

### **3. Ensaio para Avaliação da Resistência da Interface**

#### **3.1. Considerações Iniciais**

Esta tese se propõe a desenvolver, construir e calibrar um equipamento capaz de realizar ensaios de rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado sob de baixas tensões normais.

Desta forma, o objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão contendo métodos de ensaios, equipamentos reportados e condicionantes associadas ao equipamento e condicionantes associadas aos materiais ensaiados.

#### **3.2. Ensaio de Rampa**

Os ensaios de rampa representam uma alternativa para modelar problemas de estabilidade de camadas superficiais de geossintéticos em taludes muito inclinados, sendo considerado um ensaio de qualificação.

A mecânica do ensaio de rampa é simples, como pode ser observado na Figura 24. Consiste em uma caixa rígida com solo, apoiada sobre uma camada de geossintético. Este pode estar apoiado sobre a rampa de ensaio ou sobre outra caixa contendo solo. Todo este conjunto encontra-se inicialmente na horizontal. O ensaio é realizado aumentando-se gradativamente a inclinação da rampa até ocorrer o deslizamento ao longo da interface solo-geossintético.

Estes equipamentos normalmente utilizam caixas de ensaio com áreas de interface variando de 0,005 a 1m<sup>2</sup>

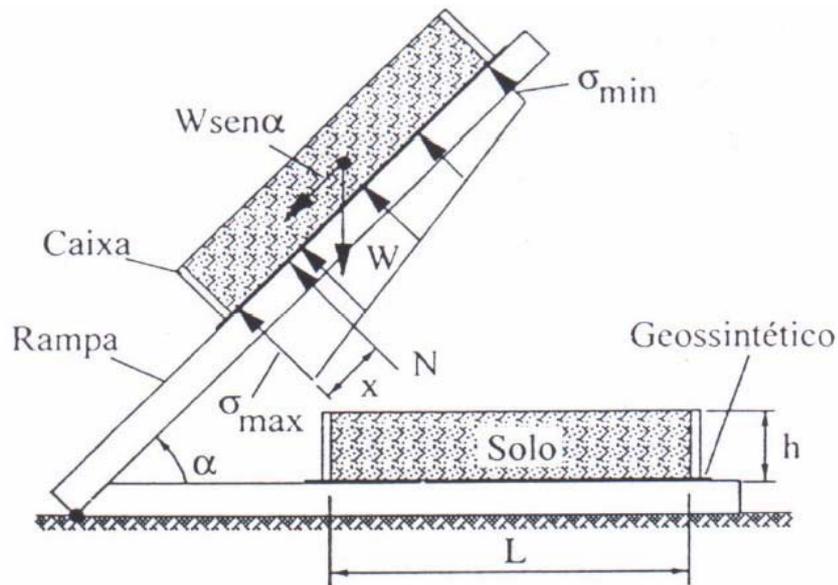


Figura 24 - Mecânica do ensaio de rampa (Melo *et al.*, 2003).

A equação que define a mecânica do ensaio de rampa é a mesma Equação 1 apresentada anteriormente. Entretanto a tensão normal média atuando sobre a superfície de contato solo-geossintético é definida como:

$$\sigma = \frac{W \times \cos \alpha}{A} \quad (6)$$

onde:

$\sigma$  = tensão normal média que atua na interface;

$W$  = peso da amostra;

$A$  = área de contato solo-geossintético;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da rampa.

Para se obter os parâmetros de interface solo-geossintético ( $a$  e  $\phi_{sg}$ ), basta construir a envoltória de resistência utilizando-se no mínimo três ensaios com tensões de confinamento diferentes, como apresentado anteriormente na Figura 12.

### 3.2.1. Métodos para ensaio de Rampa

A norma ISO 12957-2 apresenta as recomendações para a execução do ensaio de rampa além das dimensões mínimas da caixa de ensaio e dos instrumentos necessários para monitoração do ensaio (Figura 25).

Os aspectos mais importantes desta norma são resumidos, segundo Lopes (2001):

(i) O equipamento de ensaio pode ser de dois tipos: pode possuir uma base rígida e lisa, onde se coloca o geossintético, ou então, o geossintético pode ser colocado sobre o solo que preenche uma caixa inferior;

(ii) Em qualquer dos casos, a caixa superior, que contém o solo que irá deslizar sobre o geossintético durante o ensaio, deverá ter dimensões internas mínimas de 0,3m de comprimento, 0,3m de largura e 0,05m de profundidade, ou ser de no mínimo sete vezes a dimensão máxima das partículas de solo;

(iii) A caixa inferior, caso exista, deverá ter dimensões internas mínimas de 0,4m de comprimento, 0,325m de largura e 0,05m de profundidade, ou ser de no mínimo sete vezes a dimensão máxima das partículas de solo;

(iv) O equipamento deve possuir um mecanismo que lhe permita inclinar uma superfície, com uma velocidade que garanta a elevação de uma das suas extremidades de cerca de 5% do comprimento da superfície por minuto. No início de cada ensaio essa superfície deve estar na horizontal;

(v) O equipamento deve possuir dispositivos que lhe permitam medir o deslocamento da caixa superior, a inclinação da superfície em relação à horizontal durante o ensaio, bem como a força aplicada pelo sistema de pesos no solo que preenche a caixa superior;

(vi) O geossintético deve ser assentado na sua superfície de apoio, de modo a evitar qualquer deslocamento relativo entre ele e esta superfície.

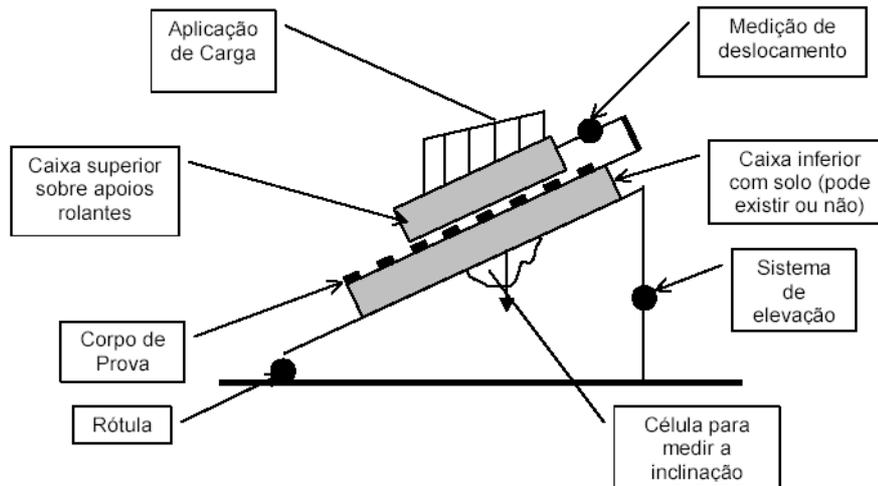


Figura 25 - Representação esquemática do equipamento de ensaio de rampa (Adaptado da ISO 12957-2).

### 3.2.2. Equipamentos de ensaio de Rampa

A literatura apresenta alguns equipamentos desenvolvidos para ensaios de rampa.

Girard *et al.* (1990) desenvolveram um protótipo de aparelho para ensaios de rampa. Este equipamento foi utilizado para avaliar dois casos de escorregamentos de *lining* em barragens de enrocamento. O equipamento, ilustrado na Figura 26, é composto por uma plataforma metálica com dimensões de 1m x 1m, sobre a qual é fixada uma caixa com 5cm de altura que armazena o solo. As interfaces a serem ensaiadas são assentadas a esta caixa inferior. Neste conjunto coloca-se uma caixa superior de madeira de 20cm de altura, que pode ser totalmente preenchida com solo. Os ângulos são medidos de maneira indireta, utilizando-se uma régua graduada. O procedimento de ensaio consiste em inclinar a rampa com velocidade aproximada de 5cm/min até a ruptura da amostra.

Gourc *et al.* (1996) compararam a aplicabilidade dos ensaios de cisalhamento direto e plano inclinado num projeto onde foram realizados 100 ensaios do primeiro e 75 do segundo, para vários tipos de interface. O equipamento de plano inclinado foi descrito como um aparato composto de uma base de 150cm x 150cm inclinável uma velocidade controlada, caixa superior em dois tamanhos distintos (100cm x 100cm; 50cm x 50cm) para amostras de solo, sendo que a menor delas oferece a possibilidade de inclinação das faces laterais e

um sistema para coleta de dados de inclinação e deslocamento. A inclinação das faces de uma das caixas é justificada por tornar a distribuição de tensões normais sobre a interface mais uniforme durante o ensaio. As tensões normais podem ser aplicadas através do solo de cobertura, como também por placas de aço. Uma peculiaridade deste equipamento de rampa é a possibilidade de determinação do ângulo que ocorre o primeiro deslocamento, ou seja, o ângulo de início de deslocamento. O equipamento é apresentado na Figura 27.

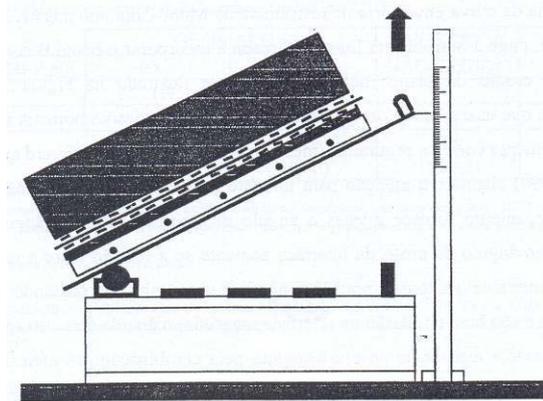
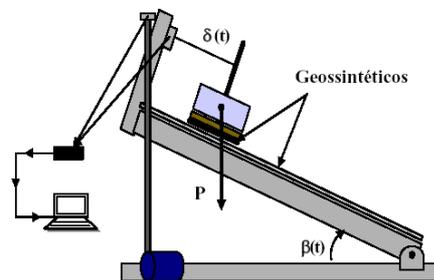


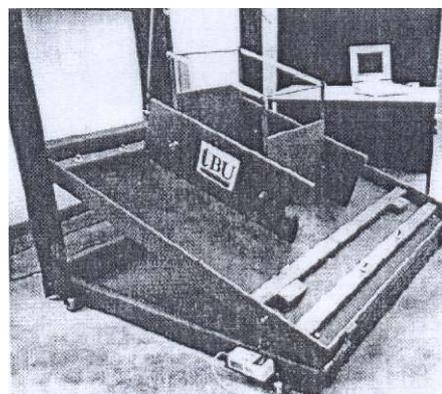
Figura 26 - Equipamento de rampa reportado por Girard *et al.* (1990).



(a) vista esquemática.



(b) Configuração para ensaios geossintético-geossintético.



(c) Configuração com faces inclinadas para solo-geossintético

Figura 27 - Equipamento de rampa reportado por Gourc *et al.* (1996).

Izgin (1997) propõe um aparelho com dimensões de rampa de 600mm de comprimento x 490mm de largura x 25mm de espessura (Figura 28). Pode ensaiar amostras de 60x60mm, 200x200mm e 300x300mm. Para as amostras de menores dimensões, o confinamento pode atingir 50kPa. Para as amostras maiores, as tensões confinantes são restritas a 25kPa. O sistema de inclinação de rampa é composto por um compressor de ar comprimido que aciona um sistema hidráulico. As velocidades de inclinação que podem ser aplicadas por este sistema variam de 1 a 6,5°/s (Yzgin e Wasti, 1998). Não há informações sobre os sistemas de medição de deslocamento horizontal e de inclinação.

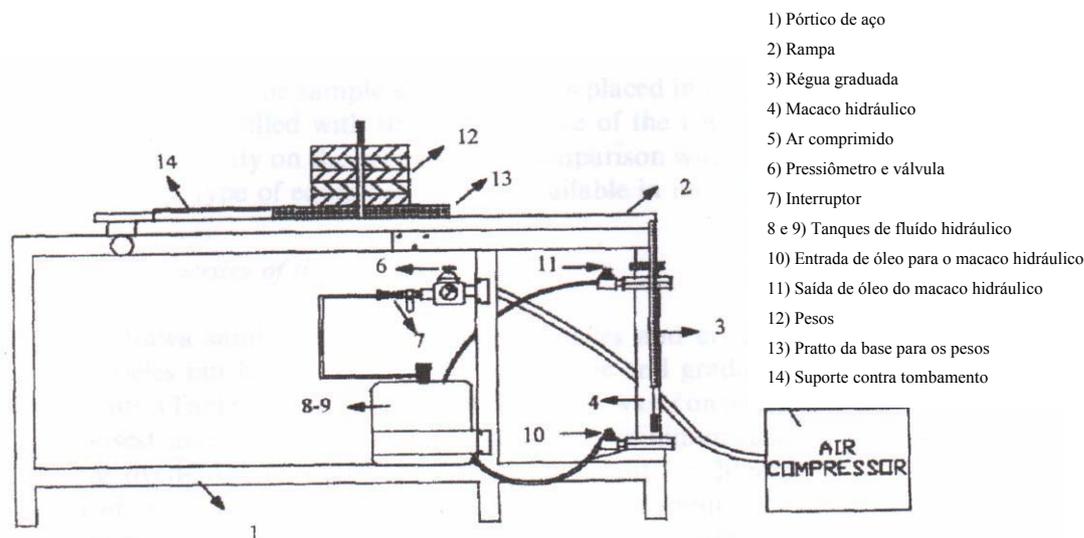
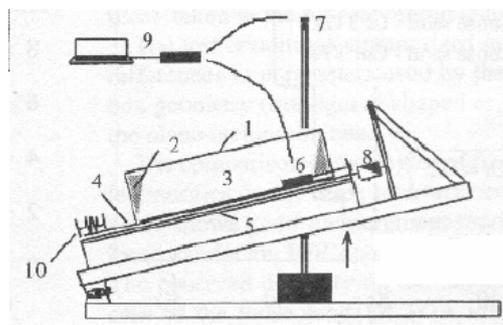


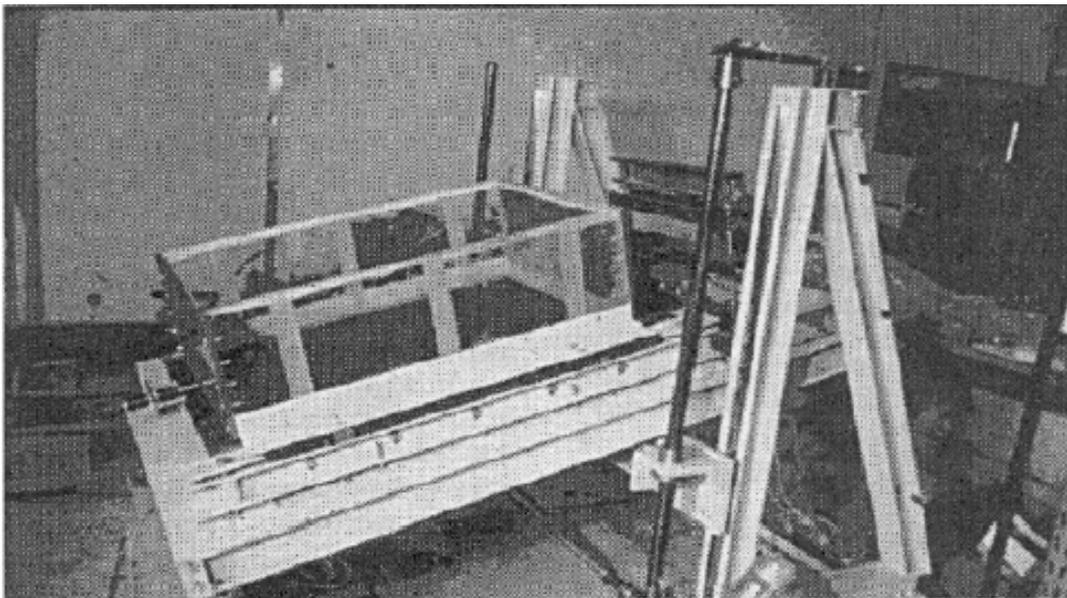
Figura 28 - Equipamento de rampa reportado por Izgin e Wasti (1998).

Lalaratokotoson *et al.* (1999) descrevem um equipamento de rampa para a determinação de parâmetros de interface. O equipamento consiste de um suporte rígido onde fica posicionado o geossintético, que é ancorado na extremidade ascendente da rampa. A caixa de teste tem as dimensões de 100cm x 70cm x 30cm e possui a opção de inclinar as suas faces, para minimizar a não uniformidade da distribuição da tensão normal. A medição dos deslocamentos horizontais da caixa e da inclinação é feita através de sensores e transmitida para um sistema de aquisição de dados. As principais características do equipamento são apresentadas na Figura 29.



(a) Vista esquemática.

- 1 - Caixa de teste (1 x 0,7 x 0,3 m<sup>3</sup>)
- 2 - Face da caixa inclinada
- 3 - Solo
- 4 - Geossintético
- 5 - Suporte Rígido
- 6 - Sensor deslocamento
- 7 - Sensor inclinação
- 8 - Ancoragem geossintético
- 9 - Aquisição dados
- 10 - Sensor de força



(b) Detalhe.

Figura 29 - Equipamento de rampa reportado por Lalarakotoson *et al.* (1999).

O equipamento reportado por Lima Jr. (2000), ilustrado na Figura 30 apresenta dimensões internas da caixa de confinamento de solo iguais 1920mm de comprimento, 250mm de altura e 470mm de largura. As camadas de geossintéticos podem ser ancoradas na extremidade ascendente da rampa e células de carga de tração permitem a medição das cargas de tração nas extremidades fixas dos geossintéticos. Até três camadas de geossintéticos podem ser ensaiadas simultaneamente. Deflectômetros fornecem os deslocamentos relativos entre a caixa da amostra e a rampa. Um sistema de carga vertical, consistindo de pesos de concreto, permite a aplicação de sobrecargas sobre a amostra de solo de, no máximo, 6kPa.



Figura 30 - Equipamento da Universidade de Brasília (Lima Jr., 2000).

Lopes (2001) construiu um equipamento capaz de realizar o ensaio de rampa de duas formas distintas. Na primeira o geossintético é fixado sobre uma base rígida e lisa e, na segunda, é sobreposto ao solo que preenche uma caixa inferior (Figura 31).

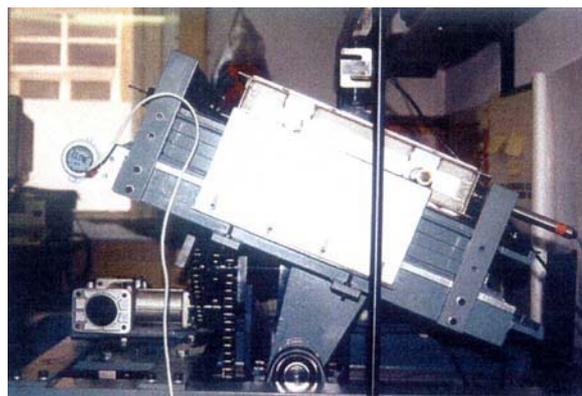


Figura 31 - Equipamento da Universidade do Porto (Lopes, 2001).

