



MARCELA PEREIRA ANDRADE

**ESTUDO NUMÉRICO COMPARATIVO DO
COMPORTAMENTO DE MUROS DE SOLO REFORÇADO
COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE FACE**

**LAVRAS-MG
2019**

MARCELA PEREIRA ANDRADE

**ESTUDO NUMÉRICO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE
MUROS DE SOLO REFORÇADO COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE FACE**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Curso de
Engenharia Civil, para a obtenção do
título de Bacharel.

Profa. Me. Raquel Mariano Linhares
Orientadora

**LAVRAS-MG
2019**

MARCELA PEREIRA ANDRADE

**ESTUDO NUMÉRICO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE
MUROS DE SOLO REFORÇADO COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE FACE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Civil, para a
obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 11 de novembro de 2019.

Raquel Mariano Linhares UFLA

Denise de Carvalho Urashima CEFET-MG

Eduardo Souza Cândido UFLA

Profa. Me. Raquel Mariano Linhares
Orientadora

**LAVRAS-MG
2019**

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por me permitir realizar mais este sonho.

Aos meus pais por serem meus maiores incentivadores durante estes 5 anos, sempre me dando apoio, amor e carinho, não medindo esforços para que eu alcançasse meus sonhos.

À minha irmã por ser minha melhor amiga e a pessoa que mais me inspira diariamente.

À minha avó por todas as orações e pelo amor incondicional.

Às minhas amigas Bia e Val por terem sido minhas maiores companhias nestes 5 anos e com quem vivi meus melhores momentos na faculdade.

Aos meus amigos da faculdade Alice, Bárbara, Bianca, Bruna, Esthela, Lu, Lucas, Marina, Mateus, Tawany e Yara por deixarem esta trajetória mais leve, cheia de felicidade e bons momentos.

À Gi pela amizade e apoio, por ter dividido comigo a casa, a vida e cada momento de tristeza ou felicidade.

Ao Vitor pela parceria no início do curso e pela amizade para a vida toda.

À Anahí, à Emilly, à Paula e à Catalina por terem me ensinado tanto sobre cultura, diferenças e respeito em tão pouco tempo e por terem me acolhido tão bem.

Aos amigos do Brasil que o México me deu e que são uma das minhas maiores saudades, Adonias, Bruna, Maria e Mateus, por terem sido minha família durante um semestre e por me lembrarem diariamente que estaremos juntos para a vida toda.

Aos demais amigos que o intercâmbio me deu, Alexis, Maria, Christian, Yedani e Sonja, por terem sido e continuarem sendo essenciais na minha vida.

A todos da Universidad de Monterrey que me receberam de maneira inigualável, sempre muito amorosos e receptivos, fazendo com que eu me sentisse em casa e proporcionando uma das melhores experiências da minha vida.

Ao México por ser minha segunda casa, o lugar onde sempre vou me sentir acolhida e pelo qual tenho muito amor e carinho.

À Ana por todo o companheirismo, compreensão e amizade neste último semestre.

Aos meus amigos colombianos, Ingrid, Hanner e Hermes, por terem sido luz na minha vida quando mais precisei.

À minha orientadora, Raquel, por toda a paciência, pelos ensinamentos, por me incentivar diariamente e sempre me fazer acreditar que sou capaz de atingir meus objetivos, além de me inspirar no amor pela Geotecnia.

|

Ao professor Saulo, meu primeiro orientador na UFLA, por ter me ensinado todas as bases de pesquisas acadêmicas, com as quais desenvolvi todos os meus projetos na faculdade.

Aos professores Eduardo e Ígor, pelas aulas excelentes, por todo o conhecimento transmitido de maneira tão leve e por me inspirarem, como profissional e como pessoa.

À UFLA por ter me proporcionado os melhores anos da minha vida, nos quais conheci pessoas que vou levar para sempre comigo e onde pude realizar meu sonho.

A todos, por fim, que, de alguma maneira, colaboraram para que eu pudesse chegar até aqui, obrigada!

|

“Pies, ¿para qué los quiero si tengo alas para volar?”

(Frida Kahlo)

RESUMO

O uso de solo reforçado para a construção de muros e taludes é uma técnica que visa um melhoramento nas propriedades mecânicas do solo, que quando bem compactado possui boa resistência ao cisalhamento e à compressão, mas não à tração. Assim, a inclusão de reforços objetiva o aprimoramento desta propriedade, tornando possível a construção de taludes com maiores inclinações, já que o elemento de reforço promove maior estabilidade na estrutura. Os Muros de Solo Reforçado (MSR) são uma solução eficiente para os problemas de geotecnia e, por isso, vêm sendo amplamente utilizados. No geral, para estas estruturas usa-se uma geometria de face plana, ainda que inclinada, sendo variados somente parâmetros como altura do muro, inclinação, restrição do pé e tipo de faceamento. Todavia, estudos afirmam que uma geometria de face côncava seria mais eficiente para um MSR por oferecer maior estabilidade. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar, através do *software* Plaxis, uma análise mais aprofundada da relação da geometria da face com a estabilidade de um MSR, visando uma possível validação do modelo de face côncava. Além disso, foi proposta uma geometria de face mista, composta por uma parte côncava e uma parte plana, a fim de sanar problemas de instabilidade na face em trechos de talude negativo gerados pela concavidade. Foi possível, com esta pesquisa, mensurar os parâmetros de tensões de tração nos reforços (geogrelhas, para este trabalho), deslocamentos laterais e recalques, tanto para o muro de geometria de face convencional, quanto para as outras duas propostas, gerando resultados que mostram a viabilidade da implementação destas novas alternativas de geometria em situações reais de projeto.

Palavras-chave: Muro de solo reforçado. Geometria da face. Face côncava. Plaxis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Seção transversal típica de um muro de solo reforçado.....	15
Figura 2.2 - Mecanismos verificados pela estabilidade externa	19
Figura 2.3 - Mecanismos que regem a estabilidade interna.	20
Figura 2.4 - Ponto de equilíbrio de deformações.	22
Figura 2.5 - Idealização do perfil côncavo com curvatura controlada pelo MCO.	25
Figura 3.1 - Geometria do Muro A.....	28
Figura 3.2 - Geometria do Muro B.	29
Figura 3.3 - Geometria do Muro C.....	30
Figura 3.4 - Detalhe do processo de compactação.	32
Figura 3.5 - Detalhe do processo de compactação para trechos de talude negativo.	33
Figura 3.6 - Malha do Muro A ao final da construção.	34
Figura 3.7 - Malha do Muro B ao final da construção.	34
Figura 3.8 - Malha do Muro C ao final da construção.	35
Figura 4.1 - Deformação do Muro A provocada por uma sobrecarga de 100 kPa.....	35
Figura 4.2 - Deformação do Muro B provocada por uma sobrecarga de 100 kPa.....	36
Figura 4.3 - Deformação do Muro C provocada por uma sobrecarga de 100 kPa.....	36
Gráfico 4.1 - $\sum T_{\text{máx}}$ x Altura do muro.	37
Gráfico 4.2 - $\sum T_{\text{máx}}$ x Carregamentos.....	38
Gráfico 4.3 - Altura do muro x Deslocamentos laterais.....	39
Gráfico 4.4 - Recalque x Comprimento do muro.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros necessários para a construção da face côncava.	29
Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados no projeto.	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Contextualização	11
1.2.	Objetivos	13
1.3.	Organização do trabalho	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.	Elementos de um MSR	15
2.1.1.	Sistema de drenagem	15
2.1.3.	Reforço	16
2.1.4.	Face	17
2.2.	Comportamento de um MSR	18
2.2.1.	Estabilidade externa	18
2.2.2.	Estabilidade interna	19
2.2.3.	Principais fatores que influenciam no comportamento de um MSR	21
2.2.3.1.	Rigidez relativa solo-reforço	21
2.2.3.2.	Compactação do solo	23
2.2.3.3.	Combinação de elementos do muro	23
2.3.	<i>Softwares</i> e geotecnia	26
3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1.	Geometria	28
3.2.	Parâmetros geotécnicos	30
3.3.	Validação do modelo numérico	31
3.4.	Métodos construtivos	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1.	Tensões de tração nos reforços	36
4.2.	Deslocamentos laterais	38
4.3.	Recalques	39

|

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
5.1.	Conclusões	41
5.2.	Sugestão de pesquisas futuras	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Desde os primórdios, o solo é elemento fundamental nos mais variados processos construtivos desenvolvidos pelo homem. Todavia, devido ao fato de muitas vezes as propriedades de resistência dos solos mais próximos às construções não serem suficientes, fez-se necessário o desenvolvimento de técnicas que possibilitassem o reforço destes.

Segundo Palmeira (2018), construções datadas de séculos a.C., como as muralhas da Mesopotâmia, apresentam em sua composição camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. A Grande Muralha da China é outro exemplo de uma obra que remonta à Antiguidade e que possui o solo reforçado como auxílio para sua estabilidade. Além disso, no Peru, também há a presença desse tipo de estrutura nas estradas construídas pelos incas, porém utilizando lã de lhama como reforço para o solo.

Entretanto, pode-se afirmar que somente na década de 70, quando o arquiteto francês Henry Vidal concebeu a técnica denominada “Terra Armada”, o solo reforçado adquiriu maior visibilidade no ramo industrial. Tal técnica, como explica Palacios (2012), consistia em introduzir tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que constituíam a face do maciço de solo, aprimorando as propriedades deste em obras de contenção.

O uso de geossintéticos como elementos de reforço, por sua vez, é recente e iniciou na mesma década em que surgiu a “Terra Armada”. Esta alternativa começou a ser adotada devido à necessidade de se determinar parâmetros para projetos de solos reforçados (quanto à resistência, durabilidade, entre outros), o que fez com que os materiais sem controle tecnológico utilizados anteriormente fossem substituídos por materiais que possibilitassem a determinação de suas características (TEIXEIRA, 2006).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 12553, os geossintéticos podem ser definidos como:

“Produtos poliméricos (sintéticos ou naturais), industrializados, desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções, dentre as quais destacam-se: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial”.

Tais materiais podem ser divididos em geotêxteis e geogrelhas e seu uso na geotecnia vem crescendo paulatinamente ao longo dos anos.

É necessário, contudo, entender *a priori* o porquê de se reforçar o solo e quais são as características desejadas com este procedimento. Ehrlich e Becker (2009) fazem as seguintes considerações sobre este tema:

“O solo, desde que adequadamente compactado, em geral, apresenta boa resistência à compressão e ao cisalhamento. A resistência à tração, no entanto, é baixa ou nula. De modo similar ao que se verifica no concreto armado, a inclusão de reforços supre essa deficiência.”

Nota-se, então, que ao reforçar o solo visa-se um melhoramento de suas propriedades mecânicas. Assim, são introduzidos reforços no maciço que possuem alta resistência à tração, como fitas metálicas, geotêxteis, geogrelhas, fibras, dentre outros, compensando a fraqueza do solo em relação a esta propriedade. Um exemplo do funcionamento dos reforços é nas areias limpas, cuja resistência à tração é nula, possibilitando fazer taludes inclinados de, no máximo, 40°, como afirmam Ehrlich e Becker (2009). Os autores explicam que, ao reforçar esse mesmo material, torna-se viável a construção de um talude vertical, visto que os reforços solidarizam a região de potencial instabilidade do solo com a região estável, o que garante a estabilidade do talude.

Assim, nota-se que essa técnica seria altamente aplicável a diversos ramos da geotecnia, como em projetos de rodovias, na mineração e em estruturas de contenção. Este último emprego do solo reforçado deve ser destacado, porque para tal fim essa técnica apresenta várias vantagens. A execução de muros e taludes em solo reforçado é uma solução que, além de econômica, é de fácil e rápida execução, não exige mão de obra especializada e gera estruturas que apresentam alta tolerância à deformação do solo de fundação (EHRlich; AZAMBUJA, 2003).

