

2 Revisão Bibliográfica

2.1.1. Considerações Iniciais

A inserção de materiais alternativos nos solos, como forma de melhoria da resistência, vem crescendo mundialmente, nas últimas décadas. Os geossintéticos, em particular, vêm sendo cada vez mais utilizados nas obras geotécnicas, principalmente em sistemas de reforço, controle de erosão, aterros sobre solos moles, drenagem, sistemas de impermeabilização, dentre outros. Devido a este crescente aumento, tornam-se cada vez mais importante o estudo do comportamento destes materiais quando inseridos na massa de solo, ou seja, do mecanismo de interação entre solo e geossintético.

O mecanismo de interação entre solo e geossintético é complexo, sendo função das propriedades dos materiais envolvidos e expresso em termos de resistência, pelos parâmetros de adesão (a) e ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}).

Os parâmetros de interface podem ser obtidos através de ensaios de campo e laboratório. Os ensaios de campo têm a vantagem de representar mais corretamente as solicitações *in situ*, entretanto, possuem custo elevado e apresentam difícil execução. Já os ensaios de laboratório têm custo mais acessível, porém apresentam inconvenientes, como tamanho de amostras reduzido.

Este capítulo aborda as principais características dos geossintéticos disponíveis no mercado, em especial, geogrelhas e geomembranas que foram utilizadas nos ensaios desta presente pesquisa, para determinação da resistência da interface solo-geossintético. Apresenta também a descrição dos ensaios de rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado, bem como a influência das condições de contorno.

2.1.2. Geossintéticos

A Sociedade Internacional de Geossintéticos, IGS, define os geossintéticos como materiais planos, poliméricos (sintéticos ou naturais) utilizados em combinação com o solo, rocha e/ou outros materiais geotécnicos na engenharia.

Os geossintéticos são constituídos em sua maioria por polímeros e em menor escala por aditivos. O termo polímero foi criado em 1933 pelo sueco Jöns Jakob Berzelius, sendo resultante do encadeamento de átomos de carbono, formando uma cadeia carbônica associada ou não a grupos funcionais, estruturados à partir de pequenas unidades de repetição denominadas monômeros, e de grupos de ponta, que são pequenas unidades que finalizaram a cadeia polimérica (Bueno, 2004).

Os primeiros geossintéticos a serem utilizados foram os geotêxteis tecidos na década de 50, nos EUA, na antiga Alemanha Ocidental e no Japão. Foram empregados como reforço de subleitos de pavimentos de rodovias, elementos de drenagem em muros de concreto para controlar a erosão marítima, e como elemento de separação em “rip-raps”, respectivamente.

Na década de 60, ocorreu a primeira aplicação de geotêxtil não-tecido de fibras em recapeamento asfáltico e controle de erosão. No Japão, em 1966, foram utilizadas as georredes como reforço de aterro de solos moles, o que levou a criação das geogrelhas.

Na década de 70 iniciaram-se as construções de grandes barragens, com cerca de 80m de altura, com inúmeras aplicações de geotêxtil no sistema drenante-filtrante, como no caso da Hans Stridjon Dam, na África do Sul, e da Frauenau Dam, na Alemanha. Em 1977 a França sediou o primeiro encontro (International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics) onde os termos geotêxtil e geomembrana foram propostos pelo professor Jean Pierre Giroud.

No Brasil, os geossintéticos vêm sendo empregados desde a década de 70. Em 1971 ocorreram as primeiras aplicações de obras rodoviárias, como é o caso da BR-101, em Angra dos Reis (RJ) e na rodovia Transamazônica. Em 1975 os geossintéticos começaram a ser aplicados em obras de drenagem profunda, enrocamentos marítimos e barragens de terra. Na década de 80, os primeiros geotêxteis tecidos foram fabricados e as primeiras obras de porte de solo

reforçado com geotêxtil na rodovia que liga Taubaté a Campos do Jordão foram executadas. Em 1982 ocorre a primeira aplicação de geomembrana nacional de PVC.

As funções desempenhadas pelos geossintéticos são as mais variadas e de acordo com a norma brasileira NBR 12.553 as principais são: controle de erosão superficial, drenagem, filtração, impermeabilização, proteção, reforço e separação (Tabela 1). Para cada uma destas aplicações existe um, ou mais de um, geossintéticos recomendados (Tabela 2).

Os exemplos de geossintéticos são: geobarra, geocélula, geocomposto, geoespaçador, geoexpandido, geoforma, geogrelha, geomanta, geotêxtil, geotira, geotubo, dentre outros. Muitos dos novos geossintéticos ainda não foram classificados como os geocompostos para recapeamento asfáltico e para filtração, não sendo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais aplicações dos geossintéticos (Vertematti, 2004)

Aplicação	Objetivo
Reforço	Restringir deformações e aumentar a resistência do maciço em obras geotécnicas, aproveitando a resistência à tração do material geossintético.
Filtração	Permitir a passagem e coleta de fluídos, sem a movimentação de partículas do maciço.
Drenagem	Coletar e/ou facilitar os movimentos de fluidos no interior do maciço.
Proteção	Reduzir solicitações localizadas, homogeneizando o nível das tensões que atingiriam determinada superfície ou camada.
Separação	Evitar a mistura entre materiais granulares com características geotécnicas distintas.
Impermeabilização	Conter o avanço de uma pluma de contaminação, evitando a migração de líquidos ou gases em aplicações ambientais.
Controle de Erosão	Proteger a superfície do terreno contra o arraste de partículas pela ação de ventos e águas superficiais.

Tabela 2 - Tipos de geossintéticos e suas principais aplicações (Vertematti, 2004)

Geossintético	Aplicação						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Geotêxtil	x	x	x	x	x		x
Geogrelhas	x						
Geomembranas					x	x	
Geocompostos	x		x			x	
Geobarras	x						
Geoespaçadores			x				
Geotiras	x						
Georedes			x				
Geotubos			x				
Geomantas						x	x
Geocélulas	x						x

(1) Reforço; (2) Filtração; (3) Drenagem; (4) Proteção; (5) Separação; (6) Impermeabilização; (7) Controle de Erosão

Dentre os geossintéticos citados será dada ênfase à descrição da geogrelha e geomembrana, pois foram os utilizados nesta pesquisa.

2.1.3. Geogrelhas

As geogrelhas [GG] são estruturas regulares planas em forma de grelha, que possuem os orifícios maiores que a área dos elementos que a constituem. A existência de tais aberturas promove o inter-travamento do solo nas mesmas, como mostra a Figura 1. É considerada unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção, e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas (NBR 12553).

A geogrelha extrudada [GGE] é obtida através de processo de extrusão, geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, e recobertos por um

revestimento protetor (IGS, 2000). O estiramento, que pode ser em um único sentido formando geogrelhas unidirecionais ou nos dois sentidos formando geogrelhas bidirecionais.

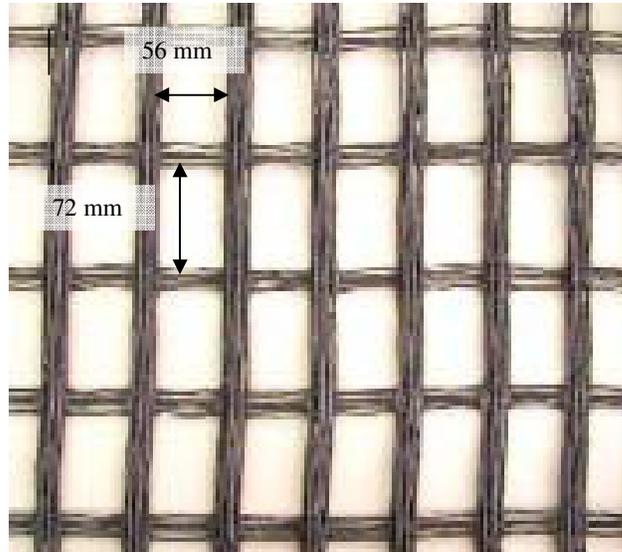


Figura 1 - Geogrelha tecida de poliéster revestida com PVC (Maccaferri)

A geogrelha soldada [GGB] é composta por elementos de tração longitudinais e transversais, soldados nas juntas, produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, recobertos por um revestimento protetor.

A geogrelha tecida [GGW] é composta por elementos de tração longitudinais e transversais, tricotados ou inter-tecidos nas juntas.

Os polímeros normalmente empregados na fabricação de geogrelhas são o polietileno de alta densidade (PEAD), o poliéster (PET) e o polipropileno (PP).

Podem ser rígidas ou flexíveis, e seu emprego é quase que exclusivamente, para reforço, embora sejam utilizadas também como elemento de separação e proteção superficial.

As primeiras geogrelhas foram fabricadas na Inglaterra pela Netlon e levadas para o EUA em 1982 pela Tensar. Estas podem ser produzidas através da perfuração de chapas, as quais são posteriormente tensionadas em uma ou duas direções, com o objetivo de melhorar as suas propriedades físicas. Em geral, as geogrelhas resultantes deste processo de fabricação apresentam aberturas variando de 1 a 10 cm, na forma de elipse, retângulo com cantos arredondados ou quadrados.

2.1.4. Geomembranas

Geomembrana [GM] é um produto bidimensional de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por materiais termoplásticos, elastoméricos e asfálticos, utilizado para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação (NBR 12553). As geomembranas podem ser reforçadas e/ou texturizadas. Na geomembrana reforçada [GMR] a armadura de reforço é incorporada ao produto, formando um conjunto monolítico. Já a geomembrana texturizada [GMT], possui acabamento superficial com função de aumentar as características de atrito de interface.

