

## 6. Resultados e Análises: Verificações Iniciais

### 6.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas e analisadas as verificações iniciais realizadas nesta tese. Elas incluem a precisão do equipamento, influência das dimensões das caixas, influência da metodologia de ensaios e desgaste da geomembrana.

Primeiramente foi proposto um critério de ruptura unificado para os três ensaios baseado no critério de ruptura do ensaio de rampa previsto na Norma Européia ISO 12957-2 e nas observações de Pitanga *et al.* (2007).

A avaliação da precisão ou acurácia do equipamento foi feita utilizando-se um conjunto de ensaios que apresentam características idênticas, tais como, mesmo solo, mesma densidade relativa, mesma interface solo-geossintético ou solo-solo. Esta análise foi realizada para algumas das configurações de ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado.

A avaliação da influência das dimensões das caixas de ensaio foi realizada considerando-se o aumento ou diminuição da área de contato, variação da forma da área de contato e variação da espessura da camada de solo no interior da caixa de ensaio.

A influência de metodologia de ensaio foi avaliada somente em uma das configurações de ensaio de rampa (RP25Q-10). Ela consistiu em comparar as envoltórias de resistência obtidas para ensaios realizados com as faces internas (frontal e traseira) na vertical e faces inclinadas de 30° com a vertical.

Foi verificada também a influência do desgaste e do dano da geomembrana nos valores dos parâmetros de interfaces obtidos pelos diferentes ensaios. A avaliação consistiu em comparar envoltórias obtidas com amostras novas, amostras com uso controlado e amostras com uso excessivo .

Sempre que possível foram utilizados os resultados reportados por Aguiar (2003), Rezende (2005) e Tavares (2008).

## 6.2. Critério de Ruptura Unificado

Todos os ensaios deste trabalho são expressos em termos de curvas tensão cisalhante vs deslocamento. As Figuras 177 a 179 apresentam resultados típicos de ensaios de rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado, respectivamente.

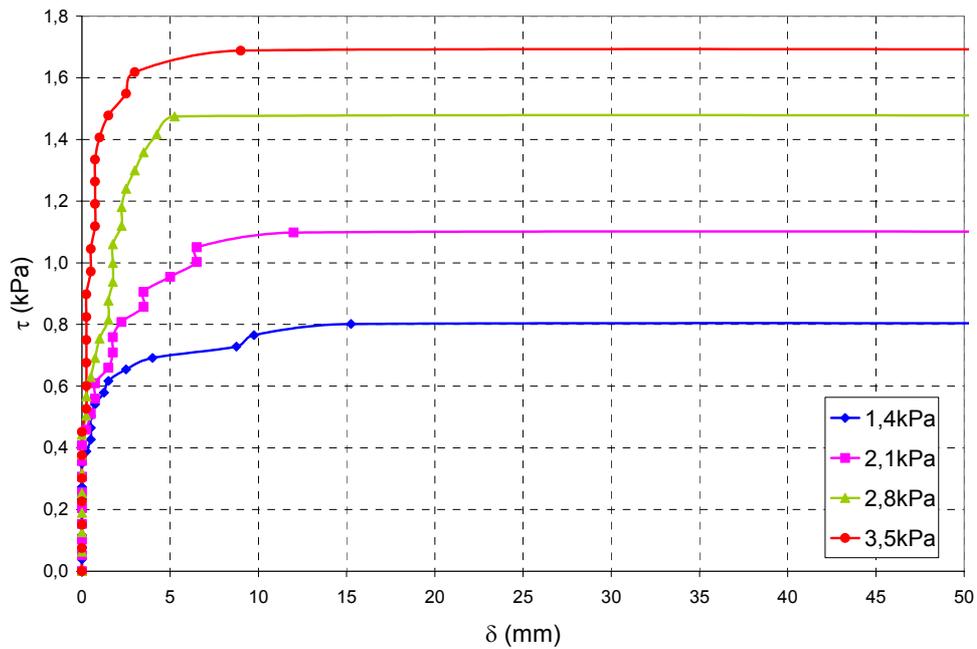


Figura 177 - Resultados típicos de ensaios de rampa - interface Ar15 x Ar15.

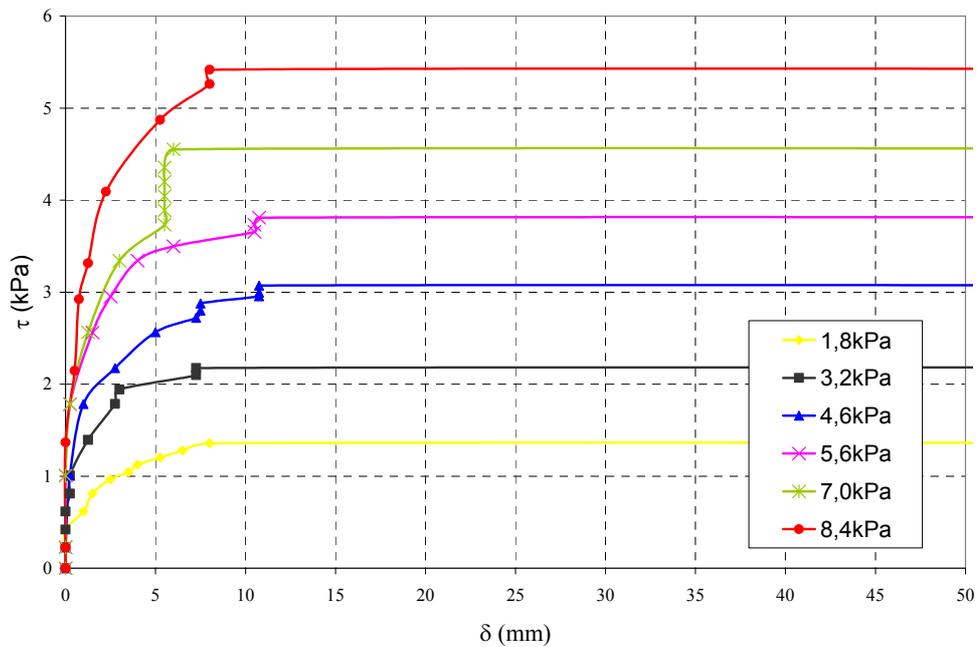


Figura 178 - Resultados típicos de ensaios de cisalhamento direto convencional - interface Ar15 x GG35.

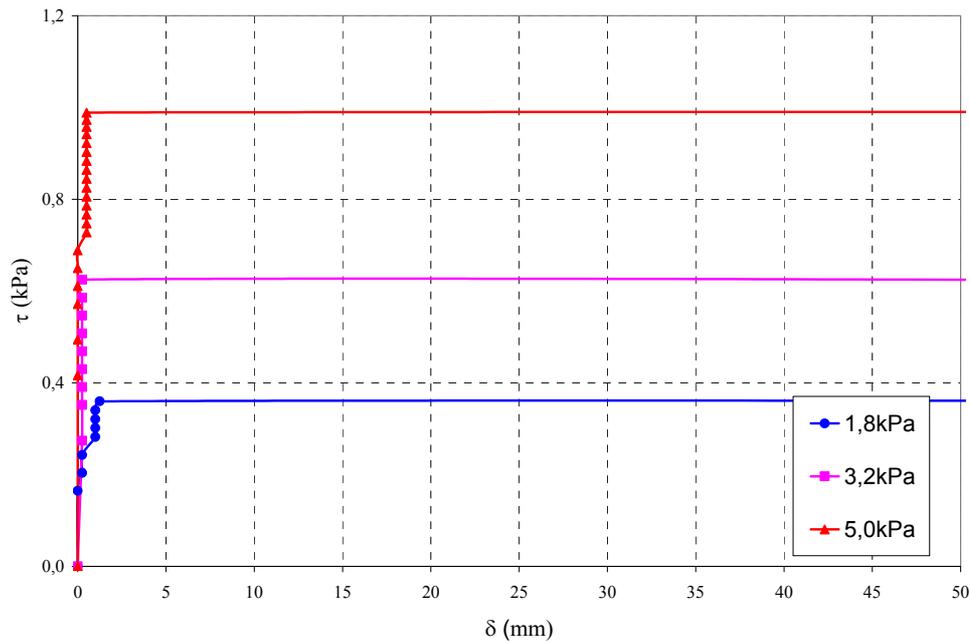


Figura 179 - Resultados típicos de ensaios de cisalhamento direto inclinado - Ar15 x GMPL.

A uniformização da apresentação dos resultados trouxe como benefício à possibilidade de padronização do critério de ruptura. Observa-se que, independente do tipo de ensaio e tensão confinante, as curvas  $\tau$  vs  $\delta$  não mostram pico de resistência. Este comportamento é típico de ensaios de cisalhamento com força controlada (para deformação controlada ver Anexo I). Normalmente utiliza-se como critério de ruptura uma deformação limite (como sugerido na Norma ISO 12957-2), entretanto, outras considerações podem ser feitas.

Sobre a forma de interpretação de ensaios de rampa, Pitanga *et al.* (2007) fazem algumas considerações que também podem ser aplicadas aos ensaios de cisalhamento direto convencional e inclinado.

Segundo estes autores, o comportamento da interface solo-geossintético, em ensaios de rampa, pode ser dividido em três fases (Figura 180). Identifica-se uma fase estática (Fase 1), na qual a caixa de ensaio superior permanece imóvel sobre a plataforma de ensaio ( $\delta=0$ ) até alcançar um ângulo  $\alpha=\alpha_0$ , onde  $\alpha_0$  é o ângulo de início de movimento (Figura 180a). A fase transitória corresponde a Fase 2, na qual para um incremento da inclinação  $\alpha$  (para  $\alpha>\alpha_0$ ), a caixa superior se move (Figura 180b). A fase do deslizamento não estabilizado é a última fase (Figura

180c), onde a caixa superior sofre um deslizamento não estabilizado a uma velocidade crescente, ainda que a inclinação seja mantida constante ( $\alpha = \alpha_s$ ).

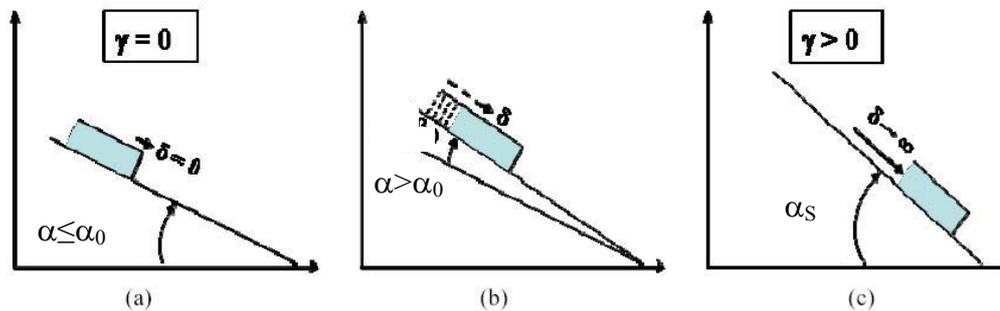
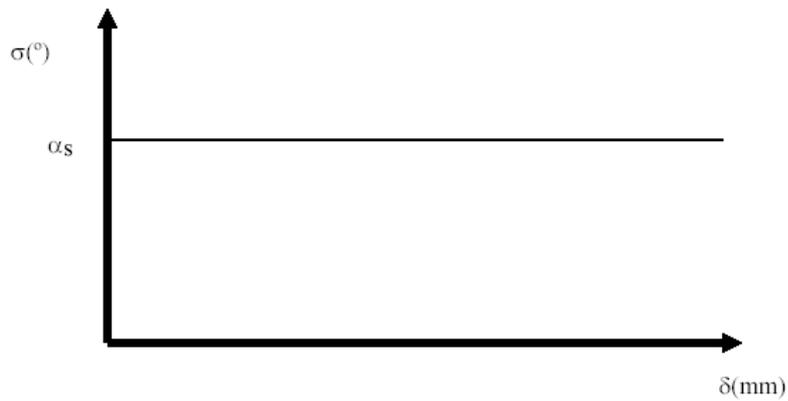


Figura 180 - Fases do movimento do elemento superior da interface com o aumento da inclinação  $\alpha$  do plano inclinado: (a) fase 1, fase estática; (b) fase 2, fase transitória; (c) fase 3, fase de deslizamento não estabilizado (Pitanga *et al.*, 2007).

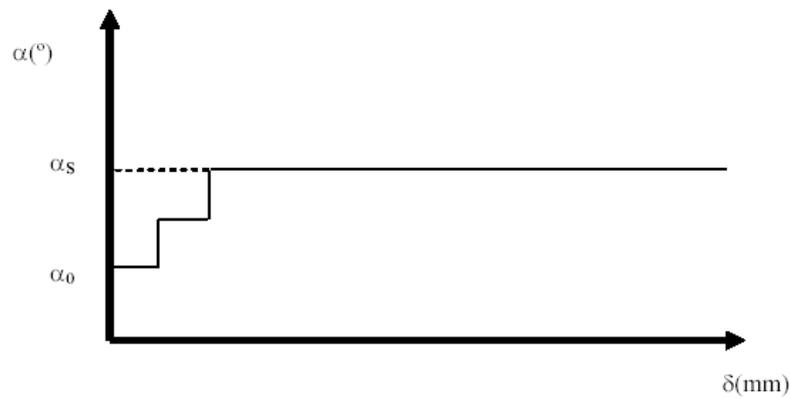
Por sua vez a fase transitória (Fase 2) também é subdividida em três padrões de deslizamento (Figura 181):

- (i) Deslizamento súbito, na qual a caixa superior desliza de forma não estabilizada sem uma fase transitória expressiva (Figura 181a);
- (ii) Deslizamento irregular, onde o deslocamento aumenta acompanhado de rupturas progressivas (Figura 181b);
- (iii) Deslizamento gradual, onde o deslocamento aumenta progressivamente com o aumento de inclinação (Figura 181c).

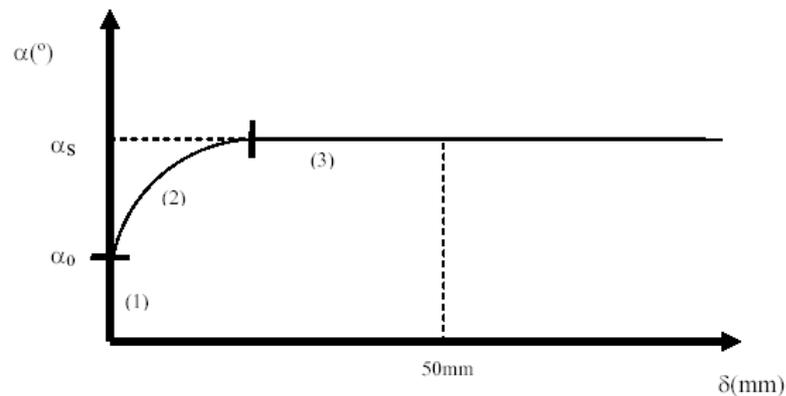
A Norma Européia ISO 12957-2 especifica que o ângulo de rampa de ruptura é o ângulo correspondente a 50mm de deslocamento. Porém, como observam Pitanga *et al.* (2007), o ângulo de rampa de ruptura ocorre, frequentemente, para um deslocamento inferior ao especificado pela norma. Desta forma, o ângulo de ruptura foi determinado nesta pesquisa segundo um dos três padrões de deslizamento apresentados na Figura 181. Na impossibilidade de identificar o padrão de deslizamento, utilizou-se a recomendação da norma ISO 12957-2 (caso C da Figura 181).



