueles que me deram suporte em persistir em uma carreira de engenheiro civil, e me deram todas as oportunidades necessárias para obter uma formação de excelência, meus pais Mauricio e Vera.

Agradeço ao meu Professor orientador Dr. José Bento Ferreira, pelo auxílio, apoio e confiança durante os últimos meses.

Além disso, agradeço aos Professores Dr. George de Paula Bernardes e Dr. Antonio Wanderley Terni, pelo auxílio nesse trabalho.

Gostaria de agradecer ao meu colega, companheiro de apartamento e grande amigo Engenheiro Fernando Moretto Pinto, por me aturar durante toda a faculdade.

Gostaria também de agradecer à pessoa que me permitiu chegar aonde cheguei em minha graduação, meu parceiro de trabalhos e estudos e eterno colega, Felipe Correa da Silva.

Aos meus não apenas colegas de turma, ou futuros engenheiros, mas meus amigos, Rafael Fontebasso, João Victor Mussi, Bruna Garcia, Luis Henrique Veloso, Otavio Honório, Leonardo Arakawa, Vinicius Vargas, Kauê de Paula, e os parceiros da Banda da Civil, e os amigos dos outros cursos, Leandro Koji, Marcelo Kenzo, Sérgio Contar, Guilherme Jun e Pamela Kaiser, graças a vocês, a graduação foi o melhor momento da minha vida.

Ao final, gostaria de deixar um espaço para aqueles que serviram de inspiração, tanto profissionalmente como em pensamento e me proporcionaram a perseverança para chegar até aqui, Eric Theodore Cartman por sua atitude, Goku que demonstrou com a dedicação que nada é impossível, Shiryu amigo que combateu o câncer e se livrou da cegueira.

"Cada um de nós tem sua própria vida para viver. É uma jornada, não uma separação"
Kenshin Himura

RATTICHERI, M. M. **Parede Diafragma**. 2015. 63f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Um estudo sobre contenções, com o emprego de parede diafragma, revisando suas características, vantagens e métodos construtivos, e sua aplicação segundo a teoria de Therzaghi. O trabalho aborda as vantagens dos equipamentos de escavação como o Clamshell e a Hidrofresa, técnicas de escavação, tipos de armadura, concretagem de lamelas, metodologias de drenagem e comparação a outras técnicas. Apresenta ainda um estudo de caso, onde pela aplicação de dois métodos executivos, possibilitando fazer uma análise comparativa em uma situação real de obra.

PALAVRAS CHAVE: Parede Diafragma. Lama Bentonítica. Escavação. Mureta Guia. Clamshell. Hidrofresa. Ficha.

RATTICHERI, M. M. **Diaphragm Wall**. 2015. 63f. Graduate Work (Graduation in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

In the study line about contention, using Diaphragm Wall, revising the characteristics, vantages and constructive methods, following the application due to Terzaghi's theory. This work will be revising the advantages of the excavation equipments like the Clamshell and the Hydraulic Rolling Excavator, excavation techniques, and types of steel reinforcements, concreting, draining methodologies and comparison with other techniques. Also, will be revised a Study of Case, which by the application of two executive methodologies, will be possible to make a comparative analyses in a real construction situation.

KEYWORDS: Diaphragm Wall. Mineral Slurry. Excavation. Guiding Wall. Clamshell. Hydraulic Rolling Excavator. Wall Extension.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos NBR 6118

b_w	Largura da alma de uma viga
c	Cobrimento da armadura em relação à face do elemento
d	Altura útil
f	Resistência
h	Dimensão
h	Altura
K	Coefficiente
A_s	Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração
G	Ações permanentes
M	Momento
ρ_{\min}	Taxa geométrica mínima de armadura longitudinal de vigas e pilares
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto
γ_s	Coefficiente de ponderação da resistência do aço

Símbolos subscritos

c	concreto
d	valor de cálculo
k	valor característico
y	escoamento do aço

Símbolos Geotecnia

B	largura da coluna de solo
c	Coesão
E_a	carga de empuxo ativo
W	Peso próprio do solo
ϕ	ângulo de atrito interno do solo
γ	Peso específico do solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
3	CONCEITO	12
3.1	ORIGEM.....	18
3.2	FLUÍDOS ESTABILIZANTES.....	19
3.2.1	Lama Bentonítica	19
3.2.2	Polímero Biodegradável	22
3.2.3	Comparativo Entre Polímero Biodegradável e Lama Bentonítica	23
3.3	DRENAGEM.....	24
3.4	APLICABILIDADE DAS PAREDES DIAFRAGMA.....	26
3.5	DADOS TÉCNICOS.....	27
3.5.1	Lama Bentonítica	27
3.5.2	Concreto	27
4	BASE DE CÁLCULO	28
4.1	ESTABILIDADE DA VALA.....	28
4.1.1	Ficha	28
4.1.2	Estabilidade do Fundo da Vala	29
4.2	MÉTODO DE ANÁLISE PRELIMINAR PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DE UMA PAREDE DIAFRAGMA.....	32
4.2.1	Análise do Programa	32
4.2.2	Resultados	36
5	TÉCNICA EXECUTIVA	38
5.1	PAREDE GUIA.....	38
5.2	ESCAVAÇÃO.....	40
5.2.1	Clamshell	40

5.2.2 Hidrofresa	43
5.3 ARMADURA.....	46
5.4 CONCRETAGEM.....	47
6 ESTUDO DE CASO	51
7 CONCLUSÃO	59
BIBLIOGRAFIA	60

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de criação de espaços em ambientes urbanos cada vez mais preenchidos demandou à criatividade humana a ir além do espaço oferecido.

Com as ferramentas fundamentadas aos conceitos e técnicas da engenharia civil, o ser humano obteve a capacidade de alterar o ambiente a seu favor e explorar tanto o céu, como os oceanos, e principalmente o solo.

A grande dificuldade encontrada ao se lidar com o solo era o próprio solo, e sua principal dificuldade estava em fazer sua contenção.

A necessidade de se criar uma contenção do solo fez com que fosse desenvolvido o conceito de muro de arrimo, uma estrutura provisória ou permanente, capaz de criar um estado de segurança em taludes, terrenos inclinados, valas e outros tipos de escavação, evitando deslizamentos e conseqüentemente acidentes fatais, criando um estado de estabilidade.

Para ambientes urbanos, onde o espaço é muito limitado e é cada vez maior a demanda por escavações mais profundas criou-se a necessidade da introdução de novos métodos executivos.

Dentre muitos outros métodos de contenção do solo, surge o método da parede diafragma que, em poucas palavras, permite uma escavação segura onde a parede de contenção praticamente “já está lá”, durante a retirada do solo.

O diferencial para paredes diafragma em relação a outros tipos de muros de arrimo é o fato de a estrutura ser executada antes da remoção da terra que contemplará a obra.

Com o uso de fluídos de contenção, somados aos equipamentos de escavação lineares, a parede diafragma é criada por partes e depois de concluída, pode ser realizada a escavação, assegurada por um muro de contenção já existente.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho, baseado nas normas da ABNT para Concreto Armado e a teoria de Therzaghi, é conceituar o método executivo da Parede Diafragma, revisando técnicas e equipamentos utilizados em sua sequência de execução, além da revisão teórica.

O trabalho aborda os passos gerais e o comparativo do maquinário utilizado em sua execução.

Explana sobre os tipos de flúidos de contenção mais comumente usados, suas vantagens e desvantagens, inclusive em caráter ambiental.

Além das etapas executivas é discutido brevemente como a parede diafragma se comporta, abordando através da teoria de Terzagui, como ela deve se comportar.

Desenvolve-se um modelo de orientação inicial para decisão e definição do tipo de projeto que pode ser realizado com parede diafragma, estipulando através dos valores de armadura mínima, a espessura e o tipo de concreto que pode ser utilizado em função da análise primária dos momentos gerados pelo solo.

E por fim é realizado um estudo de caso que compara a execução de duas estações metroviárias em meio a um ambiente urbano, mostrando vantagens e desvantagens das técnicas executivas e do maquinário utilizado num ambiente real de obra.

3 CONCEITO

Não é possível falar sobre parede diafragma sem explicar o conceito de muro de contenção.

A designação de muro de contenção é uma forma de se referir a uma estrutural que tenha a finalidade de conter uma determinada massa de solo “instável”.

Um muro de contenção é uma estrutura corrida e vertical, ou quase vertical, capaz de promover um estado de segurança impossibilitando o movimento do solo, em condições inclinadas, declives, valas, cortes, escavações, etc., impedindo seu deslizamento, ou qualquer tipo de estado de ruptura, construído em tipos de estruturas variadas, concreto armado, alvenaria, pedras, ou elementos especiais.

Seu formato varia em função da necessidade de projeto, mas os muros mais comuns são os de perfil trapezoidal, escalonado ou retangular.

Um muro de contenção garante seu estado de segurança através de esforços resistivos, utiliza-se no geral do peso próprio de sua estrutura como elemento resistivo, porém dependendo do formato de seu perfil tipo, pode-se aproveitar de outros fatores como elementos resistentes, incluindo até mesmo a massa de solo a seu favor.

Mesmo quando o muro de contenção tem como função principal o reforço do solo, existem variações nos tipos de solicitações quanto à intensidade, ao tempo de duração, aos níveis de deformação, etc., exigindo estudos diferenciados e específicos para cada aplicação.

Dentre as vantagens de se utilizar um muro de arrimo como solução construtiva, as que mais se destacam são:

- Possibilidade de construir aterros ou taludes;
- Impacto ambiental reduzido;
- Execução de obras em lugares de acesso restrito;
- Redução do tempo de execução de uma obra.

Dentre os muitos tipos de muros de contenção retangulares, temos parede diafragma.

O conceito de Parede diafragma nasce a partir da ideia de painéis (lamelas) de concreto, executados no subsolo por meio de trincheiras escavadas, alinhados em um determinado sentido, formando um muro vertical contínuo de contenção subterrâneo.

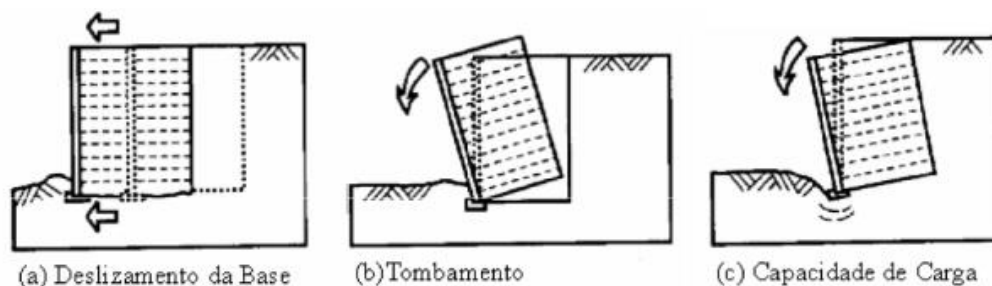
Após executada por completo, a parede diafragma fica presente e pronta para se tornar a estrutura de contenção e inicia-se o processo de escavação.

A parede diafragma deve garantir a sua própria estabilidade, impedindo o movimento do solo. As verificações de estabilidade de um muro de contenção devem garantir que a parede não sofra deslizamento da base (figura 1A), tombamento (figura 1B) e seja estável quanto à capacidade de carga do solo (figura 1C).

Com espessura variando de 0,40m a 1,20m (com casos especiais que chegam até 2,40m), normalmente armados, sendo moldadas in loco, as lamelas podem ser executadas acima ou abaixo do nível da água, em qualquer tipo de solo.

Durante a escavação, conforme a necessidade do projeto, elementos estruturais de escoramento podem ser introduzidos ao corpo da parede, dependendo da necessidade do projeto. Os mais comuns são estroncas, tirantes ou perfis metálicos.

Figura 1- Condições de estabilidade de um muro de contenção



Fonte: http://engenhariacivilunip.weebly.com/uploads/1/3/9/9/13991958/aula_2-2_-_dimensionamento_-_parte_-2muros_de_arrimo_2.pdf

A estrutura da parede permite a absorção de cargas axiais, empuxos e momentos fletores, sem criar uma superfície de escorregamento, além de impedir o fluxo de água no interior da escavação, sem a necessidade da manutenção ou rebaixamento do nível do lençol freático.

Figura 2 – Parede diafragma atirantada na obra de torre comercial na Av. Paulista em São Paulo



Fonte: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/186/imagens/i354185.jpg>

Faz-se o uso de fluidos estabilizantes nas valas escavadas como a lama bentonítica ou polímeros biodegradáveis, que por sua vez, durante a execução, promovem um estado de segurança impedindo qualquer sedimentação, graças ao seu comportamento em relação ao solo.

