

MANUAL BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS

JOSÉ CARLOS VERTEMATTI
Coordenador

PROPRIEDADES
ENSAIOS E NORMAS
REFORÇO E CONTENÇÃO
FILTRAGEM E DRENAGEM
FUNDACOES
SEPARACAO E PROTECAO
OBRAS HIDRAULICAS
ADENSAMENTO
PAVIMENTACAO
CONTROLE DE EROSAO
BARBEIRAS IMPERMEABILIZANTES



EDITORA EDGARD BLÜCHER

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS
DE NÃO TECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS

SÃO PAULO

2004

10/11/09
SGS

Capítulo 13

Aplicações em Barreiras Impermeabilizantes

Benedito de Souza Bueno B 928 a
Clóvis Benvenuto
Orencio Monje Vilar

13.1 INTRODUÇÃO

Barreiras impermeabilizantes são utilizadas na engenharia para as mais variadas finalidades, como por exemplo, impedir a migração de umidade e de vapores, reservar água e diferentes efluentes, e conter rejeitos das mais variadas origens, como o lixo urbano e os resíduos industriais.

Tradicionalmente, essas barreiras têm sido construídas com os mais diferentes materiais, como solo compactado, concreto, asfalto e mantas impregnadas com diferentes substâncias. O advento dos geossintéticos introduziu novos materiais para a composição de barreiras impermeáveis, como as geomembranas (GM) e os geocompostos argilosos para barreiras (GCL). Cada uma dessas opções apresenta vantagens e desvantagens, em função de uma série de requisitos exigidos em determinada aplicação: resistência e durabilidade frente às solicitações de natureza química, física e mecânica; disponibilidade do material; facilidade de construção e custo. Por exemplo, na possibilidade de recalques, solos compactados, relativamente rígidos, camadas de asfalto e placas de concreto podem trincar, facilitando o vazamento das substâncias contidas. Além disso, essas camadas possuem espessuras apreciáveis, ocupando volumes importantes que poderiam ser mais bem aproveitados. As geomembranas e os geocompostos argilosos por apresentar reduzida espessura e elevada flexibilidade, constituem uma alternativa apropriada nessas situações.

No decorrer deste capítulo, são apresentadas as características gerais das geomembranas e dos geocompostos argilosos, suas aplicações típicas, propriedades e solicitações a que estão sujeitas em barreiras impermeáveis, bem como aspectos construtivos de sua aplicação em campo.

1401255
0001084

SYSNO	1401255
PROD	0001084
ACERVO EESC	

Assim, dispõe-se de membranas compostas a partir de diferentes matérias-primas, destacando-se, também, que é possível produzir mantas para impermeabilização de outras maneiras (por exemplo, através da impregnação de um geotêxtil com asfalto). Serão aqui abordadas somente as GM termoplásticas, com ênfase para as de PEAD (polietileno de alta densidade), as de PELBD (polietileno linear de baixa densidade) e as de PVC (polivinil clorado), que são os tipos mais utilizados em barreiras impermeáveis.

As membranas de polietileno de alta e de baixa densidades são fornecidas em bobinas, com larguras entre 5 e 10 m, comprimentos da ordem de 200 m e espessuras entre 1,0 e 2,5 mm. Por sua vez, as geomembranas de PVC são fabricadas também em bobinas, mas comumente fornecidas em painéis de variadas dimensões, compostos a partir de emendas feitas em fábrica; as espessuras variam de 0,4 a 2,0 mm.

Como qualquer material, as geomembranas estão sujeitas a uma série de solicitações desde sua fabricação, estocagem e transporte até a instalação e vida útil da obra. A Tab. 13-2 apresenta uma síntese preliminar das vantagens e desvantagens associadas aos diferentes tipos de geomembrana.

TABELA 13-2
Vantagens e desvantagens dos principais tipos de geomembrana

Tipo de geomembrana	Vantagens e desvantagens
PEAD e PELBD Polietileno de alta e de baixa densidade	Boa resistência contra diversos agentes químicos Boas características de resistência e solda Boas características de resistência mecânica Bom desempenho a baixas temperaturas Baixo atrito de interface, se for de superfície lisa PEAD é relativamente rígido PELBD é mais flexível Formação de rugas; difícil conformação do subleito Sujeita a <i>stress cracking</i>
PVC Polivinil clorado	Boa trabalhabilidade (flexível) Facilidade de soldagem Bom atrito de interface, mesmo com superfície lisa Boas características de resistência mecânica Baixa resistência a ultravioleta, ozônio, sulfetos e intempéries Fraco desempenho a altas e baixas temperaturas Baixa resistência química a algumas substâncias

13.3.2 Geocompostos argilosos para barreiras impermeabilizantes

Nos geocompostos argilosos (GCL) para barreiras impermeabilizantes — ou *geosynthetic clay liners* (EUA) e *geosynthetic clay barriers* (comunidade européia), na literatura de língua inglesa —, uma camada de argila em pó, usualmente bentonita sódica, é ligada por meios mecânicos ou químicos a um geotêxtil ou a uma geomembrana. Como em sua fabricação se emprega a bentonita, são também chamados de “geocompostos bentoníticos”. São fabricados com dimensões da ordem de 5 m por 50 m e espessuras de 1 cm, sendo o conteúdo de argila, com umidade entre 10 e 20%, da ordem de 5 kg/m².

Uma classificação geral dos diferentes tipos de geocompostos argilosos separa-os em reforçados e não-reforçados. No caso dos reforçados, as camadas externas de geossintéticos são unidas mecanicamente por costura ou agulhamento; os não reforçados são fabricados com o uso de adesivos. A Fig 13-1 ilustra as diferentes classes de geocompostos argilosos.

Os geocompostos argilosos têm sido utilizados em substituição ou em adição a solos em sistemas impermeabilizantes. Suas principais qualidades residem na flexibilidade, com propriedades de autocicatrização, em caso de perfuração, e relativa facilidade de instalação e de emenda. Além das considerações anteriores, há ainda a possibilidade de suas propriedades serem controladas durante o processo de fabricação, o que permite reduzir os custos associados à garantia de construção nos trabalhos de instalação em campo. A Tab. 13-3 faz uma comparação das características e principais diferenças entre barreiras de solos compactados e os geocompostos argilosos.

FIGURA 13-1

Geocompostos argilosos reforçados e não-reforçados.

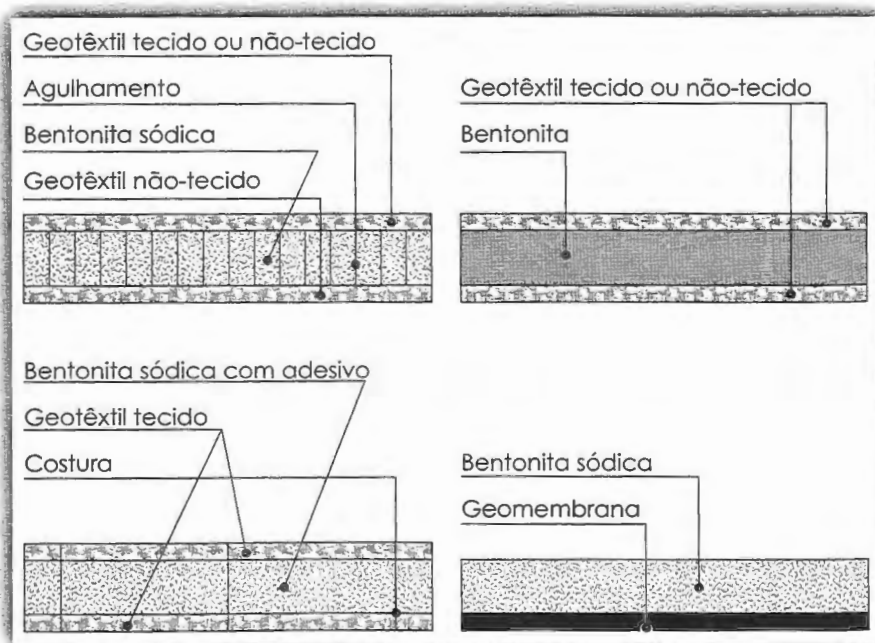


TABELA 13-3

Comparação solos compactados versus geocompostos argilosos, quando utilizados como barreiras impermeáveis [DANIEL, 1995]

Característica	Geocomposto argiloso	Solo compactado
Material	Bentonita, adesivos, geotêxteis e geomembranas	Solos locais ou misturas de solo e bentonita
Espessura	Aproximadamente 12 mm; ocupa pouco volume do aterro	Comumente entre 30 e 60 cm; ocupa maior volume do aterro
Condutividade hidráulica	$10^{-11} \text{ m/s} \leq k \leq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$	$k \leq 10^{-9} \text{ m/s}$
Velocidade e facilidade de construção	Rápida, instalação simples	Lenta; construção complicada
Facilidade de garantia de qualidade	Relativamente simples e direta; procedimentos baseados no bom senso	Procedimentos de garantia de qualidade complicados; requer pessoal habilitado e com bom conhecimento
Vulnerabilidade a danos durante a construção devido a ressecamento e congelamento	Essencialmente secos; não podem ressecar durante a construção; pouco vulnerável a congelamento-degelo	Próximo da saturação; pode ressecar durante a construção; vulnerável a congelamento-degelo
Vulnerabilidade a punção	Vulnerável se de pequena espessura	Barreiras espessas não podem ser punçoadas acidentalmente
Vulnerabilidade a danos por recalques diferenciais	Resiste a recalques diferenciais muito maiores que os suportados por solos compactados	Não resiste muito a recalques sem fissurar
Disponibilidade de materiais	Facilmente transportados a qualquer local	Materiais apropriados não-disponíveis em qualquer local
Custo	Relativamente baixo; bastante previsíveis que não variam muito de projeto para projeto	Muito variável – depende das características dos solos disponíveis no local
Facilidade de reparo	Fácil, com a colocação de remendo sobre a área danificada	Difícil – pode exigir o deslocamento de equipamento pesado se a área a reparar for grande
Experiência	Pequena	Utilizada há muitos anos
Aprovação por organismos reguladores	Não explicitamente permitido; em muitas normas e especificações – o proprietário deve obter aprovação de equivalência para atingir as especificações de performance	Solos compactados são usualmente requeridos pelas agências reguladoras para compor barreiras.

13.4 PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Os geossintéticos para impermeabilização são utilizados em várias situações e na impermeabilização de diversos tipos de obras e estruturas, tais como:

- aterros de resíduos domésticos e industriais;
- lagoas de contenção e de tratamento de resíduos industriais;
- revestimento de túneis;
- bases encapsuladas de estradas;
- tanques e silos subterrâneos de armazenamento;
- lagoas para piscicultura, esporte e lazer;
- coberturas e subsolos de edificações;
- caixas d'água elevadas ou enterradas;
- canais de adução e irrigação;
- piscinas e praia artificiais;
- confinamentos de áreas contaminadas.

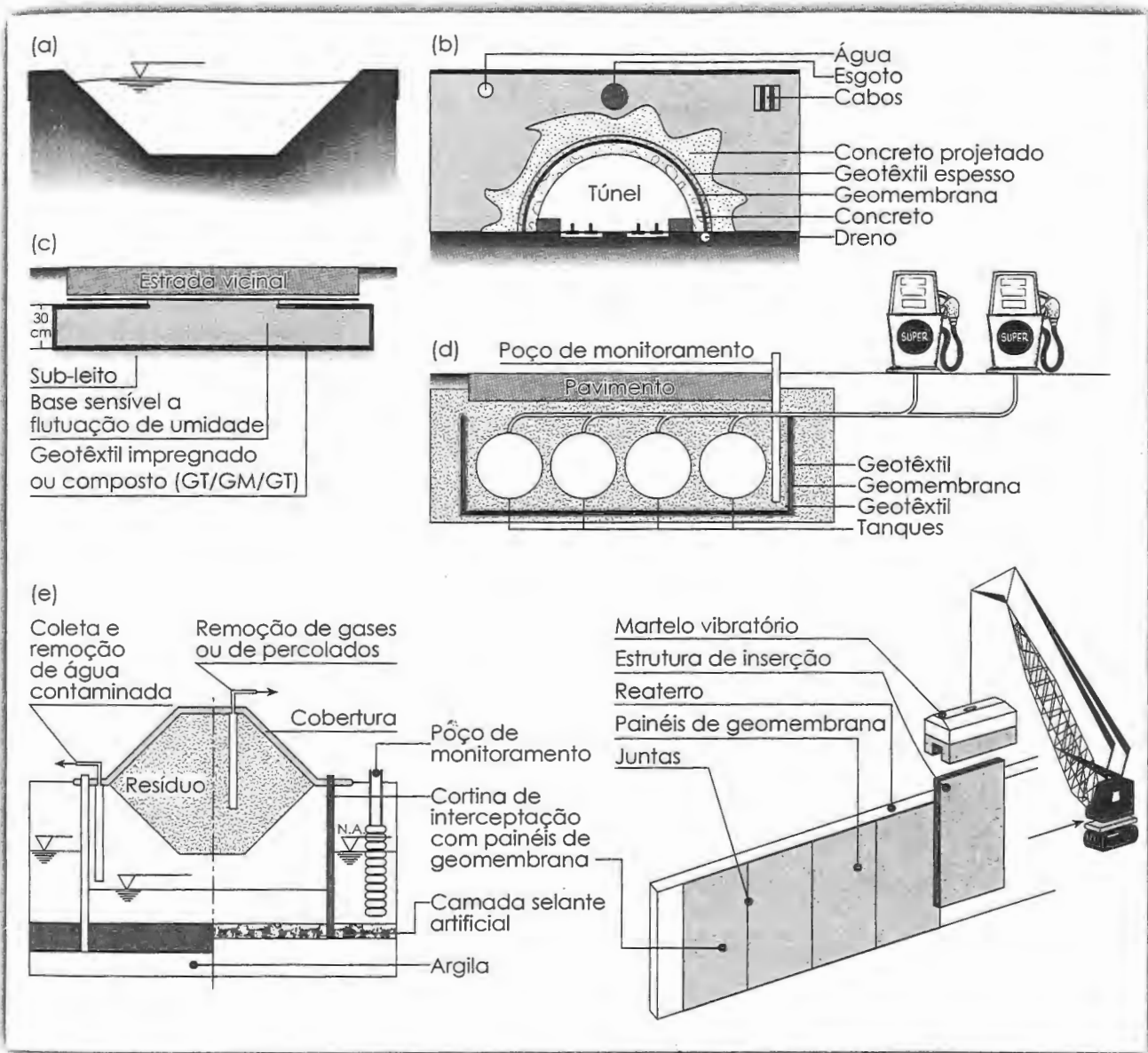
A Fig. 13-2 ilustra algumas dessas aplicações.

