



geo|soluções

a Strata Company

Uso de geocélulas em obras de engenharia

Manual para obras de canalização,
sistemas de contenção, proteção de taludes,
controle de erosão e reforço de pavimentos



www.geosolucoes.com

Uso de geocélulas em obras de engenharia



Índice

1. Conceito	7
2. Propriedades técnicas	10
3. Aplicação de proteção e controle de erosão	10
3.1. Introdução	10
3.2. Características dos materiais de preenchimento utilizados nas aplicações de proteção e controle de erosão	11
3.3. Principais aplicações da geocélula strataweb na proteção e controle de erosão	13
3.4. Escolha do material de preenchimento	13
3.5. Geotêxtil	13
4. Geocélulas em revestimento de canais	14
4.1. Introdução	14
4.2. Preenchimento das células com solo e vegetação	15
4.3. Preenchimento das células com material granular	15
4.4. Preenchimento das células com concreto	15
4.5. Altura das células	16
4.6. Ancoragem	17
4.7. Canaleta de ancoragem	19
4.8. Grampos de ancoragem dos painéis da geocélula	19
4.9. Grampos de união de painéis da geocélula	19
4.10. Cabos e grampos de ancoragem	20
4.11. Método de ancoragem	20
4.12. Instalação da geocélula strataweb usando cabos de ancoragem	21
4.13. Sequência executiva	24
4.14. Dimensionamento hidráulico	26
4.14.1. Dados necessários	26
4.14.2. Conceitos utilizados	26
4.14.3. Geocélula strataweb preenchida com solo e vegetação	29
4.14.4. Geocélula strataweb preenchida com material granular	30
4.14.5. Geocélula strataweb preenchida com concreto	32
4.15. Composição de custos da geocélula strataweb	33
4.16. Comparação de custo da geocélula strataweb com outras soluções usuais	33
4.16.1. Comparação de custo entre strataweb preenchida com brita e gabião colchão (colchão reno)	34
4.16.2. Comparação de custo entre strataweb preenchida com concreto e revestimento de concreto armado	37
5. Geocélulas no revestimento e proteção de taludes	39
5.1. Introdução	39
5.2. Escolha do material de preenchimento, altura, ancoragem e instalação da geocélula strataweb	40

Geogrupo Engenharia Geotecnia Ambiental Ltda.

Rua Simão Álvares, 912 - Pinheiros
São Paulo – SP - 05417-020 – Brasil
Tel: (11) 3803.9509
contato@geosolucoes.com
www.geosolucoes.com

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e que não se destine a qualquer fim comercial e sendo preservado o conteúdo original.

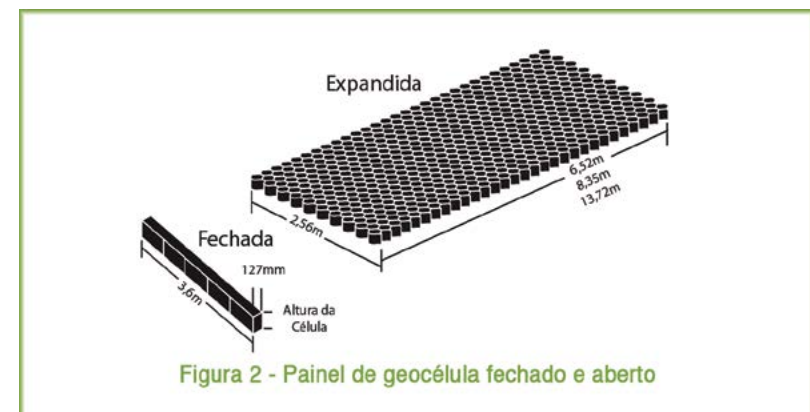
5.3. Dimensionamento da geocélula strataweb para revestimento e proteção de taludes	41
5.3.1. Verificação da estabilidade ao longo do talude (bloco central)	41
5.3.2. Verificação da estabilidade na crista do talude	42
5.3.3. Verificação da estabilidade da ancoragem do bloco abcd na crista do talude	44
5.3.4. Verificação da estabilidade no pé do talude	45
5.3.5. Verificação da estabilidade do solo de cobertura	46
5.3.6. Resumo do procedimento de dimensionamento	47
5.4. Composição de custos	48
6. Estruturas de contenção com geocélulas	49
6.1. Introdução	49
6.2. Conceito e aplicações	49
6.3. Contenções com geocélula strataweb	51
6.4. Dimensionamento	52
6.4.1. Estabilidade externa	52
6.4.2. Estabilidade interna	54
6.5. Sequência executiva	55
6.5.1. Verificação prévia	55
6.5.2. Preparação do local e da superfície de apoio	55
6.5.3. Instalação da base do muro de contenção	56
6.5.4. Instalação do sistema de drenagem	57
6.5.5. Proteção da escavação e drenagem	57
6.5.6. Instalação dos painéis da geocélula strataweb	57
6.5.7. Instalação dos geossintéticos para reforço (quando especificado no projeto)	58
6.6. Vantagens econômicas das estruturas de contenção com geocélula strataweb	59
6.7. Vantagens estéticas das estruturas de contenção com geocélula strataweb	60
7. Suporte de carga	60
7.1. Introdução	60
7.2. Solução com geocélula strataweb em aplicações de estabilização/suporte de carga	60
7.3. Principais aplicações	61
7.3.1. Reforço de base e sub-base	61
7.3.2. Reforço de pavimentos	61
7.4. Fatores que influem no reforço de solo com geocélula	63
7.4.1. Fatores do reforço de geocélula	63
7.5. Dimensionamento	64
7.5.1. Generalidades	64
7.5.2. Método de cálculo	66
7.6. Sequência executiva	75
8. Referências	77

1. Conceito



A configuração tridimensional em forma de colmeia, **figura 1**, é uma das mais resistentes formas estruturais encontradas na natureza, sendo por isso utilizada em vários elementos na indústria aeronáutica e de naves espaciais. Na área dos geossintéticos, as células em forma de colmeia constituem uma estrutura tridimensional de solo ou de material granular reforçado, denominada geocélula, gerando uma solução para os problemas mais difíceis da engenharia civil, relacionados com a capacidade de suporte sobre solos moles, erosão em taludes, revestimento de canais e em diversas aplicações em aterros sanitários.

A geocélula é um geossintético constituído por tiras sobrepostas, de polietileno de alta densidade extrudado, unidas entre si por meio de solda em intervalos descontínuos, de forma que, quando separadas ou expandidas, durante a instalação, apresentam-se como um painel de estrutura tridimensional de células contíguas, de paredes verticais, semelhante a uma colmeia. Os painéis são fornecidos fechados, com as tiras empilhadas umas sobre as outras e são abertos para serem instalados, como mostra a **figura 2**.



Quando o material de preenchimento das células é granular, a geocélula comporta-se como uma placa semirrígida, resultado do confinamento celular, que transfere e distribui as solicitações de compressão e de tração de grande intensidade, proporcionando maior capacidade de carga do que qualquer geogrelha ou outro geossintético. O uso de material coesivo para enchimento das células não é apropriado para o uso como reforço, porque devido às células serem pequenas, não há condições para compactação, como também pela falta de benefícios físicos desses solos. Contudo, para proteção de superfície de taludes contra erosão e canalizações de reduzida velocidade de escoamento, há a possibilidade do preenchimento da geocélula com material coesivo, inclusive com solo para plantio de vegetação, como será visto adiante no presente manual.

Nas aplicações de reforço as células individuais da geocélula têm as dimensões da altura (h) e do diâmetro (d) na proporção de aproximadamente um ($h/d = 1$), Richardson (2004.)

A concepção da geocélula ocorreu no final da década de 1970, quando o U.S. Army Corps of Engineers foi incumbido de desenvolver rapidamente um sistema tipo plataforma para ser apoiado sobre solos de baixa capacidade de suporte e permitir o acesso de equipamentos militares pesados. O resultado desse desenvolvimento foi a invenção da geocélula, que ao ser preenchida com areia ou pedra suportaria cargas elevadas, quando colocada sobre esses solos pouco resistentes. Desde então, a geocélula tem sido utilizada em projetos/obras militares e civis em todo mundo.

A geocélula StrataWeb de PEAD está disponível no mercado com a superfície lisa ou texturizada, e com ou sem perfuração nas paredes/tiras constituintes das células dos painéis, **figura 3**. Quando o solo de apoio do painel da geocélula é argiloso, um geotêxtil com função separação deve ser colocado sob o painel para evitar o bombeamento de finos para o interior do enchimento granular da geocélula.



Figura 3
Geocélula com paredes perfuradas

A função do confinamento celular para solo de apoio granular

No início da pesquisa sobre geocélula, Webster e Watkins (1997) mostraram que as geocélulas apresentavam um confinamento efetivo do material de enchimento, quando a altura da célula era igual ou maior que o seu diâmetro. Segundo Richardson (2004) esse confinamento é similar àquele apresentado pela bolsa preenchida com areia, em “sandbags” convencionais. Quando a carga é aplicada no material granular confinado, sua expansão perpendicular à carga é limitada pela resistência à tração da bolsa. Isso cria uma tensão confinante, que aumenta a resistência do enchimento granular. O confinamento lateral da geocélula produz uma coesão aparente no enchimento granular, a qual é importante para o desempenho deste. O valor da coesão aparente desenvolvida é influenciado pela rigidez das paredes da geocélula e pela capacidade desta em conter o enchimento granular. O modelo da coesão aparente tem sido aplicado com sucesso a todas as configurações de solo reforçado, e para aplicações em estradas pode ser claramente demonstrado usando as análises convencionais de capacidade de carga, as quais mostram que o uso da geocélula pode aumentar em até 300 vezes a capacidade de carga, quando comparada a uma camada de areia. Na falta de um método rigoroso para a avaliação da capacidade de carga para uma geocélula especificada com preenchimento granular, a coesão aparente deve ser baseada em ensaios de laboratório.

Fatores que influem na capacidade de carga da geocélula em solos de baixa capacidade de suporte

Avesani Neto (2013) cita que entre as características da geocélula que influem diretamente na capacidade de carga, de um sistema de reforço, estão o formato, as dimensões e a quantidade de células, a geometria do reforço e o material de composição (resistência/rigidez) da célula. Assim sendo, os parâmetros significativos para essa aplicação são: a razão de forma (altura dividida pela largura da célula) e a razão do carregamento (largura do carregamento dividido pela largura da célula). Por outro lado, Richardson (2004) chama atenção para que se deve ter em mente o papel da rigidez na geocélula, estrutura em forma de colmeia de material polimérico, quando esta é selecionada para um projeto. Painéis de geocélula podem ter uma porcentagem significativa das suas paredes removidas pela perfuração das tiras. As perfurações reduzem muito a rigidez da estrutura em forma de colmeia. Desta forma, as perfurações devem ser apenas suficientes para melhorar o atrito de interface.

O desempenho das geocélulas constituídas por tiras de PEAD texturizadas, como também das constituídas por paredes perfuradas, é essencialmente o mesmo para a maioria dos materiais granulares. As perfurações são realizadas para permitir que os painéis de geocélula sejam drenantes, quando usados em taludes na aplicação de proteção e controle de erosão, e não melhoram o desempenho destas em aplicações de capacidade de suporte, objeto do item 7. Por outro lado, quando a texturização é realizada, reduz significativamente a espessura nominal e consequentemente reduz a rigidez da estrutura de colmeia da geocélula.

Durabilidade da geocélula

As propriedades físicas e de durabilidade da geocélula StrataWeb apresentadas na **tabela 1** do item 2 - Propriedades Técnicas - são similares às propriedades da geomembrana de PEAD. É importante notar que as geocélulas devem ter grande resistência ao stress cracking, a qual é necessária, uma vez que o material granular será compactado diretamente em contato com as paredes das células. Além disto, a geomembrana e a geocélula de PEAD devem possuir uma proteção muito boa contra os raios ultravioleta, pois em várias aplicações podem ficar expostas por longos períodos de tempo. Geralmente, a geocélula fica exposta aos raios UV por um período curto, somente durante a instalação.

2. Propriedades Técnicas

As geocélulas são fabricadas com a licença do U.S. Army Corps of Engineers, desta forma a maioria das propriedades físicas são as mesmas para todos os fabricantes. No entanto, o fabricante deve assegurar os valores mínimos das propriedades, incluindo as de durabilidade, por meio de um bom controle de qualidade de fabricação, e o projetista deve confirmar a veracidade dos valores mínimos, antes de especificar a geocélula.

As propriedades da geocélula StrataWeb estão apresentadas na **tabela 1**. Esta geocélula está disponível no mercado com as paredes sólidas (tiras sem perfuração) ou perfuradas. Os comprimentos dos painéis apresentados podem ser aumentados ou diminuídos pela adição ou retirada de células, sem custo adicional.

3. Aplicações de proteção e controle de erosão

3.1. Introdução

Os tipos de revestimento mais usados na proteção contra erosão são:

- Naturais ou vegetados (grama, grama armada)
- Flexíveis (rip-rap, gabiões, blocos pré-moldados, geocélulas StrataWeb)
- Rígidos (concreto armado)

As geocélulas StrataWeb são uma excelente opção para proteção e controle de erosão, em relação às soluções convencionais. Podem ser preenchidas com solo e vegetação, com material granular ou com concreto. Em geral, o sistema de proteção contra erosão com geocélulas StrataWeb é disposto diretamente na superfície do talude, previamente preparada, e é fixado ao solo por grampos, quando o ângulo do talude for menor do que 45° (1V : 1H). Para aplicações envolvendo taludes mais íngremes a fixação deve ser através de canaleta de ancoragem na crista do talude e de grampos.

Vantagens do uso das geocélulas StrataWeb na proteção e controle de erosão:

- Oferece proteção permanente.
- Elevado confinamento do material de preenchimento.
- Possibilidade de emprego do solo local.
- Material de elevada durabilidade.
- Diferentes opções do material de enchimento: vegetação, material granular, concreto.

A inclinação e a estabilidade interna do talude, o material de preenchimento, as precipitações pluviais e condições para irrigação, as características hidráulicas do fluxo da água subterrânea e a qualidade do solo de apoio, onde será feita a ancoragem, são algumas das variáveis que afetam o desempenho e a instalação da geocélula StrataWeb. Diante do grande número de fatores que podem interferir, para aplicações individuais, a definição dos parâmetros a serem utilizados deve ser feita com o auxílio de dados da engenharia, do meio ambiente e do projeto do local.

3.2. Características dos materiais de preenchimento utilizados nas aplicações de proteção e controle de erosão

Granular

- Reduz a energia hidráulica, limitando as forças dentro e sob as células.
- Direciona o fluxo na superfície da célula, eliminando escoamento lateral e o solapamento do solo de apoio dos painéis.
- Controla o movimento das partículas individuais, que pode ocorrer devido à gravidade ou ao escoamento da água.
- Resulta em uma estrutura flexível e durável.

Vegetação

- Reduz a energia hidráulica, limitando as forças dentro e sob as células.
- Aumenta a resistência natural e protege as raízes.
- Direciona o fluxo da água sobre o topo do painel, ao invés de através dele.
- Evita sulcos e ravinas.
- Ajuda a reduzir a perda de umidade.
- Possui apelo estético e é ambientalmente agradável.

Concreto

- Controla a retroerosão progressiva (piping) e o solapamento, por permitir que os painéis conformem-se adequadamente na superfície de apoio.
- A geocélula comporta-se como uma série de juntas de expansão, constituindo uma forma flexível.
- Proporciona ventilação onde necessário.
- Fornece estabilidade em taludes íngremes e em canais com fluxo contínuo.

Tabela 1 - Propriedades e especificações técnicas das geocélulas StrataWeb.

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA							
Propriedade do produto	Unidade	SW330	SW356	SW445	SW660	SW712	
Espaçamento de solda	mm	330	356	445	660	712	
Altura das células	mm	75,100,125,150,200					
Dimensão média da célula (+ - 3%)	largura	mm	244	259	320	488	508
	comprimento	mm	210	224	287	436	475
Área Nominal de célula (+ - 3%)	cm ²	250	289	460	1000	1206	
Dimensão da peça expandida (+ - 3%)	largura	m	2,44	2,56	2,56	2,44	2,56
	comprimento	m	6,1	6,52	8,35	12,63	13,72
Área da peça expandida (+ - 3%)	m ²	14,9	16,7	21,4	30,8	35,1	
Propriedades da junta	Altura da célula						
	mm	75 mm	100 mm	125 mm	150 mm	200 mm	
Resistência transversal das juntas (USACE TR GL-86-19, APA)	N	1065	1420	1775	2130	2840	
Propriedades do Material							
Matéria prima	Polietileno + aditivos						
Densidade do polímero (ASTM D 1505)	g/cm ³	0,935 - 0,965					
Resistência ao Stress (ASTM D 1693)	h	>500					
Adição de negro-de-fumo (ASTM D 1606)	%	min 1,5					
Espessura das faixas (ASTM D 5199)	mm	min 1,3					
Perfurações	As faixas de polietileno são perfuradas em linha com furos de diâmetro máximo de 10mm. A área perfurada é menor do que 12% da área de superfície de cada célula						

3.3. Principais aplicações da geocélula StrataWeb na proteção e controle de erosão

- Canais (como alternativa a soluções tradicionais, como o concreto armado e colchão reno).
- Revestimento e proteção de taludes (não reforçados e reforçados).

3.4. Escolha do material de preenchimento

- Solo e vegetação: indicado para taludes íngremes, bermas, diques, canaletas e vertedouros.
- Areia e material granular: apropriado para taludes com inclinação moderada.
- Cascalho (diâmetro máximo 760 mm): canais e taludes, exceto para os mais íngremes, e com fluxo moderado.
- Pedra britada: canais e taludes, exceto para os mais íngremes, e com fluxo moderado.
- Concreto: Encontro de pontes, taludes íngremes, canais com velocidade de fluxo alta, vertedouros e canaletas.

3.5. Geotêxtil



Figura 4 - Taludes de canal protegidos com geocélula e vegetação

Dependendo do material de enchimento da geocélula e do tipo de solo da superfície de apoio, pode ser necessário o uso de um geotêxtil sob os painéis. Quando o material de enchimento e o solo de apoio são diferentes, ou se o solo de apoio for muito mole ou saturado, o geotêxtil desempenhará a função de

separação impedindo a migração de finos para dentro do enchimento, assim como a possibilidade do afundamento do material de enchimento no solo mole. No entanto, o uso do geotêxtil pode reduzir significativamente o atrito de interface na base dos painéis da StrataWeb, aumentando dessa forma a força de deslizamento. Por isso, a decisão de usar ou não o geotêxtil deve ser estudada com cuidado, depois da avaliação dos benefícios e dos custos.

4. Geocélulas em revestimento de canais

4.1. Introdução

A geocélula StrataWeb oferece várias opções para resolver problemas erosivos no fundo e nos taludes de canais com fluxo intermitente ou contínuo. Nesta aplicação as geocélulas podem ser preenchidas com solo e vegetação, material granular, concreto ou uma combinação desses materiais, dependendo das condições e particularidades de cada obra.

Em canais onde a velocidade de escoamento da água é inferior a 2 m/s, a geocélula StrataWeb pode ser preenchida com brita ou solo e vegetação, onde o fluxo de água é intermitente, **figura 4**. Quando a velocidade da água for superior a 2 m/s, a geocélula StrataWeb pode ser preenchida com concreto, eliminando a necessidade de formas, armadura e mão de obra especializada. A flexibilidade do sistema StrataWeb permite que os painéis fiquem bem conformados na superfície de apoio durante a instalação, proporcionando maior contato com essa superfície, além da vantagem de elevada velocidade de execução. StrataWeb pode também ser instalada sobre uma geomembrana polimérica, com a função de proteção, quando a infiltração de água é indesejada, como no caso dos canais de irrigação, **figura 5**. O emprego da geocélula reduz significativamente o custo e o tempo de execução, quando comparado a projetos de canais com soluções convencionais.



