

8. Resultados e Análises: Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

8.1. Considerações Iniciais

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

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, ou seja, a tensão aplicada pelas placas de aço mais a camada de solo da caixa superior com a plataforma de ensaio na posição horizontal. É importante ressaltar que os valores de tensão normal e cisalhante utilizados para obtenção das envoltórias de resistência são os 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 mesma convenção de siglas do Capítulo 7 para identificação dos ensaios realizados: Ar para areia; B0 para brita; GMPL para geomembrana Polimanta; GG35 para geogrelha Fortrac; 15 para densidade relativa igual a 15%. Por exemplo, a sigla AR15xGG35 corresponde ao ensaio de interface areia-geogrelha com $D_r = 15\%$.

8.2. Influência da Tensão Confinante

A Tabela 49 apresenta os resultados mais representativos em todas as interfaces ensaiadas para, no mínimo, três tensões confinantes diferentes.

Tabela 49 - Influência da tensão confinante nas tensões cisalhantes de ruptura ($D_r = 15\%$)

Interface	τ (kPa)								$\Delta\tau$ (kPa)
	$\sigma_n=$ 1,1 kPa	$\sigma_n=$ 1,8 kPa	$\sigma_n=$ 3,2 kPa	$\sigma_n=$ 4,6 kPa	$\sigma_n=$ 5,6 kPa	$\sigma_n=$ 6,3 kPa	$\sigma_n=$ 7,0 kPa	$\sigma_n=$ 8,4 kPa	
Ar x Ar	0,93	1,36	2,36	3,11	3,59	~	4,30	~	+3,37
Ar x GG35	~	1,36	2,18	3,07	~	~	4,55	5,42	+4,06
Ar x GMPL	~	~	0,66	~	~	1,32	~	1,82	+1,16

De acordo com a Tabela 49, pode-se observar que o aumento da tensão confinante acarretou em comportamentos semelhantes no que concerne à tensão cisalhante de ruptura para as diferentes interfaces ensaiadas. Percebe-se que a interface areia-geogrelha sofre a maior influência do efeito da tensão confinante, com um aumento de 4,06kPa na tensão cisalhante de ruptura, seguida das interfaces areia-areia e areia-geomembrana com um aumento de 3,37 e 1,16kPa, respectivamente.

8.3. Influência do Tipo de Solo

8.3.1. Interface Solo-Solo

Para avaliar a influência do tipo de solo foram comparados uma série de ensaios de cisalhamento direto convencional nas interfaces areia-areia e brita-brita (Tavares, 2008) com densidade relativa de 15%.

A Tabela 50 e Figura 234 apresentam uma comparação entre os resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional nas duas interfaces.

Tabela 50 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces areia-areia e brita-brita

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
Brita (*)	1,0	8,0	0	1,02	0,78	0,77	37,6
	1,7	5,0	0	1,72	1,31	0,76	37,2
	2,4	8,5	0	2,42	1,77	0,73	36,1
Areia	1,1	23,5	0	1,10	0,93	0,85	40,2
	1,8	21,8	0	1,80	1,36	0,76	37,1
	3,2	15,3	0	3,19	2,36	0,74	36,5
	4,6	15,0	0	4,58	3,11	0,68	34,2
	5,6	13,5	0	5,59	3,59	0,64	32,7
	7,0	11,8	0	6,98	4,30	0,62	31,6

(*) Tavares (2008)

