



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

## **Efeito de Bermas em Escavação Executada em Balanço**

**Vitor Borges Ferreira Leite<sup>1</sup>, Alessandra Conde de Freitas<sup>2</sup>, Mauro Vitor dos Santos Moura<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica / Departamento de Construção Civil / vitorbfl@poli.ufrj.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica / Departamento de Construção Civil /  
alessandracfreitas@poli.ufrj.br

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica / Departamento de Construção Civil / mauro.moura@poli.ufrj.br

### **Resumo**

A construção em regiões densamente edificadas é um desafio para a Engenharia Civil em todo o mundo, uma vez que há necessidade de se repensar sobre novos aproveitamentos desses espaços saturados. Este fato proporciona um aumento progressivo na execução de estruturas subterrâneas, em especial subsolos de edifícios e túneis rodoviários e metroviários. Como a retirada do volume de solo para a execução desse tipo de obra gera deslocamentos significativos ao redor da escavação, deve ser verificado e evitado um possível comprometimento estrutural e/ou funcional de estruturas vizinhas e da própria obra. Via de regra, nos casos de escavações a céu aberto executadas em balanço, constroem-se, no interior da cava, bermas adjacentes à estrutura de contenção, a fim de reduzir os esforços e os deslocamentos da mesma. Essa redução ocorre por conta do aumento das tensões horizontais passivas mobilizadas pela presença da berma. Assim sendo, este estudo tem como propósito avaliar o comportamento de uma escavação em balanço realizada em área urbana na cidade do Rio de Janeiro. Foram efetuadas análises numéricas, baseadas no método dos elementos finitos (MEF), com auxílio da ferramenta computacional Plaxis 2D em condição de estado plano de deformação. Por meio destas análises, foi possível avaliar o efeito da adoção de diferentes geometrias de bermas nos momentos fletores e nos deslocamentos horizontais da parede diafragma utilizada como contenção. Além disso, foi verificada a influência da rigidez da parede diafragma no comportamento da escavação. Através das análises efetuadas, foi possível constatar um melhor desempenho da escavação/estrutura de contenção nos casos em que se adotou berma.

### **Palavras-chave**

Bermas; Escavação; Deslocamentos; Momentos Fletores; Análise Numérica.

### **Introdução**

Nos casos em que escavações atingem grandes profundidades, é comum a execução de bermas no interior da cava junto às estruturas de contenção. A berma funciona como uma espécie de anteparo temporário antes da instalação dos níveis de suporte, uma vez que a fase de escavação em balanço é considerada mais crítica do que a condição permanente (MORSI, 2003). Dessa forma, a berma proporciona o aumento do empuxo passivo com conseqüente redução dos deslocamentos horizontais e momentos fletores na contenção (MORSI, 2003; VALVERDE, 2018).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o efeito da berma em uma escavação ocorrida no Rio de Janeiro e verificar se as conclusões vão de encontro com o evidenciado por MORSI (2003) e VALVERDE (2018). Para isso, diferentes geometrias de bermas são modeladas e os resultados dessas análises – relativos aos deslocamentos horizontais e momentos fletores – são comparados caso a caso. Como complemento, a influência da rigidez da parede neste cenário também foi elucidada.

### **Caracterização do caso de obra e análise numérica**

O caso de obra a ser analisado é a escavação da estação de metrô de Botafogo, no Rio de Janeiro. Assim sendo, escolheu-se uma seção transversal com base nos estudos de JUCÁ (1981) e SOARES (1981), a fim de possibilitar uma análise numérica deste cenário apenas na fase construtiva em balanço.

Conforme apresentado por JUCÁ (1981) e SOARES (1981), o método construtivo foi a céu aberto em toda a extensão do traçado do metrô e a contenção executada neste trecho analisado foi em parede diafragma.