Figura 5
Geocélula StrataWeb em canal, como proteção da geomembrana

4.2. Preenchimento das células com solo e vegetação

O solo confinado e com vegetação plantada, como mostra o exemplo da **figura 4**, tem excelente desempenho em aplicações de canais com fluxo moderado a baixo. A geocélula StrataWeb melhora o desempenho da vegetação por meio do reforço que proporciona na região das raízes. Além disso, direciona o fluxo da água através do topo das células, aumenta a resistência ao cisalhamento do preenchimento e proporciona uma área esteticamente mais agradável em comparação aos métodos convencionais.

Para esse tipo de preenchimento, recomenda-se:

- velocidade de escoamento/fluxo máxima menor que 6 m/s (20 fps) e duração do pico do fluxo menor que 24 horas;
- velocidade de escoamento/fluxo máxima menor que 4,5 m/s (15 fps) e duração do pico do fluxo menor que 48 horas;
- ser usado em taludes do canal acima do nível d'água máximo.

4.3. Preenchimento das células com material granular

O material granular, tipo brita, tem um bom desempenho, permitindo o uso de diferentes tamanhos do agregado, para as variações da velocidade de escoamento/fluxo encontradas em diversos locais. Esse preenchimento fornece uma estética agradável e uma alternativa de bom custo-benefício em relação ao rip rap, pelo confinamento e aumento do desempenho de agregados menores e mais baratos.

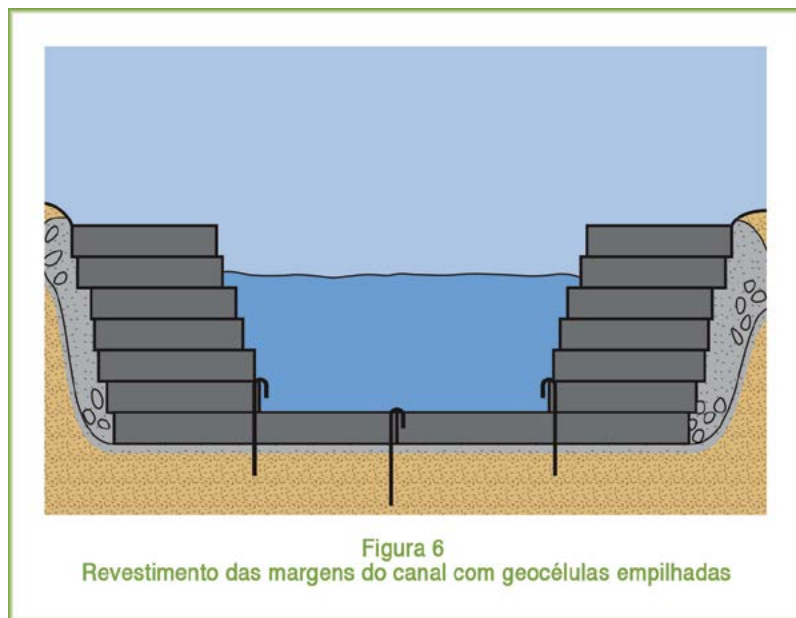
Para preenchimento com material granular, recomenda-se:

- velocidade de escoamento/fluxo máxima menor que 1 m/s (3,3 fps) para brita graduada;
- velocidade de escoamento/fluxo máxima menor que 2 m/s (6,6 fps) para brita de 38 mm (1 ½");
- velocidade de escoamento/fluxo máxima menor que 3 m/s (10 fps) para brita de 125 mm (5");
- velocidade de escoamento/fluxo máxima maior que 3,5 m/s (11,5 fps): não é recomendado o preenchimento com material granular.

4.4. Preenchimento das células com concreto

Sistemas de confinamento celular preenchidos com concreto é uma alternativa de elevado custo-benefício, quando comparados aos tradicionais canais revestidos com concreto. A flexibilidade natural do sistema de confinamento celular preenchido com concreto permite a conformação deste com a movimentação do solo de apoio, sem o fissuramento e o desnivelamento que ocorre nas placas de concreto moldadas no local. Os custos de instalação são extremamente reduzidos pela eliminação do custo das formas e outras técnicas de construção empregadas em revestimento de canais com concreto.

Em áreas com acesso limitado, ou muito erodidas, a construção de um muro de geocélula empilhadas ao longo dos taludes do canal permite o enchimento com solo vegetado, material granular ou concreto nas células externas, de modo a gerar um talude íngreme e aumentar a resistência para velocidades de escoamento maiores, **figura 6**.



Para preenchimento com concreto, recomenda-se:

- velocidade de escoamento/fluxo máxima maior que 1,8 m/s (6 fps) menor que 6 m/s (20 fps): StrataWeb de 75 mm (3") de altura;
- velocidade de escoamento/fluxo máxima maior que 6 m/s (20 fps) e menor que 7 m/s (23 fps): StrataWeb de 100 mm (4") de altura;
- velocidade de escoamento/fluxo máxima maior que 7 m/s (23 fps): StrataWeb de 150 mm (6") e 200 mm (8") de altura.

Nota: A ancoragem necessária é função da profundidade da velocidade do fluxo máximo, da inclinação do talude e do peso próprio do sistema de revestimento. O projetista deve basear o projeto em informações específicas do local.

4.5. Altura das células

Na maioria das aplicações de controle de erosão, o suporte de carga não é a consideração principal. Entretanto, deve-se fazer a escolha adequada da altura das células, que geralmente é determinada através de:

- tamanho e peso do material de preenchimento;
- inclinação do talude;

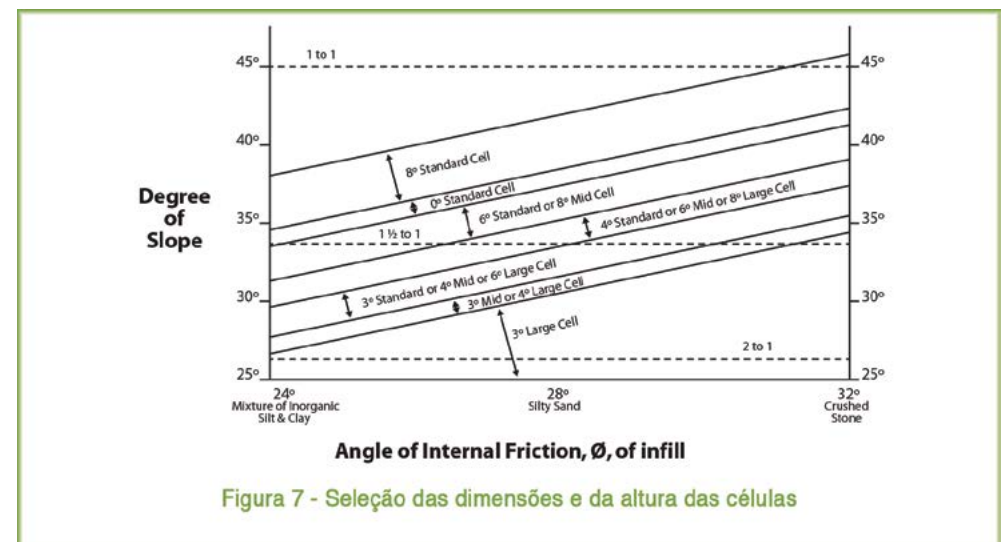
- fatores ambientais relacionados a exposição ao tempo;
- custo.

O gráfico da **figura 7** pode ser usado para selecionar a dimensão e a altura da célula em situações moderadas. Situações moderadas são caracterizadas por precipitações de pouca intensidade, algum escoamento de água pela crista do talude e nenhuma expectativa de que uma boa cobertura vegetal estará estabelecida antes da estação chuvosa ou de uma chuva forte. Se a situação do projeto for mais ou menos severa, a escolha da altura e dimensões das células deve ser baseada nessa situação real. O tamanho máximo de um agregado individual não deve ser maior que $\frac{1}{3}$ da altura da célula. As dimensões nominais das células são:

- Standard ou StrataWeb 20: 244 x 210 mm (9,6" x 8,3");
- Média ou StrataWeb 30: 320 x 287 mm (12,6" x 11,3");
- Grande ou StrataWeb 40: 508 x 475 mm (20" x 18,7").

Na escolha das dimensões da célula, é útil observar que a célula grande ou StrataWeb 40 apresenta superfície acabada mais flexível, enquanto a célula standard ou StrataWeb 20 possui maior capacidade drenante entre as paredes das células, o que no caso de preenchimento com concreto proporciona maior integração entre as células. Num painel com células standard a resistência à tração do sistema é maior.

4.6. Ancoragem



A ancoragem da geocélula StrataWeb no talude deve ser apropriada para o bom desempenho desta. As ancoragens devem permanecer após a instalação. O número e o tipo de ancoragem são determinados em função de:

- densidade do solo de apoio;
- peso e tipo do material de preenchimento;
- comprimento do talude;
- inclinação do talude;
- condições ambientais ou externas, como chuvas torrenciais ou neve;
- ângulo de atrito interno do material de preenchimento e do solo de apoio no talude (deve ser usado o menor dos dois valores);
- altura da geocélula;
- presença de geomembrana como revestimento impermeabilizante.

Antes de selecionar um método de ancoragem, é necessário primeiro calcular a força de deslizamento (NSF) ou a força que deve superar aquela que provocaria o deslizamento da StrataWeb talude abaixo. O resultado da força de deslizamento (NSF) negativo indica que a força de atrito entre a StrataWeb e o talude é suficiente para manter os painéis estáveis, sem movimentação. A **tabela 2** mostra alguns exemplos de cálculo da força de deslizamento (NSF):

equação (1)

$$\text{Força de deslizamento (NSF)} = [(H \times L \times \gamma) + (L \times SL)] \times [\text{sen } w - (\text{cos } w \tan \phi)]$$

Em que:

NSF: força de deslizamento

H: altura da célula

L: comprimento do talude

γ : peso específico do material de preenchimento

SL: sobrecarga no talude (quando houver)

w: inclinação do talude com a horizontal

ϕ : menor ângulo de atrito interno (solo de apoio ou material de preenchimento)

Tabela 2 - Exemplos de cálculo da força de deslizamento (NFS)

NFS (kN/m)*	H (mm)	L (m)	γ (kN/m ³)	SL (kN/m ²)	W (Incl. Talude)	ϕ (o)
0,8	100	6,1	19,6	1,9	1,75:1 (29,7°)	28° (areia siltosa)
5,5	150	33,0	19,6	1,9	1,75:1 (29,7°)	28° (areia siltosa)
-13,1**	100	30,5	19,6	1,9	2:1 (26,6°)	32° (pedra britada)

*Kilonewtons por metro medido paralelo à crista do talude

** Indica que não há necessidade de ancoragem

4.7. Canaleta de ancoragem

A extremidade da StrataWeb deve ser enterrada numa canaleta de ancoragem na crista do talude para evitar que ocorra fluxo de água sob os painéis. Essa ancoragem tem a vantagem de contar com o peso do solo sobre as células enterradas. A equação apresentada a seguir pode ser usada para calcular o comprimento e a altura da canaleta para suportar a força de deslizamento:

equação (2)

$$L \times H = \frac{\text{força de deslizamento} \times FS}{\gamma \times \text{tg } \phi}$$

Em que:

FS: fator de segurança (usualmente adotado de 1,5 a 3,0, dependendo das condições da obra, do nível de informação dos materiais empregados e do solo local)

γ : peso específico do solo

ϕ : menor ângulo de atrito interno (do material de preenchimento ou do solo de apoio)

Se o comprimento do talude for maior que um painel de geocélula, outros painéis devem ser unidos ao painel superior ou ancorados usando outros métodos apropriados.

4.8. Grampos de ancoragem dos painéis da geocélula

Estaquear ou grampear os painéis de StrataWeb no talude é um método usual de ancoragem usado se não houver geomembrana sob o painel e se o solo de apoio possuir resistência adequada para reter os grampos. O tipo de grampo recomendado é constituído por barras de aço dobradas em forma de "J". Além disso, o grampeamento dos painéis de StrataWeb auxiliam na sua conformação com a superfície do talude, garantido um melhor acabamento da superfície e reduzindo a perda de material usado no preenchimento.

Como regra geral, o comprimento do grampo deve ser três vezes a altura da célula, e a quantidade de grampos usuais é de cerca de 1 unidade/m². Contudo, eles podem variar em função de diversos parâmetros, sendo necessária a sua verificação para cada caso. Esquemas típicos de detalhes de locação dos grampos estão disponíveis, sob consulta ao departamento técnico da Geo Soluções.

4.9. Grampos de união de painéis da geocélula

Se as condições locais exigirem que painéis adjacentes de StrataWeb sejam unidos, será necessário um grampeamento entre eles. Para esse grampeamento, em geral, usa-se um revólver pneumático para grampos industriais. Os grampos são colocados em cada conjunto de células adjacentes. Painéis adjacentes podem também ser amarrados e unidos com cabos.

4.10. Cabos e grampos de ancoragem

Em taludes íngremes, onde é necessária uma ancoragem adicional, são usados cabos e grampos de ancoragem. Além disto, o cabo é usado onde não é possível o uso de grampos para ancoragem, como no caso de apoio em rocha e em geomembrana. Esses tipos de ancoragem também são comumente usados quando vários painéis de StrataWeb são necessários para cobrir o talude da crista até o pé. Os cabos devem ter três importantes características: resistência mecânica, durabilidade e resistência à fluência (“creep”). Os cabos de ancoragem geralmente são constituídos por correias ou cabos de poliéster de alta resistência. A carga de projeto e o espaçamento dos cabos de ancoragem são determinados em função da força a ser suportada. Um número grande de cabos de menor resistência é preferível a um pequeno número de cabos de grande resistência. Para evitar concentração de tensões no painel inferior, é essencial usar cabos contínuos ou grandes arruelas.

$$N^{\circ} \text{ cabos} = \frac{\text{força de deslizamento} \times \text{largura do painel} \times FS}{\text{resistência do cabo}}$$

4.11. Método de ancoragem

Tendo-se o resultado da força de deslizamento (NSF), calculada através da **fórmula (1)**, o próximo passo é decidir como ancorar a StrataWeb. Esse procedimento é mostrado a seguir para dois dos casos calculados, apresentados na **tabela 2**. Para o caso com NSF = 0,8 kN/m, o método comum de ancoragem da StrataWeb é cravar estacas ou grampear os painéis no talude. Para o caso com NSF = 5,5 kN/m, a StrataWeb deve ser ancorada em canaleta na crista do talude e ser também suportada por cabos.

Canaleta de ancoragem

Usando a equação (2):

$$L \times H = \frac{\text{força de deslizamento} \times FS}{\gamma \times \text{tg } \phi} = \frac{0,8 \times 2}{19,6 \times \text{tg } 28} = 0,15 \text{ m}^2$$

Uma alternativa é enterrar a extremidade da StrataWeb na crista do talude, numa canaleta de 0,30 m de profundidade por 0,50 m de largura. Outra alternativa é uma canaleta com profundidade de 0,20 m de profundidade por 0,75 m de largura.

Grampos de ancoragem

0,8 kN/m é equivalente a $0,8 \times 2,56 = 2,0$ kN, para um painel de 2,56 m de largura. Usando um fator de segurança de 2,0 e grampos de ancoragem com resistência ao arrancamento de 0,27 kN*.

$$\frac{2,0 \times 2,0}{0,27} = 14,8 \text{ grampos "J"}$$

Devem ser usados 15 grampos por painel de 2,56 m de largura.

*A resistência ao arrancamento do grampo de ancoragem depende de vários fatores, incluindo as condições de compactidade do solo de apoio e o cuidado com que os grampos são cravados. Em vista disso, o engenheiro de obra deve avaliar e recomendar o valor que deve ser usado.

Cabos

5,5 kN/m é equivalente a $5,5 \times 2,56 = 14,1$ kN, para um painel de 2,56 m de largura. Usando um fator de segurança de 3,0 e um cabo com resistência de projeto de 13,0 kN.

$$\frac{14,1 \times 3,0}{13} = 3,25 \text{ cabos}$$

Devem-se usar 4 cabos por painel de 2,56 m de largura.

Se os cabos forem amarrados em uma estrutura de suporte fixados na canaleta de ancoragem, usando o mesmo número de ancoragens que foi usado nos cabos, um fator de segurança adicional de 1,25 deve ser considerado, para incertezas do solo de apoio.

4.12. Instalação da StrataWeb usando cabos de ancoragem

Se a StrataWeb não for perfurada para passagem dos cabos, deve-se fazer os furos antes de abrir os painéis, **figura 8**. Os cabos devem ser medidos e cortados no comprimento desejado (acrescentando 10% aproximadamente para amarração em volta dos grampos de união das células). Ancorar os cabos numa estrutura de suporte na crista do talude. A estrutura de suporte pode ser um segmento de tubo de PVC de alta resistência, uma viga de concreto ou uma série de blocos de concreto colocados numa canaleta de ancoragem, **figura 9**. Uma alternativa podem ser barras do tipo de tirantes para contenção de encostas, ligadas a blocos de ancoragem (“morto”), **figura 10**.

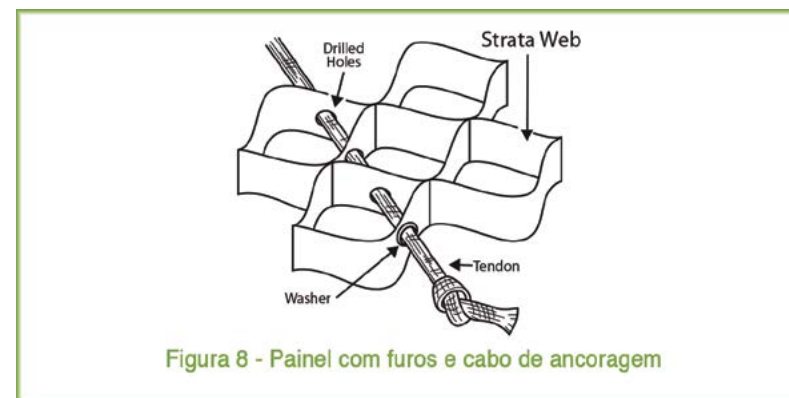


Figura 8 - Painel com furos e cabo de ancoragem

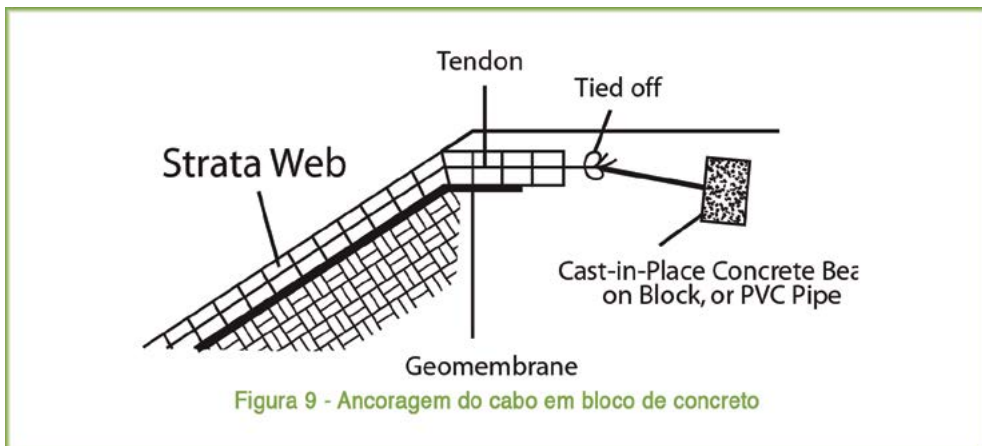


Figura 9 - Ancoragem do cabo em bloco de concreto

A StrataWeb deve sempre ser ancorada na crista do talude, independente se os cabos de ancoragem são ou não utilizados, para evitar o fluxo de água sob os painéis.

Os cabos devem ser inseridos nos furos dos painéis da StrataWeb fechada, colocada na crista do talude. É preciso medir e marcar o perímetro da área que será coberta pelo primeiro painel que será instalado. Se possível, grampos de ancoragem devem ser colocados em volta do perímetro, para segurar o painel expandido. Ao abrir e colocar os painéis no lugar, é necessário que se tome cuidado para que os cabos não saiam dos furos. O procedimento deve ser repetido para os demais painéis a serem instalados.