Além disso, na escavação, deve-se utilizar equipamentos como Clamshell Hidráulico (figura 3) ou Hidrofresa (figura 4) para realizar escavação.

Figura 3 - Clamshell Hidráulico



Fonte: <http://s688.photobucket.com/user/pranda2009/media/cats2.jpg.html?t=1271129265>

Figura 4 - Hidrofresa



Fonte: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/197/artigo294219-2.aspx>

A concretagem é feita de modo submerso e contínuo, utilizando o tubo “tremie” (tubo tremonha) (figura 5), a fim de se evitar a lavagem e desagregação do

concreto e permitindo uma execução em alta velocidade, ao mesmo tempo em que a lama excedente é bombeada, para ser reaproveitada na execução da próxima lamela.

Figura 5 - Concretagem com “tremie”



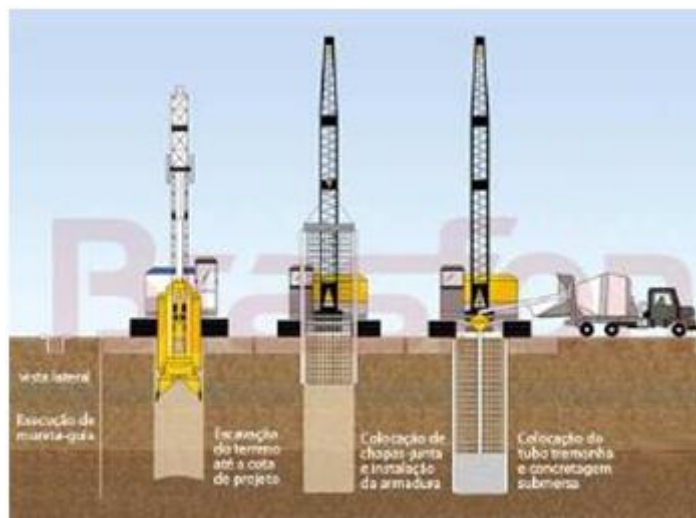
Fonte: http://www.solonet.eng.br/Duvidas/estacas_diafragma.htm

Atualmente a técnica executiva da parede diafragma é utilizada em um número elevado de obras por todo Brasil e pelo mundo, estando presente, principalmente, na construção de estações de metroviárias, garagens subterrâneas, ampliações subterrâneas, barragens, contenções, estruturas provisórias, entre tantas outras aplicações.

Uma das características da parede diafragma é ter sua parte superior com uma resistência bem menor, um trecho mais fraco, esse trecho é conhecido como concreto podre. Isso ocorre devido à mistura do concreto com a lama bentonítica, com isso observado, é comum a prática do arrasamento da camada superior das lamelas, e a construção de uma viga, que terá a função de substituir tal trecho, mantendo a espessura, com juntas de dilatação definidas em projeto, em função da distância das lamelas, e com altura aproximada de 1,5m (altura comum dado o fato que o tubo tremie fica presente, no momento inicial da concretagem, submerso no

fluido de contenção). A armadura presente na parede diafragma arrasada sofre um tratamento, mantendo-se as barras no sentido vertical apenas, que são usadas como ancoramento para a nova armadura presente na viga.

Figura 6 - Esquema executivo de uma lamela com o uso do Clamshell Hidráulico: à esquerda inicia-se o processo com a execução da mureta guia, seguida da escavação com o Clamshell e a introdução do fluido estabilizante, a colocação da armadura através de um guindaste e ao final, a concretagem com o tubo tremie.



Fonte: Acervo Brasfond - <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgSoMAE/parede-diaf-s-s-r?part=3>

Figura 7 - Parede diafragma atirantada com cantos travados por perfis metálicos, obra desconhecida, de garagem predial em subsolo



Fonte: http://www.solonet.eng.br/Duvidas/estacas_diafragma.htm

3.1 ORIGEM

Não seria possível desenvolver a técnica construtiva da Parede diafragma, sem citar a lama bentonítica como fluido estabilizante.

O uso da lama bentonítica se iniciou em 1845 com o engenheiro francês M. Fauvelle. A aplicação em questão se tratava da manutenção da estabilidade de um furo, um poço de 170 metros com o trabalho de 22 dias.

No ano de 1926 a lama bentonítica foi patenteada como elemento de suporte de escavação, por Powell, e seu uso se consistia em furos de grandes dimensões com o uso de uma lama com densidade elevada, permitindo escavação sem desmoronamento. Finalizada a escavação, a lama era bombeada para fora, após seca a vala, a concretagem era realizada. Para a época essa técnica sugeria uma vantagem ao tempo de escavação reduzido.

A Parede diafragma teve sua origem em 1953 com os engenheiros Veder e Marconi, com a mudança da forma circular na escavação para retangular, formando as paredes estruturais moldadas no solo. Sem o uso de escoramento, as valas eram executadas com a lama preenchendo-a por completo, até o seu topo.

A forma circular traduzia estabilidade, porém o uso de lamelas ainda não possuía um mecanismo bem definido, portanto a técnica era quase empírica.

Com o desenvolvimento da técnica, foi necessário o surgimento de técnicas que acompanhassem a sua evolução, assim cria-se o Clamshell.

Em 1969 a técnica de parede diafragma foi implementada pela primeira vez no Brasil, no edifício Pelletron, na Universidade de São Paulo pela construtora FRANKI.

3.2 FLUÍDOS ESTABILIZANTES

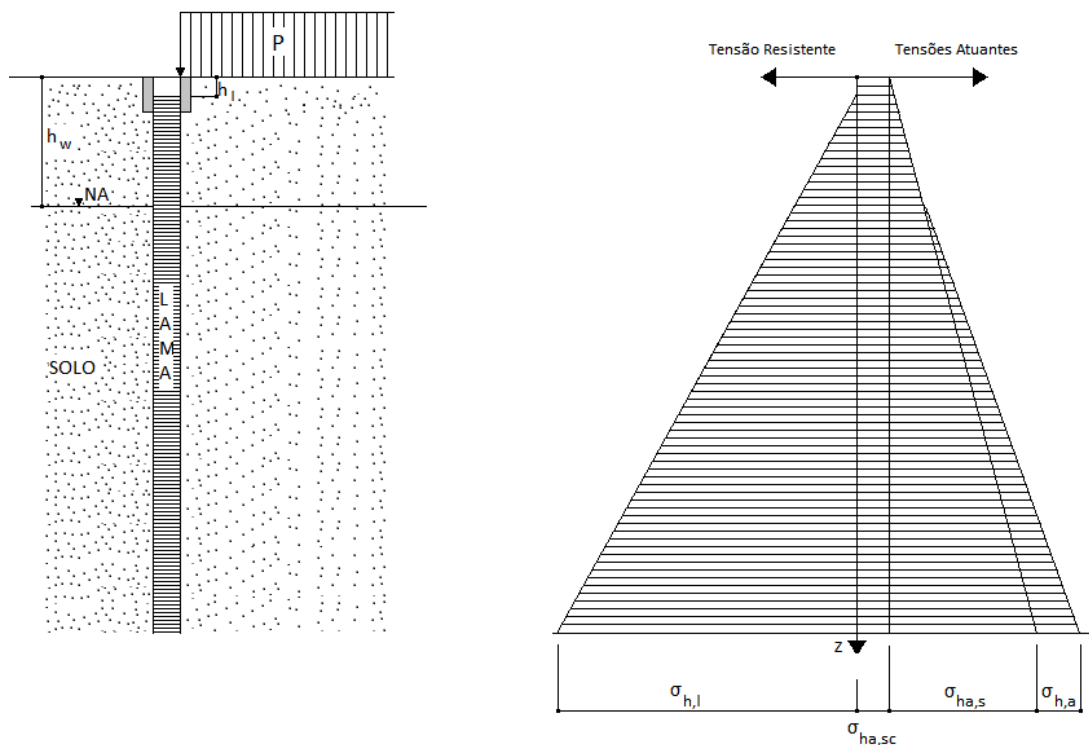
Para manter a estabilidade do talude faz-se o uso de fluídos, preenchendo a vala de maneira que não haja riscos durante a execução da parede de contenção.

Os fluídos que se destacam são a lama bentonítica e o polímero biodegradável.

3.2.1 Lama Bentonítica

A lama bentonítica é formada por uma suspensão de água e argila montmorilonítica, conhecida por bentonita e possui várias propriedades, dentre as quais, as mais importantes são a capacidade de se comportar com certa rigidez em repouso ou fluida quando agitada (tixotropicidade), forma uma película quase impermeável sobre a superfície porosa da área escavada, que permite que a lama exerça pressão hidrostática às paredes da vala (Figura 8).

Figura 8 - Exemplificação dos esforços horizontais atuantes durante o uso da lama bentonítica segundo NBR 6122 (1996) em uma situação genérica



Fonte: Autoria própria.

Na figura 8 h_w representa altura do nível da água (NA), h_l a cota da lama bentonítica, P uma sobrecarga genérica $\sigma_{h,a}$ a tensão normal, exercida pela água, $\sigma_{h,l}$ a tensão normal, exercida pela lama bentonítica, $\sigma_{h,s}$ a tensão normal, exercida pelo peso próprio do solo e $\sigma_{h,sc}$ a tensão normal, exercida pela sobrecarga. Fazendo-se um comparativo das tensões resistentes e atuantes, é possível chegar à Equação 1:

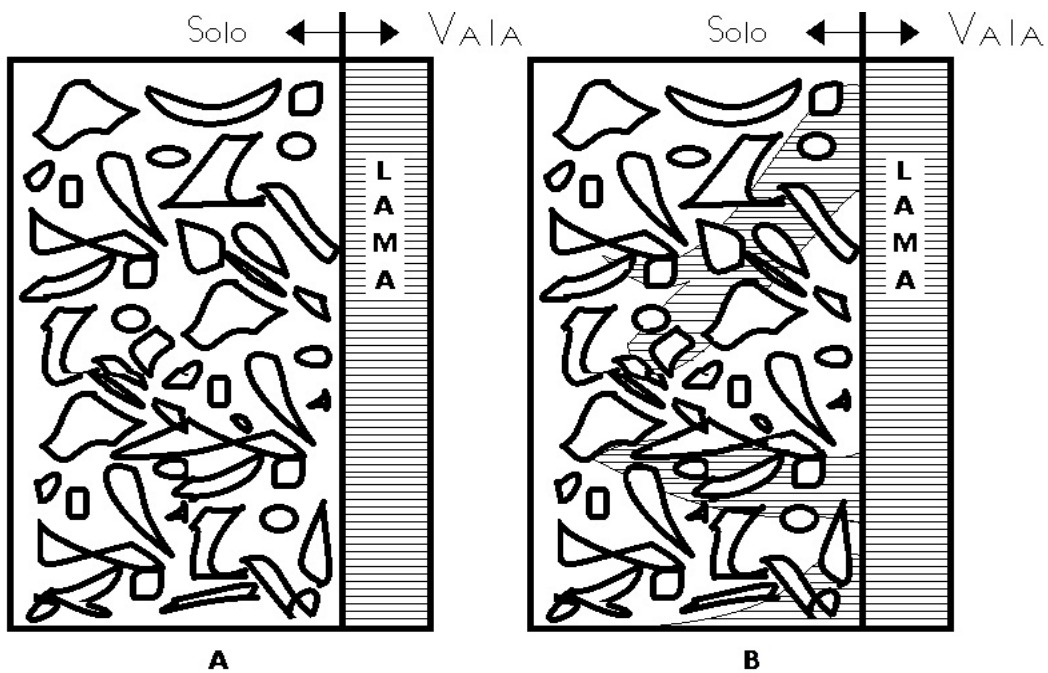
$$\sigma_{h,l} \geq \sigma_{h,a} + \sigma_{h,s} + \sigma_{h,sc} \quad (1)$$

Equação 1: Condição de estabilidade da lama bentonítica, à esquerda temos o parâmetro de resistência, à direita os parâmetros do solo que geram os esforços atuantes.

Em terrenos siltosos e argilosos, a lama forma uma camada conhecida por “cake”, que trabalha como um anteparo impermeável, já em terrenos arenosos, a lama percola certa distância e suas propriedades tixotrópicas permitem, em ambos os tipos de solo, que o material em volta se torne gelatinoso, perdendo velocidade de percolação e permanecendo em repouso (Figuras 9 e 10).

