

7. Resultados e Análises: Ensaio de Rampa

7.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e analisados os ensaios de rampa realizados nesta tese. Avalia-se a influência da tensão confinante, densidade relativa do solo, granulometria, tipo de solo e tipo de geossintético. Sempre que possível, são feitas comparações com os resultados reportados por Aguiar (2003), Rezende (2005) e Tavares (2008).

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, já que existe uma variação destes valores com a inclinação da plataforma de ensaios.

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.

Os ensaios são identificados por meio da combinação das seguintes siglas: Ar para areia; B0 para brita utilizada por Tavares (2008); GMPL para geomembrana Polimanta; GMCP para geomembrana Cipageo; GG35 para geogrelha Fortrac 35; 15, 45 e 90 para densidades relativas da areia respectivamente iguais a 15%, 45% e 90%. Por exemplo, a sigla AR15xGG35 corresponde ao ensaio de interface areia-geogrelha com densidade relativa de 15%.

7.2. Influência da Tensão Confinante

A Tabela 37 apresenta os resultados mais representativos em todas as interfaces ensaiadas para, no mínimo, três tensões confinantes diferentes. A interface areia vs geomembrana Polimanta (GMPL) foi ensaiada para três densidades relativas diferentes com o objetivo de completar o banco de dados existente e possibilitar comparações.

Tabela 37 - Influência da tensão confinante nos ângulos de rampa na ruptura

Interface	Dr (%)	α (graus)					$\Delta\alpha$	
		$\sigma_n=1,4$ kPa	$\sigma_n=2,1$ kPa	$\sigma_n=2,8$ kPa	$\sigma_n=3,5$ kPa	$\sigma_n=4,6$ kPa	(°)	(%)
Ar x Ar	15	20	21	~	22	~	+2	10,0
Ar x GG35	15	21	22	24	24	24	+3	14,3
Ar x GMPL	15	9	~	9	~	9	0	0,0
	45	9	9	9	~	~	0	0,0
	90	9	9	9	~	~	0	0,0
Ar x GMCP	15	15	16	17	~	~	+2	13,3

De acordo com a Tabela 37, pode-se observar que o aumento da tensão confinante acarretou em comportamentos diferentes no que concerne ao ângulo de rampa de ruptura para as diferentes interfaces ensaiadas. Percebe-se que a interface areia-geogrelha (Ar x GG35) sofre a maior influência da tensão confinante, com um aumento do ângulo de rampa de 3°, correspondendo a um aumento de 14,3%. Já os ângulos de rampa de ruptura das interfaces areia-areia (Ar x Ar) e areia-geomembrana Cipageo (Ar x GMCP) têm um aumento de 2°, equivalente a um aumento de 10 e 13,3%, respectivamente.

Nota-se ainda que o comportamento da interface areia-geomembrana Polimanta (Ar x GMPL) é independente da tensão confinante e densidade relativa, pois manteve-se constante e igual a 9°. Este comportamento pode ser explicado pela estrutura da geomembrana que apresenta uma face lisa e polida.

7.3. Influência da Densidade Relativa

7.3.1. Interface Solo-Solo

Os resultados dos ensaios de rampa da interface areia-areia para três valores de densidades relativas ($D_r = 15, 45$ e 90%) são resumidos na Tabela 38. Foram incorporados os resultados de Rezende (2005) para completar as análises. Apresenta-se os valores de tensão normal (σ), deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), ângulo de rampa na ruptura (α_{rup}), tensões normal e cisalhante na ruptura (σ_{rup} e τ_{rup}), relação entre as tensões e ângulo de atrito secante (ϕ_{sec}). A Figura 215 apresenta uma comparação entre os resultados dos ensaios para a tensão de confinamento de 2,1kPa (única tensão de confinamento comum).

Os resultados da Tabela 38 e Figura 214 indicam um comportamento característico de solo arenoso neste tipo de ensaio, onde a ruptura é atingida com valores reduzidos de deslocamento, para as três densidades. Os resultados também indicam que o aumento da densidade relativa acarreta em uma redução dos valores de deslocamentos máximos e um acréscimo do ângulo de rampa, para uma mesma tensão confinante, no caso 2,1kPa.

Tabela 38 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-areia e $D_r = 15, 45$ e 90% .

Dr (%)	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
15	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
45 (*)	2,1	5,3	29	1,79	1,11	0,62	31,7
	3,2	3,0	28	2,86	1,63	0,57	29,7
	5,0	3,5	28	4,44	2,47	0,56	29,1
90 (*)	2,1	2,3	34	1,73	1,30	0,75	36,9
	3,2	1,8	33	2,75	1,91	0,70	34,8
	5,0	1,5	31	4,34	2,73	0,63	32,2

(*) Rezende (2005)

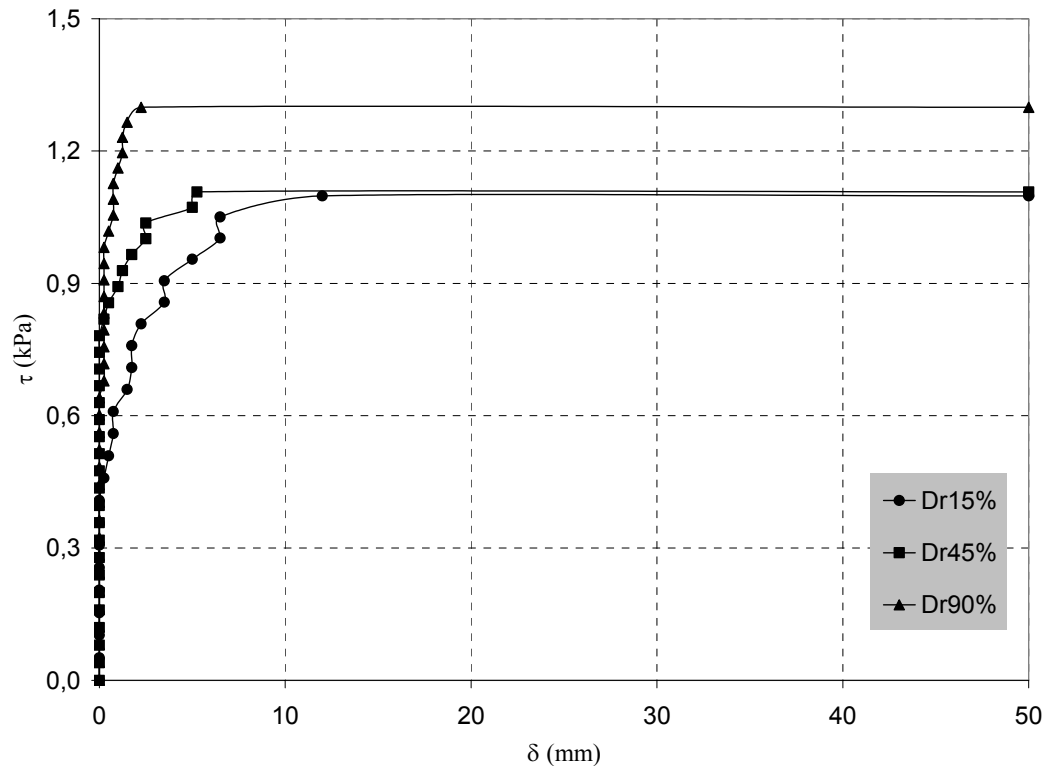


Figura 214 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x areia nas densidades relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa, em ensaios de rampa.