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

A parede diafragma tem 1,2 metro de espessura e 30,0 metros de altura, devido à existência de camadas argilosas de baixa capacidade de suporte. Na fase em balanço, a cava possui 6,0 metros de profundidade e aproximadamente 15,0 metros de largura. Além disso, foi executado um sistema de poços de alívio com bombas submersas com o objetivo de rebaixar os níveis d'água das camadas arenosas, evitando a ruptura hidráulica de fundo.

A seguir, no Quadro 1, é feita uma breve explicação sobre as condições geotécnicas do local, as quais foram descritas por JUCÁ (1981). As Tabelas 1 e 2 expõem os parâmetros do solo e da parede diafragma, obtidos por LEITE (2021), a serem utilizados na análise numérica com o modelo *Hardening Soil* (HS) por meio do *software* Plaxis 2D.

**Quadro 1 – Características geotécnicas da seção analisada no caso de obra.**

Camada	Características
1	Camada superficial de areia fina a média medianamente compacta, com 7,0 metros de espessura e $N_{SPT}$ variável entre 10 e 20 golpes.
2	Argila arenosa média a mole, com 6,0 metros de espessura e $N_{SPT}$ variando entre 4 e 8 golpes.
3	Argila siltosa muito mole a mole, com 6,0 metros de espessura e $N_{SPT}$ praticamente constante igual a 2 golpes.
4	Argila arenosa média, com 6,0 metros de espessura e $N_{SPT}$ compreendido entre 8 e 12 golpes.
5	Argila siltosa mole a média, com 3,0 metros de espessura e $N_{SPT}$ compreendido entre 2 e 5.
6	Areia grossa compacta com pedregulhos, estendendo-se até o impenetrável e $N_{SPT} > 30$ golpes. É a última camada a ser considerada.

**Tabela 1 – Parâmetros de entrada da análise numérica utilizando o modelo HS.**

Camada	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	k (m/dia)	$\nu_{ur}$	c ou Su (kPa)	$\phi'$ (°)	$E_{50}^{ref}$ (kPa)	$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	$\psi$ (°)	$R_{inter}$
1	18	1	0,2	1	35	24000	24000	72000	5	0,8
2	17	1E-05	0,2	80	25	35000	35000	105000	0	0,7
3	16	1E-07	0,2	40	-	16700	16700	50100	0	0,7
4	17	1E-05	0,2	90	-	50000	50000	150000	0	0,7
5	18	1E-07	0,2	50	-	45000	45000	135000	0	0,7
6	20	1	0,2	1	35	81000	81000	243000	5	0,9

Sendo:

$\gamma$ : peso específico do solo;

$k$ : permeabilidade do solo;

$\nu_{ur}$ : coeficiente de Poisson de descarregamento-recarregamento do ensaio triaxial drenado;

$c$ : coesão do solo;



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

$S_u$ : resistência não drenada do solo;

$\phi'$ : ângulo de atrito do solo;

$E_{50}^{ref}$ : módulo secante correspondente a 50% da tensão de ruptura do ensaio triaxial drenado;

$E_{oed}^{ref}$ : módulo oedométrico;

$E_{ur}^{ref}$ : módulo de descarregamento-recarregamento do ensaio triaxial drenado.