Outro ponto positivo dos reforços nas estruturas de contenção é a possibilidade de atingir inclinações acentuadas (até verticais), de acordo com a resistência e o número de reforços empregados. Ademais, tem bom acabamento estético no faceamento, que pode ser feito com blocos de concreto, com a revegetação da estrutura ou por meio do autoenvolvimento da face. Segundo Santos (2007), em termos ecológicos o processo também se configura como vantajoso porque:

- (i) Não apresenta poluição durante a fabricação e construção;
- (ii) A demolição da estrutura é simples.

O enfoque principal deste trabalho será nos Muros de Solo Reforçado (MSR), muros de gravidade que possuem na composição de sua estrutura o solo e elementos associados a ele que resistem à tração.

Sabe-se ainda que, no geral, a geometria da seção transversal das estruturas de solo é plana, ainda que seja inclinada. Todavia, estudos recentes inspirados em taludes naturais sem reforços, afirmam que uma geometria côncava para a face do muro ofereceria maior estabilidade, além de melhor resistência à erosão (VAHEDIFARD; SHAHROKHABADI; LESHCHINSKY, 2016). Entretanto, as investigações acerca deste tema ainda são escassas, de modo que se faz necessário um estudo mais aprofundado para realizar uma possível validação de Muros de Solo Reforçado com face côncava.

1.2. Objetivos

Pretendeu-se com esta pesquisa comparar o comportamento de três muros de solo reforçado, construídos com parâmetros idênticos, sendo diferenciados apenas pela geometria da face, sendo:

- (i) MURO A, com face inclinada e reta;
- (ii) MURO B, com face côncava, como proposto no trabalho de Vahedifard, Shahrokhabadi e Leshchinsky (2016) e usando as formulações desenvolvidas por estes;
- (iii) MURO C, com face mista, uma adaptação destes dois modelos proposta pela autora.

O estudo foi realizado com o *software* Plaxis, que possibilita o desenvolvimento de modelagens numéricas, simulando condições reais de trabalho.

O comparativo realizado aborda deslocamentos laterais, recalques e tensões totais de tração nos reforços. Vahedifard, Shahrokhabadi e Leshchinsky (2016) afirmaram que um muro de face côncava teria menores tensões de tração nos reforços para um estado último, todavia, neste projeto desejou-se analisar se esse comportamento continua o mesmo quando o muro é solicitado por sobrecargas de uso.

1.3. Organização do trabalho

No capítulo 2 deste projeto são explanados os principais conceitos relacionados a um muro de solo reforçado, como seu perfil típico e seus elementos. Além disso, é estudado o comportamento do MSR, tratando de parâmetros importantes, sendo eles a rigidez relativa solo-reforço, o ponto de equilíbrio de deformações e a geometria da face desta estrutura de contenção.

Ainda neste capítulo são expostas informações a respeito dos métodos numéricos utilizados na área da geotecnia, dando destaque ao Plaxis, o qual foi utilizado para desenvolver este trabalho.

No capítulo 3, é descrita a metodologia dessa pesquisa, evidenciando o método dos elementos finitos utilizado pelo *software* Plaxis para simular um MSR em uma situação real.

Também é explicado sobre como, por meio destes recursos, foi possível a obtenção de gráficos de deslocamentos laterais, recalques e de tensões totais de tração, estes que são altamente relevantes para o estudo realizado.

Já no quarto capítulo estão os resultados obtidos com este estudo e uma comparação do comportamento dos três modelos desenvolvidos.

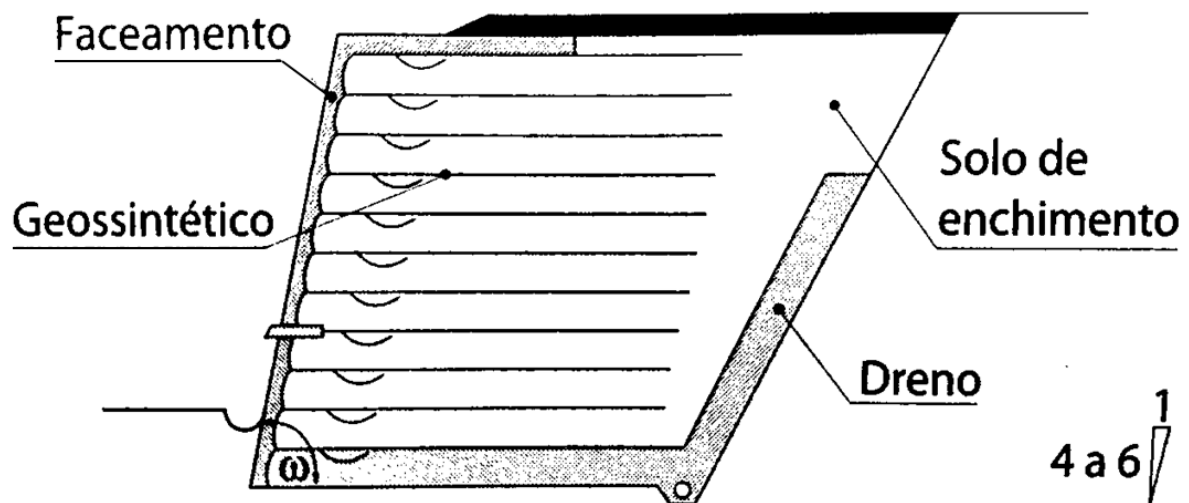
Por fim, no capítulo 5, se encontram os principais pontos observados ao longo da realização deste estudo e uma possível validação da geometria de face proposta, caso a mesma se apresente como vantajosa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Elementos de um MSR

O estudo do MSR leva em conta os diversos fatores que afetam seu comportamento, como afirmam Mirmoradi, Ehrlich e Dieguez (2015). A Figura 2.1 apresenta um arranjo simplificado típico de um MSR:

Figura 2.1- Seção transversal típica de um muro de solo reforçado.



Fonte: Ehrlich e Becker (2009).

2.1.1. Sistema de drenagem

Sabe-se que a água é o principal agente causador dos movimentos gravitacionais e de transporte de massa, o que provoca acidentes em encostas em épocas chuvosas devido à saturação da massa de solo (OHORI, 2005). Deste modo, a drenagem é essencial em um projeto responsável de uma estrutura de contenção, visando atingir poropressões nulas nos MSR, de maneira a garantir a ausência de problemas futuros.

2.1.2. Solo de enchimento

O solo de enchimento é um dos fatores que influenciam no comportamento do muro de solo reforçado, sendo que o processo de compactação deste é altamente importante para o comportamento do muro ao final de sua construção e após a aplicação de carga. Ehrlich (1999) afirma que, para um MSR, “a compactação pode ser o principal fator de influência nas tensões internas para profundidades inferiores a 6 m”. Logo, as análises de tensões devem levar em conta este processo.

A escolha do material de enchimento a ser utilizado depende também das suas propriedades físicas, como índice de plasticidade, porcentagem de finos, coesão, CBR (do inglês *California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia) e expansão. O critério de escolha se baseia na resistência e deformabilidade observada no solo durante os ensaios mecânicos e no seu comportamento quando submetido à compactação (EHRlich; AZAMBUJA, 2003).

Para a obtenção do material de enchimento de um MSR, devem-se respeitar algumas restrições em relação às suas características. Ogori (2005) destaca que solos altamente deformáveis, como argilas muito plásticas, turfas e solos orgânicos devem ser evitados. Além disso, altas concentrações de pedregulhos e entulhos também podem danificar os reforços. Por fim, é desejado um solo que seja passível de ser compactado.

A princípio, havia restrições em relação à quantidade de finos, todavia, estudos realizados por Ehrlich (1999) mostram que solos residuais com finos em climas tropicais, como no Brasil, quando não saturados, apresentam alta coesão aparente, o que pode gerar um aumento na estabilidade global dos MSR e uma conseqüente redução nas tensões que atuam sobre os reforços, bem como uma diminuição das deformações. Deste modo, em relação aos finos presentes na massa de solo, o critério de seleção para climas temperados e tropicais não deve ser o mesmo, sendo importante levar em conta a experiência local com o uso do solo em questão.

2.1.3. Reforço

Ehrlich e Azambuja (2003) afirmam que a quantidade e a resistência dos reforços empregados influenciam no desnível que poderá ser atingido. Tanto a quantidade como o comprimento do material a ser usado são definidos por meio de análises de estabilidade externa e interna, temas que serão tratados *a posteriori*. É importante ressaltar que, em geral, seu comprimento varia de 60% a 80% da altura do muro.

Outra propriedade importante do reforço é sua rigidez, em relação ao solo e ao processo de compactação. Isso porque quanto mais rígido é o reforço, mais ele absorve energia e menos ele se deforma. Alguns materiais que se destacam no uso para reforço de solos serão descritos a seguir.

2.1.3.1. Reforços metálicos

As tiras de aço são materiais usados como reforços há muito tempo e exigem uma espessura de sacrifício, que varia de acordo com a vida útil da obra e o grau de agressividade do meio, para compensar as perdas por corrosão. Deste modo, dependendo das condições de

projeto, o custo da obra pode aumentar devido à espessura requisitada (EHRlich; BECKER, 2009).

2.1.3.2. Geotêxteis

Segundo Teixeira (2003), os geotêxteis são flexíveis, porosos e extremamente versáteis, dado que possuem variadas funções, como reforço, drenagem, filtração e separação. Eles são constituídos por fibras têxteis ordenadas ou dispostas aleatoriamente (CASAGRANDE, 2001) e podem ser divididos em tecidos e não tecidos, de acordo com seu processo de fabricação.

2.1.3.3. Geogrelhas

A Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS) afirma que as geogrelhas têm como principal função o de reforço dos solos. Elas podem ser classificadas como unidirecionais, quando a resistência à tração é predominante em uma direção, ou bidirecionais, quando a resistência é elevada em duas direções ortogonais (EHRlich; BECKER, 2009).

2.1.4. Face

A face do muro é um importante influenciador no comportamento de um MSR, tanto por sua rigidez, quanto por sua geometria e inclinação. Diversos são os sistemas que podem ser usados como faceamento, dentre eles podem ser destacados o uso de blocos de concreto e o autoenvolvimento. Um estudo realizado por Mirmoradi e Ehrlich (2016) afirma que a rigidez da face, que depende do material do qual ela é feita, juntamente com as condições de restrição do pé do muro afetam as tensões de tração geradas nos reforços e também as deformações sofridas pela estrutura.

Segundo Benjamim (2006), “a face de uma estrutura de contenção em solo reforçado pode ser construída com a finalidade de aumentar a durabilidade, melhorar a estética, facilitar a construção da estrutura e melhorar o desempenho estrutural do sistema”. Os diferentes tipos de faceamento possuem valores distintos de rigidez, propriedade esta que pode influenciar na estabilização e/ou redução das deformações de um muro, de forma a aumentar a zona reforçada e fazer a face trabalhar como uma estrutura monolítica.

Dentre os diversos tipos de faceamento, dois dos mais utilizados na prática são:

(i) Blocos segmentais: elementos pré-fabricados de concreto que são utilizados como forma lateral para a compactação das camadas, ao mesmo tempo em que constituem o faceamento definitivo;

(ii) Sistemas autoenvelopados: baseia-se no uso do próprio geossintético para confinar lateralmente o solo entre duas camadas de reforço, através da sua dobra e ancoragem com o interior do muro (EHRLICH; AZAMBUJA, 2003).

2.2. Comportamento de um MSR

É notável que muito se fala sobre os tipos de faceamento que podem ser utilizados na construção de um Muro de Solo Reforçado. Contudo, as informações em relação ao formato da face e à inclinação da mesma ainda são escassas. Sabe-se que um muro de face inclinada é mais estável que um cuja face forma um ângulo de 90° com a horizontal. Entretanto, ainda não existem estudos que provem que uma geometria reta para a face seria a mais eficiente em relação à resistência e deformabilidade do conjunto.