A Figura 215 apresenta a variação do ângulo de rampa em função da tensão confinante para as interfaces areia-areia nas densidades relativas de 15, 45 e 90%. Observa-se que os ângulos de rampa sofrem redução (1 a 3°) com o aumento da tensão confinante para as densidades relativas mais altas. Ao contrário da interface com $Dr=15\%$, que indica aumento do ângulo de rampa (1,5°) com o aumento da tensão confinante.

Observou-se, também, que a diferença entre o ângulo de rampa do material mais denso e do material mais fofo diminuiu com o aumento da tensão confinante (Figura 215). Isso sugere que a envoltória de resistência apresenta uma leve curvatura para o solo mais denso.

A Figura 216 apresenta uma comparação entre as envoltórias de resistência da interface areia-areia para as três densidades relativas, onde os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 24° para a areia na densidade relativa de 15%, coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 27,2° para areia na densidade relativa de 45% e coesão de 0,4kPa e ângulo de atrito de 28,8° para a

densidade relativa de 90%. Assim, constata-se que o aumento da densidade relativa causou um aumento de $4,8^\circ$ no ângulo de atrito e de $0,2\text{kPa}$ na coesão.

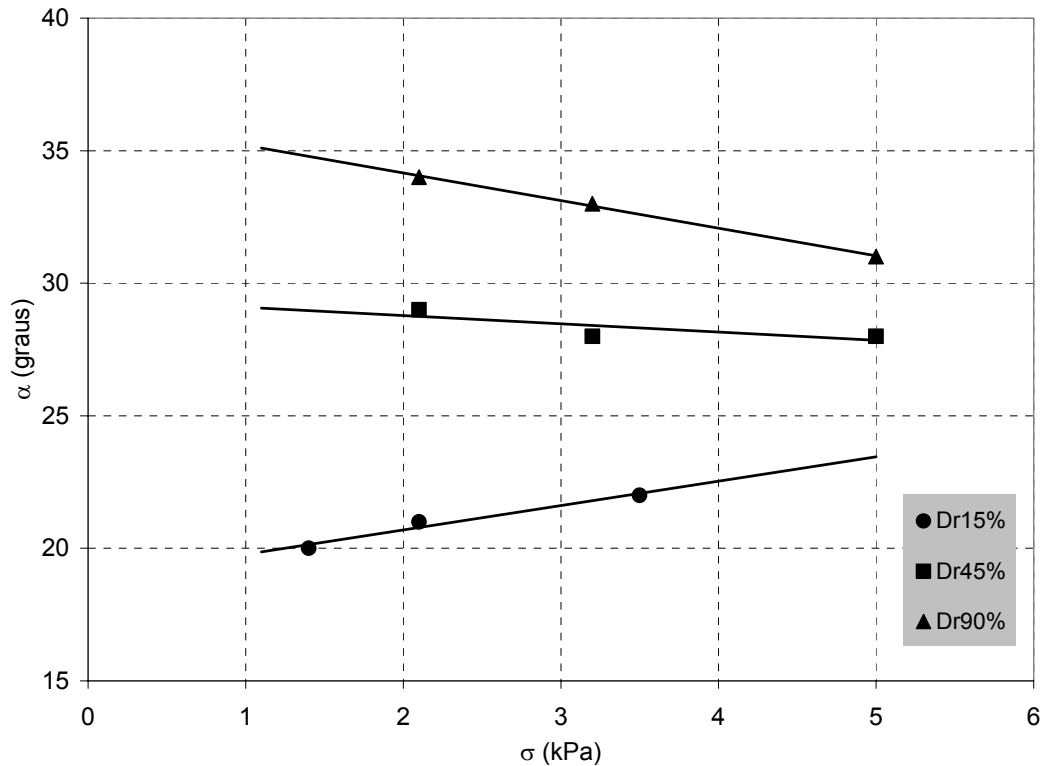


Figura 215 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas da interface areia-areia.

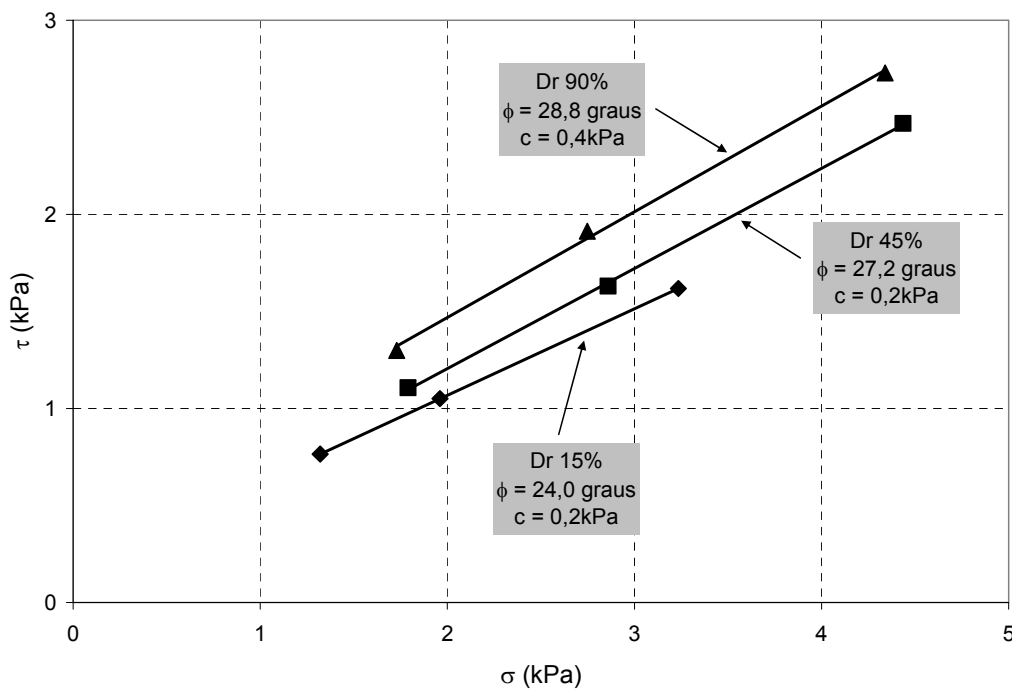


Figura 216 - Envoltórias de resistência das interfaces areia-areia nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.