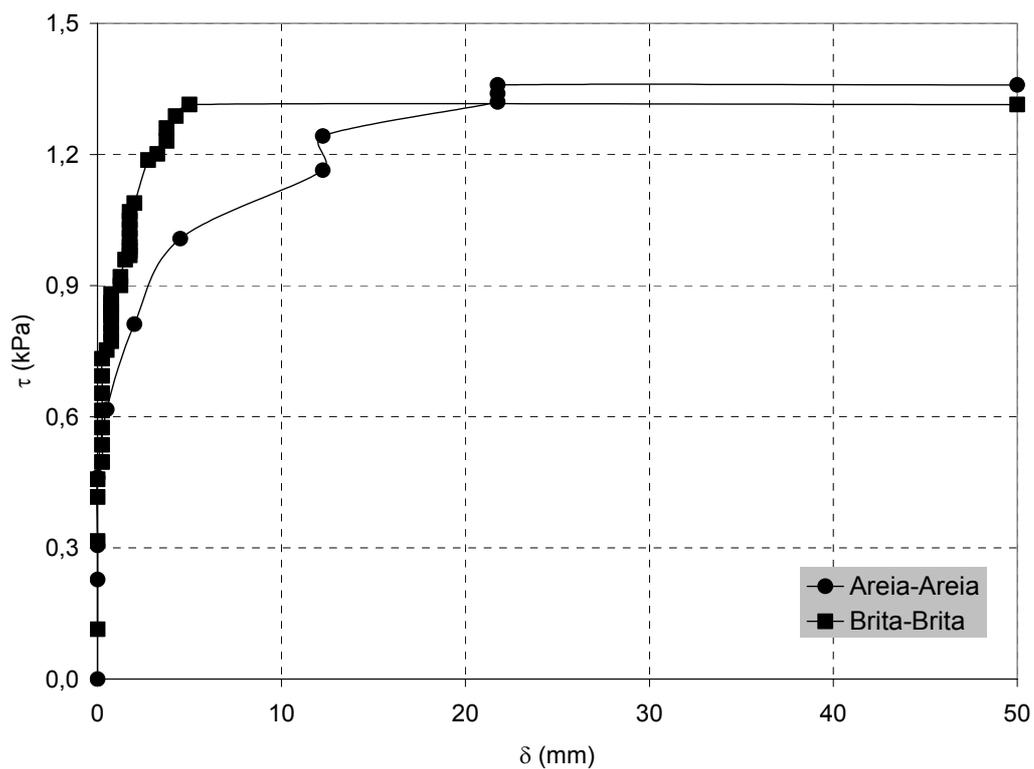


Figura 234 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa em ensaios de cisalhamento direto convencional.

Considerando a Tabela 50 e Figura 234, pode-se observar que os comportamentos das interfaces brita-brita e areia-areia são diferentes. No caso da

interface areia-areia, nota-se que a ruptura é atingida para maiores valores de deslocamento, quando comparada à interface brita-brita. Observa-se, também, que os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante no caso da interface areia-areia, enquanto que na interface brita-brita não há variação significativa.

A Figura 235 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia e brita-brita para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,4kPa e ângulo de atrito de 29,9°, para a interface areia-areia, e coesão de 0,1kPa e ângulo de atrito de 35,1°, para a interface brita-brita. Assim, pode-se concluir que com o aumento da granulometria do solo há um acréscimo do ângulo de atrito igual a 5,2°.

