

9. Resultados e Análises: Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

9.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e analisados os ensaios de cisalhamento direto inclinado realizados nesta pesquisa. Avalia-se a influência da tensão confinante, tipo de solo e tipo de geossintético.

Seguindo o procedimento dos capítulos anteriores as envoltórias de resistência das interfaces foram obtidas através de, no mínimo, três ensaios com tensões normais distintas. Os ensaios são identificados pelo valor inicial da tensão normal atuante na superfície de ruptura, ou seja, no momento em que a plataforma de ensaio ainda se encontrava na posição horizontal.

É importante ressaltar que, para a obtenção das envoltórias de resistência, foram considerados os valores das tensões normal e cisalhante correspondentes à condição de ruptura.

A parcela da tensão confinante referente à camada de solo depende do tipo de material, espessura da camada de solo e densidade relativa. Desta forma, em todas as análises são especificadas as tensões confinantes consideradas.

Adotou-se a seguinte convenção: os ensaios com areia ou brita são identificados com as siglas Ar ou B0; os geossintéticos são identificados pelas siglas GMPL (geomembrana Polimanta), GG35 (geogrelha Fortrac 35); a densidade relativa é identificada pelo respectivo valor ($D_r = 15\%$ é indicada pelo valor 15). Por exemplo, a sigla AR15xGMPL corresponde ao ensaio da interface areia-geomembrana, com densidade relativa de 15%.

Os ensaios de cisalhamento direto inclinado foram realizados nas inclinações de 4,5; 9 e 18 graus, envolvendo interfaces solo-solo e solo-geossintético.

9.2. Influência da Tensão Confinante

A Tabela 56 apresenta os resultados mais representativos dos ensaios de cisalhamento direto inclinado em todas as interfaces ensaiadas com areia fofa ($D_r = 15\%$).

Tabela 56 - Influência da tensão confinante na tensão cisalhante de ruptura em areia ($D_r = 15\%$)

| Interface | α (°) | τ (kPa) | | | $\Delta\tau$ (kPa) |
|-----------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|
| | | $\sigma_n = 1,8\text{kPa}$ | $\sigma_n = 3,2\text{kPa}$ | $\sigma_n = 5,0\text{kPa}$ | |
| Ar x Ar | 4,5 | 1,27 | 2,03 | 3,00 | +1,73 |
| Ar x GMPL | | 0,36 | 0,62 | 0,99 | +0,63 |
| Ar x Ar | 9,0 | 1,29 | 1,90 | 2,69 | +1,40 |
| Ar x GMPL | | 0,28 | 0,50 | 0,78 | +0,50 |
| Ar x GG35 | | 1,25 | 2,05 | 3,16 | +1,91 |
| Ar x Ar | 18,0 | 1,03 | 1,66 | 2,52 | +1,49 |
| Ar x GG35 | | 1,17 | 1,90 | 2,85 | +1,68 |

Pode-se observar na Tabela 56 que, para as diferentes interfaces ensaiadas, a o aumento da tensão confinante acarretou comportamentos semelhantes no que concerne à tensão cisalhante de ruptura. Percebe-se que, independente da inclinação em que foi realizada a série de ensaios, a interface areia-geogrelha é a que sofre a maior influência do efeito do confinamento, apresentando os maiores incrementos de tensão cisalhante (diferença de tensão cisalhante de ruptura entre a maior e menor tensão normal).

A Figura 241 apresenta a influência da inclinação da plataforma de ensaio sobre a variação da tensão cisalhante. Observa-se que, independente do tipo de interface, ocorre uma redução deste incremento na medida em que a inclinação aumenta. A justificativa para este comportamento está associada à redução da tensão normal média atuando na interface, à medida que aumenta a inclinação da plataforma de ensaio.

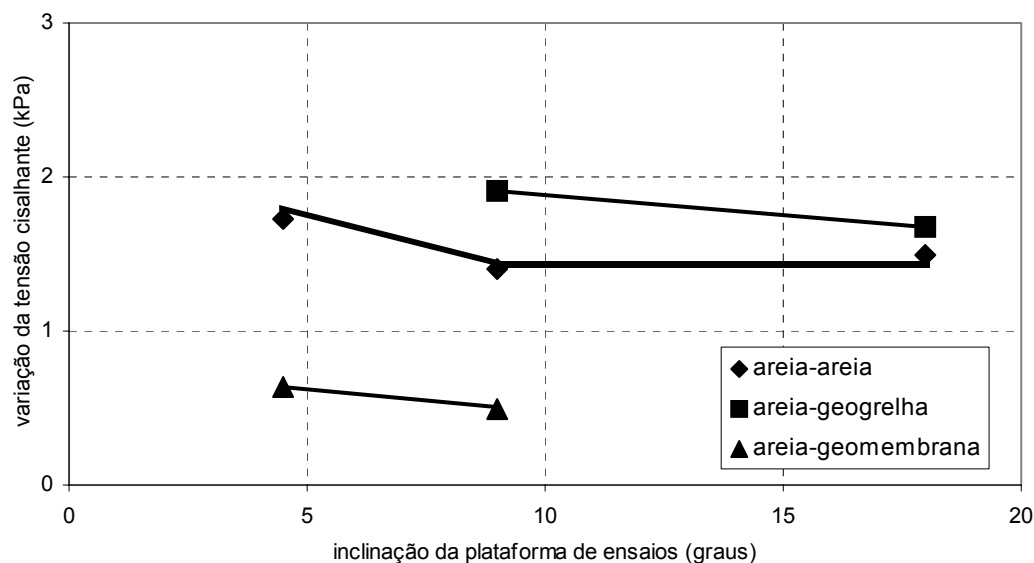


Figura 241 - Influência da inclinação no valor da tensão cisalhante de ruptura.

9.3. Influência do Tipo de Solo

9.3.1. Interface Solo-Solo

Para avaliar a influência do tipo de solo, foram comparados os ensaios de cisalhamento direto inclinado nas interfaces areia-areia e brita-brita (Tavares, 2008), com densidade relativa de 15%, para as inclinações de 9 e 18°. A Tabela 57 apresenta os resultados dos ensaios nas duas interfaces.

Tabela 57 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-areia e brita-brita ($D_r = 15\%$)

| α (°) | Solo | σ_n (kPa) | $\delta_{rup.}$ (mm) | Tensões na Ruptura | | | ϕ_{sec} (graus) |
|-----------------|--------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | | | | σ_{rup} (kPa) | τ_{rup} (kPa) | $\tau_{rup} / \sigma_{rup}$ | |
| 9,0 | areia | 1,8 | 11,5 | 1,78 | 1,29 | 0,72 | 35,9 |
| | | 3,2 | 7,5 | 3,15 | 1,90 | 0,60 | 31,1 |
| | | 5,0 | 8,5 | 4,95 | 2,69 | 0,54 | 28,5 |
| | brita (*) | 1,0 | 7,8 | 1,01 | 0,88 | 0,87 | 41,0 |
| | | 1,7 | 6,8 | 1,70 | 1,46 | 0,86 | 40,7 |
| | | 2,4 | 11,0 | 2,39 | 2,00 | 0,84 | 40,0 |

(*) Tavares (2008)

Tabela 57 (cont.) - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-areia e brita-brita ($D_r = 15\%$)

| α ($^\circ$) | Solo | σ_n (kPa) | $\delta_{rup.}$ (mm) | Tensões na Ruptura | | | ϕ_{sec} (graus) |
|--------------------------|--------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------|
| | | | | σ_{rup} (kPa) | τ_{rup} (kPa) | τ_{rup}/σ_{rup} | |
| 18,0 | areia | 1,8 | 8,8 | 1,71 | 1,03 | 0,60 | 31,0 |
| | | 3,2 | 5,5 | 3,03 | 1,66 | 0,55 | 28,7 |
| | | 5,0 | 5,6 | 4,76 | 2,52 | 0,53 | 27,9 |
| | brita (*) | 1,0 | 6,0 | 0,97 | 0,84 | 0,86 | 40,7 |
| | | 1,7 | 11,8 | 1,64 | 1,35 | 0,83 | 39,7 |
| | | 2,4 | 15,0 | 2,31 | 1,93 | 0,84 | 40,0 |

(*) Tavares (2008)

As Figuras 242 e 243 apresentam os resultados gráficos de cada ensaio. Pode-se observar que o comportamento da brita é diferente da areia. Independente da inclinação da plataforma de ensaios, os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante, no caso da interface areia-areia, enquanto que tendem a aumentar, na interface brita-brita.

A justificativa para a ocorrência de deslocamentos maiores na brita pode ser explicada pela possibilidade de rearranjo e maior imbricamento dos grãos da brita ao longo do ensaio.