7.3.2. Interface Solo-Geogrelha

Analogamente ao item anterior, os resultados dos ensaios de rampa da interface areia-geogrelha para as densidades relativas de 15, 45 e 90% são apresentados na Tabela 39 e Figura 217.

Da mesma forma que na interface areia-areia, à medida que se aumenta a densidade relativa do solo, verifica-se uma redução nos valores dos deslocamentos e um acréscimo no ângulo de rampa para a interface solo-geogrelha, para uma mesma tensão confinante de 2,1kPa.

Tabela 39 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geogrelha e $D_r = 15, 45$ e 90%

Dr (%)	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
15	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
45	1,4	10,5	21	1,32	0,81	0,61	31,4
	2,1	4,8	23	1,94	1,15	0,59	30,6
	2,8	4,8	23	2,58	1,42	0,55	28,8
90 (*)	2,1	0,8	32	1,77	1,23	0,70	34,8
	3,2	1,0	32	2,78	1,86	0,67	33,8
	5,0	2,0	30	4,38	2,65	0,60	31,1

(*) Rezende (2005)

Da Figura 218 observa-se também que, para as densidades relativas de 15 e 45%, o valor do ângulo de rampa aumenta com o aumento da tensão confinante, porém, tendendo à estabilização para as tensões mais altas. A diferença entre o ângulo de rampa do material mais denso e o dos materiais mais fofos diminuiu com o aumento da tensão confinante. Este comportamento também foi observado para interface areia-areia.

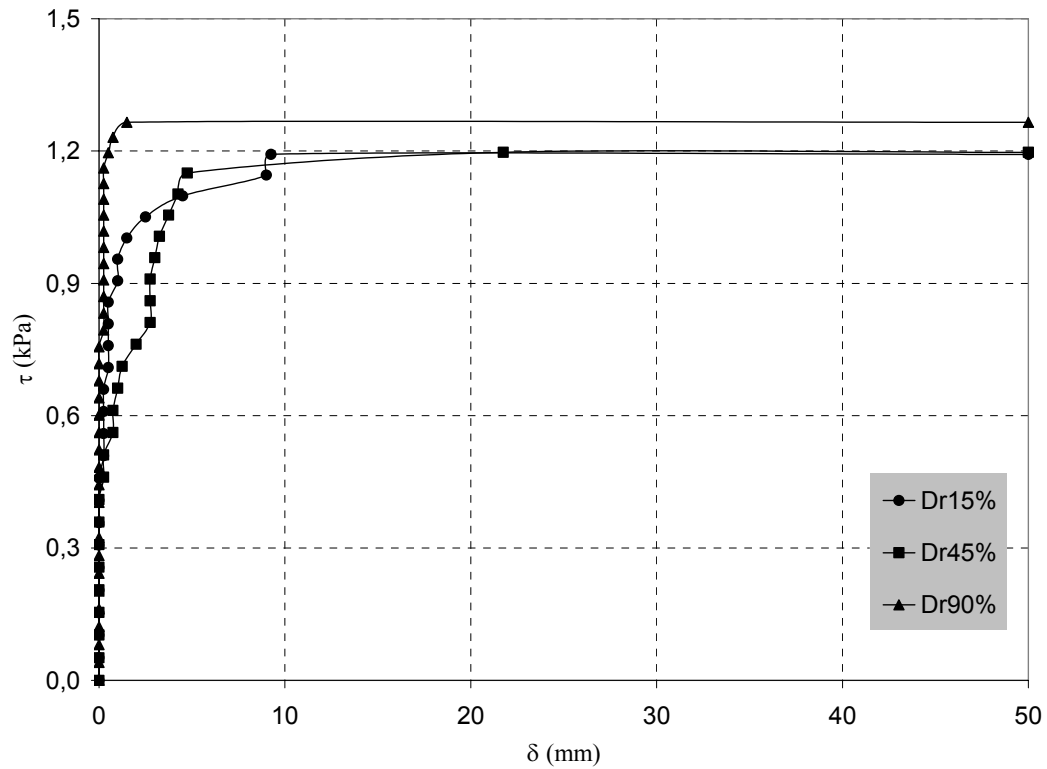


Figura 217 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x geogrelha nas densidade relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa em ensaios de rampa.

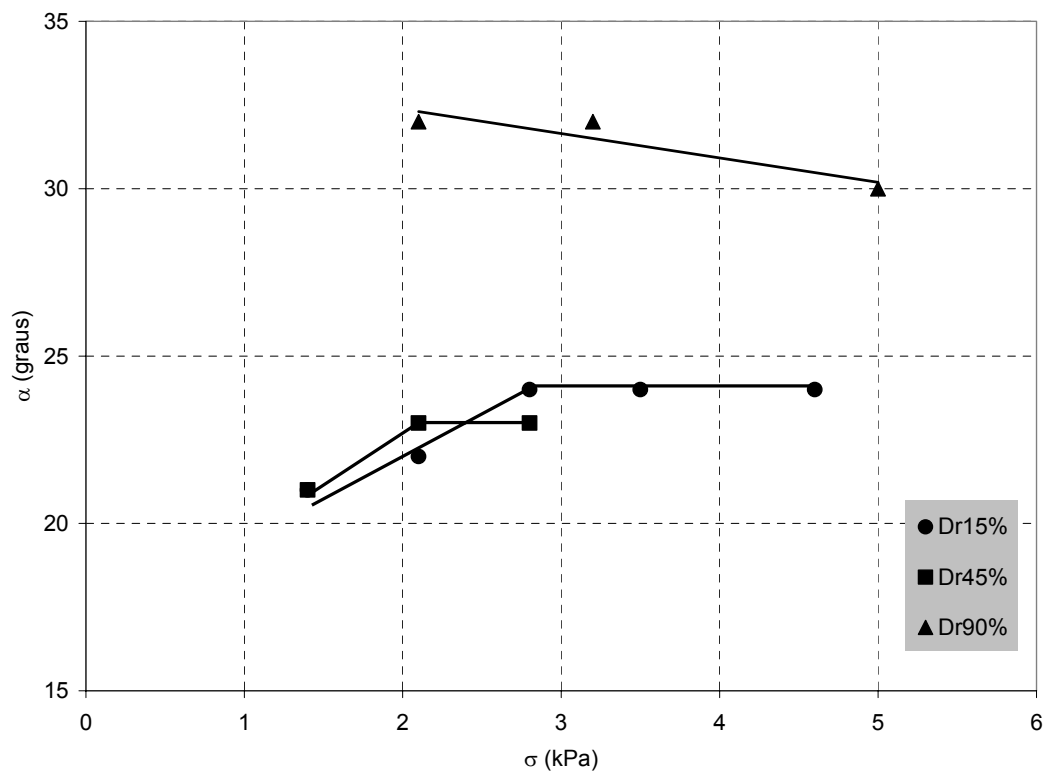


Figura 218 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas da interface areia-geogrelha.