As geomembranas são fabricadas a partir de diferentes polímeros básicos, em várias espessuras, com superfícies lisas ou rugosas. Em função dessas características, algumas propriedades como a espessura e a resistência à tração, por exemplo, podem requerer diferentes formas de determinação, de acordo com diferentes normas técnicas. A Figura 2 mostra um exemplo típico de geomembrana.

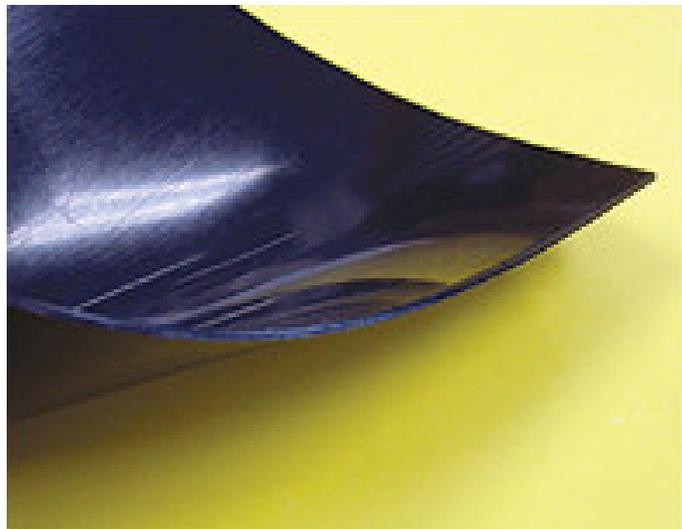


Figura 2 – Geomembrana de Pead lisa nas duas faces (Nortene)

2.1.5. Propriedades dos Geossintéticos

A seleção dos geossintéticos deve atender às propriedades fundamentais do ambiente específico que será instalado e exposto, traduzindo as condições técnicas

a que serão submetidos. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios de campo ou, mais comumente, de laboratório, os quais, para serem realistas, precisam reproduzir os aspectos importantes da interação do geossintético com o meio em que será inserido. Além disto, devem apresentar vida útil compatível com as das obras onde serão empregadas.

O comportamento do geossintético se deve aos seus componentes polímeros básicos e aditivos, e ao processo que foi fabricado. A identificação das matérias-primas empregadas na confecção dos geossintéticos pode permitir inferir sobre possível degradação e envelhecimento precoce do material em contato com os vários produtos e agentes do meio, garantindo a qualidade do produto e sua instalação. Essa identificação é feita através dos ensaios de laboratório que podem ser divididos em duas categorias: os que determinam as propriedades físicas e aqueles que determinam as propriedades mecânicas.

2.1.6. Propriedades Físicas

As propriedades físicas dos geossintéticos estão diretamente ligadas às propriedades dos polímeros que os compõem, ao modo de fabricação dos filamentos ou fibras e da estrutura do produto. As propriedades físicas de maior interesse na caracterização são massa por unidade de área ou gramatura (μ_A), espessura nominal (t_{GT}), porosidade (n_{GT}) e distribuição e dimensão das aberturas. Estas não indicam diretamente parâmetros de comportamento, mas auxiliam em identificações no campo.

A gramatura (g/m^2) é a relação entre a massa e a área de um corpo de prova de geometria regular, que não deve ser utilizada isoladamente como propriedade de especificação, pois, dependendo dos processos de fabricação, produtos com a mesma gramatura podem apresentar propriedades mecânicas e hidráulicas diferentes. Os valores usuais da gramatura variam entre 100 a 900 g/m^2 . Para os geotêxteis tecidos os valores variam de 100 a 300 g/m^2 , para os não tecidos varia de 100 a 400 g/m^2 , e entre 200 a 1000 g/m^2 para geogrelhas.

A espessura nominal (mm) é obtida medindo-se a distância interna entre duas placas rígidas submetida a uma pressão de 2 kPa.

Porosidade (%) é a relação entre o volume de poros e o volume total da amostra, expressa pela Equação 1, que relaciona a gramatura (μ_A), a massa específica da fibra ou do filamento que constitui o geotêxtil (ρ_f) e a massa específica da água (ρ_w).

$$n_{GT} = \left(1 - \frac{\mu_A}{t_{GT} \cdot \rho_f \cdot \rho_w} \right) \times 100\% \quad (1)$$

A distribuição e dimensão das aberturas são fundamentais para o dimensionamento dos geossintéticos como filtros e separadores. Os geotêxteis, tecidos ou não-tecidos, possuem um intervalo de tamanhos de abertura e não um tamanho único. A representação desse intervalo se assemelha à utilizada para representar a forma granulométrica de um solo. O intervalo varia de 0,06 a 0,15mm para os geotêxteis não tecidos e de 0,05 a 1,50mm para os geotêxteis tecidos (Aguiar, 2003).

2.1.7. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos geossintéticos referem-se à resistência do material quando submetido a um carregamento e a deformação por ele provocado.

A resistência à tração (σ_t) unidirecional é determinada a partir de ensaios que reproduzam as condições de tração no campo (Figura 3a). Uma das extremidades do corpo de prova é fixada a uma máquina de ensaio universal que aplica uma carga de tração crescente, medindo as deformações até a ruptura. As curvas obtidas nos ensaios, força de tração por unidade de largura versus deformação axial e assim obtêm-se os módulos de rigidez correspondentes. Os ensaios podem ser em tiras ou *GRAB* teste (Figura 3b).

O ensaio em tiras (faixa larga) utiliza corpos de prova de 100mm de comprimento por 200mm de largura, seguindo as normas ISO/EM e ABNT, apresentando essas dimensões os resultados ficam mais próximos do campo.

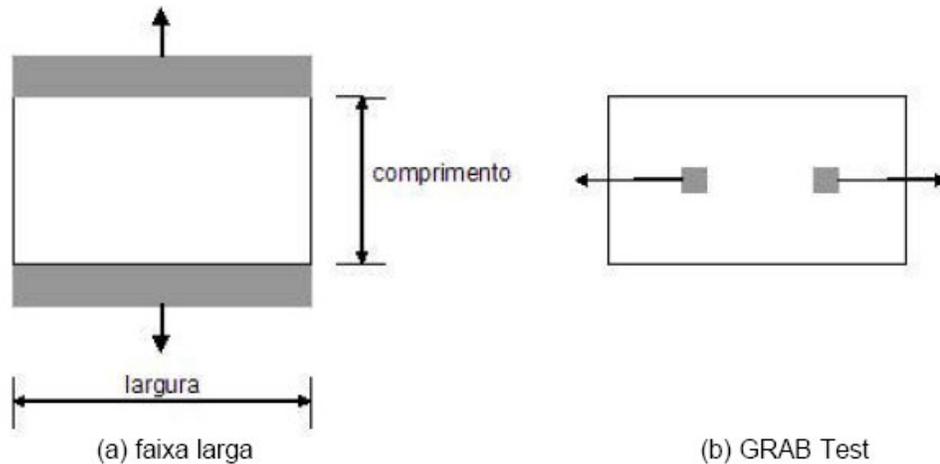


Figura 3 - Resultados de ensaios de tração em faixa larga (a) e grab test (b)

A resistência ao puncionamento é definida como a medição do comportamento dos geossintéticos quando sujeitos às compressões diferenciais ou a choques provocados pela queda de materiais. A quantificação dessa resistência é feita fixando um corpo de prova à borda de um cilindro rígido e submetendo a uma força dinâmica ou estática. O ensaio por puncionamento estático é feito numa máquina universal que aplica uma força vertical crescente na superfície do corpo de prova até sua perfuração, então se mede a força máxima e o deslocamento correspondente. No puncionamento dinâmico o ensaio busca representar o lançamento de materiais granulares sobre o geotêxtil. Um cone padrão cai em queda livre, a 50mm sobre o geossintético, provocando um furo cujo diâmetro é medido por um outro cone padronizado.

A fluência pode acontecer em vários casos de solicitações no campo, como em barreiras bentoníticas (cisalhamento), como em geocompostos drenantes (compressão) ou em estruturas de solo reforçado (tração). A caracterização do material deve ser baseada nas isócronas, que para um pré-determinado tempo, relaciona carga \times deformação e a curva de ruptura por fluência que estabelece tempos de ruptura para os vários níveis de carregamento. Quanto maior a magnitude do carregamento aplicado, maior será a fluência.

2.2. Mobilização da Resistência da interface Solo-Geossintético

O estudo da interação entre solo e reforço é complexo devido à variedade de modos de interação. Os parâmetros obtidos a partir dos ensaios de campo e de laboratório são de suma importância para o conhecimento acurado da resistência da interface entre solo e o geossintético, sendo a escolha do ensaio mais adequado em função do movimento relativo entre o geossintético e a massa de solo.

Os modos de sollicitações na interface solo-geossintético são atrito na interface (A), tração no reforço (B) e arrancamento (C). A Figura 4 ilustra essas sollicitações, uma seção típica de um muro reforçado.