Em termos de tensão cisalhante de ruptura, os resultados indicam que o aumento da inclinação da plataforma provoca uma redução dos valores de tensão devido à diminuição da tensão média atuante na interface.

A Figura 244 exibe as envoltórias de resistência da areia e da brita com densidade relativa de 15%, para inclinação de 9° . Os parâmetros obtidos foram: $c' = 0,5$ kPa e $\phi' = 23,8^\circ$ para a interface areia-areia e $c' = 0,1$ kPa e $\phi' = 38,8^\circ$ para a interface brita-brita.

A Figura 245 exibe as envoltórias de resistência da areia e da brita com densidade relativa de 15%, para inclinação $\alpha = 18^\circ$. Os parâmetros obtidos foram: $c' = 0,2$ kPa e ângulo de atrito de $26,1^\circ$ para a interface areia-areia e $c' = 0$ e ângulo de atrito de $39,3^\circ$ para a interface brita-brita.

Pode-se concluir que, para as duas inclinações, o aumento da granulometria do solo correspondeu a um acréscimo de 15 a 16° no ângulo de atrito.

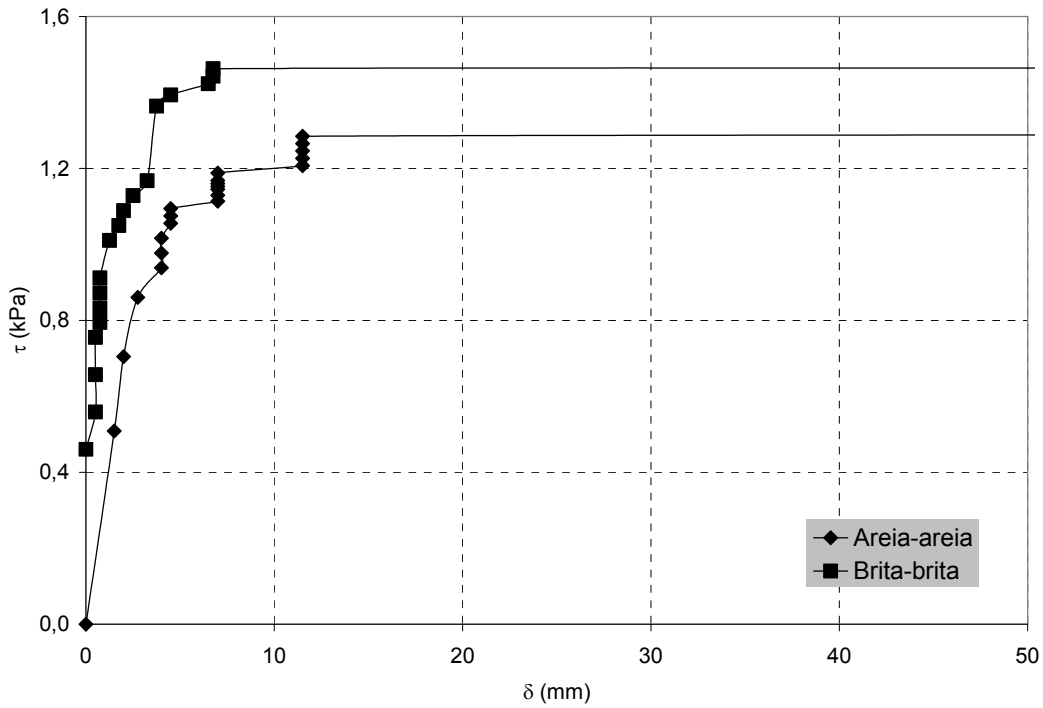


Figura 242 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma de ensaios inclinada a 9°.

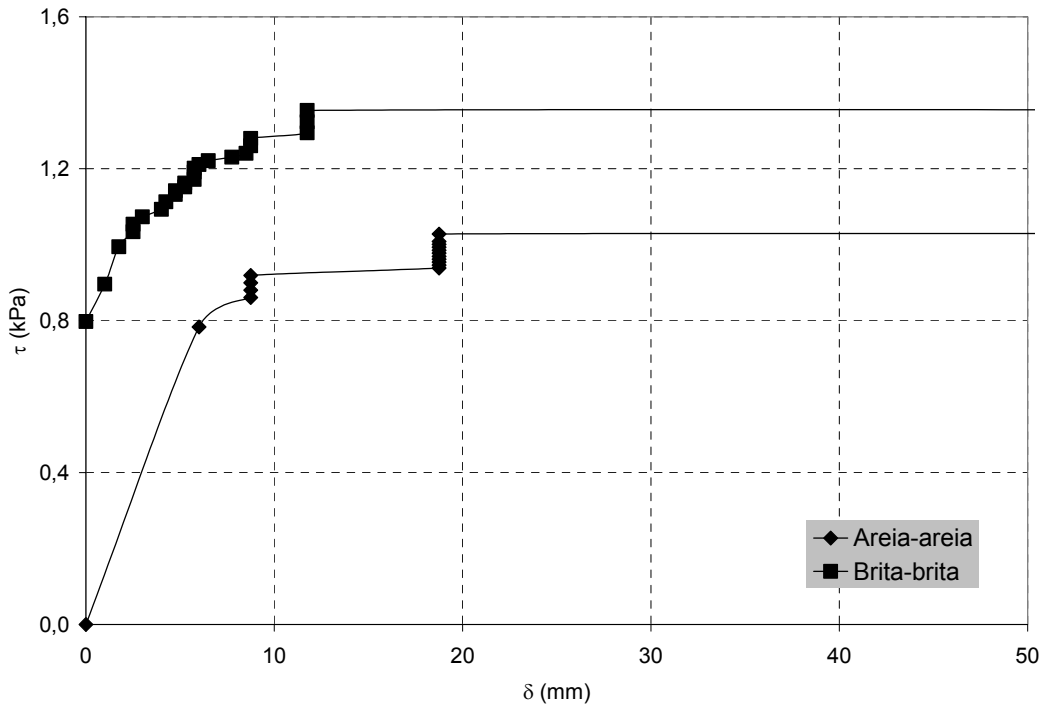


Figura 243 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma de ensaios inclinada a 18°.

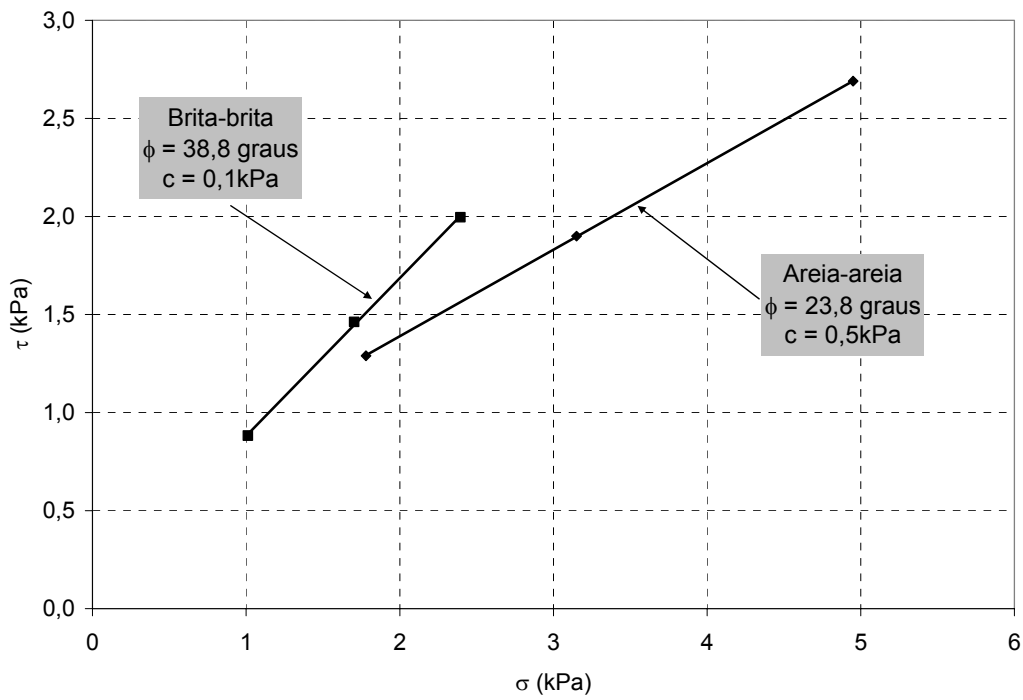


Figura 244 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.