O equipamento apresenta uma base rígida e lisa com 0,62m de comprimento, 0,43m de largura e 0,010m de espessura, onde se assenta o geossintético na primeira configuração de ensaio. Para a segunda configuração,

utiliza-se uma caixa inferior rígida com dimensões internas de 0,51m de comprimento, 0,35m de largura e 0,08m de altura, preenchida por solo no qual assenta-se o geossintético. A caixa superior rígida tem dimensões internas de 0,30m de comprimento, 0,30m de largura e 0,08m de altura.

Este equipamento possui um sistema eletro-mecânico que permite que a base rígida seja inclinada com uma velocidade constante de 0,5°/min. Um sistema de segurança desliga automaticamente o equipamento quando a caixa superior excede 0,05m de deslocamento.

Os deslocamentos relativos da caixa superior e a inclinação da rampa são medidos por um transdutor de deslocamento e um inclinômetro elétricos, respectivamente. A tensão de confinamento é aplicada por um sistema análogo ao do ensaio cisalhamento direto convencional, composto por um pendural fixo a uma célula de carga.

Briançon *et al.* (2002) propõem um equipamento de rampa composto por duas caixas de ensaio (Figura 32). A inferior tem dimensões de 2,0m x 1,2m x 0,3m e a superior 1,0m x 1,0m x 0,5m. Ambas podem ser preenchidas com solo e são capazes de ensaiar amostras de grandes dimensões (1m x 1m). Os geossintéticos são colocados entre as duas caixas. Dependendo do tipo de interface ensaiada, os geossintéticos podem ser fixados na caixa superior ou ancorados através de garras na caixa inferior. As garras são conectadas a células de carga para medição da força aplicada na amostra. O espaçamento entre as caixas pode ser ajustado, permitindo o ensaio de materiais de maior espessura como os geocompostos.



Figura 32 - Equipamento reportado por Briançon *et al* (2002).

O sistema de içamento é composto por um motor elétrico. A velocidade pode ser ajustada, variando de 0,5 a 3,5°/min. A monitoração do ensaio é realizada através de medidores eletrônicos de deslocamento, células de carga e inclinômetros.

Najero (2003) apresenta um equipamento de rampa, desenvolvido para determinar o ângulo de atrito de interfaces geossintético-geossintético (Figura 33). O equipamento é composto por duas placas metálicas com dimensões de 8,6cm por 23,8cm. A placa inferior é fixada à base da estrutura. O sistema de inclinação da rampa é composto por uma barra rosqueada que tem uma de suas extremidades presa na placa superior e é controlado por uma manivela na outra extremidade. O confinamento é obtido através de blocos de concreto e a máxima tensão aplicada é de 2kPa. A velocidade de inclinação é da ordem de 5°/min. A inclinação da rampa é monitorada por um medidor de ângulo de base magnética.

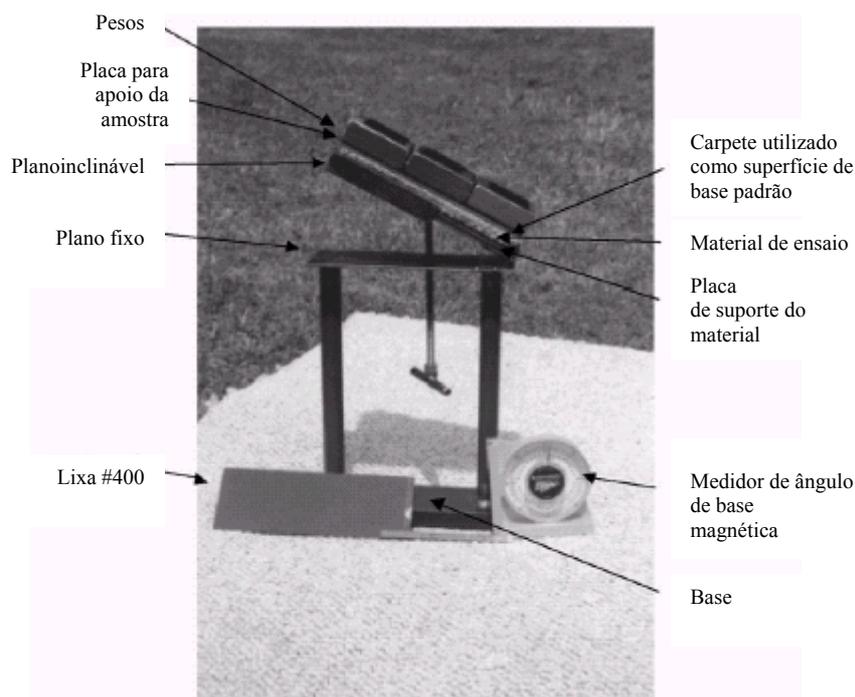


Figura 33 - Equipamento de rampa reportado por Najero (2003).

Aguiar (2003) apresenta o equipamento de rampa da PUC-Rio, composto por duas caixas de ensaio (Figura 34). A inferior tem dimensões de 120cm x 100cm x 5cm e a superior 100cm x 100cm x 5cm. Ambas as caixas podem ser

preenchidas com solo e são capazes de ensaiar amostras de grandes dimensões (100 x 100cm).

Os deslocamentos da caixa superior são monitorados empregando-se de uma régua metálica e os ângulos de rampa podem ser monitorados por dois tipos de medidores de ângulo, de base magnética e transferidor com pêndulo acoplado. As tensões de confinamento são aplicadas através de placas de concreto. A inclinação da rampa é feita por meio de um sistema de roldana e correntes fixo no centro do pórtico, ancorando-se a corrente do sistema na base da rampa.

Este equipamento sofreu algumas modificações, sendo aprimorados os sistemas de confinamento, deslocamento horizontal e fixação do geossintético (Rezende, 2005).

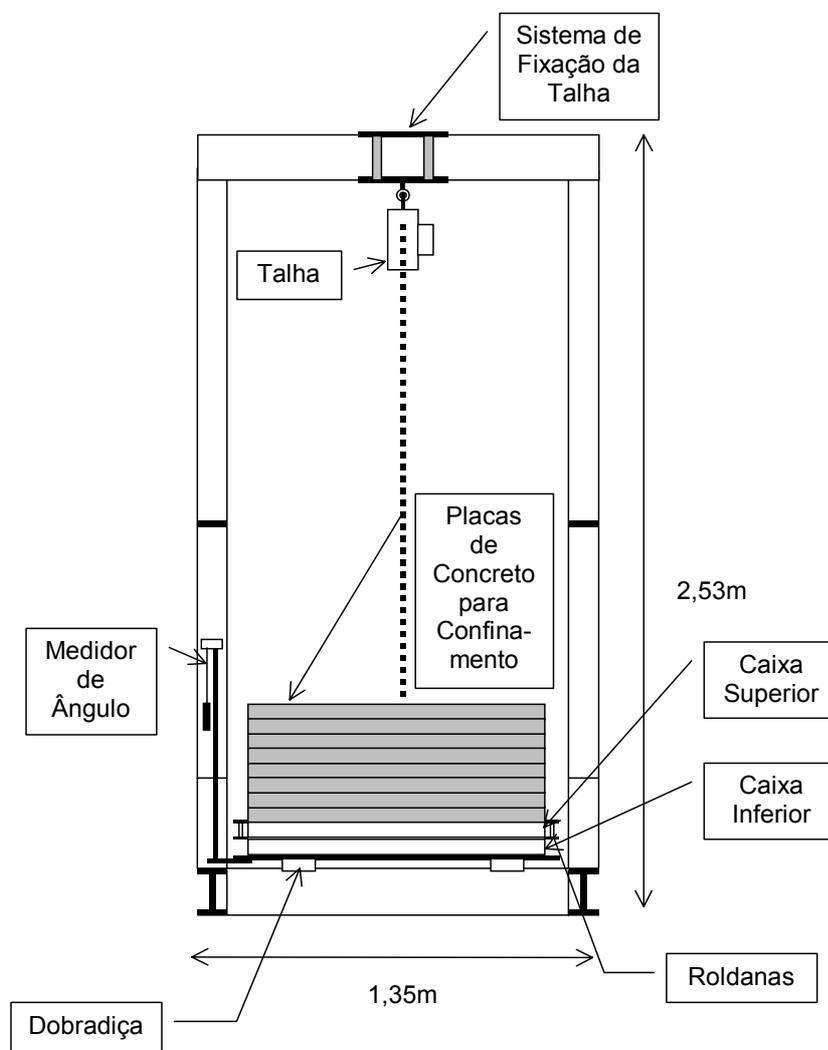


Figura 34 - Equipamento de rampa da PUC-Rio (Aguiar, 2003).

**3.2.3.****Fatores de influência dos ensaios de rampa associados ao equipamento***Influência da relação comprimento vs altura*

Melo *et al.* (2003) reportaram que, apesar de simples, o ensaio apresenta algumas limitações. A primeira é associada à variação da tensão normal com a inclinação da rampa e a segunda corresponde à forma de distribuição da tensão normal. Em geral, admite-se que a distribuição da tensão normal é uniforme ao longo da superfície de contato solo-geossintético, o que não ocorre na prática (Figura 22).

Palmeira *et al.* (2002) aproxima a distribuição das tensões a uma forma trapezoidal e seus valores máximo e mínimo são obtidos pelas seguintes relações:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = 4 - \frac{6x}{L} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma} = \frac{6x}{L} - 2 \quad (8)$$

$$\frac{x}{L} = \frac{\cos[\alpha + \tan^{-1}(h/L)]}{2\cos\alpha} \times [1 + (\frac{h}{L})^2]^{1/2} \quad (9)$$

onde:

$\sigma_{\max}$  = tensão normal máxima;

$\sigma_{\min}$  = tensão normal mínima;

$\sigma$  = tensão normal média;

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

$\alpha$  = 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 7 a 9 indicam que as dimensões da amostra influenciam significativamente nos valores da tensão máxima e mínima atuantes, sendo fatores importantes em equipamentos de pequenas dimensões.

Melo *et al.* (2003) realizaram uma série de simulações numéricas para analisar a influência do tamanho da amostra na distribuição de tensões. A Figura 35, baseada em Palmeira *et al.* (2002), apresenta a variação da tensão normal vs comprimento normalizado ( $L = 0,5, 2$  e  $10\text{m}$ ) para inclinações de  $15^\circ$  e  $25^\circ$ .

A comparação entre os resultados teóricos (Equações 7 a 9) e os resultados obtidos pela simulação numérica mostra uma boa concordância. Porém, deve-se ressaltar que, para comprimentos de interface igual a  $0,5\text{m}$ , a diferença entre valores das tensões máxima e mínima pode chegar a cinco vezes.

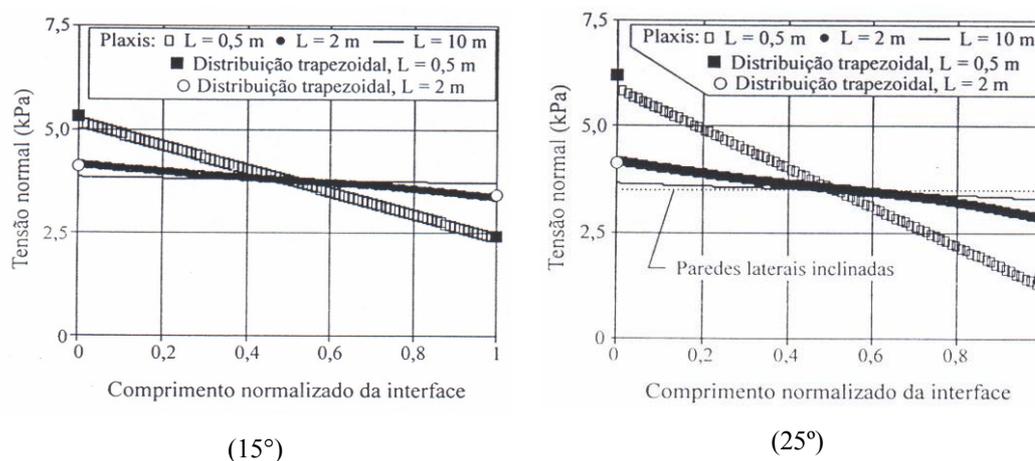


Figura 35 - Variação da tensão normal em função do comprimento normalizado (Melo *et al.*, 2003).

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

#### Influência das dimensões do equipamento

Estudos referentes à influência das dimensões das caixas de ensaios foram feitos por Izgin e Wasti (1998). Nos ensaios foram usados dois solos granulares

(areia e brita) e quatro tipos de geomembranas (duas com face lisa e duas com face rugosa). Três configurações de ensaios foram utilizadas (caixas quadradas com dimensões iguais a  $60 \times 60\text{mm}^2$ ,  $200 \times 200\text{mm}^2$  e  $300 \times 300\text{mm}^2$  com tensões normais variando de 5 a 50kPa. Os resultados são apresentados na Tabela 4, onde o valor entre parênteses é o ângulo de atrito de interface em graus e os valores entre colchetes são os valores dos ângulos (em graus) para os quais ocorreram o deslizamento para a menor e maior tensão normal usada no ensaio.

Tabela 4 - Ângulos de atrito de interface dos ensaios de rampa (Izgin e Wasti, 1998)

Solo	Área Contato (mm <sup>2</sup> )	Geomembrana			
		lisa 1 GL1	lisa 2 GL2	rugosa 1 GR1	rugosa 2 GR2
areia	60 x 60	(16,5) [18; 17]	(18,5) [20; 19]	(28) [29; 28]	(24) [26; 24]
	200 x 200	18,5 [21; 19]	~ ~	~ ~	26 [26; 26]
	300 x 300	19 [20; 19]	~ ~	~ ~	26 [26; 26]
	60 x 60	(23,5) [26; 23]	(24) [25; 24]	(30) [33; 30]	(27,5) [31; 28]
	200 x 200	(26,5) [26; 26]	~ ~	~ ~	(30,5) [32; 31]
	300 x 300	(25) [25; 25]	~ ~	~ ~	(31,5) [31; 32]

Os autores concluíram que a apresentação dos resultados em termos de curvas tensão normal x tensão cisalhante fornecem retas que passam aproximadamente pela origem, aonde poder-se-ia negligenciar a pequena adesão de 0,5kPa (Figura 36).

Izgin e Wasti (1998) também observaram que o aumento da área de contato provoca um aumento do ângulo de interface médio de cerca de três graus da menor para a maior área (Figura 37).

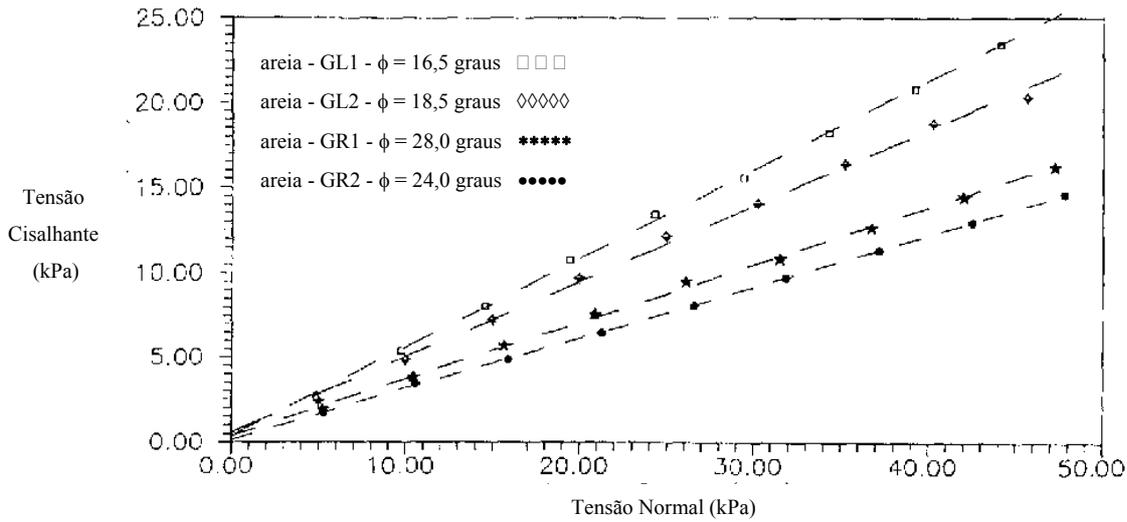


Figura 36 - Envoltórias de resistência dos ensaios de rampa para interfaces areia-geomembranas para uma área de contato de 60x60mm (Izgin e Wasti, 1998).

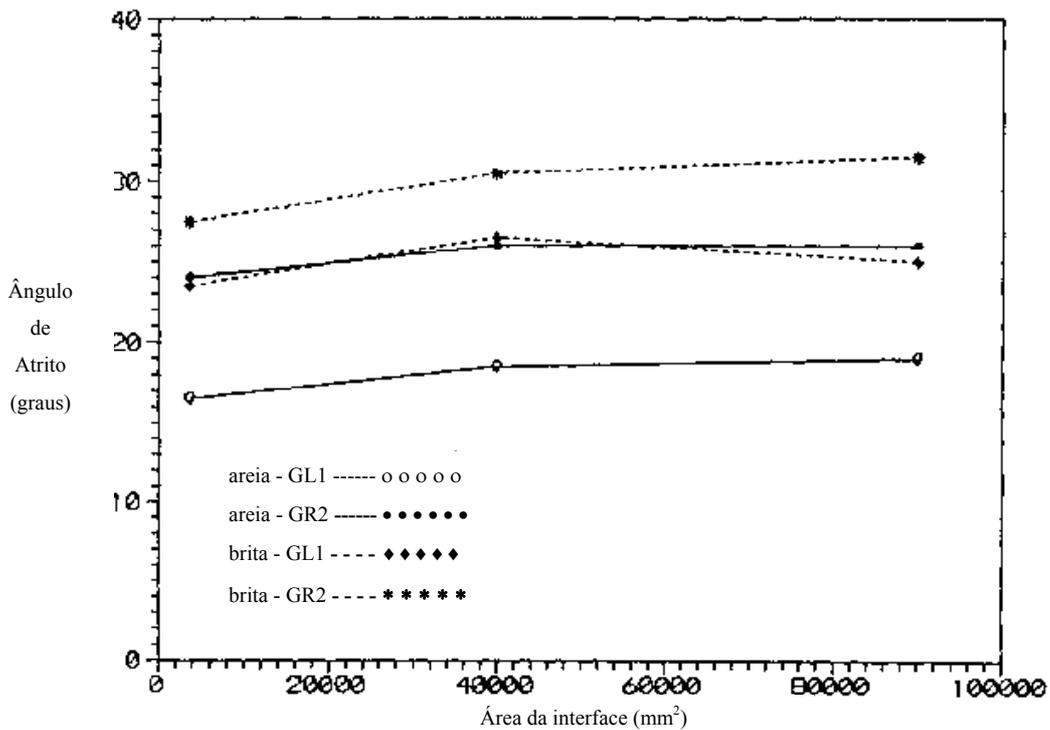


Figura 37 - Variação do ângulo de atrito de interface em função da variação da área de contato (Izgin e Wasti, 1998).