Por sua baixa permeabilidade, boas características de resistência química e mecânica, controle de fabricação e facilidade de instalação, os geossintéticos constituem uma imprescindível opção em obras de proteção ambiental, como na disposição de resíduos das mais variadas naturezas.

Neste capítulo, é dado um destaque especial às aplicações de geossintéticos em obras de controle ambiental, com ênfase nos geossintéticos que desempenham funções de impermeabilização. Essas aplicações são de extrema responsabilidade social e econômica e exigem desses produtos a solicitação de todas as suas propriedades e características.

Dispõe-se de diversas alternativas para lidar com a problemática dos resíduos, como, por exemplo, políticas que tratam de reduzi-los, reaproveitá-los ou reciclá-los. Do ponto de vista técnico, há opções como incineração e compostagem, entre outras aplicáveis a alguns tipos de resíduo sólido, como os urbanos. Contudo, qualquer que seja a opção, sempre restam resíduos que necessitam ser dispostos, de alguma forma, no meio físico e, principalmente, no solo. Para esse propósito, conta-se com dispositivos como os aterros de resíduos e as lagoas de efluentes, que são estruturas projetadas com base em princípios de engenharia e de forma a não trazer danos ou riscos para saúde pública, além de minimizar os impactos provocados no meio ambiente.

Os geossintéticos, de uma forma geral, encontram ampla aplicação nos sistemas de disposição, desempenhando funções de drenagem, de separação e de reforço, entre outras. Além disso, os geossintéticos desempenham importante função na composição de barreiras imper-

**FIGURA 13-2**

Algumas utilizações de sistemas impermeabilizantes compostos com geossintéticos.

(a) Canais de irrigação, adução e tanques de efluentes;

(b) revestimento de túneis;

(c) bases encapsuladas de estradas em solos sensíveis a flutuações de umidade;

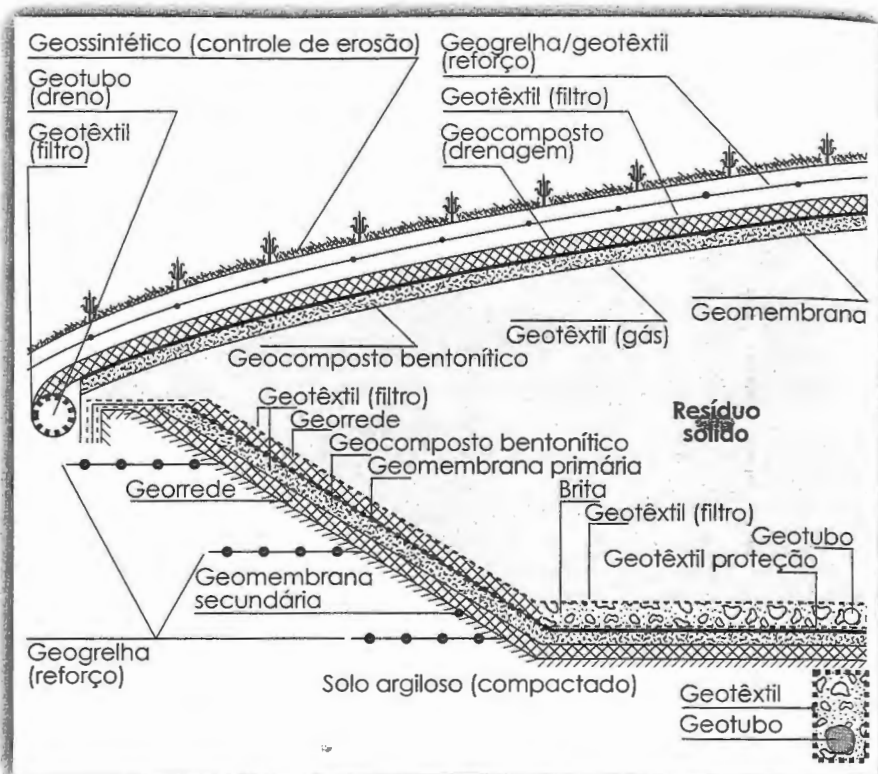
(d) tanques subterrâneos de armazenamento;

(e) confinamento de áreas contaminadas com painéis de geomembrana. (adaptado de BRANDL & ADAM, 2000).

meabilizantes desses sistemas. A Fig. 13-3 ilustra aspectos gerais de um aterro de resíduos, com ênfase para as diferentes possibilidades de aplicação de geossintéticos.

FIGURA 13-3

Aplicações típicas de geossintéticos em aterros de resíduos (adaptado de KOERNER, 1998).



Nota-se, por exemplo, na Fig. 13-3, na base e nas laterais da cava do aterro, a presença de georredes para drenagem dos líquidos percolados através do aterro, geotêxteis cumprindo o papel de elemento de separação entre o resíduo e o meio drenante (georrede ou material granular) e geomembranas (primária e secundária) protegendo o solo de fundação e cumprindo a função de evitar que os líquidos percolados, gerados por degradação do resíduo ou por infiltração, possam atingir o solo de fundação e os lençóis de água superficial e subsuperficial. Subjacente à geomembrana primária, encontra-se outra camada impermeabilizante, construída com geocomposto argiloso, seguida por outra camada drenante, destinada a servir de camada de detecção de possíveis vazamentos do corpo do aterro e, finalmente, a geomembrana secundária assentada diretamente sobre o solo de fundação, no caso, um solo argiloso compactado. Essa configuração compõe uma barreira impermeabilizante dupla, com sistema de detecção de vazamentos e é comumente utilizada para a contenção de resíduos perigosos.

Anteriormente à construção dos elementos citados, pode existir a necessidade de se drenarem fontes e nascentes situadas na base do futuro aterro, o que se pode realizar com a construção de drenos empregando geotubos e geotêxteis com a função de filtro.

Tem-se, ainda, na Fig. 13-3, a presença de geossintéticos compondo a cobertura do aterro e com funções semelhantes à que desempenham

na proteção de base. Destaca-se a presença da geomembrana e do geocomposto argiloso. Sua função consiste em impedir a entrada de água de infiltração no interior do maciço de resíduos e evitar o aumento da geração de líquidos percolados. Adicionalmente, a barreira impermeabilizante de cobertura pode conter e disciplinar o movimento de gases eventualmente gerados no resíduo, impedindo-os de se propagar descontroladamente na atmosfera. Para essa função, pode-se incorporar um geotêxtil ou um geocomposto drenante, capaz de coletar esses gases e de conduzi-los a um sistema de captação e de tratamento, para posterior uso.

Assim, é importante realçar que, com muita frequência, são construídos drenos na forma de colchões ou trincheiras sobre e sob barreiras impermeáveis. Em síntese, os sistemas drenantes com geossintéticos concebidos para obras ambientais podem cumprir as seguintes funções:

- a) Quando internos aos efluentes ou resíduos, visam captar os gases e percolados gerados para evacuá-los e prevenir o desenvolvimento de subpressões que iriam instabilizar a obra.
- b) Quando instalados sob o sistema de impermeabilização podem ser destinados a controlar o lençol freático ou a proteger o meio ambiente contra eventuais falhas e fugas de efluentes contaminantes.
- c) Quando instalados sobre os efluentes ou resíduos, em suas coberturas, visam captar as águas pluviais, impedi-las de penetrar nos resíduos e aliviar o peso da própria cobertura.

Evidentemente, para cada uma dessas utilizações deve-se conceber um sistema específico de forma a não haver superposição de funções e o comprometimento de todo o sistema de impermeabilização.

As aplicações de geossintéticos com função de filtração e drenagem são tratadas especificamente nos Caps. 5 e 7.

Na massa de resíduo, propriamente dito, podem-se adotar alternativas de colocação de geossintéticos (não-indicadas na figura), como geocompostos drenantes, tanto para líquidos como para gases, e geomembranas de uso temporário, em substituição às camadas de solos de cobertura intermediárias. Essas geomembranas podem ser dispostas ao final de uma etapa de serviço e retiradas na retomada do lançamento, evitando o espalhamento de material pelo vento e a presença de animais, com evidente ganho de espaço no aterro. Geogrelhas podem ser úteis, também, durante a operação do aterro como reforço de subleito ou de base para o tráfego de veículos pelo maciço de resíduos, durante as operações de lançamento, espalhamento e compactação.

Na ilustração da Fig. 13-3, temos a presença de barreiras de base e de cobertura compostas com a utilização de grande quantidade de geossintéticos. Nem todos esses elementos estarão necessariamente presentes em qualquer aterro, porém constata-se a importância dos geossintéticos destinados à impermeabilização — na atualidade uma presença constante em sistemas de disposição de resíduos. Aspectos adicionais acerca de barreiras impermeabilizantes, das propriedades de geomembranas e de geocompostos argilosos, bem como as solicitações típicas por que passam em obra são apresentadas a seguir.

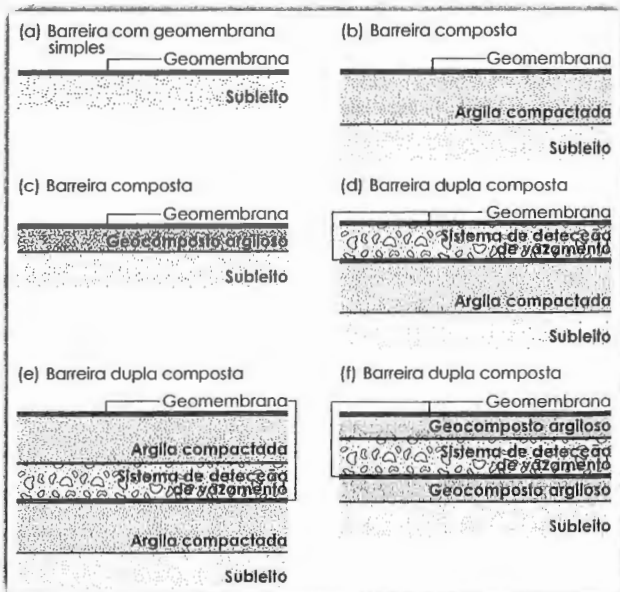
As primeiras aplicações de barreiras empregavam apenas solos de baixa permeabilidade, em geral compactados. O advento das geomembranas e, mais recentemente, dos geocompostos argilosos, modificou as configurações das barreiras, graças a uma série de vantagens, entre as quais se incluem o controle de qualidade de um produto manufaturado, a facilidade de instalação, a sua reduzida permeabilidade e o ganho de espaço no aterro. Assim, os diferentes materiais são utilizados às vezes isoladamente, mas muito comumente são combinados em diferentes configurações e arranjos, os quais dependem, em primeira aproximação, do tipo de resíduo a ser estocado. Nesse sentido, os resíduos são classificados em perigosos, não-inertes e inertes. A Fig. 13-4 ilustra algumas alternativas de barreiras.

FIGURA 13-4

Exemplos de arranjos de barreiras impermeáveis de base.

- (a) Barreira impermeável do tipo simples, em que a geomembrana repousa diretamente sobre o solo de fundação;
 (b) Barreira composta, em que se conciliam uma geomembrana e solo compactado de baixa permeabilidade;
 (c) arranjo análogo a (b), apenas substituindo-se o solo compactado por um geocomposto argiloso;
 (d) sistema de barreiras duplas em que se conciliam duas geomembranas, entremeadas por um meio drenante (material granular, georrede, etc.) e argila compactada. O meio drenante tem por função principal servir de camada de detecção e de coleta de líquidos que eventualmente vazem;
 (e) arranjo de barreiras duplas compostas;
 (f) arranjo análogo a (e), empregando geocomposto argiloso.

[Adaptado de SHARMA & LEWIS, 1994.]



Embora as geomembranas sejam consideradas impermeáveis, elas estão sujeitas a vazamentos seja por imperfeições de fabricação, de instalação e/ou de operação do sistema. Assim, a opção da Fig. 13-4(a) deve ser evitada, pois, na ocorrência de vazamentos, estes não poderão ser contidos ou atenuados. Nas outras opções, eventuais vazamentos poderão ser contidos pelas outras camadas da barreira como, por exemplo, a argila compactada na opção 13-4(b). Ressalte-se ainda que, nas seções apresentadas, estão omitidas as camadas drenantes no topo da barreira, eventuais camadas de proteção e de separação.

Assim, o interesse na adoção de sistemas compostos e de barreiras duplas visa prevenir que imperfeições de fabricação, danos de instalação e de operação das geomembranas causem a fuga descontrolada de percolado, o qual será contido pela camada inferior. No caso de barreiras duplas, o percolado poderá ser detectado e removido pelo dreno intermediário.