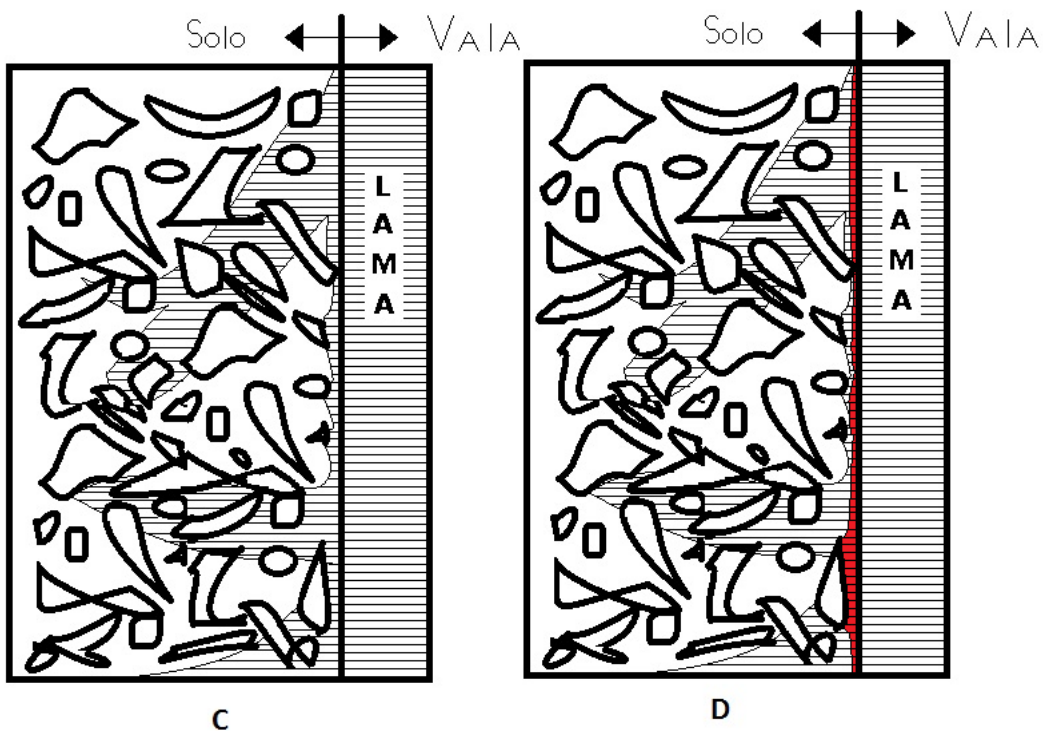
A lama deve ser introduzida de maneira que não ultrapasse o nível da parede guia, enquanto é realizada a escavação da lamela, a fim de evitar perda de bentonita ou de contaminação da superfície.

Figura 9 - Efeito do Cake em solos argilosos, à direita em tracejado a lama bentonítica e a esquerda o solo; A: estado inicial, onde o solo tem o primeiro contato com a Lama Bentonítica; B: penetração da lama no solo



Fonte: Autoria Própria.

Figura 10: Efeito do Cake em solos argilosos, à direita em tracejado a lama bentonítica e a esquerda o solo; C: estabilização do conteúdo da Lama com o solo, entrando num estado de repouso; D: formação do Filme Protetor (em vermelho), onde a Lama em repouso no solo adquiriu rigidez, e se torna o Cake, o filme protetor permite uma melhor distribuição da pressão da lama no solo



Fonte: Autoria Própria.

3.2.2 Polímero Biodegradável

Com o aumento da importância e ao respeito das questões ambientais, empresas que almejam certificações ambientais, políticas verdes, com alteração mínima ou ainda com aumento da produtividade, começaram a usar polímeros biodegradáveis como estabilizadores de valas.

Os polímeros aplicados nos fluidos de perfuração são, em geral, moléculas compridas e de alto peso molecular. Cadeias de carbono sequenciais com repetições de núcleos chamados monômeros configuram as características dos polímeros.

Nos fluidos utilizados em escavações para paredes diafragma são usados polímeros naturais e sintéticos que vão gerar principalmente viscosidade e uma película fina, que recobre a lamela da escavada, a fim de estabilizá-la.

Figura 11 - exemplo de tubo tremie em processo de concretagem de furo preenchido com polímero biodegradável bombeado



Fonte: Acervo Costa Fortuna - <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgSoMAE/parede-diaf-s-s-r?part=3>

3.2.3 Comparativo Entre Polímero Biodegradável e Lama Bentonítica

Ao primeiro olhar, a lama bentonítica tem um custo menor, porém ao se fazer uma análise comparativa inicial, nota-se que a lama despende um cuidado maior.

A lama necessita de um descarte adequado, pois suas propriedades impermeabilizantes impedem a deposição em qualquer bota fora comum. Já os fluídos biodegradáveis, se não possuem corpos sólidos em suspensão, podem ser despejados em galerias de águas pluviais.

A resolução 307/2002 do CONAMA, no anexo Resíduos de Construção classe D, inclui como resíduo contaminante a lama bentonítica, e define que o gerador dos resíduos deve ser responsável pela gestão de todo o resíduo que gera, estabelecendo diretrizes, critérios e procedimentos para minimizar os impactos ambientais.

O consumo de materiais do polímero é menor que o da lama, sendo utilizado de 1% a 3% de polímeros, contra 2,5% a 7,5% de bentonita na lama, compensando parcialmente o custo mais elevado do fluido polimérico.

A lama possui maior eficiência na contenção de valas em solos mais arenosos do que o fluído polimérico. Ambos os fluídos necessitam de espaço, com os silos de armazenamento (Figura 12).

Figura 12 - Silos de armazenamento



Fonte: <http://www.ufrgs.br/eso/content/up/042.jpg>

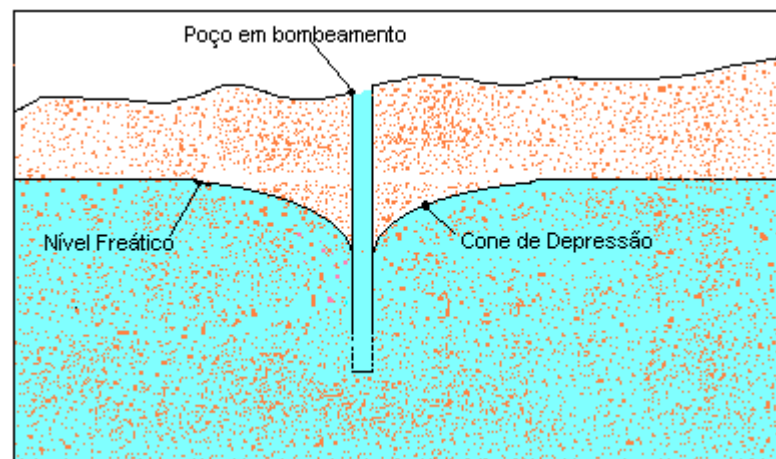
3.3 DRENAGEM

É muito comum nas obras em geral que envolvem escavações, se ultrapassar o nível da água e se deparar com um lençol freático.

A tecnologia atual permite uma intervenção no meio ambiente, alterando o nível do lençol freático em função da necessidade da obra, podendo ter caráter provisório ou permanente, sem um custo elevado, sendo que em alguns casos, apenas após a realização de ensaios, no local em que será empregada tal intervenção, que se determinará o método a ser empregado.

No geral, as intervenções giram em torno de rebaixar o lençol freático na área escavada, fazer um controle das construções lindeiras para possíveis recalques e em casos extremos fazer injeção de água no solo (figura 13).

Figura 13 - Esquema do comportamento do nível d'água quando rebaixado.



Fonte: <http://www.dicionario.pro.br/images/3/33/Image12.gif>

Dentre as técnicas mais utilizadas, destaca-se a de ponteira filtrante. Trata-se de um tubo de aço perfurado, tendo a seguir um tubo metálico fechado, com 8 a 9 metros de comprimento, preenchido com areia de filtro. As ponteiras são dispostas conforme a necessidade do local e introduzidas num sistema ligado a um motor bomba que faz a sucção (figura 14 e 15).

O rebaixamento do nível de um lençol freático causa movimento no solo, por isso sua execução deve ser primeiramente calculada. Essa movimentação pode ser gerada por recalques devido ao adensamento do solo e aumento do peso específico aparente devido à diminuição do empuxo hidrostático. Conseqüentemente isso pode

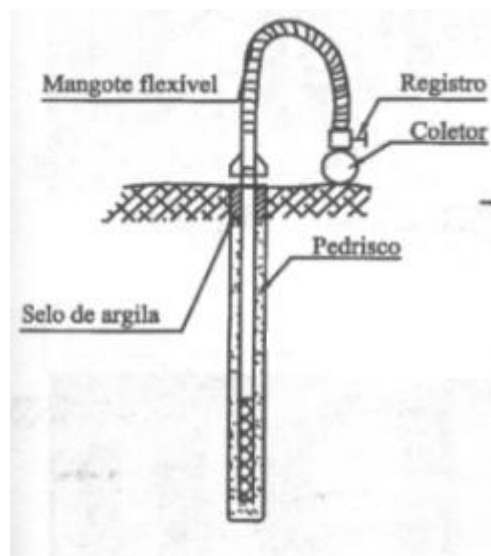
afetar as construções lindeiras, principalmente construções irregulares, ou com uma fundação inadequada. É importante, antes de realizar qualquer atividade de rebaixamento, fazer um levantamento das edificações vizinhas e durante o procedimento de drenagem, manter uma verificação periódica.

Figura 14 - Exemplo de instalação de ponteiras filtrantes



Fonte: <http://www.geocities.ws/construcaopratica/foto7.jpg>

Figura 15 - Esquema do perfil de uma ponteira filtrante operacional.



Fonte: <http://www.geocities.ws/construcaopratica/fig3p8.jpg>

3.4 APLICABILIDADE DAS PAREDES DIAFRAGMA

Paredes diafragma são recomendadas em casos onde existam edificações vizinhas que não podem sofrer recalque, como no caso de prédios por exemplo, dado ao fato que a estrutura da parede é capaz de suportar as cargas provenientes do solo, sem alterar suas características.

Em terrenos onde existe uma dificuldade técnica em rebaixar o nível d'água, paredes diafragma se tornam uma opção de extrema importância executiva. A escavação pode ser executada com a vala seca, permitindo assim a produção de barragens, por exemplo, onde as lamelas tornam-se tanto o elemento de contenção, como o elemento que impede a percolação e o fluxo d'água, permitindo uma escavação sem riscos.

É importantíssimo ressaltar que o canteiro de obras deve ser capaz de alocar os elementos necessários para a exequibilidade de uma parede diafragma, tais como, uma bancada de armação comprida para a montagem da armadura de aço de cada lamela, os silos do fluído estabilizador, sistema de bombas e para a ciclagem e filtração do fluído estabilizador, espaço para o maquinário, Clamshell ou Hidrofresa, área da mureta guia, espaço para caminhões de retirada de material e caminhões betoneira, guindastes para içar da armadura, etc.

3.5 DADOS TÉCNICOS

Para garantir uma qualidade do resultado desejado é importante um controle tecnológico dos principais elementos de parede diafragma. Dos elementos mais importantes, os mais suscetíveis a terem problemas que devem ser evitados a qualquer custo, são a lama bentonítica e o concreto.

3.5.1 Lama Bentonítica

Densidade: Inferior a 1,10g/ml (balança densidade);

Viscosidade: 20 a 90s (balança Marsh);

Resistência do Gel: 1,4 a 10,0 N/m² (Shearometer);

pH entre 7 e 12;

Teor de areia: máximo de 3%;

Quantidade de bentonita na solução: 2 a 6% do peso.

3.5.2 Concreto

Slump: 20±1 cm;

Relação de água/cimento (A/C): 0,60;

Brita 1;

Cimento: 400 kg/m³;

Areia: 35% a 45% em peso.

4 BASE DE CÁLCULO

4.1 ESTABILIDADE DA VALA

Dado que existe uma imensa dificuldade em estimar a distribuição real das tensões no solo, nos problemas de mecânica dos solos, o método do equilíbrio limite é frequentemente empregado.