A Figura 219 apresenta uma comparação entre as envoltórias de resistência da interface areia-geogrelha para as três densidades relativas, onde se obteve os seguintes parâmetros de interface: 0,2kPa de adesão e 25,9° de ângulo de atrito da interface para areia na densidade relativa de 15%, 0,2kPa de adesão e 26,0° de ângulo de atrito da interface para areia com $Dr = 45\%$ e 0,3kPa de adesão e 28,6° de ângulo de atrito da interface para areia com $Dr = 90\%$. Assim, o aumento da densidade relativa corresponde a um acréscimo de 0,1kPa na adesão e de 2,7° no ângulo de atrito de interface.

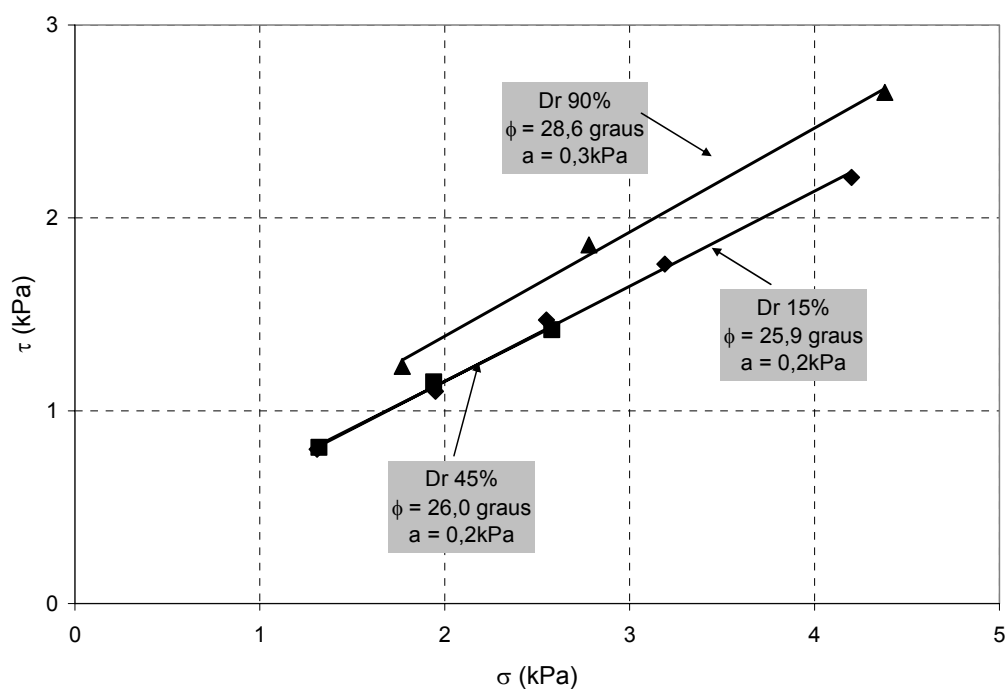


Figura 219 - Envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.

7.3.3. Interface Solo-Geomembrana

As Tabelas 40 e 41 e as Figuras 220 e 221 apresentam os resultados de ensaios de rampa na interface solo-geomembrana onde foram utilizadas duas geomembranas, Cipageo e Polimanta, com três valores de densidade relativa e diferentes níveis de tensão de confinamento.

Na Tabela 40 constata-se que, para as densidades de 15 e 45%, os deslocamentos aumentam com o aumento da tensão confinante, ao contrário do que ocorre com a interface na densidade relativa de 90%. A Figura 220 indica, inclusive, uma ruptura brusca na interface com $D_r=90\%$. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da densidade relativa e as características do geossintético. O acréscimo da densidade relativa acarreta num aumento do embricamento entre os grãos da areia tornando o sistema mais rígido. Por sua vez, a geomembrana de PVC (Cipageo) é flexível, permitindo que os grãos da areia se deformem, ou seja, embricando. Desta forma, a resistência da interface é maior, porém rompe a pequenas deformações.

Em relação à interface areia-geomembrana Polimanta, observa-se na Tabela 41 que, para a densidade relativa de 15%, há uma redução nos deslocamentos com o aumento da tensão confinante. Para as outras duas densidades relativas constata-se que, independente da tensão confinante aplicada, os deslocamentos na ruptura são semelhantes e muito reduzidos. Ressalta-se que os deslocamentos na ruptura da interface na densidade relativa de 90% são ainda menores que os da densidade relativa de 45%.

Tabela 40 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geomembrana Cipageo e $D_r = 15, 45$ e 90%

Dr (%)	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
15	1,4	1,50	15	1,36	0,54	0,40	21,7
	2,1	2,50	16	2,02	0,81	0,40	21,8
	3,5	3,50	17	2,67	1,06	0,40	21,6
45 (*)	2,1	0,25	22	1,90	0,86	0,45	24,3
	3,2	0,50	22	3,00	1,30	0,43	23,4
	5,0	1,75	22	4,66	1,97	0,42	22,9
90 (*)	2,7	0,00	26	2,41	1,28	0,53	28,0
	3,9	0,75	25	3,51	1,74	0,49	26,3
	5,1	0,00	24	4,62	2,15	0,47	25,0

(*) Rezende (2005)

Tabela 41 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geomembrana Polimanta e Dr = 15, 45 e 90%.