O cabo deve ser amarrado, com tensionamento, nos grampos de união das células ou em barras do lado de baixo da última célula.

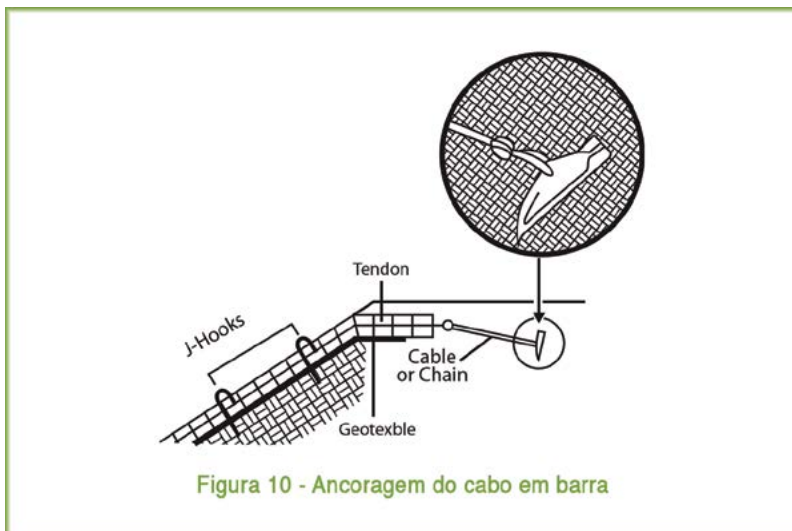


Figura 10 - Ancoragem do cabo em barra

O uso de arruelas ou placas ajuda a aliviar os pontos de tensão. O uso dos grampos de união das células, das barras, arruelas e placas auxilia a transferência da carga da StrataWeb para os cabos. Os grampos de união das células, das barras, arruelas e placas devem ser fabricados com material resistente a corrosão, como aço galvanizado, plástico de alta resistência, etc.

A **figura 11** mostra a instalação e ancoragem dos grampos e cabos, que devem seguir as seguintes etapas:

1. Fazer dois laços no cabo.
2. Puxar o laço 1 parcialmente através do laço 2.
3. Colocar o grampo de ancoragem através do laço 1 e cravar o grampo no solo de apoio até o topo da curva deste encostar no topo da célula do painel da StrataWeb.
4. Puxar as duas extremidades do cabo para fechar o laço e cravar o grampo até o topo deste ficar no nível da superfície de apoio do painel.

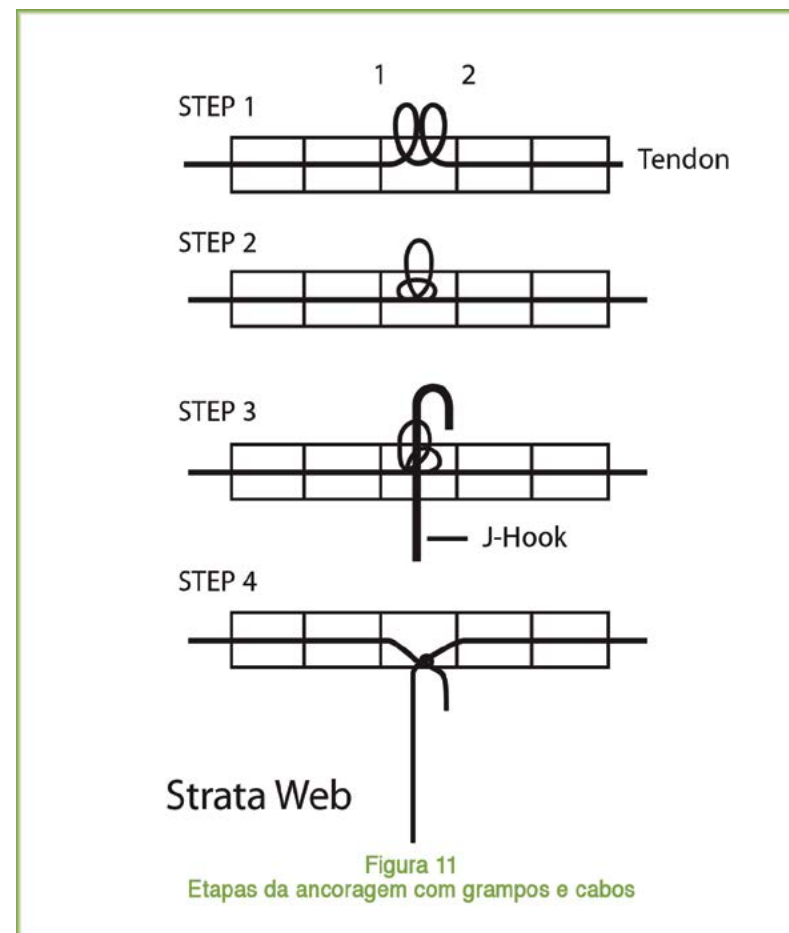


Figura 11
Etapas da ancoragem com grampos e cabos

4.13. Sequência executiva

- Preparar o local, onde será instalada a geocélula StrataWeb, removendo toda a cobertura vegetal, pedaços de madeira e solo de má qualidade. Fazer o movimento de terra e as canaletas de ancoragem, para aplicações em taludes e canais, de acordo com as especificações do projeto.
- Se for especificado um geotêxtil, a instalação deve seguir as recomendações do fabricante.
- Cravar parcialmente as estacas ou os grampos de ancoragem ao redor do perímetro da área que será coberta pelo painel a ser instalado, deixando para fora um comprimento equivalente à altura da célula mais aproximadamente 50 mm, para segurar o painel expandido. Um fio de pedreiro pode ser usado para alinhar os grampos e bordas.
- O painel de StrataWeb deve ser expandido para além do comprimento previsto no projeto, permitindo assim a acomodação posterior até o comprimento projetado. Colocar as extremidades das células da StrataWeb sobre os grampos instalados previamente e completar a cravação dos grampos até pouco abaixo das paredes das células.
- Os painéis adjacentes da StrataWeb devem estar nivelados e alinhados uns com os outros. Os painéis devem ser justapostos e colocados juntos às extremidades, coincidindo. A união dos painéis deve ser feita com grampos pneumáticos ou similar, conforme especificado para a aplicação em questão.
- Cravar o restante das estacas ou grampos de ancoragem, conforme especificado no projeto.
- Após a colocação dos painéis, StrataWeb deve ser preenchida com o material especificado no projeto.
- Para evitar danos à geocélula, o material de preenchimento deve ser lançado a uma altura menor que um metro.
- Em taludes ou canais, o material de preenchimento deve ser lançado dentro dos painéis da crista do talude para o pé, usando uma “bobcat”, retroescavadeira ou correia transportadora.
- Quando o enchimento for areia, material granular ou solo, o enchimento deve ter uma espessura adicional acima do topo do painel, de 25 mm a 50 mm, para permitir a compactação.
- Areia e enchimento granular devem ser compactados com placa no topo das células. Enchimento com solo deve ser compactado com rolo compactador, caçamba da retroescavadeira ou placa compactadora.
- Enchimento com concreto deve ser lançado manualmente e o acabamento feito com máquina.

As figuras 12 a 15, a seguir, mostram algumas etapas da instalação da geocélula StrataWeb.



Figura 12 - Ancoragem dos cabos em canaleta na crista do talude



Figura 13 - Painel de StrataWeb, com cabos, colocado no talude



Figura 14 - StrataWeb sendo ancorada no talude



Figura 15 - StrataWeb já instalada num talude

4.14. Dimensionamento Hidráulico

4.14.1. Dados necessários

- Finalidade do canal;
- Seção transversal do canal;
- Tipo de revestimento previsto;
- Características do terreno de apoio: topografia, tipo de solo, nível freático, outros fatores locais;
- Planta do traçado do canal, curvas e interferências;
- Informações de projeto: velocidade, declividade, coeficiente de rugosidade, outros;
- Natureza e impacto das condições hidráulicas que poderão ocorrer no sistema de proteção com geocélula StrataWeb a ser projetado;

4.14.2. Conceitos utilizados

O dimensionamento hidráulico da geocélula StrataWeb para revestimento de canais é similar ao dos canais convencionais e depende de aspectos relacionados à velocidade de escoamento, declividade do fundo e ao coeficiente de rugosidade, em função do tipo de preenchimento.

A versatilidade da solução, com StrataWeb em revestimentos de canais, permite alternativas com excelente custo-benefício em algumas situações e/ou locais peculiares, como por exemplo as situações descritas a seguir:

Locais onde há limitação para a largura do canal

Em áreas urbanas é comum haver restrições para a largura do canal. Esses canais geralmente são projetados com talude quase vertical e o fundo revestido. Neste caso, os taludes podem ser protegidos por um muro de contenção com

geocélulas StrataWeb empilhadas, preenchidas com material granular e vegetação, e o fundo do canal com painéis apoiados no solo, como mostra a **figura 6**.

Canais com baixa velocidade de escoamento

Uma seção transversal constituída por pouca profundidade e grande largura reduz a velocidade, a eficiência hidráulica e as tensões geradas no escoamento (Chow, 1959; Presto, 2008).

Canais com alta velocidade de escoamento

Um canal de seção trapezoidal pode ter alta eficiência hidráulica se a sua geometria seguir as proporções mostradas na **figura 16**. A eficiência hidráulica, que está associada a altas velocidades de fluxo, se o revestimento for liso (baixa rugosidade) (Chow, 1959), pode ser expressa como a vazão dividida pela seção transversal unitária, para uma dada declividade do fundo do canal. Essa eficiência aumenta à medida que a rugosidade do revestimento “n” diminui e o raio hidráulico “R” aumenta. O revestimento escolhido para o canal, neste caso, deve ser resistente às tensões que resultam da alta velocidade de escoamento.

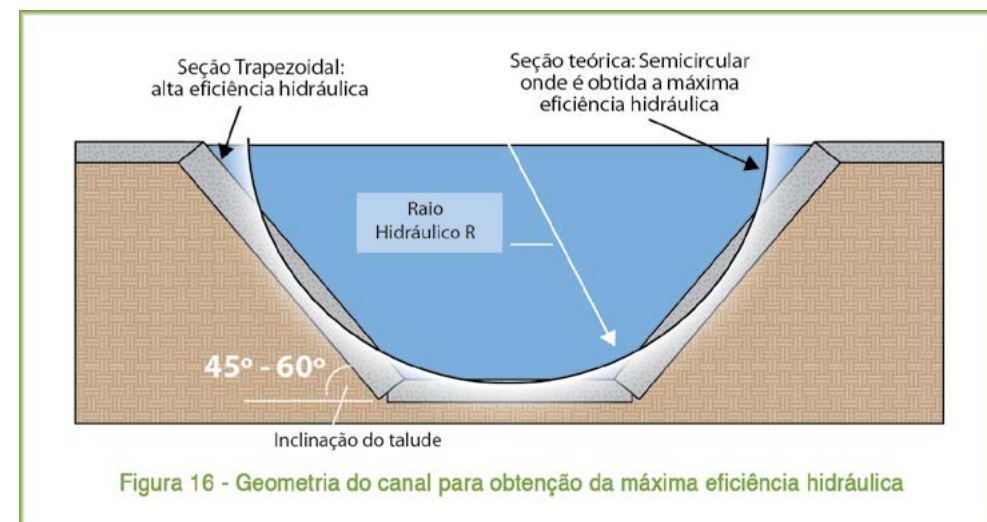


Figura 16 - Geometria do canal para obtenção da máxima eficiência hidráulica

Todos os métodos de dimensionamento de canais usam a fórmula de Manning para determinação da capacidade de escoamento. Essa fórmula relaciona a geometria da seção transversal, a rugosidade do revestimento, a declividade do fundo do canal e a velocidade média a várias profundidades:

equação (3)

$$v = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n}$$

Sendo:

v : velocidade média (m/s).

R : raio hidráulico do canal definido como a área da seção transversal do canal (A) dividido pelo perímetro molhado (P), (m).

n : coeficiente de rugosidade de Manning para o revestimento considerado.

s : declividade do fundo do canal (m/m).

Os fatores mais importantes que afetam a escolha do coeficiente de Manning para o dimensionamento de canais são: o tipo e as dimensões dos materiais que constituem o fundo e as margens, e a forma geométrica do canal. Cowan (1956) desenvolveu um procedimento para avaliar os efeitos desses fatores na determinação do valor do coeficiente de rugosidade para um canal.

A **figura 17** mostra os parâmetros que são considerados na fórmula de Manning, usada para determinar a vazão total (m³/s):

equação (4)

$$Q = vA$$

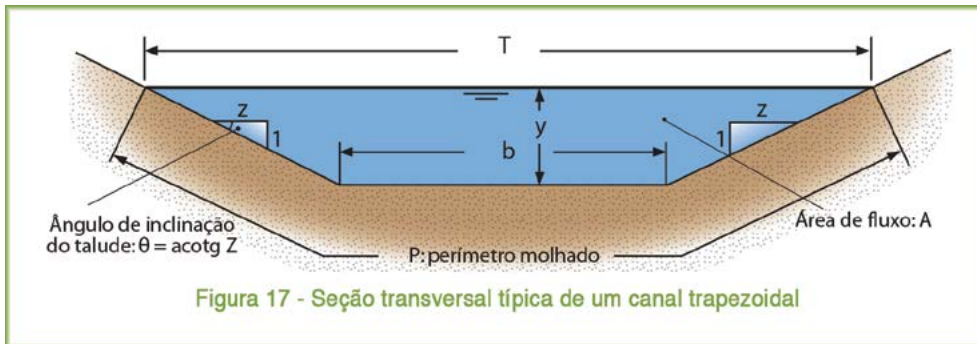


Figura 17 - Seção transversal típica de um canal trapezoidal

Segundo Chow (1959), é possível testar empiricamente combinações dos parâmetros que satisfazem as duas equações e descrevem as condições de fluxo para um dado escoamento. Para a maioria dos casos de fluxo constante, o escoamento é constante através de todo o canal, ou seja, o fluxo é contínuo e o princípio da continuidade pode ser expresso da seguinte forma:

equação (5)

$$Q_1 = A_1 v_1 = A_2 v_2 = Q_2$$

Em que os índices designam as diferentes seções do canal. Na **figura 18**, os índices 1 e 2 indicam as seções 1 e 2 consideradas.

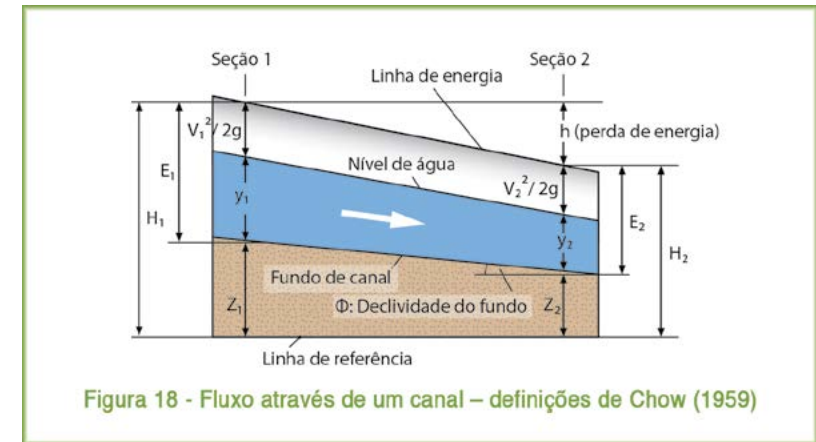


Figura 18 - Fluxo através de um canal – definições de Chow (1959)

4.14.3. Geocélula StrataWeb preenchida com solo e vegetação

A geocélula StrataWeb confina o solo, onde a vegetação germinará, assim como reforça as raízes da vegetação quando esta se estabelece. O solo de preenchimento usualmente é depositado sobre um geotêxtil não tecido de 120 a 150 g/m², colocado sob o painel da geocélula, com uma altura de aproximadamente 10 centímetros maior que altura da célula. A ancoragem dos painéis é realizada com grampos numa densidade de cerca de um grampo por metro quadrado, conforme os itens 4.8 e 4.11, e a união dos painéis, conforme o item 4.9.

Após o plantio da vegetação e até o completo estabelecimento desta, podem-se utilizar as biomantas, que proporcionarão uma proteção temporária adicional. Para taludes com inclinação maior que 2H : 1V é recomendável usar uma altura de célula de 10 centímetros, e uma maior densidade de grampos de ancoragem será necessária. Essa verificação pode ser efetuada conforme o item 4.11.

O dimensionamento é efetuado levando-se em conta além do coeficiente de rugosidade de Manning, o qual depende do tipo, da densidade e do comprimento da vegetação, a velocidade de escoamento atuante. Segundo o Guia FHWA-TS-84-204, a quantificação do efeito da vegetação no coeficiente de rugosidade depende da profundidade do escoamento, da porcentagem de perímetro molhado coberto pela vegetação, da densidade da vegetação abaixo do nível máximo da água e de quanto a vegetação se abate pelo escoamento e pelo alinhamento da vegetação com o escoamento. O alinhamento da vegetação paralelo ao escoamento pode impactar menos que um alinhamento perpendicular ao escoamento. O coeficiente de Manning, para um canal regular com superfície vegetada, pode ser estimado pela **tabela 3**, extraída do Guia FHWA-TS-84-204.

Quanto à velocidade de escoamento, deve ser seguida a mesma recomendação do item 4.2, a seguir:

- a velocidade de escoamento máxima deve ser menor que 6 m/s (20 fps) e ter duração do pico do fluxo menor que 24 horas; ou
- a velocidade de escoamento máxima deve ser menor que 4,5 m/s (15 fps) e ter duração do pico do fluxo menor que 48 horas.

Tabela 3. Coeficiente de Manning para canais revestidos com grama - Guia FHWA-TS-84-204

Coeficiente de Manning	Crescimento da Vegetação x Escoamento
0,002 – 0,010	Crescimento denso da grama flexível, como a Bermuda, ou de ervas daninhas onde a profundidade média do escoamento é de pelo menos duas vezes a altura da vegetação
0,010 – 0,025	Crescimento da grama onde o escoamento médio é de uma a duas vezes a altura da vegetação
0,025 – 0,050	Crescimento da grama onde o escoamento médio é aproximadamente igual à altura da vegetação
0,050 – 0,100	Crescimento da grama onde o escoamento médio é menor do que a metade da altura da vegetação

4.14.4. Geocélula StrataWeb preenchida com material granular

Quando as condições do escoamento não permitem a utilização de vegetação para preenchimento da StrataWeb, deve ser usado um material mais resistente, como os granulares. Nesse caso, o geotêxtil colocado sob os painéis deve ser de 250 a 350 g/m².

O cálculo da velocidade média para o dimensionamento do canal é realizado usando a **equação (3)** de Manning. Para preenchimento da geocélula com material granular, o coeficiente de rugosidade para essa equação pode ser calculado pela expressão:

equação (6)

$$n = 0,0152 (D_{50})^{1/6}$$

Sendo:

D_{50} : diâmetro do agregado.

O coeficiente de Manning do material granular depende do tamanho, da forma e da graduação desse material.

Através das **equações (3) e (6)**, o projetista pode avaliar rapidamente as alternativas de preenchimento granular e as seções de canal para encontrar o melhor projeto técnico e econômico. Geralmente o agregado é bem graduado e o tamanho máximo de um agregado individual não deve ser maior que 1/3 da altura da célula.

Richardson (2004) apresenta o cálculo da velocidade média de escoamento para um canal revestido com material granular (sem geocélula), o qual é efetuado através da equação:

equação (7)

$$D_{50} = \frac{0,0136 v^3}{y^{0,5} K^{1,5}}$$

Sendo:

D_{50} : o diâmetro do agregado com 50% de material mais fino

v : velocidade média de escoamento (m/s)

y : profundidade do canal (m)

K : fator de talude calculado em função de θ = ângulo de inclinação do talude, como segue:

$$K = [1 - (\text{sen } \theta^2 / 0,396)]^{0,5}$$

Tomando-se como exemplo o cálculo da velocidade média em um canal com 2 metros de profundidade e com ângulo de inclinação dos taludes de 14°:

$$K = \{1 - [(\text{sen } 14)^2 / 0,396]\}^{0,5} = 0,92$$

Para $D_{50} = 0,10$ m, calcula-se a velocidade média:

$$0,10 = \frac{0,0136 v^3}{2^{0,5} 0,92^{1,5}} \longrightarrow v = 2,10 \text{ m/s}$$

Portanto, esse exemplo mostra que, para um canal revestido com material granular, sem a StrataWeb, a velocidade de escoamento a longo prazo é de 2,10 m/s.