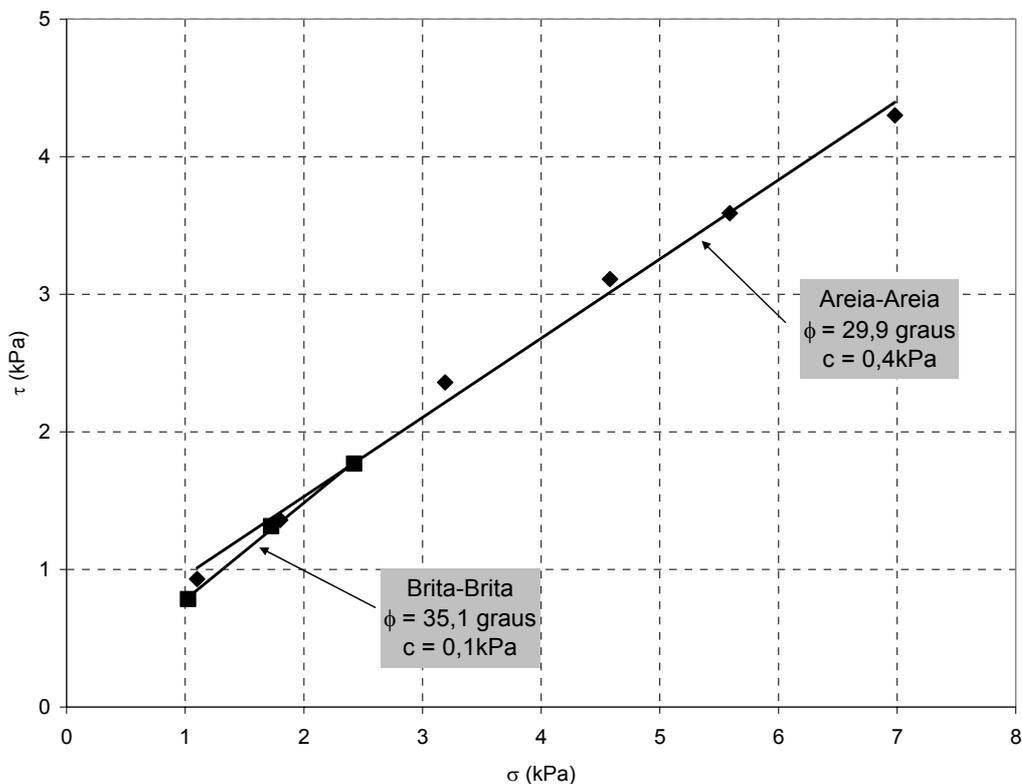


Figura 235 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%.

8.3.2. Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 51 apresenta os resultados de ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha realizados nesta

pesquisa e por Tavares (2008). A Figura 236 apresenta as curvas tensão cisalhante vs deslocamento para uma tensão confinante intermediária (1,8kPa para interface areia-geogrelha e 1,7kPa para interface brita-geogrelha).

Tabela 51 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
Brita (*)	1,0	5,5	0	1,02	0,88	0,86	40,7
	1,7	2,3	0	1,72	1,37	0,80	38,7
	2,4	5,8	0	2,42	1,89	0,78	38,0
Areia	1,8	8,0	0	1,80	1,36	0,76	37,2
	3,2	7,3	0	3,19	2,18	0,68	34,2
	4,6	10,8	0	4,58	3,07	0,67	33,8
	7,0	6,0	0	6,98	4,55	0,65	33,0
	8,4	8,0	0	8,41	5,42	0,64	32,6

(*) Tavares (2008)

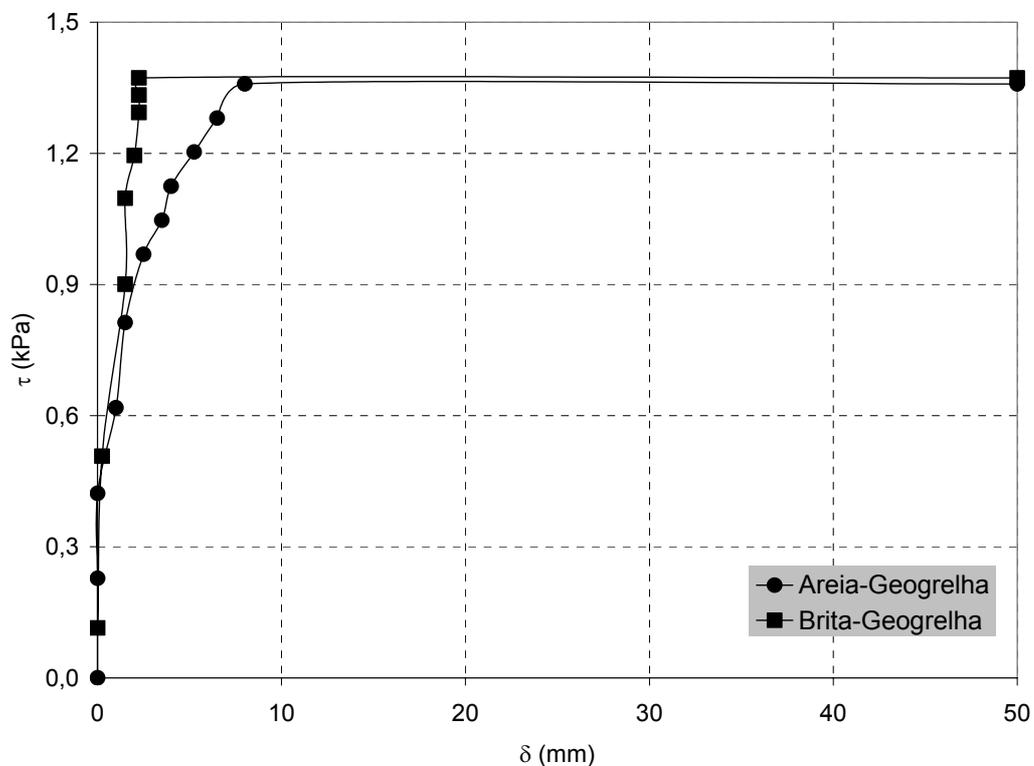


Figura 236 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para tensão confinante de 1,8kPa em ensaios de cisalhamento direto convencional.