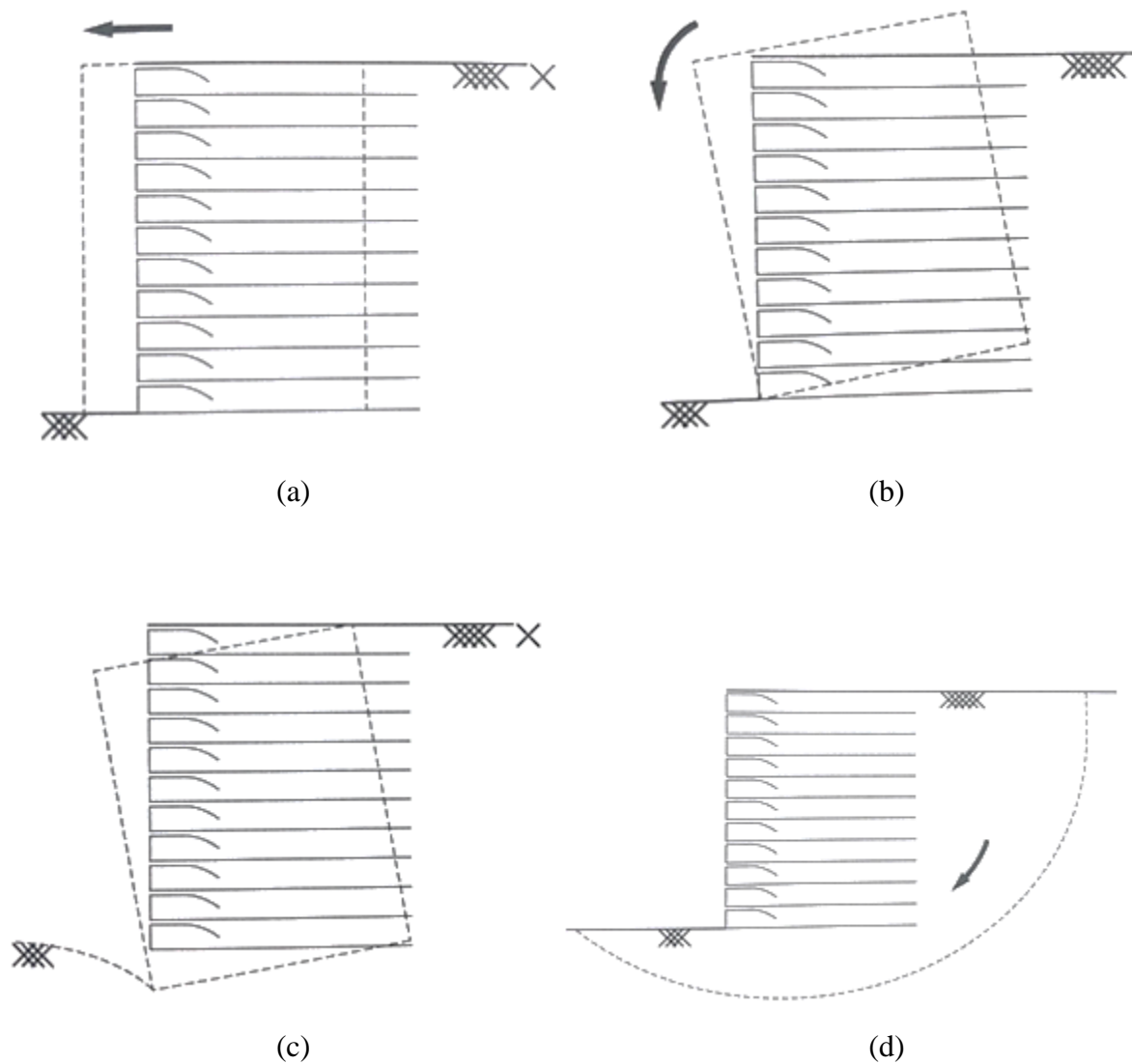
Segundo Teixeira (2003), “o projeto de taludes e muros reforçados com geogrelhas é geralmente dividido em duas etapas: a verificação da estabilidade externa e da estabilidade interna”. A seguir serão detalhadas essas duas verificações.

2.2.1. Estabilidade externa

Para realizar esta análise de estabilidade, o maciço de solo reforçado é considerado como um bloco rígido e devem ser analisadas as seguintes condições externas: deslizamento horizontal da base, tombamento do muro devido ao momento gerado pela força de empuxo ativo do solo, recalque gerado pelo peso do muro sobre o solo e ruptura geral (OHORI, 2005). A Figura 2.2 apresenta os mecanismos verificados pela estabilidade externa.

Ehrlich e Becker (2009) afirmam que tais verificações podem ser feitas por meio do uso de fatores de segurança globais, considerando a inclinação da face da estrutura e o material de fundação, ou por meio de fatores de ponderação.

Figura 2.2 - Mecanismos verificados pela estabilidade externa: deslizamento (a); tombamento (b); capacidade de carga da fundação (c) e instabilidade global (d).

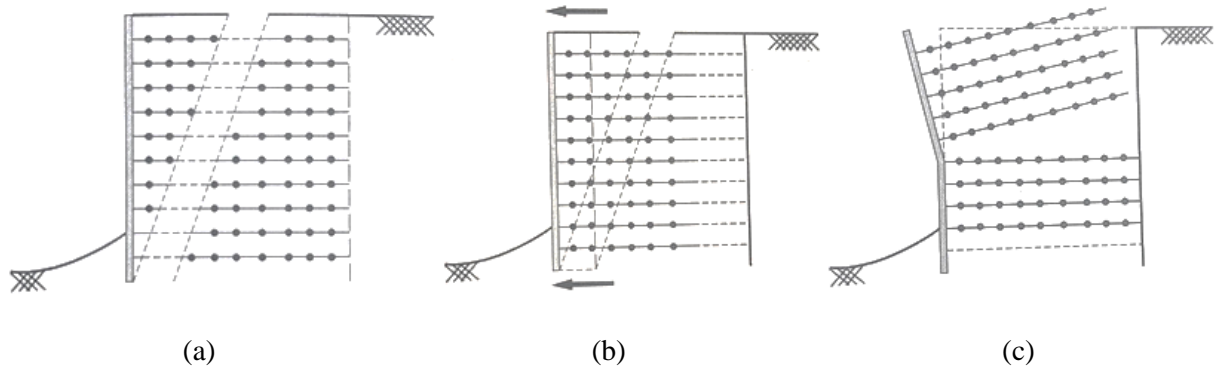


Fonte: Ehrlich e Becker (2009).

2.2.2. Estabilidade interna

Segundo Vieira (2008), a análise da estabilidade interna é o que permite quantificar qual o nível de reforço necessário para garantir a estabilidade da massa de solo. Ela considera superfícies de ruptura passando dentro do bloco de solo reforçado, levando em conta a integridade interna da estrutura e os riscos de colapso (BENJAMIM, 2006). Nesta verificação são analisadas as rupturas por tração, o arrancamento dos reforços e a instabilidade local (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Mecanismos que regem a estabilidade interna: ruptura por tração (a); arrancamento dos reforços (b) e instabilidade local (c).



Fonte: Ehrlich e Becker (2009).

Para a análise da ruptura por tração é necessário conhecer os pontos de máxima tensão de tração nos reforços. Vieira (2008) afirma que a superfície potencial de ruptura, coincide com a linha que liga os pontos nos quais se mobilizam as forças de tração máximas, $T_{m\acute{a}x}$, em cada nível do reforço. Assim, para que não haja a ruptura, é preciso que o valor desta tensão máxima de tração não supere o menor valor esperado para a resistência de projeto do geossintético, no caso a geogrelha (EHRlich; BECKER, 2009).

Em relação à resistência ao arrancamento, também é necessário conhecer a superfície potencial de ruptura, visto que à direita desta fica a zona resistente, parâmetro importante para realizar esta análise. Teixeira (2003) afirma que “para se verificar a condição de ancoragem do reforço na zona resistente (estabilidade ao arrancamento) primeiramente se avalia o empuxo horizontal de terra resistido por cada camada para então se determinar a força de arrancamento mobilizada”. Objetiva-se que haja, em um projeto, um embutimento mínimo do reforço na zona resistente para evitar o arrancamento. O valor das tensões de tração máximas não devem ser superiores à resistência ao arrancamento dos trechos ancorados dos reforços (EHRlich; BECKER, 2009).

Por fim, a instabilidade de trechos deve ser verificada, como é feito para sistemas de contenção incrementais.

2.2.3. Principais fatores que influenciam no comportamento de um MSR

2.2.3.1. Rigidez relativa solo-reforço

O comportamento de um MSR é influenciado por diversos fatores que podem ser combinados entre si. Dentre eles, pode-se citar: as condições de restrição do pé do muro, o tipo de faceamento, a inclinação e a geometria da face, o tipo de reforço.

Segundo Benjamim (2006), “o tipo de inclusão influencia na magnitude dos deslocamentos horizontais, na mobilização das forças nas inclusões e na localização da superfície de ruptura”.

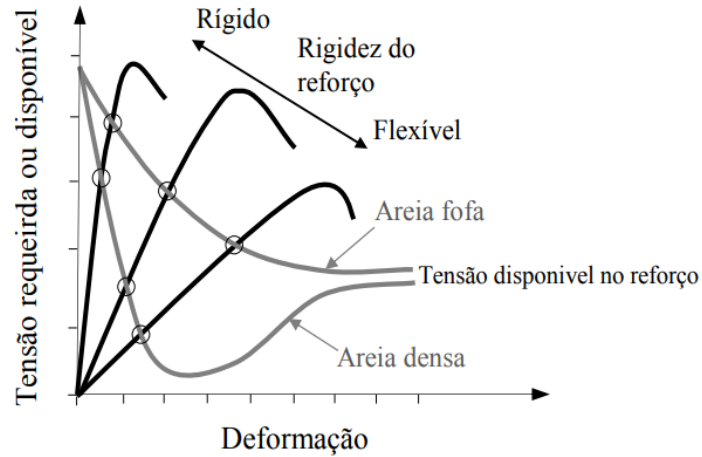
A geogrelha é um reforço classificado como extensível. Apesar de possuir menor rigidez, o que possibilita maiores deformações no solo, uma de suas vantagens é que o comprimento de ancoragem requerido para resistir aos empuxos de terra pode ser inferior ao de reforços inextensíveis. Além disso, estudos realizados por McGown *et al.* (1978) para comparar o desempenho de uma areia reforçada com geotêxtil e com elementos metálicos mostraram que o geossintético promoveu um aumento da resistência de pico, da deformação axial na ruptura e da ductilidade, porém reduziu a dilatação e a perda de resistência pós-pico. Outros experimentos realizados por Patias (2005) mostraram, ainda, uma melhor interação do solo com um reforço à base de geossintético (BENJAMIM, 2006).

Outro ponto tratado por Benjamim (2006) diz respeito à mobilização das forças de tração ao longo da altura da estrutura de contenção. Sabe-se que, quanto mais rígido o reforço, maiores serão as tensões de tração desenvolvidas.

Para um desempenho satisfatório, a estrutura deve apresentar deslocamentos que sejam suficientes para mobilizar a resistência à tração do reforço e a resistência ao cisalhamento do solo. Além disso, é essencial que os deslocamentos horizontais e recalques sejam limitados de modo que cumpram os requisitos de uso (PORTELINHA, 2012).

Deste modo, o comportamento dos diferentes tipos de solo passíveis de serem usados com reforços de rigidezes distintas pode ser relacionado em um gráfico de “Tensão requerida ou disponível x Deformação”.