Influência da presença da base rígida

A norma ISO 12957-2 faculta duas metodologias diferentes de ensaio. Na primeira o geossintético pode estar apoiado sobre uma camada de solo, contido

em uma caixa inferior, e na segunda ele pode estar apoiado sobre uma base rígida. Da mesma forma que no ensaio de cisalhamento direto, a presença ou a ausência desta camada de solo pode influenciar os resultados de ensaios com geogrelhas.

Para averiguar esta condição de contorno, Lopes (2001) realizou uma série de ensaios com duas geogrelhas (uniaxial e biaxial) e as duas metodologias sugeridas pela norma: base rígida (1) e caixa inferior com solo (2). Os resultados são apresentados na Figura 38 em termos de deslocamento (mm) x ângulo de rampa (graus).

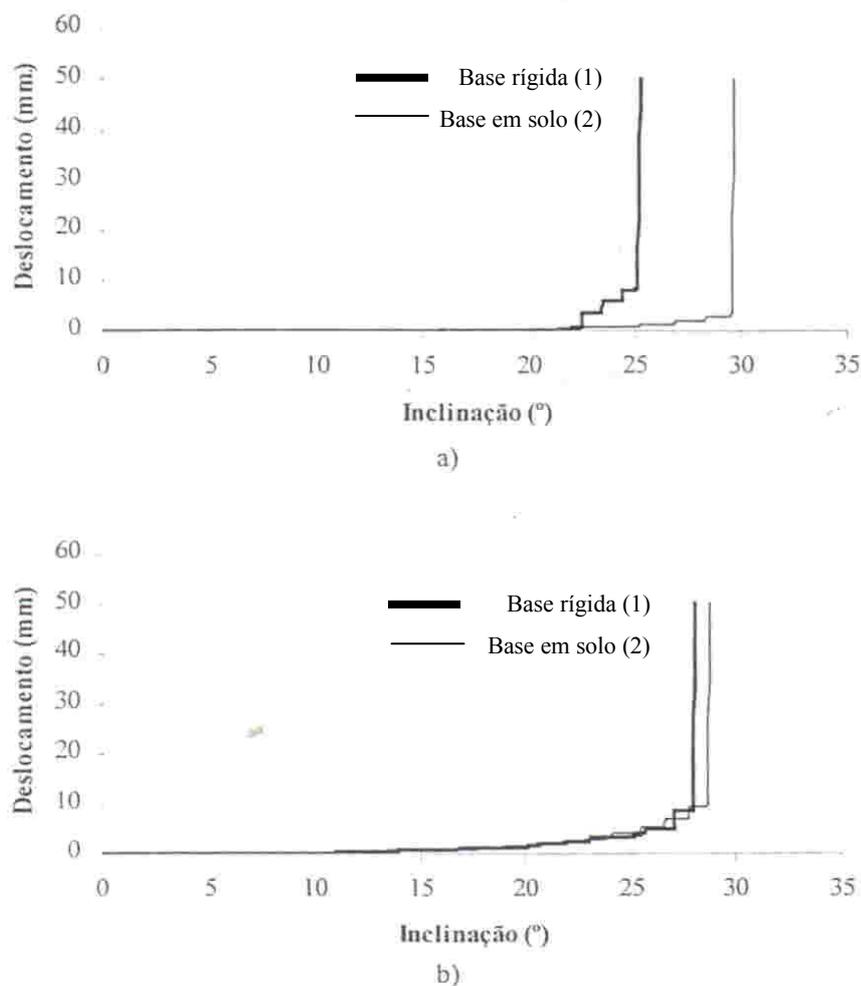


Figura 38 - Influência da presença de base rígida (1) e base solo (2) no ensaio de rampa com geogrelhas: (a) uniaxial e (b) biaxial (Lopes, 2001).

A resistência ao cisalhamento da interface solo-geogrelha, segundo Alfaro *et al.* (1995) é função de duas parcelas: atrito solo - geogrelha (membros longitudinais e transversais) e atrito solo-solo (entre as áreas abertas) (Figura 39). No caso (1), com base rígida, a parcela devida ao atrito nas áreas abertas é

reduzida, pois o atrito solo-material da base rígida (no caso uma placa de aço polida) é consideravelmente menor do que o atrito solo-solo. Observa-se que o efeito no resultado da interface com geogrelha uniaxial é considerável, provocando uma redução de cerca de 5° no ângulo de rampa. Já na interface com a geogrelha biaxial a redução foi menor, cerca de 2°. A diferença de comportamento está ligada à dimensão da área aberta das geogrelhas, sendo que a área aberta da geogrelha uniaxial é consideravelmente maior.

O uso da base rígida pode interferir nos resultados de interfaces solo-geogrelha por desprezar a parcela de atrito solo-solo. Sendo assim não se recomenda a utilização de uma base rígida neste caso.

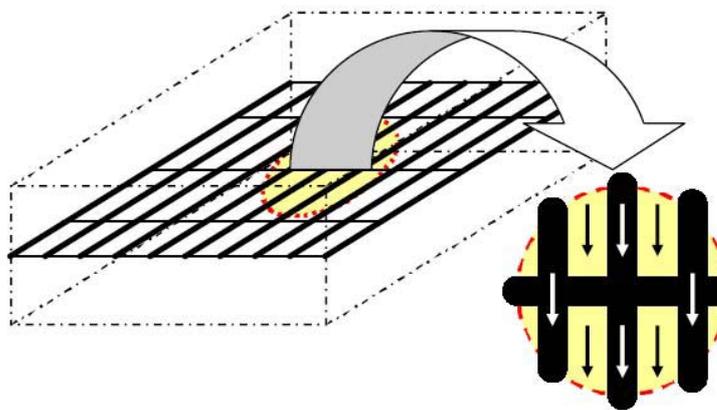


Figura 39 - Contribuição do atrito solo-solo (setas pretas) e atrito solo-geogrelha (setas brancas).

#### Influência da velocidade de basculamento da rampa

Yzgin e Wasti (1998) estudaram a influência da variação da velocidade de basculamento da rampa nos resultados dos ensaios. Os autores reportam que utilizaram velocidades de 1,00; 1,65 e 6,50°/s, não obtendo variação significativa no ângulo de ruptura de rampa obtido. Desta forma os autores sugerem uma velocidade de ensaio da ordem de 6°/s.

### 3.2.4. Fatores de influência dos ensaios de Rampa associados aos materiais

#### Tensão confinante

A influência da tensão confinante em ensaios de rampa foi estudada por vários pesquisadores (Waste e Özduzgun, 2001; Lopes, 2001; Aguiar, 2003; Rezende, 2005).

Waste e Özduzgun (2001) realizaram ensaios de cisalhamento direto e rampa utilizando o equipamento reportado por Izgin e Wasti (1998). Nos seus ensaios foram utilizadas duas geomembranas de PEAD (lisa e rugosa) e um geotêxtil não-tecido agulhado. Os resultados indicaram que o aumento da tensão confinante afeta muito mais os resultados das interfaces geotêxtil-geomembrana rugoso do que geotêxtil-geomembrana lisa (Figura 40). Também ficou demonstrado que a utilização de parâmetros de interface obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto sob ação de baixas tensões confinantes pode levar a erros contra a segurança.

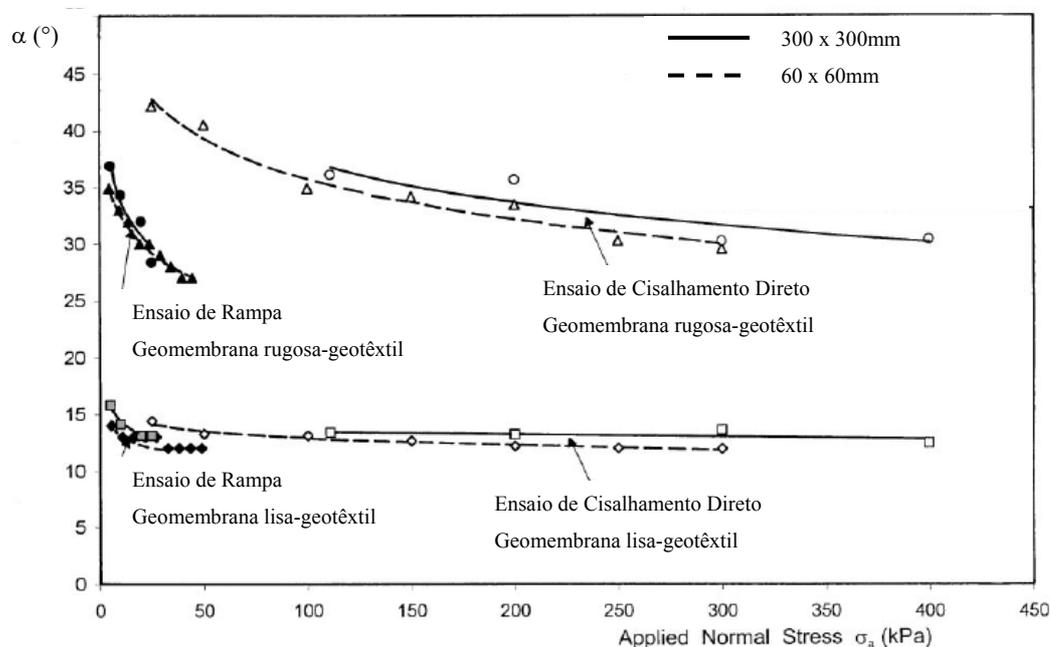


Figura 40 - Influência da tensão confinante no valor do ângulo de atrito de interface (Wasti e Özduzgun, 2001).

Lopes (2001) estudou a influência da tensão confinante em interfaces solo-geossintético. Neste estudos empregou-se o equipamento de ensaio de rampa da

Universidade do Porto (Figura 31), uma série de interfaces, três tensões de confinamento diferentes 5, 10 e 25kPa (tensão normal inicial) e um solo arenoso. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Observando os resultados da Tabela 5, concluí-se que as interfaces geomembrana lisa-areia e geogrelha uniaxial-areia apresentam a menor redução de ângulo de atrito, diferindo das interfaces geomembrana rugosa-areia e geogrelha biaxial-areia que se mostram mais suscetíveis à variação da tensão normal. No caso desta última interface, o comportamento pode ser explicado pela geometria da geogrelha e pela metodologia de ensaio que adotou uma camada de solo na caixa inferior.

Tabela 5 - Influência da tensão de confinamento no comportamento da interface solo-geossintético (Lopes, 2001)

Geossintético	Tensão de Confinamento			% de Redução (*)
	Inicial (kPa)			
	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

(\*) relação entre o ângulo de atrito de interface solo-geossintético para as tensões de confinamento iniciais de 5 e 25kPa.

Ainda em relação a estes ensaios, Lopes (2001) ressalta que, para ensaios de interface com movimento ao longo de um plano horizontal (arrancamento e cisalhamento direto), a resistência das interfaces solo-geossintético aumenta com a tensão de confinamento. Entretanto, para movimento ao longo de um plano inclinado, há uma redução da resistência das interfaces com o aumento da tensão de confinamento, em virtude do acréscimo simultâneo da tangencial instabilizadora.

Aguiar (2003) e Rezende (2005) também avaliaram a influência da tensão confinante utilizando o equipamento da PUC-Rio. Os autores utilizaram três solos (areia, silte e pedregulho) e três geossintéticos (geogrelha, geomembrana e geotêxtil não-tecido). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6. Observa-se, de uma forma geral, que em todas as interfaces ensaiadas há uma diminuição do ângulo de ruptura de rampa com o aumento da tensão confinante, sendo que a única exceção é a interface silte-geogrelha. Das interfaces apresentadas a que mais sofre com o efeito da tensão confinante é a areia fofa-geogrelha, com uma redução de 5° no ângulo de rampa, o que equivale a uma porcentagem de redução de 15,6%. Já a interface silte-geogrelha não sofreu qualquer influência.

Tabela 6 - Influência da tensão confinante nos ângulos de rampa (Aguiar, 2003 e Rezende, 2005)

Geossintéticos	Solo	$\sigma_n$ (kPa)						Redução em Graus	% de redução
		1,0	2,1	3,2	4,5	5,1	8,2		
		$\alpha$ (graus)							
Geogrelha	Ar 45	~	32	30	~	27	~	5	15,6
	Ar 90	~	33	33	~	30	~	3	9,1
	Si 100	43	~	~	44	~	43	0	0,0
	Br 35	~	37	34	~	34	~	3	8,1
Geomembrana	Ar 45	~	24	24	~	23	~	1	4,2
	Ar 90	~	26	25	~	24	~	2	7,7
	Si 100	33	~	~	32	~	31	2	7,7
	Br 35	~	32	31	~	29	~	3	9,4

Ar - areia; Si - silte; Br - brita; 35 - densidade relativa de 35%; 45 - densidade relativa de 45%; 90 - densidade relativa de 90%; 100 - grau de compactação de 100%.

### Tipo de geossintético

A estrutura dos geossintéticos condiciona os resultados dos ensaios de rampa. Desta forma, alguns pesquisadores procuraram avaliar a influência destes materiais na resistência da interface solo-geossintético.

Mello (2001) concluiu em seu trabalho que o ângulo de atrito da interface está diretamente ligado à rugosidade da interface do geossintético. O autor

realizou uma campanha de ensaios envolvendo interfaces areia-geomembrana e areia-geotêxtil (Figura 41).

Nos ensaios, os menores valores de ângulo de atrito observados foram para interfaces entre geomembranas lisas (PEAD e PVC) e areia. Os geossintéticos com superfícies mais rugosas, como o geotêxtil não-tecido e geomembrana-texturizada resultaram em valores maiores de ângulos de atrito da interface. A interface entre geotêxtil tecido e areia apresentou um valor intermediário do ângulo de atrito da interface.

Lopes (2001) realizou uma série de ensaios de rampa empregando uma areia e um grupo de geossintéticos (geomembranas lisas e rugosas, geotêxteis tecidos e não tecidos e geogrelhas uniaxial e biaxial). Nestes ensaios foi utilizada a configuração com base rígida, a qual consiste em assentar o geossintético sobre uma base rígida e lisa.

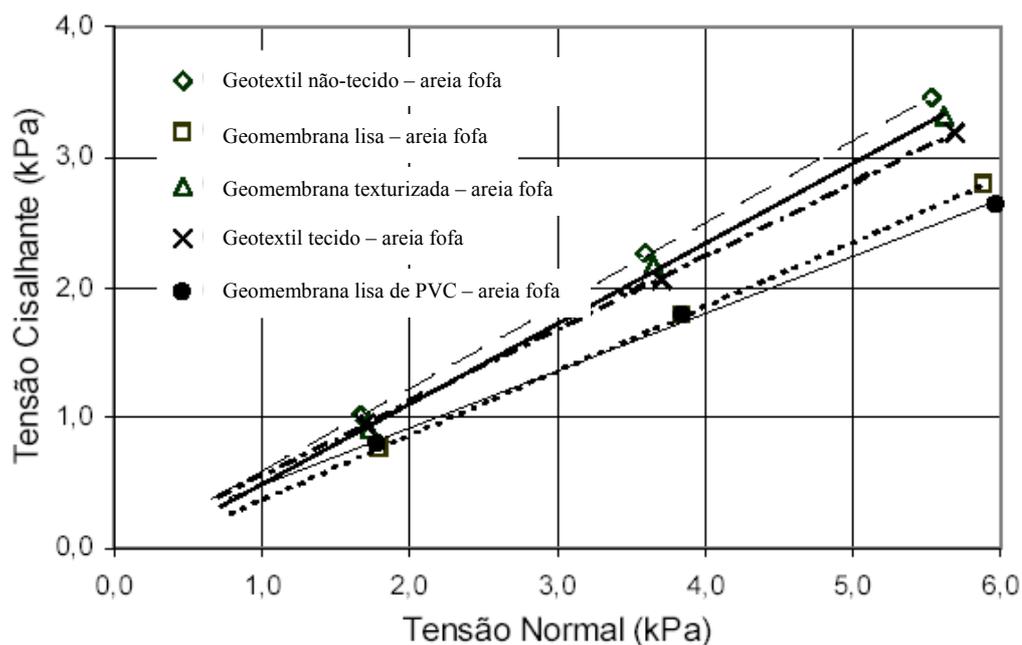


Figura 41 - Comparação entre as envoltórias de ruptura de diversas interfaces (Mello, 2001).

Lopes (2001) constatou que os geossintéticos com estrutura mais lisa (geomembrana lisa) são os que possuem os menores valores de resistência na interface. Em contrapartida, o geossintético com superfície lateral mais rugosa (geotêxtil não tecido agulhado) é o que apresenta o valor mais elevado de ângulo

de atrito. Entre os geotêxteis, verificou-se que o geotêxtil tecido é o que possui menor resistência na interface, em virtude da sua superfície ser formada por filamentos dispostos regularmente, tornando-a menos rugosa que a dos não tecidos. A resistência da interface solo-geomembrana rugosa é idêntica à das interfaces solo-geotêxtil, corroborando a utilização freqüente das geomembranas rugosas em taludes. No caso das geogrelhas, as biaxiais apresentam maior resistência que as uniaxiais.

Aguiar (2003) também realizou uma série de ensaios de rampa para avaliar a influência do tipo de geossintético na resistência da interface solo-geossintético. Em seus estudos utilizou um solo silto-argiloso, e três geossintéticos (uma geomembrana de PVC texturizada em uma das faces, um geotêxtil não tecido e uma geogrelha uniaxial). Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 7 e correspondem à adesão ( $a$ ) e ângulo de atrito da interface-solo-geossintético ( $\phi_{sg}$ ) e ainda as eficiências em termos de coesão ( $E_c$ ) e ângulo de atrito ( $E_\phi$ ). Da mesma forma que Mello (2001) e Lopes (2001), as superfícies que apresentam maior rugosidade são as mais resistentes.

Tabela 7 - Influência do tipo de geossintético nos resultados dos ensaios de rampa (Aguiar, 2003)

Interface	$a$ (kPa)	$\phi_{sg}$ (graus)	$E_c$	$E_\phi$
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	0,68	0,81

A influência do tipo de geossintético na resistência da interface solo-geossintético também foi analisada por Rezende (2005). A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos pela autora, onde se representa a densidade relativa do solo (45 e 90%),  $\Delta l_{máx}$  é o deslocamento máximo da caixa na ruptura,  $\alpha$  é o ângulo de rampa na ruptura,  $\sigma$  é a tensão normal e  $\tau$  é a tensão cisalhante.

A autora conclui que para uma mesma tensão confinante e diferentes densidades relativas, há uma diferença considerável entre o ângulo de rampa na ruptura quando se muda o geossintético ensaiado. A explicação para isso está relacionada a estrutura do geossintético. A geomembrana apresenta sua face superior lisa não propiciando o embricamento dos grãos do solo com o material,

diferentemente do que ocorre com a geogrelha. Este geossintético apresenta uma área aberta elevada propiciando um elevado contato solo-solo, além de apresentar uma superfície muito mais rugosa. É interessante ressaltar que a resistência da interface solo-geogrelha depende das duas parcelas, como demonstrado na Figura 39.