Dr (%)	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
15	1,4	2,25	9	1,39	0,35	0,25	14,2
	2,8	0,75	9	2,76	0,57	0,21	11,6
	4,6	0,25	9	4,56	0,85	0,19	10,6
45	1,4	1,25	9	1,40	0,35	0,25	14,1
	2,1	0,75	9	2,09	0,46	0,22	12,5
	2,8	1,25	9	2,77	0,57	0,21	11,6
90	1,4	0,50	9	1,41	0,35	0,25	14,1
	2,1	0,75	9	2,10	0,46	0,22	12,4
	2,8	0,75	9	2,79	0,57	0,21	11,6

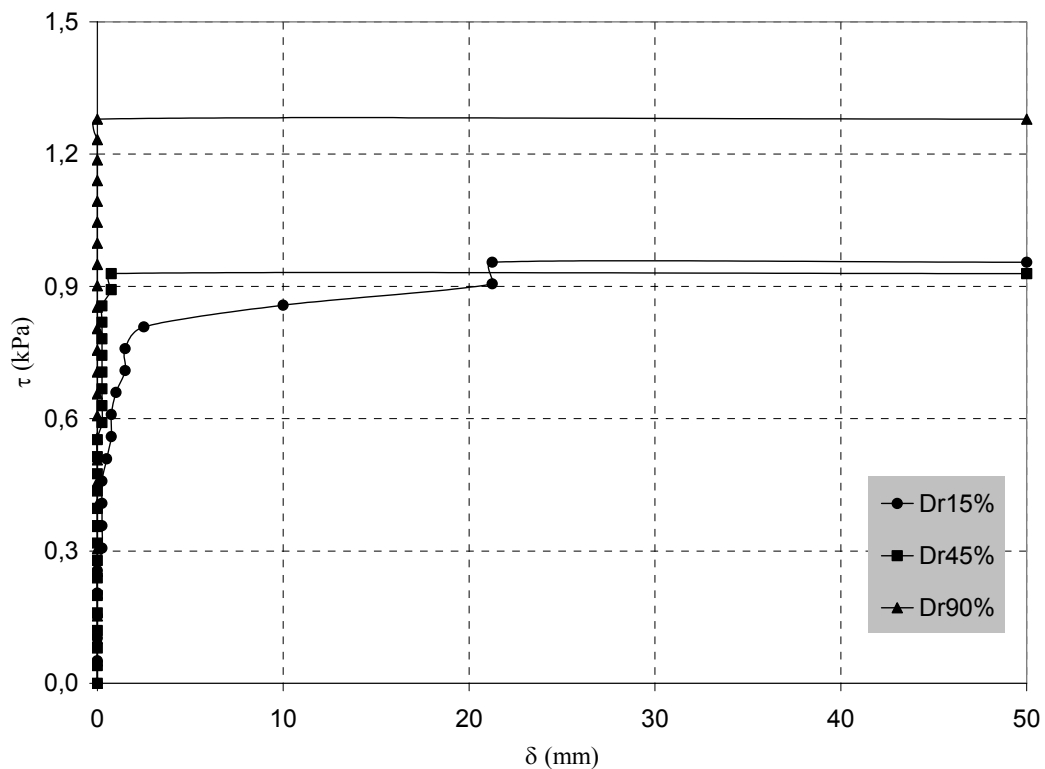


Figura 220 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia geomembrana Cipageo nas densidade relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa, em ensaios de rampa.

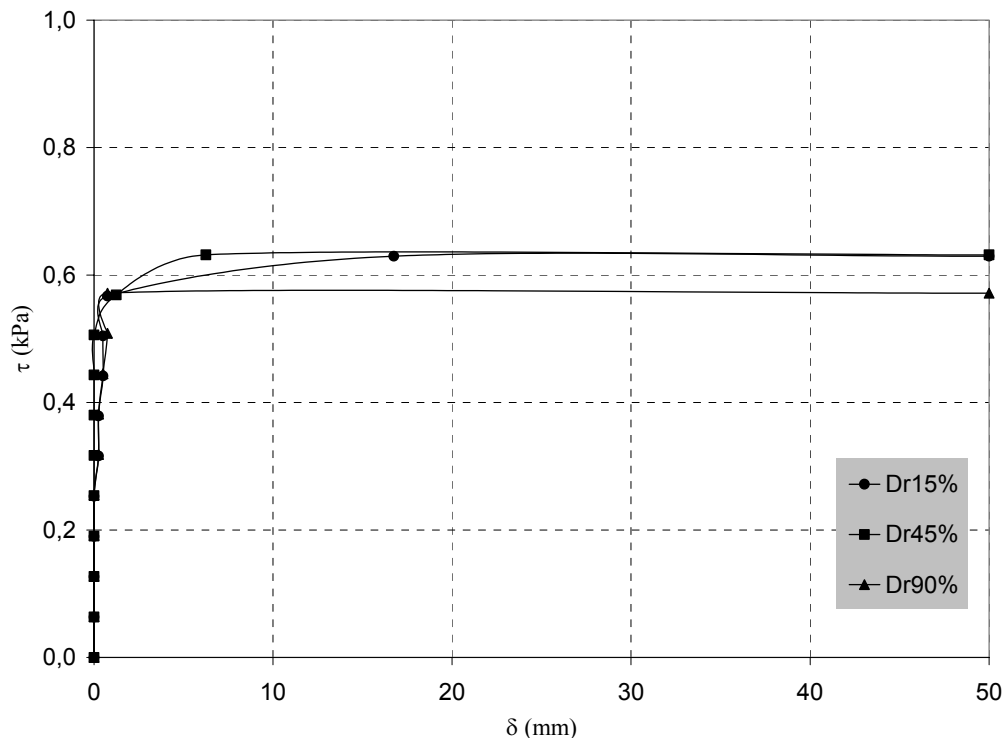


Figura 221 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana Polimanta nas densidades relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,8kPa, em ensaios de rampa.

O efeito da densidade relativa com relação aos ângulos de rampa é distinto para os dois tipos de interfaces ensaiadas (Figuras 222 e 223). Para interfaces areia-geomembrana Cipageo observa-se um comportamento parecido com o da interface areia-areia, onde a diferença entre o ângulo de rampa do material mais denso e do material mais fofo diminuiu com o aumento da tensão confinante (Figura 222).

No caso da interface areia-geomembrana Polimanta (Figura 223) a variação da densidade relativa não afeta o valor do ângulo de rampa de ruptura. A explicação para este comportamento pode estar associada à estrutura lisa e polida desta geomembrana que não permite o imbricamento das partículas do solo no geossintético.

As Figuras 224 e 225 apresentam as envoltórias de resistência para as interfaces areia-geomembrana Cipageo e areia-geomembrana Polimanta, respectivamente. Os parâmetros obtidos para a interface areia-geomembrana Cipageo (Figura 224) foram: 0kPa de adesão e 21,6° de ângulo de atrito de interface para areia na densidade relativa de 15%, 0kPa de adesão e 22,0° de

ângulo de atrito de interface para areia na densidade relativa de 45% e 0kPa de adesão e 21,6° de ângulo de atrito para areia na densidade relativa de 90%.

Para a interface areia-geomembrana Polimanta (Figura 225), os parâmetros obtidos foram sempre iguais a 0,1kPa de adesão e 9° de ângulo de atrito de interface para areia nas densidades relativas de 15, 45% e 90%.