Figura 2.4- Ponto de equilíbrio de deformações.



Fonte: Portelinha (2012).

Portelinha (2012) faz uma análise deste gráfico que é fundamental para o entendimento da rigidez relativa solo-reforço:

“As tensões horizontais no solo tendem a diminuir com a deformação, partindo da condição em repouso (K_o) para a condição ativa (K_a). Inicialmente nenhuma tensão é transferida no reforço até que num determinado nível de deformação do solo, em que as tensões passam a ser transferidas para o reforço e o equilíbrio se estabeleça devido à mobilização de tensões do sistema. Este equilíbrio pode ser observado pelo ponto de cruzamento das curvas de força transmitida pelo solo e a curva de tração disponível do reforço com a deformação. Este ponto é chamado de “ponto de equilíbrio de deformações”.”

Quando as inclusões apresentam rigidezes mais baixas, é necessária uma maior deformação para atingir este ponto de equilíbrio, todavia demandam-se menores tensões no solo e no reforço.

Assume-se que a deformação para o solo e para os reforços na interface entre eles será a mesma, com base na hipótese de aderência perfeita entre eles. O ponto de equilíbrio dependerá, portanto, da relação entre a rigidez de ambos, que é demonstrada por meio do índice de rigidez relativa (S_i), apresentado na Equação 1 (EHRlich; MITCHELL, 1994).

$$S_i = \frac{J_r}{K \cdot P_a \cdot S_v} \quad (1)$$

Onde J_r é o módulo de rigidez do reforço à tração; K é o módulo tangente inicial do solo do modelo constitutivo hiperbólico de Duncan; P_a é a pressão atmosférica; e S_v é o espaçamento vertical dos reforços.

Os valores de S_i variam com a rigidez do reforço, sendo que quanto mais rígido é este, maior o índice de rigidez relativa. Assim, com base no gráfico apresentado, nota-se que a escolha do solo e do reforço a serem utilizados no projeto deve ser feita concomitantemente, de modo a satisfazer as tensões e deformações buscadas.

2.2.3.2. Compactação do solo

Segundo Benjamin (2006), “a compactação é um processo manual ou mecânico que visa a redução do volume de vazios do solo, acarretando uma melhora de suas características, como resistência ao cisalhamento, permeabilidade, compressibilidade e absorção de água”. No muro de solo reforçado, este processo pode afetar diretamente nas tensões internas da estrutura e possui o objetivo de reduzir as deformações pós-construtivas.

Ehrlich e Azambuja (2003) destacam que estudos realizados por Duncan e Seed (1986) afirmam que a compactação pode ser vista como ciclos de carga e descarga, fazendo com que surjam tensões horizontais residuais no solo e podendo aumentar as tensões de tração que atuam no reforço. Todavia, isso não é um fator prejudicial ao MSR, visto que deste modo a estrutura se torna menos sensível aos carregamentos de menor tensão aos quais ela pode ser submetida após o processo de compactação. Este efeito, como afirmam Ehrlich e Becker (2009), pode ser entendido como uma espécie de sobreadensamento do solo.

Quando a tensão aplicada pelo lançamento de novas camadas ou de carregamentos adicionais for superior à gerada pela compactação, o solo começa a se tornar mais sensível, pois já não se encontra na fase de sobreadensamento, e a nova tensão horizontal que rege seu comportamento é resultado destas cargas. É importante ressaltar que as deformações laterais reduzem as tensões horizontais máximas geradas pela compactação e, por isso, estas tensões são função da rigidez do reforço (EHRlich; BECKER, 2009).

Por fim, em relação às tensões suportadas pela estrutura, é necessário que o Muro de Solo Reforçado seja dimensionado para suportar o somatório de tensões atuantes sobre ele, advindas do seu peso próprio, dos esforços construtivos (compactação) e de sobrecargas, ainda que estas cargas não atuem simultaneamente.

2.2.3.3. Combinação de elementos do muro

Mirmoradi e Ehrlich (2016) estudaram a influência da restrição do pé do MSR com a carga de tração gerada no reforço, por meio de modelos físicos. Notou-se que os valores de

carga no pé do muro cresceram quanto maior a restrição do pé. Todavia, as máximas tensões de tração, bem como os deslocamentos horizontais e verticais máximos, foram observadas quando não havia restrição de movimento.

Além disso, observou-se também que para muros com algum tipo de restrição no pé, o efeito combinado da rigidez do faceamento com a restrição do pé leva a uma redução das cargas nos reforços. Já no muro de pé livre, a influência do faceamento de blocos na redução das cargas nos reforços desaparece.

Ehrlich e Mirmoradi (2013), por sua vez, realizaram uma análise do efeito da combinação de rigidez da face com a resistência do pé, utilizando modelos numéricos construídos através do Plaxis e modelos físicos, que diferiam somente pelo tipo de faceamento. Para a realização do estudo, desprezou-se a resistência do pé do muro.

Os resultados mostraram que, embora a rigidez da face dos muros fosse diferente, os valores do somatório de $T_{m\acute{a}x}$ foram parecidos. Entretanto, esperava-se que uma face rígida reduzisse a tensão requerida ao longo dos reforços. Isto não ocorre porque, como a resistência no pé foi desprezada, os valores de somatório de $T_{m\acute{a}x}$ passaram a independender da rigidez da face. Notou-se também que os deslocamentos horizontais e verticais no muro com face autoenvelopada foram maiores para muros de face com blocos.

Mirmoradi, Ehrlich e Dieguez (2015) realizaram um estudo de dois modelos físicos de MSR com inclinações de face diferentes. Inicialmente adotou-se uma restrição total da base, que foi sendo liberada gradualmente até se tornar livre.

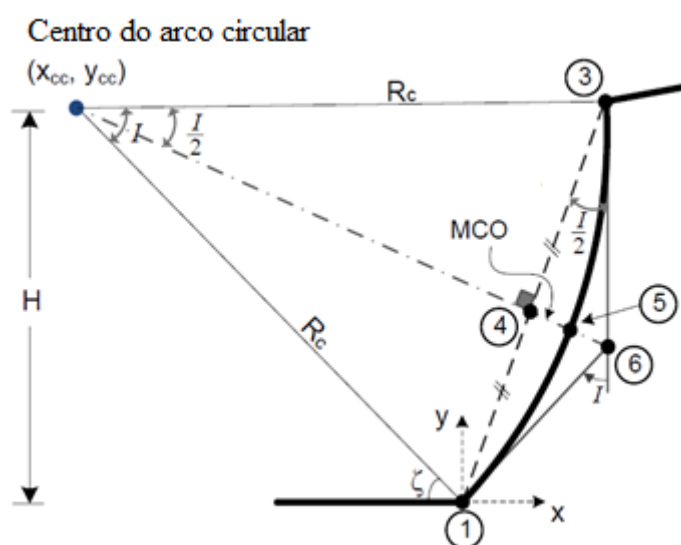
Notou-se que durante a liberação do pé, o deslocamento apresentou-se maior no muro de menor inclinação em relação à vertical. O mesmo também apresentou um maior valor de somatório de tensões nos reforços, desde o início do carregamento até o final da liberação do pé do muro. Todavia, para o muro de maior inclinação em relação à vertical, o acréscimo de tensão nos reforços após a liberação do pé foi maior, o que mostra que o efeito gerado pela restrição do pé na carga dos reforços para tal muro foi mais efetivo. O valor de carga no pé, por sua vez, foi similar para ambos os muros, o que mostra que ele independe dos valores de inclinação da face.

Com base em alguns estudos recentes que, inspirados em taludes naturais côncavos, mostraram que taludes não reforçados com perfil côncavo na seção transversal oferecem maior estabilidade e melhor resistência à erosão quando comparados a taludes planos equivalentes, Vahedifard, Shahrokhbadi e Leshchinsky (2016) realizaram uma análise de taludes côncavos a fim de quantificar a contribuição destes para a estabilidade e resistência à erosão de taludes de terra.

Baseando-se em outras análises que se embasaram na teoria do campo da linha de deslizamento e mostrando que a superfície do talude no estado de equilíbrio limite tem um perfil côncavo, os autores desenvolveram formulações para gerar essa geometria de face. Outro fator favorável a este estudo é que a flexibilidade de alguns sistemas de faceamento, como o autoenvelopamento, e os avanços nas tecnologias construtivas permitem aproveitar da alta estabilidade de perfis côncavos em estruturas de solo reforçado.

O perfil da face é idealizado por um arco circular definido por uma variável única, o Deslocamento da Corda Média (do inglês *Mid Chord Offset* – MCO). Busca-se, assim, um MCO que gere a menor tensão de tração nos reforços. O estudo utilizou como base a formulação de equilíbrio limite de log espiral, buscando mostrar o impacto da geometria da face na estabilidade e na resistência à tração requerida nos reforços de um MSR. Os autores desenvolveram formulações capazes de fornecer tanto o valor máximo de MCO de acordo com as especificações de projeto, quanto os demais parâmetros necessários para encontrar as coordenadas da face côncava do muro (FIGURA 2.5 e EQUAÇÕES 2 a 5).

Figura 2.5 - Idealização do perfil côncavo com curvatura controlada pelo MCO.



Fonte: Adaptado de Vahedifard, Shahrokhbabadi e Leshchinsky (2016).

Em um estado limite, assume-se que a força do solo é totalmente mobilizada ao longo da superfície de ruptura e a estabilidade do sistema então depende dos reforços. Assume-se também que a tensão máxima de cada camada age horizontalmente e ocorre na interseção com a superfície de falha crítica (VAHEDIFARD; SHAHROKHABADI; LESHCHINSKY, 2016).

O MCO indicado no desenho seria a flecha do meio do arco que gera a concavidade e pode ser obtido por meio da Equação 2.

$$0 \leq MCO \leq \sqrt{1 + \left(\left(\frac{H}{2} - 1 \right) \cdot \cot \omega + \frac{1}{2} H \cdot \tan \omega \right)^2} - \frac{1}{2} \sqrt{(H - 2)^2 \cdot (\csc \omega)^2} \quad (2)$$

Onde:

MCO = deslocamento da corda média;

H = altura do muro;

ω = inclinação do muro de face reta em relação a um eixo vertical perpendicular ao pé do muro.

Outro parâmetro importante é o raio, R_c , e o ângulo, I , ambos referentes ao arco e definidos pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

$$R_c = \frac{H^2}{8MCO} \cdot (1 + (\tan \omega)^2) + \frac{MCO}{2} \quad (3)$$

$$I = 4 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot MCO \cdot \cos \omega}{H} \right) \quad (4)$$

Por fim, a Equação 5 viabiliza o cálculo do ângulo ξ , sendo este o ângulo de rotação entre o pé do muro e o centro do arco, considerando como referência o plano horizontal.

$$\xi = \omega + \frac{I}{2} \quad (5)$$

Os resultados gerados pelo estudo através de uma análise paramétrica provam que taludes côncavos oferecem maior estabilidade, gerando menores tensões nas camadas de reforços, o que pode levar a modelos mais econômicos diminuindo a resistência à tração requerida e/ou o volume de aterro. Entretanto, não foram testados modelos físicos com essa geometria de face, assim como também não foram feitas simulações com valores específicos para cada parâmetro, variando apenas a geometria da face, a fim de fazer comparações. Deste modo, este trabalho busca realizar, por meio do Plaxis, modelagens numéricas que permitam analisar o comportamento dos diferentes muros e compará-los quanto aos deslocamentos laterais, aos recalques e ao somatório de tensões geradas nos reforços.

2.3. Softwares e geotecnia

Os métodos numéricos têm sido largamente utilizados no campo da engenharia, pois permitem “simular a interação entre o solo e o reforço, diferentes condições fronteira, diferentes configurações e características dos reforços e diferentes métodos construtivos”

(VIEIRA, 2008). Na modelagem numérica é possível definir os parâmetros supracitados que influenciam no comportamento de um Muro de Solo Reforçado, além das condições de contorno que o regem, tornando a simulação de sua estrutura mais fidedigna.