Tabela 8 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para uma tensão confinante de 3,2kPa (Rezende, 2005)

Geossintético	Dr (%)	$\Delta l_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\alpha$ (graus)	Tensão na Ruptura		
				$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma$
Geogrelha	45	7,00	30	2,8	1,8	0,62
	90	2,00	33	2,8	1,9	0,70
Geomembrana	45	4,50	24	3,0	1,4	0,48
	90	0,75	25	3,7	1,8	0,49

De uma forma geral os autores concordam que a rugosidade da interface é um fator de influência significativa no comportamento da resistência da interface solo-geossintético.

#### Tipo de solo

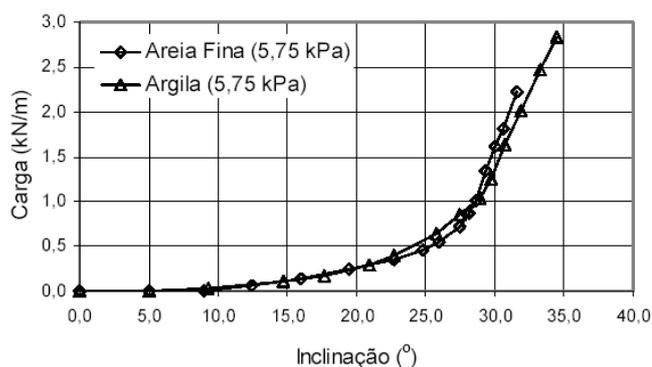
Lopes (2001) analisou a influência do tipo de solo empregando duas areias com curvas granulométricas diferentes e uma série de interfaces solo-geossintético (Tabela 9).

Constatou-se que o aumento da granulometria do solo influenciou mais nos resultados dos geossintéticos com superfície lisa (geomembrana lisa e geotêxtil tecido) devido ao aumento da superfície de contato entre o solo e o geossintético. Seu efeito é menos evidente nos geossintéticos com superfície rugosa, em virtude da rugosidade, por si só, aumentar a superfície de contato. No caso das geogrelhas, o aumento da resistência é mais marcante na biaxial, pelo fato de possuir uma área aberta menor. Porém, segundo a autora, independentemente da granulometria da areia, as interfaces com geomembrana lisa e geogrelha uniaxial continuam sendo as menos resistentes.

Tabela 9 - Influência da granulometria do solo nos resultados dos ensaios de rampa (Lopes, 2001)

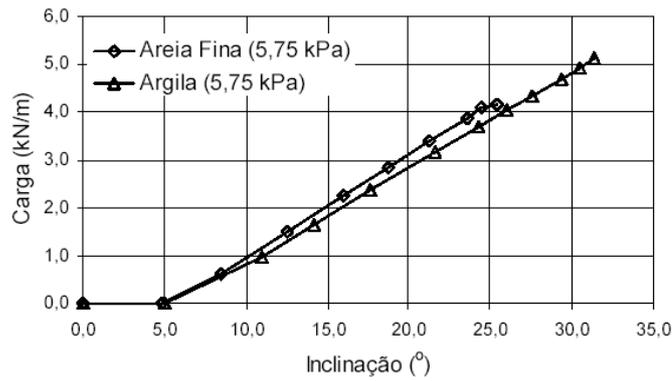
Geossintético	Areia 1	Areia 2	% de aumento
	( $D_{\text{máx}}=2,00\text{mm}$ )	( $D_{\text{máx}}=9,54\text{mm}$ )	
Ângulo de atrito na interface (°)			
Geomembrana lisa	21,4	24,5	14,6
Geomembrana rugosa	31,2	32,9	5,50
Geotêxtil tecido	30,5	33,6	10,2
Geotêxtil não tecido termossoldado	31,7	32,3	2,10
Geotêxtil não tecido agulhado	32,2	32,9	2,10
Geogrelha uniaxial	27,6	29,5	6,60
Geogrelha biaxial	30,1	33,0	9,50

Mello (2001) executou ensaios de rampa em um solo arenoso fino e um argiloso para avaliar a influência do tipo de solo na resistência de interfaces solo-geossintético. Nos seus estudos utilizou geotêxteis não-tecidos, geomembranas lisas e geomembranas rugosas. Nos ensaios foram mensuradas as cargas desenvolvidas nos geossintéticos por meio de uma célula de carga. O autor observou que as cargas medidas foram semelhantes para os dois solos, ocorrendo apenas, diferenças na carga final corresponde à ruptura da interface (Figura 42).

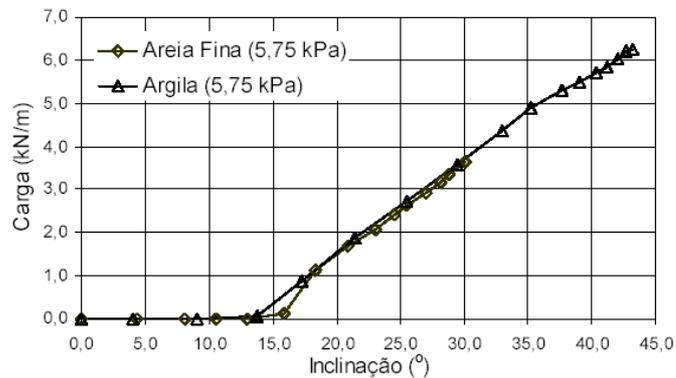


(a)

Figura 42 - Comparação das cargas com dois tipos de solo para as interfaces: (a) geotêxtil não-tecido, (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001).



(b)

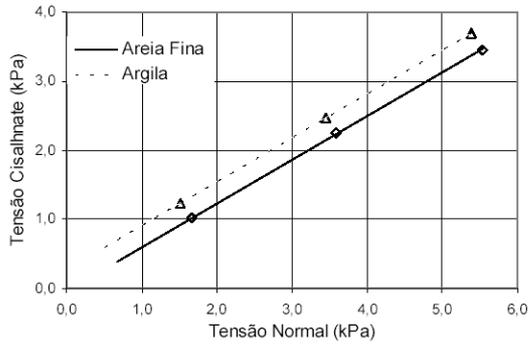


(c)

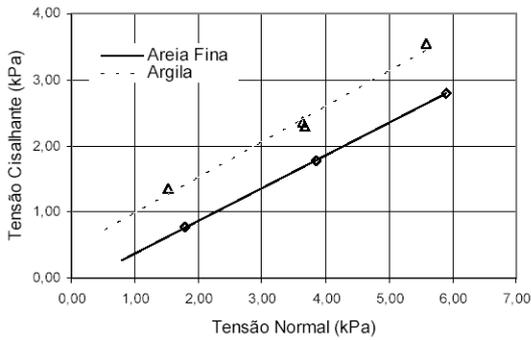
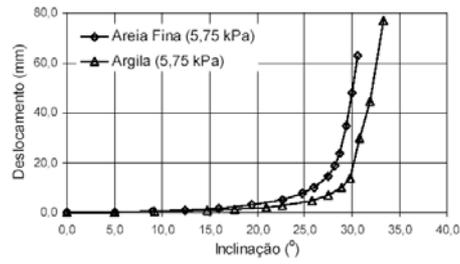
Figura 42 (cont.) - Comparação das cargas com dois tipos de solo para as interfaces: (a) geotêxtil não-tecido, (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001).

Para o geotêxtil não-tecido, a variação da carga ocorre de forma não-linear ao contrário das interfaces com geomembrana, que apresentam relação: carga vs inclinação linear.

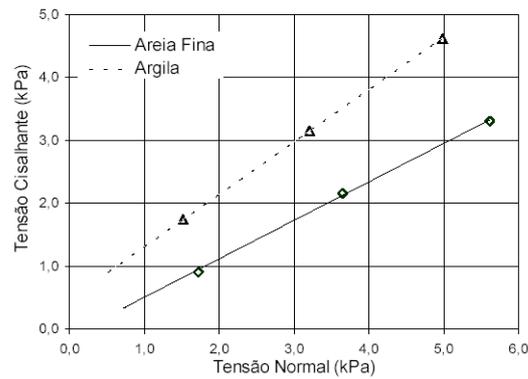
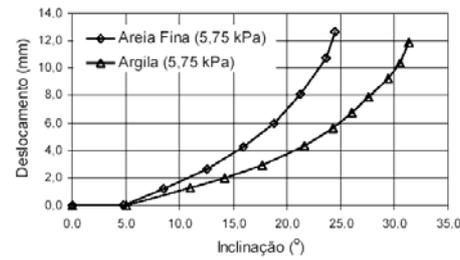
Mello (2001) também observou que os ângulos de atrito de interface são maiores para o solo argiloso (Figura 43). Uma explicação para isso pode estar no fato de que a areia foi preparada com compactação mediana ( $D_r=57\%$ ), enquanto que a argila foi compactada com a energia equivalente a do Proctor Normal.



(a)



(b)



(c)

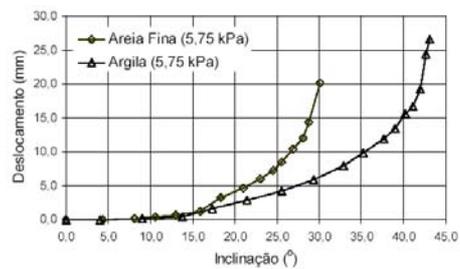


Figura 43 - Envolvórias de ruptura e variação dos deslocamentos para os dois tipos de solo e os geossintéticos: (a) geotêxtil não-tecido; (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001).

### 3.3. Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é realizado em equipamentos tradicionais modificados ou em equipamentos especialmente construídos com caixas de ensaio maiores a fim de se evitar ou minimizar o efeito de escala.

Dois tipos de montagem são normalmente empregados (Figura 44). Na primeira situação o geossintético é assentado sobre uma camada de solo e na segunda ele é colocado sobre um suporte rígido. Durante o ensaio são medidos a força horizontal necessária para deslocar a parte superior da caixa de cisalhamento e os deslocamentos vertical e horizontal.

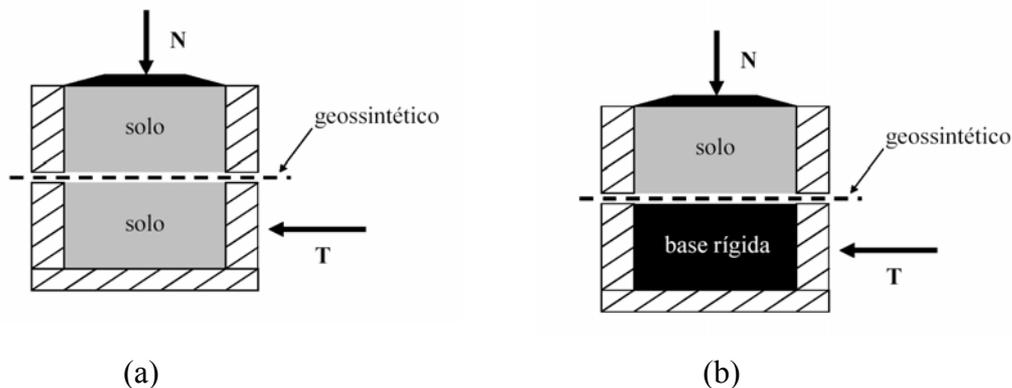


Figura 44 - Ensaio de cisalhamento direto: (a) geossintético entre duas camadas de solo e (b) geossintético colado em base rígida.

No ensaio convencional, a base rígida é utilizada na maioria dos testes 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 de duas caixas com solo, 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 (Sieira, 2003).

No caso de geogrelhas recomenda-se a configuração de duas caixas, uma vez que, este tipo de geossintético apresenta elevadas porcentagens de áreas abertas e a resistência de interface solo-geogrelha é composta pelas parcelas de atrito ao longo do geossintético e atrito solo-solo entre as aberturas (Figura 39).

Os parâmetros de resistência (adesão  $a$  e ângulo de atrito solo-geossintético  $\phi_{sg}$ ) são obtidos da envoltória de resistência, resultante de uma série de ensaios, sob a ação de diferentes tensões normais (Figura 12).

O ensaio de cisalhamento direto não oferece grande dificuldade de interpretação. Além da execução simples, permite várias configurações de ensaio. No entanto, seus resultados podem ser influenciados por fatores, tais como:

posição relativa solo-geossintético, dimensões do equipamento, espessura da camada de solo, rugosidade do plano rígido e sistema para aplicação da pressão vertical.

### 3.3.1. Métodos para ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto são os mais utilizados devido à sua simplicidade. Na literatura são reportadas diferentes configurações de caixas (dimensões) e formas de fixação com o objetivo de facilitar as leituras das medidas de força e deslocamentos. Ingold (1990) apresenta algumas destas configurações esquematizadas na Figura 45:

(i) *Caixa de Cisalhamento Fixa*: neste ensaio, o geotêxtil (ou geomembrana) é montado sobre um bloco rígido, o qual é colocado na parte inferior da caixa. A metade superior é preenchida com solo, que é cisalhado sobre a geomembrana ou geotêxtil;

(ii) *Caixa de Cisalhamento Parcialmente Fixa*: o material sintético é disposto sobre o solo que preenche a metade inferior da caixa. Uma das extremidades do geotêxtil ou geomembrana é fixada na caixa e o solo contido na metade superior é cisalhado sobre a interface;

(iii) *Caixa de Cisalhamento Livre*: Este ensaio é similar à caixa parcialmente fixa, entretanto o material sintético está livre de ambos os lados;

(iv) *Caixa de Cisalhamento de Base Larga*: Similar à caixa fixa, entretanto a metade inferior da caixa tem uma dimensão plana mais larga que a metade superior contendo o solo. Apresenta como vantagem principal uma área de contato constante entre o solo e o material sintético;

(v) *Caixa de Cisalhamento de Base Central*: Apresenta princípio semelhante à caixa de base larga, contudo, a força de atrito mobilizada no geotêxtil ou

geomembrana é medida sobre uma área plana menor que a área plana do solo na parte superior da caixa de cisalhamento.

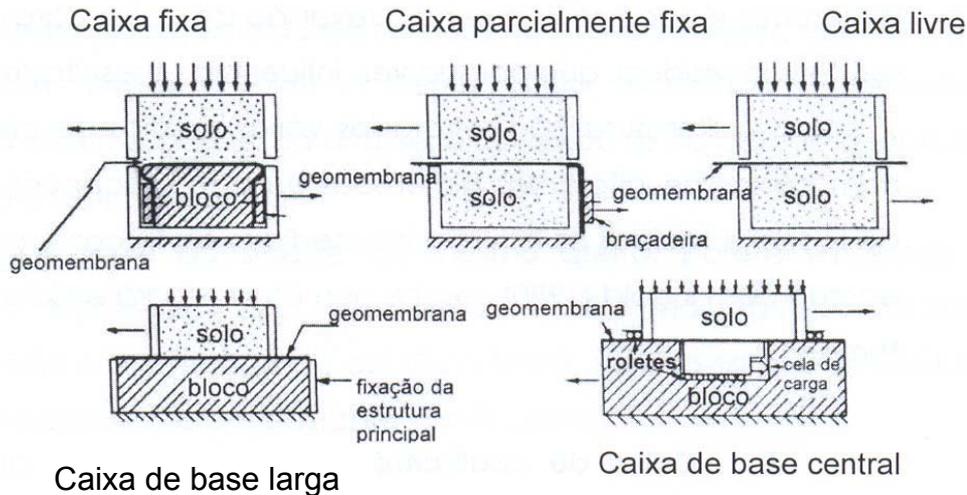


Figura 45 - Possíveis configurações do ensaio de cisalhamento direto (Ingold, 1990).

### 3.3.2. Equipamentos de ensaio de Cisalhamento Direto

Na bibliografia estão reportados equipamentos com área de contato solo-geossintético de até  $1,0\text{m}^2$  e volume interno equivalente a  $1\text{m}^3$ . Variam, também, quanto ao arranjo das caixas de ensaio, sistemas de aplicação de força normal e cisalhante e sistema de leitura de grandezas.

O equipamento reportado por Koutsourais *et al.* (1991) pertence ao Georgia Institute of Technology (Figura 46). Ele consiste de um par de caixas de ensaio com dimensões internas de  $305 \times 305 \times 51\text{mm}$ , onde a caixa inferior é fixada a estrutura principal do equipamento e a superior, móvel, recebe os esforços cisalhantes.

O sistema de aplicação de força horizontal é do tipo pneumático e está ligado à caixa superior através de um pistão acoplado a uma célula de carga. A velocidade de deformação do pistão pode ser ajustada pra variar de  $0,0025$  a  $0,25\text{mm/min}$ . A força vertical é aplicada perpendicularmente empregando-se de um sistema pneumático acoplado a uma célula de carga e move-se junto com a caixa superior de cisalhamento durante o ensaio. O limite de aplicação de força normal do sistema é desconhecido, mas estão reportadas tensões confinantes de até  $62\text{kPa}$ .

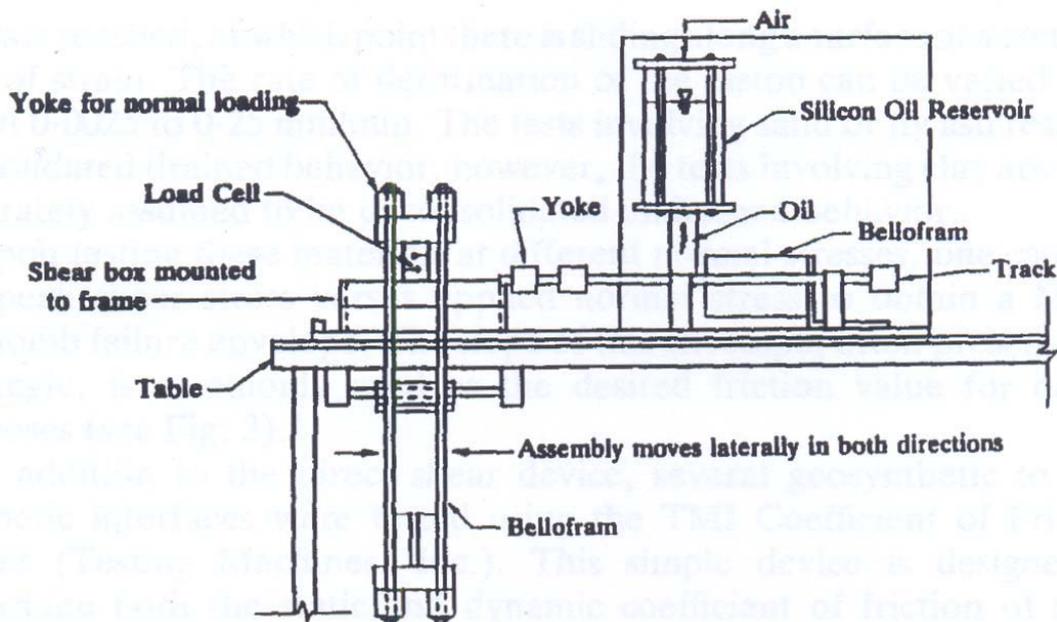


Figura 46 - Equipamento reportado por Koutsourais *et al.* (1991).