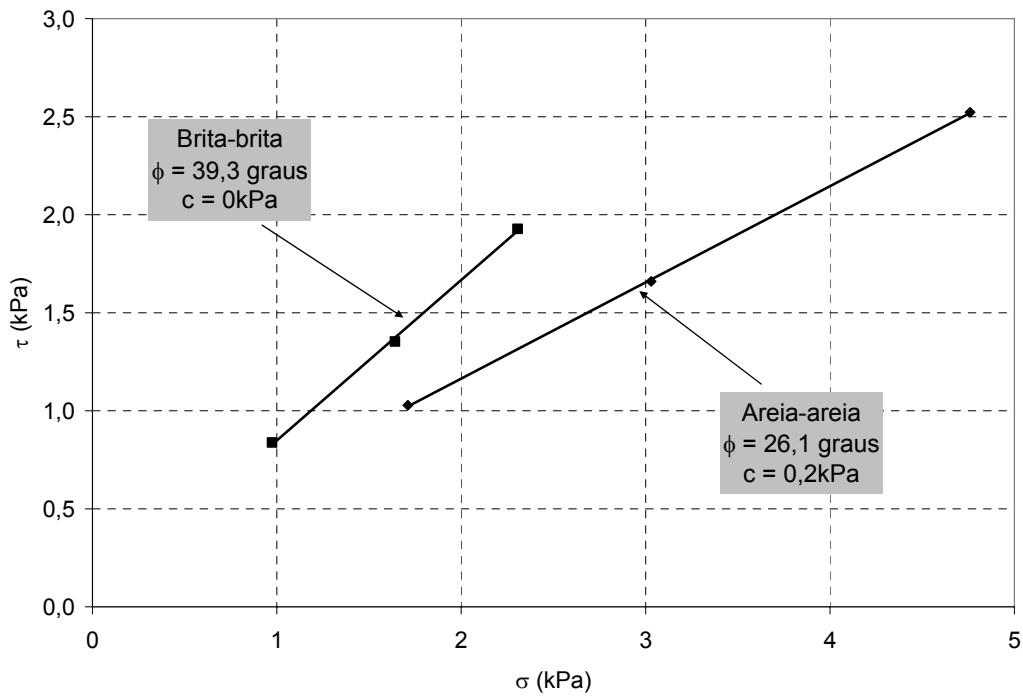


Figura 245 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 18°.

Observa-se, entretanto, que os valores de ângulo de atrito obtidos para a inclinação de 18° são um pouco superiores aos valores obtidos para a inclinação de 9°. Isto pode estar associado à menor uniformidade das tensões normais no instante da ruptura no caso da inclinação de 18°, quando comparada com a de 9°.

Os resultados obtidos com a areia na configuração RP50R-10 (Rampa, caixa de 50, Retangular), inclinada a 18°, são apresentados na Figura 246. Constata-se que os parâmetros obtidos estão bem próximos dos encontrados com a configuração RP25Q-10 (Rampa, caixa de 25, Quadrada). Esta foi a configuração utilizada em todos os ensaios de interface (areia-areia ou areia-geossintético) reportados neste capítulo. Pode-se supor, portanto, que a configuração de ensaio não interferiu nos resultados.

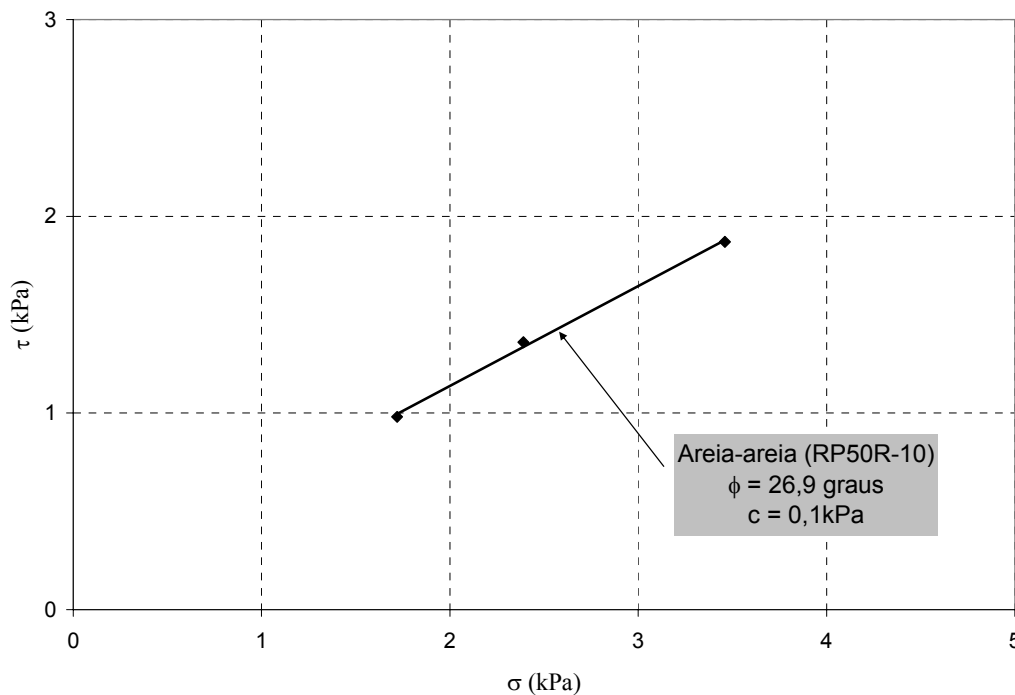


Figura 246 - Envoltória de ruptura da interface areia-areia para densidade relativa de 15%, plataforma inclinada a 18° e empregando a configuração RP50R-10.

A hipótese mais provável para explicar este comportamento pode estar associada ao método de realização do ensaio e ao sistema de basculamento do equipamento. O procedimento de ensaio de cisalhamento direto inclinado é dividido em duas fases. Na primeira etapa, as caixas de ensaio são travadas com o auxílio de grampos tipo C (Figura 163) e basculadas até um ângulo pré-

determinado. A segunda etapa corresponde ao cisalhamento propriamente dito. O basculamento é feito com a talha (Figura 93), que pode provocar uma pequena vibração na estrutura. No ensaio de rampa, o efeito da vibração é mínimo, pois o basculamento é procedido por incrementos de $1,0^\circ$. Entretanto, no ensaio de cisalhamento direto inclinado, a plataforma de ensaio é basculada de uma só vez até o ângulo de ensaio, o que pode majorar o efeito das pequenas vibrações. Este efeito pode se traduzir num aumento da densidade do solo, com conseqüente aumento de resistência.

9.3.2. Interface Solo-Geogrelha

Para avaliar a influência do tipo de solo, foram comparados os ensaios de cisalhamento direto inclinado nas interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha com densidade relativa de 15%, para as inclinações de 9 e 18° .

A Tabela 58 e as Figuras 247 e 248 apresentam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado nas duas interfaces.

Pode-se observar que o comportamento da interface brita-geogrelha é similar ao da interface areia-geogrelha. Para a inclinação da plataforma de ensaios a 9° , as duas interfaces tendem a aumentar os deslocamentos com o aumento da tensão confinante. Para a inclinação de 18° , verifica-se que os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante.

Em termos de tensão cisalhante de ruptura, os resultados indicam que o aumento da inclinação da plataforma provoca uma redução dos valores de tensão devido à diminuição da tensão média atuante na interface.

Tabela 58 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha ($D_r = 15\%$).

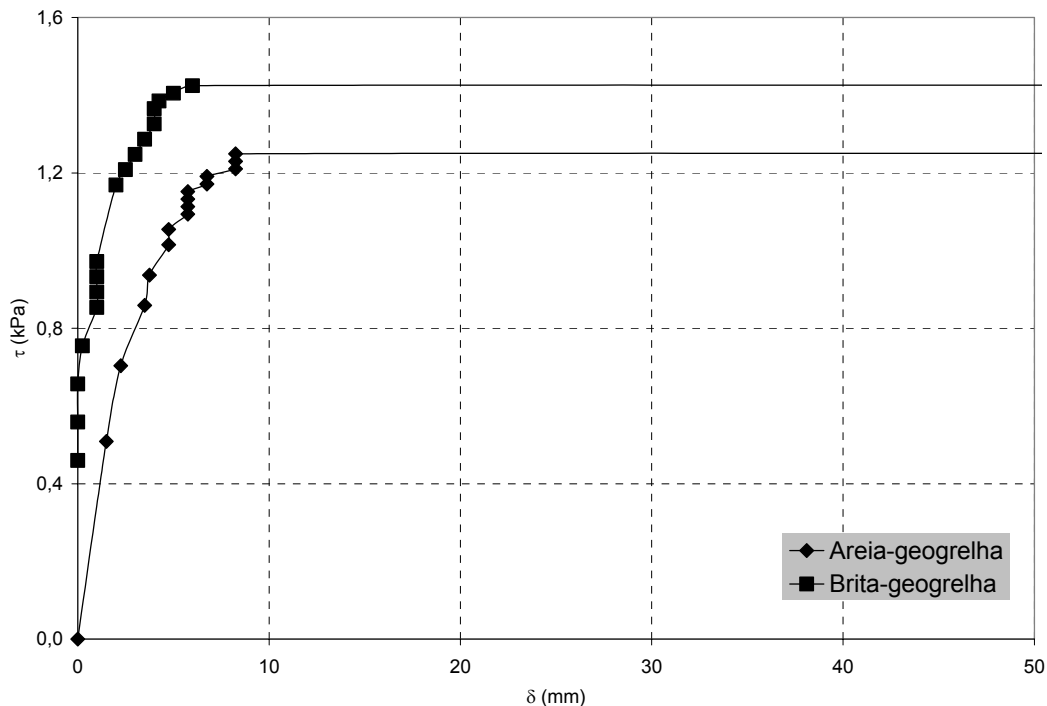
| α ($^\circ$) | Solo | σ_n (kPa) | δ_{rup} (mm) | Tensões na Ruptura | | | ϕ_{sec} (graus) |
|--------------------------|-------|---------------------|------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------|
| | | | | σ_{rup} (kPa) | τ_{rup} (kPa) | τ_{rup}/σ_{rup} | |
| 9,0 | areia | 1,8 | 8,3 | 1,78 | 1,25 | 0,70 | 35,1 |
| | | 3,2 | 7,5 | 3,15 | 2,05 | 0,65 | 33,1 |
| | | 5,0 | 9,3 | 4,95 | 3,16 | 0,64 | 32,6 |