No Método dos Elementos Finitos (MEF), um dos métodos numéricos mais utilizados na geotecnia, a partir da determinação dos princípios físicos e das variáveis que definem o problema, é possível gerar um modelo matemático que é resolvido através da discretização da estrutura gerando uma malha e equações algébricas para um número finito de pontos. Quanto maior o refinamento da malha, mais precisa é a solução fornecida. Caso tal solução não seja satisfatória, seus parâmetros devem ser refinados até que se alcance a precisão desejada. É importante ressaltar que o MEF apenas resolve os problemas com base nos dados de entrada que o usuário fornece, demandando, assim, uma escolha apropriada do modelo matemático para gerar resultados confiáveis (TEIXEIRA, 2006).

Neste trabalho, foi utilizado o *software* Plaxis como ferramenta para a aplicação de tais métodos numéricos e consequente simulação de Muros de Solo Reforçado com Geogrelhas. Teixeira (2006) define este programa como “um pacote de elementos finitos de análise bidimensional de deformações e estabilidade em engenharia geotécnica”. Mais detalhes sobre a metodologia aplicada para a utilização do *software* na realização do trabalho serão vistos no capítulo seguinte.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Com base na proposta do Muro de Solo Reforçado de face côncava feita por Vahedifard, Shahrokhhabadi e Leshchinsky (2016), neste trabalho buscou-se um aprofundamento no estudo da geometria da face destas estruturas de contenção.

Assim, foram construídos muros com três faceamentos distintos, a fim de realizar as análises comparativas.

3.1. Geometria

MURO A

Este muro é de faceamento convencional, ou seja, ainda que sua face seja inclinada, sua geometria é reta. Para este trabalho, assumiu-se uma inclinação de 10%, o que fornece um ângulo de $\omega = 5,71^\circ$ desde a face da estrutura até o eixo vertical. Além disso, adotou-se 6 m como sendo a altura do muro a ser estudado, estes que foram divididos em 30 camadas de 20 cm cada.

Figura 3.1 - Geometria do Muro A.



Fonte: Da autora (2019).

MURO B

Este muro é de face côncava e, analogamente ao Muro A, assumiu-se um muro com 6 m de altura e 10% de inclinação. Logo, $H=6$ m e $\omega = 5,71^\circ$. Deste modo, com as formulações de Vahedifard, Shahrokhhabadi e Leshchinsky (2016), os parâmetros a seguir foram calculados para o Muro B:

Tabela 3.1 - Parâmetros necessários para a construção da face côncava.

Parâmetro	Resultado
MCO (m)	0,2248
Rc (m)	20,3267
I (°)	17,06
ξ (°)	14,24

Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.2 - Geometria do Muro B.



Fonte: Da autora (2019).

MURO C

A partir da altura de 4,6 m, a formulação de face côncava gera um talude negativo, o que fornece uma região de instabilidade para a estrutura. Deste modo, viu-se a necessidade de desenvolver uma nova geometria que sanasse este problema. Assim, o muro de face mista apresenta até 4,6 m uma concavidade igual à do Muro B e, a partir deste ponto, a face torna-se reta com a mesma inclinação de 10% até a altura final de 6 m.

Figura 3.3 - Geometria do Muro C.



Fonte: Da autora (2019).

3.2. Parâmetros geotécnicos

Para a validação do modelo numérico no Plaxis e posterior estudo paramétrico, foram utilizados, para os Muros A, B e C, os parâmetros geotécnicos de Ehrlich e Mirmoradi (2013), apresentados na Tabela 3.2. Os autores utilizaram como referência resultados de modelos físicos de MSR construídos e ensaiados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, amplamente monitorados e instrumentados.

Por se tratar de uma areia, para a realização destas simulações, o modelo constitutivo utilizado foi o *Hardening Soil*, que representa um modelo de solo hiperbólico muito similar ao proposto por Duncan e Chang (1970). O autor afirma ainda que “a característica básica deste modelo é a variação da rigidez do solo com o estado de tensão”, na Tabela 3.1 representada pelos parâmetros E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} e E_{ur}^{ref} .

Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados no projeto.

Propriedade	Valor
Solo	
Ângulo de atrito, ϕ (°)	50,0
Coesão, c (kPa)	1,0
Ângulo de dilatância, ψ (°)	0,0
Peso específico, γ (kN/m ³)	21
Módulo de rigidez no carregamento, E_{50}^{ref} (kPa)	42500
Módulo de rigidez oedométrico, E_{oed}^{ref} (kPa)	31800
Módulo de rigidez no carregamento/descarregamento, E_{ur}^{ref} (kPa)	127500
Parâmetro que controla a variação da rigidez com o estado de tensão, m	0,5
Coefficiente de ruptura, R_f	0,7
Coefficiente de Poisson, ν	0,25
Reforço	
Rigidez axial elástica (kN/m)	600
Face autoenvelopada (elemento placa)	
Rigidez axial elástica (kN/m)	60
Rigidez à flexão elástica (kN.m ² /m)	1,0

Fonte: Ehrlich e Mirmoradi (2013).

3.3. Validação do modelo numérico

Foi realizada uma validação do modelo numérico, de forma a determinar se os parâmetros numéricos, de malha e os métodos construtivos do muro correspondiam àqueles utilizados por Ehrlich e Mirmoradi (2013). Reproduzindo todas as características geométricas e geotécnicas utilizadas no artigo, primeiramente variou-se o número de nós dos elementos da malha (15 nós ou 6 nós) e, em seguida, o refinamento da malha (fina, média e grosseira).

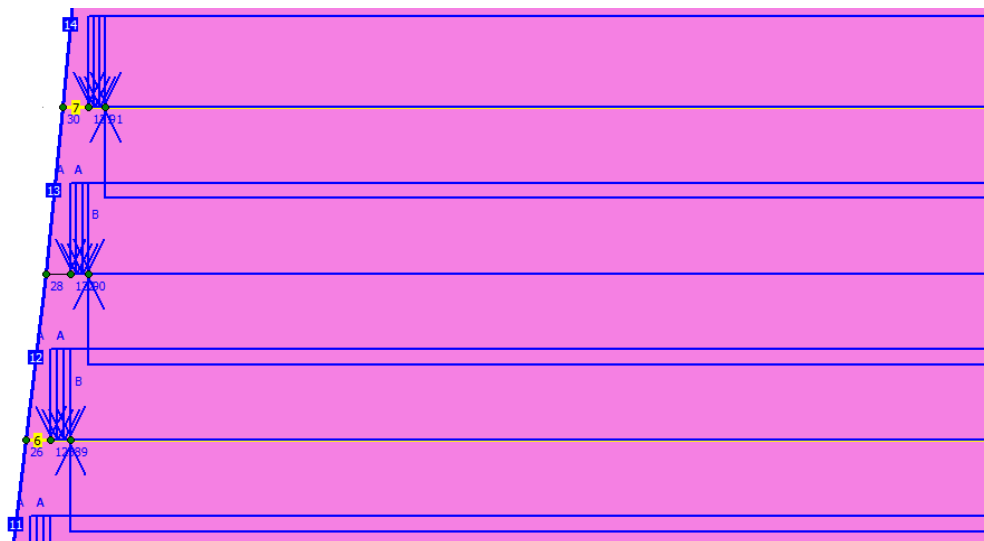
O modelo que melhor correspondeu aos resultados esperados tinha refinamento médio de malha e elementos configurados com 15 nós.

3.4. Métodos construtivos

O processo inicial de construção se deu por definir as camadas de solo no programa por meio da função estrutura de solo (*soil structure*). Em seguida, atribuiu-se o material do solo de enchimento a cada uma das 30 camadas do muro. Após, foram dispostas as geogrelhas (*geogrids*) com 450 cm de comprimento a cada 40 cm de altura, partindo diretamente do faceamento. Por fim, para modelar o faceamento em face autoenvelopada, utilizou-se o elemento placa (*plate*), uma vez que o elemento geogrelha funciona somente à tração e a face é solicitada à flexão.

Foi aplicada uma carga de compactação de 63 kPa, do Tipo II, onde se aplica uma carga distribuída de igual módulo na direção vertical nos sentidos debaixo para cima e de cima para baixo que melhor representa numericamente o comportamento real do solo compactado (MIRMORADI; EHRLICH, 2013).

Figura 3.4 - Detalhe do processo de compactação.

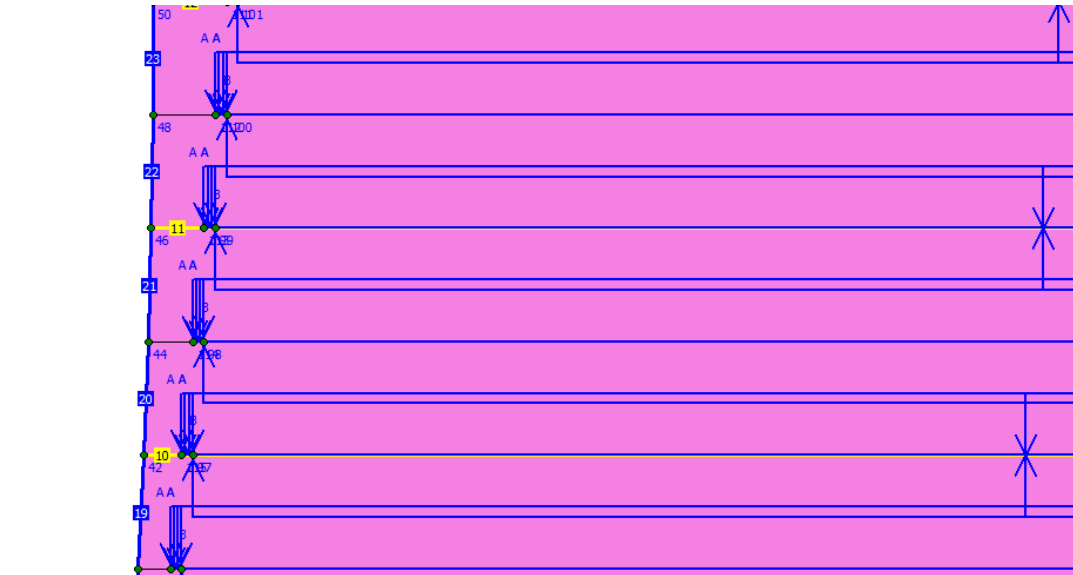


Fonte: Da autora (2019).

Para a aplicação da compactação nas camadas do muro, a carga que atua de cima para baixo foi afastada 3 cm da face e seu início teve que coincidir exatamente com o início da carga atuante na direção contrária, para que não houvesse resultante em nenhum sentido e geração de momento no modelo. Além disso, deve-se destacar que, para o muro B, a partir do momento em que sua inclinação começou a gerar um talude negativo, o afastamento da carga em relação à face precisou ser aumentado para que não ocorresse a ruptura local da face ao compactar o solo. Assim, para estabelecer um padrão para tais muros, determinou-se que a carga atuando de baixo para cima nos pontos de inclinação negativa teria distância de 2 cm daquela atuante na mesma interface, porém em sentido oposto. No muro C, onde a face deixa

de ser côncava, as cargas de compactação voltam a serem aplicadas a 3 cm desta, de modo análogo ao muro de face reta.

Figura 3.5 - Detalhe do processo de compactação para trechos de talude negativo.