Dembicki *et al.* (1990) reportam o equipamento da Faculty of Geotechnics of de Technical University of Gdansk (Polônia). As Figuras 47 e 48 apresentam uma vista geral e alguns detalhes do equipamento. Este equipamento apresenta como particularidade a capacidade de realizar ensaios de cisalhamento direto convencional e arrancamento.

Neste equipamento as caixas de ensaio são retangulares e apresentam dimensões internas de 400mm de comprimento por 250mm de largura, não sendo informada sua profundidade (Figura 48c). A caixa superior é fixada a estrutura, sendo impedido seu deslocamento horizontal, e a inferior móvel, deslizando sobre roldanas com o objetivo de diminuir o atrito.

A força de confinamento é aplicada através de um macaco hidráulico associado a uma tampa rígida. As cargas aplicadas são mensuradas através de uma célula de carga conforme a Figura 48b. Já o sistema de aplicação de força cisalhante consiste de um sistema de engrenagens acoplado a um motor que permite aplicar pequenos deslocamentos.

Não são reportadas as formas de mensuração das grandezas envolvidas durante o ensaio.

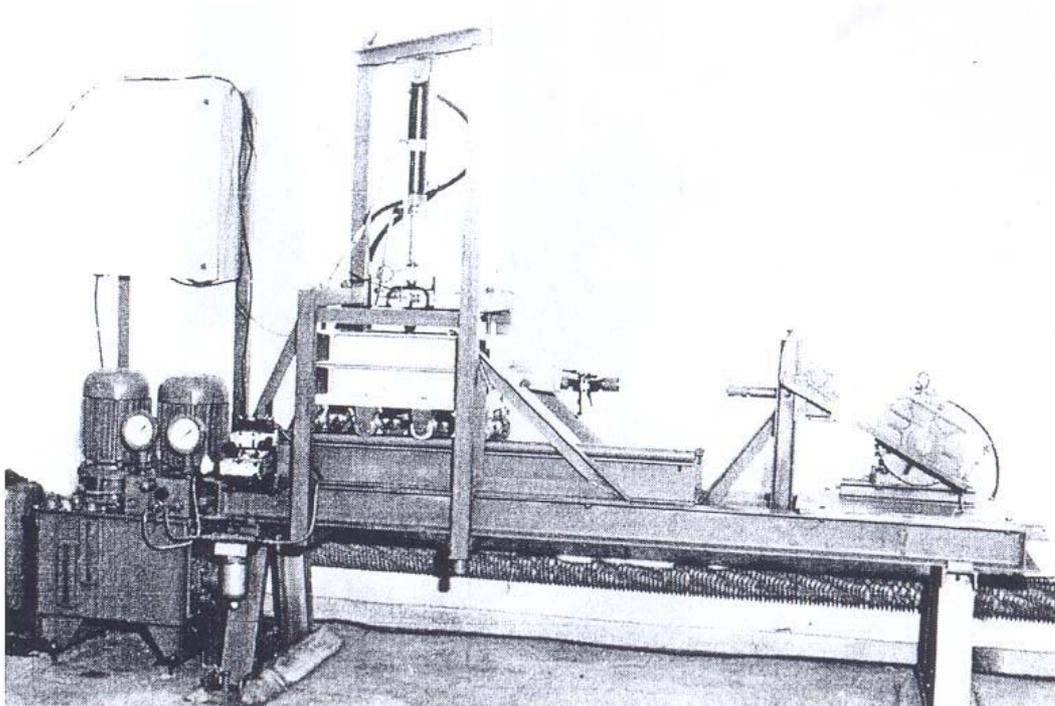


Figura 47 - Equipamento reportado por Dembicki *et al.* (1991) - Vista Lateral.

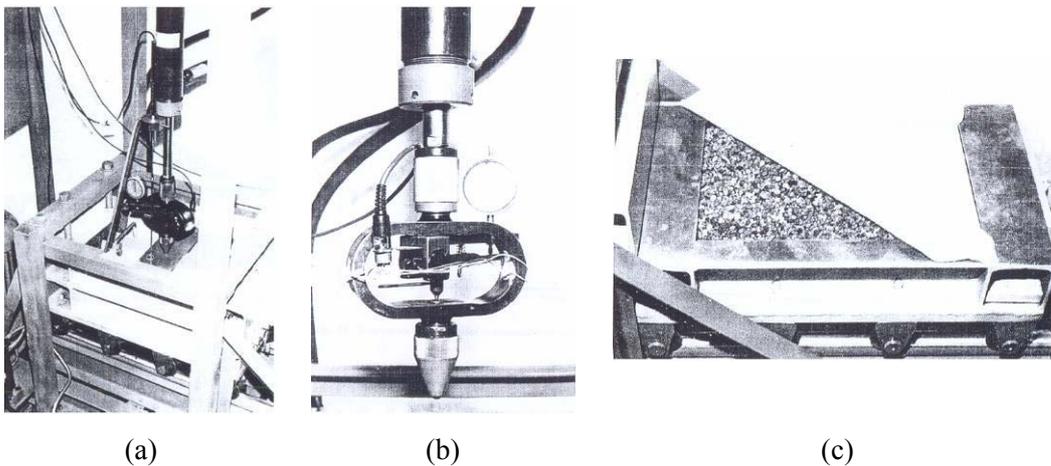


Figura 48 - Equipamento reportado por Dembicki *et al.* (1991). (a) sistema de aplicação de tensão normal; (b) detalhe do sistema de aplicação normal e (c) caixa de ensaio.

O equipamento reportado por Gomes (1993) foi desenvolvido no ITA e é constituído por um conjunto de caixas de ensaio com dimensões internas de 400x250x100mm, montadas em uma estrutura de sustentação e associadas a uma prensa de ensaio convencional (Figura 49).

A caixa superior é selada por uma tampa rígida, dotada de rótula de articulação para a transmissão das cargas verticais. A caixa inferior está apoiada

em um sistema de trilhos e rolamentos com a finalidade de reduzir o atrito com a base. O espaçamento entre as caixas pode ser ajustado.

O sistema de aplicação de força normal é composto por uma viga I de 4 polegadas (10,16cm) com 4m de comprimento, acoplada à estrutura do equipamento. Este sistema de confinamento possui em cada uma de suas extremidades sistemas articulados que atuam como elementos de suporte para conjuntos de pesos, possibilitando aplicações de cargas normais até 30 kN.

O deslocamento relativo entre as caixas é induzido por um eixo conectado à metade inferior e a um anel dinamométrico para a quantificação das cargas aplicadas, que, por sua vez, está conectado ao parafuso de acionamento de uma prensa convencional de cisalhamento direto trabalhando, entretanto, em sentido inverso ao usual. Deslocamentos horizontais e verticais do sistema são obtidos através de extensômetros.



(a) Vista Lateral.

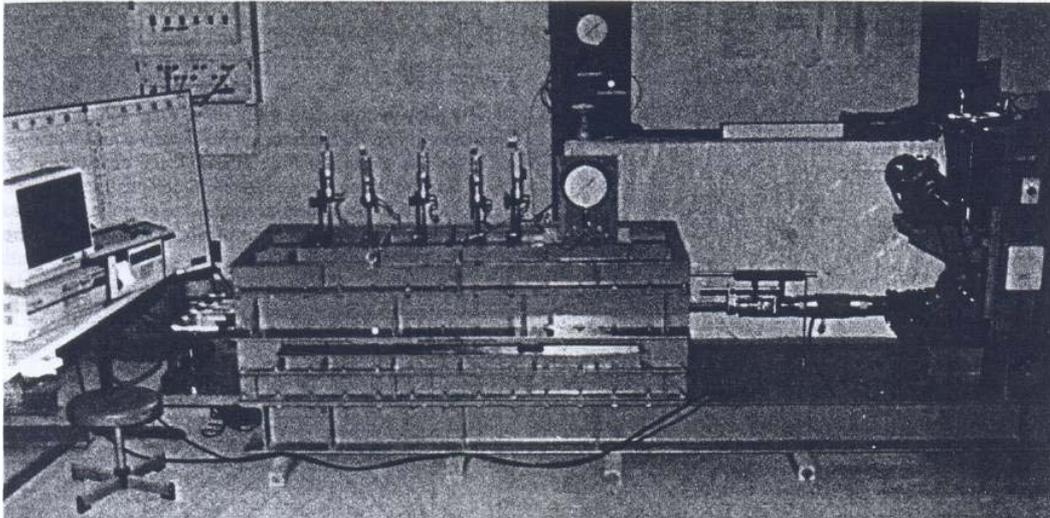


(b) Vista Frontal.

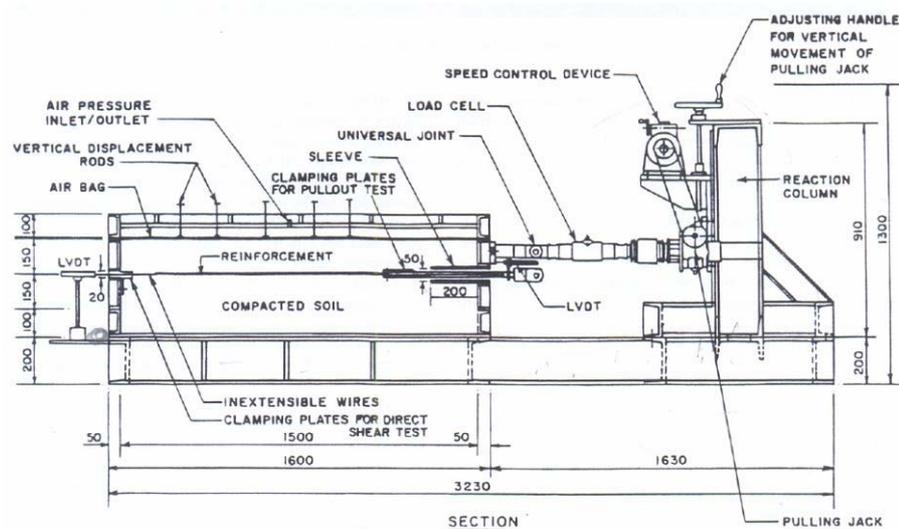
Figura 49 - Equipamento reportado por Gomes (1993).

Alfaro *et al.* (1995) reporta um equipamento capaz de realizar ensaios de arrancamento e cisalhamento direto convencional (Figura 50). No caso do ensaio de cisalhamento direto a área útil de ensaio é de 1,50m de comprimento por 0,60m de largura. A altura total do corpo de prova é de 0,40m. A caixa inferior é fixa e a superior móvel.

O sistema de aplicação de força normal é feito por bolsa de ar e o de força cisalhante por um motor elétrico acoplado a uma caixa de redução. A instrumentação é composta por LVDT's e células de carga conectadas a um sistema de aquisição de dados.



(a)



(b)

Figura 50 - Equipamento reportado por Alfaro *et al.* (1995). (a) Vista lateral e (b) detalhes do equipamento.

O equipamento da Hong Kong University of Science & Technology é reportado por Lee e Manjunath (2000) e apresentado na Figura 51. Ele apresenta caixas de cisalhamento com dimensões internas de 300 x 300mm, superior, e 420

x 300mm, inferior. A caixa inferior pode conter solo ou ser substituída por uma base rígida.

As forças normais e cisalhantes são aplicadas através de um sistema hidráulico. Quatro células de carga mensuram a força normal e duas mensuram a força cisalhante. Os deslocamentos horizontais e verticais são mensurados através de LVDT. Todos os instrumentos estão conectados a um sistema de aquisição de dados acoplado a um microcomputador.

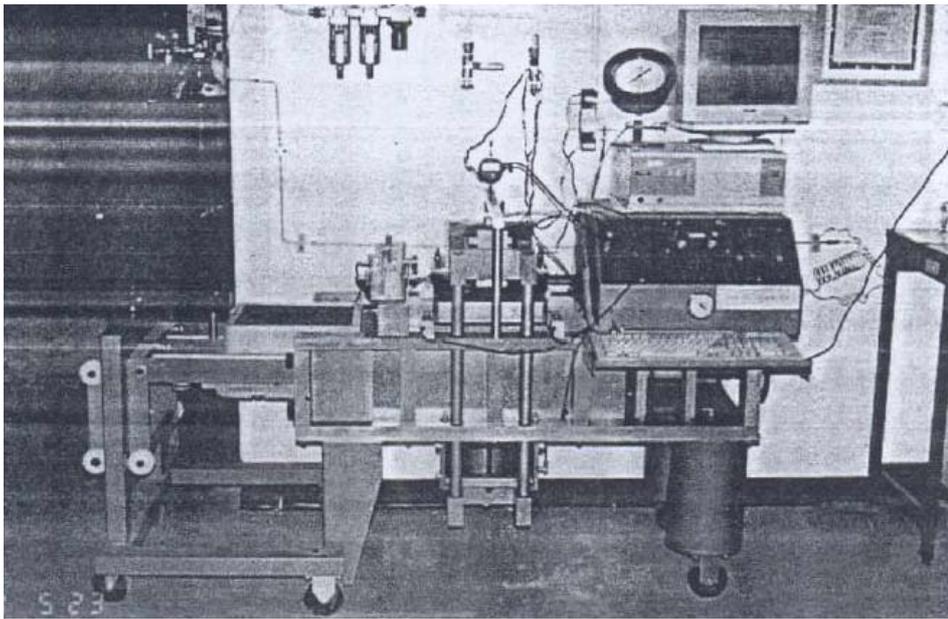


Figura 51 - Equipamento reportado por Lee e Manjunath (2000).

O equipamento reportado por Sieira (2003) pertence ao CEDEX de Madri e é denominado de CIS<sub>100</sub>(Figuras 52 e 53). Este equipamento é capaz de ensaiar corpos de prova cúbicos com cerca de 1m de aresta e executar ensaios de cisalhamento direto, cisalhamento direto com reforço inclinado e arrancamento.

A caixa de cisalhamento é formada por duas metades com seção quadrada com 1m de lado e altura útil de 0,6m. As tensões normais e cisalhantes são aplicadas através de dois macacos hidráulicos servo-controlados associados a células de cargas e transdutores de deslocamento. A capacidade dos macacos é de 1MPa e o curso máximo do macaco de cisalhamento é de 300mm, sendo este, o deslocamento máximo aplicado a caixa inferior.

A aquisição dos dados é feita de forma automática através de um sistema de aquisição de dados.

O procedimento de ensaio é análogo ao do ensaio convencional de pequena escala, onde a caixa superior é mantida imóvel e a caixa inferior se desloca.

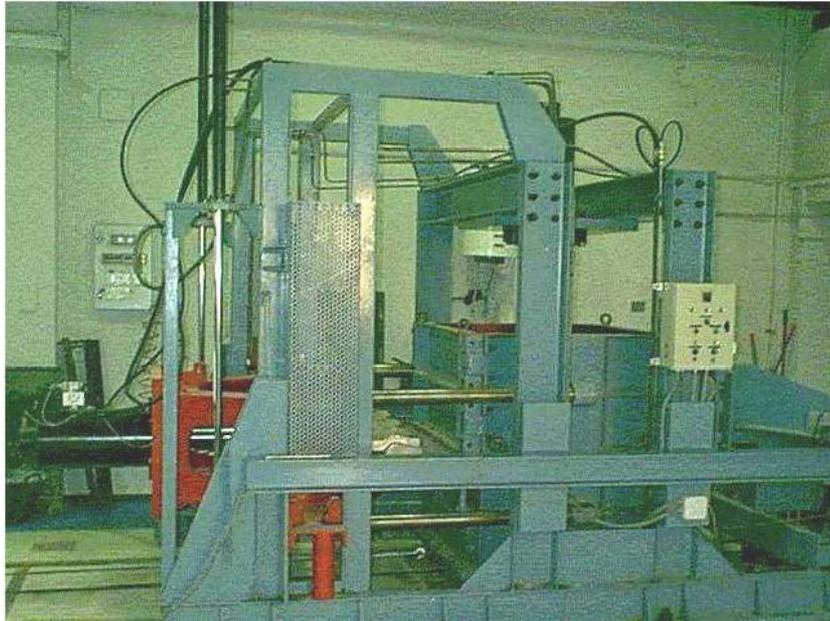
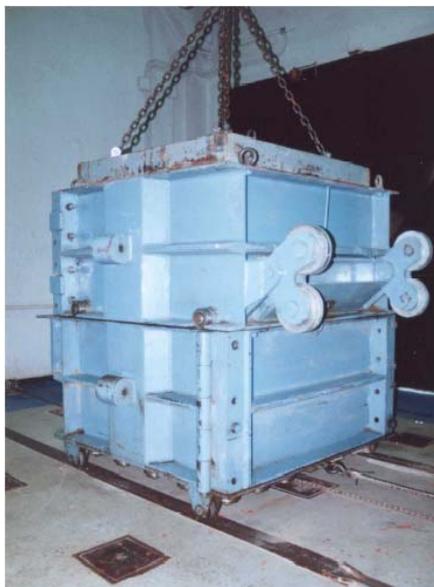


Figura 52 - Equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões - CEDEX-Madri (Sieira, 2003).



(a)



(b)



(c)

Figura 53 - (a) Caixas de ensaio do equipamento do CEDEX-Madri, (b) sistemas de aplicação de tensão normal e (c) sistema de aplicação de tensão cisalhante (Sieira, 2003).

Além dos equipamentos anteriormente descritos, Gomes (1993) resumiu diferentes arranjos experimentais e variações de equipamentos de ensaio de cisalhamento direto convencional. As características destes equipamentos são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Ensaio de cisalhamento direto (modificado de Gomes, 1993)

Referência	Caixas de Ensaio						Velocidad e do ensaio (mm/min)	Tensões do ensaio (kPa)	Classificação segundo Ingold (1990)
	Superior			Inferior					
	c	l	h	c	l	h			
Collios (1981)	40	25	10	40	25	10	0,10	25-75	CPF
Ingold (1982)	30	30	nd.	30	30	nd.	1,00	25-200	CPF
Myles (1982)	30	30	12	35	40	nd.	nd.	10-180	CPF
Martin <i>et al.</i> (1984)	10	10	3	nd.	nd.	nd.	0,13	14-100	CF
Saxena <i>et al.</i> (1985)	26	26	19	31	26	8	0,76	69-207	CPF/CBL
Degoutte <i>et al.</i> (1986)	30	30	15	30	30	15	0,20	200-1200	CPF
Miyamori <i>et al.</i> (1986)	32	32	12	48	41	nd.	0,50	50-200	CPF
Williams <i>et al.</i> (1987)	31	31	5	31	31	5	0,30	<100	CPF
Lafleur <i>et al.</i> (1987)	15	15	5	15	15	5	0,02	50-150	CPF
Fourier <i>et al.</i> (1987)	6	6	2	6	6	2	0,01-0,9	50-350	CPF
Chen <i>et al.</i> (1990)	15	15	nd.	19	17	nd.	nd.	25-196	CPF/CBL
Garbulewski (1991)	6/	6/							
	10/	10/	nd.	nd.	nd.	nd.	0,01-1,00	18-80	CF
	12	12							

c = comprimento da caixa (cm), l = largura da caixa (cm) e h = altura da caixa (cm); D = diâmetro (cm); CF = caixa fixa; CPF = caixa parcialmente fixa; CL = caixa livre; CBL = caixa de base larga e CBC = caixa de base central.