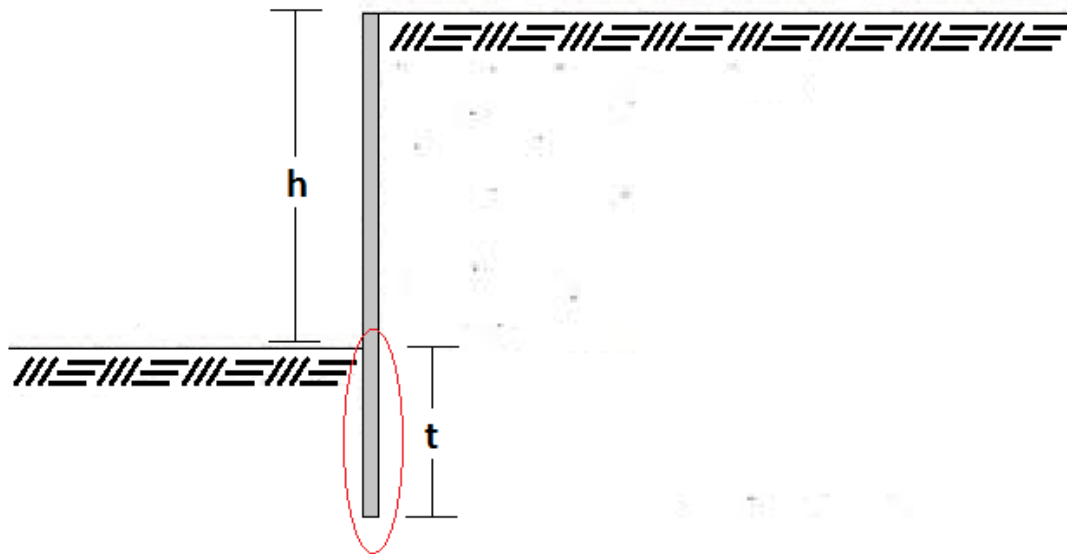
O método do equilíbrio limite consiste na determinação do fator de segurança do talude, permitindo descobrir se existire resistência suficiente para suportar, no caso da engenharia civil, construções em geral, e determinar a superfície de falha, em função de dados como a poro-pressão, resistência ao cisalhamento, momentos resistentes, geometria do talude, condições de drenagem ou não drenagem, etc.

Em paredes diafragma, o estudo da estabilidade geral da vala é feito através da análise dos mecanismos de ruptura, com as superfícies potenciais analisadas abaixo da extremidade inferior da ficha.

4.1.1 Ficha

Ficha é o trecho da lamela que fica abaixo do nível escavado (figura 16), que tem por finalidade promover uma maior estabilidade na estrutura da parede, combatendo os momentos fletores, se utilizando do peso próprio da lamela e do momento gerado na estrutura devido aos esforços normais provenientes do solo.

Figura 16 - Representação técnica de uma ficha em Parede Diafragma, com a ficha circulado em vermelho



Fonte: Autoria Própria.

Sua presença ajuda a manter a estabilidade do fundo da vala e alcança camadas do solo que possuam melhor capacidade de suporte criando uma condição real de equilíbrio de esforços.

Para casos gerais, onde o solo não seja muito mole, ou não exista nenhuma peculiaridade nas características da parede, o professor Abrahão sugere adotar a fórmula empírica (Equação 2) para a altura da ficha:

$$t=(0,20\sim 0,30) \times h. \quad (2)$$

Onde h representa a altura escavada e t a altura da ficha;

4.1.2 Estabilidade do Fundo da Vala

A estabilidade do fundo da vala é essencial para a segurança dos colaboradores e dos maquinários de obra, um acidente que ocorre dada a sua instabilidade pode ser catastrófico.

A ação do peso próprio do solo causa uma combinação de reações que consequentemente causam deformações, além disso, outros efeitos como empuxo, fendas de tração, etc. podem contribuir com a instabilidade.

Vários autores elaboraram teorias no assunto, mas para o efeito de aprendizado será apresentado o método de Terzaghi, que foi o primeiro estudioso notório a elaborar uma teoria no assunto, a Teoria Geral de Capacidade de Cargas.

É válido citar que vários estudiosos que vieram depois, se embasaram na teoria de Terzaghi, para desenvolver suas linhas de raciocínio.

Terzaghi considerou a capacidade de carga do solo, quando solicitado por uma coluna de solo de largura genérica B (figura 17). Para um solo genérico, define-se a carga nessa coluna de largura B por:

$$Q_b = W - E_a \tan \phi - c H \quad (3)$$

Equação 3: Capacidade de carga do solo, onde Q_b é a capacidade de carga, W o peso próprio do solo, E_a o empuxo ativo, ϕ o ângulo de ação de E_a , c a coesão e H profundidade do solo.

A teoria de Terzaghi considera que a carga máxima que o solo pode suportar (Q'_{RH}) em uma profundidade H e uma coluna de solo de largura B é:

$$Q'_{RH} = Q_{RH}/2 \quad (4)$$

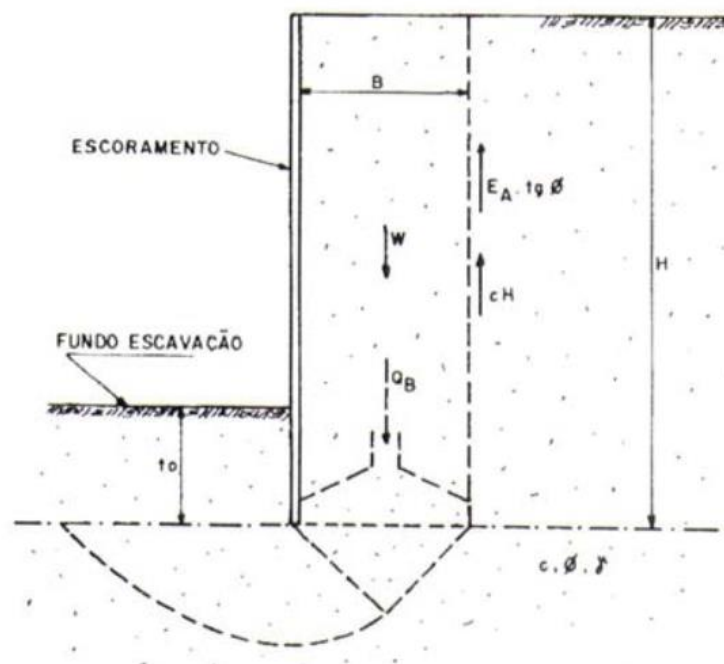
Equação 4: Carga máxima de suporte do solo onde:

$$Q_{RH} = 2B (c N_c + \gamma t_0 N_q + \gamma B N_\gamma) \quad (5);$$

Equação 5: Onde N_c , N_q e N_γ são fatores determinados, γ é o peso específico do solo e t_0 é a profundidade de aplicação de carga.

A ficha se torna uma peça chave para a capacidade de suporte de uma parede de contenção, podendo ser interpretada diretamente como t_0 , segundo o estudo de Terzaghi, ela causa um aumento na capacidade de carga, e sem ela, não há garantia real de estabilidade do fundo.

Figura 17 - Estabilidade do fundo da escavação. A figura demonstra uma situação possível considerando um solo coesivo ($\phi=0$) e arenoso ($c=0$)



Fonte: <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/3/31/Conten%C3%A7%C3%B5esSlides.pdf>.

Por final determina-se o fator de segurança (FS) pela equação 6:

$$FS = \frac{Q'_{RH}}{Q_B} = \frac{B(cN_c + \gamma t_0 N_q + \gamma B N_\gamma)}{W - E_a \tan \phi - cH} \quad (6)$$

Equação 6: Fator de segurança quanto à ruptura de fundo, em geral procura-se um valor mínimo de 1,5 para FS, variando o valor de B.

4.2 MÉTODO DE ANÁLISE PRELIMINAR PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DE UMA PAREDE DIAFRAGMA

As paredes diafragma variam de espessura conforme projeto, mas as mais utilizadas se encontram na faixa de 0,40m a 1,20m, com variações de 0,20m, sendo as de 0,40m a 0,60m, mais aplicadas às construções prediais e as de 0,80m a 1,20m, mais aplicadas às construções metroviárias, com valores característicos de resistência à compressão do concreto (f_{ck}) mais utilizados ficam em torno de 30 e 45 MPa, com variações de 5MPa.

Com o auxílio do Microsoft Excel, junto às orientações da NBR 6118, é possível desenvolver uma análise preliminar para o cálculo da espessura de uma parede diafragma fornecendo o tipo de aço, o f_{ck} do concreto, a espessura da parede, o cobrimento, adotando um valor unitário para b_w de 1 metro, os valores da taxa geométrica mínima de armadura longitudinal (ρ_{min}) fornecidos para seção retangular, e a ferramenta “Atingir Meta” do Microsoft Excel, encontra-se o valor do Momento Característico (M_k) para o qual a lamela pode suportar.

4.2.1 Análise do Programa

Essa análise preliminar tem como propósito auxiliar o projetista para a escolha das dimensões de uma parede e o tipo de concreto que deve pode ser utilizado, em função do M_k encontrado pelo resultado do programa, mas não serve como base de cálculo definitivo para a parede diafragma. Vale lembrar que os resultados servem apenas como um artifício, uma ferramenta para anteprojeto, auxiliando o projetista a determinar características iniciais para sua estrutura de contenção, para encontrar o momento máximo que a estrutura poderá resistir. O método não leva em consideração efeitos do tipo de solo, coesão, empuxo, atrito ou poropressão.

A Figura 18 demonstra o preenchimento inicial da tabela de cálculo, adotando um valor real positivo em M_k , 1 por exemplo, e inicia-se o procedimento:

O valor h representa a espessura da parede, d a espessura útil (refletindo o valor de h menos 10 centímetros de cobrimento) b_w terá o valor unitário de 1 metro.

É considerado o uso de aço CA-50, portanto a resistência característica de escoamento do aço (f_{yk}) será 500Mpa ou 50 kN/cm², define-se a resistência de cálculo do escoamento do aço (f_{yd}) por:

$$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s \quad (7)$$

Onde γ_s é o coeficiente de ponderação da resistência do aço fornecido pela tabela 1.

Figura 18 - Layout do programa.

L22		f _{ck}	
	B	C	D
	INDÍCE	VALOR	UNIDADE
	M _k =	1	kN.cm
	M _d =	1,4	kN.cm
	h=	120	cm
	d=	110	cm
	b _w =	100	cm
	f _{yk} =	50	kN/cm ²
	f _{yd} =	43,47826	kN/cm ²
	f _{ck} =	4,5	kN/cm ²
	f _{cd} =	3,214286	kN/cm ²
	k _c =	3,6E-07	
	k _x =	5,29E-07	
	k _s =	1	
	ρ _{min} =	0,259	
	A _{s1} =	31,08	cm ²
	A _{s2} =	0,000293	cm ²
	Rel=	106173,9	

Fonte: Acervo Próprio.

O parâmetro f_{ck} será uma variável para a análise e determina o valor de cálculo da resistência à compressão do concreto (f_{cd}) por:

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c \quad (8)$$

Onde γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto obtido pela tabela 1.

Tabela 1 - tabela 12.1 da NBR 6118 Valores dos coeficientes γ_c e γ_s .

Combinações	Concreto	Aço
	γ_c	γ_s
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,0

Fonte ABNT.

O programa se utiliza do estado de combinações normais para o estudo abordado.

k_c , k_x e k_s são termos que auxiliam na obtenção dos resultados desejados e seus valores podem ser calculados pelas fórmulas:

$$k_c = \frac{M_d}{b_w d^2 f_{ck}} \quad (9)$$

$$k_x = 1,25 - \sqrt{(1,5625 - 3,6765 k_c)} \quad (10)$$

$$k_s = \frac{1}{(1 - 0,4 k_x)} \quad (11)$$

ρ_{min} é fornecido pela tabela 2 utilizando os valores para seções retangulares:

Tabela 2 - tabela 17.3 da NBR 6118 taxas mínimas de armadura de flexão para vigas

Forma da seção	Valores de $\rho_{min}^{1)}$ ($A_{s,min}/A_c$) %							
	f_{ck} ω_{min}	20	25	30	35	40	45	50
Retangular	0,035	0,150	0,150	0,173	0,201	0,230	0,259	0,288
T (mesa comprimida)	0,024	0,150	0,150	0,150	0,150	0,158	0,177	0,197
T (mesa tracionada)	0,031	0,150	0,150	0,153	0,178	0,204	0,229	0,255
Circular	0,070	0,230	0,288	0,345	0,403	0,460	0,518	0,575

¹⁾ Os valores de ρ_{min} estabelecidos nesta tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{min} deve ser recalculado com base no valor de ω_{min} dado.

NOTA Nas seções tipo T, a área da seção a ser considerada deve ser caracterizada pela alma acrescida da mesa colaborante.

Fonte ABNT.