(a)



(b)



(c)

Figura 181 - Diferentes mecanismos de deslizamento observados nos ensaios: (a) deslizamento súbito; (b) deslizamento irregular; (c) deslizamento gradual.

A forma de interpretação do ensaio de rampa foi extrapolada para os ensaios de cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado, pois os mesmos padrões de deslizamento foram observados. Entretanto, em vez de se utilizar o ângulo de ruptura, utilizou-se a tensão cisalhante de ruptura. Para fins de padronização, o ensaio de rampa também foi analisado em termos de tensão cisalhante de ruptura.

Analogamente, na impossibilidade da utilização de um destes padrões de deslizamento, a tensão cisalhante de ruptura foi a equivalente a 50mm de deslocamento.

### 6.3. Precisão do Equipamento

A avaliação da precisão do equipamento ou aferição foi feita utilizando-se um conjunto de ensaios que apresentam características idênticas, tais como, mesmo solo, mesma densidade relativa, mesma interface solo-geossintético ou solo-solo. Empregaram-se quatro configurações de ensaio de rampa e uma de cisalhamento direto inclinado. A Tabela 30 apresenta resultados de ensaios de rampa para as interfaces Ar15 x GG35 e Ar15 x Ar15, os resultados reportados por Aguiar (2003) com interfaces que utilizam silte (Si) e os de Rezende (2005) com interfaces que utilizam areia na DR=45%. A Tabela 31 apresenta os resultados para uma das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado utilizando a interface Ar15 x GMPL. Nestas tabelas os resultados utilizados na avaliação da acurácia do equipamento são apresentados em termos de ângulo de inclinação de plataforma de ensaios ( $\alpha$ ), tensão normal ( $\sigma$ ) e cisalhante ( $\tau$ ), razão entre as tensões principais ( $\tau/\sigma$ ) e ângulo de atrito secante ( $\phi_{\text{sec}}$ ). São apresentados, também, os valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados calculados a partir dos ângulos de atrito secante.

A média foi calculada por meio da expressão seguinte:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (21)$$

onde:

$\bar{X}$  = média aritmética;

$x_i$  = representa cada uma das n observações;

n = número de observações.

Por sua vez, o desvio padrão foi calculado igual a:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (22)$$

onde:

$S$  = desvio-padrão;

$\bar{X}$  = média aritmética;

$x_i$  = representa cada uma das  $n$  observações;

$n$  = número de observações.

O coeficiente de variação é o resultado da divisão do desvio-padrão pela média aritmética, cujo valor mostra o quão maior (ou menor) o desvio padrão é da média. O coeficiente de variação dá uma idéia da regularidade ou homogeneidade das amostras que estão sendo estudadas. Valores elevados, superiores a 100%, representam uma amostra com grande heterogeneidade e valores inferiores a 40% refletem homogeneidade da amostra (Andriotti, 2003).

Em relação aos ensaios de rampa, observa-se que o ângulo de atrito secante apresentou maiores variações nos conjuntos de ensaios Ar15 x GG35, configuração RP50Q-10 e Ar15 x GMCP, configuração RP100Q-5. Em relação aos ensaios de cisalhamento para interface Ar15 x GMPL, observa-se que a maior variação do ângulo de atrito secante ocorre para o conjunto de ensaios sob ação da menor tensão confinante.

Os maiores coeficientes de variação obtidos nestas duas situações são de 7%, ensaio de rampa, e 8,3%, ensaio de cisalhamento direto inclinado, sendo considerados toleráveis (Andriotti, 2003). Essa dispersão de resultados pode ser explicada pela rusticidade do sistema de aplicação de cargas do ensaio de cisalhamento direto inclinado e simplicidade da instrumentação utilizada no ensaio de rampa.

Tabela 31 - Ensaios utilizados na avaliação do desempenho do equipamento

Configuração	Interface	Ensaio	$\alpha$			Tensões na Ruptura			Média (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de Variação (%)
			(graus)	$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma$	$\phi_{sec}$ (graus)				
RP25Q-10	Ar15 x Ar15	1	23	1,47	0,95	0,65	32,9	33,1	0,48	1,45	
		2	23	1,47	0,95	0,65	32,9				
		3	23	1,47	0,95	0,65	32,9				
		4	23	1,47	0,95	0,65	32,9				
		5	24	1,45	0,99	0,68	34,1				
RP25Q-10	Ar15 x GG35	1	21	1,31	0,80	0,61	31,4	31,4	2,20	7,01	
		2	19	1,33	0,73	0,55	28,7				
		3	23	1,29	0,87	0,68	34,1				
RP50Q-10	Ar15 x Ar15	1	25	1,47	0,92	0,62	32,0	31,6	0,57	1,80	
		2	25	1,47	0,92	0,62	32,0				
		3	24	1,48	0,88	0,60	30,8				
RP50R-10	Ar15 x GG35	1	23	1,48	0,86	0,58	30,0	28,9	0,94	3,25	
		2	21	1,49	0,78	0,52	27,7				
		3	22	1,48	0,82	0,55	28,9				

Tabela 31 (cont.) - Ensaios utilizados na avaliação do desempenho do equipamento

Configuração	Interface	Ensaio	α			Tensões na Ruptura			Média (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de Variação (%)
			(graus)	σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ	φ <sub>sec.</sub> (graus)				
RP100Q-5	Ar45 x GMPC	1	22	1,90	0,86	0,45	24,3	24,3	0,00	0,00	
		2	22	1,90	0,86	0,45	24,3				
		3	22	1,90	0,86	0,45	24,3				
RP100Q-5	Ar45 x GMPC	1	21	3,02	1,24	0,41	22,4	24,1	1,29	5,35	
		2	23	2,98	1,36	0,46	24,5				
		3	24	2,96	1,41	0,48	25,5				
RP100Q-5	Si100 x GT30	1	37	0,74	0,70	0,95	43,4	43,3	1,18	2,73	
		2	37	0,74	0,70	0,95	43,4				
		3	39	0,72	0,73	1,02	45,5				
		4	36	0,75	0,68	0,91	42,4				
		5	37	0,74	0,70	0,95	43,4				
		6	35	0,76	0,67	0,88	41,3				
		7	37	0,74	0,70	0,95	43,4				
RP100Q-5	Si100 x Si100	1	52	0,57	0,92	1,61	58,1	55,9	1,58	2,83	
		2	49	0,61	0,88	1,45	55,3				
		3	48	0,62	0,86	1,40	54,4				

Tabela 31 (cont.) - Ensaios utilizados na avaliação do desempenho do equipamento

Configuração	Interface	Ensaio	$\alpha$ (graus)	Tensões na Ruptura			Média (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de Variação (%)
				$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma$			
RP100Q-5	Si100 x Si100	1	43	3,29	3,23	0,98	44,5	1,46	3,36
		2	43	3,29	3,23	0,98	44,5		
		3	40	3,45	3,04	0,88	41,4		
RP100Q-5	Si100 x GG55	1	45	0,65	0,82	1,26	51,5	0,94	1,87
		2	43	0,68	0,79	1,17	49,5		
		3	43	0,68	0,79	1,17	49,5		
RP100Q-5	Si100 x GG55	1	44	3,24	3,29	1,02	45,5	1,46	3,28
		2	44	3,24	3,29	1,02	45,5		
		3	41	3,39	3,10	0,91	42,4		
RP100Q-5	Si100 x GMCP	1	33	0,78	0,63	0,82	39,2	0,99	2,48
		2	35	0,76	0,67	0,88	41,3		
		3	33	0,78	0,63	0,82	39,2		
RP100Q-5	Si100 x GMCP	1	31	3,85	2,44	0,63	32,3	0,82	2,46
		2	33	3,77	2,58	0,68	34,3		
		3	32	3,81	2,51	0,66	33,3		

Tabela 31 (cont.) - Ensaios utilizados na avaliação do desempenho do equipamento

Configuração	Interface	Ensaio	$\alpha$ (graus)	Tensões na Ruptura			$\phi_{sec}$ (graus)	Média (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de Variação (%)
				$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma$				
RP100Q-10	Ar15 x Ar15	1	26	1,45	0,87	0,60	30,9	31,3	0,52	1,66
		2	27	1,44	0,90	0,63	32,0			
		3	26	1,45	0,87	0,60	30,9			
RP100Q-10	Ar15 x GG35	1	26	1,45	0,87	0,60	30,9	31,6	0,52	1,65
		2	27	1,44	0,90	0,63	32,0			
		3	27	1,44	0,90	0,63	32,0			
CI25Q-10	Ar15 x GMPL	1	0	1,80	0,51	0,28	15,8	17,8	1,48	8,31
		2	0	1,80	0,60	0,33	18,4			
		3	0	1,80	0,63	0,35	19,3			
CI25Q-10	Ar15 x GMPL	1	0	8,41	2,76	0,33	18,2	18,1	0,14	0,77
		2	0	8,41	2,76	0,33	18,2			
		3	0	8,41	2,72	0,32	17,9			

#### 6.4. Influência das Dimensões das Caixas de Ensaio

Os resultados dos ensaios podem ser influenciados pelas características do equipamento (Figura 182), tais como tamanho da área de contato da amostra, forma da área de contato da amostra, altura de solo no interior da caixa de ensaio e o sistema de confinamento. Nesta pesquisa, o sistema de confinamento é sempre por gravidade e, portanto, somente a geometria das caixas pode influenciar os resultados dos ensaios.

Para avaliar a influência da geometria das caixas de ensaio sobre os resultados, adotou-se o seguinte procedimento: variou-se a dimensão em estudo, mantendo-se as demais dimensões constantes.

Esta avaliação teve como objetivo otimizar o uso do equipamento, ou seja, usar o menor tamanho possível de caixa de ensaio desde que não comprometesse os resultados.

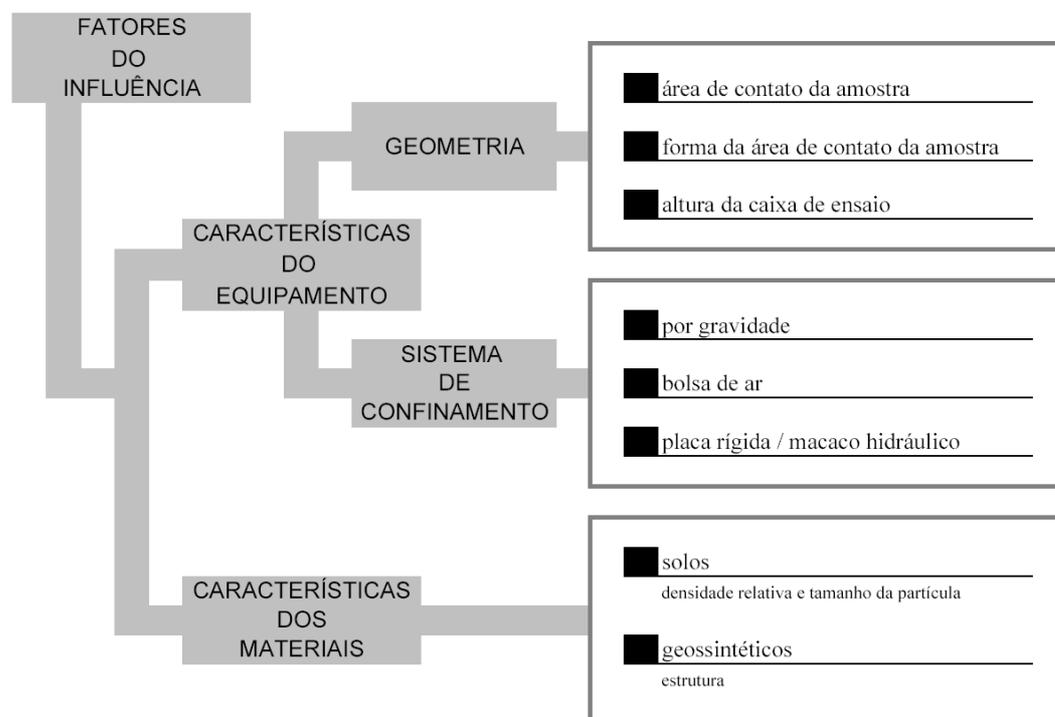


Figura 182 - Fatores que influenciam os resultados dos ensaios.

#### 6.4.1.

#### Variação da Espessura de Solo no Interior das Caixas de Ensaio

A variação da espessura de solo no interior das caixas de ensaio foi realizada somente nos ensaios de rampa, entretanto também se aplica ao ensaio de cisalhamento direto inclinado. 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, sendo o seu efeito mais evidente em equipamentos de pequenas dimensões. Os autores sugerem que esta razão seja de no mínimo 20, pois menores valores poderiam comprometer os resultados dos ensaios.

A formulação analítica, descrita no Item 3.2.3, foi aplicada nas cinco configurações de ensaio de rampa e os resultados foram expressos na forma de ábacos. No topo do ábaco encontram-se pequenas tabelas com a espessura de solo  $h$  (cm), a razão comprimento da caixa superior de ensaio *vs* espessura de solo e as tensões normal média, máxima e mínima unitárias ao longo da interface para os ângulos de 0, 15, 30 e 45 graus. Estes valores são plotados na forma de curvas comprimento normalizado *vs* tensão normal unitária.

A Figura 183 apresenta os ábacos para a configuração de ensaios de rampa RP25Q-10. As retas em vermelho indicam que, para cada inclinação, a espessura de solo acarreta uma diferença considerável de tensão entre a frente e a traseira da caixa de ensaio, que pode comprometer o resultado do ensaio.

O Apêndice IX apresenta o mesmo estudo para as outras configurações de ensaio de rampa.