Observando os resultados obtidos (Tabela 51 e Figura 236), percebe-se que a inclusão da geogrelha provoca uma redução dos deslocamentos e um aumento da tensão cisalhante de ruptura, quando comparado com os resultados das interfaces solo-solo (Tabela 50).

Os resultados da Tabela 51 indicam que o aumento da granulometria da areia para a brita promove um decréscimo dos deslocamentos na ruptura. Observa-se também o aumento dos valores das tensões cisalhantes de ruptura com o aumento da tensão confinante.

A Figura 237 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 31,7°, para a interface areia-geogrelha, e adesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 35,7°, para a interface brita-geogrelha. Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de 4° no ângulo de atrito de interface.

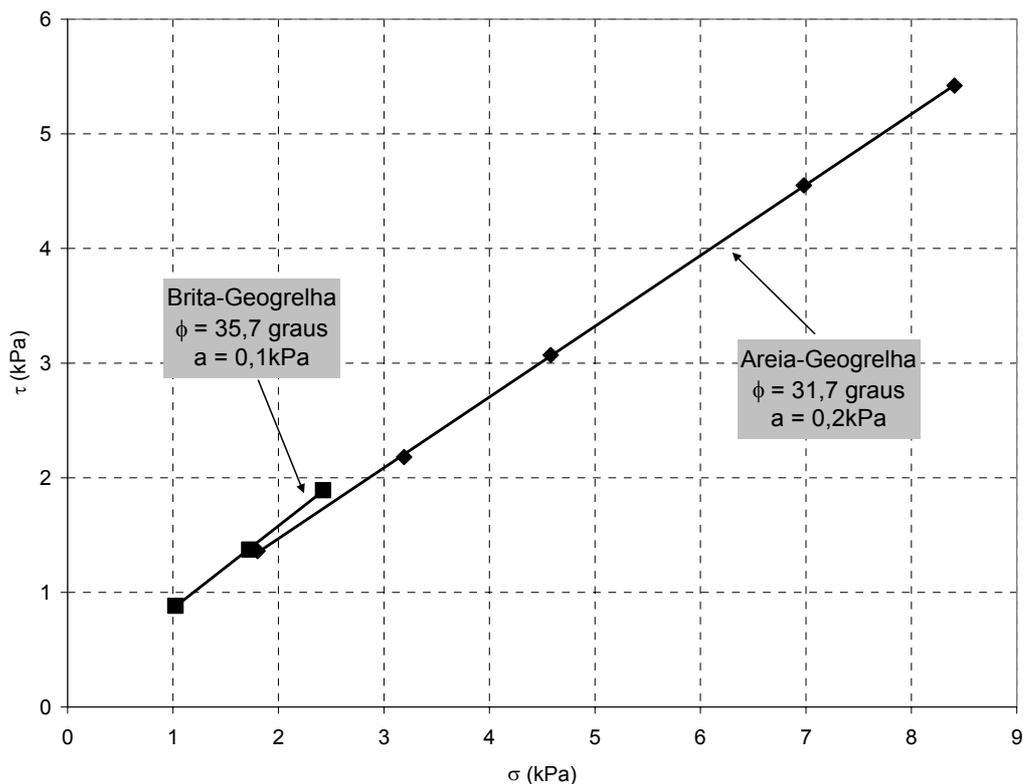


Figura 237 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para densidade relativa de 15% em ensaios de cisalhamento direto convencional.

8.3.3. Interface Solo-Geomembrana

A Tabela 52 e Figura 238 apresentam uma comparação entre os resultados das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana. A Figura 238 apresenta as curvas tensão cisalhante vs deslocamento para tensões confinantes de 2,4kPa para interface brita-geomembrana e 3,2kPa para interface areia-geomembrana.

Tabela 52 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
Brita (*)	1,0	28,5	0	1,02	0,59	0,59	30,5
	1,7	12,5	0	1,72	0,86	0,50	26,6
	2,4	8,0	0	2,42	1,23	0,51	27,0
Areia	3,2	0,5	0	3,19	0,66	0,21	11,6
	6,3	0,5	0	6,30	1,32	0,21	11,8
	8,4	0,8	0	8,41	1,82	0,22	12,2

(*) Tavares (2008)