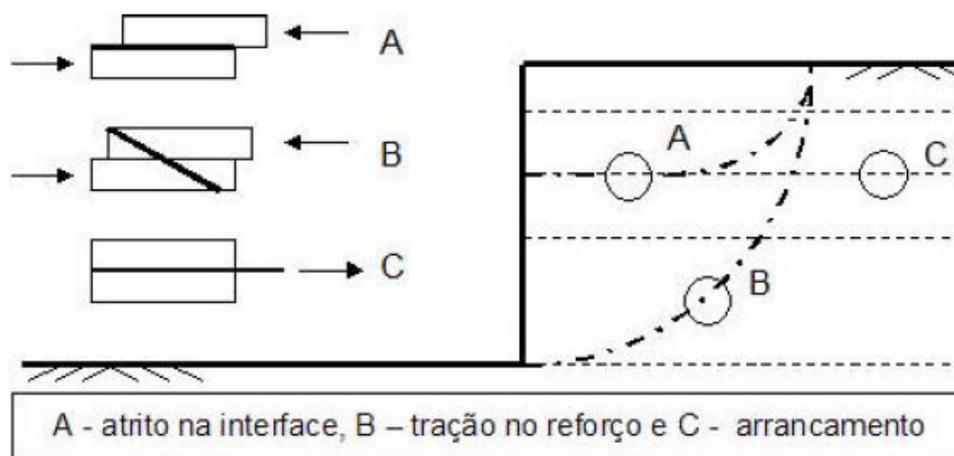


Figura 4 - Modos de interação solo-geossintético (Aguiar, 2003)

A - Atrito na Interface Solo-Reforço: neste tipo de sollicitação a massa superior de solo desloca-se em relação ao geossintético. Essa modelagem solo-geossintético é fundamental para se obter os parâmetros de cisalhamento em caso de deslizamento ao longo da interface e para conhecer a função de transferência de tensões tangenciais entre o reforço e o solo (Auñón, 1997). O ensaio utilizado para este tipo de estudo é o de cisalhamento direto. Verifica-se a formação de planos de ruptura paralelos à direção do reforço à medida que o deslizamento ocorre, a localização destes planos depende das características de deformação e de sua geometria. Se a inclusão for áspera, com reentrâncias, os planos de ruptura tenderão a se formar no solo; enquanto que, se a superfície da inclusão for lisa, e o material que a constitui pouco rígido, a ruptura tenderá a ocorrer no contato,

através do deslizamento dos grãos de solo ao longo da interface (Gouc e Beech, 1989).

B - Tração no Reforço: a tração no reforço é máxima quando a superfície de ruptura o intercepta. A simulação desse movimento é feita em laboratório, colocando-se o reforço com uma inclinação específica e constante, através do ensaio de cisalhamento direto.

C - Arrancamento: neste movimento, o geossintético se desloca em relação ao solo envolvente, mobilizando a resistência na interface. Os esforços de tração atuantes no geossintético são maiores do que à resistência que o solo oferece ao deslocamento relativo entre ambos. O ensaio utilizado para esta análise é o ensaio de arrancamento.

2.3.

Avaliação da Resistência da interface Solo-Geossintético

Os parâmetros que exprimem a resistência de interface entre o solo e o geossintético são a adesão (a) e o ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}). A Equação 2 descreve a resistência de interface.

$$\tau = a + \sigma \tan \phi_{sg} \quad (2)$$

onde:

τ = tensão cisalhante na interface,

a = adesão entre o solo e o reforço,

σ = tensão normal atuante na interface,

ϕ_{sg} = ângulo de atrito da interface solo-geossintético,

Os valores de a , ϕ_{sg} e σ podem ser obtidos em termos de tensões totais ou efetivos, dependendo da análise desejada. Os coeficientes de interação entre o solo e o geossintético, λ e f , são expressos através das Equações (3) e (4).

$$\lambda = \frac{a}{c} \quad (3)$$

$$f = \frac{\tan \phi_{sg}}{\tan \phi} \quad (4)$$

c = adesão entre os solos

ϕ = ângulo de atrito da interface solo-solo

Estes coeficientes também são conhecidos como os parâmetros de eficiência da interface solo-geossintético, E_c e E_ϕ respectivamente. (Palmeira *et al.*, 2002; Aguiar, 2003).

Para os geossintéticos planos contínuos (geomembrana, por exemplo) o valor de f tende a ser próximo à unidade no caso de atrito de interface com solos granulares ou mesmo com solos mais finos sob condições de cisalhamento drenado (Palmeira, 1987, Tupa e Palmeira, 1995). Enquanto que o valor de λ está sujeito à significativa variabilidade dependendo das características do solo fino.

2.4.

Ensaio para avaliação da Resistência da Interface Solo - Geossintético

Segundo Massashi *et al.* (1993), os ensaios de laboratório de grande porte são considerados como os mais apropriados ao estudo de interação solo-geossintéticos, visto que oferecem a possibilidade de se efetuar estudos paramétricos de fatores que possam afetar o comportamento do sistema solo-inclusão, além de permitir o aperfeiçoamento das inclusões entre si.

Teixeira (2003) também afirma que as principais vantagens dos ensaios de grande porte são a fidedignidade, a reprodução da estrutura física do maciço reforçado e a capacidade de aplicar níveis de tensão e deformação próximos dos valores de campo.

Os ensaios normalmente utilizados são os de cisalhamento direto e arrancamento. Tem sido observado também o emprego de ensaios de rampa e de ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado, ou ainda de cisalhamento direto inclinado.

No subitem a seguir, os ensaios utilizados nesta presente pesquisa, cisalhamento direto, rampa e cisalhamento direto inclinado, serão apresentados com maiores detalhes.

2.4.1. Ensaio de Cisalhamento Direto

Em geral, as caixas de cisalhamento possuem a seção quadrada, com dimensão variando de 60mm, convencionais, até 1000mm, equipamentos de grande porte (Sieira, 2003). Normalmente, as duas caixas têm as mesmas dimensões, podendo a caixa inferior ser maior do que a superior com o objetivo de manter constante a área de cisalhamento. A caixa inferior pode estar preenchida por solo ou pode ser uma base rígida. A utilização ou não da caixa inferior esta ligada ao tipo de geossintético ensaiado.

Os diversos condicionantes do ensaio e a variabilidade de metodologia exigem que se estabeleça uma análise prévia das características do equipamento, do tipo de solo e geossintético, bem como o espaçamento entre as caixas, altura do solo de cobertura, preparação e execução da amostra e ancoragem do reforço. Além das condições de drenagem, tensões aplicadas, velocidade do deslocamento e sistema de aquisição de dados.

Durante o ensaio de cisalhamento direto, aplica-se uma tensão normal constante sob a caixa superior preenchida com solo. Em seguida, mede-se a força horizontal necessária para deslocar a parte superior da caixa de cisalhamento e o deslocamento produzido. Diferentes tensões confinantes vão sendo aplicadas, para definir uma relação entre a tensão cisalhante e a normal e assim obter os parâmetros de resistência ϕ_{sg} e a .

O ensaio não oferece grande dificuldade de interpretação. No entanto, seus resultados podem ser influenciados por fatores associados ao equipamento (posição relativa do geossintético, dimensão do equipamento, espessura da camada de solo e rugosidade do plano rígido) e associados à granulometria dos solos.

A seguir apresentam-se diferentes tipos de influência referentes a este ensaio:

a) Influência da Posição Relativa Solo-Geossintético

Nakamura *et al.* (1996) executaram ensaios de cisalhamento direto com dois tipos de geogrelhas imersas em areia, em equipamentos de (300 x 300)mm². Foram utilizados dois métodos distintos de instalação de geogrelha. O primeiro

método fixou a geogrelha entre a camada de solo e um bloco rígido, o segundo posicionou a geogrelha entre duas caixas de cisalhamento preenchidas com solo.

Os autores constataram que seria mais adequado posicionar a geogrelha entre o bloco rígido e a camada superior de solo para definir a resistência de interface solo-geogrelha.

Contrariamente, Ingold (1984) e Saez (1997) sugeriram que seria melhor posicionar a geogrelha entre duas camadas de solo, pois quando a base rígida é utilizada, o atrito solo-solo é desconsiderado, obtendo-se desta forma menores ângulos de atrito na interface solo-geogrelha, como ilustra a Figura 5.

As divergências constatadas nas conclusões de Nakamura *et al.* (1996) e Saez (1997) podem estar relacionadas ao tipo de malha da geogrelha. É de se esperar que, quanto menor for a área da geogrelha disponível para o atrito na interface solo-geogrelha, maior será a contribuição do atrito solo-solo. Desta forma, a utilização do bloco rígido pode desconsiderar o atrito na interface. Por outro lado, se a geogrelha apresenta aberturas pequenas e uma área de atrito significativa, a opção do uso de bloco rígido pode ser adequada (Sieira, 2003).

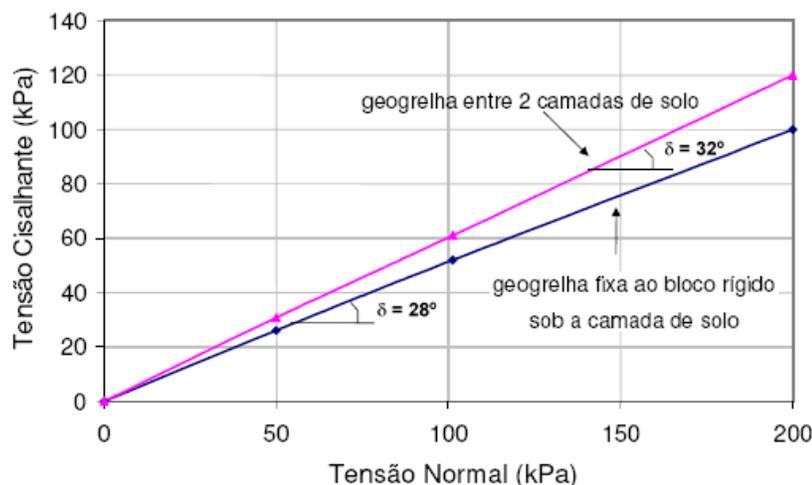


Figura 5 - Efeito da montagem do Ensaio de Cisalhamento Direto (Adaptado de Saez, 1997)

b) Influência das Dimensões do Equipamento

As dimensões das caixas variam desde os valores convencionais de 6cm x 6cm até 100 x 100cm. Geralmente, ambas as caixas (superior e inferior) possuem as mesmas dimensões. Entretanto, em alguns casos, a caixa inferior é maior do

que a superior, permitindo a obtenção de grandes deslocamentos cisalhantes sem variação da área de contato.