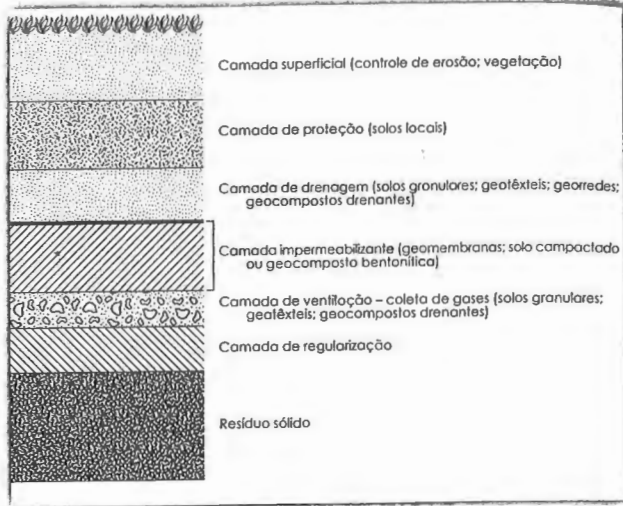
As camadas de cobertura têm função semelhante às camadas de base, no entanto estão sujeitas a outros tipos de solicitação. Por exemplo, quando o líquido, cuja infiltração para o interior do aterro se deseja controlar, é a água, a resistência química da geomembrana passa a ser uma questão secundária. Não obstante, há uma série de solicitações adicionais não-presentes na proteção de base, como ciclos de umedecimento e secagem, pressões de gás resultantes da decomposição do resíduo, erosões por ação da chuva e do vento, a ação de animais roedores, recalques por vezes elevados como em aterros de lixo urbano, a ação de raízes e deslizamentos do solo de cobertura. Essas questões tornam, muitas vezes, mais complexo o projeto de um sistema de cobertura do que o de uma impermeabilização de base.

Na prática brasileira, tem-se relegado a segundo plano a adoção de sistemas de cobertura, por razões econômicas, principalmente. No entanto, é fácil entender que a presença desse elemento é tão importante quanto as barreiras de fundo, por diversas razões. A mais imediata delas é que, impedindo-se a infiltração, serão reduzidas as quantidades de percolado a controlar no interior do maciço de resíduos, embora, em certos casos, seja conveniente uma cobertura permeável para acelerar a degradação dos resíduos, como através da técnica de recirculação de percolados, às vezes aplicada em aterros sanitários. A Fig. 13-5 mostra a composição típica de um sistema de cobertura.

Evidentemente, nem todas as camadas esquematizadas estarão presentes em qualquer projeto. Além disso, algumas camadas podem ser combinadas, como a camada superficial e a camada de proteção, escolhendo-se solos que ofereçam boa resistência mecânica e que propiciem um meio de crescimento para a vegetação. Camadas de controle e de captação de gás, por exemplo, só serão necessárias em resíduos capazes de gerar gases.

FIGURA 13-5

Exemplo de configuração de camada de cobertura de sistemas de disposição de resíduos.



Como na base, a camada impermeável constitui o elemento crucial do sistema. Geossintéticos podem desempenhar essa função com muitas vantagens, já que solos compactados — a opção clássica — apresentam algumas desvantagens, como a pouca tolerância a recalques, ressecamento e expansão por ciclos de secagem/umedecimento e dificuldade de compactação sobre resíduos fofos e/ou moles.

A Tab. 13-4 mostra as principais características dos componentes de sistemas de cobertura de aterros de resíduos.

13.5 PROPRIEDADES RELEVANTES

13.5.1 Geomembranas

Matéria-prima

Propriedades associadas à matéria-prima são importantes no processo de composição e de fabricação da manta e incluem, entre outras, a densidade da resina e seu ponto de fusão.

Em certos casos, é necessário conhecer a composição molecular da membrana, seja para identificar os seus componentes, seja para superar problemas advindos da utilização de membranas de diferentes origens, como pode ocorrer ao se soldar uma membrana de polietileno antiga com uma mais nova, por exemplo. Nesse caso, o ensaio DSC-calorimetria diferencial, por exemplo, ajuda a determinar a melhor temperatura de soldagem para essas geomembranas.

TABELA 13-4

Características dos componentes básicos de sistemas de cobertura [DANIEL, 1995]

Camada	Função primária	Materiais usuais	Observações
Superficial	Promover o crescimento da vegetação; evapotranspiração; prevenir erosão	Solo com húmus; pedregulhos (regiões áridas); geossintéticos para controle de erosão	Camada superficial para controle de erosão por água e/ou vento sempre é necessária
Proteção	Acumular água; proteger camadas inferiores contra raízes, animais e ação antrópica; proteger camada impermeável contra ressecamento e congelamento; manter estabilidade	Mistura de solos; pedregulhos	Alguma forma de proteção sempre é necessária; camadas superficiais e de proteção podem ser combinadas em uma única camada de cobertura
Drenagem	Drenar água de infiltração para minimizar seu contato com a barreira impermeável; minimizar forças de percolação	Areias; pedregulhos; geotêxteis; georredes e geocompostos	Opcional. Necessária quando quantidades excessivas de água atravessam a camada de proteção ou as forças de percolação são elevadas
Impermeável	Minimizar infiltração de água para o resíduo e o escape de gás para a atmosfera	Solos argilosos compactados; geomembranas; geocompostos argilosos	Normalmente é necessária; dispensável em regiões áridas
Coleta de gases	Coletar e transferir gás para pontos de remoção e/ou de geração	Areia; geotêxteis e georredes	Necessária se o resíduo produz quantidades excessivas de gás

Um aspecto importante e diretamente relacionado com o polímero que compõe a geomembrana é o seu grau de cristalinidade: as porções da cadeia molecular dos polímeros que se alinham em pequenas regiões são chamadas de "cristalinas", enquanto as regiões não-alinhadas são chamadas de "amorfas". Os dois polímeros termoplásticos mais utilizados na fabricação de geomembranas são os amorfos e os semicristalinos, os quais possuem parte de sua estrutura amorfa e parte cristalina. A porcentagem de cristalinidade varia de cerca de 30% no PVC até 70% no PEAD. Informações adicionais sobre matérias-primas são fornecidas no Cap. 2.

A Tab. 13-5 ilustra as principais características dos métodos de identificação química correntemente empregados em geomembranas.

Propriedades físicas e mecânicas da manta

Propriedades físicas, mecânicas e relacionadas ao meio ambiente, como a resistência aos raios ultravioleta ou ao ozônio, bem como a resistência química a diferentes substâncias, são medidas na geomembrana já manufaturada. Existe um grande número de normas e especificações de ensaios para geomembranas. Uma mesma propriedade é medida, às vezes, segundo métodos diferentes, causando confusão na escolha de um ou outro método, bem como na interpretação dos resultados. Os métodos mais citados na literatura são os da ASTM, do GRI e, mais recentemente, da ISO. A esses métodos somam-se os propostos em diversos países, como os da norma alemã, por exemplo. Nesse texto, a menos de citações específicas, listam-se as normas da ASTM pela ampla divulgação que elas já têm em nosso meio técnico e, sempre que disponível, a correspondente norma brasileira.

Entre as propriedades físicas destacam-se a espessura (que pode ser determinada através de vários procedimentos normalizados), a altura de asperezas, no caso de membranas texturizadas, e a massa por unidade de área. Há, também, métodos de ensaios para a determinação da transmissividade de vapor d'água e de vapor de diferentes solventes.

O ensaio mecânico mais correntemente efetuado é o de resistência a tração. Há várias configurações de corpos de prova e de ensaios para medir essa propriedade, sendo os ensaios unidirecionais os mais comuns. Nestes, corpos de prova são continuamente tracionados em máquinas universais de ensaio, registrando-se as deformações produzidas e as forças associadas. Esses ensaios empregam corpos de prova de dimensões relativamente pequenas, na forma de halteres, para que a ruptura possa produzir-se junto à seção estreitada e para que as deformações estejam contidas na capacidade de curso da máquina de ensaio. A norma ASTM D638 especifica as condições desses ensaios, que devem ser considerados como índice, pois servem mais para propósitos classificatórios do que propriamente para quantificação.

Ensaio de tração de banda larga representam com mais fidelidade diversas solicitações de tração. Nessa opção, empregam-se corpos de prova retangulares com 20 cm de largura e 10 cm de comprimento, como recomendam as normas NBR 12824 e ASTM D4885. Em geral, as resistências obtidas nos ensaios de banda larga são inferiores às obtidas nos ensaios com corpos de prova em forma de halteres.

Há ainda situações em que a membrana pode estar sujeita a solicitações multiaxiais, como as que ocorrem devido a recalques do material sobre o qual se apóia a membrana, e existem diversos arranjos de ensaio capazes de reproduzir esses casos em laboratório. Assim, ocorrem diferenças entre valores de resistência a tração, as quais dependem do tipo de ensaio utilizado, da forma e das dimensões do corpo de prova

TABELA 13-5
Principais características de métodos químicos de identificação de geomembranas [Halse et al., 1991]

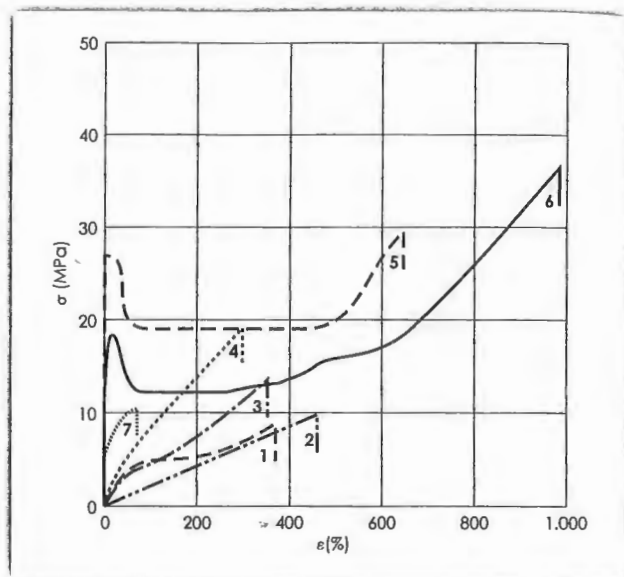
Método	Informação obtida	Vantagens ^a	Desvantagens
TGA (Termogravimétrico)	Tipo de polímero; aditivos; teor de cinzas; porcentagem de negro-de-fumo; temperaturas de decomposição	Medida direta; alta precisão; usado para todos os polímeros	Resultados qualitativos; custo elevado
DSC (calorimetria diferencial)	Ponto de fusão, cristalinidade; tempo de oxidação; transição vítrea	Medida direta, alta precisão, usado para todos os polímeros	Resultados qualitativos; limitado para polímeros clorados; custo elevado
TMA (termomecânico)	Coefficiente de expansão térmica linear; ponto de amolecimento; transição vítrea	Medida direta; alta precisão, usado para todos os polímeros	Custo elevado
IR (infravermelho)	Identifica aditivos, cargas e plastificantes; taxa de reação oxidativa	Usado para todos os polímeros	Preparação da amostra sem informação da resina; custo elevado
GC e HPLC (cromatografia)	Identifica aditivos e plastificantes	Medida direta	Preparação da amostra sem informação da resina, custo elevado
Densidade (ρ)	Densidade e cristalinidade	Medida direta, valores precisos, baixo custo	Somente polímeros selecionados; sem informação da resina
Índice de derretimento (MI)	Ponto de fusão e taxa de fluxo	Refere-se ao peso molecular; medida precisa; baixo custo	Limitado para polímeros clorados; valores empíricos
GPC (cromatografia por permeação de gel)	Distribuição de peso molecular	Valores precisos; técnica válida somente para peso molecular; usado para todos os polímeros	Não é de utilização comum; preparação da amostra; custo muito elevado

Observação: uma vantagem comum a todos os métodos é o tamanho extremamente reduzido das amostras para os ensaios, em comparação aos tamanhos típicos dos ensaios de propriedades físicas e mecânicas.

e da taxa de deformação aplicada durante o ensaio. A Fig. 13-6 ilustra curvas tensão-deformação de diversas geomembranas, onde se podem destacar diversos aspectos qualitativos e quantitativos referentes à tração desses materiais.

FIGURA 13-6

Curvas típicas tensão-deformação para diferentes tipos de geomembrana. 1, PECS; 2, butil; 3, PEC; 4, PVC; 5, PP; 6, PEAD; 7 membrana impregnada, reforçada com trama de PE [Rigo e CAZZUFFI, 1991].



Considerando apenas as geomembranas de maior uso, pode-se destacar:

- As geomembranas de PEAD são relativamente rígidas, pois atingem uma tensão de escoamento para cerca de 17% de deformação. À medida que aumentam as deformações, cai a tensão, que principia novamente a aumentar para cerca de 400% de deformação até a ruptura, que ocorre em cerca de 1.000% de deformação.
- As geomembranas de PVC são mais flexíveis e apresentam uma curva tensão/deformação diferente da observada para PEAD, com as tensões crescentes com as deformações até a ruptura, que se processa para deformações superiores a 300%.
- Considerando a tensão de escoamento do PEAD como representativa da tensão de ruptura, observa-se que o PEAD e o PVC apresentam resistências a tração de magnitudes muito próximas.
- As demais geomembranas têm características tensão/deformação que se aproximam ou das membranas de PEAD ou de PVC; ou seja, dependendo do material, tendem a ser mais rígidas ou mais flexíveis.

Os resultados dos ensaios de resistência a tração são úteis para o controle de qualidade durante a fabricação, para a comparação entre variações nos processos de produção, para a comparação entre diferentes produtos, para identificação, para verificar a variação mecânica provocada após a incubação em diferentes substâncias e para verificar a variação provocada após envelhecimento.

Outros ensaios mecânicos que traduzem solicitações comuns em geomembranas são o de resistência a punção e a rasgos. Muitas vezes as geomembranas são colocadas sobre ou sob material pontiagudo ou com cantos-vivos, como pode ocorrer quando estão em contato com materiais granulares de camadas drenantes. À medida que crescem os carregamentos, esses materiais tendem a punçar a geomembrana e abrir uma passagem para os líquidos e vapores contidos. Como no ensaio de resistência a tração, há diversas alternativas para se medir essa propriedade, com diferentes arranjos e técnicas de ensaio que, além disso, incluem ensaios estáticos e dinâmicos. As normas NBR 13359 e ASTM D4833 especificam as condições de um ensaio de punção estático correntemente utilizado. De qualquer maneira, as opções disponíveis devem ser entendidas como ensaios-índices ou qualitativos, considerando-se a pequena quantidade de amostra utilizada e a dificuldade de associar os resultados das diferentes alternativas com o desempenho em campo. Para a aplicação prática, a tendência é buscar-se um ensaio que consiga reproduzir mais adequadamente as solicitações de campo, inclusive reproduzindo as condições do material de base da membrana e do material a ser estocado.