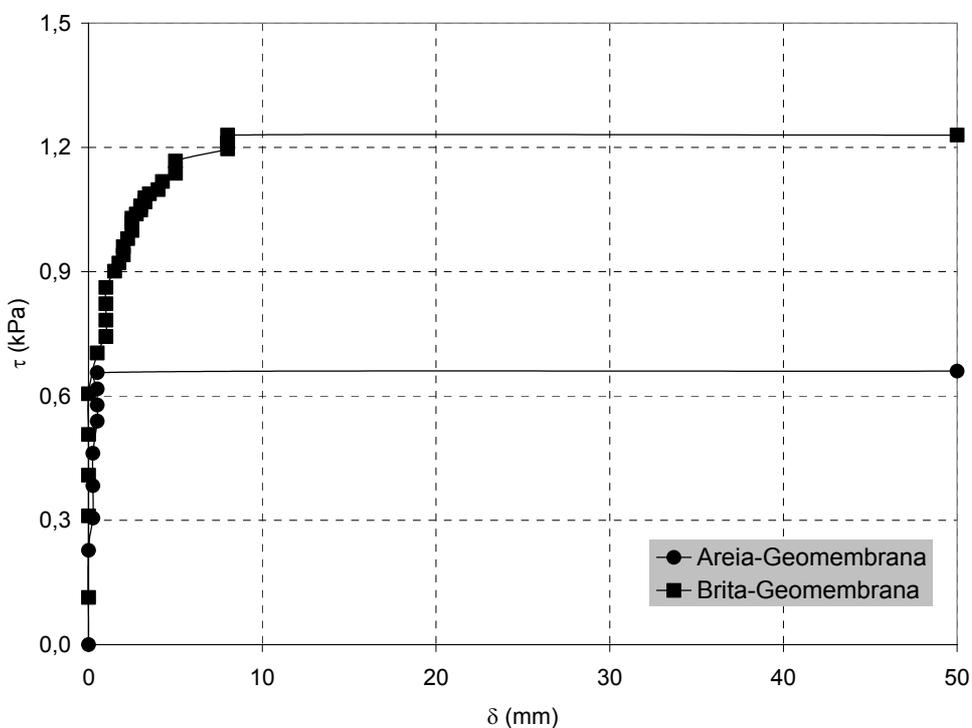


Figura 238 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geomembrana (3,2kPa) e brita-geomembrana (2,4kPa) em ensaios de cisalhamento direto convencional.

De acordo com a Tabela 52, nota-se, que o aumento da tensão confinante corresponde a uma diminuição dos deslocamentos máximos na ruptura para a interface brita-geogrelha. Para a interface areia-geomembrana, os deslocamentos tendem a um aumento pouco expressivo, quando comparado com a magnitude de variação dos deslocamentos observados na interface brita-geomembrana.

A Figura 239 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de 0kPa e ângulo de atrito de 12,6°, para a interface areia-geomembrana, e adesão de 0,1kPa e ângulo de atrito de 24,7°, para a interface brita-geomembrana. Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo do ângulo de atrito de interface de 12,1°.