Para estudar a influência desta relação, realizou-se uma série de ensaios variando-se a espessura de solo no interior da caixa de ensaio conforme a Figura 184.

h = 2,50 cm				h = 5,00 cm				h = 7,50 cm				h = 10,0 cm			
	d/h	20,0			d/h	10,0			d/h	6,67			d/h	5,00	
$\alpha$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\text{med}}$	$\sigma_{\min}$												
0	1,00	1,00	1,00	0	1,00	1,00	1,00	0	1,00	1,00	1,00	0	1,00	1,00	1,00
15	1,00	0,97	0,93	15	1,04	0,97	0,89	15	1,08	0,97	0,85	15	1,12	0,97	0,81
30	0,94	0,87	0,79	30	1,02	0,87	0,72	30	1,09	0,87	0,64	30	1,17	0,87	0,57
45	0,81	0,71	0,60	45	0,92	0,71	0,50	45	1,03	0,71	0,39	45	1,13	0,71	0,28

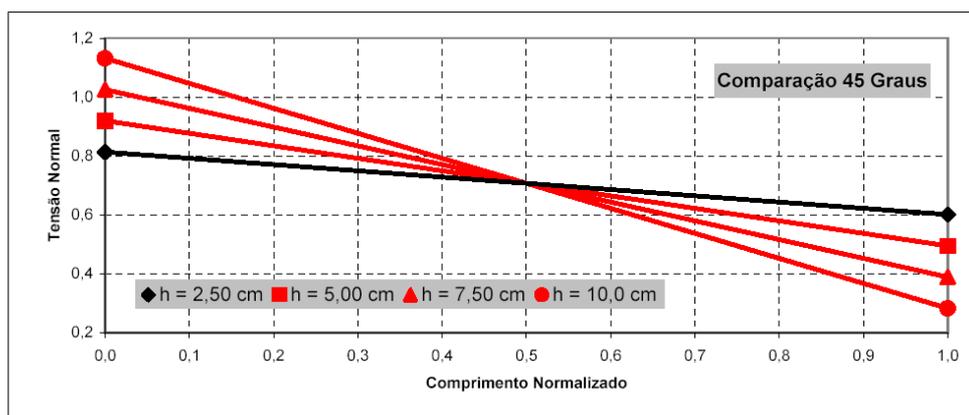
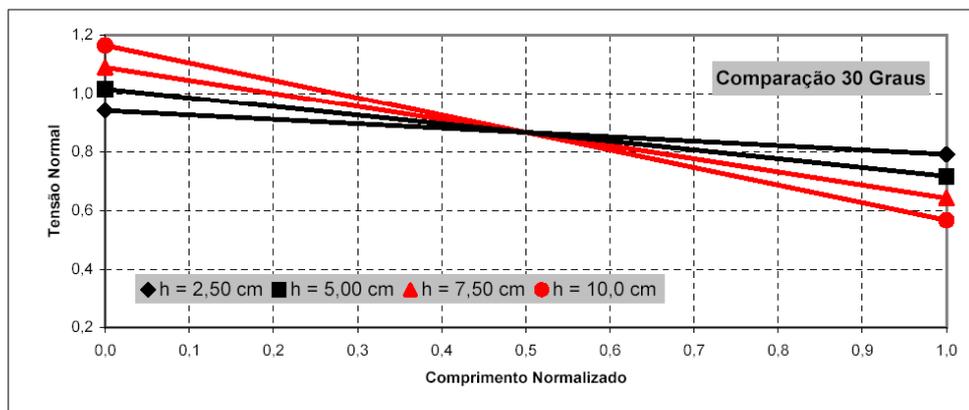
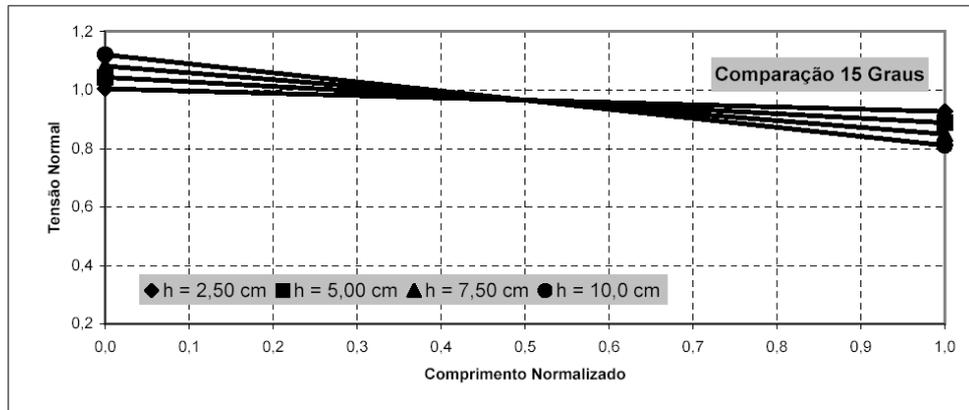


Figura 183 - Distribuição de tensões para a configuração de ensaio de rampa RP25Q-10.

Para esse estudo foram utilizadas as configurações de ensaio de rampa RP25Q-10 e RP50R-10. As configurações de RP100Q-5 e RP100Q-10 foram projetadas e construídas seguindo as recomendações de Melo *et al.* (2003) e Palmeira *et al.* (2002) e não serão utilizadas. Além disso, estas configurações

apresentam a mesma relação comprimento vs altura da configuração RP50R-10. A configuração RP50Q-10 não foi utilizada, visto que ela representa uma condição intermediária entre a RP25Q-10, mais crítica, e RP50R-10, menos crítica, no que se refere a distribuição de tensões ao longo da interface. A Tabela 32 apresenta as envoltórias analisadas para avaliar a influência da relação comprimento vs altura.

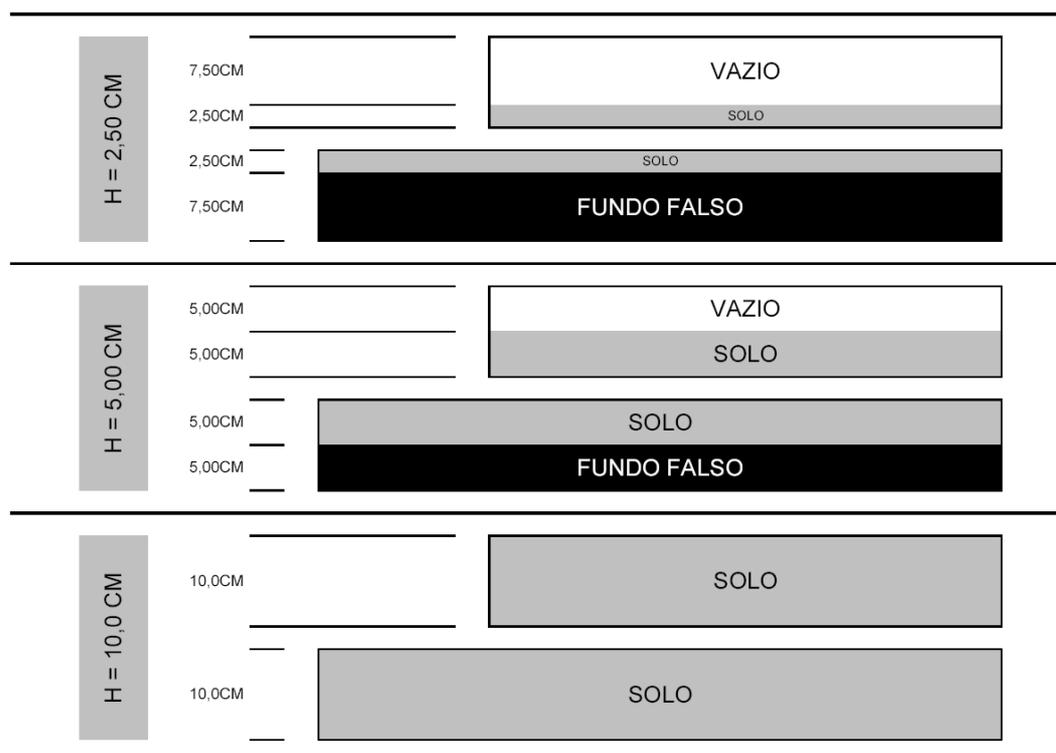


Figura 184 - Variação da altura de solo na caixa de ensaio - Configuração RP25Q-10.

Tabela 32 - Programa de ensaios para estudo da razão comprimento vs altura

Configuração	Espessura da		Relação	Interfaces	
	camada de solo h (cm)	L/h			
RP25Q-10	2,50	20	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	Ar15 x GMPL
	5,00	10	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	Ar15 x GMPL
	10,0	5	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	Ar15 x GMPL
RP50R-10	5,00	20	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	Ar15 x GMPL
	10,0	10	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	~

Nota: L = comprimento da interface (configuração RP25Q-10 L = 50cm, configuração RP50Q-10 L = 100cm)

A partir dos resultados obtidos para as interfaces solo-solo (Figuras 185 a 186), constatou-se que o aumento da espessura da camada de solo provocou um aumento do ângulo de atrito de interface, igual  $0,3^\circ$  de  $h=2,5\text{cm}$  para  $h=5,0\text{cm}$  e de  $4,4^\circ$  de  $h=5,0\text{cm}$  para  $h=10\text{cm}$  (configuração de ensaio RP25Q-10). Comparando-se os valores obtidos nos ensaios  $h=2,5\text{cm}$  e  $h=10\text{cm}$  constata-se uma diferença de  $4,7^\circ$ . Para a configuração RP50R-10, a diferença foi de  $6,1^\circ$  entre a menor e maior espessura.

É importante notar que os ensaios realizados para a obtenção das envoltórias com  $h=2,5\text{cm}$  (RP25Q-10) e  $h=5,0\text{cm}$  (RP50R-10) respeitaram o limite de distribuição da tensão normal sugerido por Palmeira *et al.* (2002). Ao contrário dos ensaios com  $h=10\text{cm}$  (RP25Q-10) que ficaram comprometidos por não apresentar a distribuição de tensões recomendada. Além disso, os ensaios com tensões confinantes mais altas não respeitam o limite de utilização imposto pelo sistema de confinamento (Item 4.6 do Capítulo 4).

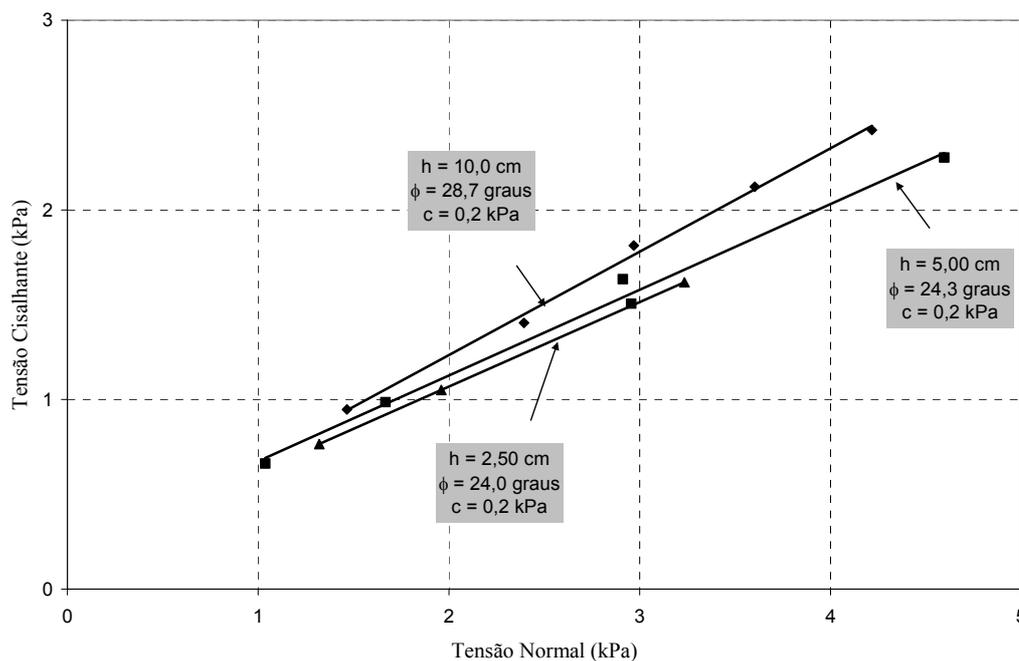


Figura 185 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x Ar15.

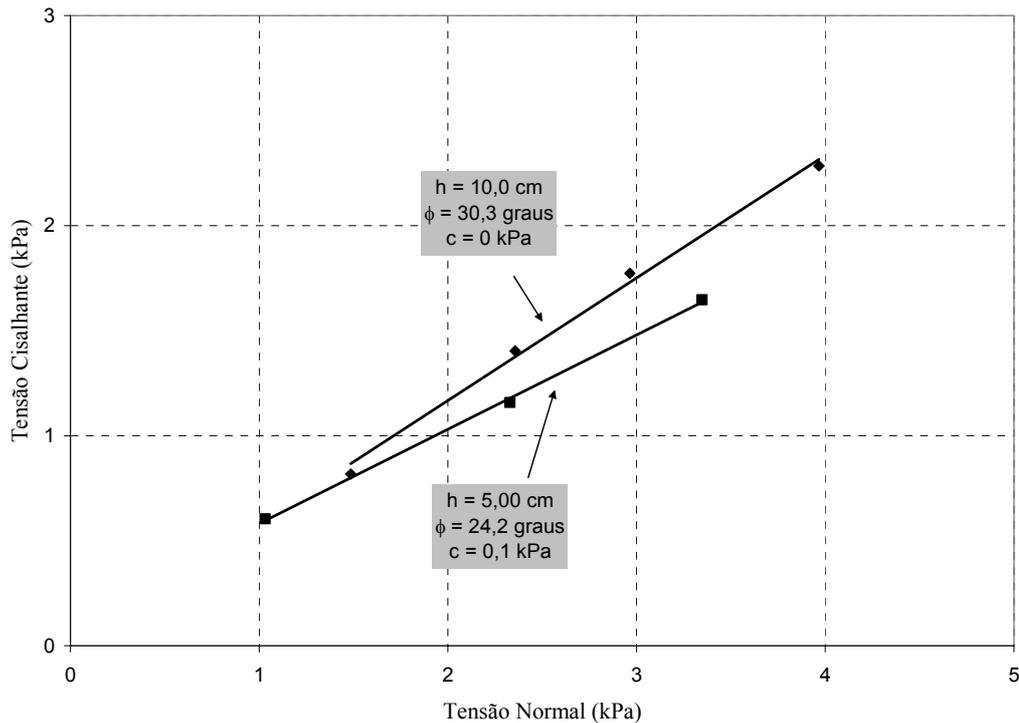


Figura 186 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP50Q-10, interfaces Ar15 x Ar15.

Utilizando a condição ideal de ensaio (Figura 187), relação comprimento da caixa de ensaio vs espessura de solo igual ou superior a 20, ou seja,  $h=2,5\text{cm}$  (RP25Q-10) e  $h=5,0\text{cm}$  (RP50R-10), constata-se que os valores de ângulo de atrito obtidos são praticamente idênticos. Isso pode ser considerado um indicativo de que a redução do tamanho da caixa de ensaio, respeitando-se os limites de utilização, pode fornecer bons resultados.

Nas Figuras 188 e 189 são apresentados os resultados para interfaces solo-geogrelha. O comportamento é semelhante ao observado para as interfaces solo-solo. A variação do ângulo de atrito de interface é muito reduzida para as espessuras de 2,5 e 5,0cm (RP25Q-10). Porém, para a espessura de 10cm, ela é superior a  $2,7^\circ$ . Para a configuração RP50R-10, a diferença entre a menor e a maior espessura foi de  $2,6^\circ$ . A explicação para este comportamento é análoga a das interfaces solo-solo, ou seja, a envoltória de resistência foi obtida de ensaios com espessuras de 10cm que não respeitam nem o limite de distribuição de tensões e nem o limite de utilização do sistema de confinamento (Item 4.7 do Capítulo 4).