Segundo a recomendação da ASTM D3080, o comprimento das caixas de cisalhamento deve ser pelo menos doze vezes o tamanho da maior partícula de solo. Jewell e Wroth (1987) sugerem que a dimensão mínima da caixa seja pelo menos 50 vezes maior do que o diâmetro médio das partículas de solo (D_{50}).

Estudos sobre a influência da dimensão do equipamento foram feitos por Saez (1997). Este executou ensaios com duas dimensões, 60 e 300mm. Na Figura 6, observa-se que nos equipamentos de menores dimensões, a envoltória não é linear, revelando a relação dependente do ângulo de atrito solo-geogrelha e a tensão normal aplicada, enquanto que no equipamento de maior dimensão a envoltória é linear e o ângulo de atrito independe da tensão normal. Outra observação é a envoltória obtida do ensaio com menores dimensões ter o ângulo de atrito de ensaio maior do que a do ensaio com o equipamento de maior dimensão. Por isso o autor sugere a utilização de equipamentos de cisalhamento direto com dimensões iguais ou maiores do que 300 x 300mm².

Gourc *et al* (1996) sugerem o mesmo para os ensaios com geogrelhas. As duas caixas com o solo deslocam-se entre si, mantendo-se o geossintético ancorado na extremidade para mantê-lo solidarizado a uma delas, buscando simular a movimentação do solo em relação ao reforço.

Tratando-se das geogrelhas, o tamanho mínimo ou mais apropriado da caixa de cisalhamento depende da abertura da geogrelha. Segundo a norma ASTM D5321, a dimensão mínima da caixa deve ser de pelo menos 5 vezes maior do que a abertura máxima da geogrelha ensaiada.

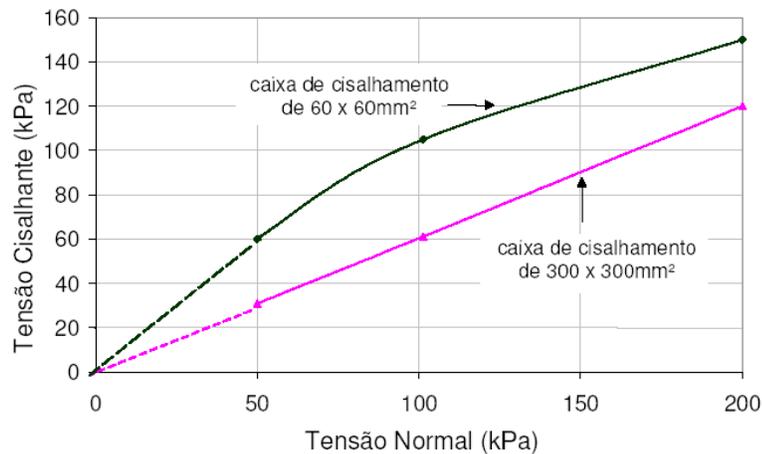


Figura 6 - Efeito das Dimensões do Equipamento de Cisalhamento Direto (Adaptado de Saez, 1997)

Aguiar (2008) avaliou a influência das dimensões das caixas de ensaio, incluiu o aumento ou diminuição da área de contato, a variação da forma da área de contato e a variação da espessura da camada de solo no interior da caixa de ensaio. O autor concluiu que, dentro dos limites de utilização estabelecidos a variação da forma e da área de contato pouco afeta os resultados obtidos. Entretanto os resultados são fortemente influenciados pela variação da relação espessura / comprimento da caixa de ensaio, que interfere na distribuição de tensões ao longo da interface.

c) Influência da Espessura da Camada

Gourc *et al.* (1996) estudaram a influência da espessura do solo no resultado dos ensaios de cisalhamento direto da interface solo-geossintético, onde foram utilizados geotêxtil não tecido e solo arenoso. Os autores concluíram que a tensão cisalhante aumenta com o aumento da espessura de solo, assim como aumenta o atrito lateral solo-caixa também aumenta (Figura 7). A espessura mínima de solo é da ordem de 5 vezes o diâmetro máximo das partículas de solo (Sopeña, 2002).

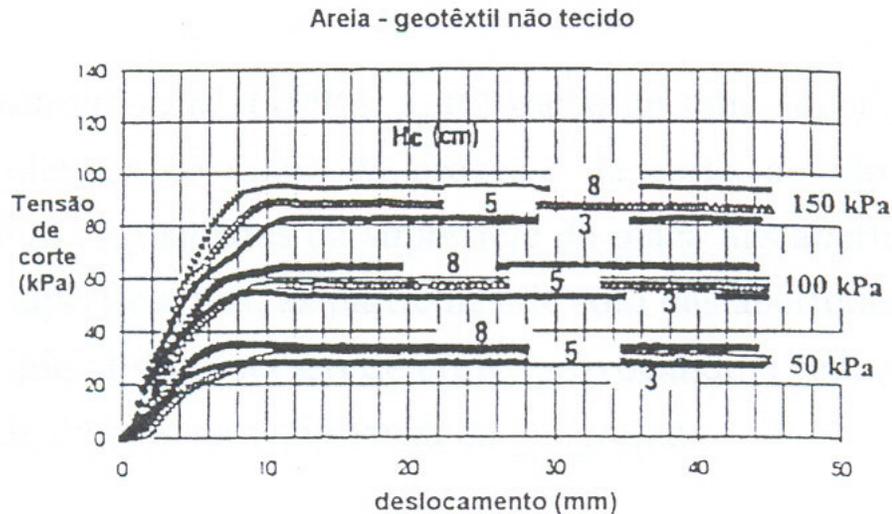


Figura 7 - Influência da espessura de solo da caixa superior na interface areia-geotêxtil em ensaios de cisalhamento direto (Gourc *et al.*, 1996)

Desta forma, existe uma relação aos tipos de solos a ensaiar, pois na maioria dos equipamentos as caixas são de 60 x 60mm² e 300 x 300mm² e as camadas apresentam espessuras entre 25 e 75mm, e os solos ensaiados devem representar um diâmetro máximo de 5 e 25mm, respectivamente (Sieira, 2000).

d) Influência da Rugosidade do Bloco Rígido

A escolha entre o bloco liso ou rugoso deve ser em função do tipo de geossintético a ser usado no ensaio, pois este é um fator que influencia nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

Gourc *et al.* (1996) executaram ensaios de cisalhamento direto utilizando geogrelha de barra espessa, sobre dois tipos de suporte, o primeiro liso e o segundo sobre uma camada de areia como suporte alternativo. Os autores concluíram que para o segundo caso, a resistência foi 20% mais elevada.

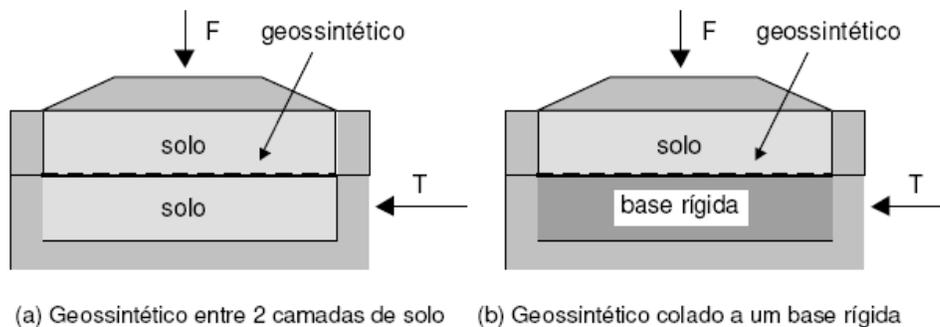
Nakamura *et al.* (1996) revelam que uma superfície rugosa induz uma tensão cisalhante mais elevada devido ao imbricamento entre as partículas de solo e a rugosidade da superfície da placa nas aberturas da grelha. Eles recomendam a colagem de um material rugoso, previamente definido, buscando uma rugosidade semelhante à do solo.

No caso das geogrelhas é aconselhável que seja utilizada a caixa inferior preenchida com solo, pois neste tipo de geossintético a resistência de interface

solo-geogrelha é composta pelas parcelas de atrito ao longo do geossintético e atrito solo-solo entre as aberturas. A última parcela não pode ser obtida quando o geossintético é colocado sob a base rígida. Mesmo assim, é conveniente lembrar que o solo pode sofrer deformações, fazendo com que a posição da geogrelha seja alterada para o início do cisalhamento (Resende, 2005).