Experimentos no Canadian National Water Research Institute, Engel and Flato, 1987, baseados no ensaio *flume*, indicaram que a velocidade de escoamento do canal pode ser aumentada em 60% quando este for revestido com geocélula. Assim sendo, no exemplo acima, a velocidade poderia ser aumentada para 3,36 m/s, se o canal fosse revestido com StrataWeb preenchida com material granular.

Richardson (2004) comenta que se nota que a velocidade de escoamento aumenta à medida que a geocélula torna-se visível devido à expulsão de algumas partículas da superfície do material granular de preenchimento, e que essa é uma das causas do conservadorismo das equações usadas no dimensionamento. A literatura dos fabricantes recomenda que a expulsão do agregado da superfície das células pode ser reduzida misturando argamassa aos primeiros três centímetros do agregado. Embora esse procedimento seja óbvio, não há uma orientação de projeto específica para o caso.

4.14.5. Geocélula StrataWeb preenchida com concreto

Quando as velocidades de escoamento do canal excedem os limites permissíveis para StrataWeb preenchida com solo e vegetação ou com material granular, o preenchimento das células deve ser com concreto. Nesse caso, a geocélula atuará como a forma do concreto, durante a execução do revestimento, e como um mecanismo de ancoragem para os blocos individuais de concreto contidos na sua estrutura no longo prazo. Os painéis da geocélula devem ser ancorados no talude e na crista, para permanecer estável no talude e resistir aos esforços gerados pela correnteza, conforme indicado nos itens 4.6 a 4.11, dependendo das condições do projeto.

A altura das células é escolhida em função das forças de arranchamento que poderão ocorrer durante a operação do canal.

De acordo com ensaios realizados na Inglaterra na década de 1980 (CIRIA, 1987), geocélulas preenchidas com concreto podem tolerar velocidades máximas de escoamento de 8 m/s se o peso dos painéis exceder 135 kg/m². Para concreto usual, esse peso está relacionado a uma altura de célula de 76 mm (3 in). Para velocidades maiores que as dos testes do CIRIA, a altura da geocélula deve ser maior. Essa pesquisa usou geocélula de paredes lisas, não perfuradas.

O coeficiente de rugosidade para o concreto lançado em revestimento de canais tem uma estreita faixa de variação, que dependerá do acabamento da superfície. Para os acabamentos mais comuns os valores de n variam de 0,012 a 0,022, como mostra a **tabela 4**.

O cálculo da velocidade média para o dimensionamento do canal é realizado pela **equação (3)** de Manning.

Tabela 4. Coeficientes de rugosidade de Manning para revestimento de canais com geocélulas preenchidas com concreto (PRESTO, 2008)

Acabamento da Superfície do Concreto de preenchimento da Geocélula	Valores do coeficiente rugosidade
Liso com espátula de aço	0,012 – 0,014
Desempenado com madeira	0,013 – 0,015
Varrida	0,016 – 0,018
Alisada	0,020 – 0,022
Pedregulho ou pedaços de rocha embutidos	0,022 – 0,030
Camadas empilhadas	0,030 – 0,040

4.15. Composição de custos da geocélula StrataWeb

A **tabela 5** apresenta a composição de custos, por área (m² de StrataWeb), para as quatro alturas em que a StrataWeb é apresentada. Ressalta-se que a tabela na sequência já apresenta perdas estimadas.

Tabela 5. Composição de custo da StrataWeb

DESCRIÇÃO	UNIDADE m ²	Geocélula			
		7,5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
MATERIAIS					
Geocélula	m ²	1.05	1.05	1.05	1.05
Material de preenchimento	m ³	0.083	0.110	0.165	0.220
Aço CA-50 8mm	barra	0.11	0.11	0.11	0.11
Geotêxtil não tecido 150 g/m ²	m ²	1.1	1.1	1.1	1.1
MÃO DE OBRA					
Encarregado de Obra	hora	0.08	0.08	0.08	0.08
Oficial	hora	0.08	0.08	0.08	0.08
Ajudante	hora	0.32	0.32	0.32	0.32

4.16. Comparação de custo da geocélula StrataWeb com outras soluções usuais

Na composição do preço, para comparação entre soluções, foram considerados somente os itens de materiais e mão de obra da solução considerada, como mostram as **tabelas 6 a 9**. Embora tenham sido consideradas todas as alturas disponíveis e respectivas aberturas da célula da StrataWeb, as **tabelas 6 e 8** mostram os dados, que foram considerados no cálculo do preço, apenas para StrataWeb de 10 centímetros de altura, a título de exemplo. No entanto, os gráficos das **figuras 19 a 21** apresentam o preço de todas as opções da StrataWeb e as comparações com as soluções em gabião colchão (Colchão Reno) e em concreto armado.

4.16.1. Comparação de custo entre StrataWeb preenchida com brita e gabião colchão (Colchão Reno)

Tabela 6 - Composição do preço da StrataWeb com 10 cm de altura, preenchida com brita
Data base: 30/01/2014 | Praça: São Paulo | Fonte: Os preços dos serviços são resultantes das composições de custo estruturadas no TCP014 (Editora PINI), com aplicação de taxas de Leis Sociais de 129,34% em cidades com ambulatório SECONCI e de 127,95% nas demais cidades. Os preços incluem BDI.

Tipo	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço Unitário			Preço total Parcial		
				Abertura 20 cm	Abertura 30 cm	Abertura 40 cm	Abertura 20 cm	Abertura 30 cm	Abertura 40 cm
	Revestimento de geocélula com altura de 10cm preenchida com pedra britada tipo 3	m ²	-						
Material	Geocélula com altura de 10 cm	m ²	1,05	R\$ 22,00	R\$ 15,00	R\$ 11,00	R\$ 23,10	R\$ 15,75	R\$ 11,55
	Material de preenchimento: Brita 3	m ³	0,110	R\$ 87,74	R\$ 87,74	R\$ 87,74	R\$ 9,65	R\$ 9,65	R\$ 9,65
	Aço CA - 50 8mm	barra	0,11	R\$ 41,05	R\$ 41,05	R\$ 41,05	R\$ 4,52	R\$ 4,52	R\$ 4,52
	Geotêxtil usado como filtro em substituição à transição granulométrica e como proteção à erosão em canais revestidos com geocélula - 150gr/ m ²	m ²	1,1	R\$ 4,54	R\$ 4,54	R\$ 4,54	R\$ 4,99	R\$ 4,99	R\$ 4,99
Mão de Obra	Encarregado	hora	0,08	R\$ 34,27	R\$ 34,27	R\$ 34,27	R\$ 2,74	R\$ 2,74	R\$ 2,74
	Oficial	hora	0,08	R\$ 15,51	R\$ 15,51	R\$ 15,51	R\$ 1,24	R\$ 1,24	R\$ 1,24
	Ajudante	hora	0,32	R\$ 12,61	R\$ 12,61	R\$ 12,61	R\$ 4,04	R\$ 4,04	R\$ 4,04
Preço Total / m ²							R\$ 50,28	R\$ 42,93	R\$ 36,76

Observação:
Barra de aço CA-50 8mm (5/16"")=4,74 kg (0,395 kg/m) - R\$ 8,66/kg (barra + corte + dobramontagem)

Tabela 7 - Composição do preço do gabião colchão com 23 cm de altura.
Data base: 30/01/2014 | Praça: São Paulo | Fonte: Os preços dos serviços são resultantes das composições de custo estruturadas no TCP014 (Editora PINI), com aplicação de taxas de Leis Sociais de 129,34% em cidades com ambulatório SECONCI e de 127,95% nas demais cidades. Os preços não incluem BDI.

Tipo	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço	Total Parcial
	Fornecimento e colocação de Gabião tipo colchão com revestimento em PVC e malha hexagonal (diâmetro do fio: 2,00mm / dimensões da trama: 60x80mm / espessura: 230mm) - Gaiola vazia	m ²	-	-	-
Material	Gabião tipo colchão com revestimento em PVC e malha hexagonal (diâmetro do fio: 2,00mm / dimensões da trama: 60x80mm / espessura: 230mm) - Gaiola vazia	m ²	1,00	R\$ 57,58	R\$ 57,58
	Pinus - sarrafo 1" x 4" - bruto	m	1,400	R\$1,03	R\$ 1,44
	Pedra rachão (D: 10 a 15cm)	m ³	0,299	R\$ 69,21	R\$ 20,69
	Geotêxtil usado como filtro em substituição à transição granulométrica e como proteção à erosão em canais revestidos com gabiões	m ²	1,100	R\$ 4,54	R\$ 4,99
Mão de Obra	Ajudante	hora	1,035	R\$ 12,61	R\$ 13,05
	Oficial	hora	0,175	R\$ 15,51	R\$ 2,21
	Encarregado	hora	0,175	R\$ 34,27	R\$ 6,00
Preço Total / m ²					R\$ 105,97

Comparação de custo entre Geocélula preenchida com brita e Gabião Colchão

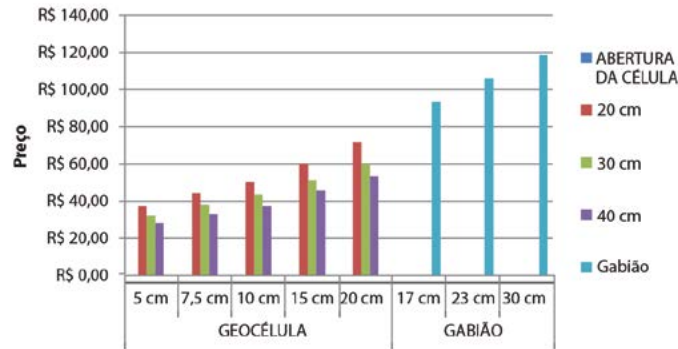


Figura 19

Comparação de custo entre Geocélula preenchida com concreto e Gabião Colchão

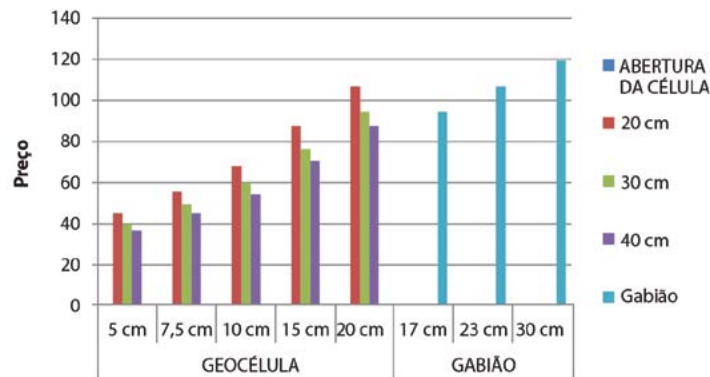


Figura 19

4.16.2. Comparação de custo entre StrataWeb preenchida com concreto e revestimento de concreto armado

Tabela 8 - Composição do preço da StrataWeb com 10 cm de altura, preenchida com concreto
Data base: 30/01/2014 | Praça: São Paulo | Fonte: Os preços dos serviços são resultantes das composições de custo estruturadas no TCP014 (Editora PINI), com aplicação de taxas de Leis Sociais de 129,34% em cidades com ambulatorio SECONCI e de 127,95% nas demais cidades. Os preços incluem BDI.

Tipo	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço Unitário			Preço total Parcial		
				Abertura 20 cm	Abertura 30 cm	Abertura 40 cm	Abertura 20 cm	Abertura 30 cm	Abertura 40 cm
	Revestimento de geocélula com altura de 10cm preenchida com concreto usinado	m ²	-						
Material	Geocélula com altura de 10 cm	m ²	1,05	R\$ 22,00	R\$ 15,00	R\$ 11,00	R\$ 23,10	R\$ 15,75	R\$ 11,55
	Material de preenchimento: concreto dosado em central fck=15Mpa	m ³	0,110	R\$ 243,96	R\$ 243,96	R\$ 243,96	R\$ 26,84	R\$ 26,84	R\$ 26,84
	Aço CA - 50 8mm	barra	0,11	R\$ 41,05	R\$ 41,05	R\$ 41,05	R\$ 4,52	R\$ 4,52	R\$ 4,52
	Geotêxtil usado como filtro em substituição à transição granulométrica e como proteção à erosão em canais revestidos com geocélula - 150gr/m ²	m ²	1,1	R\$ 4,54	R\$ 4,54	R\$ 4,54	R\$ 4,99	R\$ 4,99	R\$ 4,99
Mão de Obra	Encarregado	hora	0,08	R\$ 34,27	R\$ 34,27	R\$ 34,27	R\$ 2,74	R\$ 2,74	R\$ 1,01
	Oficial	hora	0,08	R\$ 15,51	R\$ 15,51	R\$ 15,51	R\$ 1,24	R\$ 1,24	R\$ 1,01
	Ajudante	hora	0,32	R\$ 12,61	R\$ 12,61	R\$ 12,61	R\$ 4,04	R\$ 4,04	R\$ 4,04
Preço Total / m ²							R\$ 67,46	R\$ 60,11	R\$ 53,95

Observação:

Barra de aço CA-50 8mm (5/16"")=4,74 kg (0,395 kg/m) - R\$ 8,66/kg (barra + corte + dobramontagem)

Tabela 9 - Composição do preço do concreto armado com 10cm de espessura
 Data base: 28/02/2014 | Praça: São Paulo | Fonte: Os preços dos serviços são resultantes das composições de custo estruturadas no TCP014 (Editora PINI), com aplicação de taxas de Leis Sociais de 129,34% em cidades com ambulatório SECONCI e de 127,95% nas demais cidades. Os preços não incluem BDI.

Tipo	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço	Total Parcial
	Revestimento de canal com concreto usinado - Espessura 10cm	m ²	-	-	-
Material	Concreto estrutural dosado em central, fck 15 MPa, abatimento 8 + ou - 1cm	m ³	0,105	R\$ 243,96	R\$ 25,62
	Aplicação de concreto e adensamento com vibrador de imersão com motor à gasolina	m ³	0,100	R\$ 81,88	R\$ 8,19
	Armadura de tela de aço CA-60 Ø 4,20mm, malha de 15 x 15cm	m ²	1,030	R\$ 10,18	R\$ 10,49
	Forma de madeira para piso de concreto com sarrafo de 2,5 x 7,5 cm, e aproveitamentos	m ²	1,000	R\$ 7,96	R\$ 7,96
Mão de Obra	Ajudante	hora	2,000	R\$ 12,61	R\$ 25,22
	Oficial	hora	1,000	R\$ 15,73	R\$ 12,61
	Encarregado	hora	1,000	R\$ 34,27	R\$ 34,27
Preço Total / m ²					R\$ 124,35

Comparação de custo entre revestimento de Concreto Armado e Geocélula preenchida com concreto

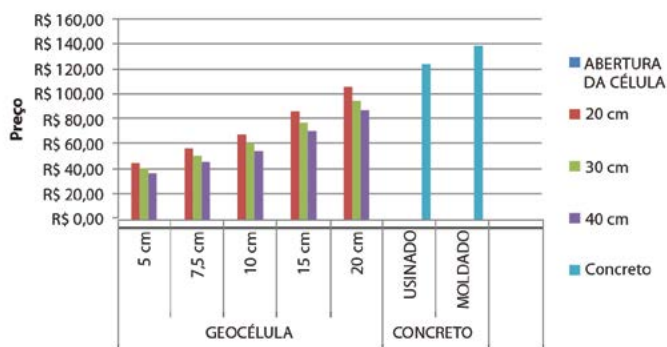


Figura 19

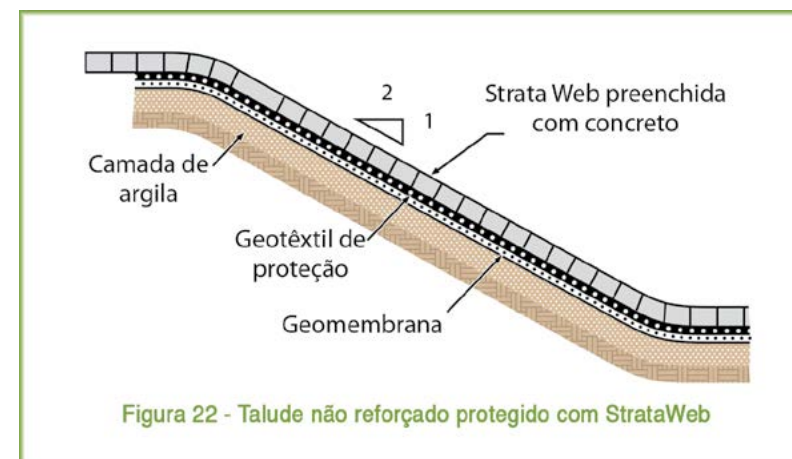
5. Geocélulas no revestimento e proteção de taludes

5.1. Introdução

A geocélula StrataWeb é uma excelente alternativa para sistema de controle de erosão de taludes de aterro e de corte em geral, não reforçados, **figura 22**, ou reforçados, **figura 23**, utilizando como material de preenchimento material granular, concreto, vegetação, Resíduo da Construção e Demolição (RCD) ou o próprio solo local. As propriedades de confinamento e drenagem da geocélula, quando incorporada ao material de preenchimento, minimizam os efeitos da erosão e promovem proteção de longo prazo na face do talude.

O projeto do sistema de confinamento celular StrataWeb para proteção e revestimento de taludes requer a análise de várias características do local. O comprimento, a altura, o ângulo de inclinação e da superfície de ruptura interna do talude são parâmetros importantes para a escolha da altura da célula e da ancoragem mais apropriada.

A geocélula StrataWeb melhora o desempenho a longo prazo dos taludes vegetados por reforçar as raízes e direcionar o fluxo hidráulico sobre o topo das células, com estas funcionando como uma série de barragens, e também evitando a formação de sulcos e ravinas. Richardson (2004) comenta que a altura da célula, neste caso, é função do ângulo de inclinação do talude e da profundidade que a raiz penetrará no solo de apoio da geocélula. Se o solo de apoio não é adequado para plantio de vegetação, a altura da célula deve ser selecionada de acordo com a necessidade de enraizamento e estabelecimento da vegetação. No caso das raízes penetrarem no solo de apoio, a altura da célula pode ser reduzida. Esta última condição é preferível, pois as raízes proporcionarão uma ancoragem de longo prazo reforçada pela geocélula. Parece ser irrelevante se as paredes das células são lisas ou texturizadas nesta aplicação. Uma superfície de talude que precisa de uma proteção com geocélula geralmente tem drenagem deficiente. Neste caso, o uso de células perfuradas permitirá a drenagem da água paralela ao talude.



A geocélula StrataWeb melhora o desempenho dos taludes, quando preenchida com material granular, por controlar a perda do enchimento, que de outra forma seria iniciado devido às forças hidráulicas e gravitacionais. Isso é obtido pela dissipação da energia hidráulica através e sob as células e pelo confinamento do material de preenchimento dentro destas.