A área da seção transversal da armadura longitudinal de tração calculada pela taxa de armadura (A_{s1}) é calculada pela equação 12 com a relação dos valores estipulados da seção ao ρ_{min} , e divide o ρ_{min} por 100 pois seu valor é fornecido em porcentagem:

$$A_{s1} = \frac{\rho_{min} h b_w}{100} \quad (12)$$

A área da seção transversal da armadura longitudinal de tração obtida pela ferramenta “Atingir Meta” (A_{s2}) é obtida em função do M_k , pela fórmula:

$$A_{s2} = \frac{k_s M_d}{d f_{yd}} \quad (13)$$

Ao final deve ser feita a relação (Rel) entre A_{s1} e A_{s2} , devendo se aproximar ao valor de 1 alterando o valor de M_k :

$$Rel = \frac{A_{s1}}{A_{s2}} \quad (14)$$

A ferramenta “Atingir Meta” (figura 19) possibilita aproximar a relação entre A_{s1} e A_{s2} ao valor de 1. A Ferramenta é encontrada na aba *Dados*, no ícone *Teste de Hipóteses*:

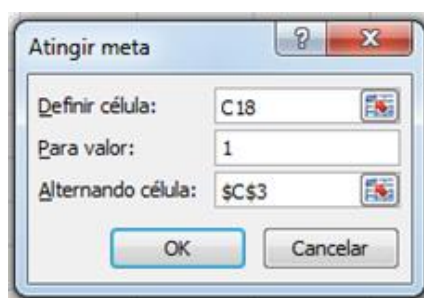
Figura 19 - Ferramenta “Atingir Meta”



Fonte: Acervo Próprio.

Ao clicar no ícone *Atingir Meta* o usuário abre a seguinte janela:

Figura 20 - Janela de preenchimento dos valores da ferramenta.

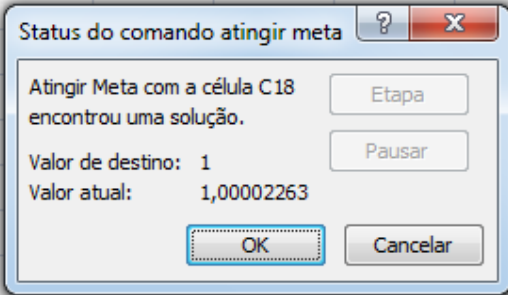


Fonte: Acervo Próprio.

Preenche-se a janela da figura 20 com *Definir Célula* assumindo a célula do valor de Rel, *Para Valor* deve ser 1 e *Alternando Célula* assumindo a célula do valor de M_k (figura 21).

Figura 21- Resultado

	B	C	D	E	F	G	H	I
	INDÍCE	VALOR	UNIDADE					
	M_k =	103784,6	kN.cm					
	M_d =	145298,5	kN.cm					
	h=	120	cm					
	d=	110	cm					
	b_w =	100	cm					
	f_{yk} =	50	kN/cm ²					
	f_{yd} =	43,47826	kN/cm ²					
	f_{ck} =	4,5	kN/cm ²					
	f_{cd} =	3,214286	kN/cm ²					
	k_c =	0,037359						
	k_x =	0,056203						
	k_s =	1,022998						
	ρ_{min} =	0,259						
	$A_{s,1}$ =	31,08	cm ²					
	$A_{s,2}$ =	31,0793	cm ²					
	Rel=	1,000023						



Fonte: Acervo Próprio.

4.2.2 Resultados

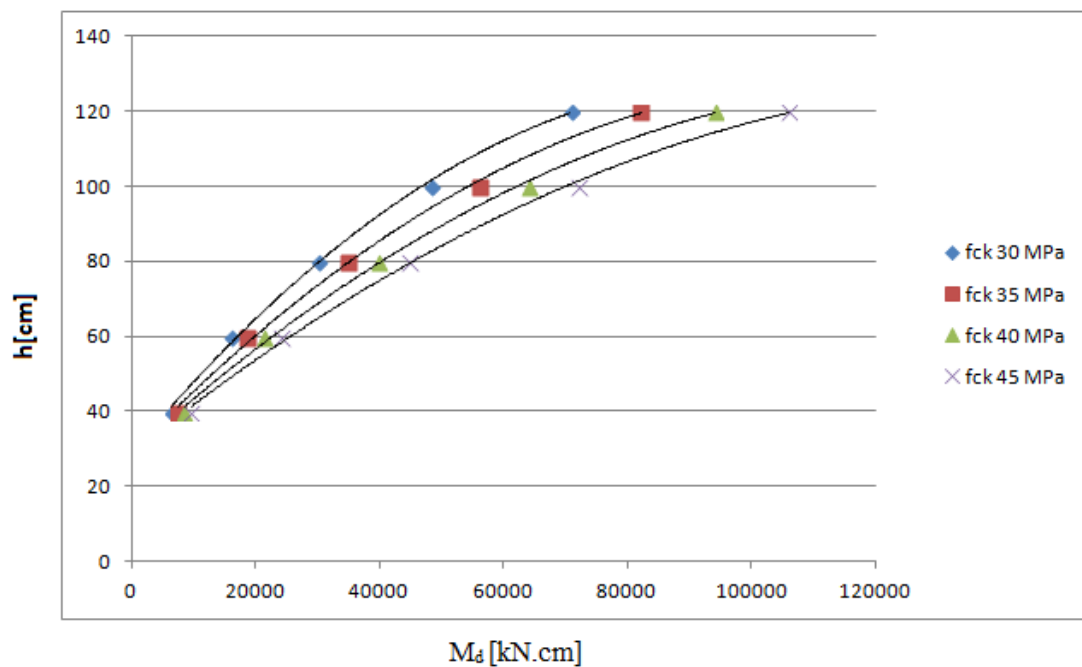
Preenchendo a planilha de cálculo e interpolando os valores das diferentes espessuras, as diferentes resistências do concreto, e considerando apenas a armadura mínima em função da resistência a compressão do concreto, é possível contruir a Tabela 3 e o Gráfico 1:

Tabela 3 - resultados obtidos no programa.

Valores de M_d (kN.cm)		f_{ck} (MPa)			
		30	35	40	45
Espessura (cm)	40	6430,744	7472,931	8550,049	9627,159
	60	16072,61	18674,16	21368,36	24062,57
	80	30011,21	34868,85	39899,57	44930,28
	100	48213,81	56017,73	64099,71	72181,69
	120	70754,3	82206,63	94067,03	105927,4

Fonte: Acervo Próprio.

Gráfico 1 - Resultados obtidos no programa, onde o eixo das abscissas apresenta os valores de M_d em kN.cm, o eixo das ordenadas apresenta a espessura h da parede em cm e as curvas representam os diferentes f_{ck} em MPa.



Fonte: Acervo Próprio.

Os resultados obtidos demonstram apenas cálculos utilizando o valor mínimo da taxa de armadura de aço, porém o usuário tem a liberdade de utilizar a taxa que achar necessário. O programa demonstra uma situação simplificada de uma das características de resistência envolvidas nas paredes diafragma, tornando-se um programa ideal para um anteprojeto, onde o projetista pode ser auxiliado e ter como base a espessura da parede e o f_{ck} ideal para seu determinado caso.

5 TÉCNICA EXECUTIVA

É natural que distintas obras apresentem distintas particularidades, entretanto a execução de paredes diafragma sempre possui uma sequência executiva geral.

É importante observar antes da obra e principalmente durante a execução da parede guia, a presença de interferências do terreno em que ocorre a obra. Essas interferências podem ser das mais variadas, como tubulações ou ramais hidráulicos, estacas, fundações de construções antigas, etc., e deve-se prever uma remoção dessas interferências, antes do início das atividades de escavação das lamelas.

5.1 PAREDE GUIA

Para a correta execução das etapas de escavação, antes de se abrir uma vala, é executada uma parede guia, também conhecida por mureta guia, que literalmente, tem a finalidade de guiar o início da escavação (Figura 22).

Figura 22 - Mureta Guia ancorada



Fonte: obra desconhecida <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgO-cAD/medotos-contencao-taludes?part=3>

Além disso, a mureta guia tem a função de impedir o desmoronamento do terreno próximo à superfície, que pode ser causado pelos movimentos de escavação ou da mudança do nível do fluido de contenção.

Em geral é composta por uma estrutura de concreto armado com dimensões que proporciona a escavação da lamela, a introdução da armadura e posteriormente a concretagem na espessura desejada.

É escavado cerca de 1,5m de profundidade, monta-se a forma (figura 23) para as dimensões da espessura solicitadas pelo projeto e com a sua armadura alocada corretamente, a mureta é concretada.

Figura 23 - Fôrma da mureta guia



Fonte: obra desconhecida <http://engenharia.anhembi.br/tcc-03/civil-13.pdf>

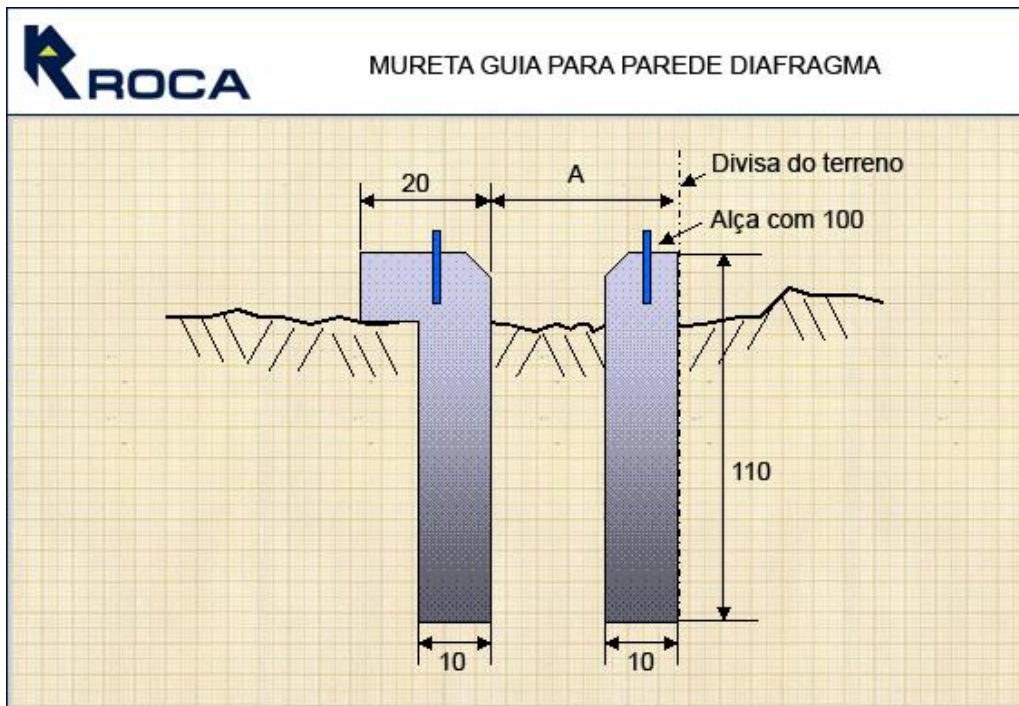
Após 24 horas é feita a desforma, seu interior é preenchido por estrocas, que dão sustentação as faces da parede, ou são simplesmente aterradas.

Após 72 horas da concretagem, se a lateral da parede diafragma já estiver toda “murada”, pode-se iniciar o processo de escavação da lamela.

Para cada caso existe um comprimento do painel de escavação, ao final da escavação, são utilizados tubos-junta, para formar um encaixe à lamela adjacente.

A parede guia, também deve ter a capacidade de conduzir a lama bentonítica e é executada conforme a escolha da sequência executiva das lamelas (alternada ou sucessiva).

Figura 24 - Projeto básico de Mureta Guia para Parede diafragma, onde A varia conforme a necessidade de projeto



Fonte: <http://rocafundacoes.com.br/wp-content/uploads/2013/04/MURETA-GUIA-PARA-PAREDE-DIA.jpg>

5.2 ESCAVAÇÃO

Ao longo do tempo o processo de escavação de valas sofreu uma evolução e foi se aprimorando conforme as necessidades das obras. Por muito tempo, o elemento mais comum na execução de parede diafragma foi o Clamshell e mais recentemente foram introduzidas as hidrofresas.

5.2.1 Clamshell

Trata-se de uma ferramenta introduzida às escavadeiras que permite a escavação e desagregação do solo com pás (também conhecidas por caçambas) que se assemelham a conchas, capazes de simular o fechamento das conchas de um bivalve, assim, confinando o material retirado, dentro das pás.

As conchas podem possuir um perfil retangular ou circular, e em alguns casos possuem dentes nos bordos.

Com o auxílio da mureta guia, o Clamshell é direcionado longitudinalmente ao eixo da parede enterrada no solo e com o movimento das pás, o material é desagregado e retirado.

Com a criação de novos equipamentos, foram introduzidos Clamshells específicos para a escavação e métodos diferentes de execução da parede diafragma, dos quais se destacam Clamshell em queda e o Clamshell hidráulico (figura 25).