Sobre este conjunto de equipamentos, o autor agrupou os seguintes aspectos relevantes:

- (i) dimensões das caixas de cisalhamento: as caixas de ensaio apresentam dimensões que vão desde 6x6cm (ensaio convencional) até cerca de 30x30cm. Em geral ambas as caixas tem dimensões iguais. Em alguns equipamentos a caixa superior é menor que a inferior, permitindo elevadas deformações sem variação da área de cisalhamento;
- (ii) espessura das camadas de solo: verifica-se que a espessura das camadas de solo é variável, tendo sido adotados valores iguais ou não para os solos de cobertura e de suporte;
- (iii) dispositivos de aplicação variados e incluem: mecanismos hidráulicos, pneumáticos, tipo alavanca, etc. A faixa de aplicação de tensão normal varia de 5 a 1200kPa;
- (iv) sistema de ancoragem de geossintético são diversos;
- (v) variação da velocidade de cisalhamento ampla, de 0,01mm/min até 3mm/min.

Observando a lista de equipamentos reportados por Gomes (2003), constata-se que ela é caracterizada por apresentar equipamentos de pequeno porte (área de contato menor que 0,1m<sup>2</sup>).

Mas independente do porte, pequeno ou grande, os ensaios de cisalhamento direto sempre são compostos por caixas de ensaios, sistema de aplicação de força (normal e cisalhante) e sistema de medição. Porém, são influenciados por uma série de fatores. Estes fatores podem ser de dois tipos: associados ao equipamento e aos materiais de ensaio.

### 3.3.3.

#### **Fatores de influência dos ensaios de Cisalhamento Direto associados ao equipamento**

##### *Influência da Posição Relativa*

A influência da posição relativa foi estudada por Ingold (1984), Saez (1997) e Nakamura *et al.* (1999). Ingold (1984) realizou uma série de ensaios de cisalhamento direto utilizando uma areia e três tipos de geossintéticos (geotêxtil não-tecido, geotêxtil tecido agulhado e geogrelha). Nestes ensaios, foram empregadas caixas de cisalhamento com dimensões 300mm x 300mm, com duas condições diferentes de montagem. Na primeira o geossintético se encontrava entre duas camadas de solo (superior e inferior), conforme a Figura 44a. Na segunda, o geossintético ficava posicionado sobre um bloco rígido (Figura 44b). As Figuras 54 e 55 apresentam alguns dos resultados obtidos.

De uma forma geral os ensaios de cisalhamento direto para as interfaces com geotêxtil forneceram resultados parecidos, com uma diferença de apenas 2°. Observa-se, entretanto, que os resultados dos ensaios com geogrelhas são significativamente diferentes. Este mesmo comportamento foi observado por Saez (1997) que executou ensaios de cisalhamento direto com geogrelhas para as duas condições distintas de montagem em equipamentos de 300 x 300mm (Sieira, 2003).

Nakamura *et al.* (1999) também realizaram estudos de posição relativa do geossintético em relação à camada de solo. Para isso utilizaram um equipamento em que a carga vertical é aplicada de baixo para cima na base da caixa inferior, com uma célula de carga acoplada. O deslocamento vertical do corpo de prova foi medido através dos deslocamentos da placa de carregamento (Figura 56). Os autores utilizaram três métodos distintos de colocação do reforço: (a) geogrelha instalada entre as camadas de solo, isto é, na posição do plano potencial de ruptura (Figura 57a), (b) geogrelha colada na placa sobre a camada de solo (Figura 57b) e (c) a geogrelha colada na placa sob a camada de solo (Figura 57c).

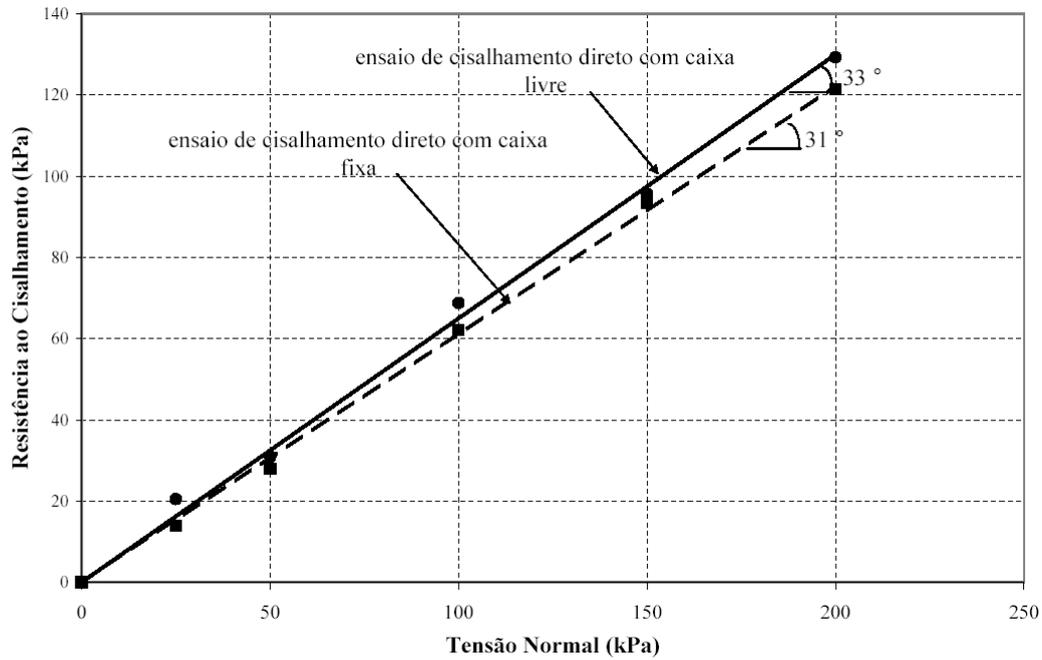


Figura 54 - Efeito da posição relativa nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geotêxtil tecido tricotado, caixa 300mm x 300mm (Adaptado de Ingold, 1984).

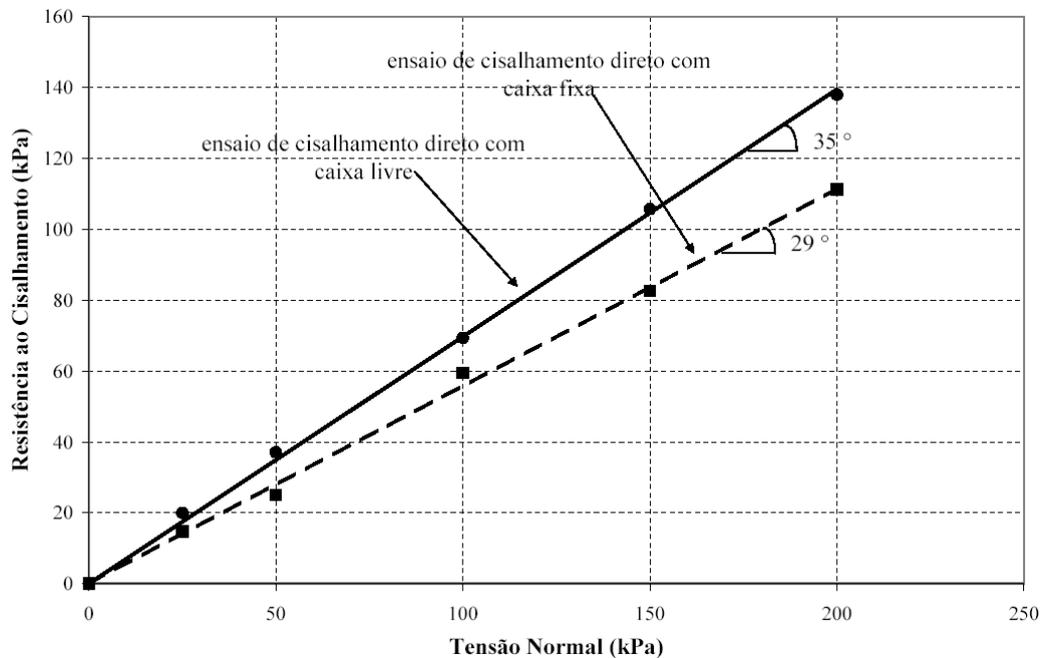


Figura 55 - Efeito da posição relativa nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geogrelha, caixa 300mm x 300mm (Adaptado de Ingold, 1984).

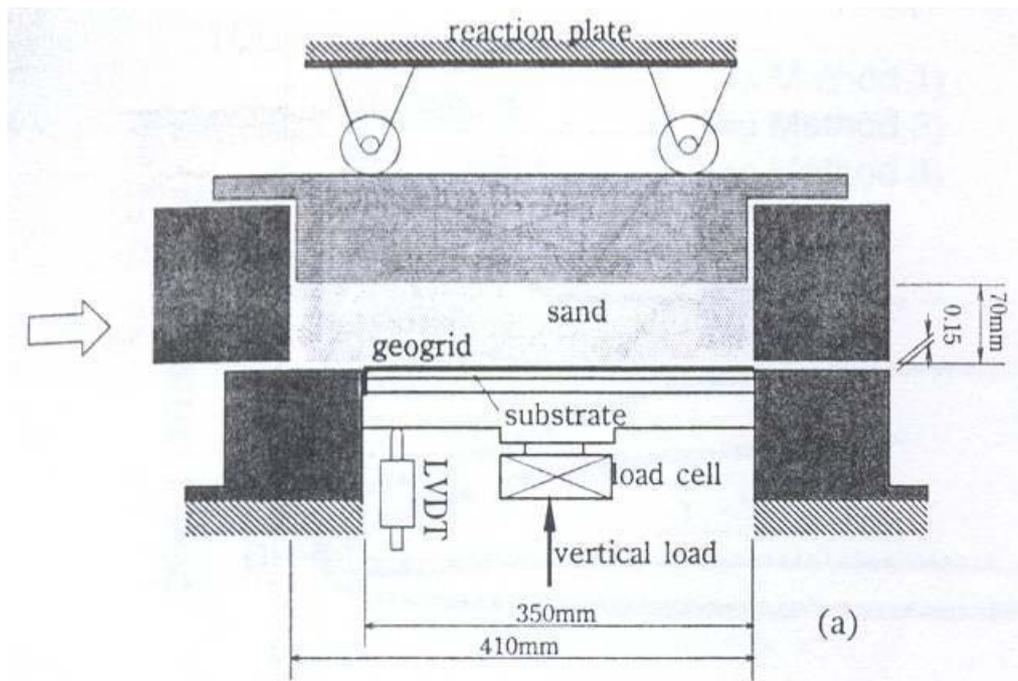
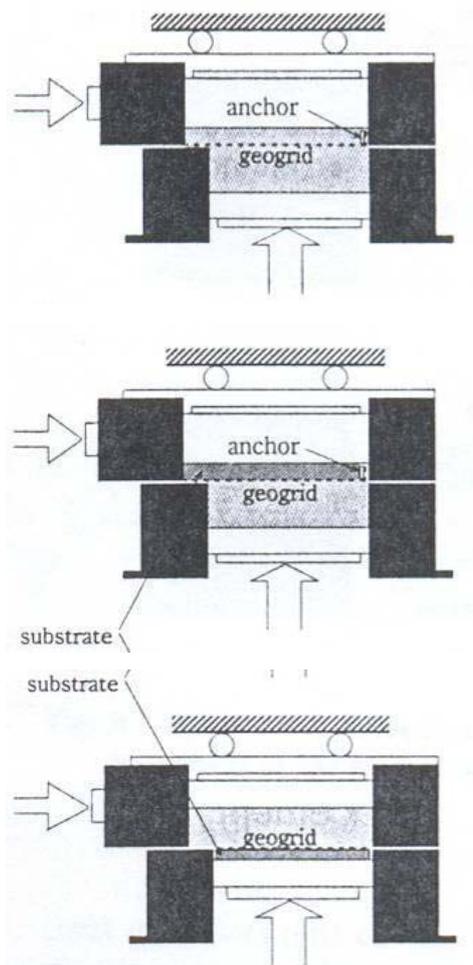


Figura 56 - Equipamento utilizado por Nakamura *et al.* (1999).



(a) Geogrelha entre duas camadas de areia

(b) Geogrelha fixa na caixa superior, com solo na caixa inferior

(c) Geogrelha fixa na caixa inferior, com solo na caixa superior

Figura 57 - Configurações da posição do reforço (Nakamura *et al.* 1999).

De acordo com os resultados da Figura 58, estes autores verificaram que na configuração “a” pode-se formar um plano de cisalhamento de pequena espessura devido à ocorrência de dilatância. Nesta situação, mede-se a resistência entre partículas de solo e não entre o solo e o geossintético.

Quando se utiliza a configuração “b”, à medida que o cisalhamento progride, as aberturas das geogrelhas vão sendo preenchidas com as partículas de solo. Desta forma, as tensões passam a ser totalmente transmitidas às partículas de solo que estão nessas aberturas.

Quando se recorre à configuração “c”, verifica-se a ocorrência de dilatância (aumento de volume) durante o cisalhamento, sendo a tensão de cisalhamento de pico tão elevada como a da própria areia, aproximando-se este valor do residual à medida que o cisalhamento avança.

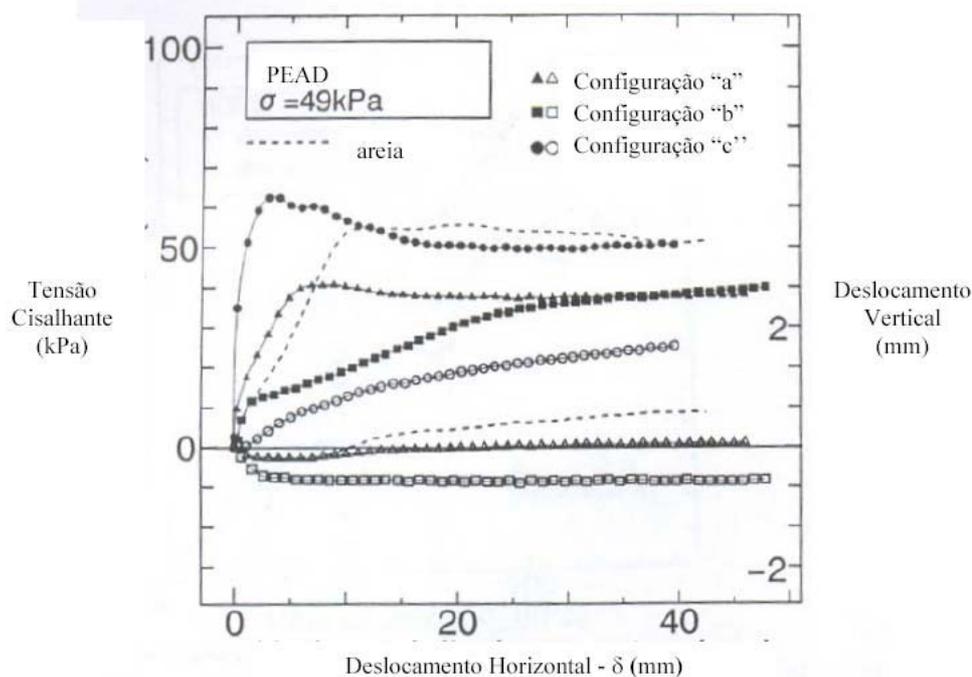


Figura 58 - Relação entre a tensão de cisalhamento e os deslocamentos horizontal e vertical (Nakamura *et al.*, 1999).

Observando os resultados de Nakamura *et al.* (1999), constata-se que eles são muito próximos na condição residual, embora haja algumas diferenças devidas ao mecanismo de mobilização de resistência. O mesmo não ocorre com a condição de pico. Assim, os autores recomendam a utilização do terceiro método

para a definição da resistência da interface solo-geossintético, quando se utiliza ensaios de cisalhamento direto.

As divergências apresentadas por Ingold (1984), Saez (1997) e Nakamura *et al.* (1999) podem estar relacionadas ao tipo de malha da geogrelha. Espera-se que, quanto menor a área da geogrelha disponível para o atrito na interface solo-geogrelha, maior a contribuição do atrito solo-solo. Neste caso, a utilização de um bloco rígido pode subestimar o atrito na interface. No entanto, se a geogrelha apresenta aberturas pequenas e uma área de atrito significativa, a opção de uso do bloco rígido também pode ser adequada.

#### *Influência das Dimensões do Equipamento*

Segundo Sieira (2003), as caixas de cisalhamento direto apresentam usualmente seção quadrada, com dimensão das arestas internas variando desde 60mm (equipamentos convencionais) até 1000mm (equipamentos de grande porte). 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.

A ASTM D-5321 especifica que, para ensaios de cisalhamento direto envolvendo interfaces solo-geossintéticos, as caixas de ensaio devem apresentar dimensões mínimas de 300 x 300mm.

Para geogrelhas, as dimensões da caixa de cisalhamento dependem das dimensões das partículas de solo e da abertura da malha. Em relação às dimensões das partículas do solo, Jewell e Worth (1987) recomendam que a menor dimensão da caixa de ensaio deve ser, no mínimo, 50 vezes maior que o diâmetro médio das partículas de solo ( $D_{50}$ ) e 12 vezes maior que a maior partícula de solo. Com relação às dimensões da geogrelha, a dimensão mínima da caixa deve ser pelo menos 5 vezes maior do que a abertura máxima da geogrelha ensaiada.

Sieira (2003) reporta estudos referentes à influência das dimensões das caixas de ensaios realizados por Ingold (1984), Palmeira (1987) e Saez (1997). Estes resultados são apresentados nas Figuras 59 a 61.

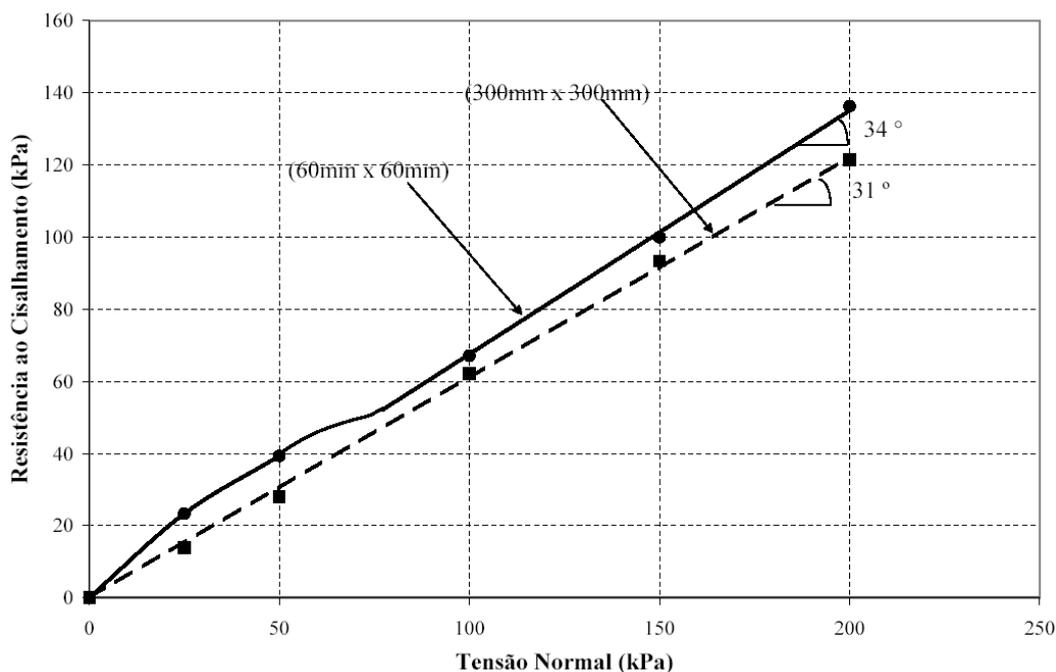


Figura 59 - Efeito da dimensão do equipamento nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geotêxtil tecido tricotado (Adaptado de Ingold, 1984).