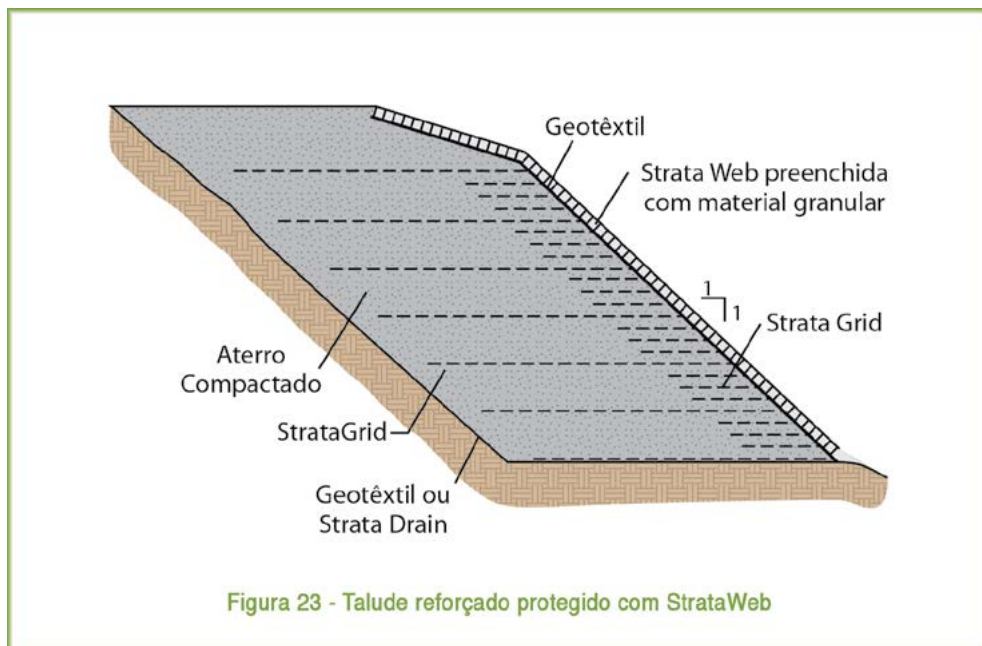


Figura 23 - Talude reforçado protegido com StrataWeb

5.2. Escolha do material de preenchimento, altura, ancoragem e instalação da geocélula StrataWeb

Na aplicação da geocélula StrataWeb para revestimento e proteção de taludes, para a escolha do material de preenchimento deve-se observar as recomendações do item 3.4. Algumas das etapas de projeto, como a escolha do tipo de geocélula, método de ancoragem e instalação são similares às etapas da aplicação em revestimento de canais, item 4, conforme indicado a seguir:

- Altura da célula: item 4.5
- Ancoragem: item 4.6
- Canaleta de ancoragem: item 4.7
- Grampos de ancoragem dos painéis da geocélula: item 4.8
- Grampos de união de painéis da geocélula: item 4.9
- Cabos e grampos de ancoragem: item 4.10
- Método de ancoragem: item 4.11
- Instalação da geocélula StrataWeb usando cabos de ancoragem: item 4.12
- Sequência executiva: item 4.13

5.3. Dimensionamento da geocélula StrataWeb para revestimento e proteção de taludes

O dimensionamento da StrataWeb em taludes pelo método de Rimoldi e Ricciuti (1994) analisa a estabilidade da geocélula ao longo (bloco central), na crista e no pé do talude.

5.3.1. Verificação da estabilidade ao longo do talude (bloco central)

O peso P do bloco central CDEF da geocélula preenchida com solo, figura 24, pode ser escrito como:

equação (8)

$$P = \gamma L H$$

Sendo:

γ = peso específico do solo de preenchimento (kN/m³)

L = comprimento do talude (m)

H = altura da geocélula (m)

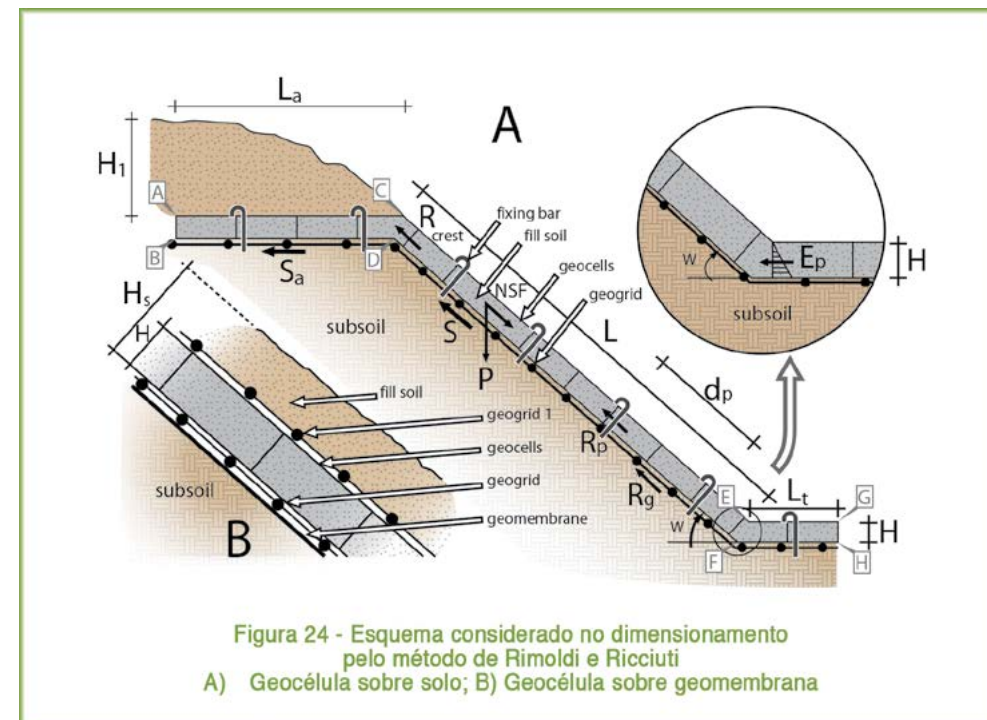


Figura 24 - Esquema considerado no dimensionamento pelo método de Rimoldi e Ricciuti
A) Geocélula sobre solo; B) Geocélula sobre geomembrana

Portanto, a força de deslizamento NSF pode ser calculada como segue:

equação (9)

$$NSF = P \operatorname{sen} w$$

Em que:

w = ângulo de inclinação do talude.

A força resistente total R_T é obtida pela somatória de todas as forças resistentes parciais:

equação (10)

$$R_T = S + \frac{R_{crista}}{FS_j} + \frac{R_P}{FS_j} + R_g + E_F$$

Em que:

equação (11)

$$S = \gamma L H \cos w \tan \phi = \text{resistência de atrito na interface}$$

ϕ = ângulo de atrito de interface entre o solo de preenchimento e o solo de apoio da geocélula, **figura 24A**, ou ângulo de atrito de interface entre a geocélula – geogrelha – geomembrana, **figura 24B**.

5.3.2. Verificação da estabilidade na crista do talude

equação (12)

$$R_{crista} = n_j J_{min}$$

R_{crista} é a resistência na crista resultante da soma de todas as resistências das soldas.

Em que:

n_j = número de soldas por unidade de largura da geocélula (m-1)

J_{min} = resistência mínima da solda (kN/solda)

FS_j = fator de segurança contra a ruptura da solda, que considera a possibilidade de danos na instalação e o efeito de longo prazo do solo e dos grampos na resistência das juntas.

O valor do FS_j deve ser no mínimo 1,5.

A resistência da solda J_{min} é avaliada através de ensaios específicos de laboratório: cisalhamento e descolamento. Os valores das resistências ao cisalhamento e descolamento das soldas devem ser fornecidos e garantidos pelo fabricante da geocélula.

Além da resistência das soldas, a resistência adicional fornecida pela transferência de carga através da fixação dos grampos é dada por:

equação (13)

$$R_p = b J_p$$

Em que:

b = número de grampos por unidade de largura do talude, distribuídos ao longo do comprimento do talude, L (m^{-1})

J_p = resistência ao cisalhamento das soldas da geocélula sob a tensão aplicada pelos grampos (kN/solda)

Tal qual a resistência da solda J_{min} , J_p é avaliada através de ensaios específicos de laboratório: cisalhamento e descolamento, e seus valores devem ser fornecidos e garantidos pelo fabricante da geocélula.

O espaçamento d_p (m) entre os grampos colocados ao longo do talude é avaliado por:

equação (14)

$$d_p = \frac{L}{b}$$

Os grampos devem ser colocados desencontrados e em múltiplos mais próximo do diâmetro da célula da geocélula, o qual é menor que d_p .

Para geogrelha: $R_g = a_{2\%}$

Com $a_{2\%}$ = resistência à tração da geogrelha a 2% de deformação (somente se a geogrelha for colocada sob a geocélula).

O uso da geogrelha é recomendado quando o talude é íngreme ou quando há uma geomembrana sob a geocélula, com conseqüente redução do ângulo de atrito na interface.

A resistência à tração da geogrelha a 2% de deformação é recomendada como parâmetro de dimensionamento, porque, baseado em observações de campo, é de fundamental importância, para haver estabilidade, que ocorra deslocamentos mínimos na interface.

Finalmente, a resistência passiva proporcionada pelas células adjacentes no pé do talude é dada por:

equação (15)

$$E_p = \frac{1}{2} k_p \gamma H^2 = \frac{1}{2} \gamma \tan^2 (45^\circ + \phi/2) H^2$$

Em que: ϕ = ângulo de atrito do solo de preenchimento (°)

O fator de segurança global, FS_g , deve ser calculado como a razão entre as forças resistentes e as forças atuantes, e deve ser no mínimo 1,5:

equação (16)

$$FS_g = \frac{R_T}{NFS}$$

5.3.3. Verificação da estabilidade da ancoragem do bloco ABCD na crista do talude

A análise da estabilidade ao longo do talude permite a escolha do tipo de geocélula adequado às condições locais e o cálculo do espaçamento entre os grampos, enquanto a análise da estabilidade da ancoragem do bloco central ABCD (**figura 24A**) permite determinar a largura da canaleta de ancoragem para uma profundidade preestabelecida ou vice-versa. É importante notar que, na análise do bloco central, mesmo considerando R_{crista} como sendo função somente da resistência das soldas, na análise da ancoragem, deve ser considerada uma força ativa maior, porque as tiras individuais da geocélula podem ser localmente tensionadas com uma solitação maior que R_j . Este fato foi registrado em várias observações de campo.

O fator de segurança para a ancoragem do bloco deve ser:

equação (17)

$$FS_a = \frac{S_a}{(NFS - S) \cos w}$$

Em que:

S_a é a componente horizontal da força resistente oriunda da canaleta de ancoragem.

equação (18)

$$S_a = \gamma H_t L_a \tan \phi_{ia}$$

Sendo:

L_a = comprimento de ancoragem

H_t = profundidade da canaleta de ancoragem

ϕ_{ia} = ângulo de atrito na interface solo de preenchimento x solo de apoio da geocélula na crista.

No denominador a força de deslizamento é subtraída da força resistente de atrito.

Das **equações (17) e (18)**, quando H_t é substituído pelo valor originado da geometria do projeto, pode-se calcular o comprimento de ancoragem:

equação (19)

$$L_a = \frac{FS_a (NFS - S) \cos w}{H_t \tan \phi_{ia}}$$

Em que:

FS_a deve ser 1,5, no mínimo.

Em qualquer caso, L_a deve ter um valor de no mínimo 0,75 m.

5.3.4. Verificação da estabilidade no pé do talude

O fator de segurança para a estabilidade do bloco do pé EFGH (**figura 24A**) é calculado como:

equação (20)

$$FS_t = \frac{S_t}{E_p}$$

Em que:

equação (21)

$$S_t = \gamma H L_t \tan \phi_{ia}$$

Sendo L_t = comprimento de ancoragem no pé do talude (m), e pode ser calculado como:

equação (22)

$$L_a = \frac{FS_t E_p}{H \tan \phi_i}$$

Sendo que:

FS_t deve ter um valor mínimo de 1,5, e L_t deve ser no mínimo 1,0 m.

Uma alternativa para ancoragem de pé é embutir a geocélula num suporte rígido, como uma parede pequena ou um bloco de concreto maciço.

5.3.5. Verificação da estabilidade do solo de cobertura

Em alguns projetos a espessura do solo de cobertura é maior do que a espessura da geocélula. Nesses casos deve ser avaliada a estabilidade do solo de cobertura na interface com a face superior da geocélula (**figura 24B**), que corresponde à superfície C-E na **figura 24A**.

A força de deslizamento nesse caso é:

equação (23)

$$NSF_1 = \gamma L (H_s - H)$$

Em que:

H_s = espessura total do solo de cobertura (m).

A força resistente total é avaliada como:

equação (24)

$$R_{T1} = S_1 + E_{pl} + R_{g1}$$

Sendo que a resistência de atrito S_1 é:

equação (25)

$$S_1 = \gamma (H_s - H) L \cos w \tan \phi$$

Portanto, a resistência proveniente do bloco de pé é:

equação (26)

$$E_{p1} = \frac{1}{2} \tan^2 (45^\circ + \phi/2) (H_s - H)^2$$

Se for utilizada uma geogrelha no topo da geocélula, (**geogrelha 1 na figura 24B**) a força resistente é avaliada por:

equação (27)

$$R_{g1} = (a_{2\%})_1$$

Com $(a_{2\%})_1$ = resistência à tração da geogrelha 1 a 2% de deformação.

O fator de segurança, nesse caso, é dado por:

equação (28)

$$FS_1 = \frac{R_{T1}}{NSF_1}$$

FS_1 deve ter um valor mínimo de 1,3.

5.3.6. Resumo do procedimento de dimensionamento

Baseado nas equações (8) a (28), o procedimento de dimensionamento da geocélula StrataWeb em taludes, pelo método de Rimoldi e Ricciuti é composto das seguintes etapas:

1. Determinar as características do solo de apoio e o ângulo de atrito de interface.
2. Determinar a força de deslizamento NSF pela **equação (9)**.
3. Selecionar o tipo de geocélula, estabelecer o fator de segurança requerido para as soldas FS_j e estabelecer o número de grampos b .
Não incluir a geogrelha nesta etapa, adotando portanto, $R_g = 0$.
4. Calcular a força resistente global R_T através das **equações (10) a (15)**.
5. Determinar o fator de segurança global FS_g , através da **equação (16)**.
6. Se FS_g for menor que 1,5, aumentar o número de grampos ou inserir uma geogrelha sob a geocélula. Definir b (número de grampos) e $a_{2\%}$ (resistência à tração da geogrelha a 2% de deformação) por tentativas, até que o fator de segurança requerido seja atingido.

Um processo rápido é estabelecer o número de grampos b através da **equação (14)**, atribuindo a d_p um valor variando entre 2 e 3 diâmetros de célula; então a resistência à tração requerida para a geogrelha pode ser facilmente calculada como:

equação (29)

$$a_{2\%} = FS_g NFS - \left(\frac{S + R_{crista}}{FS_j} + \frac{R_p + P_p}{FS_j} \right)$$

Em que: FS_g é estabelecido no valor mínimo requerido.

7. Determinar L_a através da **equação (19)**.
8. Calcular L_t pela **equação 22** com a **equação (15)**.
9. Quando a espessura do solo de preenchimento for maior que a altura da geocélula, calcular FS_1 com as **equações (23) a (28)**, adotando inicialmente $R_{g1} = 0$.
10. Se FS_1 for menor do que o valor requerido, calcular a resistência à tração necessária a 2% de deformação como:

equação (30)

$$(\alpha_{2\%})_1 = FS_1 NFS_1 - (S_1 + P_{p1})$$

Onde o valor de FS_1 adotado deve ser o mínimo exigido.

5.4. Composição de custos

A **tabela 5**, já apresentada no item 4.15, mostra a composição de custos, por área (m^2 de StrataWeb) para as quatro alturas que a StrataWeb está disponível no mercado, considerando perdas estimadas.

Tabela 5. Composição de custo da StrataWeb

DESCRIÇÃO	UNIDADE m^2	Geocélula			
		7,5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
MATERIAIS					
Geocélula	m^2	1.05	1.05	1.05	1.05
Material de preenchimento	m^3	0.083	0.110	0.165	0.220
Aço CA-50 8mm	barra	0.11	0.11	0.11	0.11
Geotêxtil não tecido 150 g/m ²	m^2	1.1	1.1	1.1	1.1
MÃO DE OBRA					
Encarregado de Obra	hora	0.08	0.08	0.08	0.08
Oficial	hora	0.08	0.08	0.08	0.08
Ajudante	hora	0.32	0.32	0.32	0.32

6. Estruturas de contenção com geocélulas

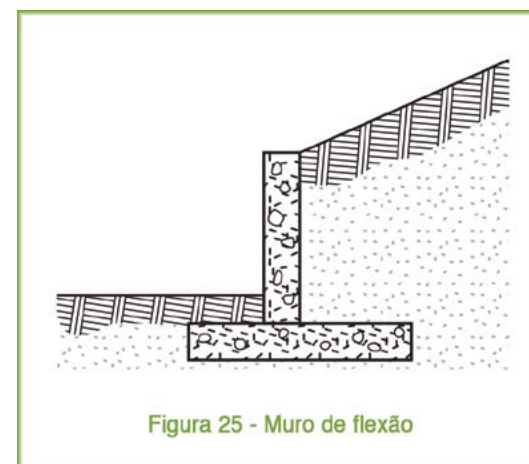
6.1. Introdução

A construção de muros de contenção e de diques pode ser executada com painéis de geocélula StrataWeb dispostos uns sobre os outros. A estrutura construída com StrataWeb pode ser projetada como um muro de gravidade ou a face de uma estrutura de solo reforçado com geossintéticos. Nos dois casos as faces das estruturas podem ser vegetadas, preenchendo-se as células externas aparentes com solo e vegetação, ou podem formar uma estrutura mais rígida, preenchendo-se as células externas com concreto. Richardson (2004) comenta que, embora os fabricantes de geocélula indiquem que muros de gravidade com geocélula possam ser construídos até uma altura de 6 metros, o projetista deve fazer uma análise comparativa de custo dessa solução com a de uso da geocélula apenas na face da estrutura de solo reforçado com geossintéticos, para alturas a partir de 3 metros.

6.2. Conceito e Aplicações

A crescente escassez de áreas acessíveis para construção está levando engenheiros, empreiteiras e projetistas a buscar soluções inovadoras para usar menores parcelas das áreas disponíveis, ou usar áreas com terreno acidentado e/ou taludes íngremes que antigamente eram consideradas inadequadas para construir. Muitas destas áreas podem ser tornadas praticamente planas e, portanto apropriadas para uso através de estruturas como muros de contenção e retaludamento.

Os tipos básicos de muros de contenção são mostrados na **figura 25**: muro de flexão, e na **figura 26**: muro de gravidade. A maioria dos muros de flexão é construída com concreto armado moldado no local. Esse tipo de estrutura retém o solo devido à sua rigidez e resistência interna. Paredes de concreto armado são estruturas caras, não têm aparência agradável e, se as tensões, resultantes de recalque diferencial, excederem à resistência do concreto, aparecerão trincas que afetarão a estabilidade e a aparência da estrutura.



Muros de gravidade são estruturas corridas que se opõem aos empuxos horizontais pelo peso próprio. Geralmente, são utilizadas para conter desníveis pequenos ou médios, inferiores a 5 metros. A estrutura de gravidade construída com a geocélula StrataWeb tem a flexibilidade que permite o seu ajuste a pequenos recalques diferenciais, sem que haja dano estrutural.



Figura 26 - Muro de gravidade

A geocélula StrataWeb pode também ser usada para construir um talude íngreme, **figura 27**, o qual pode ser construído com uma inclinação muito maior do que se conseguiria num talude com solo. Um talude íngreme construído com StrataWeb pode ser considerado um muro de contenção com inclinação da face maior que 25°.



Figura 27 - Talude íngreme com StrataWeb

6.3. Contenções com geocélula StrataWeb

Um muro de contenção ou um talude íngreme pode ser construído com StrataWeb em quase todas as situações onde se pretende fazer uma rápida alteração de nível do terreno. StrataWeb confina o solo ou outro material de preenchimento fazendo com que esse material se comporte como uma massa reforçada.

StrataWeb pode ser usada tanto em aplicações de corte como de aterro. Em projetos de contenção com aterro, o uso da StrataWeb em conjunto com uma geogrelha tem melhor custo-benefício. A geogrelha atua como reforço e a StrataWeb atua como elemento de face, tal como blocos de concreto modulares num muro de contenção. Ao contrário dos blocos, a geocélula StrataWeb é fácil de manusear, flexível, e pode ser vegetada com grama ou arbustos, para dar uma aparência natural e agradável, **figura 28**.