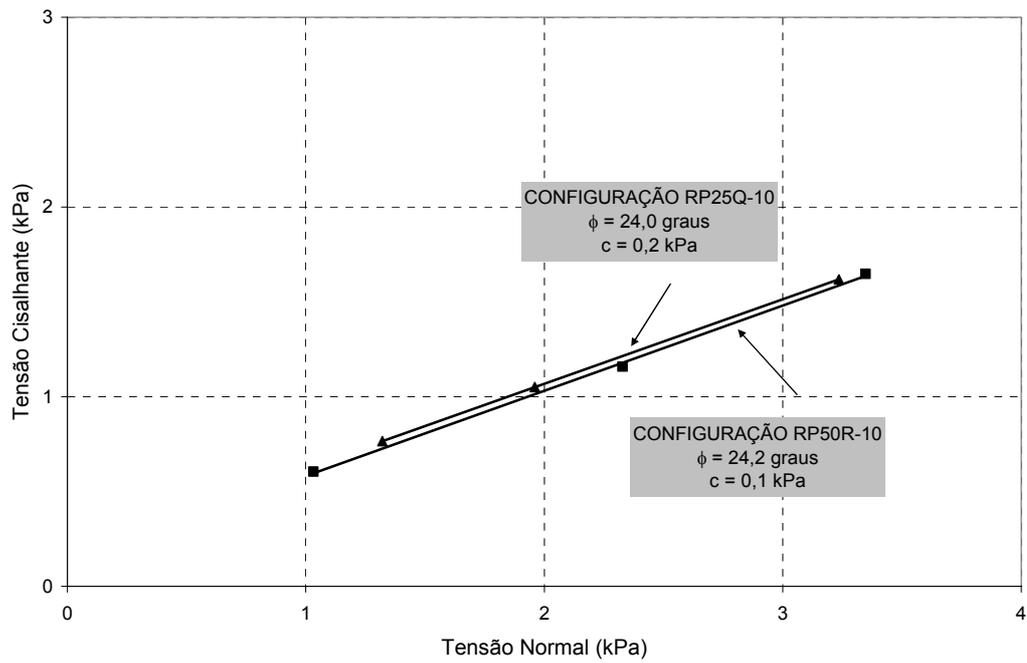


Figura 187 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação  $L/h = 20$ , interfaces Ar15 x Ar15.

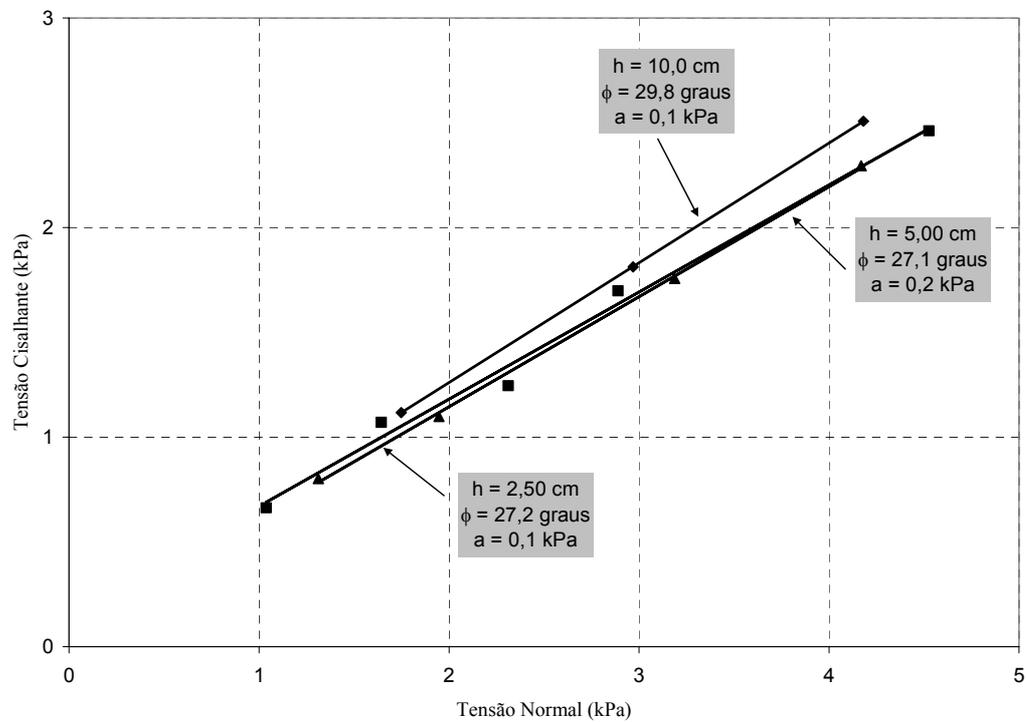


Figura 188 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x GG35.

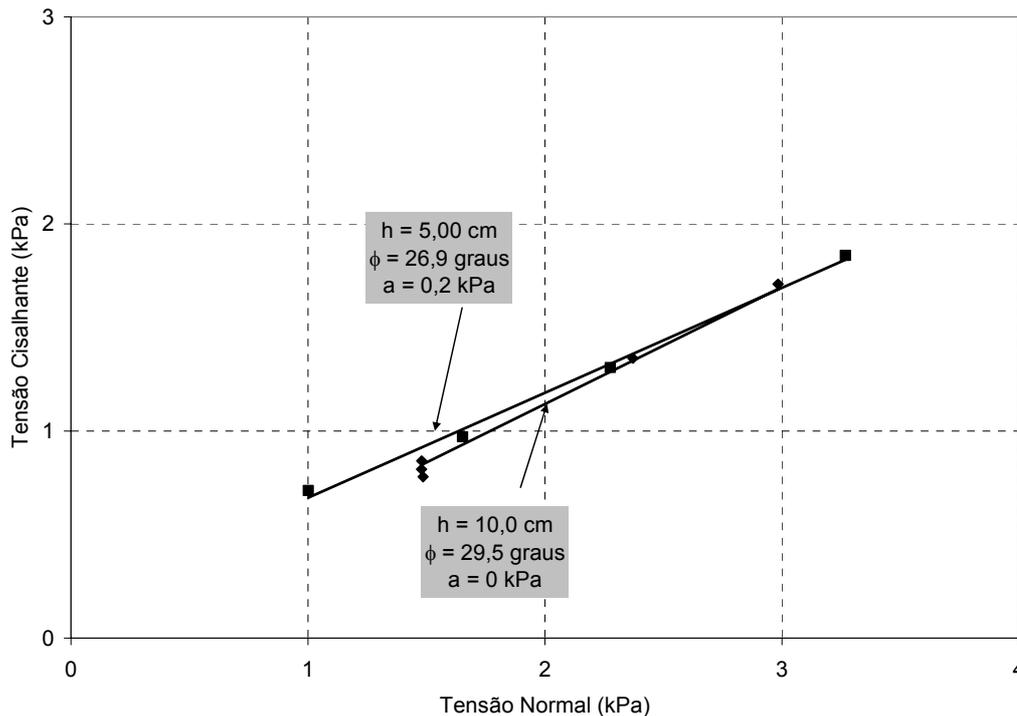


Figura 189 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP50R-10, interfaces Ar15 x GG35.

Analisando-se a condição ideal de ensaio representada na Figura 190, com relação comprimento da caixa de ensaio vs espessura de solo igual ou superior a 20, ou seja,  $h=2,5\text{cm}$  (RP25Q-10) e  $h=5,0\text{cm}$  (RP50R-10), constata-se que os valores de ângulo de atrito obtidos são praticamente idênticos. Da mesma forma que as interfaces solo-solo, este fato pode ser considerado um indicativo de que a redução do tamanho da caixa de ensaio, respeitando-se os limites de utilização, pode fornecer bons resultados.

As Figuras 191 e 192 apresentam os resultados para interfaces solo-geomembrana. Independente da espessura e configuração de ensaio, o ângulo de atrito de interface obtido é sempre igual  $9^\circ$ . A justificativa para este comportamento esta relacionada à estrutura da geomembrana que apresenta superfície lisa e polida. Estas características induzem uma baixa resistência de interface que, invariavelmente, rompe a ângulos de rampa inferiores a  $9^\circ$ . Para este ângulo não existem restrições de distribuição de tensões e limite de utilização do sistema de confinamento. Desta forma todos os ensaios realizados para diferentes espessuras e configurações são válidos.

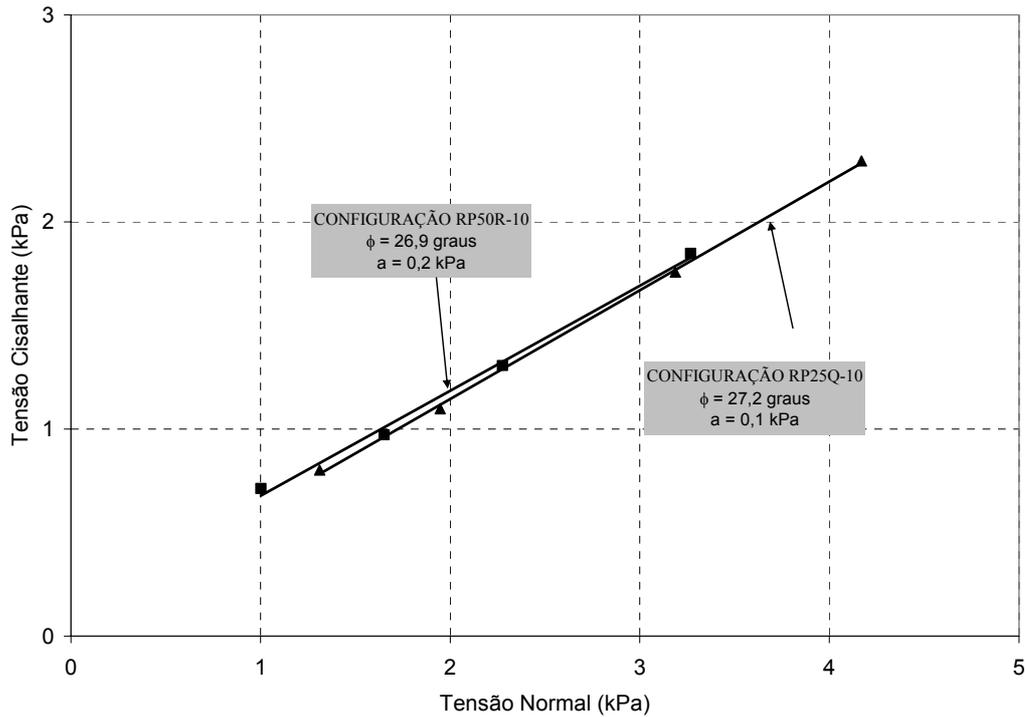


Figura 190 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação  $L/h = 20$ , interfaces Ar15 x GG35.

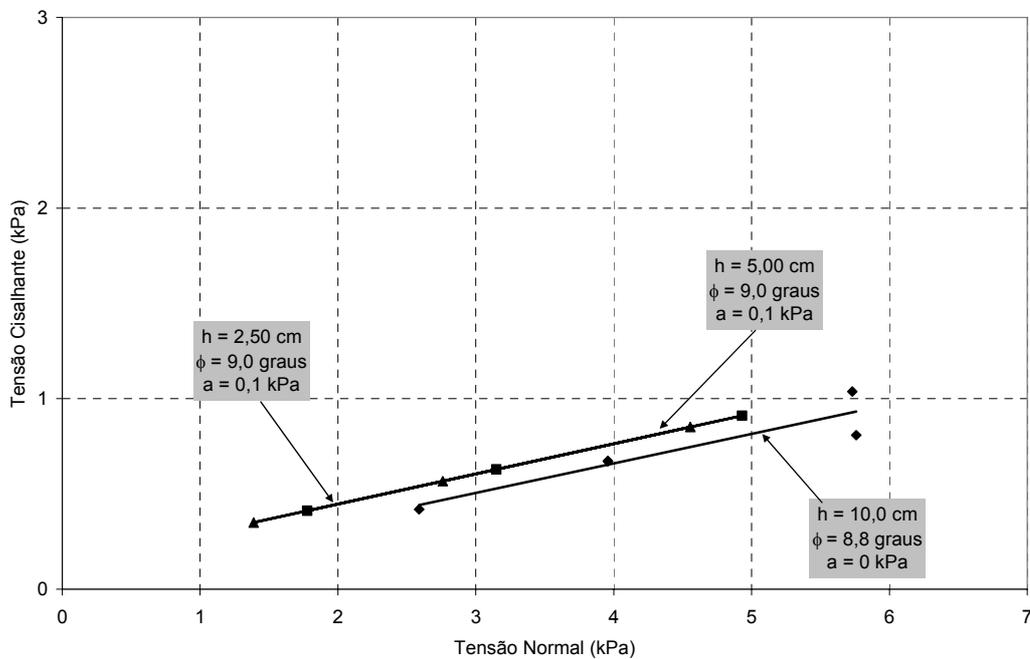


Figura 191 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x GMPL.

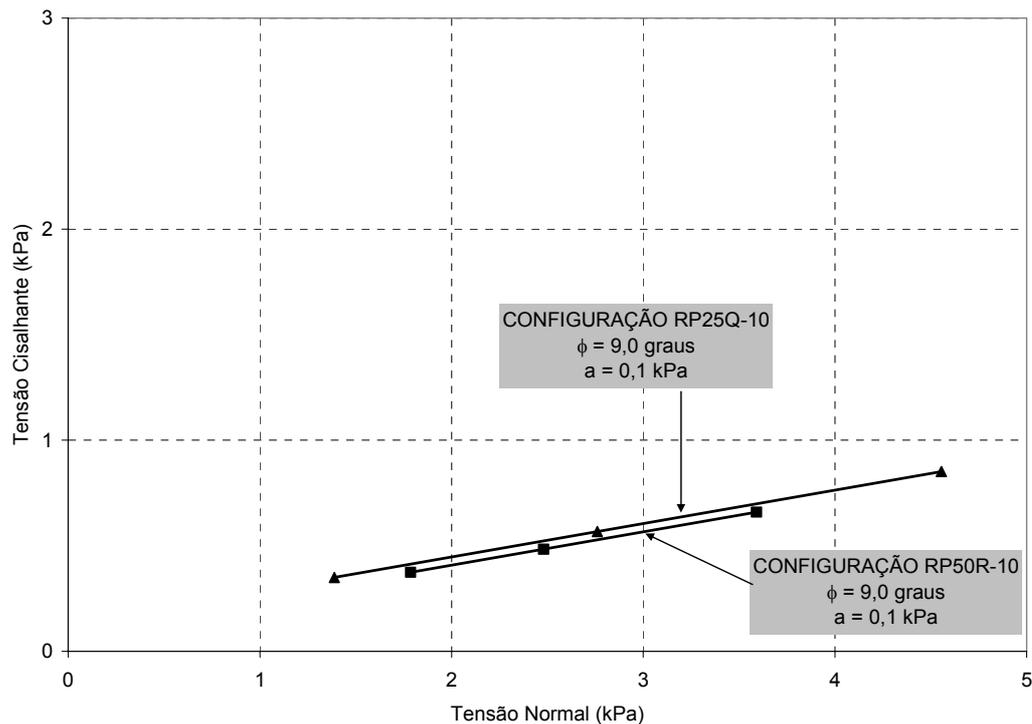


Figura 192 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação  $L/h = 20$ , interfaces Ar15 x GMPL.