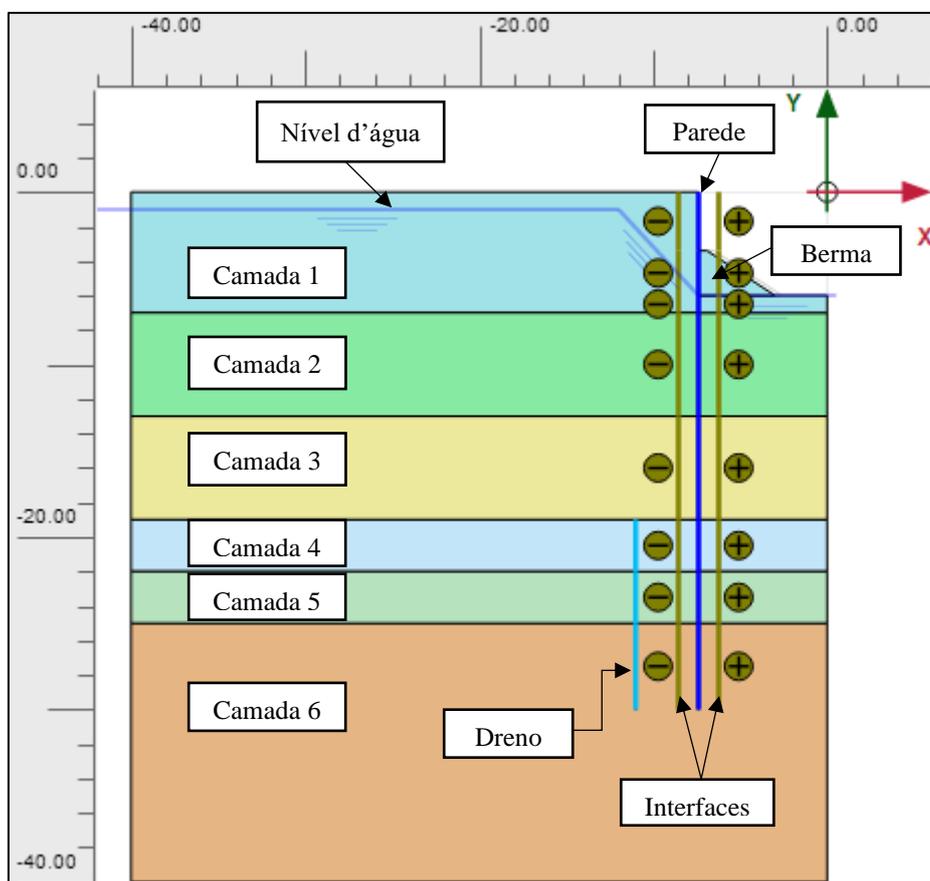
$\psi$ : ângulo de dilatância;

$R_{inter}$ : fator de redução do atrito entre o solo e a estrutura.

**Tabela 2 – Parâmetros relativos à parede diafragma no modelo HS.**

Parâmetro	Valor	Unidade
Rigidez axial	3,60E+07	kN/m
Rigidez à flexão	4,32E+06	kNm <sup>2</sup> /m
Espessura	1,20	m
Peso	8,80	kN/m/m
Coefficiente de Poisson	0,15	-

A Figura 1 ilustra uma seção transversal modelada no Plaxis 2D. Nela é possível observar as camadas de solo, o dreno que simula a bomba submersa, uma berma, o nível d'água, os elementos de interface e o elemento que representa a parede diafragma.



**Figura 1 – Seção transversal representativa do caso de obra.**



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Isto posto, a fim de detectar os parâmetros que refletem maior relevância neste cenário, são realizadas algumas análises paramétricas, as quais se diferenciam em função da(s):

- (i) Presença ou não de berma;
- (ii) Geometrias das bermas (trapezoidais);
- (iii) Rigidez da parede.

A Tabela 3 indica quais parâmetros relacionados à berma e à parede serão modificados a depender da análise; e suas respectivas dimensões. Vale ressaltar que as características geotécnicas das bermas são similares às da primeira camada arenosa, uma vez que são compostas pelo mesmo material.

**Tabela 3 – Parâmetros e suas dimensões**

Parâmetro	Dimensões
Altura da berma (Hb)	2,3m e 2,6m
Inclinação do talude da berma (i)	1:1,5 (V:H) e 1:2,5 (V:H)
Largura do topo da berma (Lt)	0,5m e 0,9m
Espessura da parede (d)	1,0m e 1,2m

### Resultados da análise numérica

Os Quadros 2 e 3 elucidam sobre a magnitude dos resultados de todas as análises numéricas no tocante aos deslocamentos horizontais máximos e momentos fletores máximos atuantes na parede diafragma.