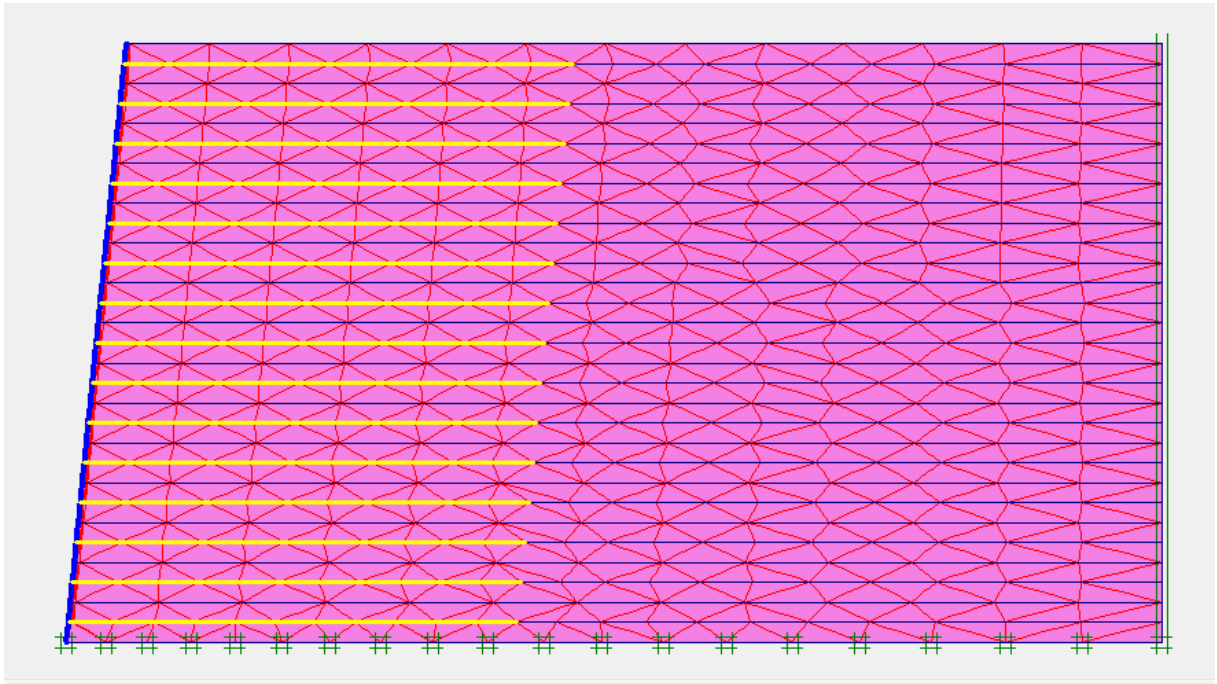


Fonte: Da autora (2019).

Para a construção do muro no Plaxis, os elementos foram sendo lançados camada por camada. Para as camadas sem reforço, criava-se uma fase na qual era feita o lançamento do solo e do elemento da face. Em seguida, uma fase de compactação era criada e as cargas de 63 kPa eram ativadas, tanto no sentido descendente quanto no ascendente. Em seguida, construía-se camada seguinte, na qual era lançado, além do solo e do faceamento, o elemento de reforço (geogrelha). Uma nova fase de compactação era criada para compactar esta camada contendo o reforço. Este processo foi sendo repetido sucessivamente até que a construção dos 6m de muro fosse concluída, com todas as camadas devidamente compactadas. Ao final deste processo, foram criadas fases para a aplicação das sobrecargas de 20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 80 kPa e 100 kPa.

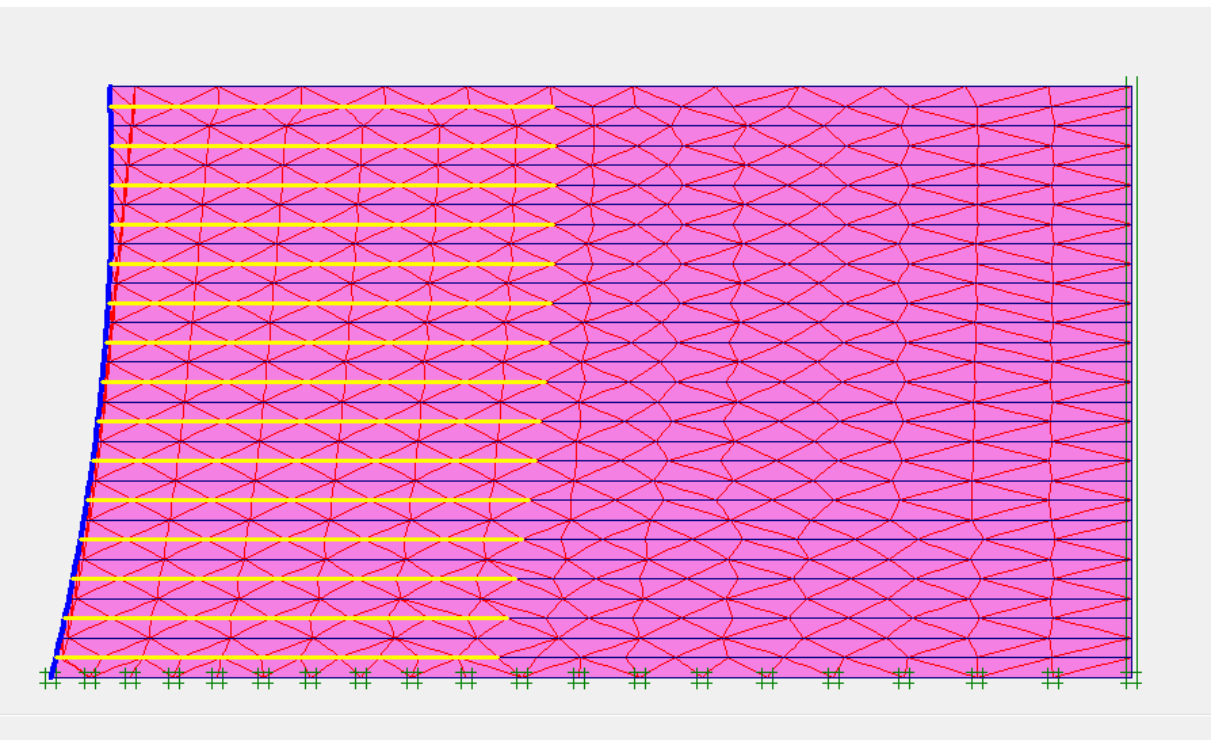
As Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 mostram um exemplo dos muros A, B e C, respectivamente, ao final da construção, após a geração da malha.

Figura 3.6 - Malha do Muro A ao final da construção.



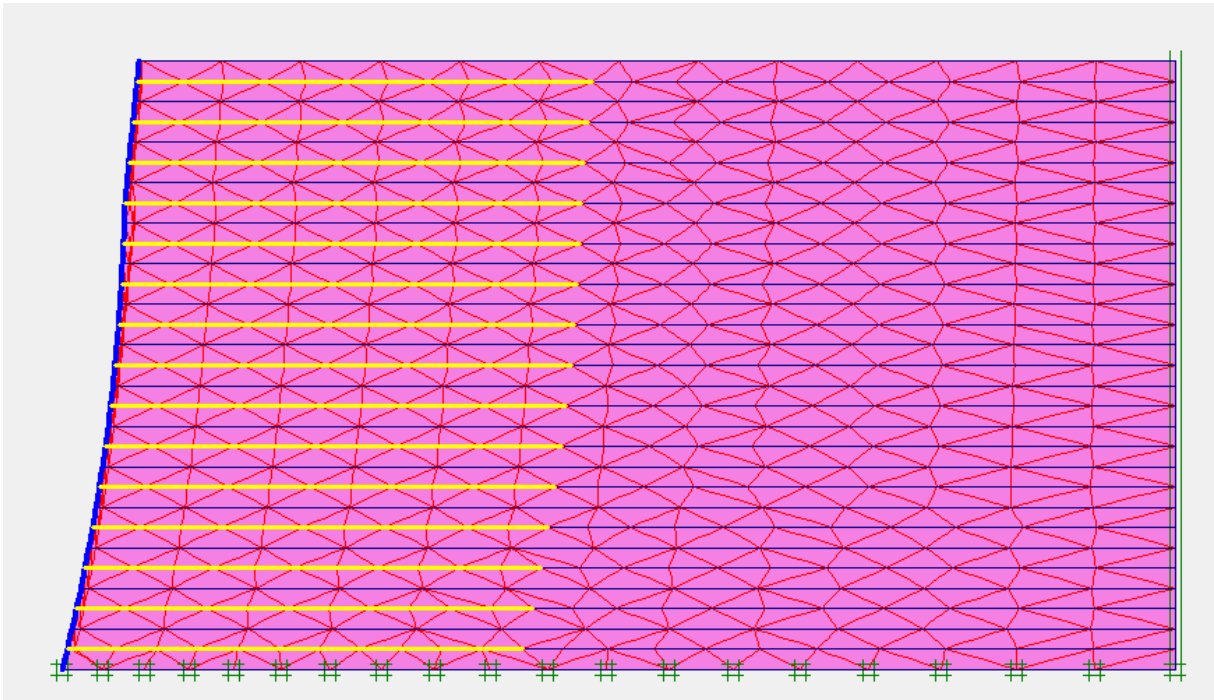
Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.7 - Malha do Muro B ao final da construção.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.8 - Malha do Muro C ao final da construção.

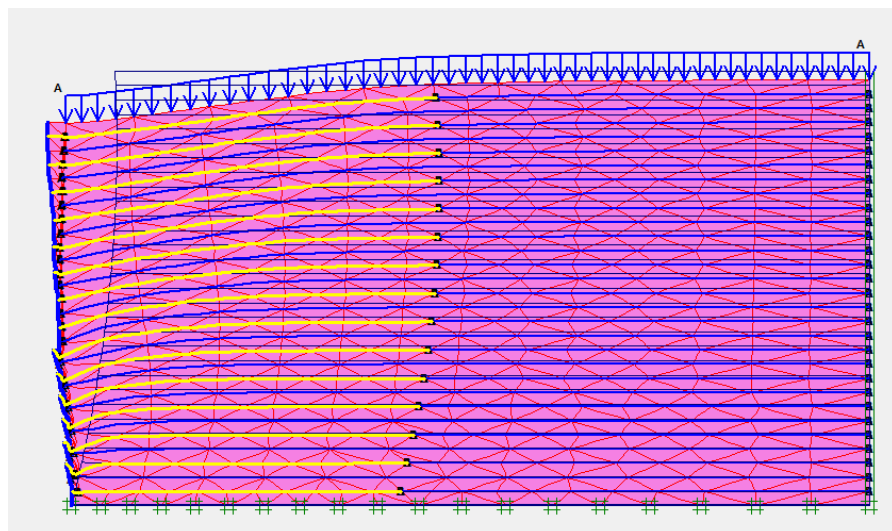


Fonte: Da autora (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

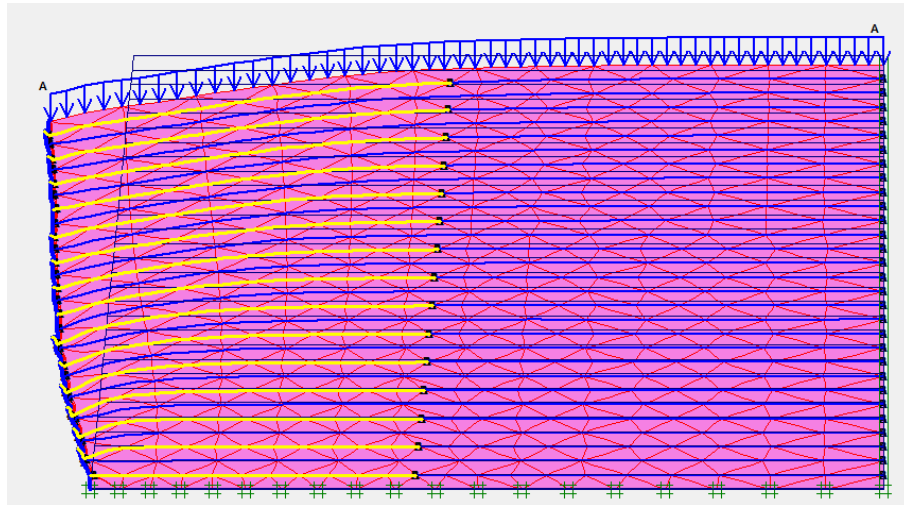
Após o término da construção e do carregamento de cada um dos três muros a serem analisados, iniciou-se o processo de coleta dos resultados. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram a deformação sofrida pelos muros A, B e C quando solicitados por uma carga de 100 kPa, em escala ampliada para promover uma melhor visualização do efeito provocado pela sobrecarga.