A resistência a punçamentos das geomembranas pode ser melhorada com a utilização conjunta de um geotêxtil atuando como reforço. O aumento da resistência estará condicionado pelas características desse geotêxtil, como o seu tipo, resistência a tração, gramatura e espessura sob carga. Os benefícios da utilização conjunta de um geotêxtil necessitam ser cotejados com uma possível redução de resistência de interface, considerando-se as baixas resistências que usualmente se desenvolvem entre diferentes geossintéticos.

Alguns fabricantes fornecem geomembranas solidarizadas com geotêxtil, constituindo geocompostos impermeabilizantes, o que minimiza o problema, pois a resistência da interface solidarizada tende a ser maior do que a resistência entre a geomembrana e o geotêxtil apenas superpostos. As combinações de geomembranas com geotêxteis substituem geomembranas mais espessas e, portanto, são geocompostos mais leves e mais fáceis de manusear. Maiores informações sobre esse tema são fornecidas no Cap. 9.

Principalmente durante a instalação, uma geomembrana está sujeita a rasgar-se por ação do vento ou por manuseio inadequado. Uma alternativa de ensaio para se conhecer a resistência ao rasgo é a oferecida pela norma ASTM D 1004. O corpo de prova apresenta, em

sua região central, uma reentrância que forma um ângulo de 90°, por onde o rasgo se propagará ao se tracionar a geomembrana. A máxima tensão aplicada constitui a resistência ao rasgo, valor que deve ser tomado como índice, já que não existe uma relação entre o valor de laboratório e o desempenho em campo.

As geomembranas, dependendo das condições de carga e de sua composição, podem estar sujeitas a ruptura por fissuras de tração (*stress cracking*). Esta é definida como a ruptura ou quebra de uma geomembrana de polietileno devida a uma tensão de tração inferior à resistência a tração da membrana. As rupturas por fissuras de tração parecem ser condicionadas por questões ambientais, como a exposição da membrana a variações de temperatura, o que pode induzir o surgimento de tensões de tração. Além disso, a presença de ranhuras e arranhões, deformações concentradas, bem como a superposição de soldas por extrusão, podem desencadear a ruptura.

De acordo com o ensaio ASTM D 5397 para verificação de fissuras sob tensão, submetem-se vários corpos de prova, imersos em solução específica (Igepal), a 50°C, a distintos carregamentos. Mede-se o tempo de ruptura para cada nível de carregamento, obtendo-se uma curva em que se distinguem um trecho de comportamento dúctil e outro de ruptura frágil. Uma geomembrana de PEAD apresentará boa resistência a ruptura por fissuras de tração se o tempo para transição entre o comportamento dúctil e frágil for superior a, pelo menos, 200 horas. Um procedimento alternativo consiste em utilizar um único corpo de prova e submetê-lo a 30% da tensão de tração de ruptura observada nos ensaios em halteres. Nesse caso, o corpo de prova deve resistir à tensão por pelo menos 100 horas. Como não é possível obter uma correlação entre o resultado do ensaio e o comportamento de campo, os resultados são válidos para o controle de qualidade de fabricação.

Do ponto de vista prático, a prevenção de ruptura por fissuras de tração, em geomembranas susceptíveis a esse fenômeno, pode ser conseguida atentando-se para os seguintes pontos:

- instalar a geomembrana com folga suficiente para compensar eventuais retrações térmicas;
- executar emendas uniformes para prevenir a concentração de esforços em pontos falhos e a conseqüente propagação de fissuras de tração;
- adotar uma adequada composição da manta, em termos de polímero e aditivos, para balancear as principais características, como a cristalinidade, a densidade, o peso molecular e a orientação das moléculas.

A Tab. 13-6 sintetiza resultados de resistência a tração, resistência a rasgos e resistência a punçamentos de algumas geomembranas fabricadas no Brasil.

Resistências de interfaces entre geomembranas e diferentes materiais

Na análise de sistemas de contenção de resíduos ou de efluentes, é necessário conhecer as resistências que podem se desenvolver entre a geomembrana e o solo subjacente, entre a geomembrana e outros geossintéticos, entre diferentes geossintéticos, e entre estes e o resíduo a ser estocado. Tal necessidade se prende ao fato de que, por vezes, as barreiras impermeáveis são compostas por diferentes geossintéticos ou repousam sobre solos de baixa resistência, de forma que as interfaces podem se constituir em planos preferenciais de ruptura e condicionar a estabilidade do resíduo, de coberturas e da barreira como um todo.

TABELA 13-6
Valores médios de algumas propriedades de
geomembranas fabricadas no Brasil*

Produto	Resistência a tração		Punção ^(b) (N)	Resistência a rasgos ^(c) (N)	
	CP em forma de haltere ^(a) (MPa)			Longit.	Transv.
PEAD 0,8 mm	19	19	389	126	129
PEAD 2,5 mm	18	20	911	338	344
PVC 1,0 mm	18	16	266	52	49
PVC 2,0 mm	17	15	504	92	95

(a) ASTM D638; (b) ASTM D4833; (c) ASTM D1004. *Propriedades medidas pelo Laboratório de Geossintéticos da EESC-USP, nos anos de 2000-2001, em amostras enviadas pelos fabricantes

Há inúmeras informações acerca das resistências de interfaces produzidas em diferentes épocas e seguindo diferentes técnicas. Assim, muito da informação presente na literatura deve ter o seu universo de abrangência limitado aos materiais e condições a partir dos quais foram obtidas. Os ensaios que fornecem essas resistências são o ensaio clássico de cisalhamento direto, preparado segundo diferentes configurações, o ensaio de plano inclinado e o ensaio de arrancamento. O ensaio de cisalhamento direto de grandes dimensões segue o preconizado pela ASTM D5321 e emprega corpos de prova quadrados, com 30 cm de lado.

Os resultados são interpretados de acordo com o critério de resistência de Mohr-Coulomb, que admite envoltória de resistência linear e que pode ser expressa como

$$s = c_a + \sigma \operatorname{tg} \delta, \quad [13-1]$$

sendo:

c_a a adesão entre o geossintético e o solo;

c o intercepto de coesão do solo;

δ o ângulo de atrito entre solo e geossintético.

Quando a geomembrana está em contato com o solo, pode-se esperar que diversos fatores tendam a afetar a resistência da interface. Por exemplo, o umedecimento da interface de geomembrana apoiada sobre argila, provocado por condensação de água ou por água advinda de processos de adensamento, pode reduzir consideravelmente a resistência que haveria caso essa umidade não estivesse presente. Acrescente-se a isso que as condições de cisalhamento do solo, se drenado ou não-drenado, desempenharão importante influência na resistência disponível. Tem-se verificado, também, que a resistência de interface entre argila e geomembrana varia com a tensão normal (envoltória de resistência curvilínea), diferentemente do pressuposto no critério de resistência de Mohr-Coulomb: para baixos valores de tensão normal, as resistências são crescentes com a tensão normal, para em seguida tornarem-se aproximadamente constantes.

Outro aspecto condicionante da resistência a se utilizar em projeto, refere-se ao fato de que a resistência de pico é atingida para valores muito baixos de deslocamentos, havendo significativas reduções pós-pico, quando a resistência encaminha-se para a resistência residual.

Os resultados de ensaio com solo costumam também ser apresentados através da eficiência, que nada mais é do que a relação entre a resistência de interface e a resistência do solo:

$$E_a = \frac{c_a}{c} \quad \text{e} \quad E_\phi = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \phi} \quad [13-2]$$

em que

E_a é a eficiência com relação à adesão;

E_ϕ a eficiência com relação ao atrito; e

ϕ o ângulo de atrito do solo.

A Tab. 13-7 sintetiza faixas de variações da resistência de interface entre solos e geomembranas, entre solos e outros geossintéticos, e entre diferentes geossintéticos. Constatam-se, de imediato, variações de grande magnitude, o que pode ser creditado aos diferentes tipos de ensaio utilizados e seus condicionamentos, à forma de interpretação dos resultados, à consideração da resistência de pico ou residual, à variabilidade das composições e dos processos de fabricação dos diferentes geossintéticos. De fato, conforme citado anteriormente, são muitas as

interferências possíveis, que incluem as condições de drenagem dos solos em contato com as geomembranas e outros geossintéticos, a faixa de tensões considerada, a possibilidade de umedecimento das interfaces e o fato de que, comumente, a resistência de pico é mobilizada para pequenos deslocamentos, com significativas reduções à medida que aumentam os deslocamentos, até atingir-se a resistência residual. Assim, os valores da Tab. 13-7 são apenas ilustrativos, evidenciando-se a necessidade de ensaios específicos que procurem retratar, o mais fielmente possível, as condições de solicitação de obra, com vistas à definição dos parâmetros de projeto.

Resistência química e durabilidade

A resistência que as geomembranas podem oferecer a diferentes substâncias constitui uma propriedade fundamental, uma vez que, se ela for de alguma forma afetada pelas substâncias presentes, a sua função de impedir a passagem de contaminantes poderá ser comprometida.

A resistência química das geomembranas tem sido determinada pelos fabricantes e por institutos de pesquisa para diferentes substâncias, como se pode comprovar pela Tab. 13-8. Esta pode ser utilizada como um guia geral, no entanto há uma série de situações em que é necessário conhecer como uma geomembrana se comporta frente a uma certa substância. Isso pode ocorrer, por exemplo, quando: a geomembrana estiver em contato com líquidos compostos por diferentes substâncias, onde efeitos sinérgicos poderão comprometer o desempenho da manta; a geomembrana for composta de uma mistura de materiais; o percolado variar sua composição química ao longo do

TABELA 13-7
Faixas de variação de ângulos de atrito de interface (em graus) entre solos e geomembranas [simplificada de SHARMA e LEWIS, 1994]

Material	Arelas	Argilas	PVC	PEAD lisa	PEAD texturizada	Georrede
Geomembrana PVC	20 – 30	6 – 15	—	—	—	—
Geomembrana lisa PEAD	17 – 25	5 – 10	—	—	—	—
Geomembrana texturizada PEAD	30 – 40	9 – 15	—	—	—	—
Geotêxtil tecido	23 – 42	16 – 26	10 – 28	7 – 11	9 – 17	9 – 18
Geotêxtil não-tecido agulhado	25 – 44	15 – 28	16 – 26	8 – 12	15 – 33	10 – 27
Georrede	—	—	11 – 24	5 – 19	7 – 25	—

tempo; ocorrerem condições extremas não-contempladas pelos testes divulgados pelo fabricante ou presentes na literatura, como, por exemplo, um efluente lançado a elevadas temperaturas.

Nota importante:

a definição de desempenho adequado, empregada na Tab. 13-8, pode variar significativamente para cada aplicação e em função da expectativa de vida desejada. Apparentemente, materiais similares podem apresentar grande variação de desempenho para a mesma exposição, dependendo de sua formulação. Dessa forma, os dados acima são meramente indicativos e não devem ser utilizados como fonte para escolha e/ou especificação de geomembranas.

TABELA 13-8
Resistência química de geomembranas [apud SHARMA e LEWIS, 1994]

Geomembrana	Borracha butil		PEC		PECS		Poliolefin elastilizada		Borracha epiclo-roidina		PEMD		Neoprene		PEAD		PVC	
Agente químico	Temperatura																	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Hidrocarbonos asfálticos	O	O	X	X	O	O	X	O	X	X	O	O	X	X	X	X	O	O
Hidrocarbonos aromáticos	O	O	O	O	O	O	X	O	X	X	O	O	X	X	X	X	O	O
Solventes clorados	X	X	O	O	O	O	X	O	X	X	X	O	X	O	X	X	O	O
Solventes oxigenados	X	X	O	O	O	O	X	O	X	O	X	X	X	X	X	X	O	O
Solventes de petróleo bruto	O	O	X	X	O	O	X	O	X	X	O	O	X	X	X	X	O	O
Álcoois	X	X	X	X	O	O	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ácidos orgânicos	X	X	X	X	X	O	X	O	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X
Ácidos Inorgânicos	X	X	X	X	X	O	X	O	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X
Bases orgânicas	X	X	X	X	X	O	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bases inorgânicas	X	X	X	X	X	O	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Metais pesados	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sais	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

A = 38°C; B = 70°C; X = desempenho adequado, em geral; O = resistência fraca, em geral.

Em casos de situações específicas, tem-se recorrido ao método 9090 da EPA, a despeito das muitas críticas que se possam fazer ao seu procedimento. Nesse método, determinam-se uma ou mais propriedades mecânicas ou químicas da geomembrana virgem e, após sua imersão na substância de interesse, durante determinados períodos de tempo e a diferentes temperaturas (23°C e 50°C são as temperaturas de referência), executam-se novos ensaios comparativos. O período máximo recomendado é de 120 dias, e o ensaio deve ser visto como um indicador da possibilidade de degradação da geomembrana frente a uma determinada substância e não como um quantificador, já que não há um critério apropriado para definir perdas aceitáveis e nem é esse o objetivo do método. Outras críticas à eficiência do método dizem respeito à inexistência de correlação entre as variações observadas em campo e em laboratório, ao tempo de ensaio relativamente curto, frente à vida útil da obra, ao fato de as amostras não estarem sujeitas a qualquer carregamento e à possibilidade de o ensaio empregado na avaliação da degradação não ser sensível o suficiente para detectar possíveis variações estruturais.

Além do efeito das substâncias químicas, qualquer ação que afete a cadeia polimérica tende a alterar o desempenho da geomembrana a longo prazo. Comumente, esses efeitos se manifestam pelo enrijecimento da manta, traduzido por um aumento da resistência à ruptura e redução da deformação correspondente mas podem também se manifestar por modificações em suas características de permeabilidade e transmissividade. Entre esses efeitos, citam-se a oxidação e a ação de raios ultravioleta, da temperatura e de agentes biológicos.