Figura 25 - detalhe do Clamshell Hidráulico



Fonte: http://www.solonet.eng.br/Duvidas/estacas_diafragma.htm

O Clamshell em queda faz uso da gravidade como fator de aceleração e aproveita seu peso próprio em queda livre para criar um efeito combinado de compressão e desagregação do solo e as pás são fechadas por um sistema de cabos. Trata-se de um processo com muitas imperfeições, já que a queda em si, não garante que as pás penetrarão o solo perfeitamente no sentido vertical, criando um movimento semelhante a uma hélice, conseqüentemente a escavação acaba por acarretar mais imperfeições com profundidades maiores. É recomendado para escavações com solos mais argilosos, com baixo número de golpes (Ensaio SPT), e profundidades não muito elevadas, já que a própria lama bentonítica necessária para estabilizar a vala age como um meio desacelerador. Devido o grande número de impactos que as pás e os dentes

sofrem durante o processo executivo, as mesmas possuem uma vida útil reduzida, além disso, os cabos, que suspendem e fecham as caçambas, estão sujeitos à fadiga.

Existem casos registrados em que após a escavação, a armadura não encaixa perfeitamente na vala, um indício grave de desalinhamento. Isso pode acarretar a problemas como cobertura insuficiente, armadura exposta, lamelas heterogêneas e desiguais, ou necessidade de substituição da armadura. Conseqüentemente, cria-se uma lamela comprometida que pode ser desastrosa devido as suas possíveis patologias.

O Clamshell hidráulico por outro lado já possui uma precisão maior, pelo fato de se aproveitar de um sistema hidráulico introduzido às pás, permitindo a rápida desagregação do solo. Além disso, o seu método executivo permite que sejam alcançadas profundidades maiores, onde o limite é dado pela sua incapacidade de ultrapassar um maciço rochoso, ou pelo alcance máximo do equipamento utilizado.

Figura 26 - Clamshell içado



Fonte: http://www.solonet.eng.br/Duvidas/estacas_diafragma.htm

As pás, de ambos os processos, são dotadas de cavidades, que ao serem erguidas para fora do fluido presente na vala, permitem o escoamento da lama que fica confinada

nas pás. Após o escoamento quase completo da lama, o material retirado é depositado aonde poderá ser realocado, conforme a necessidade da obra.

5.2.2 Hidrofresa

Trata-se de uma máquina com perfuratrizes rotativas que retira o material usando a circulação da lama bentonítica (Figura 27).

É composta por uma estrutura rígida de aço, com duas perfuratrizes dispostas horizontalmente adjacentes na parte inferior que são movidas por motores hidráulicos distintos, em rotações opostas, e uma bomba de sucção, que retira o material triturado, se aproveitando da presença da lama bentonítica, acoplada ao equipamento (Figura 28).

O avanço da escavação ocorre com a alta rotação das perfuratrizes, as correntes de corte desagregam o material, junto a presença do fluido estabilizante, a bomba de sucção se aproveita do fenômeno da circulação reversa, e o material escavado é direcionado a uma estação de tratamento, onde ocorre a separação do fluido estabilizante, e conseqüentemente sua reciclagem.

Figura 27 - Hidrofresa



Fonte: <http://pet.ecv.ufsc.br/wordpress/wp-content/uploads/2013/11/DSCN4656.jpg>

Figura 28: Hidrofresa



Fonte: http://www.brasfond.com.br/2013/images/img_hidrofresa.jpg

Graças à sua capacidade de escavar distâncias grandes num período de tempo muito menor que o Clamshell, e a disposição do equipamento de monitoramento que favorece a escavação vertical com precisão incrível, a Hidrofresa pode atingir profundidades de até 100 metros.

Figura 29 - Detalhes esquematizados da Hidrofresa

Bomba Submersa

Responsável por remover os resíduos de escavação para a estação de tratamento de lama.

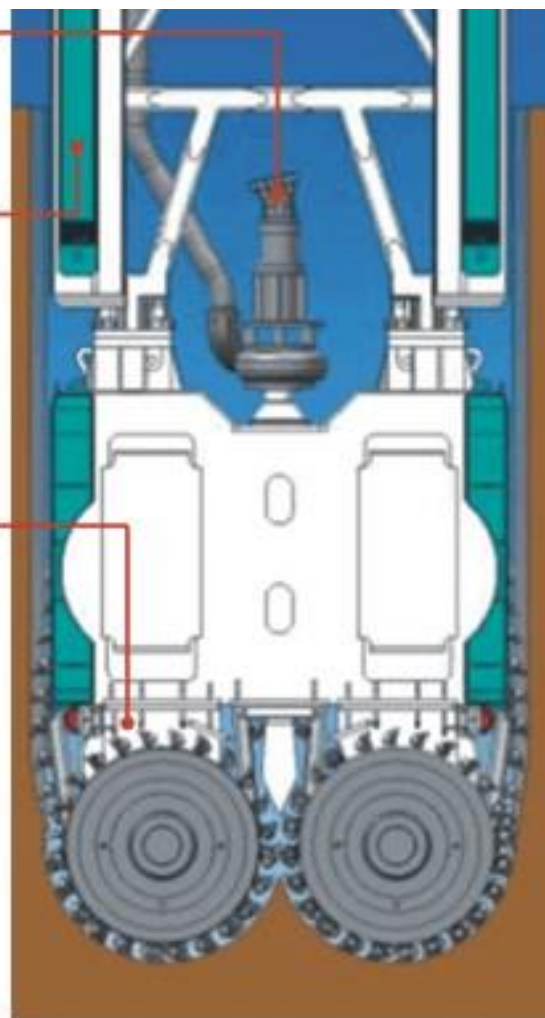
Guias e corretores de verticalidade/alinhamento

Estrutura acoplada ao corpo da hidrofresa com a função de garantir a verticalidade/alinhamento. Nas guias estão instalados os sensores de controle da escavação.

Correntes e Rodas de Corte

As correntes transferem a energia do motor para as rodas de corte. Este sistema assegura um impacto contínuo ao longo de toda a largura da escavação, aumentando a produtividade em formações geológicas resistentes.

As correntes de corte auxiliam na formação de juntas entre os painéis da parede diafragma, melhorando a verticalidade e a vedação das juntas.



Fonte: <http://www.costafortuna.com.br/imagens/hidrof/detalhes.jpg>

Apresenta muitas vantagens como a capacidade de lidar com diferentes tipos de solo, melhor acabamento das juntas e produz pouco ruído.

O Clamshell ainda é utilizado para se executar a pré-escavação, que por sua vez, junto à mureta guia e a instrumentação digital do equipamento, acaba por proporcionar uma maior precisão na escavação.

Um ponto negativo relacionado à hidrofresa está embutido no uso da circulação inversa, para a retirada do material desagregado, como consequência de haver uma trituração desse material, a lama bentonítica se contamina de maneira muito mais agravante, portanto deve-se sempre estar supervisionando a qualidade da lama, controlando seu teor de areia e introduzindo aditivos que ajudem a sua manutenção.

Quadro 1: Vantagens dos equipamentos de escavação.

Clamshell	Hidrofresa
Demanda menor Custo	Maior alcance nas escavações
Menor contaminação da Lama Bentonítica	Maior precisão na escavação das lamelas
Trabalha melhor com escavações de espessuras menores	Possibilidade de escavação nos diferentes tipos de terreno, e escavação em rocha sólida
Retira o material escorrido, escavado dentro das pás	Retira o material triturado com a circulação da lama bombeada
É necessária na maioria das pré escavações da Hidrofresa	Menor Ruído

Fonte: Autoria Própria.

5.3 ARMADURA

As armaduras utilizadas na maior parte dos cenários de parede diafragma são as dispostas em gaiolas.

Essencialmente são armaduras com dimensões elevadas em um dos sentidos (no caso da parede diafragma seria no eixo da vertical), montadas ou não na posição e local em que são empregadas. A fim de evitar que se desloquem ou torçam, elas são produzidas com elementos enrijecedores, garantindo também o correto espaçamento e disposição das barras.

A vantagem em empregar esse método consiste da necessidade de produção linear da lamela, em casos onde as lamelas possuem dezenas de metros de profundidade, seria necessário usar um guindaste de proporções métricas semelhantes, e capaz de lidar com cargas elevadíssimas, porém pode se utilizar da separação da gaiola em lances separados, desmembrando-a em diferentes elementos de menor dimensão e conseqüentemente peso.

Além disso, é impossível a montagem de uma armadura na vala, já que a mesma está preenchida com a lama.

Estudos realizados afirmam que em painéis realizados em valas com bentonita, as barras de aço dispostas horizontalmente possuem uma perda de aderência considerável, muito embora, isso não tenha causado nenhum exemplo de falha em

paredes diafragma. No caso de barras verticais o efeito da perda de aderência é quase nulo.

As barras utilizadas normalmente são as de 19 e 25 mm de diâmetro. O espaçamento das barras deve estar entre 15 cm e 30 cm.

Figura 30 - Içamento da gaiola de uma parede diafragma com 2 guindastes



Fonte: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/182/artigo286914-3.aspx>

Dada as imperfeições da escavação, o cobrimento mínimo deve ser de 5 cm. O cobrimento é garantido através do uso de espaçadores, que podem ser plásticos ou de concreto, do tipo rolo ou de patim.

5.4 CONCRETAGEM

Com o auxílio de um guindaste, ao término da etapa de escavação, inicia-se a colocação da armadura em meio à vala preenchida com a lama. A armadura é içada e colocada de maneira que permita a passagem do tubo tremonha, que realizará a concretagem.

A fim de garantir estabilidade e o cobrimento correto, a armadura é apoiada na mureta guia, que conta também com roletes distanciadores, eles exercem a função de espaçadores.

Imediatamente após a colocação da armadura inicia-se a concretagem, realizada de modo submerso com o auxílio do tubo tremonha, evitando mistura entre a lama e o concreto lançado.

O concreto normalmente é alocado com o uso de caminhões betoneira, que o lançam em um funil presente na superfície, ligado ao tubo tremonha.

Durante a concretagem, sempre que necessário, deve-se executar cortes na tubulação, garantindo que a ponta do tubo tremonha esteja sempre inserida a 1,50 metros no concreto, e retirado por completo durante o início de pega.

Vale lembrar que o concreto fresco, assim como a lama bentonítica, possui certa tixotropia, assim é capaz de manter a estabilidade da vala.

Enquanto a concretagem ocorre, para evitar desperdícios, com o auxílio de bombas de sucção, é retirada a lama bentonítica, que pode ser empregada em uma lamela adjacente, ou armazenada em silos.

Apesar de serem fluidos distintos, existe uma mistura entre a lama e o concreto. A mistura é parcial, e se a concretagem for realizada de maneira ideal, o trecho do concreto misturado à bentonita fica concentrado na parte superior da lamela, formando uma zona conhecida por concreto pior ou concreto podre.

A concretagem ideal, portanto, se trata apenas de uma concretagem de caráter contínuo, evitando pausas, com o tempo total não ultrapasse 4 horas. As pausas prolongadas promovem um endurecimento do concreto podre próximos da zona de lançamento, formando porções de baixa resistência, dispostas distintamente na lamela. O tempo limite recomendado para paralisação varia em função dos aditivos e características do concreto, mas normalmente não deve ultrapassar 30 minutos.

Figura 31 - Armadura Içada



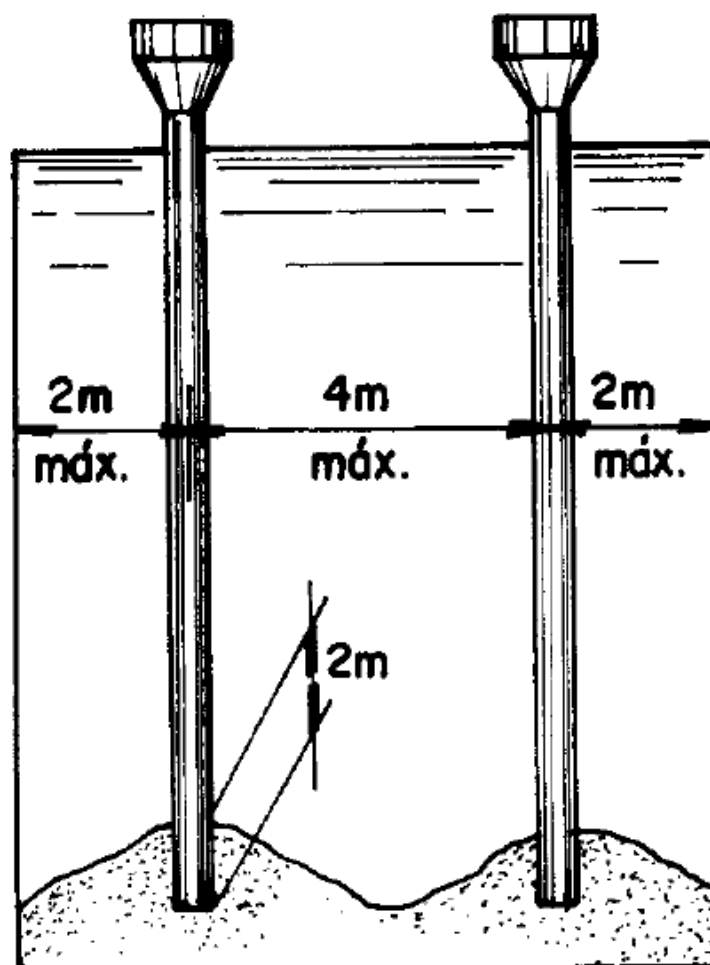
Fonte: http://www.costafortuna.com.br/imagens/servicos/svc_conten_004.jpg

A velocidade do lançamento ideal deve estar entre 20 e 35 m³/h.