Figura 28 - Face vegetada de muro de contenção com StrataWeb



Figura 29 - Geocélula StrataWeb usada na reposição de peso no pé de um talude de corte

Em taludes de corte, a face cortada pode ficar instável no pé do talude pela falta de confinamento. A geocélula StrataWeb é uma alternativa econômica em relação ao gabião caixa, para ser usada na reposição do peso no pé do talude. Nessa aplicação painéis empilhados de StrataWeb comportam-se como uma massa reforçada quase vertical, **figura 29**.

6.4. Dimensionamento

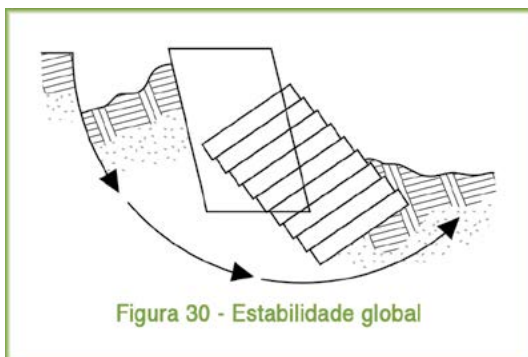
Um muro de gravidade deve ser estável em relação às forças externas e às forças internas atuantes, que podem causar sua ruptura.

6.4.1. Estabilidade externa

Muros de contenção com geocélula StrataWeb devem ser dimensionados em relação a quatro modos potenciais de ruptura externa: estabilidade global, escorregamento da base, tombamento e capacidade de carga do solo de apoio. Para essas verificações podem ser empregadas as metodologias tradicionais de muros de arrimo de gravidade descritas na literatura técnica.

• Estabilidade global

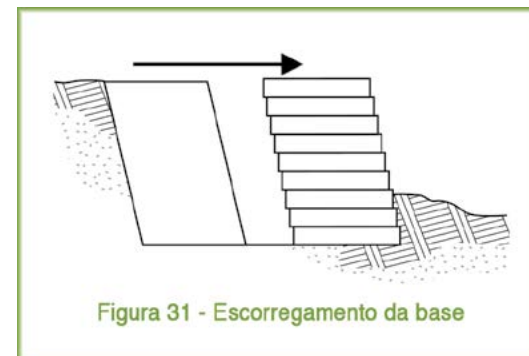
A estabilidade global é referente à estabilidade do muro, do solo atrás do muro e do solo sob o mesmo, **figura 30**. O projetista deve verificar se toda a área, incluindo o muro, é estável e não sofrerá ruptura. Deve ser efetuada também uma análise de estabilidade interna do solo, para eliminar a possibilidade de ruptura global.



• Escorregamento da base

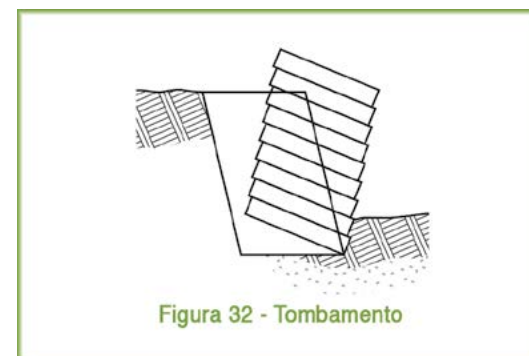
O escorregamento da base resulta das forças laterais oriundas do empuxo e da água, se houver. A força resistente ao escorregamento da base será proveniente do atrito entre o material de preenchimento do último painel da geocélula StrataWeb e o solo de apoio deste, **figura 31**.

O projetista deve aumentar as dimensões do muro, se a força resistente for menor do que a requerida para haver estabilidade, de forma que, com o aumento da área de contato, aumente a força resistente. Uma opção alternativa é usar material de preenchimento com maior característica de atrito.



• Tombamento

Verifica-se a possibilidade de tombamento do muro em torno do seu pé, **figura 32**. A força de tombamento será a soma de cada força atuante multiplicada pelo braço do momento. A força resistente será o produto do peso do muro multiplicado pelo braço do momento que é a distância horizontal do pé até o centro do muro de gravidade. Se o cálculo mostrar que o momento atuante é menor que o requerido, uma alternativa é aumentar a dimensão do muro, aumentando assim o peso e o braço do momento.



• Capacidade de carga do solo de apoio

Refere-se à verificação da capacidade do solo de apoio de suportar o peso do muro, **figura 33**. A análise é a mesma que se faz para fundações diretas. Se o cálculo mostrar que o solo de apoio não é capaz de suportar o peso do muro será necessário aumentar as dimensões da base. Isso diminuirá a pressão (força por unidade de área) exercida no solo, pela base do muro. Outra opção seria aumentar a profundidade da base do muro no solo para alcançar um solo mais resistente.



Figura 33 - Capacidade de carga

Para cada uma das verificações quanto à estabilidade, as forças resistentes devem exceder as forças atuantes que poderão causar a ruptura, por meio de um fator de segurança. A seleção dos fatores de segurança deve ser em função das consequências que uma ruptura teria e da confiança do projetista nos parâmetros utilizados no cálculo. Os fatores de segurança mostrados a seguir são geralmente usados no projeto de muros de gravidade:

- Estabilidade global: $FS_{gl} = 1,5$
- Escorregamento da base: $FS_{esc} = 1,5$
- Tombamento: $FS_{tomb} = 2,0$
- Capacidade de carga do solo de apoio: $FS_{cc} = 3,0$

Sempre que a dimensão mínima, da face até a parte de trás do muro, for maior ou igual a 60% a dimensão da altura do muro, os fatores de segurança acima citados podem ser utilizados nos projetos.

6.4.2. Estabilidade interna

A estabilidade interna refere-se à habilidade das partes individuais do muro atuarem como uma unidade única. O muro deve ser projetado de forma que cada parte individual não se solte, escorregue ou se separe do corpo do muro. Num muro de bloco modular em solo reforçado, o projetista deve se preocupar com o potencial de desprendimento dos blocos sob tensão ou com o arrancamento em relação à face ou ao solo. A ruptura também pode ocorrer se o bloco da face for empurrado para fora do muro, **figura 34**. No caso da verificação da estabilidade interna de muros construídos com a geocélula StrataWeb, a única verificação a ser feita é o escorregamento potencial entre painéis, **figura 35**. Se um fator de segurança de 1,5 ou maior não for atingido no projeto inicial, as seções precisam ser maiores para aumentar a área da superfície ou deve-se usar um material de preenchimento que tenha maior características de atrito.

NOTA: Para obter as diretrizes detalhadas do projeto de muros de contenção utilizando a geocélula StrataWeb, faça contato com o departamento técnico da Geo Soluções.

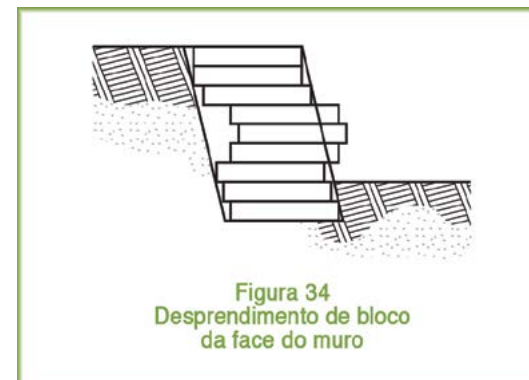


Figura 34
Desprendimento de bloco
da face do muro

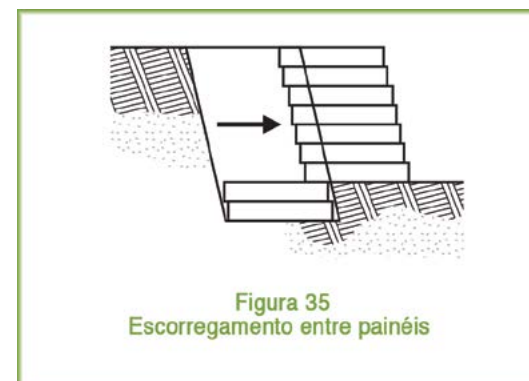


Figura 35
Escorregamento entre painéis

6.5. Sequência executiva

6.5.1. Verificação prévia

- Assegure-se de que as condições locais da obra e o planejamento da instalação do muro de contenção do sistema StrataWeb estejam de acordo com os detalhes do projeto.
- Assegure-se de que todos os materiais e componentes do sistema StrataWeb estejam disponíveis no local da obra.

6.5.2. Preparação do local e da superfície de apoio

- Inicie a preparação para a instalação do muro de contenção do sistema StrataWeb pela limpeza da área e remoção da vegetação.
- Conclua os serviços de terraplenagem, escavação ou aterro de acordo com o projeto.
- Remova o solo que não é adequado para a fundação do muro de contenção do sistema StrataWeb e substitua-o pelo material especificado no projeto.
- Prepare o solo de fundação do muro, como recomendado no projeto, antes da colocação da base do muro.

6.5.3. Instalação da base do muro de contenção

- Abra e posicione os painéis da geocélula StrataWeb especificada para a base, conforme o projeto.
- Mantenha os painéis da base da StrataWeb abertos por meio de uma das seguintes opções:
 - Estacas retas ou grampos J
 - Quadro de madeira com as dimensões do painel, **figura 36**
 - Outras opções
- Preencha os painéis de StrataWeb da base do muro com o material especificado até aproximadamente 50 milímetros acima do topo da célula, **figura 37**.
- Coloque o solo de aterro em torno dos painéis de StrataWeb da base do muro, tomando o cuidado para que a colocação desse material não interfira na colocação do sistema de drenagem, **figura 36**.
- Compacte o material de preenchimento e de aterro a 95% PN usando equipamentos convencionais, **figura 38**.



Figura 36 - Quadro de madeira para manter o painel de geocélula aberto



Figura 37 Preenchimento dos painéis da base



Figura 38 Compactação do material de preenchimento



Figura 39 Muro de contenção com StrataWeb parcialmente construído

6.5.4. Instalação do sistema de drenagem

- Instale os tubos de drenagem sub-horizontais especificados na cota e no local mostrados nas plantas do projeto, assegurando que um gradiente mínimo de 2% seja mantido em toda a extensão e em todas as saídas.
- Assegure que todas as conexões dos tubos sejam efetuadas de forma apropriada e que os drenos sub-horizontais sejam conectados aos tubos de saída ou a um sistema de drenagem sub superficial.
- Onde especificado, envelope o dreno sub-horizontaI junto com o material drenante (areia, brita, cascalho, etc.) num geotêxtil.
- Envolve todos os tubos de drenagem sub-horizontaI, que saem na face do muro, com um geotêxtil adequado, para prevenir a perda de material de preenchimento das células.
- Verifique se a descarga dos tubos dreno sub-horizontais não causarão erosão localizada na face, que poderá afetar a estabilidade do muro de geocélula StrataWeb.

6.5.5. Proteção da escavação e drenagem

- Coloque um geotêxtil adequado sobre a base e no talude cortado atrás do muro de StrataWeb, onde estiver especificado.
- Instale os geocompostos drenantes onde estiver especificado. Assegure-se de que o sistema de drenagem é funcional e esteja conectado a uma saída adequada ou a um sistema de drenos sub-horizontais.

6.5.6. Instalação dos painéis de geocélula StrataWeb

- Abra e posicione os painéis da StrataWeb especificada, conforme o projeto.
- Mantenha os painéis da base da StrataWeb abertos por meio de uma das seguintes opções:
 - Estacas retas ou grampos J (permanentes ou temporários)
 - Quadro de madeira com as dimensões do painel, **figura 36**
- Verifique que cada painel de geocélula StrataWeb esteja totalmente aberto.
- Corrija o alinhamento e as bordas externas dos painéis adjacentes e assegure que a superfície superior dos painéis adjacentes esteja nivelada.
- Fixe as bordas externas dos painéis adjacentes com grampos ou como especificado no projeto executivo.
- Preencha os painéis de StrataWeb com o material de preenchimento especificado, nivelando-o numa altura de aproximadamente 50 milímetros acima do topo da célula.
- Compacte o material de preenchimento a 95% PN usando equipamentos e métodos convencionais de compactação.
- Coloque o solo de reaterro especificado atrás dos painéis instalados de StrataWeb e compacte a 95% PN.
- Nas áreas de corte, leve o reaterro até facear o talude cortado.
- Nas áreas de aterro, coloque o solo de aterro conforme especificado no projeto executivo.

- Equipamentos pesados de compactação podem ser usados para compactar o reaterro até uma distância de um metro dos painéis de StrataWeb. Para compactação próxima aos painéis devem ser usados compactadores leves, os quais também devem ser utilizados para compactar o material de preenchimento, **figura 38**.
- Após a compactação de cada camada, remova do topo da StrataWeb o material em excesso, de forma que o topo da geocélula fique visível, **figura 39**.
- Quando posicionar a próxima camada de painéis, assegure-se de que:
 - A condição de apoio de cada camada seja mantida;
 - O alinhamento das células seja mantido para evitar a perda do material de preenchimento.
- Na instalação de muros de StrataWeb muito íngremes, uma tira de 40 centímetros de geotêxtil não tecido deve ser colocada sobre a linha das células externas em cada camada, para prevenir a perda do material de preenchimento.
- Quando for exigido material especial de preenchimento (como solo superficial) na linha de células da face do muro, as seguintes técnicas de construção devem ser empregadas:
 - Cobrir as células externas com placas móveis para evitar que o material de preenchimento das células internas entre nas células que requerem preenchimento especial. Remover as placas após o fim da compactação e preencher as células vazias com o material especial;
 - As células externas podem ser dobradas e grampeadas com um grampo simples. Após as etapas de preenchimento e compactação das células internas, as células externas podem ser reabertas e preenchidas com o material especial;
 - Cada camada deve ser aberta e preenchida separadamente começando com a camada mais baixa até as camadas mais altas.

6.5.7. Instalação dos geossintéticos para reforço (quando especificado no projeto)

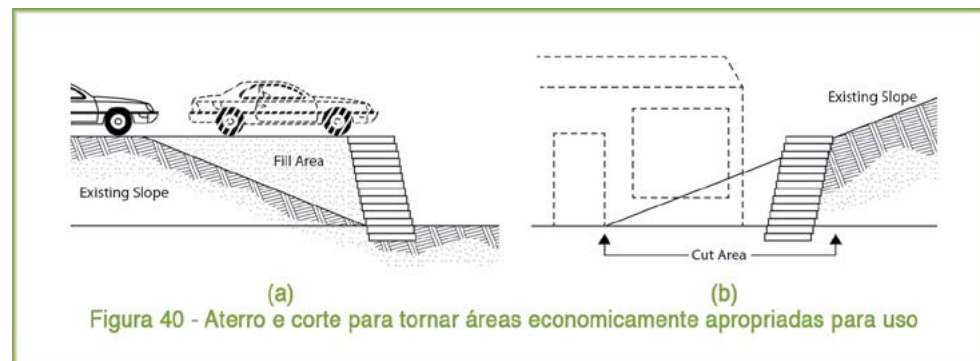
- Coloque os elementos do geossintético de reforço (geogrelha ou geotêxtil tecido), dimensionados e orientados de acordo com a planta do projeto executivo, entre as camadas indicadas da geocélula StrataWeb. É importante que as camadas de reforço sejam:
 - Colocadas horizontalmente, com o eixo da maior resistência perpendicular à face do muro.
 - Planas e livres de dobras após a colocação;
 - Colocadas de modo que a ponta extrema esteja a 150 milímetros, no mínimo, da face do muro, e se estenda horizontalmente na zona do aterro compactado.
- Coloque e preencha a próxima camada de geocélula StrataWeb.
- Puxe manualmente o reforço de volta a partir das seções do muro de StrataWeb colocadas.
- Fixe a extremidade traseira da camada de reforço, de modo que fique esticada e livre de dobras.

- Equipamento de compactação pé de carneiro deve operar na zona do aterro reforçado somente após ser colocado um recobrimento mínimo de 150 milímetros sobre a camada de reforço.
- Equipamento de compactação com pneu de borracha pode operar diretamente sobre o reforço, tomando-se o cuidado de evitar paradas bruscas e curvas fechadas.
- Coloque o aterro sobre o reforço em camadas de 250 milímetros, começando da parte de trás dos painéis de StrataWeb e espalhando o aterro até o final da zona reforçada.
- Assegure que não ocorra deslocamento excessivo do reforço durante a colocação do aterro.
- Compacte o aterro com 95% PN usando métodos e equipamento convencionais.
- Continue a sequência executiva até que o muro de contenção com StrataWeb esteja finalizado.

6.6. Vantagens econômicas das estruturas de contenção com geocélula StrataWeb

Em muitos projetos, como em alargamento de rodovias, são necessárias mudanças rápidas no nível do terreno, **figura 40 (a)**. Em outros tipos de projetos, como condomínios de apartamentos, onde há taludes íngremes, mudanças rápidas no nível do terreno são as formas mais eficientes de tornar a área do terreno economicamente viável para uso e construção, **figura 40 (b)**. Uma maneira rentável de se fazer uma rápida mudança de nível no terreno é através da construção de muros de contenção de gravidade reforçados ou taludes reforçados.

O uso da geocélula StrataWeb nessas estruturas de contenção, combinadas ou não com um reforço de geogrelha, pode ser tão eficaz quanto alternativas mais caras, como concreto moldado no local, muros de concreto armado, muros de blocos modulares ou gabiões. A geocélula StrataWeb é leve, fácil de manusear, pode ser preenchida com materiais locais e não requer equipamento especial para sua instalação.



6.7. Vantagens estéticas das estruturas de contenção com geocélula StrataWeb

As células externas dos painéis de StrataWeb podem ser preenchidas com solo superficial e vegetadas com grama, arbustos ou flores. Um muro ou um talude íngreme de StrataWeb vegetado integra a estrutura aos arredores, acrescenta um colorido na área e ameniza a aparência da face do muro. Além disso, um muro vegetado absorverá grande parte da água e da força com que esta fluirá através do talude. Isso tem um impacto benéfico significativo nas consequências de uma grande quantidade de água caindo numa face de um muro íngreme.

7. Suporte de carga

7.1. Introdução

Quando cargas de tráfego são aplicadas ao solo e transmitidas ao subleito, o solo não se deformará ou formará trilhas de rodas se a resistência ao cisalhamento do solo for maior que as cargas aplicadas. A resistência do solo é uma função de características como ângulo de atrito interno, coesão e grau de compactação.

A maioria dos sistemas de apoio de estradas e estacionamentos consiste de uma ou mais camadas de material de aterro de boa qualidade colocado e compactado sobre o solo do subleito. Os materiais de aterro permitem que o sistema de apoio suporte cargas de tráfego que somente o solo não seria capaz de suportar. A função da(s) camada(s) do material de base é distribuir as cargas aplicadas sobre uma área grande, reduzindo assim a pressão (carga dividida área), a qual é transferida para o subleito. O material da base é capaz de distribuir as cargas aplicadas porque as partículas individuais do agregado travam-se entre si. As cargas aplicadas são transmitidas através do material da base como forças verticais e horizontais.

Se as forças horizontais (laterais) empurram o material da base, desenvolve trilhas de rodas, resultando numa camada mais fina, menos capaz de resistir cargas adicionais aplicadas que acabam levando à ruptura da camada. Mesmo um material de base de boa qualidade, com resistência interna apropriada e com intertravamento das partículas, pode ser forçado a se mover lateralmente.

O material de má qualidade do subleito em contato com o material da base não fornece o ângulo de atrito adequado na interface para restringir o movimento.