Figura 4.1 - Deformação do Muro A provocada por uma sobrecarga de 100 kPa.



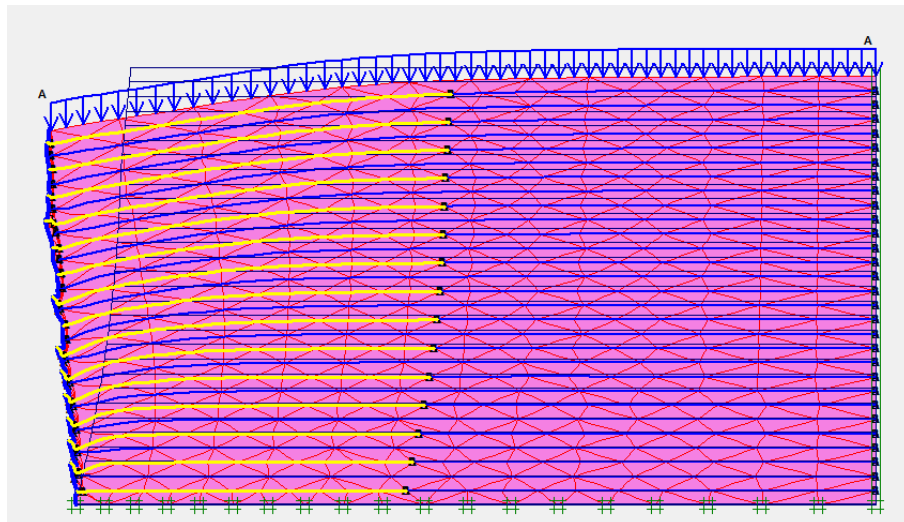
Fonte: Da autora (2019).

Figura 4.2 - Deformação do Muro B provocada por uma sobrecarga de 100 kPa.



Fonte: Da autora (2019).

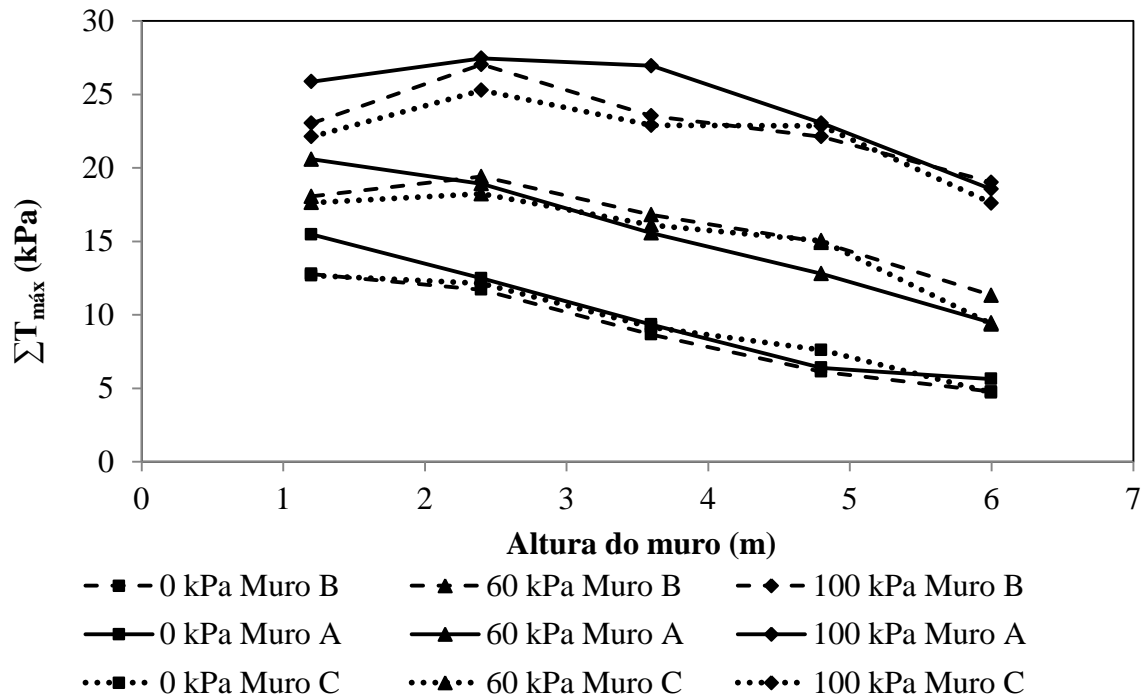
Figura 4.3 - Deformação do Muro C provocada por uma sobrecarga de 100 kPa.



Fonte: Da autora (2019).

4.1. Tensões de tração nos reforços

Para a construção do Gráfico 4.1, foi feito o somatório de tensões de 3 em 3 reforços, ou seja, a cada 1,2 m, para observar o comportamento de tais tensões ao longo da altura do muro. Para um melhor entendimento do gráfico, foram escolhidas as sobrecargas de 0 kPa, 60 kPa e 100 kPa para serem representadas para cada um dos três muros.

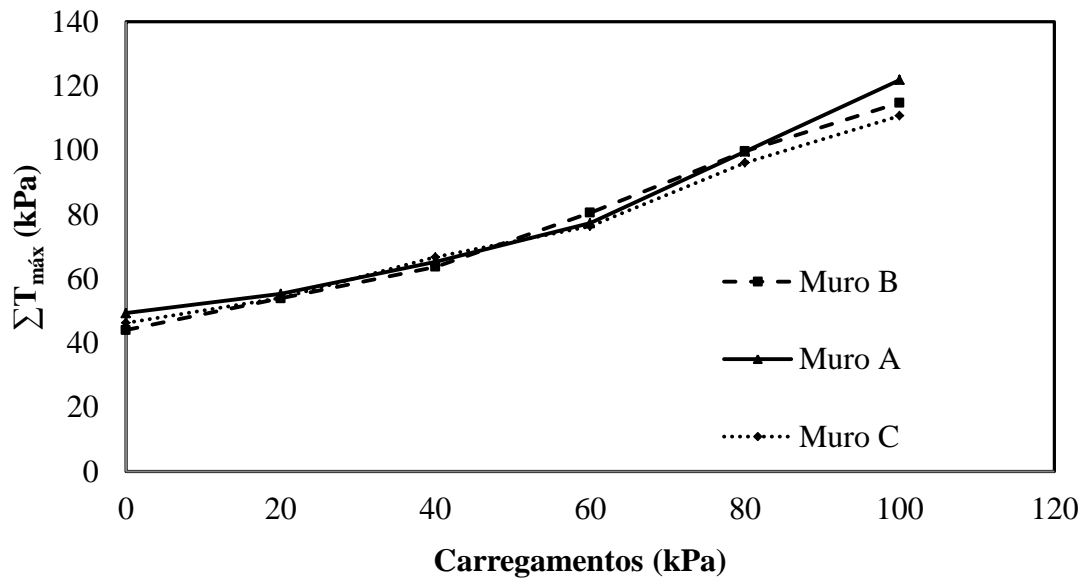
Gráfico 4.1 - $\Sigma T_{\text{máx}}$ x Altura do muro.

Fonte: Da autora (2019).

De modo geral, nota-se que houve um decréscimo de tensões de tração nos reforços à medida que a altura aumentava, sendo a menor tensão observada em 6 m, para os diferentes tipos de face e para os três carregamentos em estudo.

Além disso, é possível notar ao observar o Gráfico 4.1 que o Muro B, quando comparado ao Muro A, apresentou tensões de tração mais elevadas para maiores alturas. Isso porque a concavidade da face nas camadas finais do muro gerou um talude negativo na parte superior, que está sujeito a maiores efeitos de instabilidade. É possível perceber que, no MURO C, as tensões de tração na parte superior do muro foram reduzidas significativamente, apresentando o melhor comportamento na altura de 6 m para os três carregamentos representados.

Para uma análise do comportamento geral dos muros de diferentes faces, tem-se o Gráfico 4.2 do somatório total de tensões nos reforços ao longo de todo o muro e para todas as sobrecargas aplicadas, possibilitando uma visão mais ampla dos resultados. Este gráfico fornece dados importantes para realizar o comparativo com o trabalho realizado por Vahedifard, Shahrokhadi e Leshchinsky (2016).

Gráfico 4.2 - $\Sigma T_{\text{máx}}$ x Carregamentos.

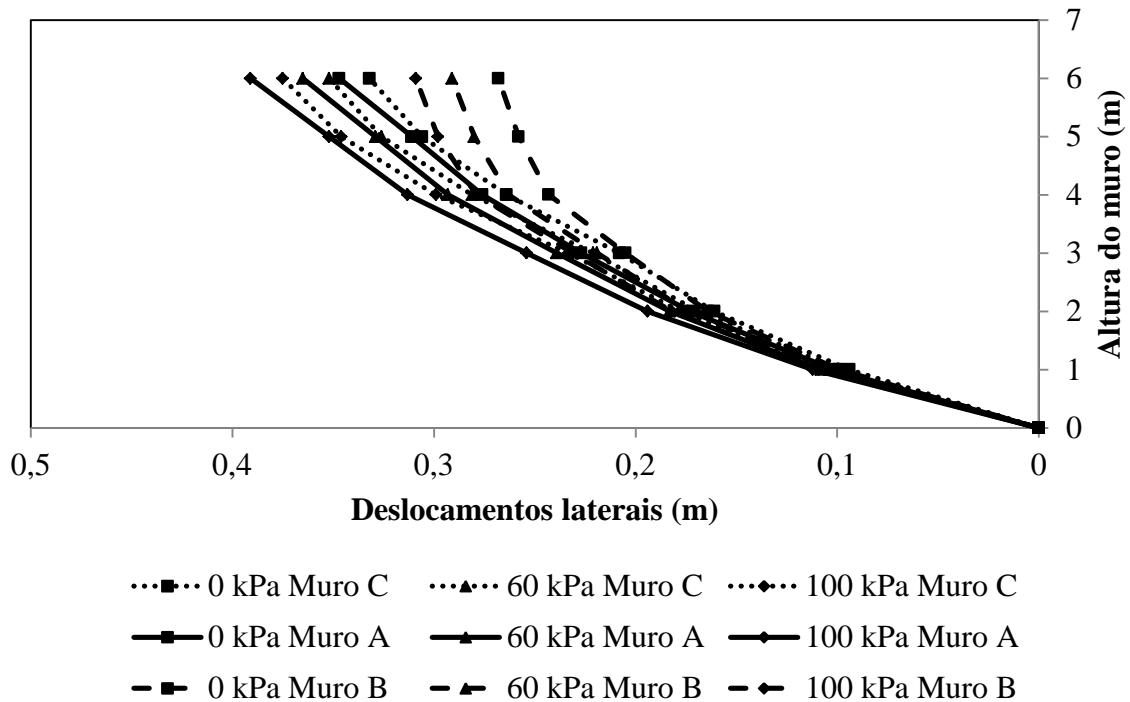
Fonte: Da autora (2019).

O Gráfico 4.2 confirma estas observações feitas, pois ainda que, de maneira geral, o Muro B tenha apresentado menor somatório total de tensões nos reforços que o Muro A, os menores valores obtidos foram, na verdade, para o Muro C.