A base rígida é utilizada na maioria dos ensaios executados em geotêxteis e geomembranas. Este procedimento representa convenientemente o mecanismo de interação por atrito, além de garantir que a interface coincida com a superfície de ruptura. No caso da opção por solo nas duas caixas, deve-se considerar o efeito do adensamento na fase inicial do ensaio, que pode mudar a posição do geossintético em relação à superfície de ruptura (Aguiar, 2003).

A Figura 8 sugere a escolha da parte inferior da caixa, preenchida com solo ou base rígida, para dois tipos de geossintético, geogrelha e geomembrana.



(a) Geossintético entre 2 camadas de solo (b) Geossintético colado a um base rígida

Figura 8 - Sistema de Interação Solo Geossintético no Equipamento de cisalhamento direto (Sieira, 2000)

e) Influência da granulometria do solo

Gomes (1993) estudou a influência da granulometria e da angularidade das partículas do solo, em análise de interfaces solo-geotêxteis, com solos de diferentes faixas granulométricas (brita, seixo, pedrisco e areia) e de diferentes graus de angularidade dos grãos (brita com grãos angulares e seixo com grãos arredondados). O autor afirma que o aumento da granulometria do solo acarreta um aumento dos parâmetros de interface e que este aumento pode ser justificado por mecanismos como travamento, bloqueio e imbricamento dos grãos do solo na superfície do geotêxtil. Ressalta-se que a angularidade dos grãos tende a intensificar os efeitos de travamento e bloqueio do solo ao longo da manta têxtil,

proporcionando a mobilização de maiores tensões cisalhantes. A Tabela 3 apresenta os resultados.

Tabela 3 - Influência da granulometria e da angularidade em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)

Interface	Solo		Geotêxtil OP20 (*)		Geotêxtil OP30 (*)		Geotêxtil OP60 (*)		Geotêxtil PR-2004 (**)	
	c	ϕ	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}
Areia	0	38,0	0	38,0	1	37,0	0	36,5	1	32,0
Pedrisco	0	37,0	1	37,0	1	37,0	0	37,0	1	35,0
Seixo	0	41,0	2	41,0	1	41,0	0	40,5	0	38,5
Brita	0	45,0	8	42,0	10	44,5	10	43,0	1	42,0

(*) geotêxteis não tecidos e (**) geotêxtil tecido.

Aguiar (2008) estudou a influência do tipo de solo (areia e/ou brita) nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. O autor observou nas interfaces ensaiadas que o aumento do diâmetro do grão acarreta um maior valor do ângulo de atrito. Verificou, também, que há uma redução da eficiência na interface solo-geogrelha, e um aumento para a interface solo-geomembrana.

2.4.2. Ensaio de Rampa

Os ensaios de cisalhamento direto e arrancamento são realizados para se obter a resistência de interface solo-geossintético. Para situações como taludes de áreas de disposição de resíduos, os resultados dos ensaios podem conduzir a erros significativos. Isto se deve à representação incorreta do mecanismo de sollicitação do geossintético, no caso do ensaio de arrancamento, ou à baixa tensão utilizada no ensaio de cisalhamento direto, fazendo com que o projeto fique contrário à segurança, como constatado por Girard *et al.* (1990) e Gourc *et al.* (1996).

Desta forma, os ensaios de rampa representam uma alternativa para modelar problemas de estabilidade de camadas superficiais de geossintéticos em taludes muito inclinados (Figura 9). São considerados como um ensaio de qualificação em que é possível reproduzir, por exemplo, a estabilidade de um ensaio de

multicamadas ou fluência das interfaces para tensões normais reduzidas (Gouc et al., 1996).

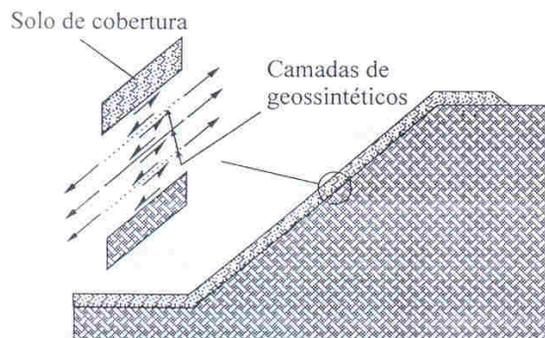


Figura 9 - Esquema de talude de disposição de resíduos com sistemas de multicamadas de geossintéticos (Adaptado Mello *et al.*,2003)

O mecanismo do ensaio de rampa é simples, como pode ser observado na Figura 10. O equipamento consiste em uma caixa superior rígida com solo confinado sob a face do geossintético, fixa a um plano e inicialmente na horizontal, apoiada sobre uma base. Esta base pode ser uma caixa preenchida com solo, ou por uma base rígida, por exemplo, uma placa de madeira. As restrições feitas à base rígida ocorrem quando são ensaiadas interfaces solo-geogrelha, em função da não reprodução da parcela atrito solo-solo nas aberturas da geogrelha.

Existem vários métodos para aplicação das tensões normais, entre eles cita-se a utilização de amostras de solo com diferentes alturas, além da aplicação de sobrecargas através da colocação de placas de concreto, colchões de ar, entre outros.

O ensaio é realizado inclinando-se gradualmente este conjunto até que ocorra o deslizamento completo ao longo da interface solo-geossintético. Os procedimentos do ensaio de rampa encontram-se descritos na ISO 12957-2.

As dimensões das caixas de ensaio geralmente possuem caixas de ensaio com áreas de interface variando de 0,005 a 1m².

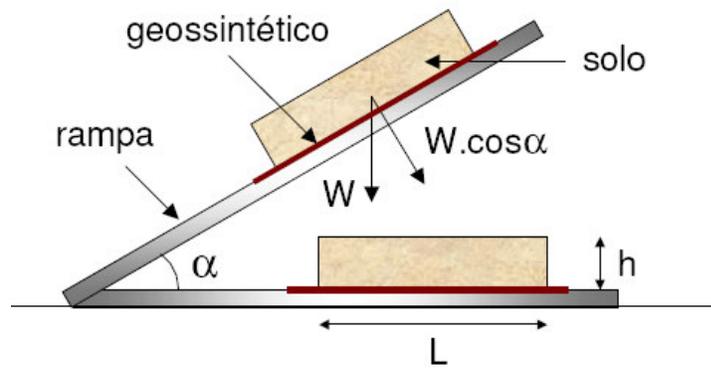


Figura 10 - Conjunto de forças do ensaio de rampa (Rezende, 2005)

O ensaio é executado sob no mínimo três diferentes tensões confinantes para obtenção da envoltória de resistência na interface e assim obter os parâmetros de interface solo-geossintético (a e ϕ_{sg}).

A tensão média sobre a superfície de contato solo-geossintético é definida através da Equação 5.

$$\sigma = \frac{W \cdot \cos \alpha}{A} \quad (5)$$

onde:

σ = tensão normal média que atua na interface;

W = peso da amostra;

A = área de contato solo-geossintético;

α = ângulo de inclinação da rampa.

Os ensaios de rampa não oferecem grandes dificuldades de interpretação. No entanto, os resultados podem estar influenciados por fatores, tais como: tensão de confinamento, tipo de geossintético, tipo de solo, rugosidade do plano rígido e dimensões do corpo de prova. Com relação à influência da velocidade do ensaio e da densidade relativa do solo, são poucas as informações da literatura (Rezende, 2003). Conclui-se que a análise dos resultados de rampa permite afirmar que o equipamento se mostra como excelente ferramenta para analisar o comportamento de interfaces solo-geossintéticos.

Os resultados dos ensaios podem ser influenciados por fatores, tensão de confinamento, tipo de geossintético, tipo de solo e sistema de camadas, entre outros.

a) Influência da Tensão de Confinamento

Uma das restrições do ensaio é a variação da tensão normal com a inclinação da rampa, como observado na Figura 11. A outra limitação seria a forma de distribuição da tensão normal. Geralmente, admite-se que a distribuição da tensão média normal é uniforme ao longo da superfície de contato. No entanto verifica-se que a não uniformidade vai aumentando à medida que a inclinação do plano de cisalhamento aumenta.

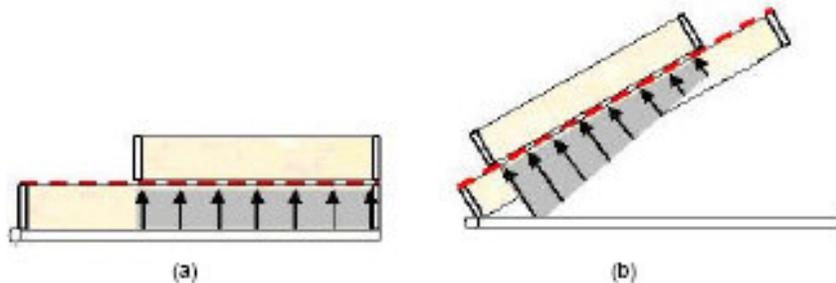


Figura 11 - Variação da distribuição da tensão normal com a inclinação da rampa: (a) condição inicial e (b) durante o ensaio (Rezende, 2005)

Lopes (2001), Palmeira *et al.* (2002), Aguiar (2003) e Resende (2005) admitem que a distribuição das tensões é uma forma trapezoidal e seus valores máximo e mínimo são obtidos através das seguintes relações:

$$\frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma} = 4 - \frac{6x}{L} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma} = \frac{6x}{L} - 2 \quad (7)$$

$$\frac{x}{L} = \frac{\cos \left[\alpha + \tan^{-1} \left(\frac{h}{L} \right) \right]}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \left[1 + \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Onde:

σ máx. = tensão normal máxima;

σ mín = tensão normal mínimo;

σ = tensão normal média;

x = distância entre a extremidade inferior do bloco de solo e o ponto de aplicação da força normal na interface;

α = ângulo de inclinação da rampa;

h = altura da amostra de solo;

L = comprimento da base da amostra de solo;

W = peso da amostra.