Tabela 58 (cont.) - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha ($D_r = 15\%$).

| α ($^\circ$) | Solo | σ_n (kPa) | $\delta_{rup.}$ (mm) | Tensões na Ruptura | | | ϕ_{sec} (graus) |
|--------------------------|--------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | | | | $\sigma_{rup.}$ (kPa) | $\tau_{rup.}$ (kPa) | $\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$ | |
| 9,0 | brita (*) | 1,0 | 4,5 | 1,01 | 0,74 | 0,74 | 36,5 |
| | | 1,7 | 6,0 | 1,70 | 1,42 | 0,84 | 40,0 |
| | | 2,4 | 8,3 | 2,39 | 2,10 | 0,88 | 41,3 |
| 18,0 | areia | 1,8 | 9,5 | 1,71 | 1,17 | 0,68 | 34,4 |
| | | 3,2 | 8,3 | 3,03 | 1,90 | 0,63 | 32,1 |
| | | 5,0 | 4,3 | 4,76 | 2,85 | 0,60 | 30,9 |
| | brita (*) | 1,0 | 6,3 | 0,97 | 0,88 | 0,90 | 41,3 |
| | | 1,7 | 4,0 | 1,64 | 1,43 | 0,87 | 41,0 |
| | | 2,4 | 5,5 | 2,31 | 1,77 | 0,77 | 37,6 |

(*) Tavares (2008)

A Figura 249 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia e brita-brita para a inclinação de 9° na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: $c=0,2\text{kPa}$ e $\phi=31,1^\circ$ para a interface areia-areia e $c=0$ e $\phi=44,4^\circ$ para a interface brita-brita.

Figura 247 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geogrelha e brita-geogrelha para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma inclinada a 9° .

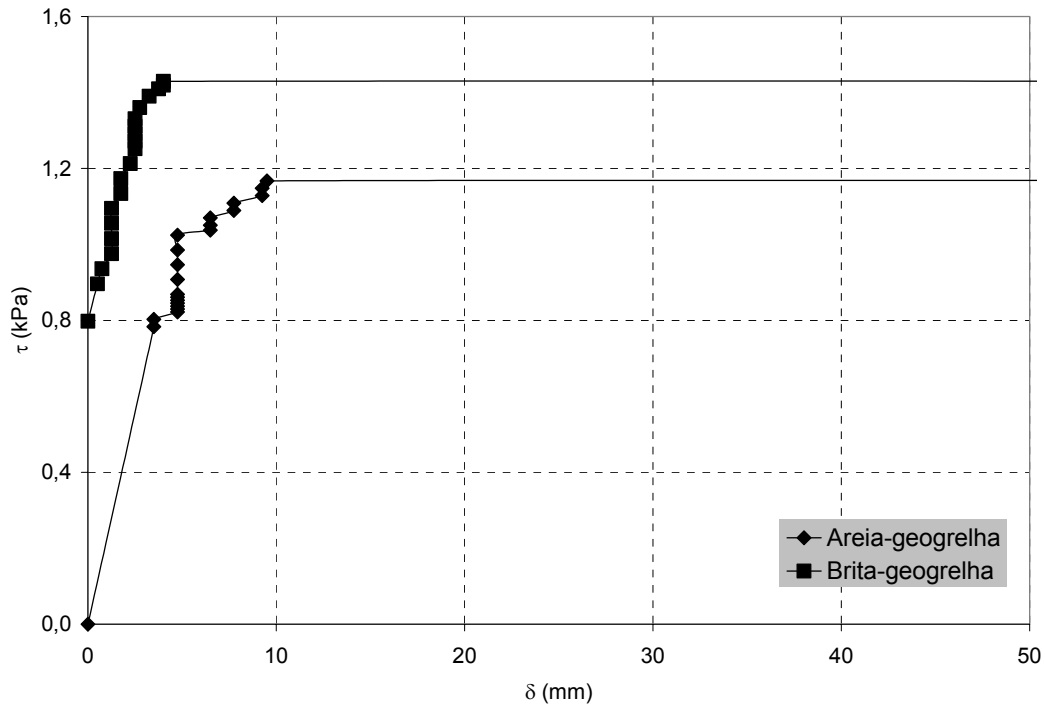


Figura 248 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geogrelha e brita-geogrelha para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma inclinada a 18°.

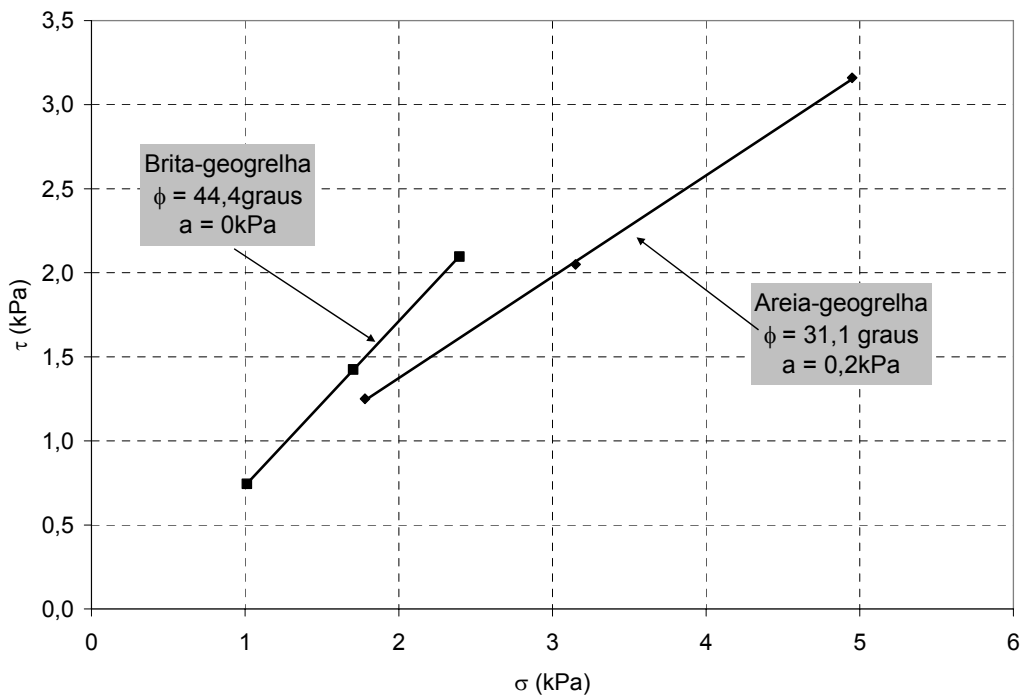


Figura 249 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.

A Figura 250 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia e brita-brita para a inclinação de 9° na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de $28,8^\circ$ para a interface areia-areia e coesão de 0,3kPa e ângulo de atrito de $33,9^\circ$ para a interface brita-brita.

Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de $13,3^\circ$ no ângulo de atrito.

Diferentemente do observado nos resultados das interfaces solo-solo, não se percebeu um efeito mesmo que pequeno da vibração do sistema de basculamento do equipamento.