Pode-se concluir que não há variação significativa do ângulo de atrito de interface e da adesão das duas interfaces areia-geomembrana com o aumento da densidade relativa.

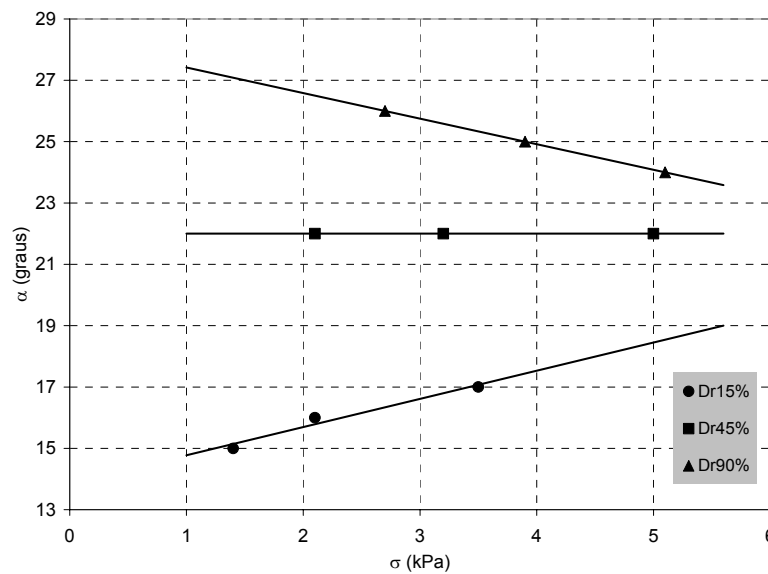


Figura 222 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas - Interface areia-geomembrana Cipageo.

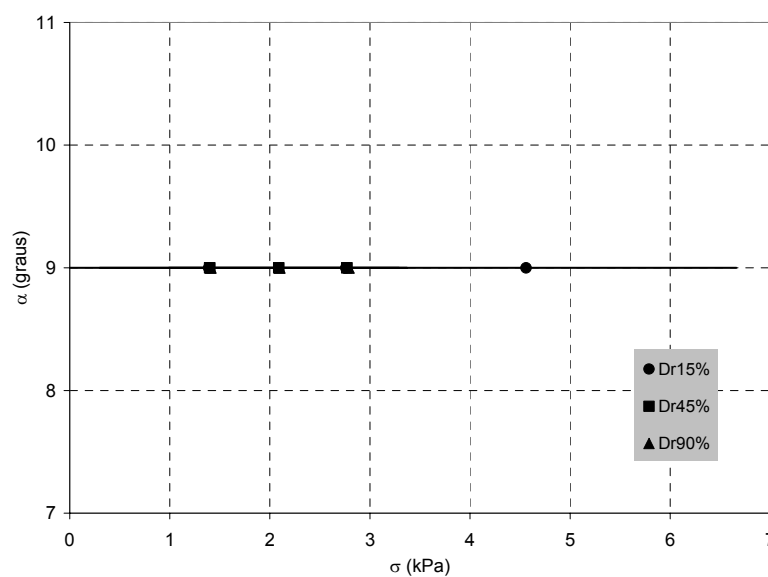


Figura 223 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas - Interface areia-geomembrana Polimanta.

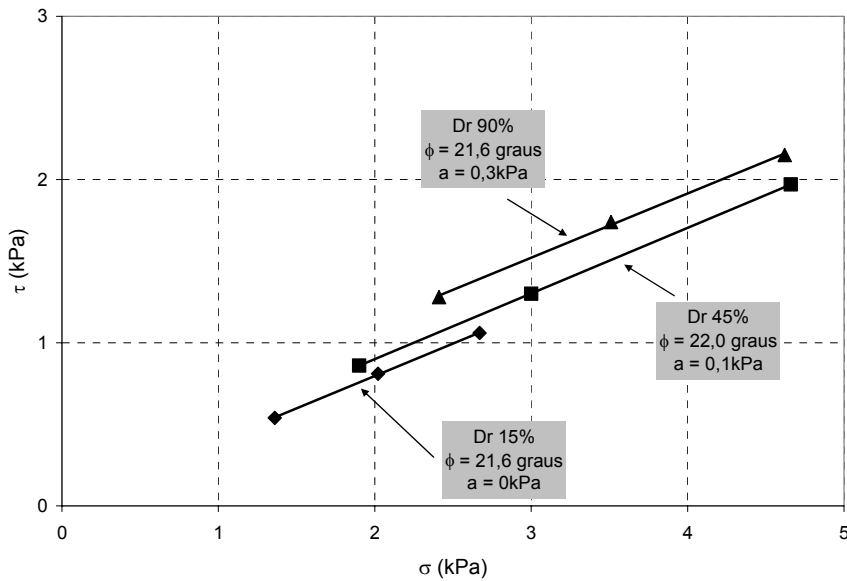


Figura 224 - Envolvórias de resistência das interfaces areia-geomembrana Cipageo nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.