7.2. Solução com geocélula StrataWeb em aplicações de estabilização/suporte de carga

Para prevenir o movimento lateral no fundo ou no interior da camada da base, tem-se utilizado há vários anos geogrelhas ou geotêxteis de alto módulo de rigidez (baixo alongamento). Devido à sua resistência, alongamento limitado e estrutura, esses geossintéticos têm boa capacidade de restringir movimentos laterais dos materiais de base, com os quais estão em contato. Embora esses geossintéticos sejam úteis em muitas aplicações de estabilização e suporte de carga, somente são eficazes quando em contato com os materiais/solo da base. A prevenção

do movimento lateral dos materiais da base acima e abaixo da linha de contato com os geossintéticos depende totalmente da qualidade do material da base. A geocélula StrataWeb é uma solução alternativa que incorpora o conceito do confinamento em duas dimensões (comprimento e largura) e estende esse conceito à terceira dimensão (profundidade). O confinamento horizontal e vertical de toda a profundidade da camada de base representa um salto quântico na teoria da estabilização e tem implicações importantes sobre custo-benefício e desempenho de longo prazo dos projetos.

Devido à resistência das paredes da célula ao movimento lateral, materiais de base de menor qualidade e de menor custo podem ser utilizados. Adicionalmente, o material da base poderá ter graduação mais aberta, a qual melhorará muito o sistema de drenagem, resultando numa longa vida de serviço da estrada ou do estacionamento. Se um estacionamento não for pavimentado, águas pluviais podem infiltrar no subleito, possibilitando a eliminação de uma bacia de detenção. Outro importante benefício da estabilização de solos com geocélula StrataWeb é a eficácia da geocélula em distribuir as cargas aplicadas sobre uma grande área. Como as células de um painel são conectadas umas às outras, cada painel de StrataWeb atua como um grande tapete ou colchão. StrataWeb reduz significativamente a pressão aplicada ao subleito pela carga atuante no topo da sua superfície. A vantagem é que a estabilização pode ser obtida com uma mínima quantidade de material usado junto com a geocélula StrataWeb.

7.3. Principais aplicações

7.3.1. Reforço de base e sub-base

- Pavimento poroso (**exemplo figura 41**)
- Sapatas corridas para blocos modulares de muros de contenção
- Suporte de tubulações e bueiros (**exemplo figura 42**)

7.3.2. Reforço de pavimentos (exemplo figura 43)

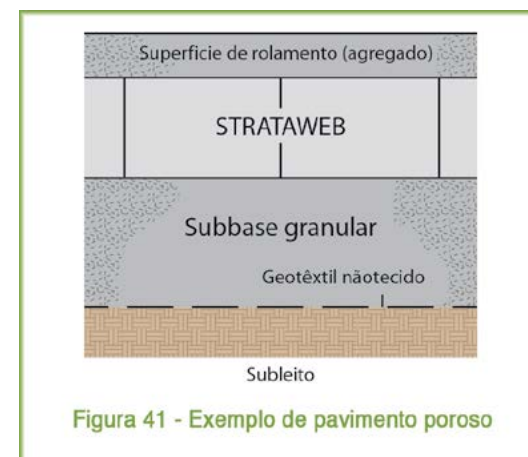
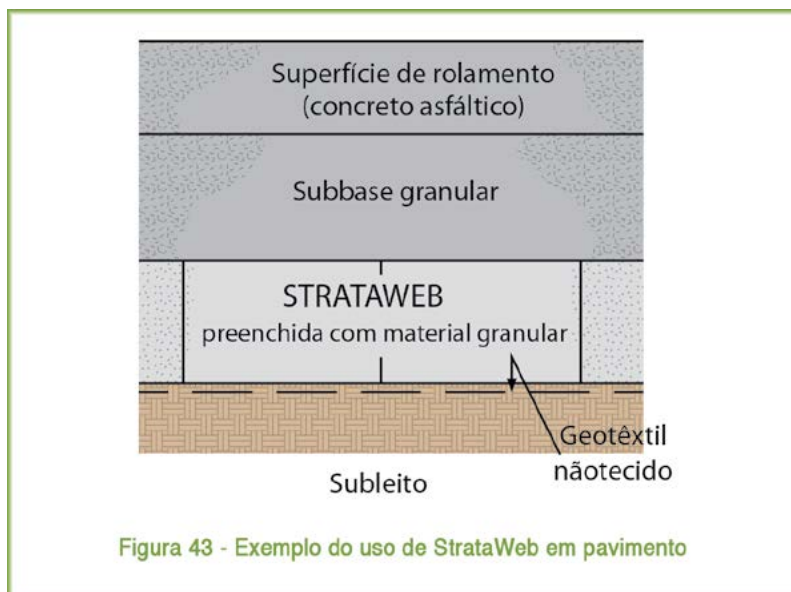
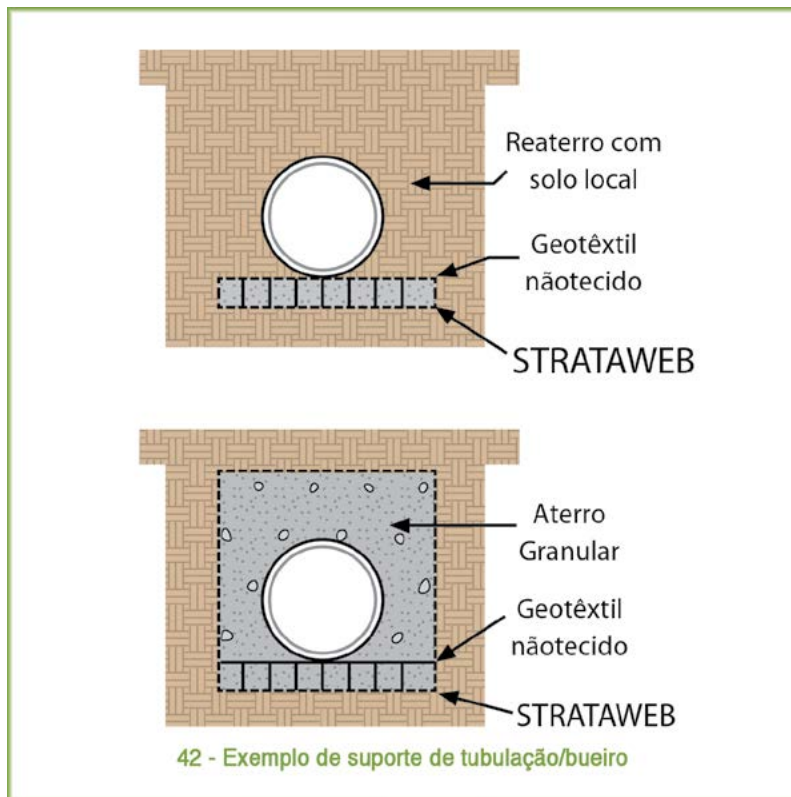


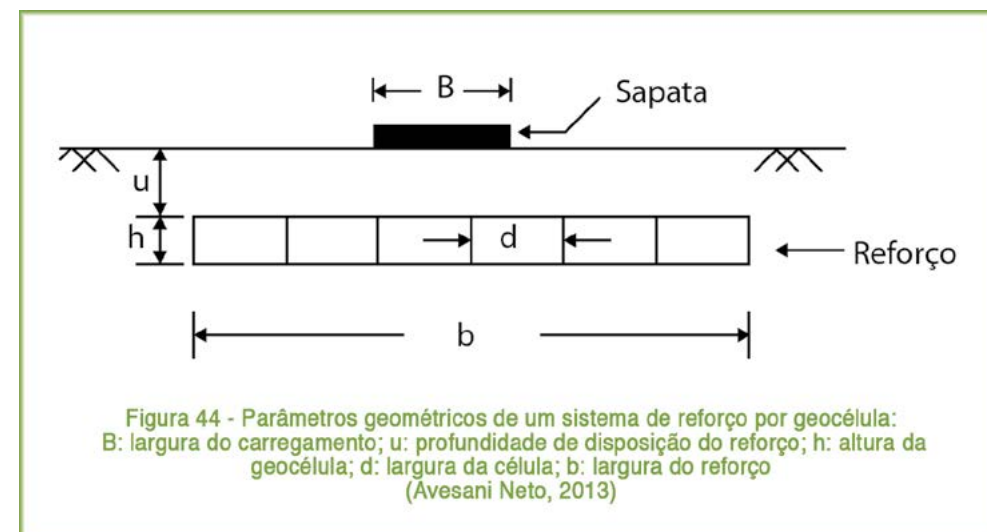
Figura 41 - Exemplo de pavimento poroso



7.4. Fatores que influenciam no reforço de solo com geocélula

7.4.1. Fatores do reforço de geocélula

Conforme Avesani Neto (2013), as características da geocélula que influenciam diretamente a capacidade de carga do sistema são: a forma, as dimensões, a quantidade de células, a geometria do reforço e o material de composição da célula (resistência/rigidez). A **figura 44** apresenta os parâmetros geométricos de um sistema de reforço por geocélulas.



As principais conclusões obtidas nesta parte da pesquisa de Avesani Neto foram as seguintes:

- A característica de maior influência no reforço com geocélula é devido à razão de forma da geocélula (h/d), seguida pela profundidade de embutimento do reforço (u), que foi reportado nos ensaios de diversos autores;
- Há um comportamento distinto entre geocélulas de reduzida ($h/d < 1$) e elevada ($h/d > 1$) razão de forma, sendo que para aquelas há uma maior participação do efeito do confinamento devido a uma maior “flexão” sofrida pelo reforço de geocélula (semelhante a uma viga), e nestas há um predomínio do efeito laje, com um espriamento mais uniforme das tensões (análogo a um bloco de fundação);
- A geocélula proporciona melhora no reforço de solo, mesmo quando preenchida com solos coesivos e saturados;
- A associação da geocélula com reforços planares aumenta ainda mais a melhora do reforço nos casos de geocélulas de reduzida razão de forma;
- O ângulo de espriamento das tensões verticais em reforços de geocélula é principalmente afetado pela razão de forma da célula, obtendo um valor ótimo para um $h/d = 1$.

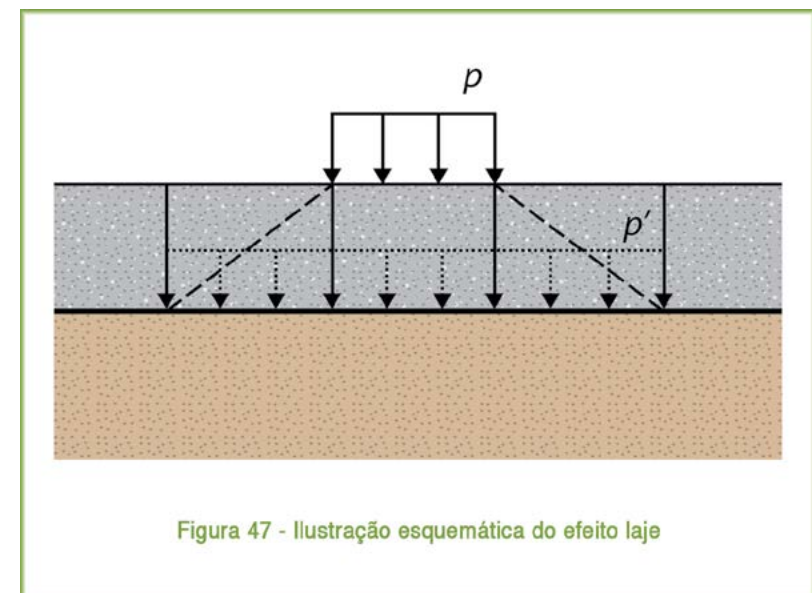
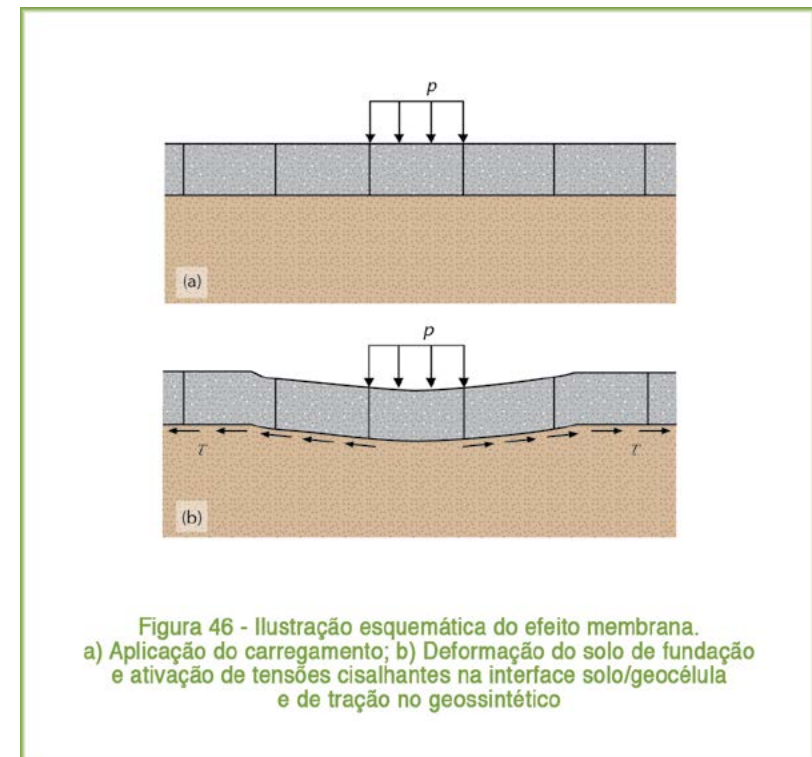
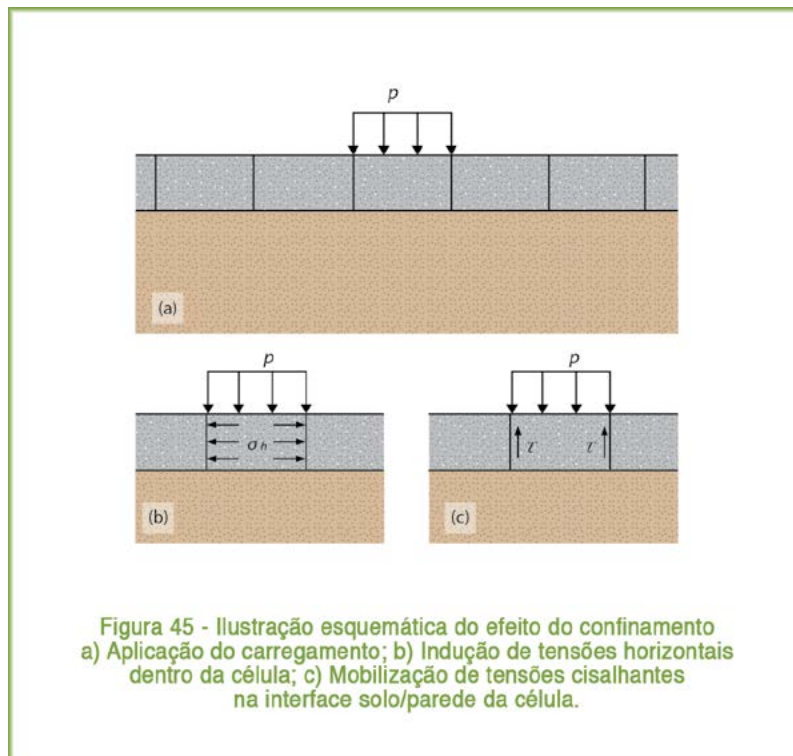
7.5. Dimensionamento

7.5.1. Generalidades

Este item foi totalmente extraído da pesquisa de Avesani Neto (2013) por se tratar de um trabalho recente que reúne informações de várias outras pesquisas e autores.

A geocélula usada como reforço basal melhora a capacidade do solo devido aos efeitos de confinamento (**figura 45**) e membrana (**figura 46**), e também desenvolve um terceiro mecanismo – o efeito laje (**figura 47**), além de contar com maior eficiência no efeito confinamento do solo. Cada mecanismo pode ser entendido e analisado de forma específica, contudo, atuam de forma conjunta e são inter-relacionados, sendo gerados pelo mesmo carregamento aplicado.

Além desses três mecanismos, há um quarto efeito, presente apenas quando é utilizado um material separador – como o geotêxtil – em adição à geocélula: o efeito da separação, descrito como o impedimento do deslocamento descendente do solo de preenchimento das células; e teria, ainda, a capacidade de melhorar a eficiência do reforço de geocélula. Contudo, esse efeito pode ser considerado de difícil mensuração devido à sua pequena magnitude e camuflagem com os outros mecanismos.



7.5.2. Método de cálculo

O método de cálculo proposto por Avesani Neto considera apenas os efeitos de confinamento e de laje, e a capacidade de carga do solo reforçado é expressa por:

equação (31)

$$p_r = p_u + l$$

Em que:

p_r = capacidade de carga do solo reforçado com geocélula

p_u = capacidade de carga do solo de fundação

l = melhoria devido à geocélula

A capacidade de carga do solo de fundação não reforçado deve ser determinada de acordo com a necessidade de cada caso e de cada aplicação. Pode ser através de valores empíricos, equações (por exemplo, métodos de capacidade de carga de Terzaghi, Vesic e outros; ou por metodologias de engenharia de transportes ou aterros sobre solos moles), ou ainda por ensaios de campo.

• Efeito do confinamento

O efeito do confinamento é considerado através da colocação de um carregamento sobre o reforço de geocélula, o qual gera tensões verticais e horizontais dentro da célula, **figura 45**. Adotam-se as tensões verticais iguais ao carregamento (p), e as horizontais podem ser estimadas pela equação:

equação (32)

$$\sigma_h = K \sigma_v = K p$$

Em que:

σ_h = tensão horizontal dentro da célula

σ_v = tensão vertical igual ao carregamento (p) sobre a camada de geocélula

K = coeficiente de empuxo

A carga vertical aplicada gera tensões de cisalhamento (**Figura 45**) devido ao deslocamento relativo entre o material de enchimento e as paredes das células. A tensão cisalhante (τ) é função da tensão normal no plano de contato entre os dois materiais, sendo neste caso a tensão horizontal e o atrito de interface entre os mesmos, conforme a equação a seguir:

equação (33)

$$\tau = \sigma_h \tan \delta = K p \tan \delta$$

Em que:

τ = tensão de cisalhamento gerada dentro da célula

δ = ângulo de atrito de interface entre o material de preenchimento e a parede da célula, podendo ser adotado por meio de ensaios entre o material da célula e o de preenchimento, ou estimado como $\frac{2}{3}$ do ângulo de atrito interno do material de enchimento (Bueno e Vilar, 2002).