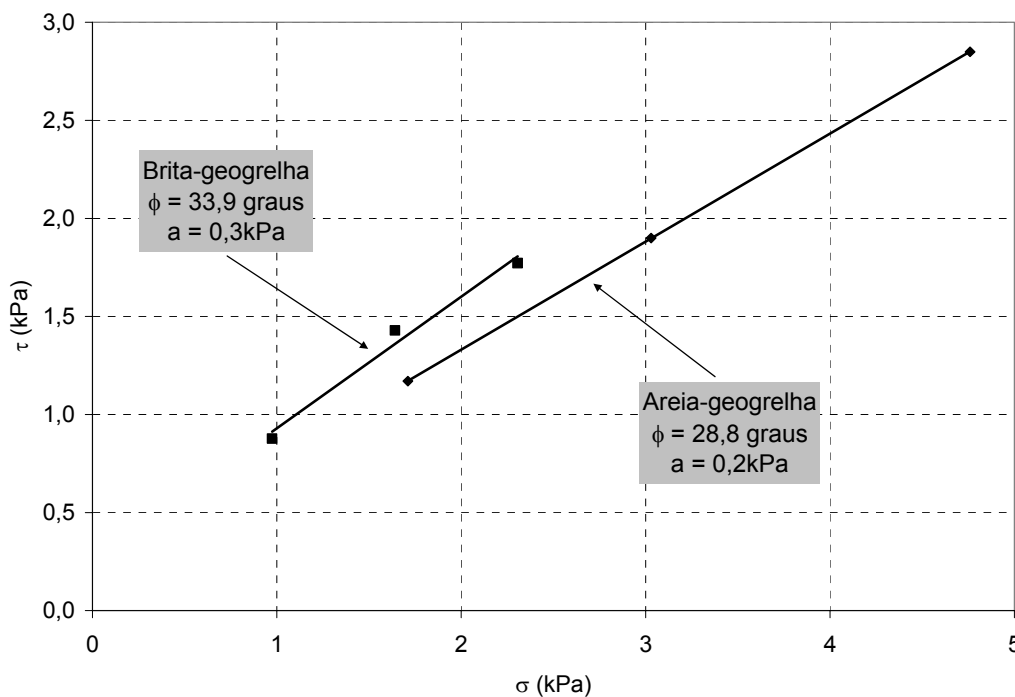


Figura 250 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 18° .

9.3.3. Interface Solo-Geomembrana

Da mesma forma que nos itens anteriores, para avaliar a influência do tipo de solo foram comparados os ensaios de cisalhamento direto inclinado nas interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana, com densidade relativa de 15%, para as inclinações de $4,5^\circ$ e 9° . A geomembrana utilizada neste estudo foi a Polimanta da Engepol.

A Tabela 59 e Figuras 251 e 252 apresentam os resultados dos ensaios de rampa nas duas interfaces.

Tabela 59 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana ($D_r = 15\%$).

| α ($^\circ$) | Solo | σ_n (kPa) | $\delta_{rup.}$ (mm) | α_{rup} (graus) | Tensões na Ruptura | | | ϕ_{sec} (graus) |
|--------------------------|--------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | | | | | σ_{rup} (kPa) | τ_{rup} (kPa) | $\tau_{rup} / \sigma_{rup}$ | |
| 4,5 | areia | 1,8 | 1,3 | 4,5 | 1,79 | 0,36 | 0,20 | 11,4 |
| | | 3,2 | 0,3 | 4,5 | 3,18 | 0,62 | 0,20 | 11,1 |
| | | 5,0 | 0,3 | 4,5 | 4,99 | 0,99 | 0,20 | 11,2 |
| | brita (*) | 1,0 | 45,8 | 4,5 | 1,02 | 0,58 | 0,57 | 29,7 |
| | | 1,7 | 15,3 | 4,5 | 1,72 | 0,82 | 0,48 | 25,6 |
| | | 2,4 | 31,8 | 4,5 | 2,42 | 1,22 | 0,51 | 27,0 |
| 9,0 | areia | 1,8 | 0 | 9 | 1,78 | 0,28 | 0,16 | 9,0 |
| | | 3,2 | 0 | 9 | 3,15 | 0,50 | 0,16 | 9,0 |
| | | 5,0 | 0 | 9 | 4,95 | 0,78 | 0,16 | 9,0 |
| | brita (*) | 1,0 | 31,5 | 9 | 1,01 | 0,51 | 0,50 | 26,6 |
| | | 1,7 | 22,5 | 9 | 1,70 | 0,82 | 0,48 | 25,6 |
| | | 2,4 | 27,8 | 9 | 2,39 | 1,09 | 0,46 | 24,7 |

(*) Tavares (2008)

Pode-se observar que o comportamento da interface brita-geomembrana é parecido com o da interface areia-geomembrana. Observa-se que, independente da inclinação da plataforma de ensaios, os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante. A exceção é a interface areia-geomembrana, que exibe uma ruptura brusca, ou seja, com deslocamento praticamente nulo.

Entretanto a magnitude dos deslocamentos das interfaces brita-geomembrana é bem maior do que a areia-geomembrana. A justificativa para a ocorrência de maiores deslocamentos na interface brita-geomembrana pode ser relacionada com a possibilidade de um maior rearranjo ao longo do ensaio.

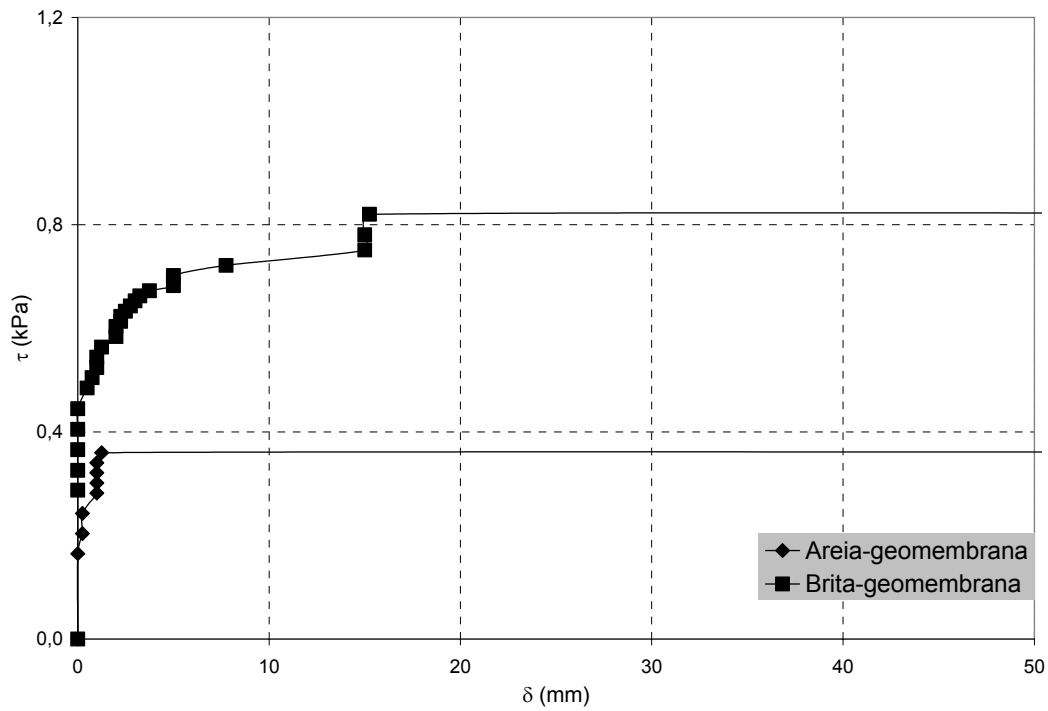


Figura 251 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geomembrana e brita-geomembrana para $\sigma = 1,8\text{kPa}$ e plataforma inclinada a $4,5^\circ$.