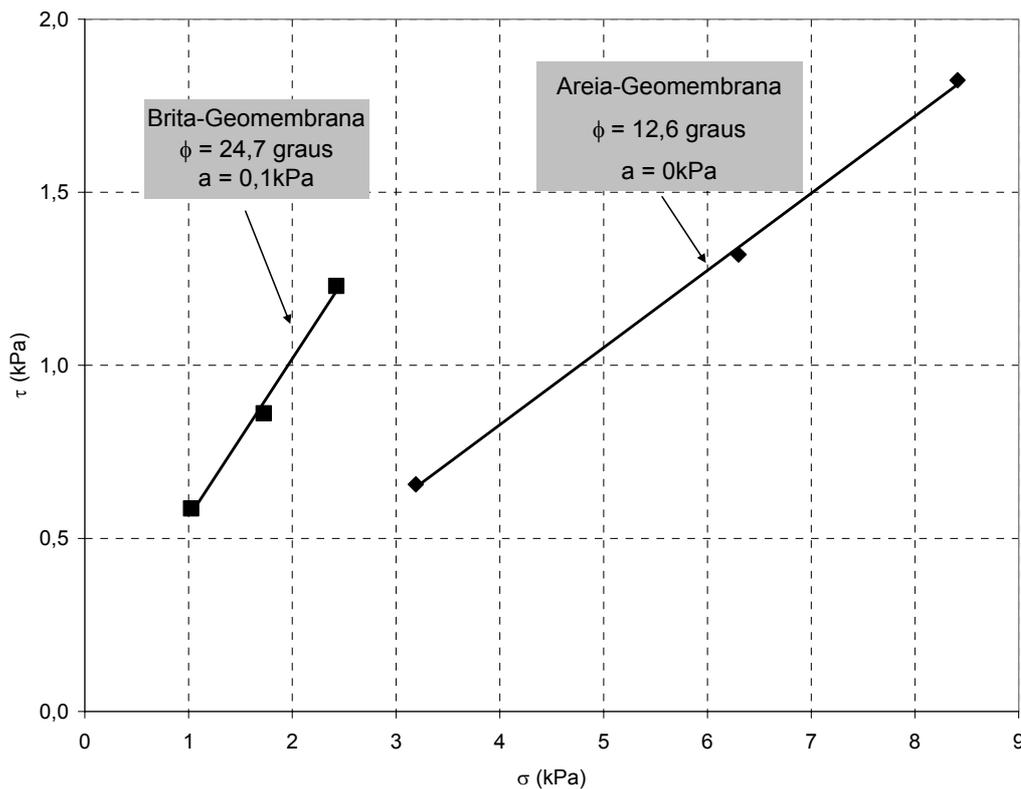
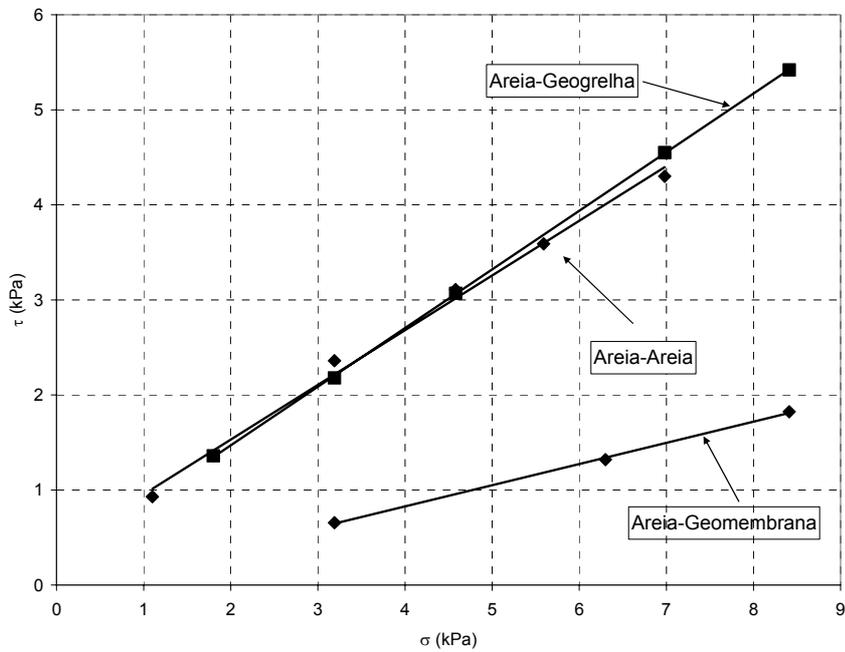


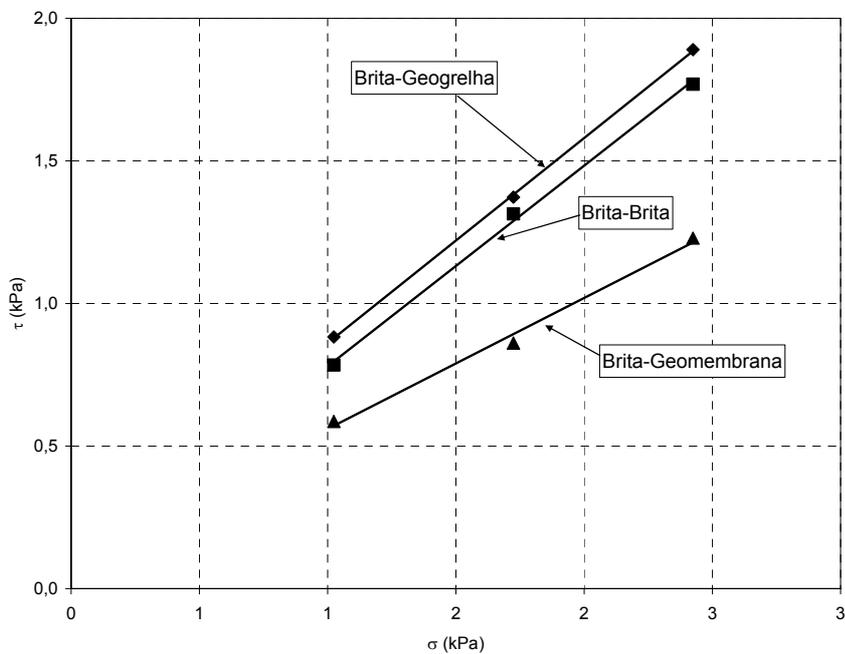
Figura 239 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15% em ensaios de cisalhamento direto convencional.