A Tabela 33 apresenta os parâmetros de interfaces obtidos neste estudo. Observa-se, que para as interfaces areia-areia e areia-geogrelha, que o aumento da espessura da camada de solo induz um aumento do ângulo de atrito de interface. Este aumento se deve ao uso incorreto do equipamento, ou seja, os limites de distribuição de tensões e utilização do sistema de confinamento não foram respeitados. A consequência é o travamento da caixa superior, acarretando o aumento do ângulo de rampa e, por sua vez, o aumento do ângulo de atrito de interface.

As interfaces com geomembrana apresentaram um comportamento diferente. Independente do tamanho da caixa de ensaio e espessura da camada de solo estas interfaces apresentam sempre o mesmo comportamento, rompendo a baixos ângulos de rampa. Consequentemente, os limites da distribuição de tensões e restrição do sistema de confinamento não são atingidos. Este comportamento da geomembrana se deve às características de sua superfície, lisa e polida.

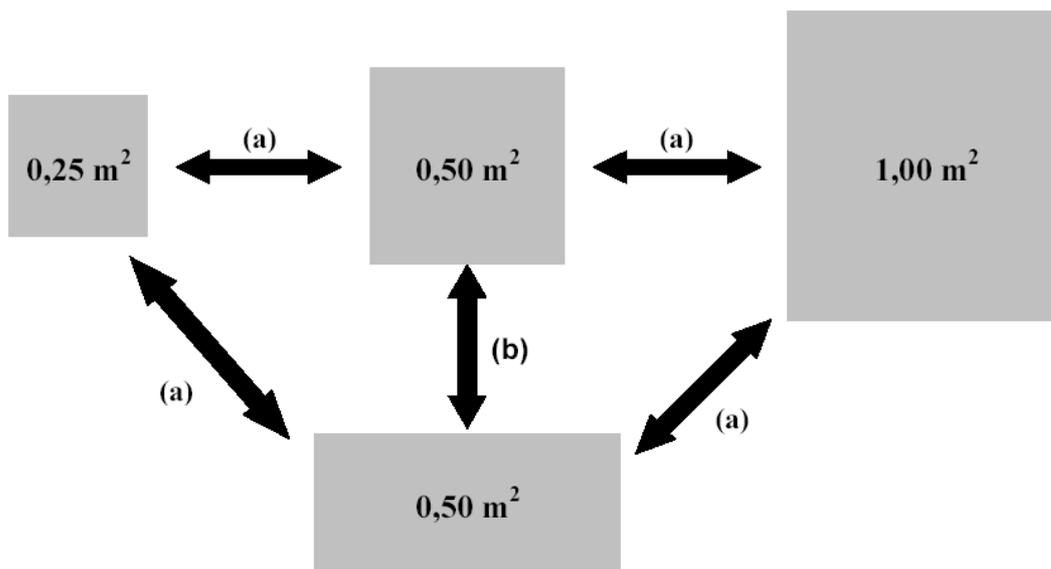
Tabela 33 - Parâmetros de interface obtidos no estudo da influência da relação L/hL

Configuração	Espessura da camada de solo h (cm)	Relação L/h	Interfaces					
			Ar15 x Ar15		Ar15 x GG35		Ar15 x GMPL	
			$\phi$ (°)	a (kPa)	$\phi$ (°)	a (kPa)	$\phi$ (°)	a (kPa)
RP25Q-10	2,50	20	24,0	0,2	27,2	0,1	9,0	0,1
	5,00	10	24,3	0,2	27,1	0,2	9,0	0,1
	10,0	5	28,7	0,2	29,8	0,1	8,8	0,0
RP50R-10	5,00	20	24,2	0,1	26,9	0,2	9,0	0,1
	10,0	10	30,3	0,0	29,5	0,0	~	~

Obs.: L = comprimento da interface; RP25Q-10 L=50cm e RP50R-10 L=100cm.

#### 6.4.2. Variação da Área de Contato

A variação da área de contato pode ser de duas formas: redução (ou aumento) da área de contato mantendo a forma fixa ou alteração da forma mantendo-se a área fixa (Figura 193).



(a) aumento ou diminuição da área de contato

(b) mudança da forma da área de contato

Figura 193 - Variação da forma e tamanho da área de contato.

A avaliação da influência da variação do tamanho e forma da área de contato foi feita para os ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado.

### Ensaio de Rampa

A influência da forma e dimensões em ensaios de rampa foi avaliada em duas partes. Na primeira realizou-se uma comparação em termos de ângulo de atrito secante médio englobando as quatro novas configurações de ensaio de rampa e somente interfaces Ar15 x Ar15. Todos os ensaios utilizados apresentam espessura de solo de 10cm, mesma densidade relativa e submetidos a uma tensão confinante de 1,6kPa. Os resultados são apresentados na Tabela 34 e Figura 194.

Observa-se para as interfaces solo-solo que o aumento da área de contato de 0,25 para 0,50m<sup>2</sup> acarreta uma diminuição do ângulo de atrito secante de 1,5°. Entretanto, o aumento da área de 0,5 para 1,0m<sup>2</sup>, ou a mudança da forma da área de contato, não influencia significativamente o valor do ângulo de atrito secante (Figura 194).

Os resultados dos ensaios areia-areia para a configuração RP25Q-10 não respeitam o limite de distribuição de tensões, pois apresentam uma relação comprimento da caixa vs altura igual a 5. O não respeito desta condição acarreta no travamento da caixa de ensaio por excesso de concentração de tensões na parte frontal e o conseqüente aumento do valor do ângulo de rampa.

Para as outras configurações, os valores de ângulo de atrito secante foram parecidos. Esse resultado era esperado, pois estes conjuntos de ensaios não sofrem influência das condições de contorno do equipamento, tais como distribuição de tensões e limite de utilização do sistema de confinamento.

É importante ressaltar que todos estes ensaios respeitaram os limites impostos quanto à relação diâmetro da partícula / espessura da camada de solo e a relação abertura da malha da geogrelha / dimensões internas da caixa de ensaio apresentadas no Capítulo 3.

Tabela 34 - Ensaio de rampa para avaliação da influência das dimensões do equipamento nos resultados

Interface	Configuração	Ensaio	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	Tensões na Ruptura			$\phi_{\text{sec}}$ ( $^{\circ}$ )	Média ( $^{\circ}$ )
				$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma$		
Ar15xAr15	RP25Q-10	1	23	1,47	0,95	0,65	32,9	33,1
		2	23	1,47	0,95	0,65	32,9	
		3	23	1,47	0,95	0,65	32,9	
		4	23	1,47	0,95	0,65	32,9	
		5	24	1,45	0,99	0,68	34,1	
	RP50Q-10	1	25	1,47	0,92	0,62	32,0	31,6
		2	25	1,47	0,92	0,62	32,0	
		3	24	1,48	0,88	0,60	30,8	
	RP50R-10	1	24	1,46	0,89	0,61	31,2	31,2
	RP100Q-10	1	26	1,45	0,87	0,60	30,9	31,3
2		27	1,44	0,90	0,63	32,0		
3		26	1,45	0,87	0,60	30,9		

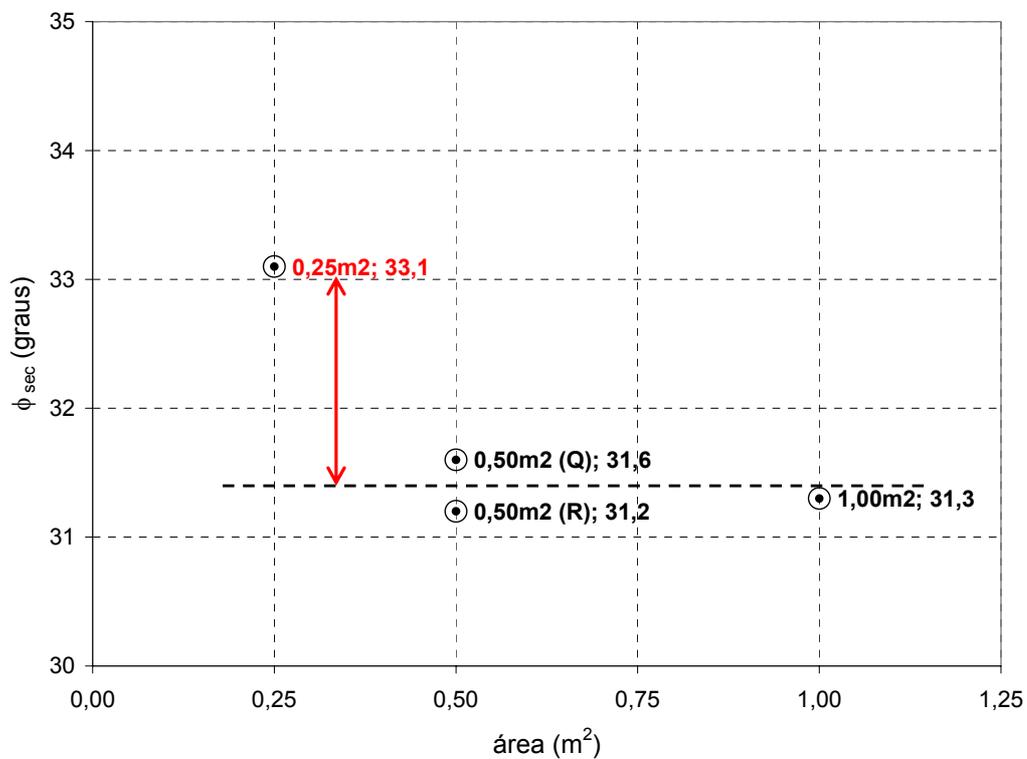


Figura 194 - Comparação dos resultados de ensaios de rampa, em termos de ângulo de atrito secante, para interfaces solo-solo.

A segunda parte da avaliação da influência da forma e dimensões das caixas consistiu em comparar as envoltórias de resistência obtidas para interfaces solo-solo e solo-geossintético empregando as configurações de ensaio RP25Q-10 ( $0,25\text{m}^2$ ) e RP50R-10 ( $0,50\text{m}^2$ ). Neste caso foi avaliado, somente, o efeito de aumento da área de contato (Figuras 195 a 197). Os ensaios utilizados nesta comparação seguiram as recomendações do Item 6.4.1 no que diz respeito à relação comprimento / altura das caixas de ensaio.

Independente da interface observa-se que a diminuição da área de contato pouco altera o valor do ângulo de atrito de interface. A variação foi de  $0,2^\circ$  para a interface areia-areia,  $0,3^\circ$  para a interface areia-geogrelha e  $0^\circ$  para a areia-geomembrana. Conclui-se então que a redução da área de contato não altera o valor do ângulo de interface. Desta forma, a utilização da configuração RP25Q-10 pode ser empregada sem restrições nos demais estudos desta pesquisa.

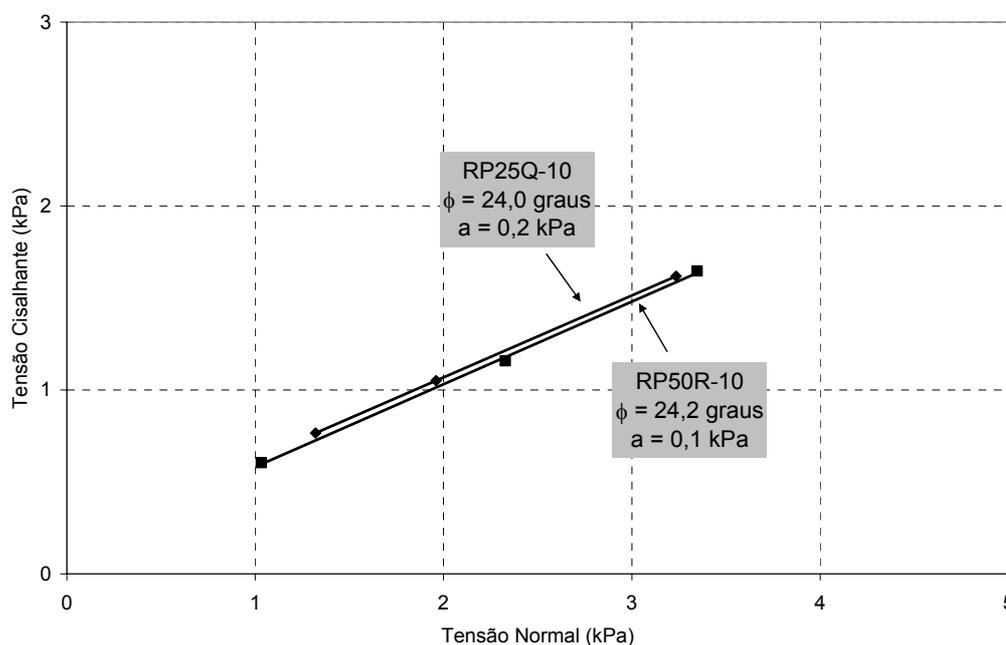


Figura 195 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência.

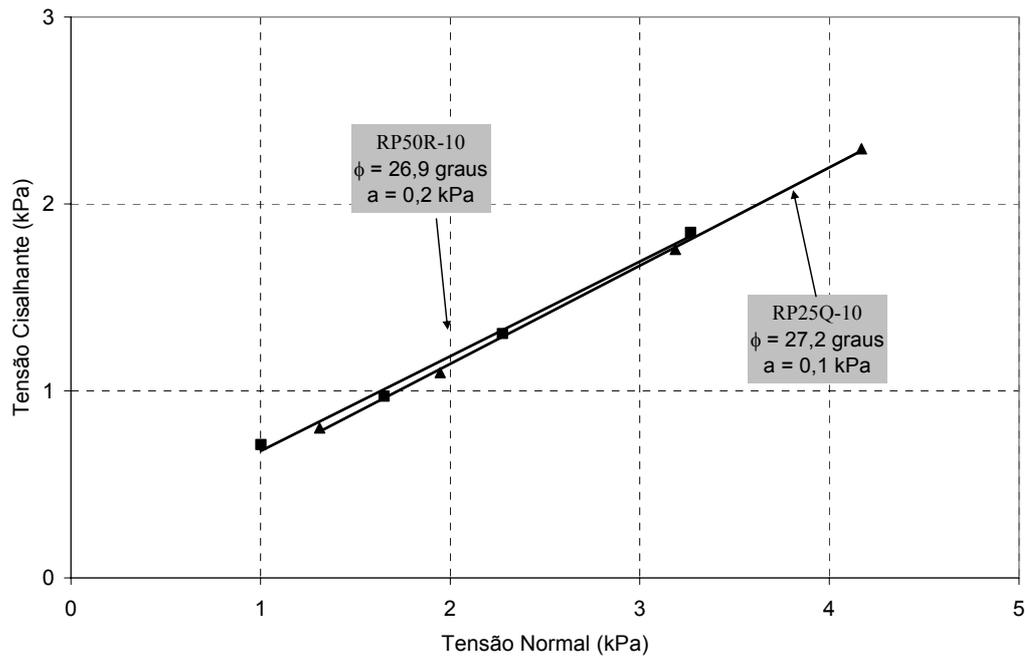


Figura 196 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência.