Durante a concretagem, é comum agitar a lama, a fim de se evitar a aderência da mesma às armaduras, tornando-a mais fluida.

Dependendo da largura da vala, recomenda-se o uso de tubos tremonha extras. Valas com até 4 metros de largura utilizam apenas um tubo, valas maiores podem dispor de um tubo a mais (figura 32).

Figura 32 - Uso de um "Tremie" extra



Fonte: http://www.costafortuna.com.br/imagens/servicos/svc_conten_019.jpg

Os aditivos mais usados na concretagem são os retardadores e os plastificantes, já que a parede ideal deve ter um efeito impermeabilizante e durante a concretagem, o ideal é evitar o início prematuro da pega do concreto, que causaria um cenário desastroso, como entupimento do tudo tremonha, impossibilidade de adensamento do concreto, aumento do índice de vazios, aparecimento de trincas e fissuras, além de outras possíveis patologias na estrutura.

6 ESTUDO DE CASO

O caso em questão se trata de uma obra da empresa “X”, de construção de duas estações de metrô (estação 1 e estação 2), na cidade “Y”. Ambas as estações se utilizam da execução de paredes diafragma, que agregadas a tirantes tensionados, seriam utilizadas como muros de arrimo no auxílio da escavação das estações, e posteriormente, como paredes provisórias, durante a execução do corpo principal das estações.

As características do solo em ambas as estações eram semelhantes. Nível da água próximo de 15 metros abaixo do solo. A composição do solo era em geral argila siltosa de rigidez mediana, e com camadas de areia presentes em pequenas porções.

Foi necessário o uso de bombas de rebaixamento e ponteiras filtrantes para coordenar o nível de água presente na obra.

O bairro da cidade “Y” em que a obra foi realizada, era uma região predial, onde foi necessário o controle constante do recalque das construções vizinhas, além de um estudo constante das características do solo durante a realização das obras.

As estações possuíam características semelhantes quanto às dimensões das lamelas de parede diafragma, onde na maioria dos casos possuíam dimensões de aproximadamente 50 metros de profundidade, com 5 metros de largura por 1,2 metros de espessura.

O corpo das estações possuía uma extensão de 220 metros, com largura de 40 metros, e a laje inferior estaria 35 metros abaixo do nível do solo, sendo que a estação 1 teria a sua extensão em forma de arcos encurvados paralelamente (Figura 33 e Figura 34), e a estação 2 era em formato retangular regular (Figura 35 e Figura 36).

Sobre a parede diafragma seriam instalados trilhos que suportariam os pórticos que posteriormente auxiliariam na retirada do material escavado dentro das estações.

Seria arrasada a parte superior das lamelas, conhecida por concreto podre e feita uma viga de coroamento capaz de suportar a carga do pórtico, eram mantidas as barras verticais da armadura, que posteriormente serviriam como ancoramento da viga.

A estação 1 teve a escavação da vala para as paredes diafragma realizada com Clamshell em queda, e foi logo observado que dada a extensão do corpo da estação, e a imprecisão do Clamshell, que muitos erros seriam acumulados e comprometeriam com a qualidade da execução. A observação tornou-se realidade, conseqüentemente houve erros de fechamento. Alguns trechos não puderam ser executados, graças a não

linearidade das lamelas adjacentes já executadas, já outros pelo fato das lamelas não comportarem nem mesmo a armadura de aço.

A estação 2 não acabou acarretando os mesmos erros da estação 1, pois dada a execução da estação 1, a equipe de engenharia optou por realizar a escavação utilizando Hidrofresa.

Para lidar com os problemas acarretados nas lamelas executadas pelo Clamshell, era necessário realizar a escavação da estação 1, e assim descobrir os erros presentes na execução e executar os trechos que haviam sido deixados para trás.

Figura 33 - Imagem aérea da estação 1 na etapa de escavação



Fonte: Acervo próprio.

Figura 34 - Imagem aérea da estação 1 na etapa de escavação



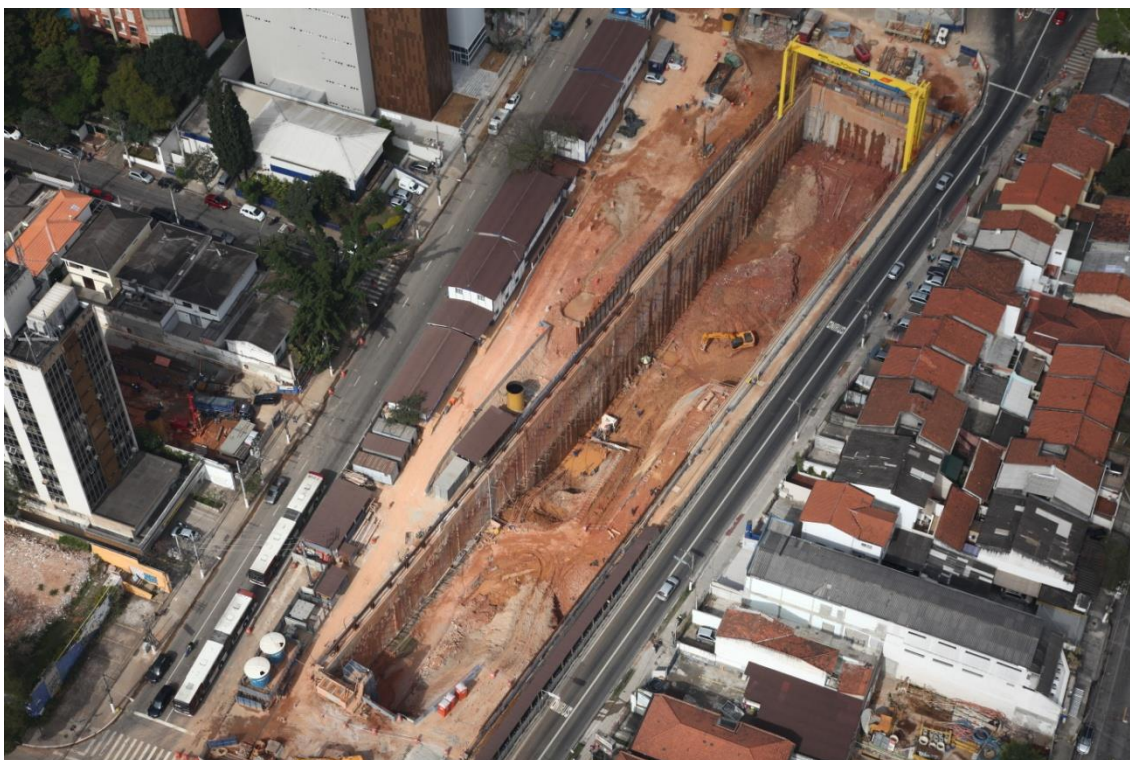
Fonte: Acervo próprio.

Figura 35 - Imagem aérea da estação 2 na etapa de escavação



Fonte: Acervo próprio.

Figura 36 - Imagem aérea da estação 2 na etapa de escavação



Fonte: Acervo próprio.

Ambas as estações previam 4 níveis de escavação, que correspondiam a cota 1 metro inferior as cotas de onde seriam feitos os tirantes, que estariam dispostos a cada 5 metros nas partes gerais do corpo da estação (figura 37).

Figura 37 - primeiro e segundo nível de execução de tirantes, estação 2



Fonte: Acervo próprio.

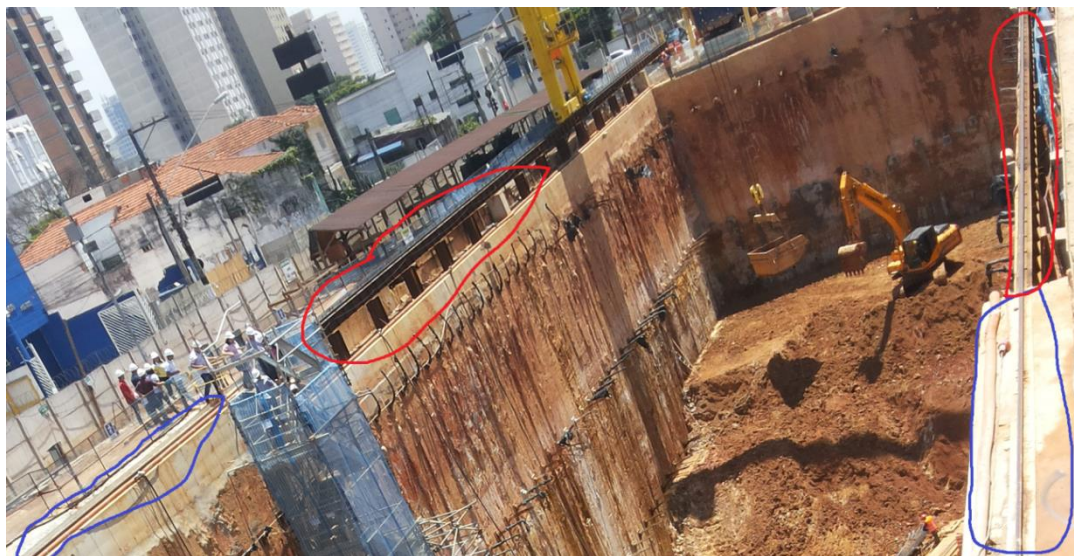
A estação 2 previa um declive natural de região e a sua parede não possuía uma cota constante ao longo de sua extensão. Para a mesma poder se beneficiar do uso do pórtico em toda sua extensão, foi criado um trilho suspenso em sua extensão mais baixa, que daria sustentabilidade ao pórtico (figura 38).

Após a viga que suportaria o pórtico estar completa, as lamelas da estação 1 que não haviam sido executadas, eram escavadas por retroescavadeiras, conforme se alcançavam os níveis de execução dos tirantes. Montavam-se as formas e a concretagem era realizada por um “cachimbo” presente em uma das formas.

Essa é uma técnica utilizada para realização de paredes verticais confinadas, onde uma das formas possui uma abertura para a entrada do concreto em sua parte superior, normalmente em um dos cantos, e essa abertura possui uma canaleta (cachimbo), que é concretada junto à parede. Após a retirada das formas, a parede permanece com um pedaço referente ao cachimbo, que é arrasado em seguida, deixando apenas a parede desejada.

Conforme os níveis de escavação eram alcançados, as lamelas remanescentes eram executadas.

Figura 38 - Detalhe do trilho do pórtico da estação 2, em azul, o trilho sobre a viga de coroamento, em vermelho, o trilho suspenso

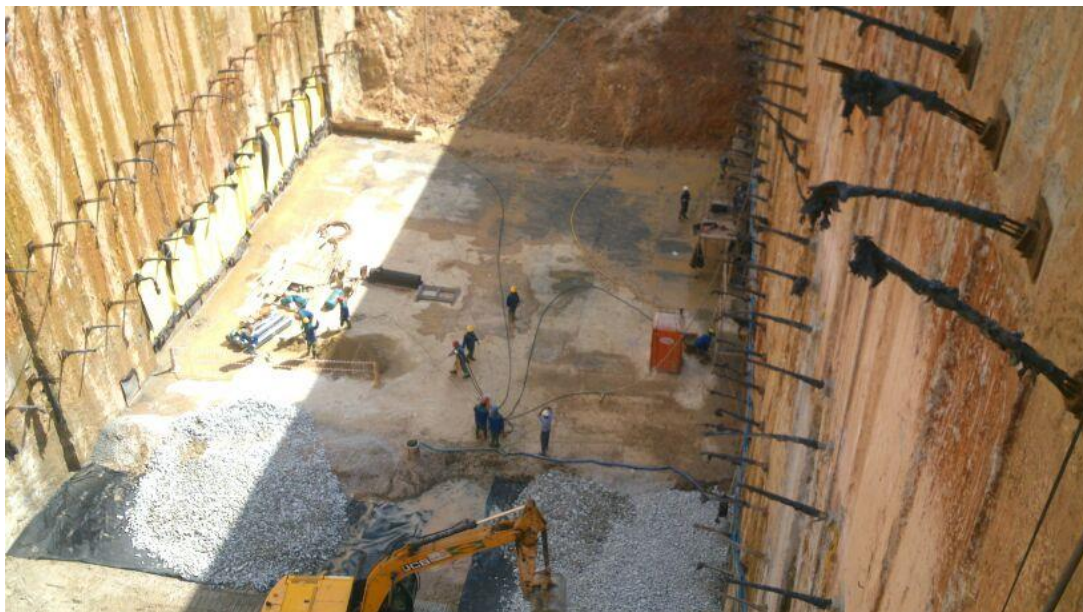


Fonte: Acervo próprio.