Para combater a ação dos raios ultravioleta e da oxidação, recorre-se a vários aditivos na composição da geomembrana, como negro-de-fumo, antioxidantes e outros agentes estabilizadores. A presença e a dispersão de negro-de-fumo pode ser avaliada pelos métodos ASTM D1603 e ASTM D3015. A resistência a raios ultravioleta é determinada segundo procedimento similar ao utilizado na determinação da resistência química, expondo-se a manta, em laboratório, a condições controladas de raios ultravioleta, ou em ambiente externo, diretamente sob a luz solar. Ensaio de referência são comparados na amostra virgem e efetuados após exposição da membrana a raios ultravioleta, relatando-se a porcentagem de resistência retida pela membrana após certo tempo de exposição. Métodos aplicáveis são o ASTM D4355 e ASTM D1435.

Os processos de oxidação ocorrem pela interação entre radicais livres e o oxigênio, e afetam a cadeia polimérica da resina, num processo que tende a aumentar gradativamente, uma vez deflagrado. A avaliação da quantidade e da depleção de antioxidantes em membranas pode ser obtida em ensaios térmicos, como o de DSC, descrito na Tab. 13-5, em que se satura de ar o recipiente contendo a geomembrana e mede-se o OIT - tempo de indução da oxidação.

A deterioração de geomembranas por agentes biológicos compreende a ação de animais (roedores e insetos), raízes e microorganismos, com efeitos de difícil quantificação. Em primeira aproximação pode-se esperar que geomembranas mais resistentes possam também suportar a ação de animais e raízes, a menos que em suas composições entrem substâncias que atraíam roedores. A ação de microorganismos parece não afetar as cadeias poliméricas, no entanto podem afetar geossintéticos em contato com as geomembranas, como geotêxteis destinados à filtração e separação que podem se colmatar.

Frise-se, também, que variações de temperatura podem afetar o desempenho de geomembranas. O efeito parece ser mais marcante para altas do que para baixas temperaturas. O método ASTM D794 fornece recomendações de ensaio para avaliação das mudanças provocadas pela elevação de temperatura.

13.5.2 Geocompostos argilosos

Condutividade hidráulica

De uma forma geral, a condutividade hidráulica de geocompostos argilosos (GCL) varia entre 10^{-10} e 10^{-8} cm/s, em relação inversa à intensidade da tensão normal atuante. Dados experimentais indicam não haver diferenças significativas de condutividade entre os diferentes geocompostos argilosos, com exceção, evidentemente, dos que utilizam geomembranas. No que se refere às emendas por superposição, também há comprovação de que funcionam adequadamente, não comprometendo a baixa condutividade da manta.

Resistência ao cisalhamento

A resistência de geocompostos argilosos pode ser separada considerando duas possibilidades de ruptura: uma passando pelo próprio corpo da bentonita (resistência interna) e outra pela interface entre o geotêxtil (ou geomembrana) e o material adjacente (resistência de interface).

Um problema associado aos geocompostos argilosos reside nas baixas resistências das bentonitas, quando hidratadas. Bentonitas secas apresentam ângulos de atrito por vezes superiores a 30° ; contudo, quando hidratadas, esses ângulos caem até a valores inferiores a 10° . Isso pode gerar situações de instabilidade, quando rupturas podem ocorrer através da bentonita. As técnicas de reforço introduzidas na produção de diversas classes de geocompostos argilosos têm permitido superar essa deficiência, contudo as condições de uso devem garantir a permanência desse benefício. Por exemplo, em camadas de cobertura, a ação das intempéries pode expor e sollicitar o geocomposto, comprometendo esse benefício a longo prazo.

Da mesma forma que os demais geossintéticos, as informações disponíveis acerca da resistência de geocompostos argilosos apresentam grande dispersão, pelas características dos ensaios empregados, condições de hidratação, tipo de geossintético, forma de união, condições de dissipação de pressões neutras e influência das características químicas do fluido de hidratação. Assim, sugerem-se ensaios específicos para a definição de parâmetros de projeto, onde se possam levar em conta as características de solicitação do material em obra.

A resistência de interface fica condicionada, entre outros fatores, pelo material em contato com o geocomposto e pela possibilidade de a bentonita escapar do invólucro de geotêxteis e lubrificar a interface. Em função da grande variedade de situações que podem ocorrer, o mais indicado para cada situação específica é realizar ensaios em que as condições de campo possam ser reproduzidas a contento, principalmente em relação às condições de umidade e de dissipação de pressões neutras.

Autocicatrização

Danos de instalação e de operação podem provocar furos em geocompostos argilosos. No entanto a elevada capacidade de expansão da bentonita componente dos geocompostos argilosos faz com que a autocicatrização ocorra com facilidade, dependendo do tamanho do furo. Experimentos de laboratório com geocomposto do tipo colado, seco e com abertura controlada de furos revelaram que furos com diâmetro inferior a 25 mm pouco afetam a condutividade hidráulica após hidratar a bentonita, estando esta confinada.

Outra situação em que a autocicatrização se faz presente ocorre em processos decorrentes de ciclos de umedecimento e secagem. Os geocompostos, depois de hidratados, expandem e, quando ressecados, contraem e trincam, com aumento da permeabilidade. Experimentos laboratoriais revelam que, também nesses casos, a capacidade de autocicatrização recupera as propriedades hidráulicas do geocomposto, quando novamente hidratado, praticamente sem alteração da condutividade. Um aspecto ainda não-esclarecido suficientemente é a presença de cátions capazes de substituir o Na^+ da bentonita. Dependendo do cátion, é possível haver interferências na permeabilidade da manta e na capacidade de expansão da bentonita. Um expediente utilizado para prevenir problemas dessa natureza consiste em saturar o GCL com água, anteriormente ao seu contato com o percolado que possa conter cátions trocáveis. Tem-se também, nesses casos, substituído a bentonita sódica por bentonita cálcica. Esta apresenta menor capacidade de troca, no entanto tem maior condutividade hidráulica e menor expansão.

13.6 ESFORÇOS SOLICITANTES EM GEOMEMBRANAS

Além das solicitações de natureza física e química, também atuam sobre as geomembranas esforços mecânicos decorrentes de várias ações, como o peso próprio, o peso do resíduo a estocar, a dilatação térmica, recalques, arraste provocado por deslizamento do resíduo ou da cobertura, e vento, entre outras. Essas solicitações servirão para estabelecer uma espessura mínima que, no entanto, poderá ser modificada por imposições construtivas e características de sobrevivência à instalação, ou, ainda, por especificações de agências reguladoras. Apresentam-se, a seguir, modelos para cálculo de algumas dessas ações.

13.6.1 Tensões devidas ao próprio peso

As geomembranas têm como função primária a estanqueidade e por isso os esforços sobre ela devem ser minimizados. Não obstante, certas ações sempre estarão presentes, como o peso próprio da membrana disposta sobre um talude (Fig. 13-7).

O peso da geomembrana (W), por metro de comprimento do talude, será:

$$W = \gamma_{GM} t \frac{H}{\sin \beta} \quad [13-3]$$

Assim, a tensão atuante na geomembrana fica expressa por:

$$\sigma_{tA} = \frac{W \sin \beta - W \cos \beta \operatorname{tg} \delta}{t} \quad [13-4]$$

sendo:

γ_{GM} o peso específico da geomembrana;

t a espessura da geomembrana;

H a altura do talude;

β o ângulo de inclinação do talude;

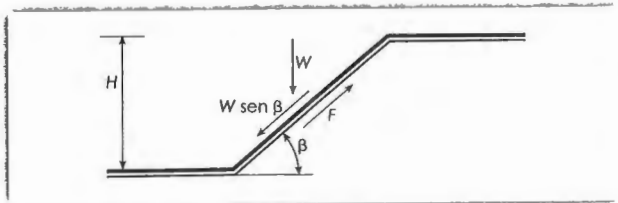
σ_{tA} a tensão de tração atuante na geomembrana;

W o peso da geomembrana; e

δ o ângulo de atrito entre a geomembrana e o material de fundação.

FIGURA 13-7

Ação do próprio peso da geomembrana.



13.6.2 Tensões causadas por recalques

Outras ações mais difíceis de quantificar referem-se à possibilidade de recalques do solo de fundação e a arraste da geomembrana, promovida pela movimentação do resíduo estocado, da camada de proteção ou do solo de cobertura. Destaque-se que, além dos recalques do solo, recalques do resíduo estocado afetam rotineiramente as membranas posicionadas nos sistemas de cobertura.

No caso de ocorrência de um recalque ΔH , como assinalado na Fig. 13-8, verifica-se que a membrana passa a ser tracionada. No modelo proposto por KOERNER (1998), para se calcular a espessura da geomembrana capaz de suportar as tensões despertadas, é necessário conhecer o comprimento de mobilização, a mínima distância necessária para mobilizar toda a resistência da geomembrana, quando confinada sob uma certa tensão normal. A Fig. 13-9 mostra o comprimento de mobilização para membranas de PEAD e de PVC.

Considerando o equilíbrio de forças na direção horizontal (Fig. 13-8), pode-se escrever:

$$T \cos \alpha = F_{U\sigma} + F_{L\sigma} + F_{LT}, \quad [13-5]$$

resultando para a força de tração na geomembrana:

$$T = \frac{\sigma_n x (\operatorname{tg} \delta_U + \operatorname{tg} \delta_L)}{\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha \operatorname{tg} \delta_L} \quad [13-6]$$

Conhecendo-se a tensão de ruptura da geomembrana (σ_r) e o fator de segurança (FS) que se deseja no dimensionamento, pode-se determinar a mínima espessura (t) para resistir ao esforço calculado (T):

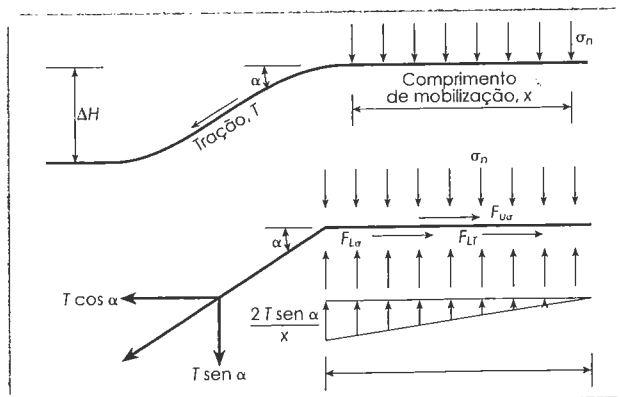


FIGURA 13-8

Geomembrana tracionada por recalque da fundação e modelo de cálculo [KOERNER, 1998].

$$t = \frac{\sigma_n x (\operatorname{tg} \delta_U + \operatorname{tg} \delta_L)}{(\sigma_r / FS)(\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha \operatorname{tg} \delta_L)} \quad [13-7]$$

Os símbolos adicionais da Eqs. [13-5], [13-6] e [13-7] são:

$F_{U\sigma}$ a força de atrito sobre a geomembrana, devido ao peso de material estocado (se for um líquido, como num canal ou lagoa, essa força será nula);

$F_{L\sigma}$ a força de atrito sob a geomembrana, devido ao peso de material estocado;

F_{LT} a força de atrito sob a geomembrana, devido à componente vertical da força de tração T ;

α o ângulo de subsidência;

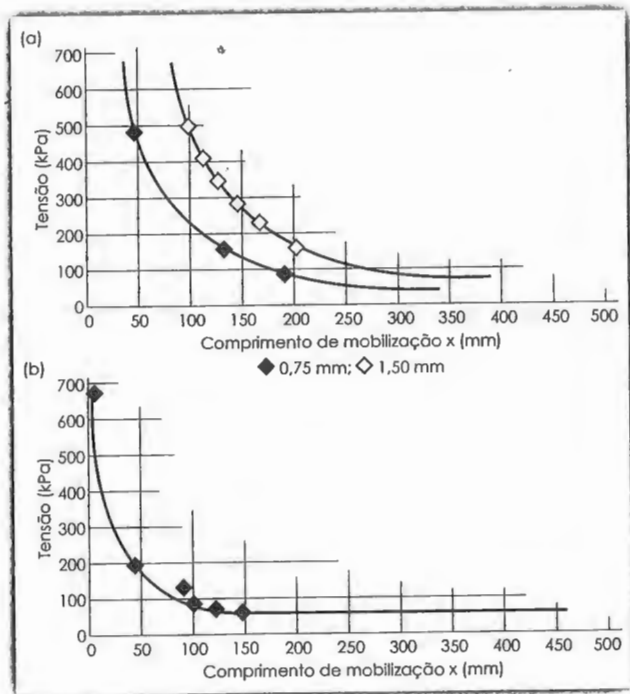
σ_n a tensão normal, devido ao peso de material estocado;

δ o ângulo de atrito entre a geomembrana e o material adjacente;

x o comprimento de mobilização (Fig. 13.9)

FIGURA 13-9

Comprimentos típicos de mobilização e tensões normais associadas para geomembranas de (a) PEAD e de (b) PVC. [KOERNER, 1998].



13.6.3 Traclonamento devido a arraste

Outra solicitação importante refere-se à possibilidade de arraste da geomembrana provocado pelas solicitações de atrito que possam se desenvolver entre a geomembrana e o material imediatamente sobrejacente. Sendo F_U a força de atrito sobre a geomembrana (devida, por exemplo, ao resíduo estocado, à camada de proteção mecânica, à camada de drenagem) e F_L a correspondente força entre a geomembrana e o material subjacente, se F_U for maior que F_L , a membrana passa a ser traclonada e pode romper. Cumpre, assim, verificar a resistência a tração da geomembrana (e de qualquer geossintético componente da barreira e sujeito ao mesmo tipo de solicitação).

SHARMA & LEWIS (1994) sugerem como alternativa de abordagem dessa questão que se apele para uma solução de natureza física, como, por exemplo, conciliar os materiais em contato. Assim, reduzir o coeficiente de atrito entre a geomembrana e o material sobrejacente (F_U) e fazer com que esse atrito seja inferior ao atrito que se desenvolve entre a geomembrana e o material subjacente (F_L) minimiza os efeitos de arraste. A adoção de um geotêxtil sobre a geomembrana pode facilitar essa tarefa, contudo em todas essas situações é indispensável verificar a estabilidade do corpo do aterro, que pode ter uma ruptura condicionada por esses planos de menor resistência.