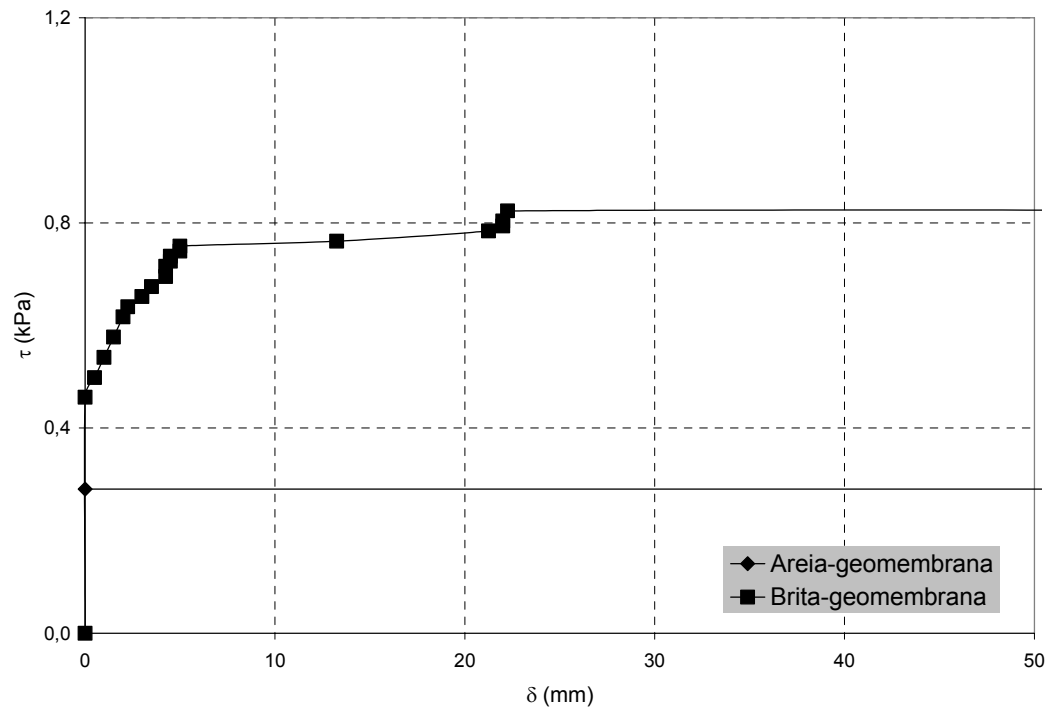


Figura 252 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geomembrana e brita-geomembrana para $\sigma = 1,8\text{kPa}$ e plataforma inclinada a 9° .

Em termos de tensão cisalhante de ruptura, os resultados indicam que o aumento da inclinação da plataforma provoca uma redução dos valores de tensão devido à diminuição da tensão média atuante na interface.

A Figura 253 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para a inclinação de $4,5^\circ$ na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: $a=0$ e $\phi_{sg}=11,1^\circ$ para a interface areia-geomembrana e $a=0,1$ kPa e $\phi_{sg}=24,8^\circ$ para a interface brita-geomembrana.

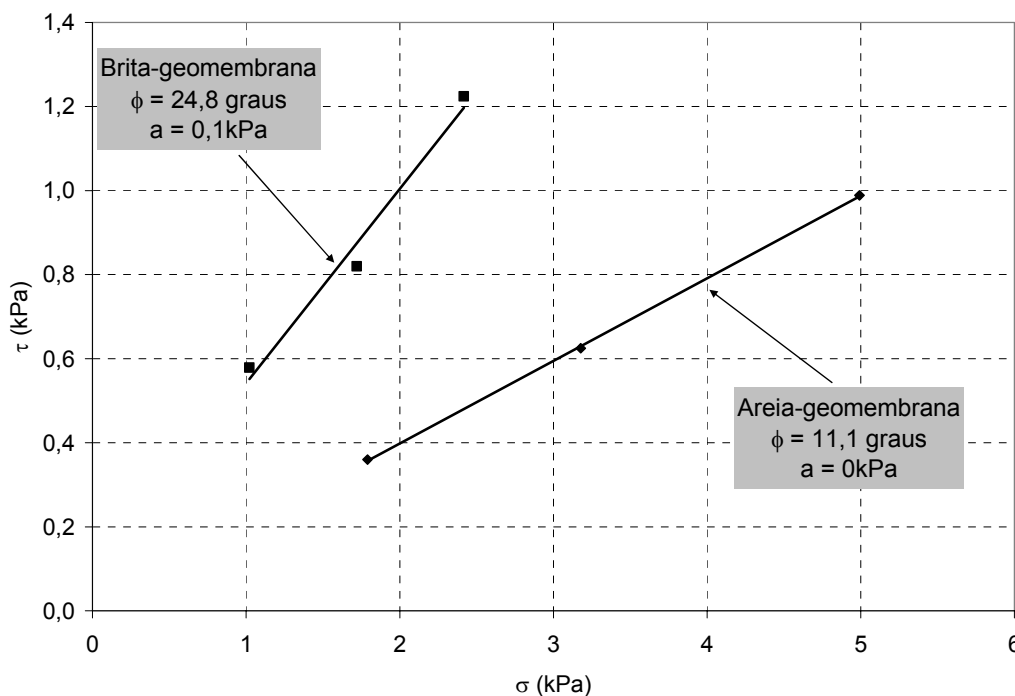


Figura 253 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a $4,5^\circ$

A Figura 254 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para a inclinação de 9° na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: $a=0$ e $\phi_{sg}=9^\circ$ para a interface areia-geomembrana e $a=0,1$ kPa e $\phi_{sg}=22,9^\circ$ para a interface brita-geomembrana.

Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de cerca de 14° no ângulo de atrito. É importante

frisar que os ensaios utilizados para determinar a envoltória de ruptura da interface areia-geomembrana apresentaram uma ruptura similar à dos ensaios de rampa e, com isso, os parâmetros de interface foram similares.

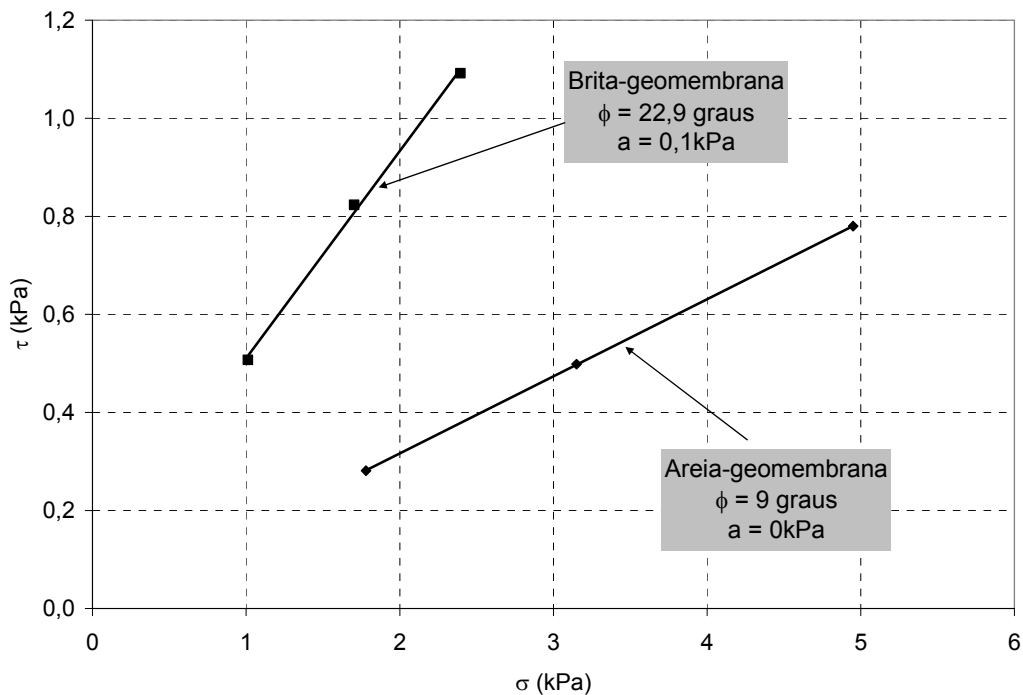


Figura 254 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.

9.3.4. Eficiências de Interfaces

As Figura 255, 256 e 257 apresentam as envoltórias de resistência das interfaces areia-geossintético e brita-geossintético estudadas neste capítulo.

A Tabela 60 resume os parâmetros de resistência obtidos e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ).

Tabela 60 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces.

| α (°) | Interface | a (kPa) | ϕ_{sg} (graus) | E_c | E_ϕ |
|-----------------|-----------|------------|------------------------|-------|----------|
| 4,5 | Ar x GMPL | 0 | 11,1 | 0 | 0,39 |
| | B0 x GMPL | 0,1 | 24,8 | ~ | ~ |
| 9,0 | Ar x GMPL | 0 | 9 | 0 | 0,38 |
| | B0 x GMPL | 0,1 | 22,9 | 1 | 0,59 |
| | Ar x GG35 | 0,2 | 31,1 | 1 | 1,31 |
| | B0 x GG35 | 0 | 44,4 | 0 | 1,13 |
| 18,0 | Ar x GG35 | 0,2 | 28,8 | 1 | 1,10 |
| | B0 x GG35 | 0,3 | 33,9 | 0 | 0,86 |