Com a escavação também eram descobertos trechos que não possuíam cobertura adequado para armadura, chegando a ter a armadura exposta nesses trechos, a opção para correção era a utilização de Grout (uma argamassa composta por cimento areia quartzo água e aditivos especiais que tem como destaque sua elevada resistência mecânica).

Completada a escavação e protendidos os tirantes, era executada a laje de fundo, que seria também a laje do pavimento mais inferior da estação, onde passariam os trens (Figura 39).

Figura 39 - Laje de fundo da estação 1



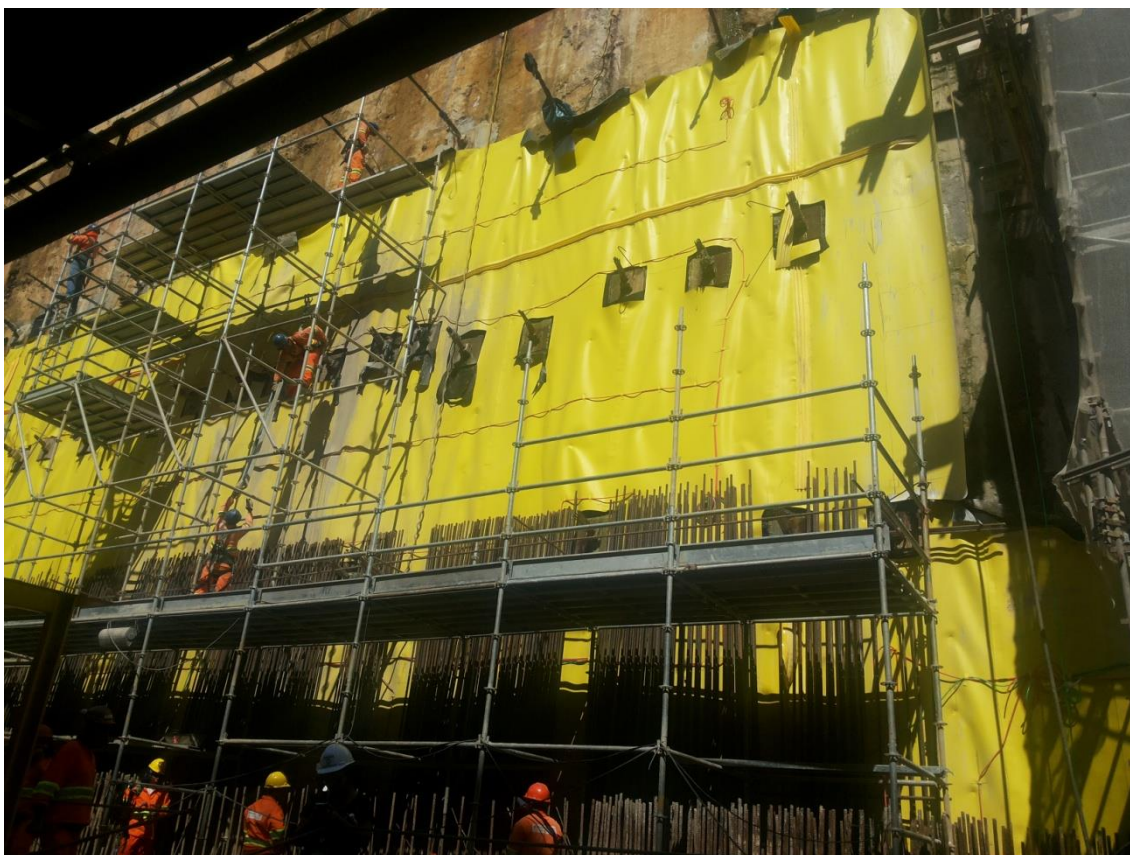
Fonte: Acervo próprio.

As paredes diafragma para as estações 1 e 2, eram nada mais que uma estrutura provisória que auxiliavam a escavação e após executada a laje de fundo, se construiriam dentro das porções escavadas, as verdadeiras estações.

Foram colocadas lonas impermeáveis e conforme a estrutura “subia” os tirantes protendidos eram soltos, pois a parede diafragma somada à espessura das paredes da estação proviriam resistência suficiente para suportar as cargas geradas pelo solo (Figura 40).

Ao final, foi possível observar as vantagens executivas da hidrofresa, em relação ao Clamshell. Apesar da hidrofresa possuir um custo executivo muito superior, os erros acarretados pelo Clamshell acabaram custando muito mais para a empresa “X”, provando que o Clamshell é melhor para obras pequenas ou que necessitam de menor precisão.

Figura 40 - Aplicação da lona impermeável, em conjunto com o início das atividades da parede da estação



Fonte: Acervo próprio.

7 CONCLUSÃO

Ao final desse trabalho, foi possível desenvolver uma maior compreensão do conceito inicial de parede diafragma e construir uma visão diferenciada sobre o assunto.

Dentre os vários tipos de construção de muros de contenção, a parede diafragma se destaca por se tratar de um método que interfere pouco no ambiente, e com a logística correta e um espaço adequado, acaba se tornando a solução para muitas das obras de escavação, principalmente em ambientes urbanos ou obras de grande escala.

A concepção do método de análise preliminar para o cálculo da espessura de uma parede diafragma poderá dar uma base ao projetista quanto onde começar. Os resultados obtidos ao se comparar as espessuras da parede com o momento característico demonstram que naturalmente uma maior espessura causa uma maior resistência. A diferença dos fck por outro lado, não é bem demonstrada nos resultados obtidos, já que a diferença que surge apenas pela mudança do valor da taxa mínima de armadura de aço para cada fck resulta em pouca diferença quanto as características de momento resistente da parede. O critério do fck deve ser atribuído em função de outros estudos e dará diferença em estudos de esforços normais e cortantes. O método de análise preliminar para o cálculo da espessura de uma parede diafragma, não pode ser levado como um critério de aplicação em uma situação real e o projetista deve possuir discernimento e utilizar o método apenas como critério inicial de escolha e conceber o projeto a partir de uma análise mais profunda.

O estudo de caso, além de promover uma vivência executiva em uma experiência de um cenário de obra real, permitiu também uma percepção comparativa dos métodos executivos de escavação da vala.

A Hidrofresa mostrou-se muito mais precisa que o Clamshell, mesmo tendo um custo de alocação mais elevado, sua qualidade no resultado acaba por compensar o seu custo, na aplicação metroviária.

Além disso, a experiência com o estudo de caso permitiu uma ideia clara do conceito do “tripé da produtividade da obra”, que visa um equilíbrio entre o custo, o tempo e a qualidade. A empresa ao optar pelo custo menor teve uma perda considerável na qualidade.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118** - Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122** - Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211** - Agregado para Concreto. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892** - Materiais Metálicos - Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953** - Concreto para Fins Estruturais - Classificação por Grupos de Resistência, 2011.
Bowles, Joseph E. **Foundation Analysis And Desing** 5thed. New York: McGraw-Hill; 1996.

COSTAFORTUNA. **Hidrofresa**. Disponível em:
<http://www.costafortuna.com.br/svc_hidrofresa.html>. Acesso em: 21 de janeiro de 2015.

COSTAFORTUNA. **Hidrofresa**. Disponível em
<http://www.costafortuna.com.br/documentos/folder_hidrofresa.pdf>. Acesso em:
21 de janeiro de 2015.

FUNDESP. **Paredes diafragma e estaca barrete**. Disponível em:
<<http://www.fundespp.com.br/2009/paredesdiafragma.html>>. Acesso em: 5 de dezembro de 2014.

GEOFIX. **Parede diafragma Clamshell**. Disponível em:
<<http://www.geofix.com.br/site2010/servicos/paredes-diafragma-clam-shell/>>. Acesso em: 21 de novembro de 2014.

GEOFUND. **Parede Diafragma e estacas barrete**. Disponível em:
<<http://www.geofund.com.br/?p=210>>. Acesso em 12 de dezembro de 2014.

GEOSONDA. **Parede diafragma**. Disponível em:
<<http://www.geosonda.com.br/ParedeDiafragma.pdf>>. Acesso em: 9 de fevereiro de 2015.

GRANDES CONSTRUÇÕES. **A Importância do uso de polímeros em obras de fundações**. Disponível em:
<http://www.grandesconstrucoes.com.br/br/index.php?option=com_content&task=printMateria&id=876>. Acesso 28 de julho de 2015

HACHICH W, FALCONI F.F., SAES J.L., FROTA RGQ, Carvalho CS, Niyama S, editores. **Fundações: teoria e prática**. 2ª Ed. Pini; 2005.

HUESKER. **Catálogo de especificações técnicas**. Disponível em:
<<http://www.huesker.com.br/downloads/catalogos.html>>. Acesso em: 8 de fevereiro de 2015.

NCMA (1997). **Design Manual for Segmental Retaining Walls**, 2nd Edition, Second Printing, National Concrete Masonry Association, Herndon, Virginia.

NEVES, Luis Fernando de Seixas. **Dicionário de engenharia geotécnica e fundações**. 1ª Ed. São Paulo: edição do autor; 2010.

PINI. **Como contratar execução de parede-diafragma**. Disponível em:
<<http://construcomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/131/artigo298925-1.aspx>>. Acesso em 7 de novembro de 2014.

PINI. **Projeto Parede Diafragma**. Disponível em:

<<http://equipedeobra.pini.com.br/construcao-reforma/82/plantas-parede-diafragma-343758-1.aspx>>. Acesso em: 7 de agosto de 2015.

PINI. **Responsabilidades no rebaixamento do lençol freático**. Disponível em:

<<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/109/artigo281904-1.aspx>>. Acesso em: 3 de novembro de 2015.

ROCA FUNDAÇÕES. **Parede diafragma**. Disponível em:

<<http://www.rocafundacoes.com.br/servicos/parede-diafragma>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2014.

SCRIBD. **Paredes Diafragma Sistema Construtivo**. Disponível em:

<<https://pt.scribd.com/doc/72094586/Paredes-Diafragma-Sistema-Construtivo>>. Acesso em: 7 de dezembro de 2014.

TÉCHNE. São Paulo: Editora Pini, novembro de 2013.

TÉCHNE. **Sistemas Construtivos, Paredes Diafragma**. Disponível em:

<<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/182/artigo286914-3.aspx>>. Acesso em: 30 de julho de 2015

TÉCHNE. **Descarte de resíduos perigosos**. Disponível em:

<<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/189/descarte-de-residuos-perigosos-instalacao-de-estacoes-de-coleta-288004-1.aspx>>. Acesso em: 16 de outubro de 2015

TREVIGEOS. **Parede Diafragma**. Disponível em:

<http://www.trevigeos.com.br/viewdoc.asp?co_id=3260> Acesso em: 14 de janeiro de 2015

UCG. **Parede diafragma**. Disponível em:

<<http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/16538/material/PARED E%20DIAFRAGMA.pdf>>. Acesso em: 29 de outubro de 2014.

UFJF. **Rebaixamento do Lençol Freático**. Disponível em <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid02.2.pdf> Acesso em: 8 de agosto de 2015.

UFSC. **Métodos para construção de parede diafragma, Clamshell e Hidrofresa**. Disponível em: <<http://pet.ecv.ufsc.br/2013/11/metodos-para-construcao-de-parede-diafragma-clamshell-e-hidrofresa/>>. Acesso em: 28 de outubro de 2014.

UFMG. **Paredes Diafragma Sistema Construtivo**. Disponível em: <<http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg1/Paredes%20Diafragma%20Sistema%20Construtivo.pdf>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2015.

UFPR. **Rebaixamento de Lençol Freático**. Disponível em: <http://www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC066/Rebaixamento_de_%20lencol.pdf>. Acesso em: 7 de agosto de 2015.

UFPR. **Contenções**. Disponível em: <<http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/2/29/Conten%C3%A7%C3%B5es.pdf>>. Acesso em: 5 de novembro de 2015.

UFPR. **Contenções**. Disponível em: <<http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/3/31/Conten%C3%A7%C3%B5esSlides.pdf>> Acesso em 5 de novembro de 2015.

UFRJ. **Aplicação da Técnica Construtiva de Subsolo Invertido**. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10011792.pdf>>. Acesso em: 29 de março de 2015.

USP. **Parede Diafragma em valas de metro**. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1979DO_WalterAbrahaonNimir.pdf>. Acesso em: 4 de março de 2015.