**Quadro 2 – Deslocamentos horizontais máximos**

Hb (m)	i (V:H)	Deslocamento horizontal máximo (mm)			
		d = 1,0m		d = 1,2m	
		Lt = 0,5m	Lt = 0,9m	Lt = 0,5m	Lt = 0,9m
Sem berma	-	38,8		33,0	
2,3	1:1,5	25,3	25,0	22,1	21,7
2,3	1:2,5	20,2	19,6	17,5	17,1
2,6	1:1,5	23,2	22,8	20,4	19,8
2,6	1:2,5	17,3	16,3	15,4	14,4

**Quadro 3 – Momentos fletores máximos**

Hb (m)	i (V:H)	Momento Fletor Máximo (kNm/m)			
		d = 1,0m		d = 1,2m	
		Lt = 0,5m	Lt = 0,9m	Lt = 0,5m	Lt = 0,9m
Sem berma	-	-634,5		-658,6	
2,3	1:1,5	-413,1	-412,2	-434,9	-433,8
2,3	1:2,5	-338,8	-336,7	-360,7	-359,3
2,6	1:1,5	-377,9	-376,8	-401,5	-400,5
2,6	1:2,5	-298,2	-291,2	-321,5	-314,4



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Foram montadas as Figuras 2 e 3, as quais ilustram, respectivamente, gráficos de deslocamento horizontal *versus* profundidade e momento fletor *versus* profundidade. Essas figuras possuem configuração de “matriz”, com objetivo de facilitar a visualização e a comparação dos resultados obtidos pelas análises.