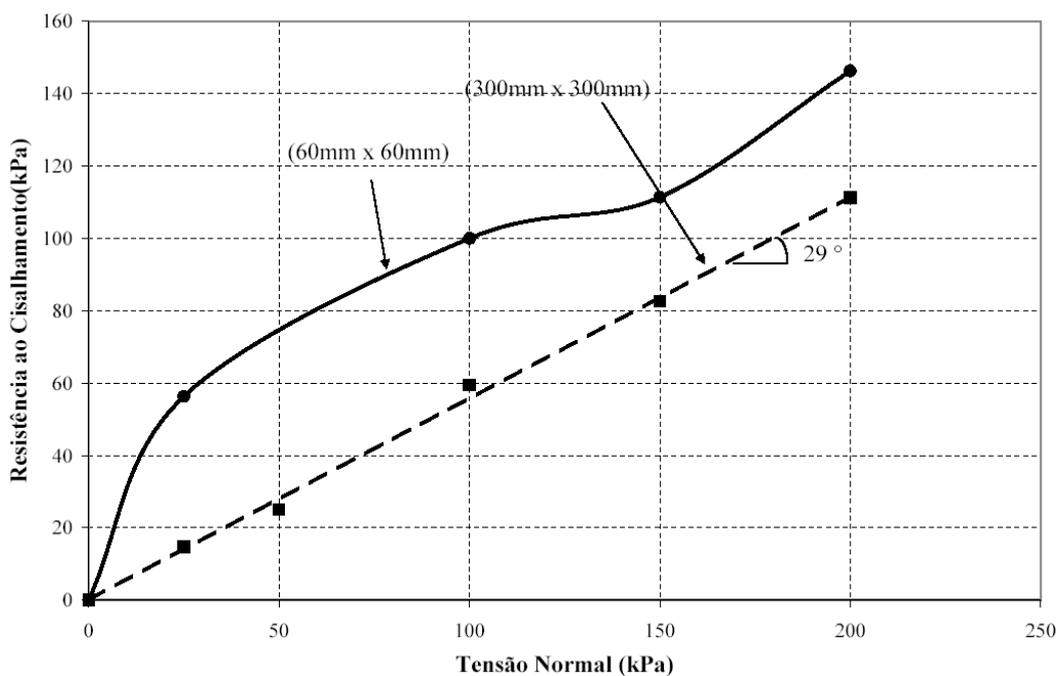


Figura 60 - Efeito da dimensão do equipamento nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geogrelha (Adaptado de Ingold, 1984).

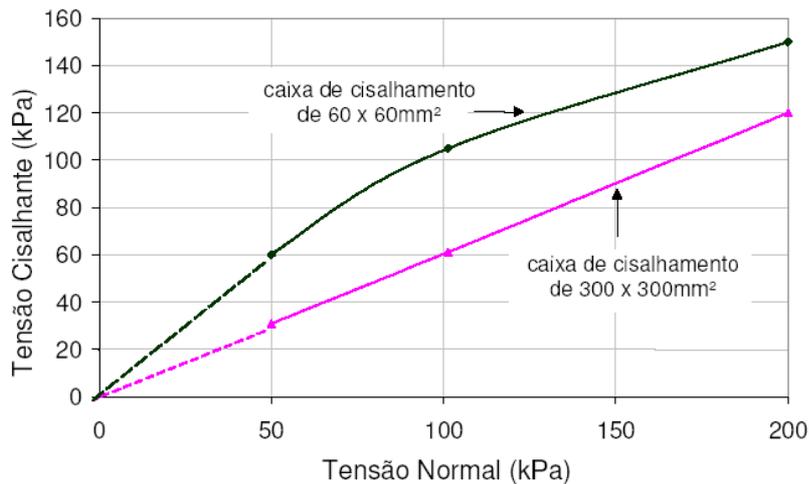


Figura 61 - Efeito das dimensões do equipamento de cisalhamento direto para geogrelha e areia (Adaptado de Saez, 1997).

Da mesma forma que para o estudo de influência de posição relativa, os ensaios de Ingold (1984) para interfaces com geotêxtil apresentam resultados semelhantes quanto ao ângulo obtido. Os ensaios com solo-geotêxtil tecido (caixa de 60 x 60mm) apresenta um comportamento não linear indicando uma dependência entre o ângulo de atrito e a tensão normal aplicada.

Os dois autores executaram ensaios com geogrelhas em areia, com caixas de mesmas dimensões, sendo observado um comportamento semelhante. Para o equipamento de dimensões menores, a envoltória é não linear, implicando em uma dependência entre o ângulo de atrito solo-geogrelha e a tensão normal aplicada. Por outro lado, nos equipamentos de maiores dimensões, a envoltória é linear, fazendo com que o ângulo de atrito independa da tensão normal aplicada. Observa-se também que a envoltória obtida no ensaio com o equipamento de menor dimensão encontra-se acima da envoltória obtida no equipamento de maior dimensão. Desta forma, os autores sugerem a utilização de equipamentos de cisalhamento direto com dimensões iguais ou maiores que 300mm x 300mm, confirmando a recomendação da ASTM D5321.

Hsieh *et al.* (2002) realizaram ensaios com geomembranas de diferentes rugosidades e duas areias. Foram utilizadas caixas de ensaio com dimensões de 100 x 100mm, 200 x 200mm, 300 x 300mm e 400 x 400mm. Os resultados para a interface entre a geomembrana lisa e a areia são apresentados na Tabela 11.

Observa-se que os valores de ângulos de atrito de pico obtidos em ensaios com caixas pequenas são menores do que os obtidos em caixas maiores. Entretanto, os valores residuais são maiores.

Por outro lado, os valores de atrito de pico são maiores e semelhantes a partir das caixas de dimensões 300 x 300mm e 400 x 400mm, pois as maiores dimensões eliminam o efeito de borda.

Tabela 11 - Resultados de ensaios de cisalhamento direto: interface areia / geomembrana lisa (Hsieh *et al.* 2002)

Tamanho da caixa (mm)	Ângulo de atrito de pico (°)	Ângulo de atrito residual (°)
100 x 100	19,7	17,9
200 x 200	22,4	16,0
300 x 300	24,2	18,9
400 x 400	24,1	19,1

### Influência da Espessura das Amostras de Solo

As camadas de solo, tanto de cobertura como de suporte, podem ter espessuras iguais ou diferentes. Gourc *et al.* (1996) estudaram a influência da espessura de solo nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto da interface solo-geossintético (Figura 62).

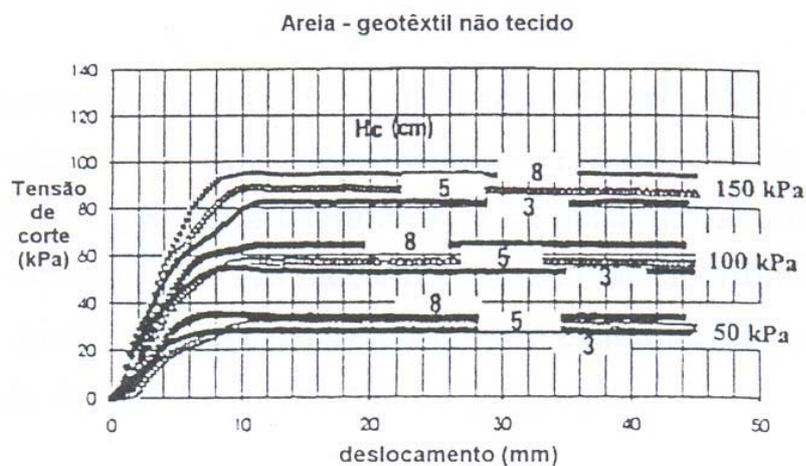


Figura 62 - Influência da espessura de solo da caixa superior na interface areia-geotêxtil em ensaios de cisalhamento direto (Gourc *et al.* 1996).

Os resultados mostraram que a tensão cisalhante aumenta com a espessura de solo para ensaios com geotêxtil não-tecido e areia. A espessura mínima recomendada por Sopena (2002) é da ordem de 5 vezes o diâmetro máximo das partículas de solo (Sieira, 2003).

### Influência da Rugosidade do Bloco Rígido

A utilização de blocos lisos ou rugosos para suportar o geossintético é um dos fatores que influenciam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Nestes casos os materiais que mais sofrem influência nos seus resultados são as geogrelhas com malhas de grande abertura. Gourc *et al.* (1996) executaram ensaios de cisalhamento direto com uma geogrelha com barras espessas, sobre um suporte liso e sobre uma camada de areia como suporte alternativo. Os resultados demonstraram que, no segundo caso, obtém-se uma resistência 20% superior (Figura 63).

Para compensar a limitação referente à rugosidade do bloco, Nakamura *et al.* (1996) sugerem a utilização de uma superfície rugosa que induza uma tensão cisalhante mais elevada devido ao imbricamento entre as partículas de solo e às rugosidades da superfície do bloco nas aberturas da grelha. Uma solução proposta por Gourc *et al.* (1996) seria a colagem de um material rugoso, buscando-se uma rugosidade semelhante à do solo (Sieira, 2003).

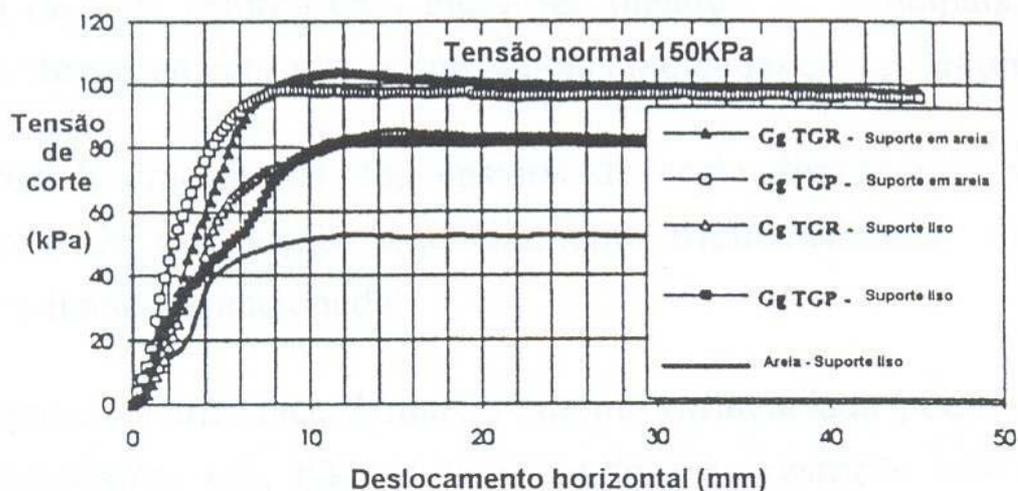


Figura 63 - Influência do suporte no atrito entre a geogrelha e a areia (Gourc *et al.* 1996).

Influência do Sistema de Aplicação de Sobrecarga

Palmeira (1999) apresenta quatro formas diferentes de configuração para aplicação de sobrecargas em ensaios de cisalhamento direto (Figura 64). Segundo ele, na situação mais tradicional, a tensão vertical é aplicada através de uma placa rígida (Figura 65a e b). Outras condições possíveis são à fixação da placa do topo à metade superior da caixa de cisalhamento (Figura 65c) ou a utilização de uma bolsa pressurizada no topo (Figura 65d).

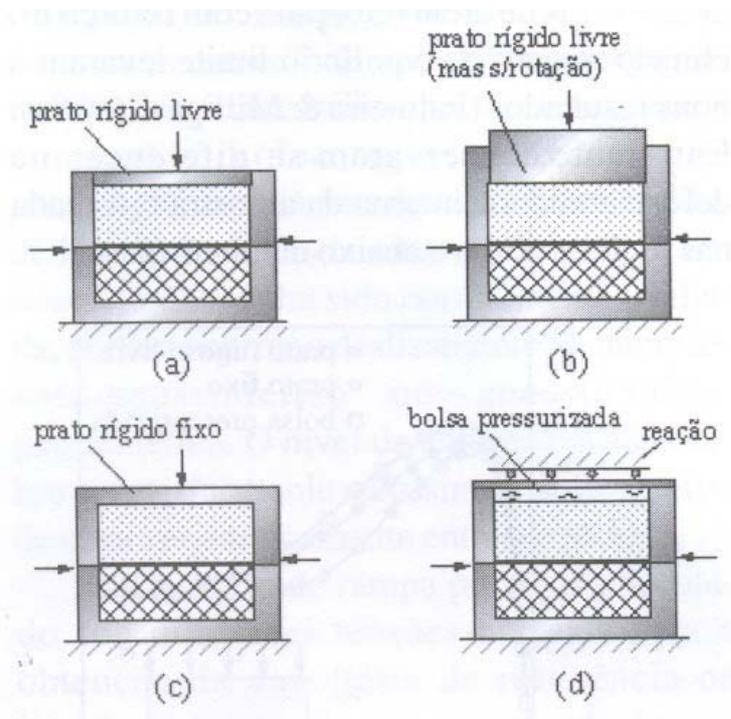


Figura 64 - Condições de fronteiras típicas em ensaios de cisalhamento direto (Palmeira, 1999).

Palmeira (1987) apresenta, também, uma comparação entre os resultados de ensaios com areia densa para diferentes condições de fronteira no topo em termos de tensão cisalhante no plano central ( $\tau$ ) normalizado pela tensão normal ( $\sigma$ ) (Figura 65). Ele observa que o deslocamento cisalhante na ruptura e o ângulo de atrito a volume constante foram pouco afetados pelas diferentes condições de fronteira. O ângulo de atrito secante de pico nas condições do ensaio foi cerca de 2° superior para o caso com bolsa flexível no topo.

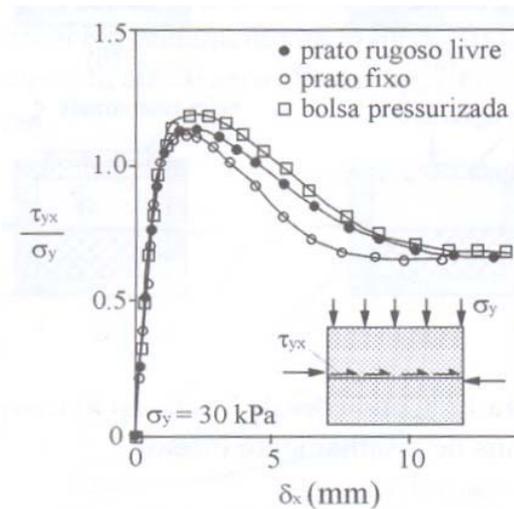


Figura 65 - Ensaio de cisalhamento direto em areia densa com diferentes condições de fronteira (Palmeira, 1987).

Nakamura *et al.* (1999) utilizaram para avaliar esta condição de contorno o equipamento apresentado na Figura 56 e outro equipamento (Figura 66), onde a carga vertical é aplicada de cima para baixo no topo da caixa superior através de uma membrana de borracha pressurizada. Neste equipamento a medição da tensão normal era feita por uma célula de carga instalada na base da caixa inferior.

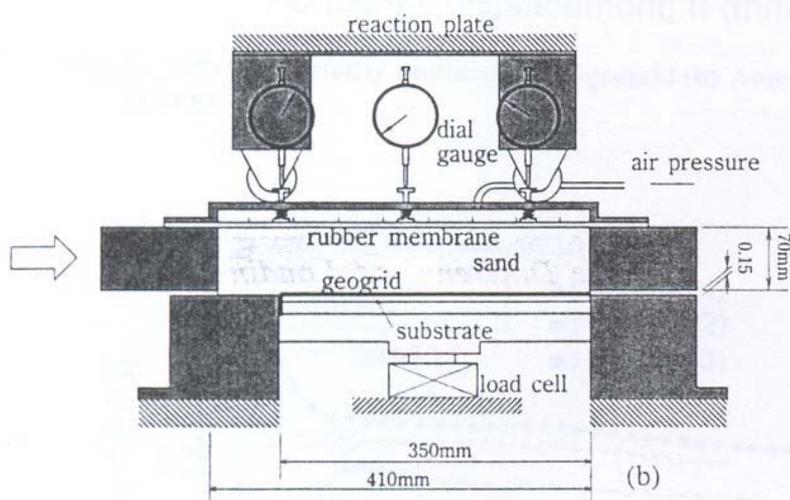


Figura 66 - Representação esquemática do aparelho de cisalhamento direto em que a carga é aplicada de cima para baixo no topo da caixa superior (Nakamura *et al.*, 1999) - Configuração B.

Na Figura 67 são apresentadas as relações tensão cisalhante/tensão normal obtidas em ensaios de cisalhamento utilizando estas duas metodologias. No caso do equipamento da Figura 56, a força normal é aplicada e medida na mesma face,

pelo que a tensão normal medida tem sempre o mesmo valor constante. Por outro lado, a célula de carga que mede a tensão normal no aparelho da Figura 65 está do lado oposto ao sistema de aplicação da tensão normal. Esta tensão varia, durante o cisalhamento, devido à dilatação das partículas de solo na vizinhança do plano de cisalhamento, apesar da pressão normal aplicada ser mantida constante.

Sendo assim, é necessário medir a tensão normal instalada no plano de cisalhamento com o geossintético, dado que esta tensão normal pode variar durante o cisalhamento.