4.2. Deslocamentos laterais

Os valores de deslocamento lateral foram retirados a cada metro vertical na face dos muros estudados. Assim, pode-se obter um gráfico de perfil de deslocamento. Para uma melhor visualização dos deslocamentos, inverteu-se o eixo do gráfico, de modo que as curvas de deslocamento se apresentam concordantes com as deformações sofridas pela face.

Gráfico 4.3 - Altura do muro x Deslocamentos laterais.



Fonte: Da autora (2019).

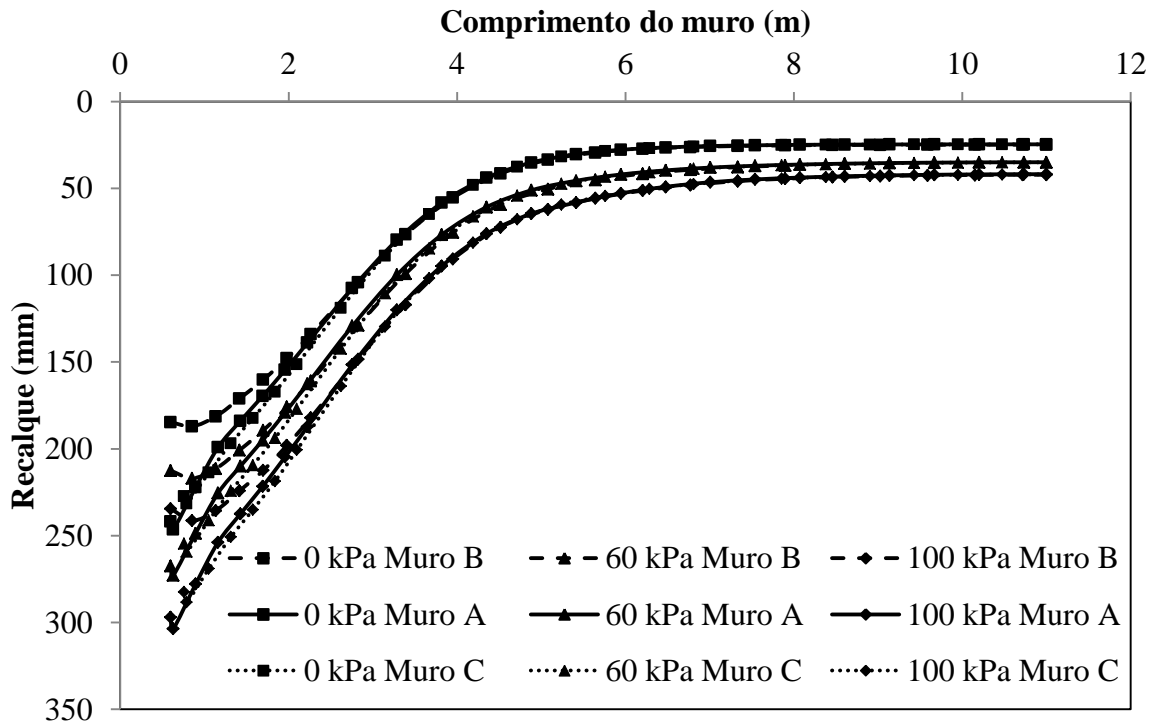
Realizando uma análise do Gráfico 4.3, é possível perceber que para os Muros A, B e C, à medida que ocorreu o aumento da altura, aumentaram também os deslocamentos laterais, sendo que nas primeiras camadas dos muros estes se apresentavam muito similares, independente do tipo de faceamento. Além disso, nota-se que o Muro A foi o que mais se deslocou para os três carregamentos diferentes, o que está em concordância com o fato de que ele apresentou maiores tensões.

Em contrapartida, ao estudo realizado para as tensões de tração, neste caso observou-se um melhor comportamento para o Muro B, este que apresentou deslocamentos consideravelmente menores no ponto crítico de análise (6 m). O Muro C mostrou-se mais eficaz que o Muro A, visto que seus deslocamentos foram menores para os três carregamentos.

4.3. Recalques

Os valores foram obtidos em uma seção na superfície do topo de cada um dos muros. Do mesmo modo que o gráfico de deslocamentos laterais, o Gráfico 4.4 foi feito em concordância com a realidade e, por isso, apresenta inversão de eixos.

Gráfico 4.4 - Recalque x Comprimento do muro.



Fonte: Da autora (2019).

Deve-se, primeiramente, ressaltar que somente foram notadas diferenças maiores nos valores dos recalques nos primeiros 2 m de comprimento a partir da face dos muros. É possível perceber também que os valores de recalque para os diferentes muros foram praticamente idênticos. Observa-se um comportamento similar das curvas de recalque para os três tipos de carregamento, a partir de 2 m. Ainda que para maiores cargas o recalque tenha sido maior, os valores de deslocamento vertical a partir deste ponto seguem uma tendência.

Analogamente à situação observada no Gráfico 4.4, para os valores de recalque anteriores a 2 m de comprimento o Muro B também apresentou melhor desempenho. Isso porque, antes de unir-se às curvas dos demais muros para comprimentos maiores, ele apresentou recalques muito menores quando comparados aos observados nos Muros A e C. Outro ponto importante de ser destacado é que, para esta análise, os Muros A e C apresentaram um comportamento muito similar, sendo que suas curvas coincidiram em grande parte do gráfico apresentado.

Analisando o Gráfico 4.4, é possível notar que esta diferença nos primeiros dois metros deve-se a uma desestabilidade local relativa à face do muro. Esta informação é confirmada ao realizar uma comparação com o Gráfico 4.3, o qual mostra diferentes deslocamentos laterais ao longo da face provocados por tal falta de estabilidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

A partir do estudo realizado neste trabalho, algumas considerações devem ser feitas. Primeiramente, em relação ao MURO A, nota-se que o mesmo seria a pior solução diante de todas as situações. Isso porque, de modo geral, apresentou maiores tensões de tração nos reforços, tanto em relação à altura do muro quanto às diferentes sobrecargas aplicadas. Além disso, os valores de deslocamentos laterais observados para este caso apresentaram-se elevados quando comparados aos demais muros, enquanto o recalque, ainda que similar ao do MURO C, foi muito superior ao do MURO B. Tais observações são condizentes com a proposta de Vahedifard, Shahrokhbabadi e Leshchinsky (2016), que já previa menor estabilidade para esta geometria de face.

O MURO B, por sua vez, mostrou um bom comportamento quanto às tensões de tração desenvolvidas na geogrelha, mesmo que o MURO C tenha apresentado tensões ainda mais baixas. É importante notar que as maiores tensões foram observadas na parte mais alta do muro, problema que buscou ser corrigido com a proposta de geometria de muro da autora. Analisando as deformações laterais e os recalques, nota-se que o MURO B foi a opção mais eficaz, fornecendo valores muito menores que os demais, resultados estes que se mostraram relevantes, já que os deslocamentos horizontais e verticais são gerados pela instabilidade na face, que pode comprometer a estabilidade interna do muro, levando-o à ruptura.

Por fim, em relação ao MURO C, percebe-se que as tensões de tração geradas na geogrelha foram muito inferiores quando comparadas às dos outros dois muros, sendo assim o muro mais vantajoso nesse aspecto. Deste modo, o problema das altas tensões no topo do muro foi solucionado. Já nos deslocamentos laterais, o MURO C apresentou comportamento intermediário, sendo melhor que o MURO A e pior que o MURO B. Por último, para os recalques, os valores proporcionados pela simulação foram quase iguais aos do MURO A e superiores ao do MURO B.

Diante destas considerações, nota-se que os muros mais eficazes de acordo com os parâmetros estabelecidos neste trabalho e com as análises de tensões de tração, deslocamentos laterais e recalques foram os muros B e C. É necessário ressaltar que, ainda que o MURO C tenha resolvido o problema das altas tensões de tração para grandes alturas, para as demais análises ele não foi vantajoso em relação ao MURO B. Assim, seu uso somente seria viável caso o principal objetivo fosse a redução de tais tensões, não necessitando de grandes

mudanças nos parâmetros de deslocamentos horizontais e verticais quando comparado ao MURO A.

De modo geral, o MURO B seria a opção ideal de construção devido aos seus bons resultados em relação a todas as análises realizadas, validando, portanto, o comportamento previsto por Vahedifard, Shahrokhbadi e Leshchinsky (2016).

5.2. Sugestão de pesquisas futuras

Realizar a mesma análise, porém variando os seguintes parâmetros:

- (i) Altura do muro;
- (ii) Tipo de faceamento;
- (iii) Inclinação;
- (iv) Restrição do pé.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATHURST, R. J. **Classificação dos geossintéticos**. Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), disponibilizado pela Associação Brasileira de Geossintéticos (IGS BRASIL), traduzido por MENDES, M. J. A. Disponível em: < <http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/1.pdf>> . Acesso em: 15 de out. 2019.

BENJAMIM, C. V. dos S. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil**. 2006. 147 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CASAGRANDE, M. dal T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

EHRlich, M. **Análise de Muros e Taludes de Solos Reforçados**. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. Rio de Janeiro. 70 – 84. 1999. Anais.

EHRlich, M.; AZAMBUJA, E. **Muros de Solo Reforçado**. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. Porto Alegre. 81 – 100. 2003. Anais.

EHRlich, M.; BECKER, L. **Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 126 p.

EHRlich, M.; MIRMORADI, S. H. **Evaluation of the effects of facing stiffness and toe resistance on the behavior of GRS walls**. Geotextiles And Geomembranes. Rio de Janeiro, p. 28-36. 13 jul. 2013.

EHRlich, M.; MITCHELL, J. K.. **Working Stress Design Method for Reinforced Soil Walls**. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 120, No. 4, p. 625-645. abr. 1994.

McGOWN, A; ANDRAWES, K. Z.; AL-HAZANI, M.M. **Effect of inclusion properties on the behaviour of sand**. Geotechnique, v.28, n.3, p.327-347. 1978.

MIRMORADI, S. H.; EHRlich, M.. **Evaluation of the effect of toe restraint on GRS walls**. Transportation Geotechnics. Rio de Janeiro, p. 35-44. 3 mar. 2016.

MIRMORADI, S. H.; EHRlich, M.; DIEGUEZ, C. **Evaluation of the combined effect of toe resistance and facing inclination on the behavior of GRS walls**. Geotextiles And Geomembranes. Rio de Janeiro, p. 287-294. 26 dez. 2015.

OHORI, R. K. **Estudo da utilização de muros SRW ou muros de segmentado de concreto: aspectos construtivos**. 2005. 15 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de São Francisco, Itatiba, 2005.

PALACIOS, M. A. P. **Comportamento de uma areia reforçada com fibras de polipropileno submetida a ensaios triaxiais de extensão**. 2012. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 368 p.

PATIAS, J. **Avaliação do uso de solos não convencionais em estruturas de solo reforçado**. 2005. 129 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PORTELINHA, F. H. M.. **Avaliação experimental da influência do avanço do umedecimento no comportamento de muros de solos finos reforçados com geotêxteis não tecidos**. 2012. 149 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SANTOS, E.C. G. dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TEIXEIRA, C. F. **Análise numérica de ensaios em solo reforçado com geogrelha**. 2006. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

TEIXEIRA, S. H. C. **Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados**. 2003. 109 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

VAHEDIFARD, F.; SHAHROKHABADI, S.; LESHCHINSKY, D. **Geosynthetic-reinforced soil structures with concave facing profile**. Geotextiles And Geomembranes. Rio de Janeiro, p. 358-365. 8 fev. 2016.

VIEIRA, C. F. da S. **Muros e taludes de solo reforçado com geossintéticos: comportamento sísmico e metodologias de dimensionamento**. 2008. 288 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.