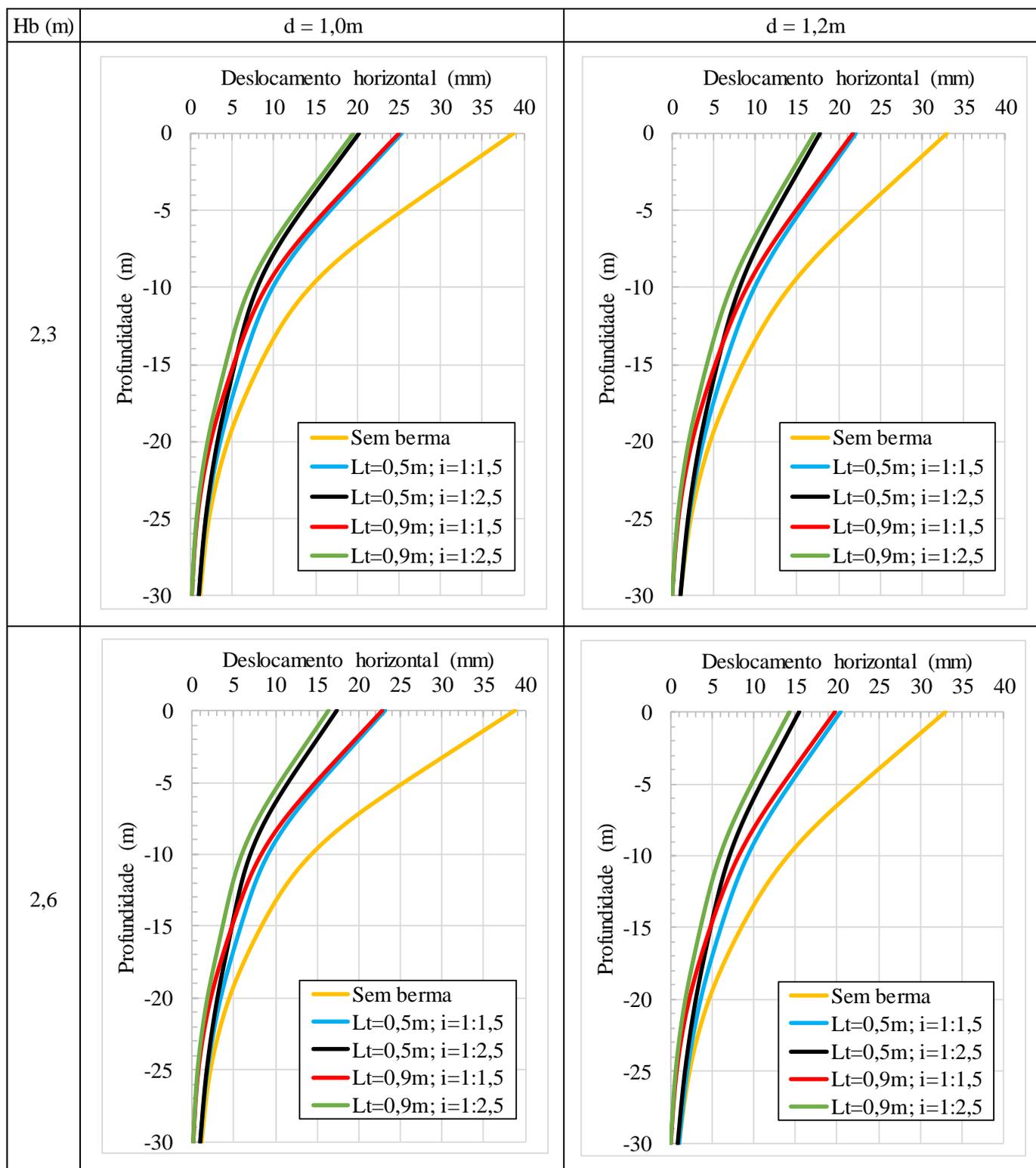


Figura 2 – Deslocamento horizontal em função da profundidade

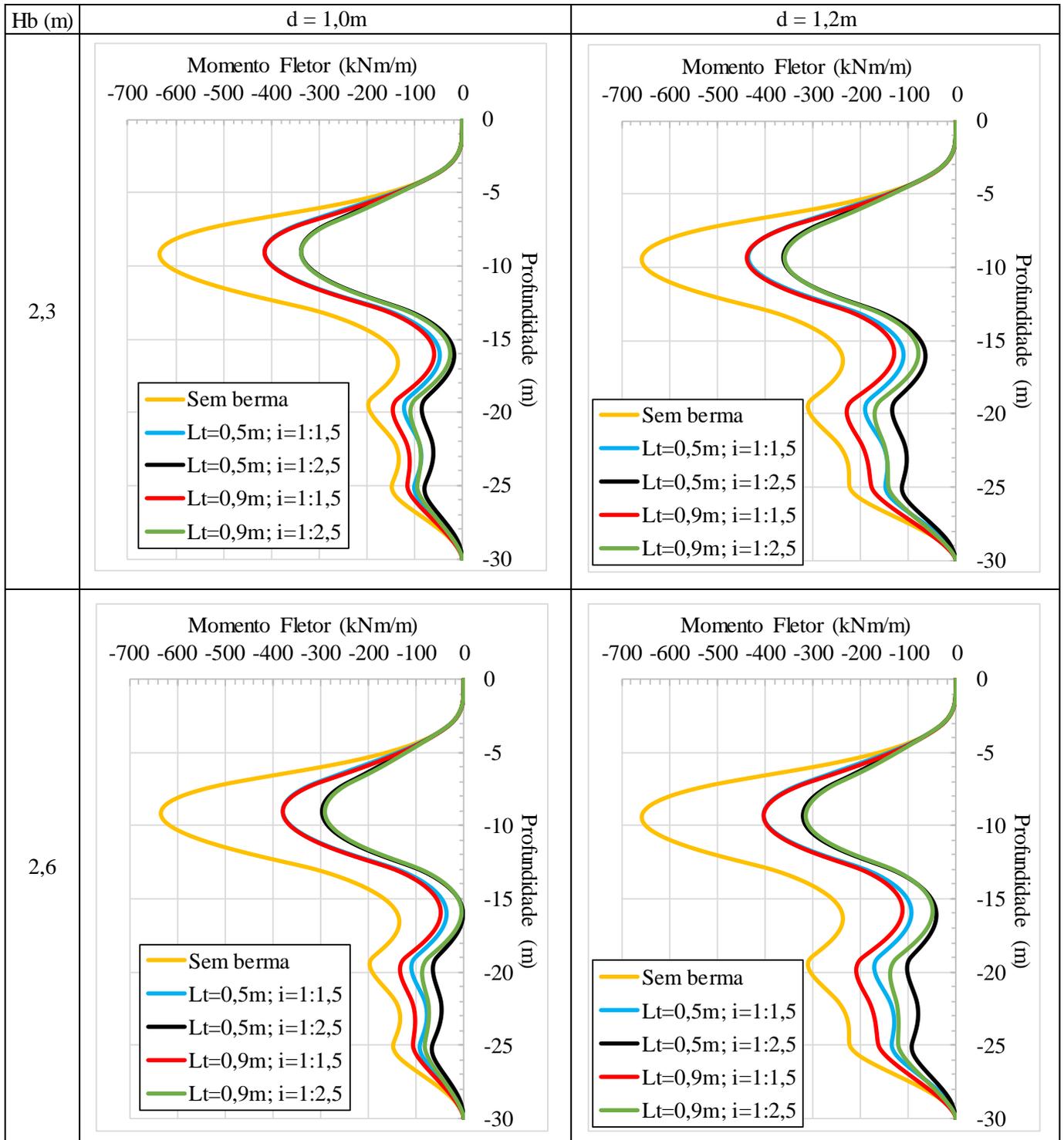


Figura 3 – Momento fletor em função da profundidade



## Conclusões

É percebido nitidamente que na análise sem berma os deslocamentos horizontais e momentos fletores da parede são maiores em módulo do que as com berma, corroborando os resultados encontrados na literatura.

Nos casos em que se tem bermas de mesma geometria, ao aumentar a rigidez da parede, há redução dos deslocamentos horizontais e aumento dos momentos fletores.

Nota-se que ao aumentar somente a altura da berma, ocorre redução dos deslocamentos horizontais e dos momentos fletores. Foi observado que ao aumentar a largura do topo da berma e/ou a inclinação do talude, sem variar a rigidez da parede, esse fenômeno também ocorre. Isso é justificado pelo aumento do empuxo passivo nesta região proporcionado pelo incremento do volume de solo.

Até aproximadamente à profundidade -15,0 metros, os momentos fletores são bastante similares nas análises de diferentes larguras de topo da berma e de iguais inclinações, concomitantemente. Este fato pode ser justificado pelo baixo aumento de volume de solo.

Em todas as análises, os deslocamentos máximos se deram no topo da parede, o que é característico de estruturas executadas em balanço, e os momentos fletores máximos ocorreram na mesma profundidade (cerca de 9 metros).

Embora o autor não tenha baseado seu estudo nas geometrias de MORSI (2003) e VALVERDE (2018), os resultados aqui encontrados convergem com os encontrados por esses autores, ampliando o banco de dados relativo ao estado da arte da utilização de bermas em escavações.

## Referências

- JUCÁ, J. F. T., Influência de Escavações nos Recalques em Edificações Vizinhas. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1981.
- LEITE, V. B. F., Análise do Comportamento de uma Parede Diafragma Multiescorada – Caso de Obra Instrumentada. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.
- MORSI, Y. G. Y., Berms of Stabilizing Earth Retaining Structures. Dissertação de M. Sc., Cairo University, Cairo, Egito, 2003.
- SOARES, M. M., Cálculo de Paredes Diafragma Multi-escoradas em Presença de Solos Argilosos. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1981.
- VALVERDE, J. G. N., Influência da Banqueta no Comportamento de Escavações com Cortina em Balanço. Dissertação de M. Sc., PGEIV/UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.