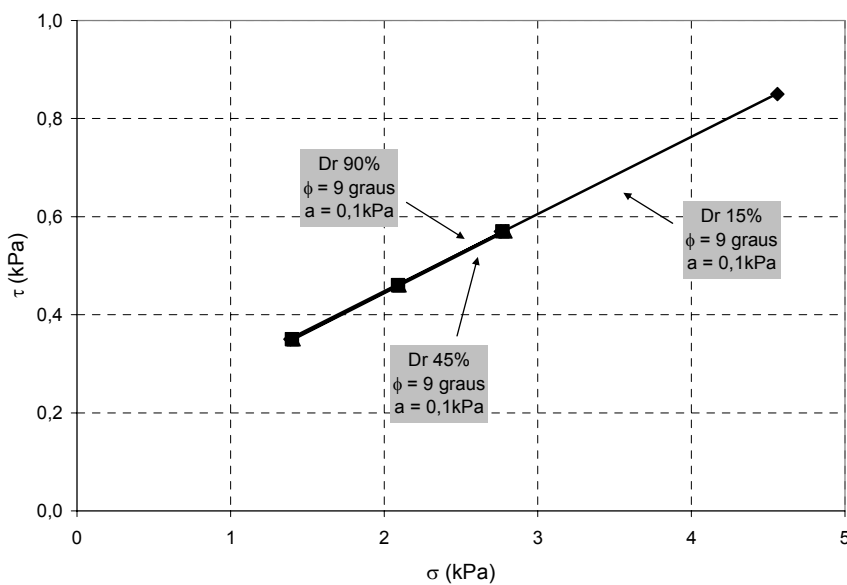
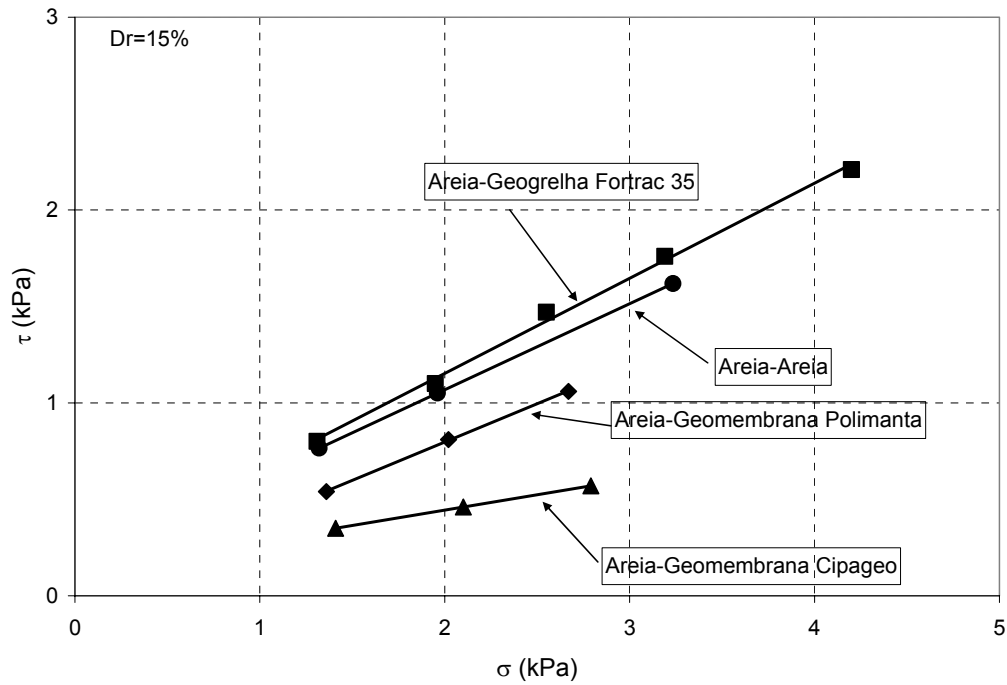


Figura 225 - Envolvórias de resistência das interfaces areia-geomembrana Polimanta nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.

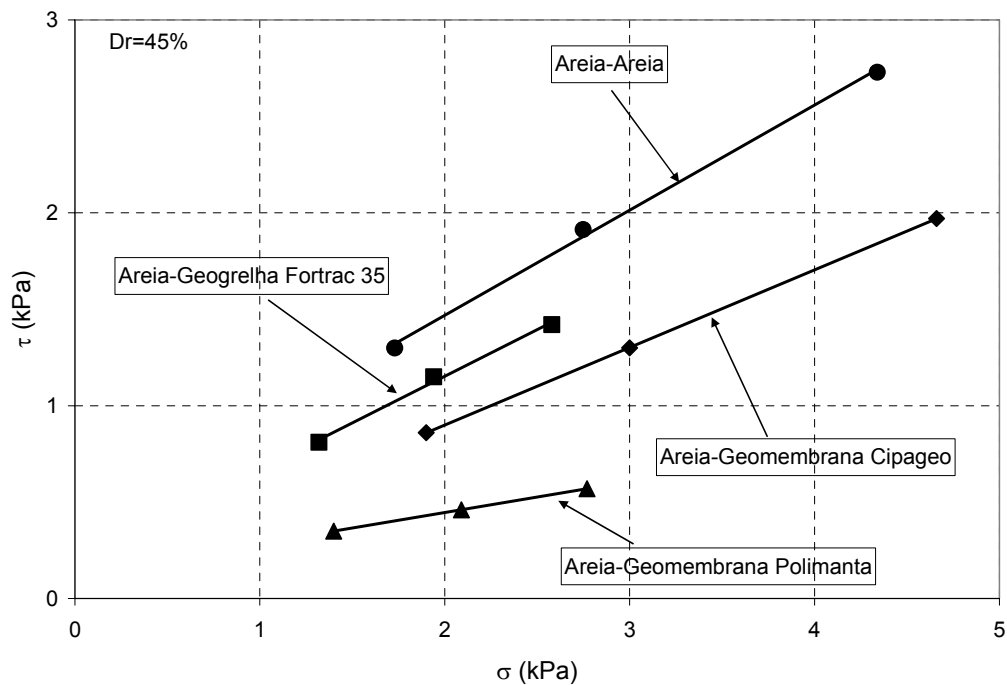
7.3.4. Eficiências de Interfaces

A Figura 226 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha e areia-geomembrana (Cipageo e Polimanta), ensaiadas nas três densidades relativas (15, 45 e 90%). A Tabela 42 apresenta um resumo dos

parâmetros de resistência obtidos e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) para cada uma das interfaces.

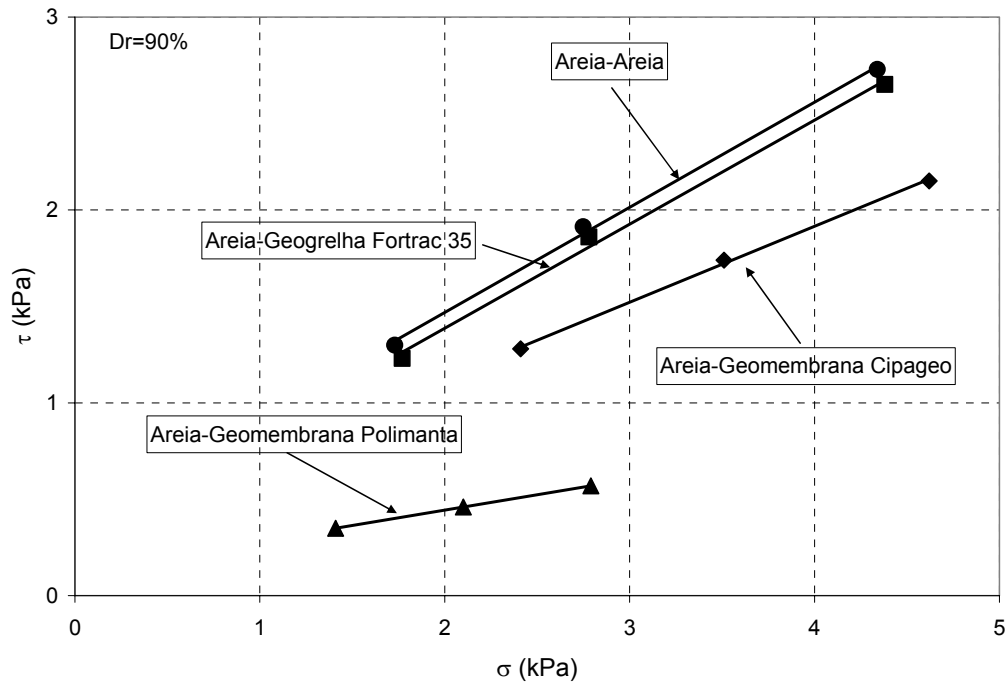


(a)



(b)

Figura 226 - Envoltórias de resistência das interfaces ensaiadas em areia com: (a) Dr=15%; (b) Dr=45% e (c) Dr=90%, obtidas em ensaios de rampa.