As Equações (6) a (7) indicam que as dimensões da amostra afetam significativamente os valores das tensões máximas e mínimas atuantes, sendo os fatores importantes para equipamentos de pequenas dimensões.

A influência da tensão de confinamento foi estudada por vários pesquisadores (Juran *et al.*, 1998; Farrag *et al.*, 1993; Ladeira, 1995; Pinho Lopes, 1998; Wasti e Özduzgun, 2001; Lopes, 2001; Mello *et al.*, 2003).

Wasti e Özduzgun (2001) realizaram ensaios de cisalhamento inclinado e ensaio de rampa utilizando os mesmos equipamentos descritos em Izgin e Wasti (1998) para interfaces geotêxtil-geomembrana. Foram utilizadas geomembranas de PEAD (lisa e rugosa) e geotêxtil não-tecido (agulhado). Os autores observaram que as variações do ângulo de atrito da interface com o aumento da tensão normal são mais sensíveis para as geomembranas rugosas do que para as lisas (Figura 12).

Lopes (2001) estudou a influência da tensão de confinamento na resistência da interface solo-geossintético através de ensaios de rampa com diferentes geossintéticos para três tensões de confinamento no início do ensaio (5kPa, 10kPa e 25kPa) em um solo arenoso ($D_{máx} = 2,0\text{mm}$) com o geossintético colocado sobre uma base rígida. A autora constatou que a geomembrana lisa e a geogrelha uniaxial foram os materiais que apresentaram menor redução do ângulo de atrito, ao contrário da geomembrana rugosa e da geogrelha biaxial que mostraram maior sensibilidade às variações da tensão de confinamento.

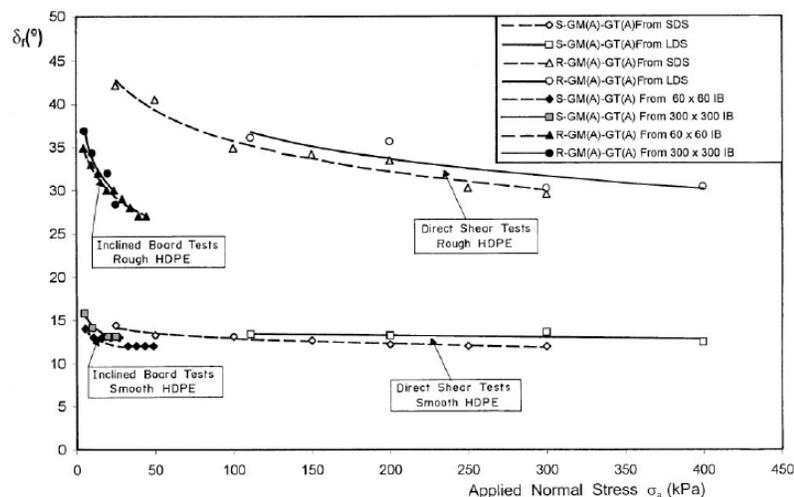


Figura 12 - Influência da tensão confinante no valor do ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}) (Wasti e Özdüzgun, 2001)

A Tabela 4 mostra a influência das tensões de confinamento para diferentes geossintéticos. Para uma dada tensão de confinamento, a relação entre o ângulo de atrito da interface solo-geossintético para as tensões de confinamento iniciais de 5 kPa e 25 kPa, se mantém constante para os diferentes geossintéticos ensaiados, mostrando a importância do tipo de geossintético na resistência da interface.

Tabela 4 - Influência da tensão de confinamento no comportamento da interface solo-geossintético (Lopes, 2001)

Geossintético	Tensão de Confinamento Inicial (kPa)			% Redução (*)
	5	10	25	
	Ângulo de Atrito na Interface (°)			
Geomembrana lisa	21,2	21,4	20,8	2,2
Geomembrana rugosa	33,0	31,2	30,2	8,4
Geotêxtil tecido	32,2	30,5	29,7	7,9
Geotêxtil não tecido termossoldado	32,3	31,7	30,5	5,4
Geotêxtil não tecido agulhado	33,1	32,2	30,9	6,6
Geogrelha uniaxial	26,8	27,6	26,5	1,1
Geogrelha biaxial	31,3	30,1	28,7	8,2

Mello *et al.* (2003) realizaram uma série de simulações numéricas para analisar a influência do tamanho da amostra na distribuição de tensões. A Figura 13, baseada em Palmeira *et al.* (2002), apresenta a variação da tensão normal e comprimento normalizado ($L = 0,5, 2$ e 10m) para inclinações de 15° e 25° . A comparação entre os resultados teóricos e os resultados obtidos pela simulação numérica mostram uma boa concordância. Porém, deve-se ressaltar que para comprimentos de $0,5\text{m}$, a diferença de valor entre a tensão máxima e mínima pode chegar a cinco vezes.

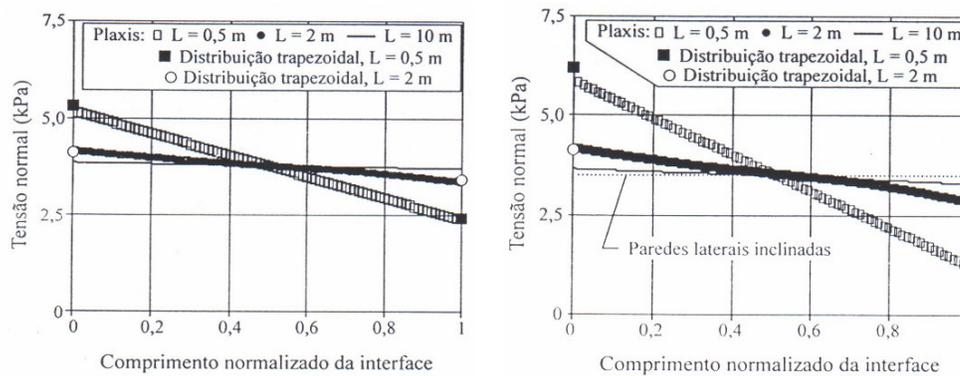


Figura 13 - Variação da tensão normal em função do comprimento normalizado: (a) Inclinação de 15° e (b) Inclinação de 25° (Mello *et al.* 2003)

Gourc *et al.* (1996) sugerem a utilização de caixas de ensaio com faces inclinadas, para uniformização das tensões no momento da ruptura da interface. Uma alternativa menos complexa é proposta por Mello *et al.* (2003) que recomendam a utilização de caixas de ensaio com relação comprimento-altura elevada.

Em relação às envoltórias de resistência obtidas em ambos os ensaios, Izgin e Wasti (1998) observaram que os ensaios em rampa forneceram envoltórias lineares que passam pela origem. No entanto, os ensaios de cisalhamento direto convencionais apresentaram envoltórias com ordenada não nula e ângulos de atrito da interface superiores aos obtidos nos ensaios de rampa.

b) Influência do Tipo de Geossintético

Muitos autores analisaram a influência do geossintético na caracterização da resistência da interface solo-geossintético através dos ensaios de rampa (Izgin e

Wastin, 1998; Lima Jr, 2000; Mello, 2001; Lopes, 2001; Aguiar, 2003; Briançon *et al.*, 2003; Resende 2005).

Giroud *et al* (1990) executaram ensaios de rampa para diferentes interfaces solo-geossintético, sob baixos níveis de confinamento. Os ângulos de atrito da interface obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento em plano inclinado foram inferiores (cerca de 5 a 0°) aos obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto convencionais. Em ambos os trabalhos, os autores acreditam que os ensaios de rampa fornecem ângulos de atrito mais realistas, quando as tensões normais são reduzidas.

Izgin e Wasti (1998) estudaram a resistência ao cisalhamento da interface areia-geomembrana através de ensaios de cisalhamento convencionais e em plano inclinado. Foram ensaiadas geomembranas lisas e rugosas de polietileno de alta densidade. Os autores observaram um ângulo de atrito da interface (ϕ_{sg}) superior no caso de geomembranas com superfícies rugosas.

Lima Júnior (2000) e Mello (2001) executaram ensaios de rampa, utilizando diferentes tipos de geossintéticos (geotêxteis tecido, geotêxtil não tecido, geomembrana lisa e geomembrana rugosa) e diferentes solos (areia fina, areia grossa e argila). Os autores observaram que as características superficiais dos geossintéticos influenciam os mecanismos de ruptura. Os maiores valores de aderência solo-geomembrana foram obtidos nos ensaios com solo argiloso e geomembrana rugosa.

Mello (2001) ressaltou que para pequenas inclinações de rampa, somente uma pequena fração do comprimento da geomembrana é solicitada. No entanto, à medida que a inclinação da rampa aumenta, todo o comprimento da geomembrana é submetido à deformação. A distribuição das deformações ao longo do comprimento da geomembrana é não uniforme.