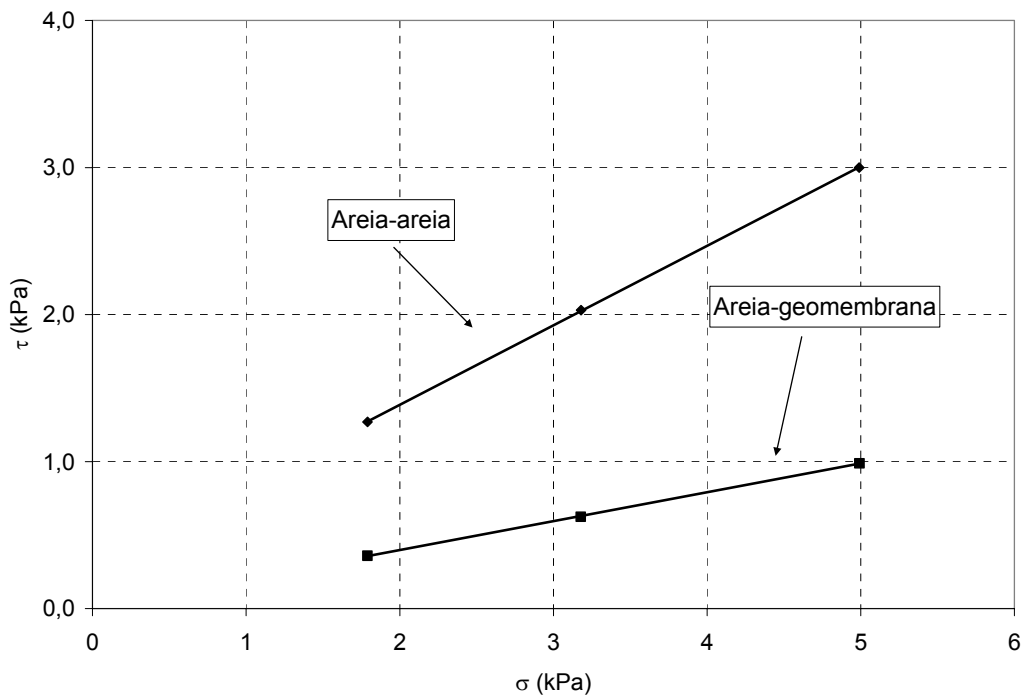
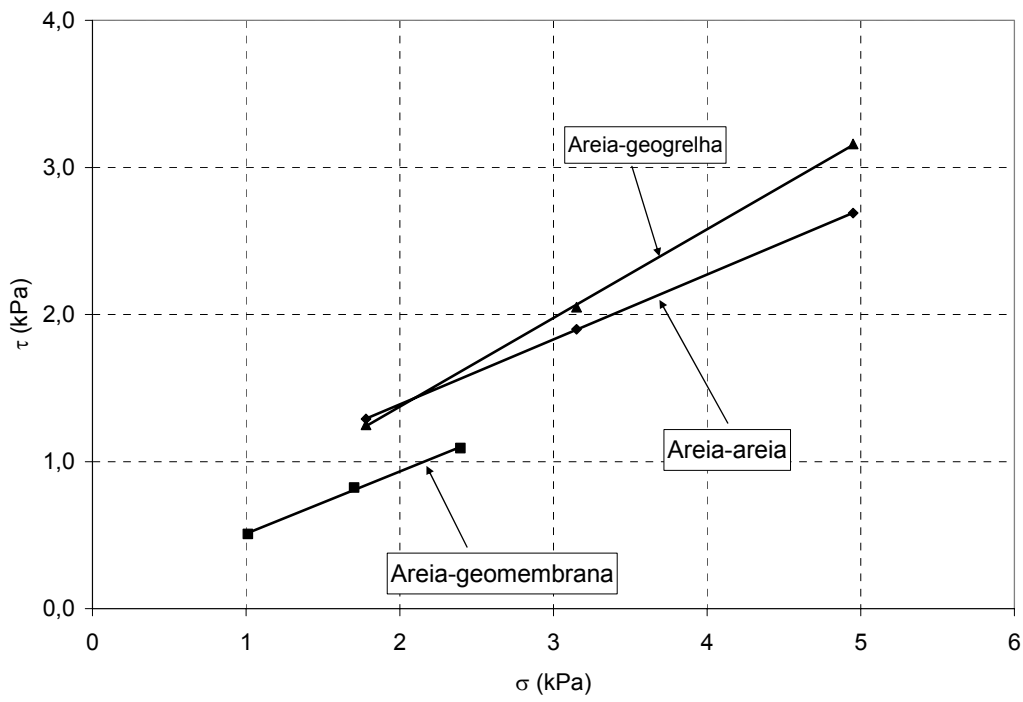
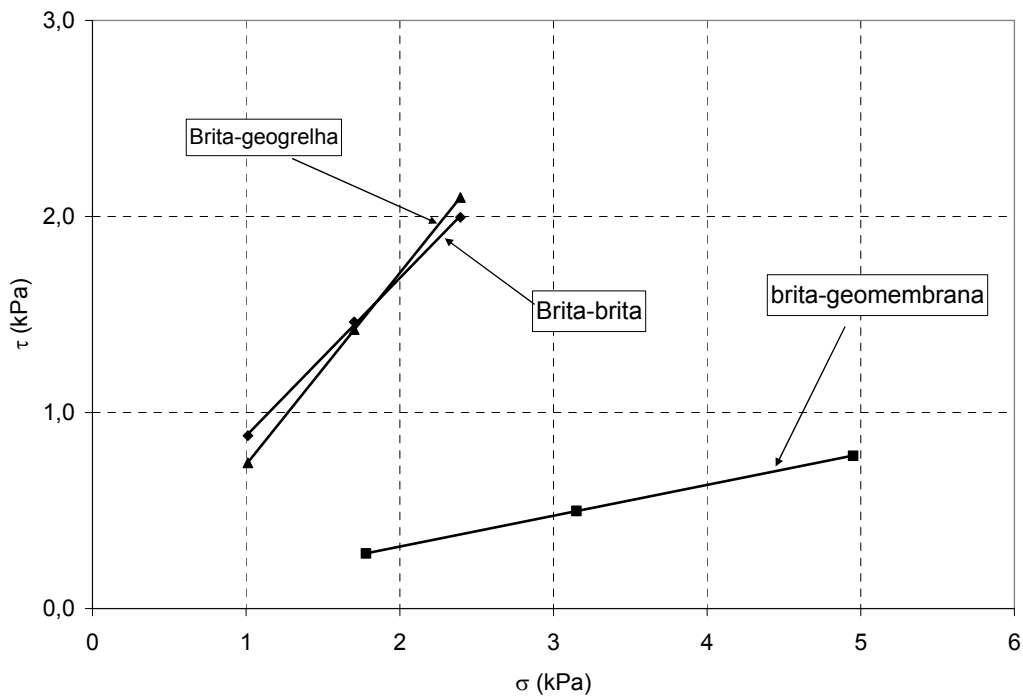


Figura 255 - Envoltórias de resistência das interfaces com areia obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 4,5°.

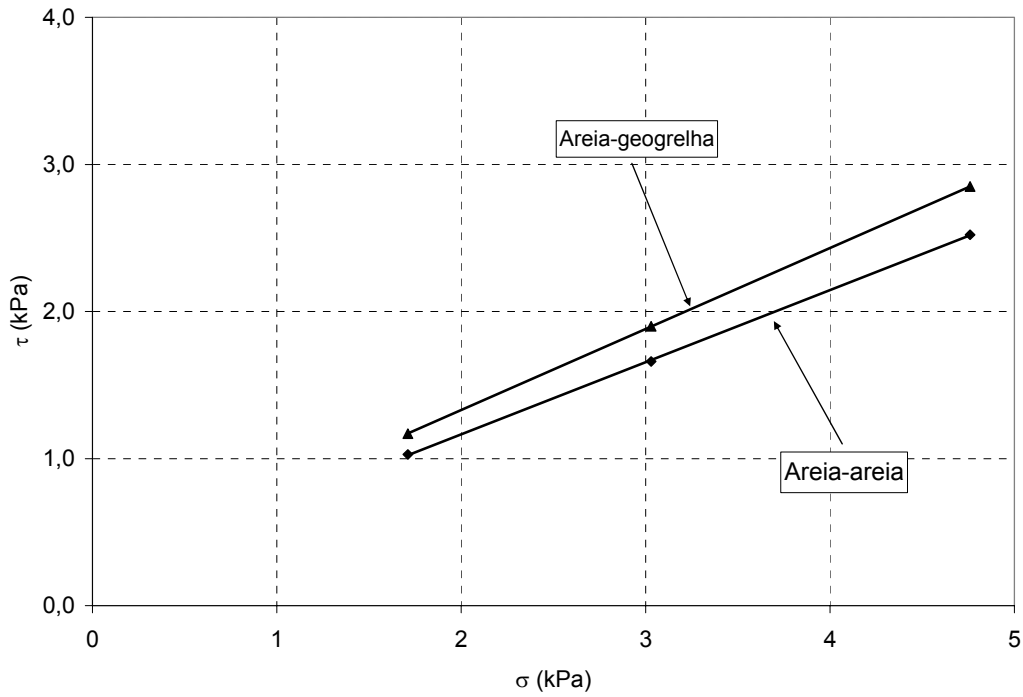


(a)