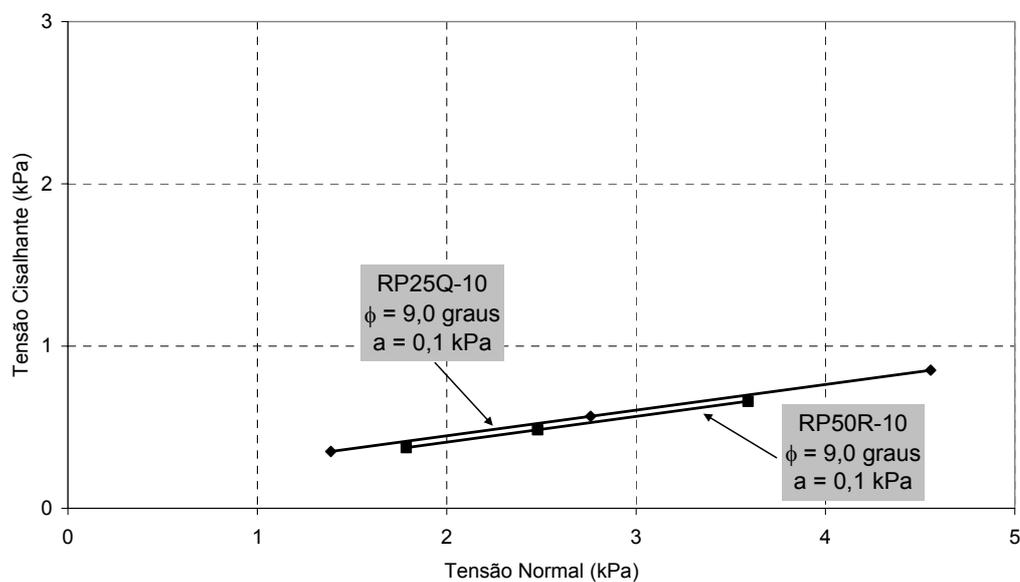


Figura 197 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-geomembrana em termos de envoltória de resistência.

### Ensaio de Cisalhamento Direto

De maneira análoga ao estudo feito para o ensaio de rampa, empregaram-se duas configurações de ensaio de cisalhamento para analisar o efeito da redução da área de contato nos parâmetros obtidos (Figuras 198 a 202).

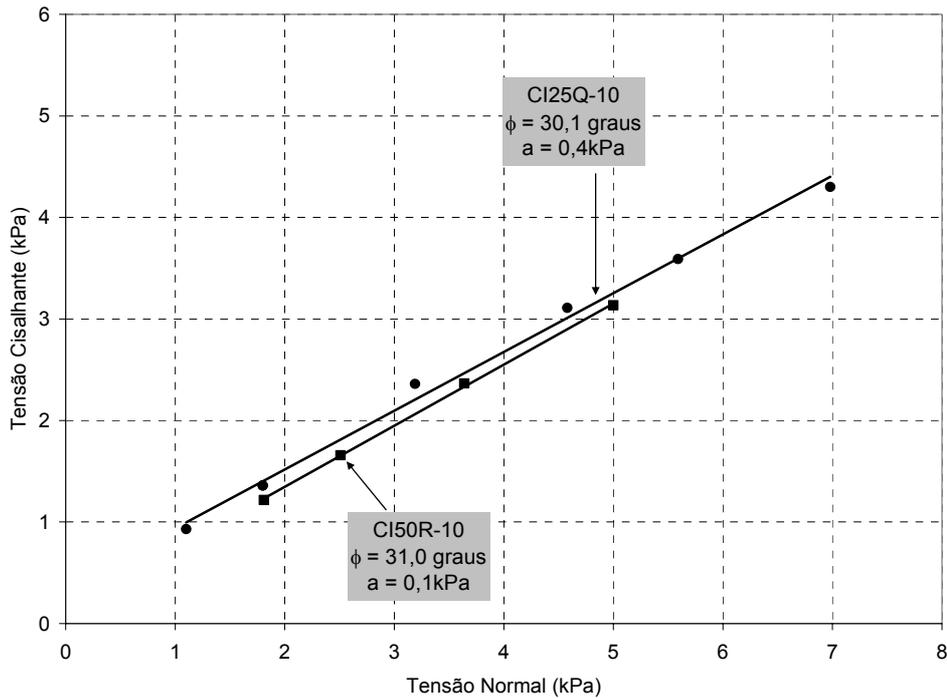


Figura 198 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência.

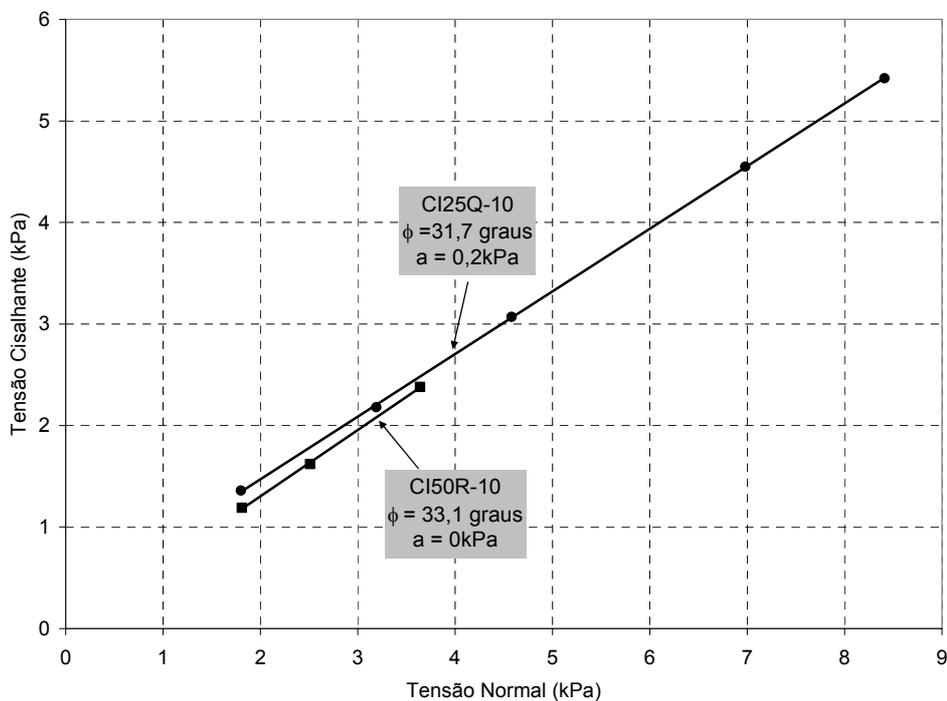


Figura 199 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência.

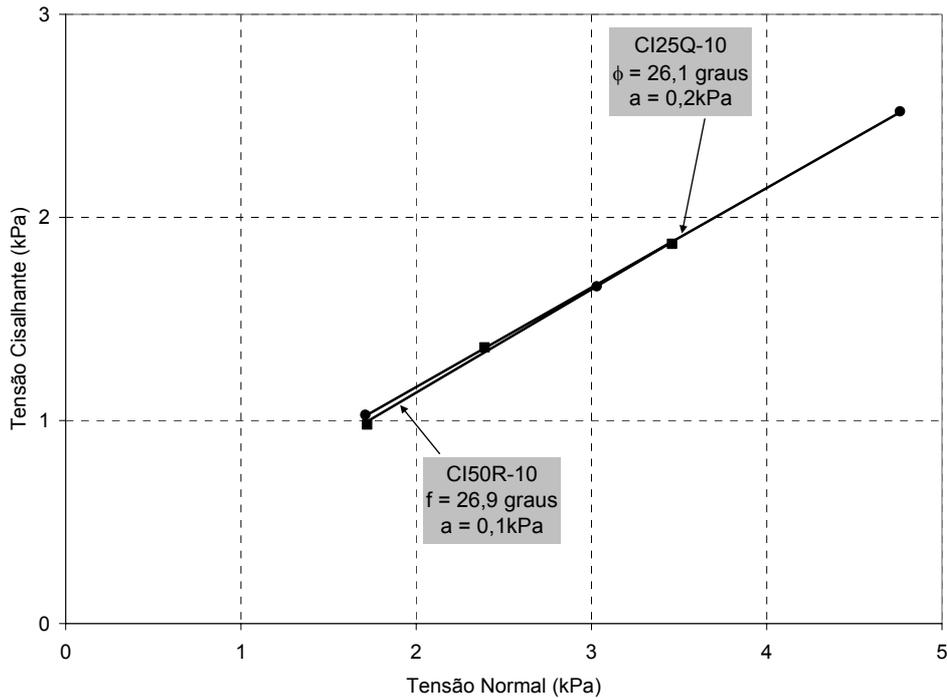


Figura 200 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 18°.

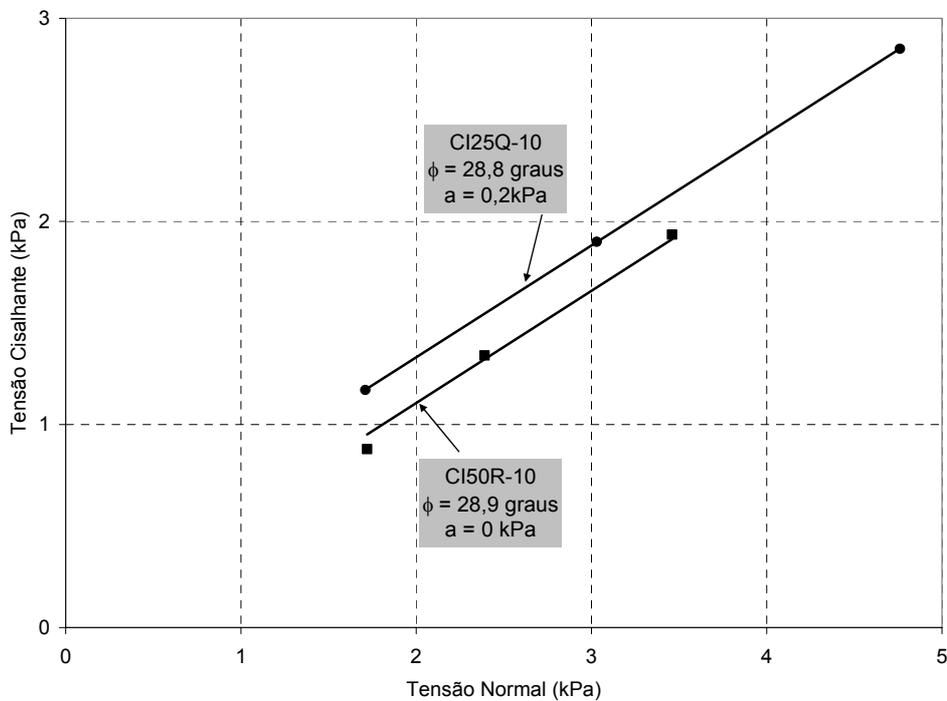


Figura 201 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 18°.

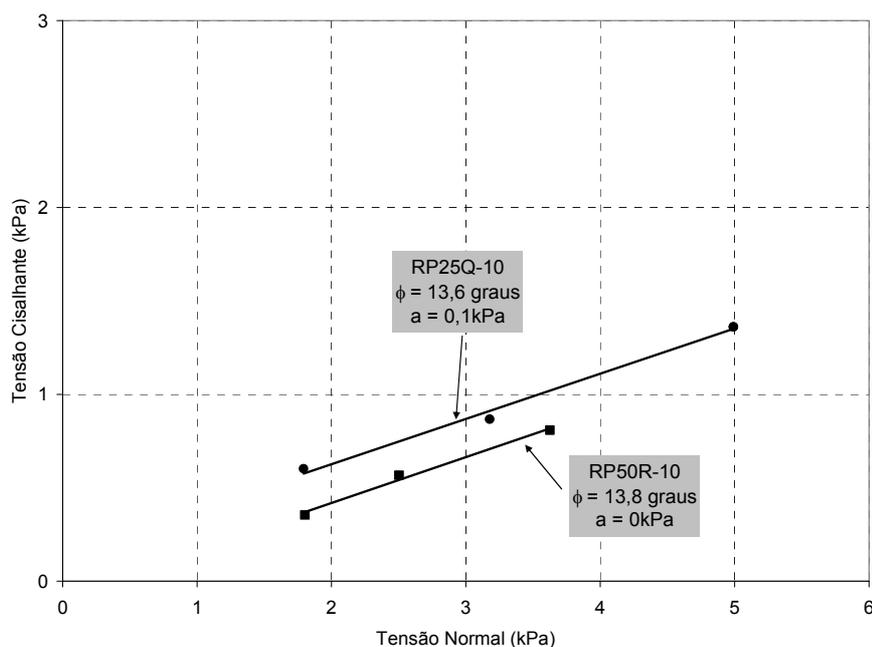


Figura 202 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geomembrana em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 4,5°.

A Tabela 35 apresenta um resumo dos resultados destes ensaios. Apesar das diferenças entre os valores dos parâmetros obtidos pelas duas configurações ser um pouco maior a conclusão é a mesma dos ensaios de rampa. A utilização da configuração de ensaio com caixa menor não compromete os resultados. Desta forma, a utilização da configuração CI25Q-10 pode ser empregada sem restrições nos demais estudos da pesquisa.

Tabela 35 - Resumo dos resultados para os ensaios de cisalhamento

Inclinação (°)	Configuração	Interface					
		Ar15 x Ar15		Ar15 x GG35		Ar15 x GMPL	
		$\phi$ (°)	c (kPa)	$\phi$ (°)	a (kPa)	$\phi$ (°)	a (kPa)
0	CI25Q-10	30,1	0,4	31,7	0,2	~	~
	CI50R-10	31,0	0,1	33,1	0,0	~	~
4,5	CI25Q-10	~	~	~	~	13,6	0,1
	CI50R-10	~	~	~	~	13,8	0,0
18	CI25Q-10	26,1	0,2	28,8	0,2	~	~
	CI50R-10	26,9	0,1	28,9	0,0	~	~

### 6.5. Influência da Metodologia de Ensaio

Para avaliar a influência da metodologia de ensaio foram comparadas as envoltórias de ruptura de ensaios de rampa para as interfaces areia-areia, areia-geogrelha e areia-geomembrana com densidade relativa de 15% (Tabela 36 e Figuras 203 a 205).

Conforme mencionado anteriormente, o equipamento possibilita a realização de ensaios de rampa com faces normais ou inclinadas (Figura 206). A vantagem da utilização das faces inclinadas é ter, no momento da ruptura, uma melhor distribuição da tensão normal.