13.6.4 Tensões causadas por dilatação térmica

Variações de temperatura ocasionam expansão e contração das membranas. Isso pode despertar tensões de tração e é um importante tópico construtivo, visto ser necessário preverem-se folgas de instalação capazes de compensar as deformações geradas. A elongação da manta por variação térmica (ΔL) pode ser expressa por:

$$\Delta L = \mu L \Delta T \quad [13-8]$$

onde:

μ é o coeficiente linear de expansão térmica;

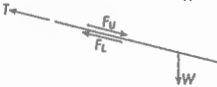
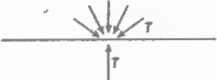
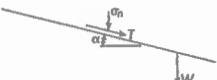
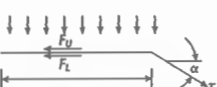
L o comprimento da manta;

ΔT a variação de temperatura.

A título de ilustração, membranas de PEAD apresentam μ variando entre $11 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e de PVC, com 35% de plastificante, entre 7 e $25 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Nos cálculos que envolvem efeitos devido à temperatura, é importante considerar a temperatura da geomembrana e não a temperatura ambiente, visto que nas geomembranas a temperatura atinge valores superiores à do ambiente.

A Tab. 13-9 sintetiza uma série de solicitações sobre geomembranas, os modelos de cálculo sugeridos na literatura e os parâmetros necessários.

TABELA 13-9
Solicitações mecânicas em geomembranas [KOERNER, 1998]

Problema	Tensões na gm	Diagrama de corpo livre	Propriedades necessárias Geomem-brana	Aterro	FS típico
Peso próprio	Tração		$\gamma_{GM}, t, \sigma_{adm}, \delta_L$	β, H	≥ 10
Peso do solo de cobertura	Tração		$t, \sigma_{adm}, \delta_U, \delta_L$	β, h, γ, H	0,5 a 2
Impacto durante a construção	Impacto		I	d, W	0,1 a 5
Peso do aterro	Compressão		σ_{adm}	γ, H	≥ 10
Punção	Punciona-mento		σ_p	γ, H, P, A_p	0,5 a 3
Ancoragem	Tração		$t, \sigma_{adm}, \delta_U, \delta_L$	$\beta, \gamma, \phi H$	0,7 a 5
Recalque Do aterro	Cisalha-mento		τ, δ_U	α, γ, H	≥ 10
Recalque sob o aterro	Tração		$\tau, \sigma_{adm}, \delta_U, \delta_L, X$	α, γ, H	0,3 a 10
Geomembrana γ_{GM} = peso específica da geomembrana t = espessura da geomembrana σ_{adm} = tensão admissível (cedência, ruptura) τ = tensão cisalhante I = resistência a impacto σ_p = resistência a punção δ_U = ângulo de atrito com material sobrejacente δ_L = ângulo de atrito com material subjacente X = comprimento de mobilização T = força de tração na geomembrana			Aterro H = altura do talude β = ângulo do talude γ = peso específico h = altura da camada α = ângulo de subsidência ϕ = ângulo de atrito d = altura de queda W = peso da geomembrana p = força de punção A_p = área de punção		

13.6.5 Comprimento de ancoragem

Geomembranas lançadas em superfícies inclinadas como, por exemplo, na proteção dos taludes de um canal, devem ser ancoradas para não deslizar, sob ação dos esforços que sobre ela atuam. A ancoragem pode ser proporcionada pelo simples espalhamento de um comprimento adicional de geomembrana, ou pela sua inserção em uma trincheira, como esquematizado nas Figs. 13-10 e 13-11.

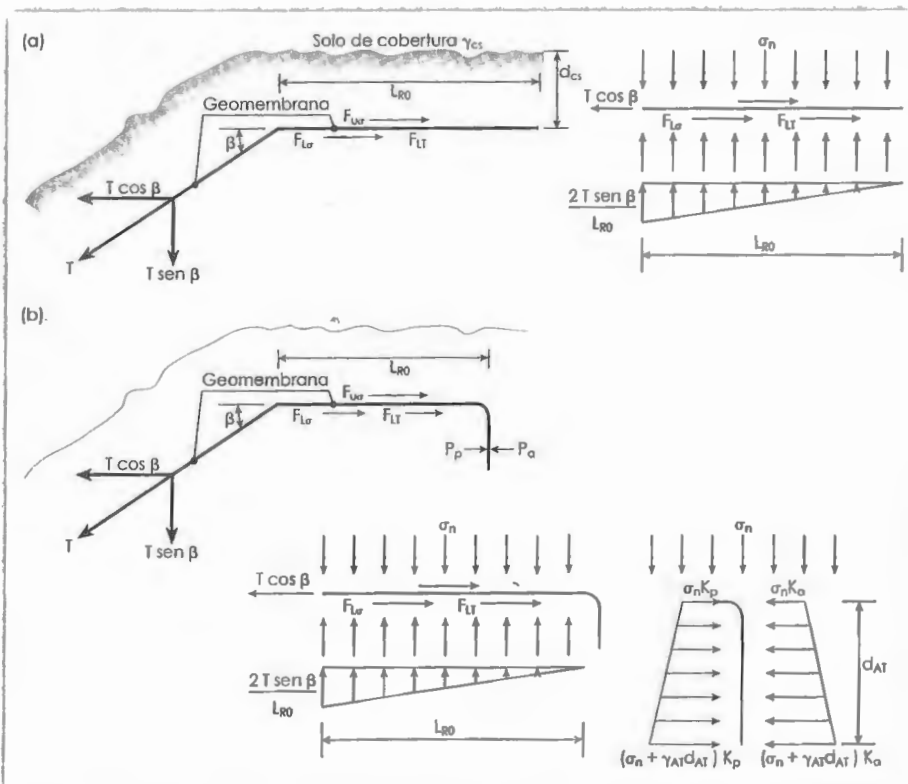


FIGURA 13-10

Modelos de cálculo de ancoragem de geomembranas.

(a) Ancoragem simples;

(b) ancoragem em trincheira.

FIGURA 13-11

Esquema típico de ancoragem de geomembrana em trincheira.



No caso sem trincheira, a condição de equilíbrio na direção horizontal fornece:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x = 0 \quad \text{ou} \quad T_{adm} \cos \beta &= F_{U\sigma} + F_{L\sigma} + F_{LT} = \\ &= \sigma_n \tan \delta_U (L_{RO}) + \sigma_n \tan \delta_L (L_{RO}) + 0,5 \left(\frac{2T_{adm} \sin \beta}{L_{RO}} \right) (L_{RO}) \tan \delta_L \end{aligned}$$

Resulta, assim, para o comprimento de ancoragem da geomembrana:

$$L_{RO} = \frac{T_{adm} (\cos \beta - \sin \beta \tan \delta_L)}{\sigma_n (\tan \delta_U + \tan \delta_L)} \quad [13-9]$$

em que:

T_{adm} é a força de tração admissível na geomembrana ($T_{adm} = \sigma_{adm} \cdot t$)

σ_{adm} a tensão de tração admissível na geomembrana;

t a espessura;

β o ângulo de inclinação do talude;

$F_{U\sigma}$ a força de atrito sobre a geomembrana, devido ao peso do solo sobrejacente (pequenas espessuras de solo, trincamentos e movimentações em conjunto com a geomembrana tornam esse valor desprezível);

$F_{L\sigma}$ a força de atrito, sob a geomembrana, devido ao peso do solo sobrejacente;

F_{LT} a força de atrito, sob a geomembrana, devido à componente vertical da força de tração, T ;

σ_n a tensão normal, devido ao peso do material sobrejacente;

δ o ângulo de atrito entre a geomembrana e o material adjacente; e

L_{RO} o comprimento de ancoragem.

No caso de uma trincheira, surgem esforços adicionais causados pelos empuxos ativo (P_A) e passivo (P_P) sobre a membrana na trincheira. Da condição de equilíbrio na direção horizontal, tem-se:

$$\Sigma F_x = 0 \quad \text{e} \quad T_{adm} \cos \beta = F_{U\sigma} + F_{L\sigma} + F_{LT} - P_A + P_P \quad [13-10]$$

onde

$$P_A = \frac{1}{2}(\gamma_{AT}d_{AT})K_A d_{AT} + (\sigma_n)K_A d_{AT}$$

ou $P_A = (0,5\gamma_{AT}d_{AT} + \sigma_n)K_A d_{AT}$ [13-11]

Analogamente,

$$P_P = (0,5\gamma_{AT}d_{AT} + \sigma_n)K_P d_{AT}, \quad [13-12]$$

sendo:

γ_{AT} o peso específico do solo na trincheira;
 d_{AT} a profundidade da trincheira de ancoragem;
 K_A o coeficiente de empuxo ativo;
 K_P o coeficiente de empuxo passivo; e

Dessa opção resulta uma equação e duas incógnitas, d_{AT} e L_{RO} , sendo necessário adotar valores para uma delas para se obter a outra.

Na determinação dos esforços para calcular a força de ancoragem necessária, devem-se considerar todos os esforços que venham a sollicitar a geomembrana, como o peso próprio; o efeito da temperatura e de ventos, se importantes no local; e o efeito de arraste proporcionado pelo resíduo ou por uma camada de cobertura.

Embora as geomembranas devam ser instaladas para se evitar a ocorrência de arrancamento e de rasgo pelos esforços atuantes, tem-se assumido que a possibilidade de arrancamento ocorra antes de um eventual rasgo, por ser menos prejudicial ao sistema e pela maior facilidade de correção. Com esse objetivo, dimensiona-se a força de arrancamento na ancoragem ligeiramente inferior à força resultante da resistência à tração da geomembrana.

13.7 ASPECTOS DE INSTALAÇÃO DE BARREIRAS IMPERMEÁVEIS

Na definição de uma barreira impermeável, diversos requisitos devem ser verificados e atendidos. Estes incluem desde a concepção do sistema em si, com a escolha da geomembrana e dos elementos apropriados para a finalidade desejada, até requisitos construtivos, de controle de instalação e de monitoramento em serviço que deverão ser obedecidos para que a barreira cumpra a sua função. Foge do objetivo deste manual entrar em detalhes acerca da concepção do sistema, os quais podem ser encontrados em textos específicos, como SHARMA & LEWIS (1994) e KOERNER (1994), e em normas de diferentes organismos, como a Usepa e a Cetesb, em São Paulo.

São apresentadas, a seguir, algumas informações sobre a instalação de geomembranas. Ressalte-se, porém, que dado o caráter de síntese deste texto, maiores detalhes podem ser obtidos nas recomendações para projeto do IGS Brasil (IGSBR GM 01/03, 2003).

13.7.1 Aspectos gerais

No que se refere à escolha do tipo e espessura da geomembrana, é necessário lidar com questões tais como vida útil do empreendimento, se temporário ou definitivo, a natureza do resíduo a ser estocado, sua periculosidade e sua agressividade aos tipos de geomembrana em consideração. Outros aspectos que possam afetar a durabilidade da membrana devem ser avaliados, como a possibilidade de exposição a intempéries (raios ultravioleta; grandes variações de temperatura) durante longos períodos e a ação de agentes biológicos (animais, micro-organismos, raízes). Em geral, as geomembranas são compostas com aditivos que permitem resistir à ação de raios ultravioleta durante a instalação, mas, em caso de paralisação da instalação por longos períodos ou de construção em etapas, será recomendável prever alguma forma de proteção. O mesmo se aplica em camadas de fechamento, onde o solo de cobertura possa ser erodido e expor a geomembrana. Situações como essa devem ser reparadas imediatamente à sua constatação.

Durante a vida útil do empreendimento, as ações em serviço precisam ser consideradas. Estas incluem o efeito de agentes que possam afetar a durabilidade da geomembrana, como as solicitações de origem mecânica: recalques, objetos que puncionem a geomembrana ou por arraste do material sobrejacente (o próprio resíduo, camadas de proteção ou de cobertura, etc.).

Os esforços atuantes nas geomembranas, em conjunto com as considerações acerca da durabilidade e sobrevivência do sistema, servirão para definir uma espessura mínima, bem como os detalhes de ancoragem. No entanto, essas espessuras mínimas podem ser sobrepujadas por especificações restritivas dos organismos reguladores ou por requisitos de sobrevivência à instalação, conforme se discutirá mais adiante. Contudo não há prescrições para todos os tipos de aplicações e nem em todos os países, cabendo ao engenheiro um papel fundamental na proposição de determinada alternativa para um problema que se mostre equivalente às especificações das agências reguladoras.

As operações de construção e de instalação da geomembrana constituem um ponto crucial para o sucesso do empreendimento. Nesse particular, pode ser necessário conhecer aspectos ambientais locais, como o regime de chuvas, as variações de temperatura, a umidade relativa e o regime de ventos. Certas geomembranas são mais sensíveis a variações de temperatura do que outras; assim, a variação de temperatura, a umidade e o vento podem dificultar a sua instalação e as operações de emenda.

As variações de temperatura obrigam a adoção de folgas nas dimensões das geomembranas para se evitarem os problemas decorrentes da contração, como tensões indesejáveis. A formação de rugas ou "bocas de peixe" deve ser evitada procurando-se alternativas de cons-

trução, como lançamento de quantidades de membrana que possam ser emendadas rapidamente ou trabalhar nas partes do dia em que as temperaturas são mais amenas. Na ocorrência de rugas, estas devem ser cortadas, a fim de se manter plana a região de emenda e facilitar a passagem da máquina de solda. Nessas operações, as dimensões de traspasse podem ficar inadequadas, caso em se deve recobrir a área com um “manchão” do mesmo material da geomembrana, soldado a ela por extrusão, estendendo-se até cerca de 15 cm além da área afetada.

Antes do lançamento da geomembrana, é necessário que o subleito esteja devidamente preparado e conformado para recebê-la. Isso inclui observar, como mínimas, as características de compactação e a presença de materiais cortantes ou pontiagudos, como pedras com dimensões acima de um mínimo especificado e, caso previsto, a correta instalação de alguma forma de proteção mecânica, como geotêxteis destinados à proteção contra punção.