Lopes (2000) executou uma série de ensaios de rampa (Figura 14) com o objetivo de avaliar a influência da estrutura do geossintético, da granulometria do solo e da tensão confinante no mecanismo de interação solo-geossintético. Para tanto, foram utilizados dois tipos de solos arenosos e sete tipos de geossintéticos incluindo geogrelhas, geotêxteis não tecidos e tecidos e geomembranas. As principais conclusões foram que:

- 1) A estrutura do geossintético influencia a resistência das interfaces solo-geossintético. A estrutura contínua mais lisa (geomembrana lisa) apresenta valores

menores de resistência na interface com o solo. Em contrapartida, o geossintético com a superfície mais rugosa (geotêxtil não-tecido agulhado) apresenta ângulo de atrito mais elevado;

2) Nos ensaios efetuados sobre base rígida, as geogrelhas biaxiais apresentam maior resistência do que as geogrelhas uniaxiais, ao que acontece nos ensaios de arrancamento, onde é possível considerar a contribuição da mobilização da resistência passiva nas barras transversais da geogrelha

3) À medida que a tensão confinante aumenta, verifica-se uma redução no valor do ângulo de atrito da interface solo-geossintético;

4) A utilização de solos com granulometria mais grosseira conduz a um acréscimo da resistência da interface. Este acréscimo é mais acentuado quando o geossintético apresenta uma superfície lisa.

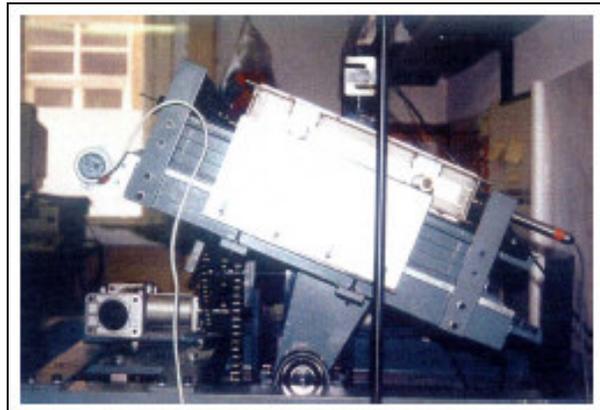


Figura 14 - Equipamento da Universidade do Porto (Lopes, 2001)

Lopes (2001) realizou ensaios de rampa de geossintéticos com estruturas diferentes em um solo arenoso com geossintético colocado sobre uma base rígida e lisa. Foram utilizadas geomembranas lisa e rugosa (pitonada), geotêxtil tecido e não tecido (termosoldado e agulhado) e geogrelha uniaxial e biaxial.

A autora concluiu que o geotêxtil tecido é o que possui menor resistência na interface, em virtude da sua superfície ser formada por filamentos dispostos regularmente tornando-se menos rugosa que a dos não tecidos. A resistência da interface solo-geomembrana rugosa é idêntica à das interfaces solo-geotêxtil, esclarecendo as razões que levam a utilização das geomembranas rugosas em taludes.

Aguiar (2003) realizou ensaios de rampa em geotêxteis não tecidos, geogrelha uniaxial e geomembrana (texturizada em uma das faces) para verificar a resistência da interface com um solo silto-argiloso. A Tabela 5 mostra os valores dos parâmetros de resistência e a eficiência de interação nas interfaces.

Tabela 5 - Influência do tipo de geossintético nos resultados dos ensaios de rampa (Aguiar, 2003)

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c	E_ϕ
Solo-geotêxtil	0,16	41,4	0,64	0,94
Solo-geogrelha	0,22	43,7	0,88	1,02
Solo-geomembrana	0,17	35	0,68	0,81

Resende (2005) avaliou, dentre outros, a influência do tipo de geossintético no mecanismo de interação solo-geossintético. Desta forma, a autora utilizou materiais distintos, como uma geomembrana de PVC e uma geogrelha uniaxial de poliéster. Os materiais usados foram areia e brita, com densidades relativas de 35% e 100%. Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

A autora concluiu que os maiores ângulos de rampa na ruptura correspondem à geogrelha. A interface com areia densa ($D_r = 100\%$) foi a que apresentou uma maior diferença, correspondente a 8° , seguida pela interface com areia fofa ($D_r=35\%$) que apresentou uma diferença de 6° . A interface com brita é a que apresenta menor variação do ângulo de rampa na ruptura, equivalente a 3° . Isto pode ser decorrente do ganho de resistência da interface em virtude do aumento da rugosidade da geomembrana provocado pelo arranjo irregular dos grãos da brita. Este ganho de resistência poderia ser menor, caso a brita estivesse com uma densidade relativa maior, pois haveria uma tendência dos grãos situados na interface ficarem dispostos de forma horizontal, diminuindo então a rugosidade na interface.

Tabela 6 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para a tensão confinante de 3,2 kPa

Geossintético	Solo	Dr (%)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	α (°)	Tensões na Ruptura		
					σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ
Geogrelha	Areia	35	7,00	30	2,8	1,8	0,62
		100	2,00	33	2,8	1,9	0,70
	Brita	35	8,75	34	2,6	1,9	0,73
Geomembrana	Areia	35	4,50	24	3,0	1,4	0,48
		100	0,75	25	3,7	1,78	0,49
	Brita	35	10,75	31	2,7	1,7	0,65

c) Influência do tipo de solo

Giroud *et al.* (1994) apresentam resultados de ensaios em cisalhamento direto e rampa para diversas interfaces, utilizando solo arenoso, solo argiloso e três tipos de geomembranas. Segundo os autores o estudo da interface argila-geomembrana é justificado por esse tipo de situação ser muito comum em aterros sanitários. Em solos não coesivos, a ruptura é brusca, enquanto que para as argilas os deslocamentos acontecem de maneira progressiva à medida que a inclinação aumenta. Além disto, os deslizamentos das argilas compactadas na umidade ótima ocorrem para inclinações maiores que as das areias. Para melhor estudo da interação argila-geomembrana, os autores sugerem ensaios adicionais para determinar a influência da umidade de compactação, assim como taxa de inclinação da rampa. Deve-se observar que os diferentes valores de rigidez à tração das geomembranas também devem ter afetado os resultados apresentados na Figura 15.

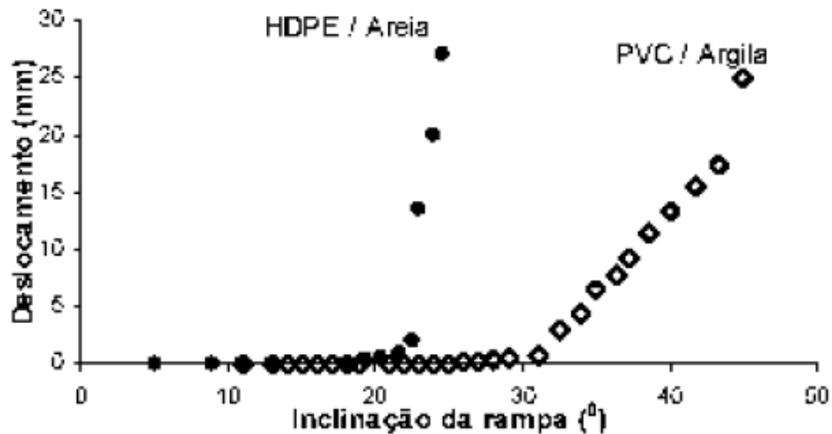


Figura 15 - Deslocamentos medidos em duas interfaces na rampa (Modificado – Girard *et al.*, 1994)

Mello (2001) executou ensaios de plano inclinado em um solo arenoso fino e um argiloso e utilizou três geossintéticos, geotêxteis não-tecidos, geomembranas lisas e geomembrana rugosa. As cargas desenvolvidas nos geossintéticos foram medidas através de uma célula de carga. O autor observou que as cargas medidas nos geossintéticos foram semelhantes para os dois solos, sendo uma única diferença encontrada no valor da carga final (valor que depende da inclinação em que ocorreu o deslizamento e da rigidez à tração do geossintético). Para o geotêxtil não-tecido, a variação ocorre de uma forma não linear, diferentemente para as geomembranas, lisa e texturizada, que apresentam uma forma mais linear, como mostra a Figura 16. Esta diferença no formato das curvas se deu principalmente pela diferença de rigidez à tração dos materiais.

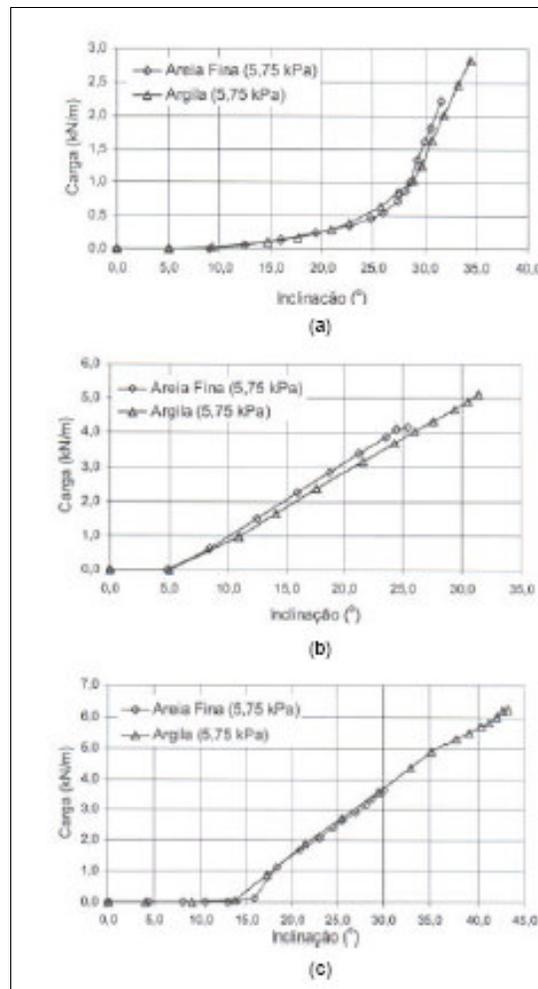


Figura 16 - Comparação das cargas com dois tipos de solo para as interfaces: (a) geotêxtil não-tecido; (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001)

Lopes (2001) concluiu através dos seus ensaios apresentados na Tabela 7, que quanto maior a granulometria dos solos arenosos, maior será a influência nos geossintéticos de superfície lisa (geomembrana lisa, seguida pelo geotêxtil tecido) devido ao aumento da superfície de contato entre o solo e o geossintético. A influência da granulometria de solo em geossintéticos com superfície rugosa é menor porque a própria rugosidade permite aumentar o contato com o solo. A autora ressalta que independente da granulometria, as interfaces com geomembrana lisa e geogrelha uniaxial continuam sendo menos resistentes.