Tabela 36 - Resultados dos ensaios de rampa com faces normais e inclinadas para as interfaces solo-solo, solo-geogrelha e solo-geomembrana

Interface	Metodologia	$\sigma_n$ (kPa)	$\delta_{rup}$ (mm)	$\alpha_{rup}$ (graus)	Tensões na Ruptura			$\phi_{sec}$ (graus)
					$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma$	
Ar15xAr15	V (0°)	1,4	9,8	20	1,32	0,77	0,58	30,1
		2,1	6,5	21	1,96	1,05	0,54	28,2
		3,5	3,0	22	3,23	1,62	0,50	26,6
	I (30°)	2,7	10,5	22	2,56	1,39	0,54	28,5
		4,3	20,0	23	3,99	2,06	0,52	27,4
Ar15xGG35	V (0°)	1,4	3,3	21	1,31	0,80	0,61	31,4
		2,1	4,5	22	1,95	1,10	0,56	29,4
		2,8	5,5	24	2,55	1,47	0,58	30,0
		3,5	6,8	24	3,19	1,76	0,55	28,9
		4,6	4,3	24	4,20	2,21	0,53	27,7
	I (30°)	2,7	13,5	21	2,53	1,33	0,53	27,7
		3,5	8,8	21	3,28	1,61	0,49	26,2
		4,3	9,8	22	3,99	1,98	0,50	26,4
Ar15xGMPL	V (0°)	1,4	2,3	9	1,39	0,35	0,25	14,2
		2,8	0,8	9	2,76	0,57	0,21	11,6
		4,6	0,3	9	4,56	0,85	0,19	10,6
	I (30°)	2,7	0,0	6	2,76	0,38	0,14	7,92
		4,3	0,3	6	4,33	0,55	0,13	7,22
		5,1	0,3	6	5,12	0,63	0,12	7,03

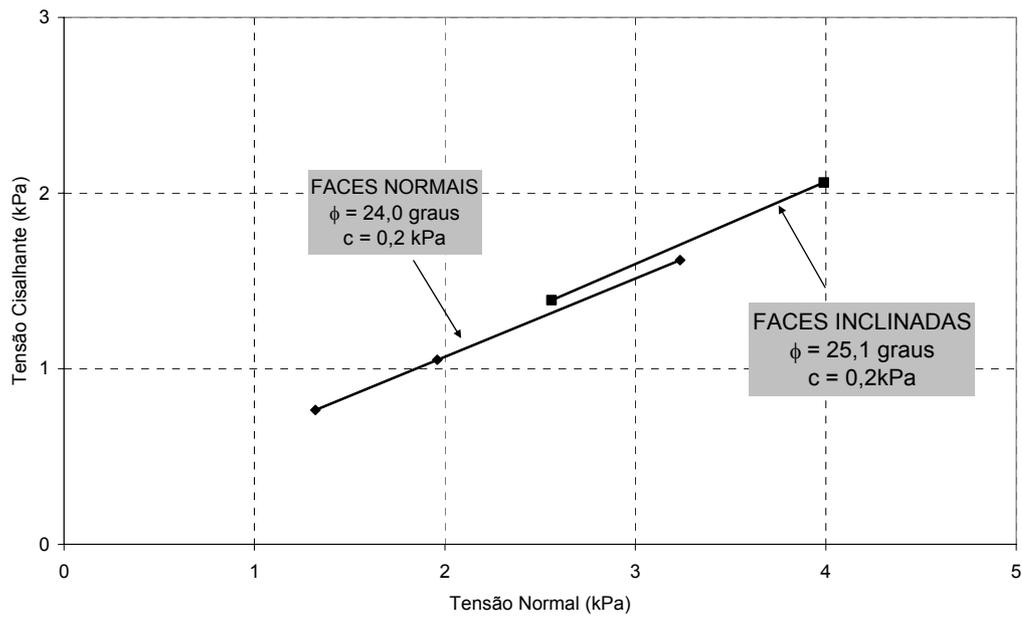


Figura 203 - Envoltórias de resistência solo-solo obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.

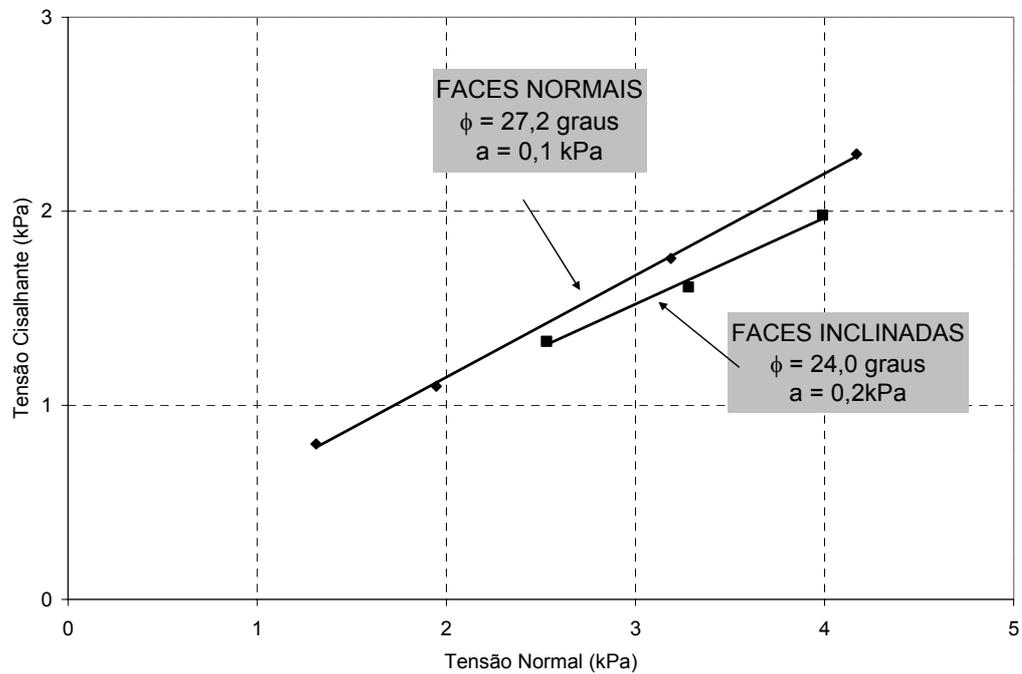


Figura 204 - Envoltórias de resistência solo-geogrelha obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.

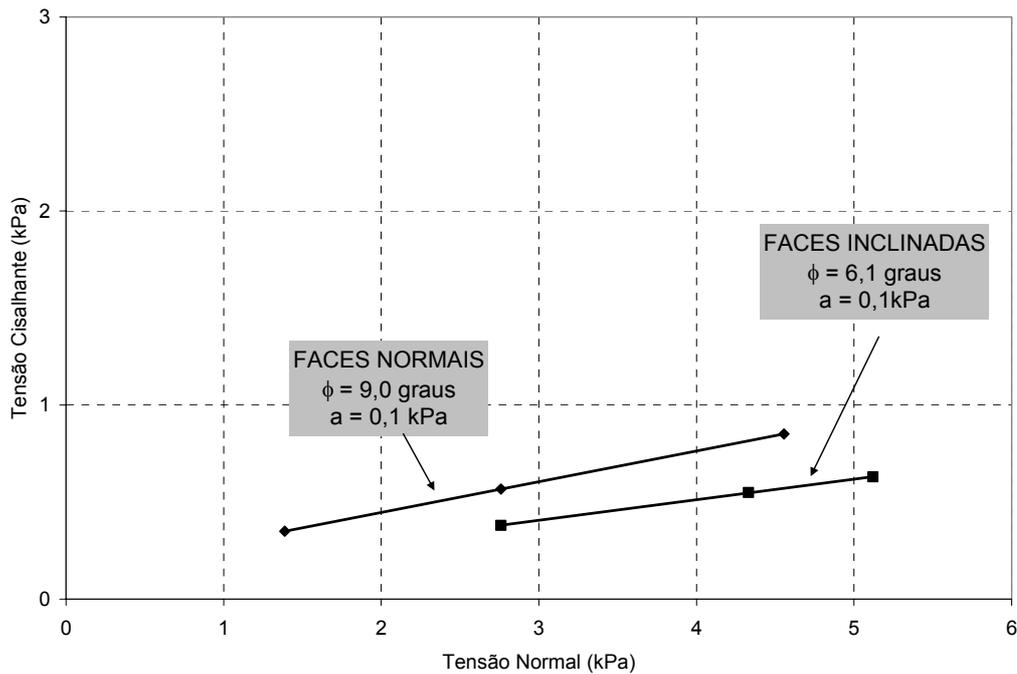


Figura 205 - Envoltórias de resistência solo-geomembrana obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.

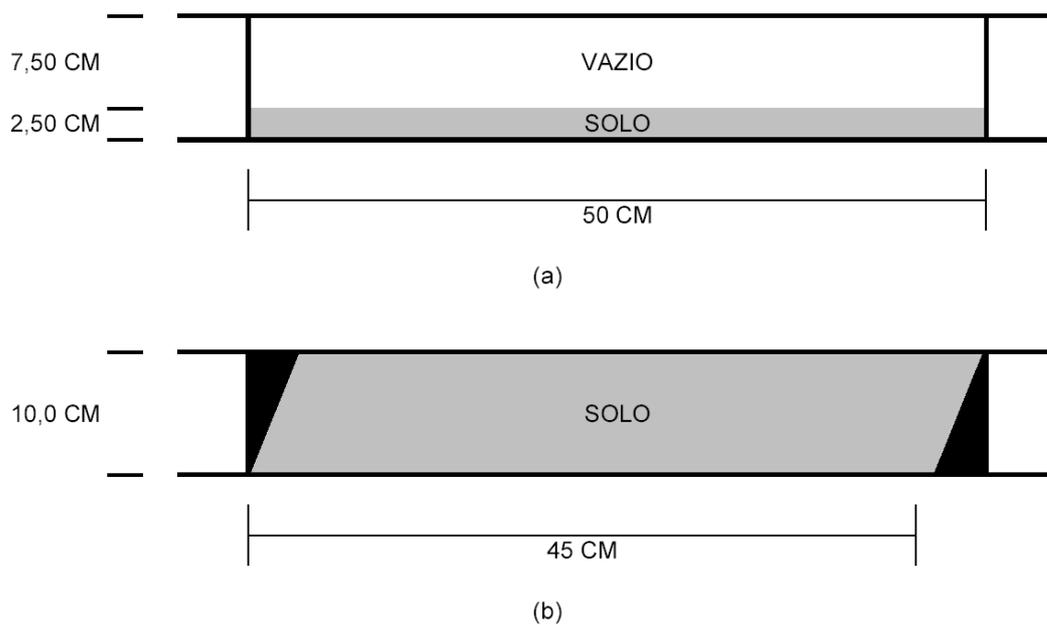


Figura 206 - Esquema interno da caixa superior de ensaio da configuração RP25Q-10 utilizado na avaliação da metodologia de ensaio com faces: (a) normais e (b) inclinadas.

A comparação entre os resultados obtidos pelas duas metodologias não é boa. A diferença entre os parâmetros obtidos é considerável, sendo em média, 3° no ângulo de atrito de interface. A justificativa para este comportamento pode ser associada a dois fatores:

(i) *distribuição da tensão normal ao longo da interface*: as duas metodologias têm comportamentos completamente diferentes no que concerne a distribuição de tensões ao longo da interface. No ensaio com faces convencionais a distribuição de tensões deixa de ser uniformemente distribuída e passa a ser trapezoidal à medida a plataforma de ensaios é basculada. Isso se torna crítico na condição de ruptura. Na metodologia com face inclinada a distribuição de tensões inicialmente não uniforme atinge uma condição ótima de distribuição uniforme com uma inclinação de 30°. Desta forma, para interfaces mais resistentes, a utilização de faces inclinadas pode ser interessante. Entretanto, para as interfaces menos resistentes (Ar15 x GMPL), ela é extremamente desfavorável, ocasionando rupturas que não condizem com a realidade. A solução para melhorar o desempenho desta metodologia seria utilizar faces com inclinações menores. Também é interessante ressaltar que a utilização de faces inclinadas pode ser a mais indicada para os ensaios de cisalhamento direto inclinado, pois são realizados em uma inclinação pré-determinada.

(ii) *compactação dos corpos de prova*: este é outro fator que pode contribuir para um resultado ruim. A compactação é extremamente complicada atrás da face inclinada frontal devido à falta de acesso (Figura 207).



Figura 207 - Face inclinada frontal.

## 6.6. Desgaste e Dano na Geomembrana

O estudo do desgaste e lesão (dobra no corpo de prova) em geomembranas foi feito em uma série de corpos de prova da geomembrana Polimanta com o intuito de se avaliar a possibilidade de reaproveitamento de um mesmo corpo de prova para mais de um ensaio.

O estudo consistiu em avaliar estas duas condições em duas configurações de ensaio de rampa e depois para uma das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado.

A Figura 208 apresenta as envoltórias obtidas para as condições de uso excessivo da geomembrana empregando-se as configurações RP25Q-10 e RP50R-10 e de dano simulado (vinco) empregando-se, somente, a configuração RP25Q-10.

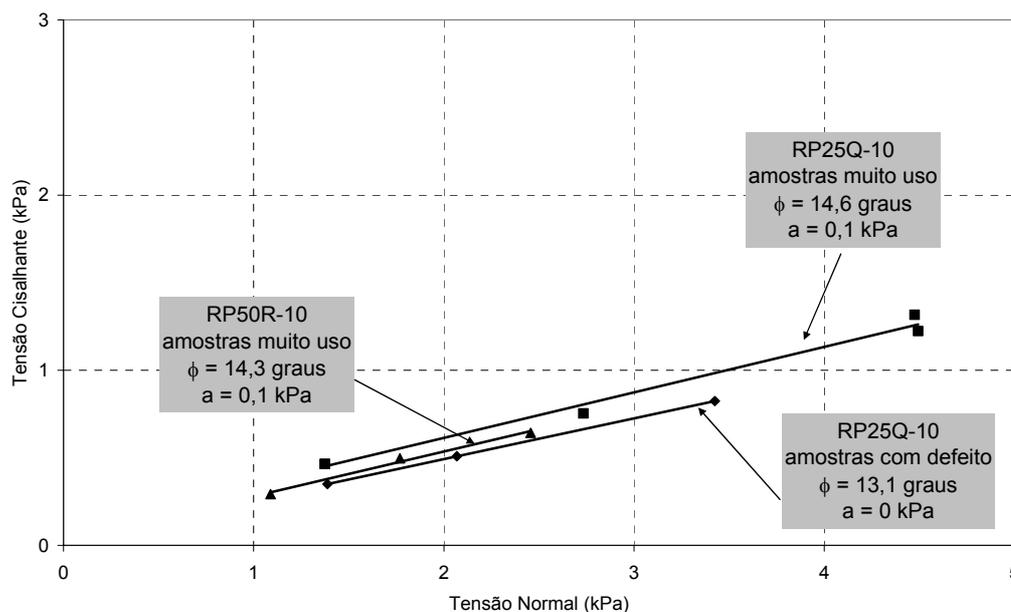


Figura 208 - Ensaio de rampa para interfaces solo-geomembrana: amostras com defeito e muito uso.

Observa-se que os parâmetros obtidos a partir das duas configurações de rampa para as amostras desgastadas são praticamente os mesmos, 14,3° (RP50R-10) e 14,6° (RP25Q-10). Já o efeito do dano resultou em um ângulo de atrito de interface igual a 13,1°.

Avaliou-se também, através de envoltórias de resistência, a influência de se utilizar o mesmo corpo de prova de geomembrana por um número determinado de vezes (uso controlado). Os resultados são comparados com os obtidos com

amostras novas (Figura 209). As amostras de uso controlado foram reutilizadas por somente duas vezes, ou seja, o suficiente para se obter uma envoltória de três pontos.