Camadas de proteção mecânica sobre a geomembrana são necessárias por diversas razões, como evitar o punção pelo resíduo, possibilitar o tráfego de veículos e prevenir danos por vandalismo. Em geral, elas podem ser compostas com solo local, com resíduos selecionados, com geotêxteis combinados ou não com solo, com argamassa ou concreto, entre outros.

No lançamento das camadas de proteção, de camadas drenantes e das primeiras camadas de resíduos, deve-se cuidar para que os equipamentos necessários ao espalhamento tenham peso e características compatíveis com a proteção, evitando-se assim danos desnecessários à membrana. Dessa forma, o trânsito de qualquer equipamento sobre a geomembrana desprotegida deve ser proibido. O mesmo se aplica ao movimento da equipe de instalação, que deve ser minimizado e realizado com cuidado e com calçados adequados, evitando-se também a queda de ferramentas que possam ferir a manta por impacto.

Dessa breve exposição, constata-se que as geomembranas devem sobreviver aos rigores da instalação para que possam ter um desempenho compatível com o desejado em projeto. Assim, as condições de subleito, a forma de lançamento da manta e das camadas de proteção afetarão a sua sobrevivência. KOERNER (1998) sugere valores mínimos de propriedades para garantir a sobrevivência de geomembranas, frente a distintas condições de instalação, os quais são reproduzidos na Tab. 13-10.

O plano de instalação da geomembrana, a posição das emendas e a proteção ao levantamento pelo vento precisam ser considerados a priori para evitar imprevistos durante a instalação. Como já comentado, a ação do vento pode levantar a membrana e rasgá-la. Dessa forma é preciso promover ancoragem provisória para a membrana recém-espalhada, até que se execute a emenda e a ancoragem definitivas. Isso normalmente

é realizado com o auxílio de sacos de areia, espaçados convenientemente e com peso tal que possam resistir ao esforço de levantamento provocado pelo vento. O lançamento de quantidades que possam ser instaladas ao longo de um dia de trabalho constitui-se num expediente recomendável para evitar a exposição desnecessária da membrana ao vento e aos demais agentes, como variações de temperatura.

Os detalhes de acabamento de toda a instalação devem ser criteriosamente considerados. Estes incluem a ancoragem e a forma como a geomembrana interagirá com interferências que necessitem atravessá-la, como condutos que transportem efluente para uma lagoa ou sistemas de drenagem de gases de camadas de cobertura. Os detalhes de como a geomembrana deve envolver o dispositivo e como ocorrerá a vedação dessa interação devem ser apresentados em projeto. A Fig. 13-12 mostra um detalhe típico de envolvimento de tubo traspassante.

Quanto à trincheira de ancoragem, sua seção deve ser cuidadosamente especificada para que já desde os trabalhos de conformação se procure dar a forma apropriada no subleito. Nesse particular, deve-se conciliar a seção da trincheira com as características da geomembrana, visto que geomembranas muito rígidas dificilmente poderão ser dobradas ou convenientemente soldadas, a fim de atender a conformação de uma trincheira de seção retangular. Mudar a seção da trincheira (por exemplo, adotar seção em V), sempre se verificando as cargas sobre os condutos que eventualmente componham a trincheira, pode ser uma alternativa ao problema citado.

TABELA 13-10

Propriedades mínimas recomendadas para a sobrevivência de geomembranas às operações de instalação [KOERNER, 1998]

Propriedade e método de ensaio	Grau requerido de sobrevivência à instalação*			
	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Espessura (ASTM D 5193) (mm)	0,63	0,75	0,88	1,00
Tração ASTM D 882 (tira de 25 mm) (kN/m)	7,00	9,00	11,00	13,00
Rasgo (D1004 – molde C) (N)	33,00	45,00	67,00	90,00
Punção (ASTM D 4833) (N)	110,00	140,00	170,00	200,00
Impacto (ASTM D 3998 modificada) (J)	10,00	12,00	15,00	20,00

"Baixo" refere-se à colocação manual, cuidadosa, em subleito bem graduado, muito uniforme, com cargas leves de natureza estática, típicas de barreiras de vapor abaixo de lajes de piso. "Médio" refere-se à colocação manual ou mecânica em subleitos com cargas médias, típicas de revestimento de canais. "Alto" refere-se à colocação manual ou mecânica, em subleitos de textura pobre, com cargas altas, típicas de barreiras e coberturas de aterros. "Muito alto" refere-se à colocação manual ou mecânica em subleitos de textura muito pobre, com cargas muito altas, típicas de barreiras para pilhas de lixo e coberturas de reservatórios.

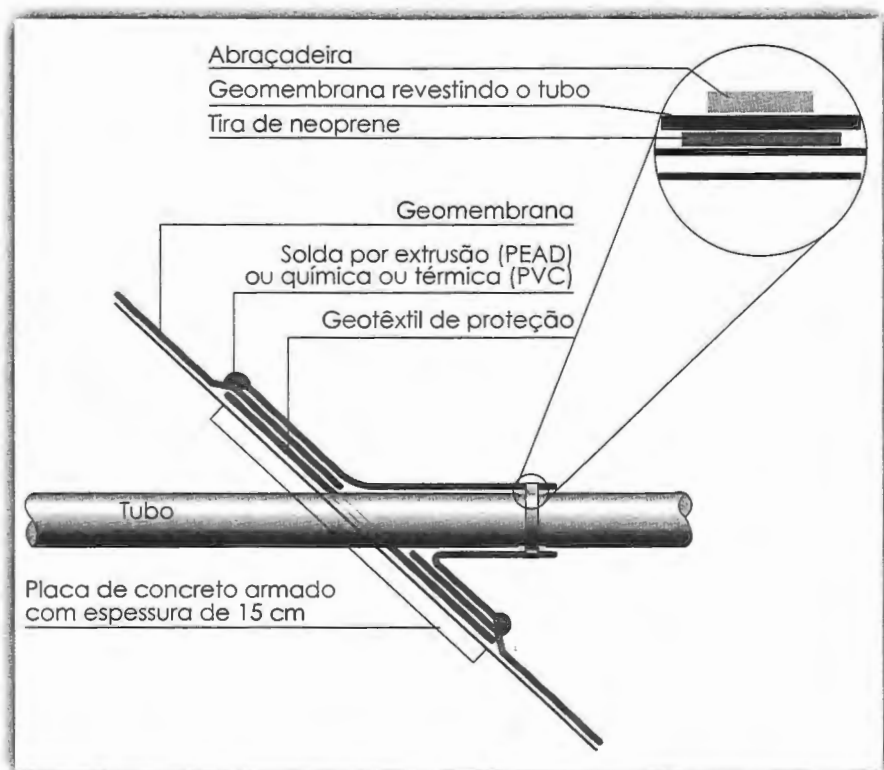


FIGURA 13-12 Exemplo de conexão tubo/geomembrana, dis-postos em talude.

Além desses aspectos, é necessário verificar a ocorrência de planos preferenciais de ruptura nas diversas interfaces que possam levar o sistema à instabilidade. Quando se pensa no sistema como um todo, há a necessidade de se levar em consideração aspectos como os dispositivos de drenagem, a capacidade de carga e recalques da fundação, a estabilidade dos taludes e a estabilidade dos solos de cobertura. Questões de cunho geotécnico podem ser resolvidas consultando-se a literatura específica sobre o assunto. KOERNER (1998) e SHARMA & LEWIS (1994) apresentam diversas considerações acerca de problemas geotécnicos associados a sistemas de disposição de resíduos.

13.7.2 Execução de emendas

Emendas em geomembranas

Um aspecto comum na instalação de geomembranas é a necessidade de emendas em campo, mesmo daquelas fornecidas em painéis. Trata-se de uma operação delicada e fundamental para um bom desempenho da geomembrana em qualquer sistema de impermeabilização. Na verdade, em função da reduzida permeabilidade desses materiais, os aspectos determinantes de seu comportamento serão as fugas e os vazamentos e não a permeabilidade. Vazamentos podem ocorrer através de emendas malfeitas, tanto em campo quanto em fábrica, orifícios resultantes

da fabricação, perfurações por manuseio e instalação inadequada ou devidas a solicitações em serviço. A emenda de geomembranas configura o processo mais crítico de toda a instalação e do qual dependerá o desempenho da barreira como um todo.

No caso de membranas flexíveis, como as de PVC, sempre que possível, devem-se utilizar painéis pré-fabricados, em que várias larguras de geomembranas são emendadas na própria fábrica, diminuindo a probabilidade de falhas e imperfeições. De qualquer maneira, o projetista deve levar em conta os equipamentos de movimentação e acessos disponíveis na obra para dimensionar os painéis ou bobinas de geomembrana a serem fornecidos.

Alguns métodos de emenda são aplicáveis somente a certos tipos de geomembranas. Em geral eles se baseiam em processos térmicos ou processos químicos, que por amolecimento ou derretimento, seguidos da aplicação de pressão sobre as superfícies a serem coladas, permitem a união de membranas contíguas.

Quando se opta por geomembranas de polietileno, deve-se prever que praticamente todas as emendas serão realizadas em campo, pois, embora elas possam ser soldadas na fábrica, deve-se evitar o seu dobramento, o que inviabiliza a produção de painéis. As geomembranas de polietileno são unidas comumente por processos térmicos, sendo o de solda por cunha quente e o da extrusão de material fundido, de mesma composição que a membrana, os mais comuns.

O primeiro processo utiliza equipamento específico e consiste em fundir as geomembranas na região da emenda por meio da passagem de uma cunha metálica aquecida por resistência elétrica e, em seguida, um mecanismo de pressão na forma de rolos complementa o processo de solda das duas mantas. Nesse processo, pode-se ter uma única emenda uniforme ou duas emendas, separadas por um espaço vazio, utilizado para verificar a estanqueidade da solda. No procedimento de solda, devem ser controladas a temperatura, a pressão aplicada às mantas e a velocidade de execução.

Outro processo de fusão emprega ar aquecido através de uma resistência: o ar é impelido ao longo da junção entre as membranas, promovendo sua fusão. Em seguida, a área é pressionada para completar o processo de solda. Tal como no processo de cunha quente, uma ou duas linhas de solda podem ser executadas.

No processo de extrusão, uma porção derretida do polímero é extrudada e colocada em contato com a extremidade da manta (fílete de extrusão) que está superposta e com a manta subjacente ou entre as duas mantas (extrusão plana). O polímero derretido aquece e derrete as mantas na região da emenda, ocorrendo a ligação após o resfriamento. Esse é, praticamente, o único processo possível de ser aplicado em mantas de polietileno em locais de difícil acesso, geome-

trias complicadas, soldas de pequenos comprimentos e reparos ou reforços na forma de “manchão”.

Os processos de fusão (cunha quente e ar quente) também são aplicados a mantas de PVC. Estas comumente já saem de fábrica soldadas em painéis que podem ou não cobrir a área desejada, em função de sua dimensão. Os painéis confeccionados em fábrica geralmente têm as emendas executadas por solda com aparelho de alta frequência: a ressonância molecular provoca o aquecimento e a fusão das geomembranas. Para grandes áreas, porém, é necessário emendar diferentes painéis em campo.

Uma outra opção, comum para PVC, é a utilização de solvente (solda química) passado sobre as superfícies a serem unidas, as quais, em seguida, devem ser pressionadas para que se complete a união. Alternativamente, pode-se dissolver uma certa quantidade do polímero (entre 1 e 20%), para tornar o solvente mais viscoso ou para ajustar sua taxa de evaporação. Por fim, podem-se utilizar nessas mantas, adesivos, colas químicas ou de contato. A Tab. 13-11 sintetiza os possíveis tipos de emenda aplicáveis a diferentes geomembranas, enquanto a Fig. 13-13 ilustra esquemas de diversos tipos de emenda.

A execução das emendas é complementada com testes de resistência e de estanqueidade. As emendas devem oferecer resistência compatível com a da geomembrana. O método ASTM D4437 especifica as condições de ensaio de resistência de geomembranas, que compreendem a tração da emenda e o seu descolamento.

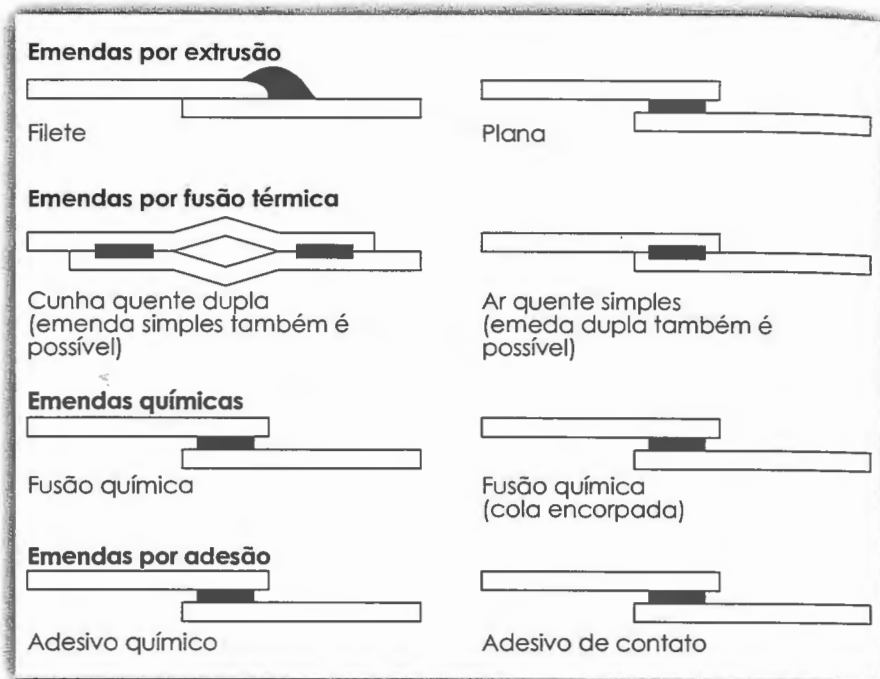
TABELA 13-11
Possíveis métodos para emendas de diferentes tipos de geomembrana
[KOERNER, 1998]

Método de emenda	Tipo de geomembrana						
	PEAD	PEMF	PP	PP-R*	PVC	PECS-R*	EIA-R*
Extrusão (filete e plano)	A	A	A	A	A**	NA	NA
Fusão térmica (cunha quente e ar quente)	A	A	A	A	A	A	A
Fusão química (química e química encorpada)	NA	NA	NA	NA	A	A	A
Adesiva (química e contato)	NA	NA	NA	NA	A	A	A

*Reforçadas. **Aplicável apenas para acabamentos. A, método aplicável; NA, método não-aplicável; PEMF, polietileno muito flexível (inclui geomembranas de PE de densidades muito baixa e linear de baixa densidade).