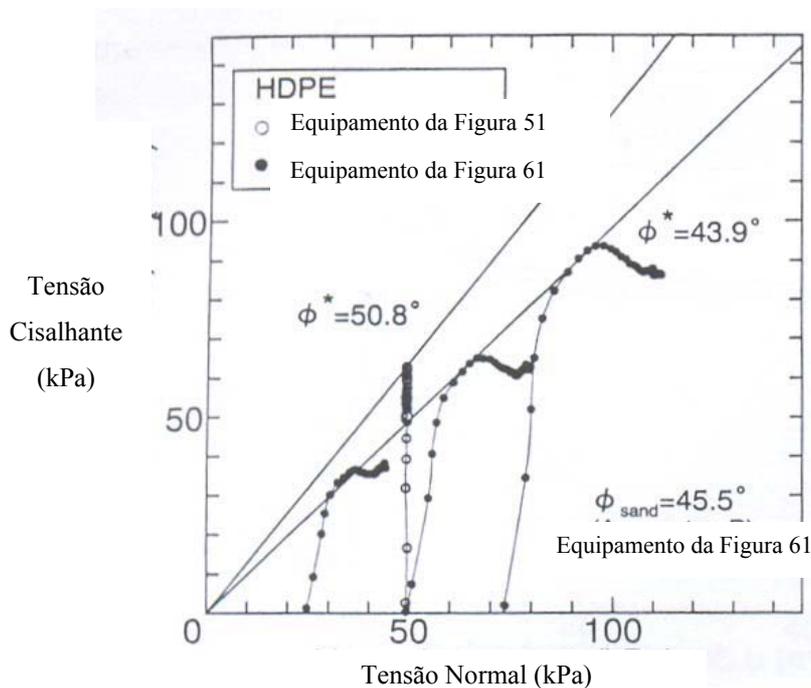


Figura 67 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto obtidos com o equipamento da Figura 56 e o equipamento da Figura 66 (Nakamura *et al.*, 1999).

### 3.3.4.

#### Fatores que influenciam os ensaios de Cisalhamento Direto associados aos materiais

Os resultados também são influenciados por uma série de fatores associados aos materiais ensaios e dentre eles podemos destacar.

#### Densidade Relativa

Gomes (1993) estudou a influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo-geossintético. O autor concluiu que o ângulo de atrito de interface é

proporcional a densidade relativa do solo. Quanto maior for a densidade relativa maior será o ângulo de atrito do solo (Tabela 12). Porém, em termos de resistência residual, as interfaces com solos fofos ou densos tendem a resultados similares.

Tabela 12 - Influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)

Interface	Areia		Geotêxtil OP20 (*)		Geotêxtil OP30 (*)		Geotêxtil OP60 (*)		Geotêxtil PR-2004 (**)	
	c	$\phi$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$
	Areia fofa	0	38,0	0	38,0	1	37,0	0	36,5	1
Areia densa	3	41,0	4	40,5	4	40,0	4	40,0	5	36,0

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

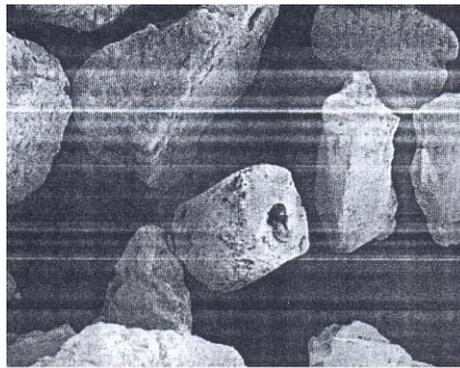
Lee e Manjunath (2000) apresentaram alguns resultados sobre a influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Tabela 13). Porém não comentaram os resultados obtidos.

Tabela 13 - Influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Lee e Manjunath, 2000)

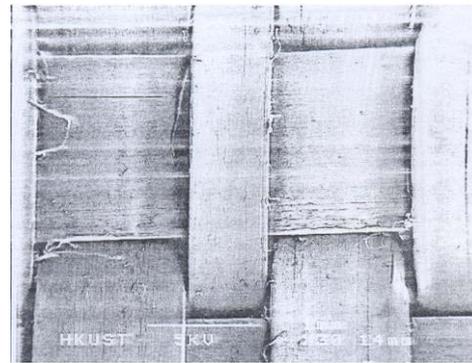
Interface	Areia		Amoco 2000 (**)		Reemay 3401 (*)		Televev 70/70 (**)	
	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$
Dr 50%	0	33,5	0	32,5	0	33,2	0	31,1
Dr 80%	0	34,8	0	33,0	0	33,2	0	31,2

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

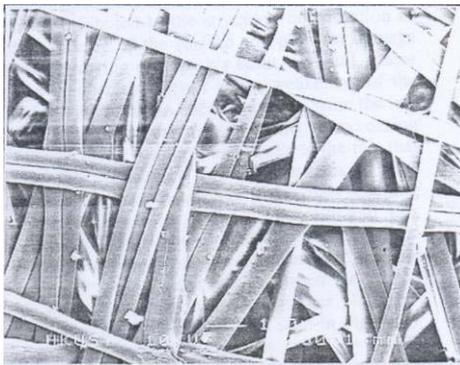
Entretanto, diferentemente de Gomes (1993), observa-se que o aumento da densidade relativa não acarretou em um aumento significativo do ângulo de atrito de interface. A explicação para este comportamento está nas características dos materiais utilizados nos ensaios, a areia “UST sand” (Figura 68a) e os geotêxteis Amoco 2000 (Figura 68b), Reemay 3401 (Figura 68c) e Televev 70/70 (Figura 68d).



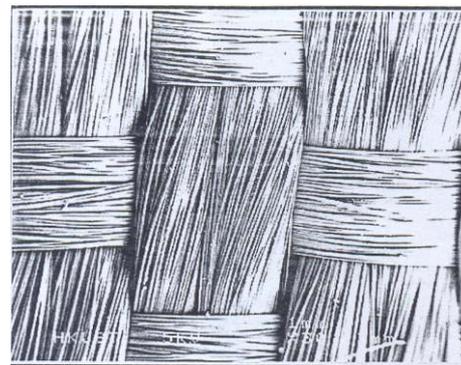
(a) "UST sand"



(b) Amoco 2000



(c) Reemay 3401



(d) Televev 70/70

Figura 68 - Materiais utilizados por Lee e Manjunath (2000).

Os grãos areia "SUT sand" foram caracterizados como subangulares com bordas arredondadas. Esta característica diminui o imbricamento dos grãos, facilitando o rolamento dos mesmos sobre a superfície da manta. Os geossintéticos no caso do geotêxteis tecidos, apresentam uma superfície menos rugosa quando comparado com o geotêxteis não-tecidos, justificando a pouca variação no valor do ângulo de atrito de interface.

### Umidade do Solo

Gomes (2003), também estudou a influência da umidade nos resultados de interfaces solos não-coesivos e solos coesivos com geotêxteis. No caso de solos não-coesivos se observou que o ângulo de atrito de interface é pouco afetado pelo teor de umidade do solo, tanto no caso de geotêxteis não-tecidos como no caso de geotêxteis tecidos. No caso de solos coesivos o ângulo de atrito de interface decresce com o aumento da umidade do solo. Observou-se, para geotêxteis não-tecidos, que o ângulo de atrito de interface pode variar sensivelmente para estes

materiais devido a suas propriedades drenantes. A Tabela 14 apresenta alguns dos resultados obtidos pelo autor.

Tabela 14 - Influência do teor de umidade em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)

Interface	Solo-solo		Geotêxtil OP30 (*)		Geotêxtil PR-2004 (**)	
	c	$\phi$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$
Areia densa seca	3	41,0	4	40,0	5	36,0
Areia densa úmida	6	40,5	5	40,5	6	35,0
Caulinita (***)	22	32,0	18	34,0	18	29,5
Caulinita (****)	20	24,0	12	29,0	13	21,5

(\*) geotêxteis não tecidos, (\*\*) geotêxtil tecido, (\*\*\*) 28% de umidade, (\*\*\*\*) 34% de umidade

### Rigidez

A rigidez à tração do reforço é definida como sendo a relação entre força e deformação. Jewell e Wroth (1987) apresentam resultados de ensaios de cisalhamento direto mostrando que quanto maior a rigidez à tração (reforço inextensível) mais frágil é o maciço reforçado. Entretanto, se a rigidez for menor (reforço extensível), maior será a ductilidade do maciço reforçado (Figura 69).

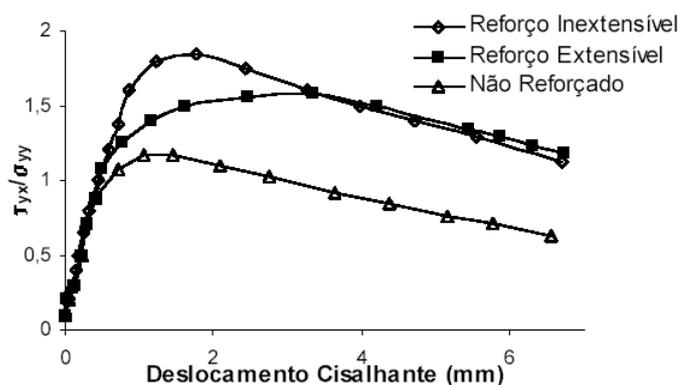


Figura 69 - Efeito da rigidez do geossintético (Jewell e Wroth, 1987).

Gomes (1993), estudando o comportamento da interface areia-geotêxtil não-tecido em ensaios de tração confinada, verificou que um aumento do confinamento resulta num aumento da rigidez a tração. O autor verificou,

também, que o efeito do confinamento é mais evidente no comportamento dos geotêxteis não-tecidos, pois estes materiais possuem suas fibras dispostas aleatoriamente e o confinamento do solo impede a reorientação das fibras na direção do carregamento, o que não acontece para a situação sem confinamento (Figura 70).

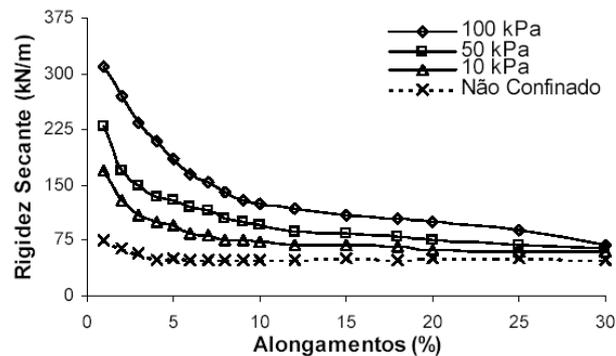


Figura 70 - Efeito do confinamento na rigidez de geossintéticos (Gomes, 1993).

### Rugosidade da Superfície do Geossintético

O estudo da influência da rugosidade do geossintético, geralmente geomembranas, na resistência ao cisalhamento da interface, seja ela com solo ou com outro geossintético, tem sido objeto de diversos autores (Giroud *et al.*, 1990; 1998; Izgin e Wasti, 1998; Wasti e Özdüzgün, 2001). Em todos os trabalhos se observa que a rugosidade induz um acréscimo de resistência da interface como mostra a Figura 71. Este comportamento é função da forma mobilização da resistência da interface, mecanismo de atrito, que é função da rugosidade da superfície do geossintético.

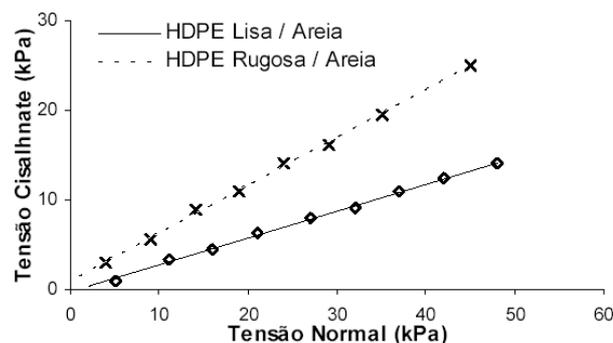


Figura 71 - Efeito da rugosidade na resistência da interface (Izgin e Wastin, 1998).

Granulometria e Angularidade das Partículas

A influência da granulometria e angularidade das partículas do solo foi investigada por Gomes (1993) mediante a análise de interfaces solo-geotêxteis com solos de diferentes faixas granulométricas (brita, seixo, pedrisco e areia) e diferentes angularidades dos grãos (brita com grãos angulares e seixo com grãos arredondados). A Tabela 15 apresenta os resultados.

Tabela 15 - Influência da granulometria e angularidade em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)

Interface	Solo		Geotêxtil OP20 (*)		Geotêxtil OP30 (*)		Geotêxtil OP60 (*)		Geotêxtil PR-2004 (**)	
	c	$\phi$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$	a	$\phi_{sg}$
	Areia	0	38,0	0	38,0	1	37,0	0	36,5	1
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.

Em geral, o aumento da granulometria do solo acarreta num aumento dos parâmetros de interface. Este aumento pode ser justificado por mecanismos como travamento, bloqueio e imbricamento dos grãos do solo na superfície do geotêxtil.

Entretanto, são observados maiores valores de ângulo de atrito de interface e de adesão para os geotêxteis não-tecidos. Esta diferença pode ser explicada pelas características da superfície da manta têxtil tecida. A natureza essencialmente lisa da superfície do geotêxtil tecido é um fator condicionante para que o mecanismo básico de ruptura ao longo da interface ocorra por deslizamento e rolamento das partículas resultando em parâmetros de interfaces mais baixos quando comparados com os geotêxteis não-tecidos.

A influência da angularidade dos solos foi investigada a partir da comparação dos resultados obtidos para interfaces com brita e seixo rolado. Estes materiais estão enquadrados dentro de uma mesma faixa granulométrica (4,8 - 9,5mm). Gomes (1993) afirma 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.

### 3.4. Considerações Finais

O ensaio de rampa é simples de executar. Seu procedimento de preparação, execução e análise são parecidos com os do cisalhamento direto. Porém, uma atenção especial deve ser dada à variação de tensão normal, uma vez que esta pode interferir nos resultados.

Na revisão são apresentados a referência normativa do ensaio e alguns equipamentos reportados na bibliografia. A norma especifica o tamanho mínimo das caixas de ensaio, a razão mínima entre a altura caixa e o tamanho da maior partícula, as possíveis configurações de ensaio (ausência ou não da caixa inferior), a velocidade indicada para o ensaio e os dispositivos de medição de deslocamento, ângulo e aplicação de sobrecargas.

O porte dos equipamentos reportados na bibliografia varia consideravelmente. A Tabela 16 apresenta o resumo das principais características.

Tabela 16 - Ensaio de Rampa - resumo das características

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
Lalarakotoson <i>et al.</i> (1999)	não tem caixa inferior			100	70	30	?	AI, DH	peso do solo

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;

Tabela 16 (cont.)- Ensaio de Rampa - resumo das características

Autor	Caixas de Ensaio						VI (cm/min)	Medições	STN
	Inferior			Superior					
	c	l	h	c	l	h			
Lima Jr. (2000)	200	50	var.	192	47	25	?	AI, DH, CG, CV	solo e placas de concreto
Lopes (2001)	51	35	8	30	30	8	0,5	AI, DH, CV	solo e placas de aço
Briançon et al (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;

A maioria dos equipamentos reportados pode ser considerada de grande porte (áreas de contato superiores a 1,0 x 1,0m<sup>2</sup>). A presença ou não da caixa inferior vai depender do tipo de geossintético a ser ensaiado. Em relação à velocidade de ensaio, pode-se afirmar que não existe uma padronização entre os diferentes autores. Porém a norma ISO 12957-2 sugere uma velocidade angular de 5% do comprimento por minuto. Quanto à instrumentação, a maioria dos autores mede ângulos e deslocamentos horizontais (previstos na norma). O sistema de aplicação de sobrecargas (tensão confinante) é sempre por peso, variando-se o material empregado (aço ou concreto).

O ensaio de rampa tem restrições de funcionamento que podem influenciar os resultados. Estas restrições estão ligadas à distribuição da tensão normal, ao tamanho da caixa de ensaio e à rugosidade do plano rígido.

Sobre cada uma delas pode-se destacar:

(i) Influência da Razão Comprimento *vs* Altura: Conforme os estudos numéricos e analíticos feitos por Melo *et al.* (2003) e Palmeira *et al.* (2002), a distribuição da tensão normal varia durante o ensaio, sendo função da razão entre o comprimento e a altura da caixa de ensaio. Segundo os autores, as dimensões da amostra contribuem significativamente nesta distribuição, sendo o seu efeito mais evidente em equipamentos de pequenas dimensões.

Para uniformizar as tensões, Gourc *et al.* (1996) sugerem o uso de caixas com faces inclinadas e Melo *et al.* (2003) sugerem caixas com razões comprimento-altura elevadas.

(ii) Influência das dimensões do equipamento: Izgin e Wasti (1998) realizaram estudos sobre a influência do tamanho da caixa de ensaio nos resultados do ensaio de rampa. Para isso utilizaram dois solos granulares, quatro geomembranas e três configurações de ensaio. Como resultado destes estudos, os autores concluíram que o aumento do tamanho da caixa de ensaio provocou um aumento do ângulo de atrito de interface.

(iii) Presença do plano rígido: a ausência da camada de solo contida por um caixa inferior pode influenciar os resultados de ensaios com geogrelha. Assim, não é recomendada a utilização de bases rígidas nos ensaios com este tipo de geossintético.

Os ensaios de cisalhamento direto para o estudo de interfaces solo-geossintético seguem os mesmos procedimentos de preparação, ensaio e análise do ensaio de cisalhamento direto convencional em solos.

Nesta revisão são apresentados alguns métodos de ensaio que permitem diversas formas de configuração e fixação de geossintéticos com o intuito de facilitar a medição de força e deslocamento. A escolha de uma ou outra configuração vai ser função do tipo de geossintético a ser ensaiado.

Porém, como todo o ensaio de laboratório, o ensaio de cisalhamento direto tem restrições de funcionamento que podem influenciar os resultados. Estas restrições estão ligadas à posição relativa do geossintético, dimensões do

equipamento, espessura da amostra, rugosidade do bloco onde se assenta o geossintético e sistema de aplicação de tensão normal.

Sobre cada um destas restrições podemos destacar:

(i) Posição relativa do geossintético: a presença ou não de um bloco rígido não interfere significativamente nos resultados de interfaces solo-geotêxtil e solo-geomembrana. Porém o uso do bloco rígido interfere nos resultados de interfaces solo-geogrelha por desprezar a parcela de atrito solo-solo. Sendo assim não se recomenda a utilização de uma base rígida no caso de geogrelhas.

(ii) Influência das dimensões do equipamento: Existe uma recomendação da ASTM que especifica o tamanho mínimo das caixas de ensaio (300mm x 300mm). A influência desta restrição foi estudada por alguns pesquisadores que constataram que, a partir das dimensões 300mm x 300mm, os valores de adesão e ângulo de atrito de interface não sofrem alterações significativas. Porém, deve ser dada atenção à razão dimensão da caixa de ensaio / tamanho da partícula de solo.

(iii) Influência da espessura da amostra de solo: o aumento da espessura da camada de solo acarreta num aumento de tensão cisalhante. Neste caso, tem que ser dada atenção ao fato que existe uma recomendação de altura mínima de caixa de ensaio em função do diâmetro da partícula do solo ensaiado.

(iv) Influência da rugosidade do bloco rígido: no caso de se utilizar o bloco rígido em ensaios de interface-solo geogrelha, deve-se garantir que o bloco tenha uma rugosidade semelhante à do solo.

(v) Influência do sistema de aplicação de sobrecarga. Ficou demonstrado que cada um dos sistemas de confinamentos induz uma diferente tensão normal no plano de cisalhamento. Sendo assim é necessário medir a tensão normal no plano de cisalhamento, dado que o seu valor, nesse plano, pode variar durante o cisalhamento.