Aguiar (2008) observou que as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência, quando comparadas às interfaces solo-geogrelha devido o tipo de estrutura do geossintético, já que a geomembrana perde resistência pelo fato de

possuir uma superfície lisa, ao contrário da geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo com as aberturas da malha da geogrelha.

Tabela 7 - Influência da granulometria do solo nos resultados dos ensaios de rampa (Lopes, 2001)

Geossintético	Solo 1	Solo 2(*)	% aumento
	Ângulo de Atrito na Interface (°)		
Geomembrana lisa	21,4	24,5	14,6
Geomembrana rugosa	31,2	32,9	5,5
Geotêxtil tecido	30,5	33,6	10,2
Geotêxtil não tecido termossoldado	31,7	32,3	2,1
Geotêxtil não tecido termossoldado	32,2	32,9	2,1
Geogrelha uniaxial	27,6	29,5	6,6
Geogrelha biaxial	30,1	33,0	9,5

(*) Solo com dimensão de partícula maior.

d) Influência dos sistemas de camadas

No campo, é muito comum a utilização de duas camadas ou mais de geossintéticos em contato. Um dos exemplos é em obras de disposição de resíduos, a presença de geotêxtil sobre ou sob uma camada de geomembrana pode ter as funções de drenagem, proteção da geomembrana contra os danos mecânicos ou como camada de absorção de tensões de tração (camada de aderência) para minimizar a transferência de tensões para a geomembrana. Desse modo, o sistema de cobertura é formado por interfaces solo-geossintético e geossintético-geossintético, com diversas resistências de interface e deformabilidade que levam a complexos e práticos mecanismos de interação e deformabilidade (Figura 17). Dependendo do valor da inclinação do talude, as camadas de solo de cobertura podem vir a ser compactada de forma bastante precária. Deste modo, o ensaio de plano inclinado assume grande importância para a quantificação da resistência da interface entre diferentes materiais, servindo de subsídio para o projeto de taludes de área de escavação (Resende, 2005).

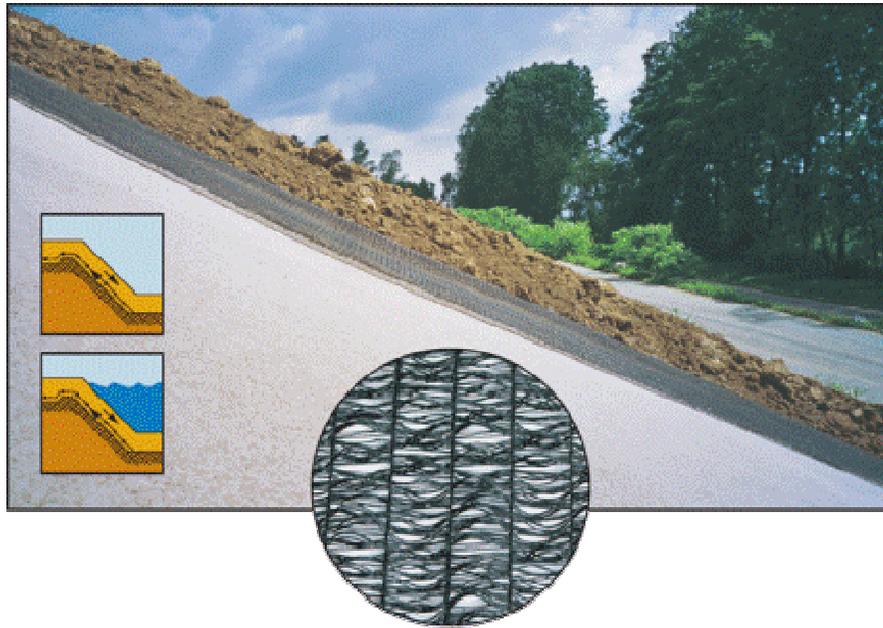


Figura 17 - Situação típica em um talude reforçado com geossintéticos

2.4.2.1. Equipamentos para ensaio de Rampa

A literatura apresenta diversos tipos de equipamentos de ensaio de rampa, os quais estão sucintamente descritos na Tabela 8.

O equipamento de Aguiar (2003) foi desenvolvido na PUC-Rio em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGS). Segundo o autor o equipamento foi elaborado considerando-se uma série de recomendações encontradas na literatura, principalmente na norma européia ISO 12957-2.

O conjunto é constituído por uma estrutura de suporte, sistema de carregamento, caixas de ensaio e instrumentação e por seus componentes básicos, sistema de basculamento e caixas de ensaio. A estrutura é composta por uma série de perfis de aço soldados, formando um sistema único, dimensionado de forma a resistir aos esforços solicitantes dos ensaios propostos. A base é constituída por perfis I de 6 polegadas (15,24cm), com dimensões iguais a 2,50m de comprimento e 1,35m de largura (Figura 18).

Tabela 8 - Equipamentos de Rampa (Aguiar, 2008)

Autor	Caixas de Ensaio						VI (cm/min)	Medições	STN
	Inferior			Superior					
	c	l	h	c	l	h			
Girard <i>et al.</i> (1990)	100	100	5	100	100	20	5	AI	peso do solo
Gourc <i>et al.</i> (1996)	150	150	-	100 ou 50	100 ou 50	-	-	AI, DH	solo e placas de aço
Izgin (1997)	não tem caixa inferior			60 200 300	60 200 300	-	1 a 6,5 (°/min)	-	solo e placas de aço
Lalarakotoso n <i>et al.</i> (1999)	não tem caixa inferior			100	70	30	-	AI, DH	peso do solo
Lima Jr. (2000)	não tem caixa inferior			192	47	25	-	AI, DH, CG	solo e placas de concreto
Lopes (2001)	51	35	8	30	30	8	0,5	AI, DH, CV	solo e placas de aço
Briançon <i>et al.</i> (2002)	200	120	30	100	100	50	0,5 a 3,5 (°/min)	AI, DH, CG	peso do solo
Najero (2003)	não tem caixa inferior			não tem caixa superior			5 (°/min)	AI	placas de concreto
Aguiar (2003)	120	100	5	100	100	5	~1 (°/min)	AI, DH	solo e placas de aço

c = comprimento da caixa (cm), l = largura da caixa (cm) e h = altura da caixa (cm);

VI = velocidade de inclinação da caixa; STN = sistema de aplicação de tensão normal;

AI = ângulo de inclinação da rampa, DH = deslocamento horizontal da caixa superior,

CG = carga no geossintético e CV = carga vertical aplicada na amostra.



Figura 18 - Estrutura principal do equipamento desenvolvido por Aguiar (2003)

A plataforma de ensaio é uma placa de aço de 0,64cm de espessura com dimensões de 1,1m de largura por 1,3m de comprimento. Enrijecida com perfis U de 2 polegadas (5,08cm x 2,54cm x 0,64cm) e barras chatas de 2 polegadas (5,08cm x 0,32 cm) soldadas em sua face inferior. Sua área útil é de 1,0m largura x 1,2m comprimento, com as extremidades destinadas à fixação das caixas de ensaio.

Esta estrutura foi construída previamente por Aguiar (2003) e corresponde a base para o equipamento utilizado por Rezende (2005), as alterações no equipamento foram no sentido de aumentar a precisão dos resultados. Segundo a autora, a primeira delas foi a fixação de um ponto de medição dos deslocamentos da caixa superior, tornando possível o monitoramento dos deslocamentos nas duas extremidades da caixa (Figura 19). A outra alteração refere-se ao sistema de

fixação do geossintético (Figura 20), o qual constitui de uma garra metálica, fixada na caixa inferior através de dois perfis U, permitindo-se assim o alinhamento do geossintético entre as duas caixas (plano de ruptura) diminuindo o tempo de preparação dos corpos de prova, já que não existe mais a necessidade de fixar o geossintético em ambos os lados. Uma vista geral do equipamento pode ser observada na Figura 21.



Figura 19 - Sistema de monitoramento dos deslocamentos (Rezende,2005)



Figura 20 - Sistema de fixação do geossintético (Rezende,2005)



Figura 21 - Equipamento de Rampa da PUC-Rio (Aguiar, 2003)

2.5. Considerações Finais

Neste capítulo foi feita uma revisão sobre os ensaios de cisalhamento direto e de rampa, citando os diversos equipamentos encontrados na literatura, os fatores que influenciam os resultados, entre eles, tensão de confinamento, tipo de geossintético, tipo de solo, rugosidade do bloco rígido e configuração do corpo de prova.