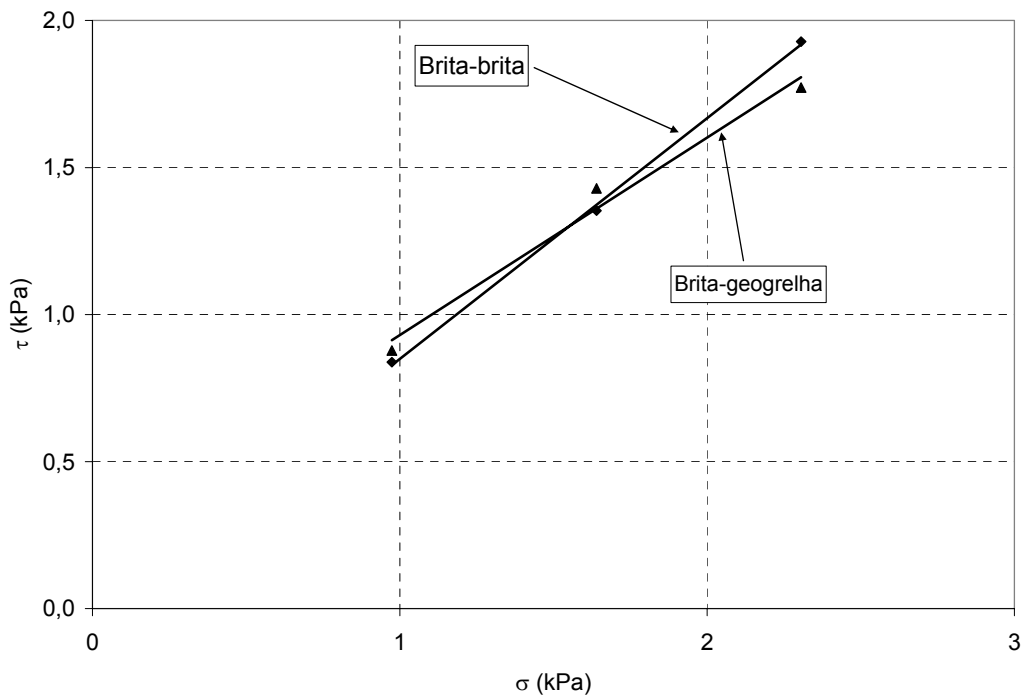


(b)

Figura 256 - Envoltórias de resistência das interfaces com (a) areia e (b) brita, obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 9°.



(a)



(b)

Figura 257 - Envoltórias de resistência das interfaces com (a) areia e (b) brita, obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 18° .

Na Tabela 60, observa-se que o aumento da granulometria tem efeitos diferentes para as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana. Para a interface solo-geogrelha a 9° de inclinação, o aumento da granulometria corresponde a uma redução de eficiência em termos de ângulo de atrito e coesão. Nas interfaces solo-geomembrana, nota-se que o aumento da granulometria corresponde a um aumento de eficiência de ϕ_{sg}' e a' . Para os ensaios com 18° de inclinação, caso das interfaces solo-geogrelha, nota-se que o aumento da granulometria corresponde a uma redução de eficiência dos parâmetros de resistência.

Conclui-se, de uma forma geral, que o aumento da granulometria, independente do ângulo em que foi realizado o ensaio, corresponde a um aumento de eficiência de interface para as interfaces solo-geomembrana e a uma redução de eficiência de interface para as interfaces solo-geogrelha.

9.4. Influência do Tipo de Geossintético

Para analisar a influência do tipo de geossintético, foram considerados ensaios representativos das interfaces solo-geossintético executados no equipamento de cisalhamento direto inclinado sob tensão de confinamento intermediária (1,8kPa). A Tabela 61 apresenta os resultados dos ensaios. A geomembrana utilizada foi a Polimanta.

Tabela 61 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para $D_r = 15\%$ e tensão confinante de 1,8kPa

| Geossintético | Solo | δ_{rup} (mm) | α_{rup} (graus) | Tensões na Ruptura | | | ϕ_{sec} (graus) |
|---------------|----------|------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------|
| | | | | σ_{rup} (kPa) | τ_{rup} (kPa) | τ_{rup}/σ_{rup} | |
| Geogrelha | Areia | 8,3 | 9 | 1,78 | 1,25 | 0,70 | 35,1 |
| | Brita(*) | 6,0 | 9 | 1,70 | 1,42 | 0,84 | 40,0 |
| | Areia | 9,5 | 18 | 1,71 | 1,17 | 0,68 | 34,4 |
| | Brita(*) | 4,0 | 18 | 1,64 | 1,43 | 0,87 | 41,0 |
| Geomembrana | Areia | 1,3 | 4,5 | 1,79 | 0,36 | 0,20 | 11,4 |
| | Brita(*) | 15,3 | 4,5 | 1,72 | 0,82 | 0,48 | 25,6 |
| | Areia | 0 | 9 | 1,78 | 0,28 | 0,16 | 9,0 |
| | Brita(*) | 22,5 | 9 | 1,70 | 0,82 | 0,48 | 25,6 |

(*) Tavares (2008)

Na Tabela 61, pode-se observar que, para cada tipo de interface, os maiores valores de ângulo de atrito secante na ruptura correspondem à geogrelha. As duas interfaces (geogrelha e geomembrana) apresentaram uma diferença superior a 5 graus no valor de ϕ_{sec} , para qualquer inclinação de ensaio. Os maiores valores observados são para a interface brita-geomembrana, cerca de 16,6°.

Os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da granulometria para as interfaces solo-geogrelha, independente do ângulo de inclinação do ensaio. Entretanto, é observado um comportamento distinto para as interfaces solo-geomembrana. Enquanto a ruptura das interfaces areia-geomembrana tende a ser brusca, ou com pequenos deslocamentos, a interface brita-geogrelha apresenta deslocamentos maiores na ruptura. Uma explicação para isso pode estar associada à capacidade que a brita tem de modificar a textura da superfície da geomembrana através de ranhuras ou danos que aumentam o imbricamento. Estes pontos tendem a dificultar ou retardar a ruptura da interface, além de aumentar a resistência final.

Na Tabela 62, observa-se que a geogrelha tem os maiores parâmetros de interface. Houve uma diferença de mais de 20° no ângulo de atrito das duas interfaces (geogrelha e geomembrana), nos ensaios com 9° de inclinação. Esse comportamento deve-se às características superficiais do geossintético. A geomembrana apresenta uma superfície lisa e polida, sem imbricamento com os grãos de solo, e por consequência, com menor resistência. Por sua vez, a geogrelha tem uma área aberta considerável, propiciando o contato solo-solo, além das tiras longitudinais e transversais apresentarem uma superfície rugosa.

Tabela 62 - Parâmetros de resistência obtidos para cada interface, com $D_r = 15\%$

| α (°) | Geossintético | Solo | a (kPa) | ϕ_{sg} (graus) |
|--------------|---------------|-------|---------|---------------------|
| 4,5 | Geomembrana | areia | 0 | 11,1 |
| | | brita | 0,1 | 24,8 |
| 9 | Geomembrana | areia | 0 | 9 |
| | | brita | 0,1 | 22,9 |
| | Geogrelha | areia | 0,2 | 31,1 |
| | | brita | 0 | 44,4 |
| 18 | Geogrelha | areia | 0,2 | 28,8 |
| | | brita | 0,3 | 33,9 |

9.5. Considerações Finais

O capítulo apresentou uma análise da resistência das interfaces solo-geossintético, obtidas em ensaios de cisalhamento direto inclinado. Nestes estudos, foram avaliadas as influências do tipo de solo, do tipo de geossintético e da tensão confinante nos resultados dos ensaios.

O programa experimental envolveu ensaios de cisalhamento direto convencional em dois tipos de geossintéticos e um solo (areia), utilizado na condição fofa (densidade relativa de 15%).

Foram executados ensaios de interface solo-solo, no equipamento de cisalhamento direto inclinado, obtendo-se os parâmetros de resistência nas mesmas condições de baixas tensões normais. Com isso, foram obtidos os valores de eficiência da interface.

Analisou-se a influência da tensão confinante, verificando-se que seu aumento acarretou em comportamentos similares, no que concerne à tensão cisalhante de ruptura para as diferentes interfaces.

Quanto à influência do tipo de solo, observou-se que o aumento da granulometria corresponde a um aumento do ângulo de atrito de interface. Verifica-se, também, que há uma redução da eficiência, na interface solo-geogrelha, e um aumento de eficiência, para a interface solo-geomembrana.

Com relação ao tipo de geossintético, observou-se que as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência, quando comparadas com as interfaces solo-geogrelha. Isto pode ser explicado pelo fato que a geomembrana apresenta uma superfície lisa e polida, dificultando o imbricamento dos grãos do solo.