FIGURA 13-13

Esquemas de diversos tipos de emenda.



Usualmente são executadas emendas de teste em retalhos de manta, a fim de se verificar a adequação de determinado método de emenda e treinamento e aclimação da equipe de instalação às condições locais. Corpos de prova dessas emendas são testados para verificar a qualidade da emenda e, eventualmente, definir procedimentos de ajuste no processo para obter produtos com a especificação desejada. As emendas de teste são também executadas durante o transcurso da obra, quando ocorrerem mudanças climáticas, troca de equipe de instalação ou alteração em qualquer fator que possa afetar a qualidade da emenda.

Após execução de uma certa quantidade de emendas, é necessário testá-las para verificação do produto acabado. Para esse propósito, realizam-se ensaios nas emendas (ensaios não-destrutivos) e em porções retiradas de campo (ensaios destrutivos). Evidentemente, a quantidade de ensaios destrutivos deve ser a menor possível, em função das interferências que causam, como a necessidade de remendos nas partes amostradas. Algumas recomendações sugerem uma frequência de seis amostras obtidas aleatoriamente a cada quilômetro de emenda ou, de forma regular, uma amostra a cada 150 m de emenda.

Os ensaios destrutivos são pontuais e revelam aspectos da resistência da emenda. No entanto nada dizem da continuidade da emenda e sua estanqueidade. Ensaios não-destrutivos se prestam para avaliar as emendas em sua totalidade e podem ser efetuados das mais variadas maneiras. O ensaio de pressurização da emenda consiste em aplicar, nas emendas duplas, uma certa pressão e verificar a sua permanência.

Em caso de queda de pressão, há pontos de vazamento ao longo do trecho ensaiado. Esses pontos podem ser encontrados reduzindo-se os trechos gradativamente.

O ensaio de faísca (*spark test*) é utilizado para verificar os painéis quanto à possibilidade de haver furo ocasionado por queda de objetos durante a instalação, ocorridos durante o transporte ou oriundos de defeitos de fabricação. O ensaio é constituído por uma fonte de baixa amperagem e alta tensão ligada a um fio terra e uma haste dotada de uma escova que, ao ser passada lentamente sobre o painel provoca uma faísca, acompanhada de um aviso sonoro, se encontra qualquer descontinuidade na geomembrana. No caso de teste de emendas através desse método, insere-se um fio condutor na emenda e, com um aparelho elétrico dotado de um sensor, aplica-se uma tensão elevada numa das extremidades, percorrendo-se a emenda com o sensor. Defeitos são detectados por um alarme sonoro no equipamento.

A tecnologia de emendas vem sendo constantemente aprimorada e novos métodos têm surgido e começam a ser gradativamente utilizados na prática, como os métodos ultra-sônicos. Foge do objetivo deste manual fornecer detalhes acerca de todos os métodos de solda, podendo os interessados recorrer a KOERNER (1998) para informações adicionais. Evidentemente, a introdução de um novo método não deve prescindir de todas as verificações necessárias para que eles tenham sua eficiência e aplicabilidade claramente definidas.

Emendas em geocompostos argilosos

Nos GCLs, a maioria das emendas é efetuada por simples superposição, em comprimentos que variam entre 10 e 30 cm. A Fig. 13-14 ilustra diversas opções de emendas.

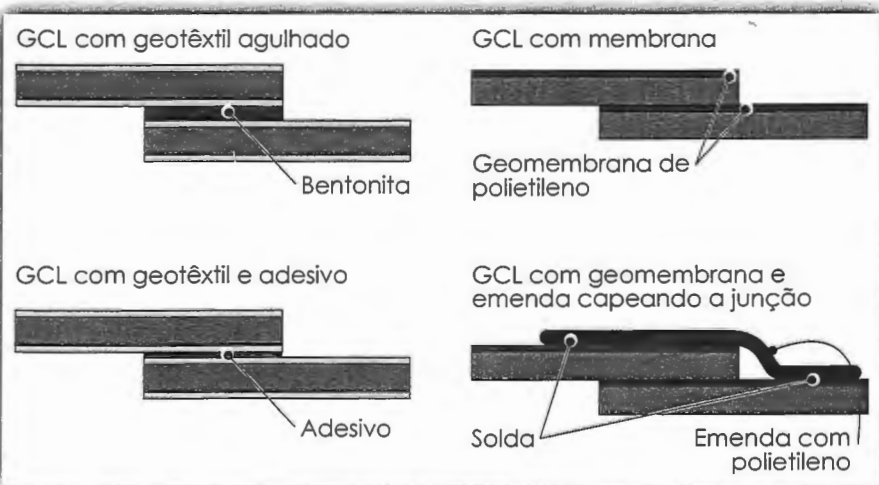


FIGURA 13-14

Opções de emendas em geocompostos argilosos.

No caso de geocompostos argilosos (GCLs) produzidos com geotêxteis agulhados, coloca-se a bentonita numa proporção de cerca de 0,8 kg/m, na região de superposição, que deve penetrar nos poros do geotêxtil e, quando hidratada, promover a autoligação entre os painéis; para geotêxteis colados, prescinde-se da colocação de bentonita adicional. No caso de geocompostos argilosos com geomembranas, adota-se só a superposição como emenda. No entanto, em certas situações, uma garantia adicional pode ser proporcionada, colocando-se uma capa de geomembrana soldada.

Disposição geométrica das emendas

No tocante à disposição das emendas, estas devem se posicionar de forma a minimizar os esforços sobre elas. Algumas recomendações gerais sugeridas por SHARMA & LEWIS (1994) são:

- orientar as emendas no sentido do máximo gradiente;
- emendas paralelas ao pé do talude devem ser locadas a uma distância mínima de 1,5 m do pé, para evitar que sejam afetadas por contrações ou levantamentos junto ao pé;
- emendas paralelas à crista devem ser localizadas no mínimo a 60 cm desta, a fim de minimizar os esforços sobre a emenda;
- as membranas a montante devem sobrepor-se às membranas a jusante; isso evita o acúmulo de percolado na emenda e minimiza as condições de pelagem da emenda em caso de recalque, espalhamento ou instabilidade do resíduo;
- o número de emendas deve ser minimizado, especialmente nos cantos e em posições em que a geometria é diferenciada;
- as emendas devem se estender até os limites do painel que será ancorado; isso evitará o rasgamento da geomembrana na eventualidade de ela ser exposta;
- emendas em cantos para onde convergem três ou quatro mantas devem ser completadas com uma cobertura (manchão) que recubra o local com várias emendas.

13.7.3 Documentação e acompanhamento técnico da instalação

Durante a instalação da geomembrana, deve-se registrar, em forma de relatórios, toda a sequência executiva da instalação: número, localização e data de colocação de cada painel ou bobina, ensaios de verificação e de controle de qualidade das soldas e o as *built* de toda a geomembrana instalada. O instalador deve comprovar a qualidade dos serviços de instalação da geomembrana, através da apresentação

de planilhas do registro dos trabalhos e dos ensaios de estanqueidade e verificação da qualidade das soldas.

Paralelamente, deve ser feito o acompanhamento técnico de obra (ATO), através do monitoramento da instalação da geomembrana, que compreende a verificação de todas as etapas dos serviços. Assim, recomenda-se que sejam verificados e documentados (relatórios e fotos) os seguintes itens:

- condições da superfície de apoio;
- colocação e modulação dos painéis;
- ancoragem temporária e ancoragem definitiva;
- equipamentos necessários para as soldas;
- equipamentos necessários para os ensaios de verificação das soldas;
- verificação da execução das soldas e eventuais reparos;
- verificação dos acabamentos em interferências, tais como tubos, paredes, extravasores, etc.;
- verificação do cruzamento das soldas;
- elaboração do as built (esquema da modulação, interferências e reparos);
- verificação do correto preenchimento das planilhas de controle, de acordo com o serviço executado e na sequência de execução;
- verificação do preenchimento do diário de obras, que é um relato de tudo o que aconteceu no dia, como, por exemplo, as interrupções e as respectivas justificativas.

13.8 CONCLUSÕES

As baixas permeabilidades, as boas características de resistência química e mecânica, o controle de fabricação de um produto manufaturado e a facilidade de instalação são razões que justificam o crescente uso de geomembranas e de geocompostos argilosos em obras de proteção ambiental. Assim, o uso dessa classe de geossintético se constitui num item praticamente obrigatório na construção de barreiras impermeabilizantes, em obras que exigem proteção contra a migração de fluidos como nos sistemas de contenção de resíduos e de efluentes. Há um expressivo acervo de utilizações bem-sucedidas no Brasil e em todo o mundo, e os fabricantes brasileiros podem proporcionar materiais e tecnologia de qualidade para enfrentar os problemas em que barreiras impermeabilizantes se façam necessárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 12824, *Geotêxteis: Determinação da Resistência à Tração Não-confundida* — Ensaio de Tração de Faixa Larga. [São Paulo, Brasil, 1994].
- ABNT NBR 13359, *Geotêxteis: Determinação da Resistência ao puncionamento Estático* — Ensaio com Pistão CBR. [São Paulo, Brasil, 1995].
- ASTM D 638-02a, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, 14 p. [Pensilvânia, EUA, 2002].
- ASTM D794-93, *Practice for Determining Permanent Effect of Heat on Plastics*. Withdrawn. [Pensilvânia, EUA, 1998].
- ASTM D 1004-03, *Standard Test Method for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting*, 4p. [Pensilvânia, EUA, 2003].
- ASTM D 1435-99, *Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics*, 5p. [Pensilvânia, EUA, 1999].
- ASTM D 1603-01, *Standard Test Method for Carbon Black in Olefin Plastics*, 3p. [Pensilvânia, EUA, 2001].
- ASTM D 1693-01, *Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics*, 12 p. [Pensilvânia, EUA, 2001].
- ASTM D3015-78, *Standard Recommended Practice for Microscopical Examination of Pigment Dispersion in Plastic Compounds* [Pensilvânia, EUA, 1978].
- ASTM D3083-89, *Specification for Flexible Poly (Vinyl Chloride) Plastic Sheeting for POND, Canal, and Reservoir Lining*. Withdrawn [Pensilvânia, EUA, 1998].
- ASTM D4437-99, *Standard Practice for Determining the Integrity of Field Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes*. [Pensilvânia, EUA, 1999].
- ASTM D 4355-02, *Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc Type Apparatus*, 6p. [Pensilvânia, EUA, 2002].
- ASTM D 4833-01, *Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes, and Related Products*, 4p. [Pensilvânia, EUA, 2001].
- ASTM D4885-01, *Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method*. [Pensilvânia, EUA, 2001].
- ASTM D 5321-02, *Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method*, 7p. [Pensilvânia, EUA, 2002].
- ASTM D5397-99e1, *Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test*. [Pensilvânia, EUA, 1999].
- BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J. G. e ADAM, D., "Geosynthetics in Waste Containment Facilities: Recent Advances. Proc. VII Int. Conf. on Geosynthetics, vol. 2, p.445-507 (Nice, França, 2002)].
- BRANDL, H. & ADAM, D., "Special Applications of Geosynthetics in Geotechnical Engineering". Proceedings II European Geosynthetics Conference [Bologna, Itália, 2000].

- DANIEL, D. E., "Pollution Prevention in Landfills Using Engineered Final Covers. Proc. of the Symposium Green '93", p. 73-92 [Bolton, Grã-Bretanha, julho de 1993], A. A. Balkema [Rotterdam, Hoanda, 1995].
- EPA METHOD 9090, "Compatibility Tests for Wastes and Membrane Liners in EPA SW-846; Test Methods for Evaluating Solid Waste. U. S. Environmental Protection Agency [Washington, DC, EUA 1992].
- IFAI - Industrial Fabric Association International Geotextile Division, "A Design Primer: Geotextiles and Related Materials", 1th. ed., [EUA, 1990].
- IGSBR GM 01/03, *Instalação de Geomembranas Termoplásticas em Obras Geotécnicas e de Saneamento Ambiental* - IGS [São Paulo, Brasil, 2003].
- HAISE, Y., WIERTZ, J. RIGO, J. M. e CAZZUFFI, D. A., "Chemical Identification Methods used to Characterize Polymeric Geomembranes". Geomembranes - Identification and Performance Testing - Report of Technical Committee 103 MGH - Mechanical and Hydraulic Testing of Geomembrane - RILEM. Chapman and Hall, p. 316-336 [Londres, Grã-Bretanha, 1991].
- KOERNER, R. M., *Designing With Geosynthetics*, 4a. ed. Prentice Hall Inc., 761 pgs [Upper Saddle River, New Jersey, EUA, 1998].
- REDDY, D. V.; BUTUL, B., *A Comprehensive Literature Review of Liner Failures and Longevity*. Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, Universidade da Flórida [Flórida, EUA, 1999].
- RIGO, J. M. e CAZZUFFI, D. A., "Test Standards and Their Classification". Geomembranes - Identification and Performance Testing - Report of Technical Committee 103_MGH - Mechanical and Hydraulic Testing of Geomembrane - RILEM. Chapman and Hall, p. 22-58 [Londres, Grã-Bretanha, 1991].
- SHARMA, H. D. e LEWIS, S. P., *Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills: Design and Evaluation*. John Wiley & Sons, 588 p. [1994].