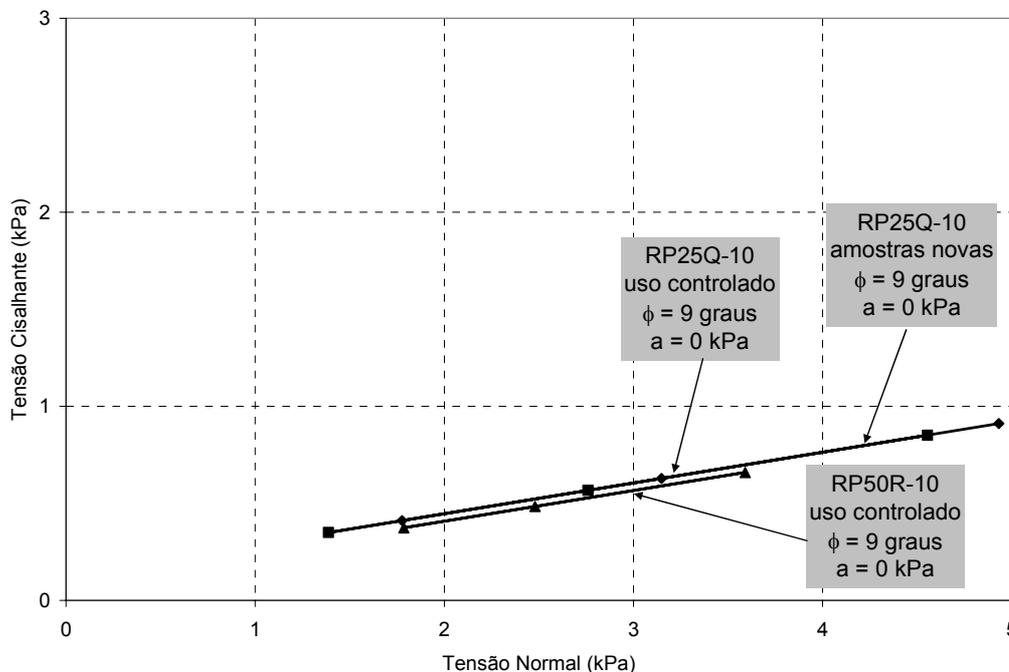


Figura 209 - Ensaios de rampa para interfaces solo-geomembrana: amostras com uso controlado e novas.

Observa-se que independente da configuração de ensaio e da condição da amostra, uso controlado ou nova, os parâmetros de interface foram sempre os mesmos e iguais  $9^\circ$  de ângulo de atrito e zero de adesão. Portanto, estes resultados confirmam a possibilidade de uso da mesma amostra por três vezes sem que isso comprometa os valores dos parâmetros de resistência de interface para este o geossintético (geomembrana) utilizado nesta pesquisa..

A Figura 210 apresenta uma comparação entre os resultados desta análise, em termos de envoltórias de resistência, considerando amostras com defeito, amostras com muito uso e amostras com uso controlado.

Percebe-se que há uma variação considerável do ângulo de atrito de interface quando se altera as condições da superfície da geomembrana. O defeito na amostra e o uso em excesso provocam um aumento do ângulo de atrito de interface de  $4,1^\circ$  e  $5,6^\circ$ , respectivamente. O vinco na amostra de geomembrana com defeito e o excesso de uso introduzem uma rugosidade artificial na superfície

da geomembrana lisa, transformando-a em geomembrana rugosa. Conforme reportado no Capítulo 3, a resistência da interface da geomembrana rugosa é maior do que uma geomembrana lisa. Isso ocorre devido ao imbricamento dos grãos de solo com as rugosidades (Izgin e Wasti, 1998).

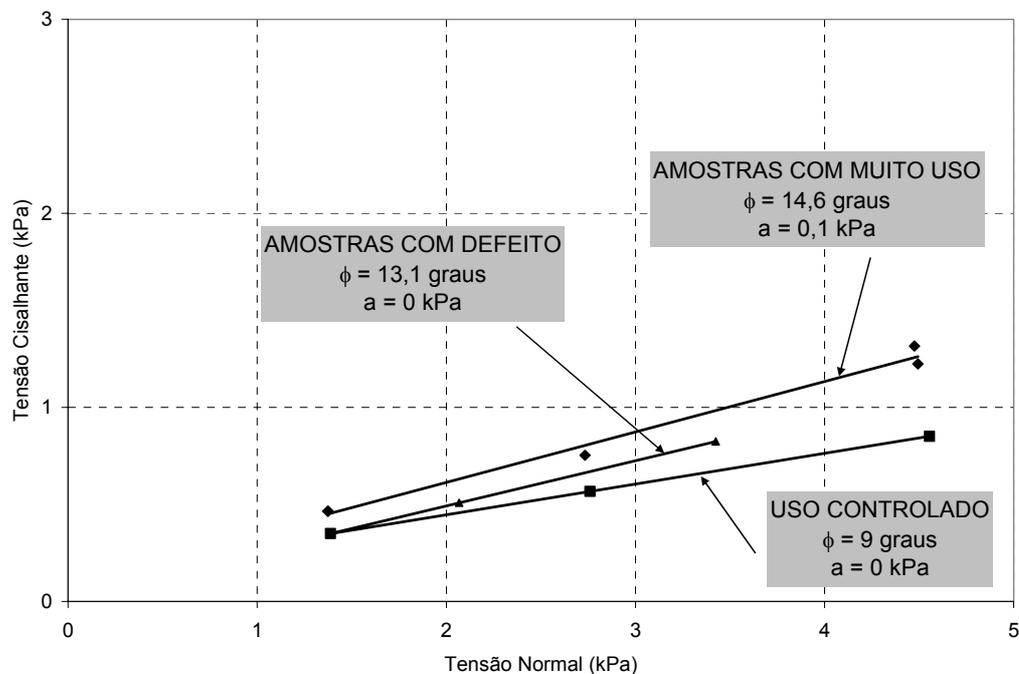


Figura 210 - Comparação entre os resultados dos ensaios de rampa para interfaces solo-geomembrana.

Este mesmo estudo foi feito para os ensaios de cisalhamento direto convencional e cisalhamento direto inclinado. Observa-se que, independente do tipo de ensaio, os resultados são semelhantes aos do ensaio de rampa, ou seja, uma diferença considerável de comportamento entre as amostras de geomembrana com condições de uso excessivo e dano provocado em relação ao de amostras novas e de uso controlado.

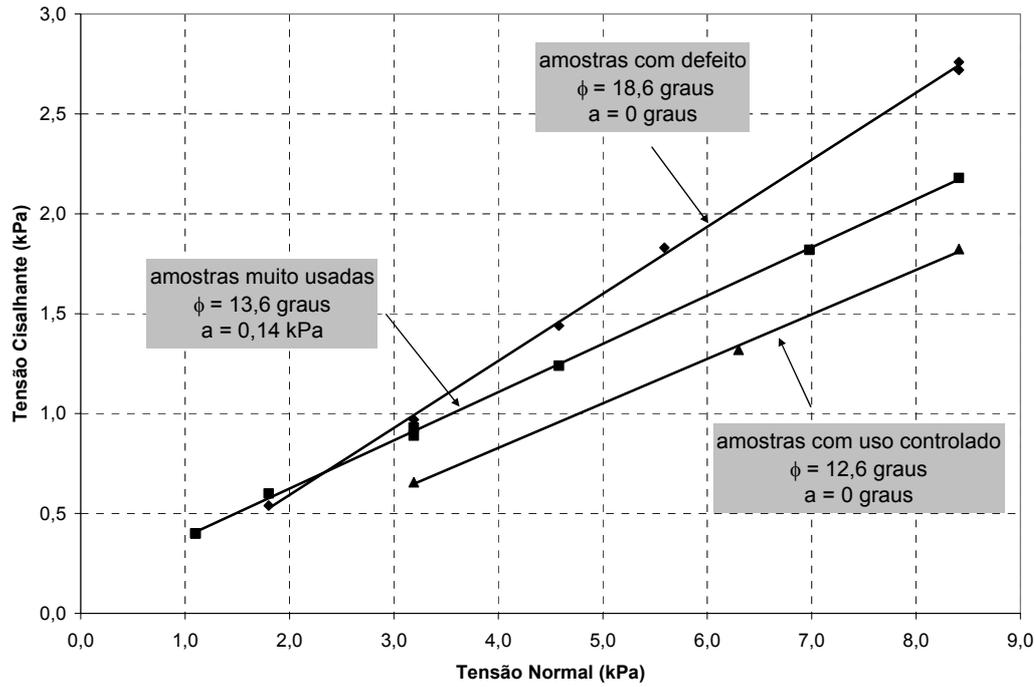


Figura 211 - Ensaios de cisalhamento direto para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.

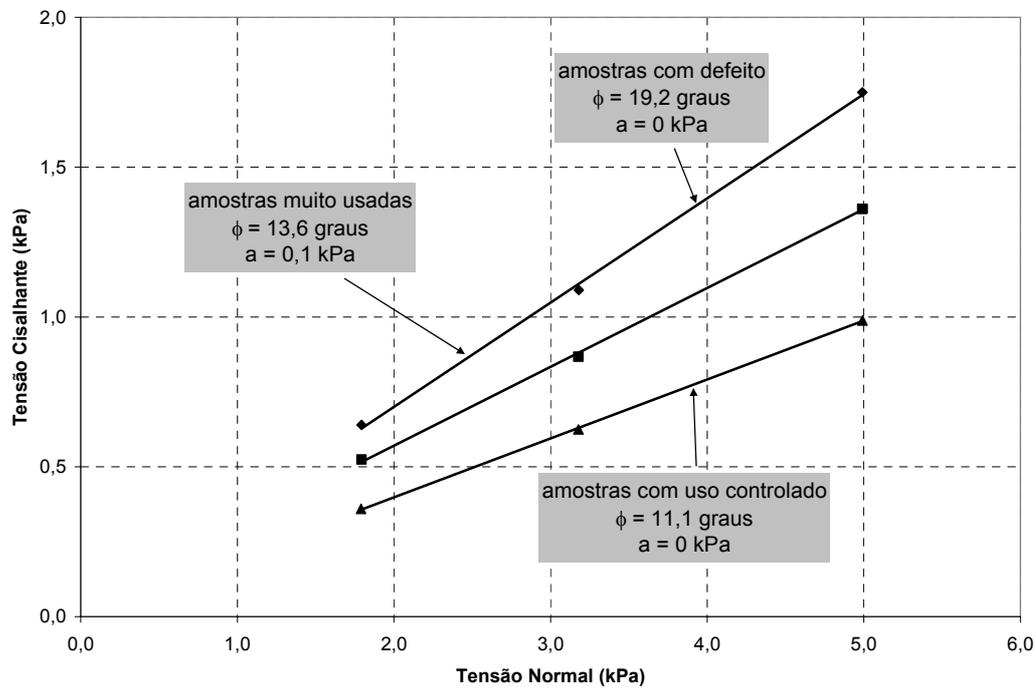


Figura 212 - Ensaios de cisalhamento inclinado (plataforma inclinada de 4,5 graus) para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.

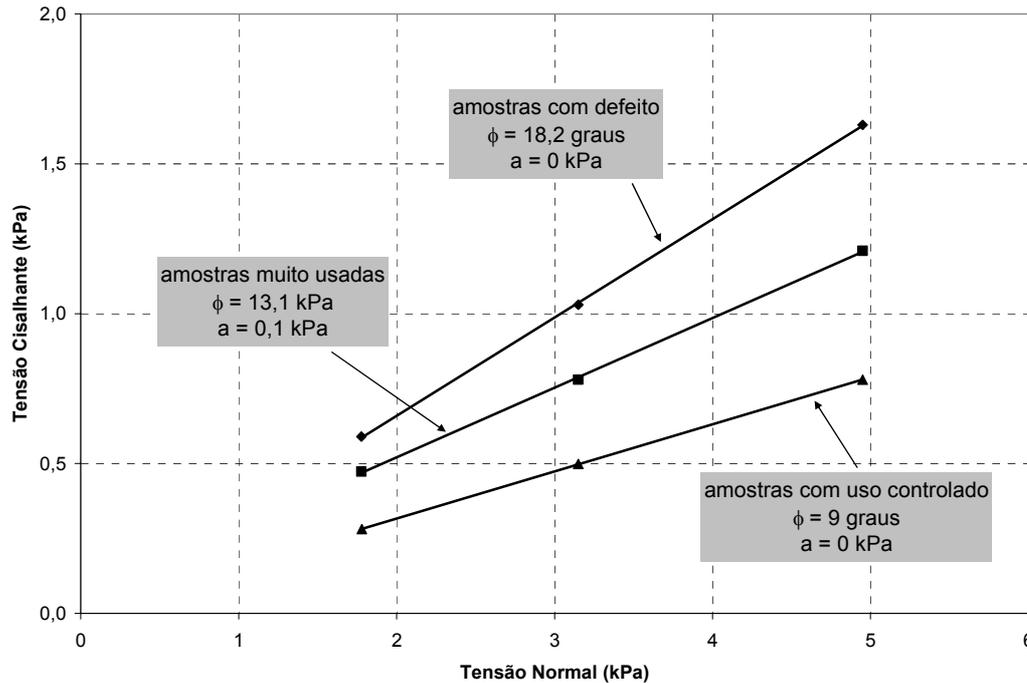


Figura 213 - Ensaio de cisalhamento inclinado (plataforma inclinada de 9°) para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.

## 6.7. Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma série de análises e verificações iniciais que são utilizadas nos demais capítulos de resultados subsequentes.

As análises de todos os tipos de ensaios foram realizadas adotando-se um critério de ruptura unificado que levou em consideração as observações de Pitanga *et al.* (2007) e da Norma ISO 12957-2.

Também foi feita a avaliação da acurácia do equipamento empregando-se um conjunto de ensaios que apresentavam características idênticas. Concluiu-se que, apesar da rusticidade, o equipamento apresenta uma precisão razoável e dentro de limites toleráveis.

A influência das dimensões do equipamento foi avaliada por meio da variação da forma e dimensão da área de contato e variação da relação comprimento / altura da caixa de ensaio.

As conclusões indicam 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, a qual interfere na distribuição de tensões ao longo da interface. Um estudo experimental comprovou as recomendações feitas por Melo *et al.* (2003) e Palmeira *et al.* (2002). A formulação analítica sugerida por estes autores foi empregada nas análises de todos os conjuntos de caixas e de todos os ensaios.

Também foi estudada a influência da metodologia de ensaio nos resultados de rampa. Ensaios com caixas de faces inclinadas não forneceram bons resultados quando comparados com os ensaios de faces verticais.

Por último, foi analisada a influência de danos e desgaste excessivo das amostras de geomembrana nos parâmetros de interface obtidos para diferentes ensaios. Concluiu-se que eles são significativamente alterados pelo aumento da rugosidade da interface causado pelos danos e desgaste. Entretanto, ensaios com o uso controlado das amostras fornecem parâmetros de resistência de interface semelhantes aos das amostras novas.