Como a célula é uma estrutura tridimensional, o cálculo deve ser estendido para a mesma situação. Portanto, a tensão de cisalhamento gerada dentro da célula deve ser multiplicada pelo valor da superfície interna desta, de forma a obter uma força de resistência ao cisalhamento para cada célula, **figura 48**, de acordo com a equação a seguir. A forma da célula foi considerada quadrada, com uma largura equivalente (d).

equação (34)

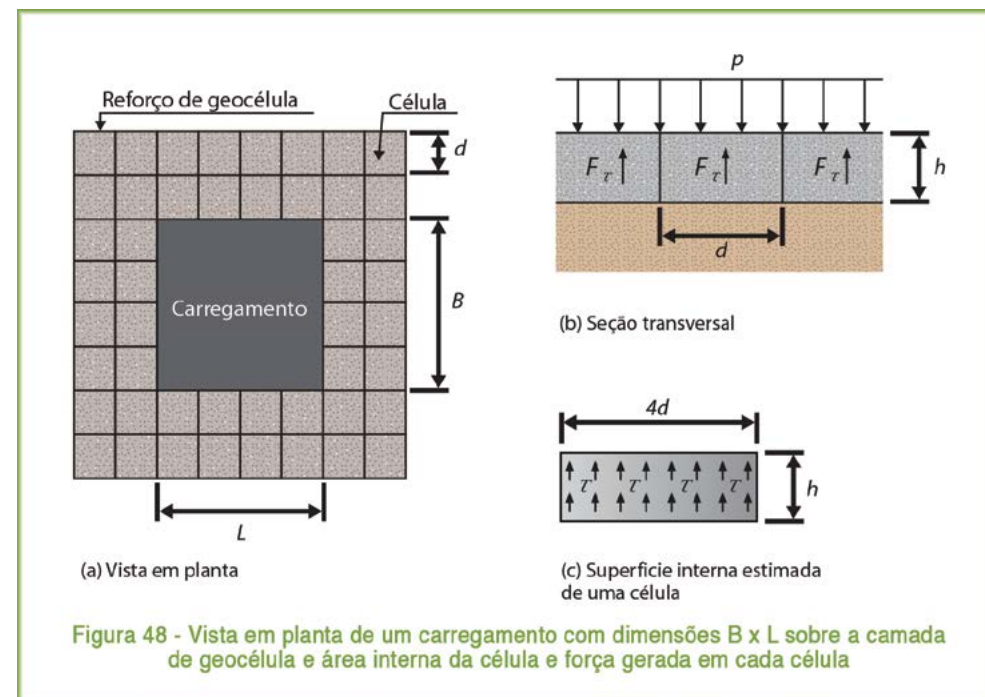
$$F_T = h 4 d \tau = h 4 d K p \tan \delta$$

Em que:

F_T = força de cisalhamento de uma célula

d = largura (diâmetro) equivalente da célula

h = altura da célula



Para se calcular a reação da camada de geocélula, para um carregamento com largura igual a (B) e comprimento (L), determina-se o número de células que participam do reforço, ou seja, que atua diretamente sob o carregamento, **figura 48**, conforme a equação a seguir. Assume-se, aproximadamente, que a área em planta da célula é dada pela área de um quadrado com largura equivalente igual à largura da célula (d).

equação (35)

$$n = \frac{BL}{d^2}$$

Em que:

n = número de células sob a placa de aplicação de carga

B = largura da sapata

L = comprimento da sapata

Portanto, a soma das forças de cisalhamento de todas as células sob o carregamento, que expressa a melhora da capacidade de carga devido ao confinamento, pode ser expressa por:

equação (36)

$$\Sigma F_{\tau} = h \cdot 4 \cdot d \cdot K_p \cdot \tan \delta \cdot \frac{BL}{d^2} = 4 \cdot \frac{h}{d} \cdot K_p \cdot \tan \delta \cdot BL$$

Em que:

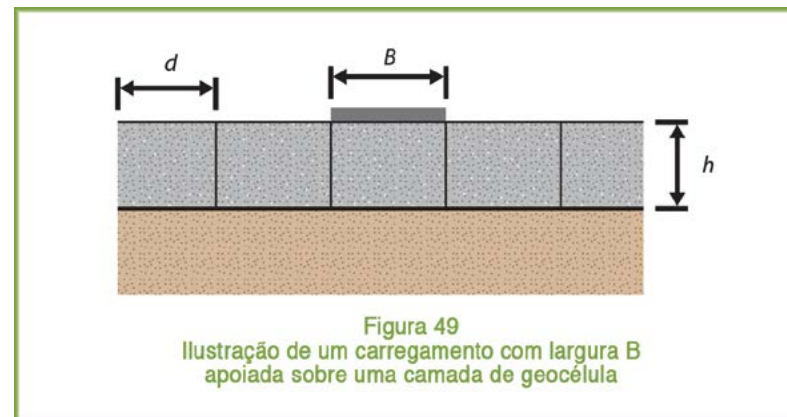
ΣF_{τ} = melhora devido ao efeito do confinamento (soma das forças de cisalhamento das células sob a sapata)

h/d = razão de forma da geocélula

Na **equação (36)** estão considerados tanto fatores pertinentes ao solo (K e δ) como da geocélula (h/d e δ), sendo a equação igualmente aplicável para os casos de carregamentos por sapatas circulares e quadradas (situação em que $B = L$) ou corridas. No caso de reforço de base de pavimentos, deve ser considerado o caso de sapata corrida.

• Efeito laje

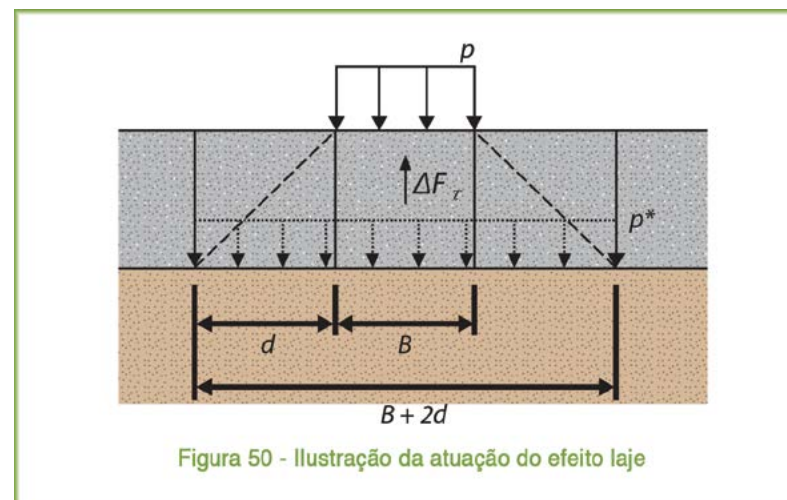
É considerada a atuação de uma sapata de largura B sobre o reforço de geocélula, conforme a **figura 49**.



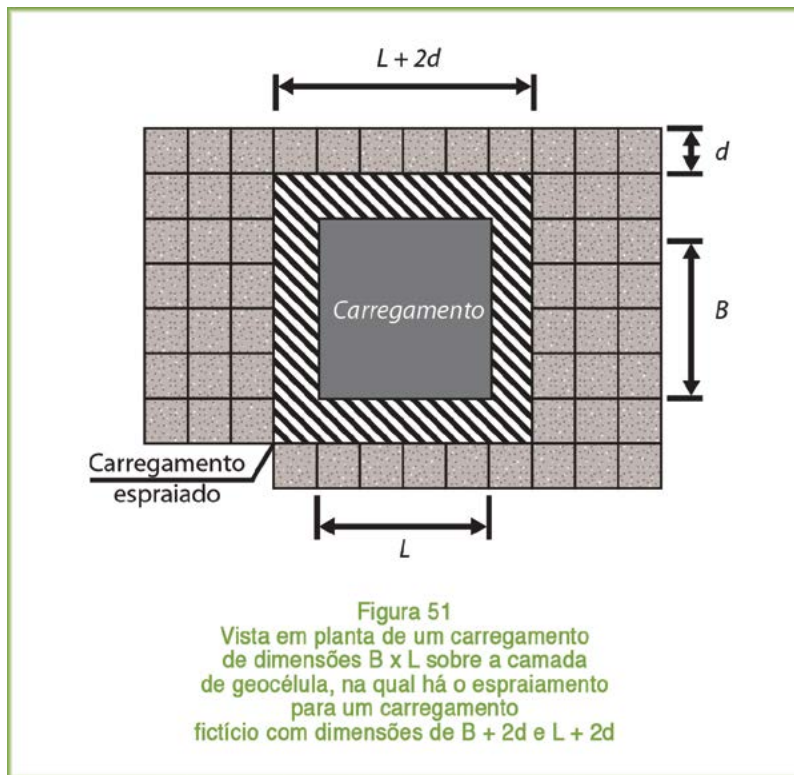
Conforme comentado no item 7.5.1 e na **figura 47**, com a aplicação da carga pela sapata, e devido à rigidez do material de preenchimento (fruto do confinamento celular dessa estrutura), as tensões são espreadas até a camada inferior ao reforço, para uma área de atuação superior àquela original da sapata. A literatura utiliza um ângulo de espraio (θ) com a vertical, para definir o valor da propagação de tensões.

Avesani Neto optou por utilizar um espraio das tensões até uma célula adjacente àquela carregada, ou seja, de um valor igual a (d) para cada lado do carregamento, devido às características geométricas desse tipo de reforço e ao confinamento propiciado pela célula.

A **figura 50** mostra, de forma esquemática, a propagação das tensões adotada como sendo um valor igual a (d) em ambos os lados do carregamento, configurando um “carregamento equivalente” sobre a fundação com largura igual a $B + 2d$.



O carregamento possui largura (B) e comprimento (L), e, com a dissipação que ocorre ao longo da altura da geocélula, devido ao efeito do confinamento (e anteriormente formulada), a propagação das tensões até a base da camada de geocélula ocorrerá de acordo com a **figura 51**, conforme Avesani Neto.



Realizando um balanço de forças na camada de geocélula, conforme o observado na **figura 50**, tem-se que a força atuante na fundação (sob a geocélula) é igual à força aplicada na superfície subtraída da melhora devido ao efeito do confinamento (ΣF_T), conforme a fórmula a seguir.

equação (37)

$$p^* (B + 2d)(L + 2d) = p B L - 4 \frac{h \tan \delta K p B L}{d}$$

Em que:

p^* = tensão atuante sob a camada de geocélula
 p = tensão atuante sobre a camada de geocélula
 d = largura equivalente da célula

Da **equação (37)** chega-se à tensão que efetivamente atua no solo subjacente ao reforço de geocélula (p^*):

equação (38)

$$p^* = (p - 4 \frac{h \tan \delta K p}{d}) \frac{B L}{(B + 2d)(L + 2d)}$$

Dessa equação extrai-se o *efeito de espalhamento*, que é a relação entre as características geométricas do carregamento e da geocélula (B , L e d), conforme a equação:

equação (39)

$$e = \frac{B L}{(B + 2d)(L + 2d)}$$

Sendo e o efeito de espalhamento.

A partir do efeito de espalhamento obtém-se o fator de forma do carregamento, que é a relação entre a largura da célula e a largura/comprimento do carregamento (d/B):

equação (40)

$$e = \frac{1}{1 + 2 \frac{d}{B} + 2 \frac{d}{L} + 4 \frac{d^2}{B L}}$$

Em que: d/B , d/L e d^2/BL são os fatores de forma do carregamento para cada uma das dimensões do carregamento.

No caso de carregamentos corridos (no qual $L \gg B$, em geral $L > 5B$), como em pavimentos, ou circulares e quadrados (situações que $B = L$), a expressão do efeito do espalhamento será função apenas da largura, ou diâmetro do carregamento, e simplificada, respectivamente, a:

equação (41)

$$e = \frac{1}{1 + 2 \frac{d}{B}}$$

equação (42)

$$e = \frac{1}{(1 + 2 \frac{d}{B})^2}$$

Portanto, a equação que descreve a tensão sob o reforço pode ser reescrita como segue:

equação (43)

$$p^* = (p - 4 \frac{h \tan \delta K p}{d}) e$$

• Equação final

Considerando-se as tensões atuantes sobre (p) e sob (p^*) a camada de geocélula, como apresentado na **figura 50**, define-se a melhora devido ao reforço de geocélula (I) como a subtração da tensão atuante sobre a geocélula daquela que efetivamente age no solo (sob a geocélula).

Da **equação (31)**:

equação (44)

$$p_r = p_u + (p - p^*)$$

A capacidade de carga do solo reforçado com a geocélula (p_r) será então:

equação (45)

$$p_r = p_u + \frac{4 h \tan \delta K p e + (1 - e) p}{d}$$

Avesani Neto comenta que, conforme observado em diversos ensaios de laboratório (Dash et al., 2007; Han et al., 2008; Madhavi Latha et al., 2009), o aumento da razão de forma (h/d) para valores superiores a aproximadamente a unidade modifica o comportamento do reforço de geocélula. De acordo com esses autores, geocélulas de reduzida razão de forma ($h/d < 1,0$ a $1,5$, aproximadamente) possuem um comportamento semelhante a uma viga, que devido à flexão, exibe uma maior deformação e , conseqüentemente, conduz a maiores tensões de contato no solo de fundação. Além disso, nessa situação, a geocélula apresenta tensões de compressão em seu topo e de tração em sua base, com maior mobilização de tensões de cisalhamento. Entretanto, ainda de acordo com esses autores, reforços de geocélulas de elevada razão de forma ($h/d > 1,0$ a $1,5$, aproximadamente) possuem maior rigidez e se comportam como um bloco de fundação, com uma distribuição de deformações e pressões mais uniforme em sua base. Nesse caso, a principal forma de reforço é pelo espraiamento das tensões verticais. No presente método de cálculo, o efeito do confinamento foi limitado a uma razão de forma de até 1 (um), a partir da qual, na **equação (45)**, esse parâmetro é limitado ao valor da unidade (1).

Uma vez definida a geometria da geocélula e do carregamento, a equação anterior foi retrabalhada de forma a se agrupar às constantes envolvidas, criando um novo fator adimensional denominado *fator de reforço da geocélula* (I_G), fator este que é função apenas da geocélula e do carregamento:

equação (46)

$$p_r = p_u + \frac{[4 h \tan \delta K e + (1 - e)] p}{d}$$

$$p_r = p_u + I_G p$$

• Fator de segurança e tensão admissível

A formulação proposta por Avesani Neto para a capacidade de carga do solo reforçado (p_r) depende do valor da tensão aplicada na superfície (p). Esse autor propôs também uma metodologia de cálculo do Fator de Segurança e da tensão admissível para a situação reforçada.

O Fator de Segurança é resultante da divisão da resistência disponível (capacidade de carga do solo reforçado – p_r) pela solicitação (carregamento aplicado – p). Assim, pela **equação (46)**, dividindo ambos os termos pelo carregamento aplicado (p), obtém-se uma relação entre os Fatores de Segurança na condição reforçada (FS_r) e não reforçada (FS_u), dependente do fator de reforço da geocélula (I_G):

equação (47)

$$\frac{p_r}{p} = \frac{p_u}{p} + \frac{I_G p}{p}$$

$$FS_r = FS_u + I_G$$

Em aplicações de fundações, é usual se trabalhar com uma tensão admissível, tensão esta que, quando aplicada ao solo, provocaria apenas recalques que as estruturas na superfície suportariam sem inconvenientes, conduzindo a uma situação satisfatória de segurança (BOWLES, 1996; TEIXEIRA e GODOY, 1996; CINTRA et al., 2003; ABNT NBR 6122:2010). Portanto, partindo-se da equação anterior, mantendo como variável de entrada o Fator de Segurança da situação reforçada (FS_r), e isolando o carregamento aplicado (p), definindo-o nesta situação como carregamento admissível (p_a) para o FS_r escolhido, obtém-se:

equação (48)

$$FS_r = \frac{p_u + I_G}{p}$$

equação (49)

$$p_a = \frac{p_u}{FS_r - I_G}$$

Na fórmula obtida, para $FS_r = 1$ (e, conseqüentemente, na ruptura para a situação reforçada: $p = p_r$), tem-se a condição de equilíbrio limite entre a solicitação aplicada na fundação (carregamento sob a camada de reforço de geocélula – p^*), com a capacidade de carga do solo de fundação (p_u), conforme desenvolvimento, por outro caminho [condição $p^* = p_u$ e usando as **equações (44) e (46)**]:

equação (51)

$$(p - \frac{4 h \tan \delta K p}{d}) e = p_u$$

equação (52)

$$(1 - \frac{4 h \tan \delta K}{d}) e p = p_u$$

equação (53)

$$p = \frac{p_u}{e (1 - \frac{4 h K \tan \delta}{d})}$$

Portanto, a tensão de ruptura calculada pelo método proposto é dada por:

equação (54)

$$p = \frac{p_u}{1 - I_G}$$

Observação:

No mecanismo proposto por Avesani Neto, para o modelo de cálculo não foi considerado o posicionamento do carregamento em relação à geocélula. Em aplicações práticas, não necessariamente o carregamento (uma sapata, por exemplo) estará perfeitamente centrado com uma célula do reforço. Tampouco a dimensão do carregamento e da largura da célula será exatamente a mesma. Dessa forma, como o modelo não captura esses efeitos, uma variação do espraiamento real em comparação com o calculado pode ocorrer, o que poderá gerar pequenas diferenças de valores previstos e medidos.

7.6. Sequência executiva

De dois a quatro trabalhadores, sem qualquer equipamento especial, instalam a geocélula StrataWeb rápida e facilmente. Os painéis são enviados fechados para a obra, com dimensões de 3,6 m x 0,127 mm x altura da célula. As etapas da instalação são as seguintes:

1. Escavar e conformar o solo de apoio na cota, declividade e dimensões especificadas no projeto.
2. Se o material de preenchimento for diferente do solo de apoio, deve ser usado um geotêxtil como separador. Em função da propriedade que for relevante para essa aplicação: resistência ou permeabilidade, seleciona-se o geotêxtil mais apropriado tecido ou não tecido. O geotêxtil deve ser simplesmente desenrolado sobre a superfície de apoio, com uma sobreposição mínima de 45 centímetros entre os painéis adjacentes.
3. Escolher o local onde será colocado o primeiro painel de geocélula StrataWeb e colocar grampos nas quatro extremidades.
4. Estender o painel além do seu comprimento previsto e soltar em seguida, para que haja conformação na dimensão pretendida. Colocar o painel sobre os grampos cravados. Grampos adicionais podem ser necessários ao longo do perímetro, de forma a se ter a expansão completa de cada célula. Quando não for possível usar grampos (em solos rochosos, etc.), um quadro ou moldura

de madeira pode ser necessário. Os painéis adjacentes devem ser instalados da mesma forma e unidos ou grampeados juntos, para formar uma cobertura contínua.

5. Preencher a primeira linha de células com uma pá carregadeira ou caminhão caçamba e empurrar o material para dentro das células usando pás ou uma lâmina de trator, **figuras 52 a 54**. Para permitir a subida de equipamento na geocélula, se necessário, fazer uma rampa com o material de preenchimento, adjacente a StrataWeb. Continuar o preenchimento até que todas as células estejam preenchidas. Nenhum equipamento deve se movimentar sobre células não preenchidas. O material de preenchimento deve sempre ter uma espessura superior à altura das células, para permitir a compactação.
6. A próxima etapa deve ser a compactação do sistema StrataWeb, **figura 55**. O método mais comum de compactação é através de passadas sucessivas do equipamento usado para espalhar o material de preenchimento. Um rolo vibrador, e/ou água, pode ser necessário para alcançar o nível de compactação especificado.
7. Uma vez que as células foram preenchidas e o sistema foi compactado, a base de geocélula StrataWeb está pronta para suportar as cargas de tráfego pesado.



Figura 52
Preenchimento da Strata Web



Figura 53
Preenchimento da Strata Web



Figura 54
Espalhamento do material
de preenchimento



Figura 55
Compactação do material
de preenchimento

8. Referências

AVESANI NETO, J. O. “Desenvolvimento de uma metodologia de cálculo e simulações numéricas aplicadas na melhoria da capacidade de carga de solos reforçados com geocélula”. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2013.

CIRIA Report 116. “Design of Reinforced Grass Waterways”, Construction Industry Research and Information association. London, 1987.

CHOW, V. T. “Open Channel Hydraulics”, McGraw-Hill Book Company Incorporation. 1959.

COWAN, W. L. “Estimating Hydraulic Roughness Coefficients”, Agricultural Engineering, V. 37, no 7, p. 473-475. 1956.

ENGEL, P.; FLATO, G. “Flow Resistance and Critical Flow Velocities for Geoweb Erosion Control System”. Research and Applications Branch – National Water Research Institute, Canada Centre for Inland Waters. Burlington, Ontario, Canada. March, 1987.

FHWA-TS-84-204 - USGS. “Guide for Selecting Manning’s Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains”. United States Geological Survey Water-supply Paper 2339.

PRESTO Geosystems. “Channel Protection System – Technical Overview”. Appleton, Wisconsin. 2008.

Richardson, G. “Geocells: a 25-year perspective” Parts 1 and 2. Designer’s Forum, Geosynthetics Magazine, 2004.

WEBSTER, S. L.; WATKINS, J. E. “Investigation of Construction Techniques for Tactical Bridge Approach Roads across Soft Ground”. Report S-77-1, Soil and Paviments Laboratory, U.S. Army Waterways Experimental Station. Vicksburg, Mississippi, 1977.



**Uso de geocélulas
em obras de engenharia**

Revisão: José Orlando Avesani Neto
e Leandra Trindade

Diagramação: Kelly Cristina Santos

Ilustrações: Henrique de Souza Vieira

Produção gráfica: departamento de marketing GeoSoluções

São Paulo, Janeiro de 2015



Tel: 55 11 3803 - 9509

www.geosolucoes.com
contato@geosolucoes.com

Rua Simão Álvares, 912 - Pinheiros
Sao Paulo - SP - 05417-020 - Brasil