8.3.4. Eficiências de Interfaces

A Figura 240 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces areia-geossintético e brita-geossintético estudadas nesta pesquisa.



(a)



(b)

Figura 240 - Envoltórias de resistência obtidas de ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces com areia (a) e brita (b).

A Tabela 53 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 53 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces obtidos de ensaios de cisalhamento direto convencional, $D_r = 15\%$

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c	E_ϕ
Ar x GG35	0,2	31,7	0,50	1,06
B0 x GG35	0,1	35,7	1,00	1,02
Ar x GMPL	0,0	12,6	0,00	0,42
B0 x GMPL	0,1	24,7	1,00	0,70

Os parâmetros de eficiência E_c e E_ϕ foram calculados considerando os parâmetros de resistência dos dois tipos de solo, obtidos dos ensaios de cisalhamento direto convencional.

De acordo com a Tabela 53, observa-se que o aumento da granulometria tem efeitos diferentes para as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana. Para a interface solo-geogrelha, o aumento da granulometria corresponde a uma diminuição pouco significativa de eficiência em termos de ângulo de atrito e um aumento considerável de eficiência em termos de coesão. Nas interfaces solo-geomembrana, observa-se o aumento de eficiência em termos de ângulo de atrito e de coesão com o aumento da granulometria.

8.4. 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 convencional sob tensão de confinamento de 3,2kPa para interfaces areia-geossintético e 2,4kPa para interfaces brita-geossintético.

Na Tabela 54, 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 de 22,7 e 11,0° no ângulo de atrito secante de ruptura, respectivamente. O aumento da

granulometria corresponde a uma diminuição dos deslocamentos da interface areia-geossintético, ao contrário da interface areia-geomembrana.

Tabela 54 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para a tensão confinante de 2,6kPa, obtidos de ensaios de cisalhamento direto convencional com $D_r = 15\%$

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	7,3	0	3,19	2,18	0,68	34,3
	Brita(*)	5,8	0	2,42	1,89	0,78	38,0
Geomembrana	Areia	0,5	0	3,19	0,66	0,21	11,6
	Brita(*)	8,0	0	2,42	1,23	0,51	27,0

(*) Tavares (2008)

Na Tabela 55, pode-se observar que, os maiores parâmetros de interface correspondem à geogrelha. As duas interfaces, geogrelha e geomembrana, apresentaram uma diferença de mais de 4 e 12,1° no ângulo de atrito de interface, respectivamente.

Tabela 55 - Comparação entre os parâmetros de resistência das interfaces obtidos em ensaios de cisalhamento direto convencional com $D_r = 15\%$

Geossintético	Solo	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)
Geogrelha	areia	31,7	0,2
	brita	35,7	0,1
Geomembrana	areia	12,6	0,0
	brita	24,7	0,1

8.5. Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma análise das resistências de interfaces solo-geossintético obtidas em ensaios de cisalhamento direto convencional. Nestes estudos foram avaliados a influência do tipo de solo, tipo de geossintético e tensão confinante nos resultados dos ensaios. Desta forma, foram apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de rampa executados no programa experimental, incorporando parte do banco de dados disponível (Tavares, 2008).

O programa experimental envolveu ensaios de cisalhamento direto convencional em dois tipos de geossintéticos e areia com densidade relativa de 15%. Foram realizados ensaios de interface solo-solo, obtendo-se os parâmetros de resistência a baixas tensões normais, nas mesmas condições dos ensaios de interface. Com isso, foram obtidos os valores de eficiência da interface.

Analisou-se a influência da tensão confinante nas tensões cisalhantes de ruptura e concluiu-se que as diferentes interfaces apresentam comportamentos semelhantes.

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

Por fim, 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 tipo de estrutura do geossintético, já que a geomembrana perde resistência devido às características de sua superfície lisa e polida.