(c)

Figura 226 (cont.) - Envoltórias de resistência das interfaces ensaiadas em areia com: (a) $D_r=15\%$; (b) $D_r=45\%$ e (c) $D_r=90\%$, obtidas em ensaios de rampa.

Tabela 42 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces, em ensaios de rampa.

Interface	D_r (%)	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c (*)	E_ϕ
Ar x GG35	15	0,2	25,9	1,00	1,08
	45	0,2	26,0	1,00	0,96
	90	0,3	28,6	0,75	0,99
Ar x GMCP	15	0,0	21,6	0,00	0,90
	45	0,1	22,0	0,50	0,81
	90	0,3	21,6	0,75	0,75
Ar x GMPL	15	0,1	9,00	0,50	0,38
	45	0,1	9,00	0,50	0,33
	90	0,1	9,00	0,25	0,31

As eficiências foram calculadas através das Equações 19 e 20 (Capítulo 5), considerando os parâmetros de resistência da interface areia-areia, obtidos dos ensaios de rampa para as três densidades relativas.

De acordo com a Tabela 42, observa-se que, para as interfaces areia-geomembrana, os valores de E_{ϕ} são menores que os da interface areia-geogrelha. Estes valores reduzidos de E_{ϕ} na interface areia-geomembrana são conseqüentes da baixa rugosidade da superfície do geossintético. No caso da geogrelha, os maiores valores são decorrentes da resistência oferecida pelo imbricamento dos grãos do solo com a malha da geogrelha.

A Tabela 42 mostra também que o aumento da densidade relativa corresponde a uma redução dos valores de E_{ϕ} para todas as interfaces. Entretanto, ela é mais acentuada para as interfaces solo-geomembrana.

7.4. Influência do Tipo de Solo

7.4.1. Interface Solo-Solo

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

A Tabela 43 e Figura 227 apresentam uma comparação entre os resultados dos ensaios de rampa nas duas interfaces.

Tabela 43 - Resultados dos ensaios de rampa para as interfaces areia-areia e brita-brita

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
Areia	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
Brita (*)	1,1	6,3	28	0,90	0,75	0,83	39,8
	1,8	14,0	32	1,46	1,22	0,83	39,8
	2,5	23,5	34	2,01	1,68	0,84	39,9

(*) Tavares (2008)

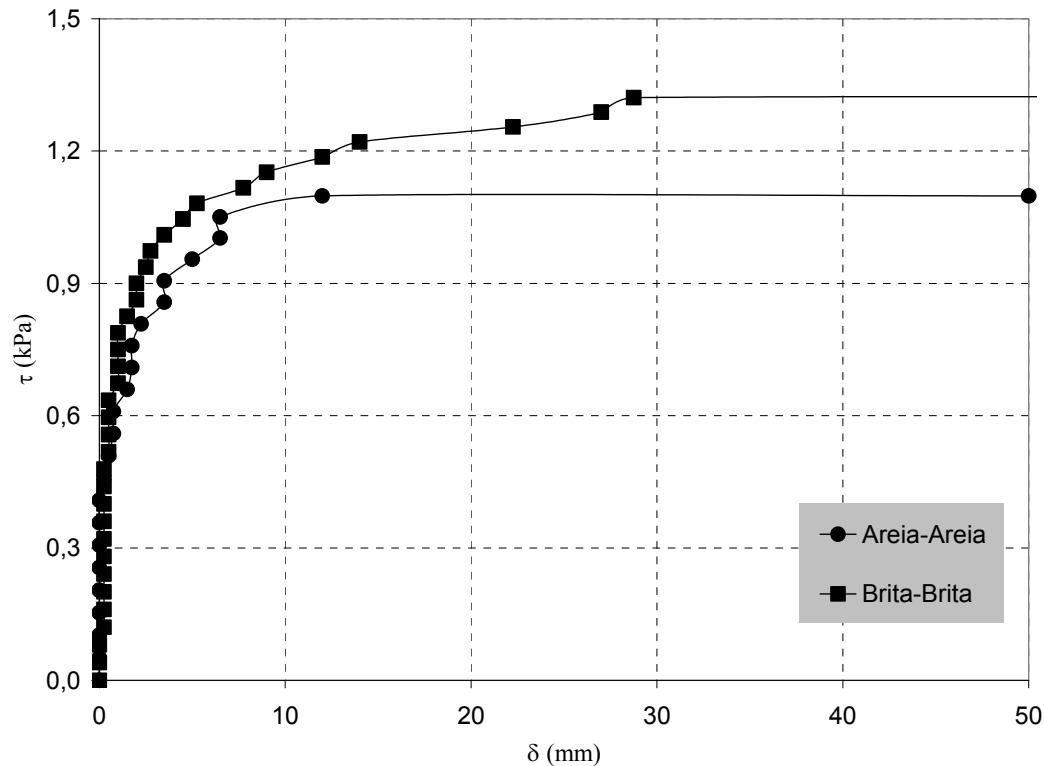


Figura 227 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-areia e brita-brita e tensão confinante intermediária, obtidas em ensaios de rampa.

Considerando a Tabela 43 e Figura 227, pode-se observar que o comportamento da interface brita-brita é diferente da interface areia-areia. No caso da interface areia-areia, nota-se que a ruptura é atingida para menores deslocamentos, 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 tendem a aumentar.

A ocorrência de grandes deslocamentos na interface brita-brita pode ser explicada pela possibilidade de rearranjo e maior imbricamento dos grãos da brita ao longo do ensaio.

Em termos de ângulo de rampa na ruptura, os resultados indicam que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de ângulo de rampa à medida que a tensão confinante aumenta.

A Figura 228 exhibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia e brita-brita para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 24,0° para a interface areia-areia e coesão de 0kPa

e ângulo de atrito de $39,9^\circ$ para a interface brita-brita. Assim, conclui-se que o aumento da granulometria da areia para a brita corresponde a um acréscimo do ângulo de atrito de $15,9^\circ$.

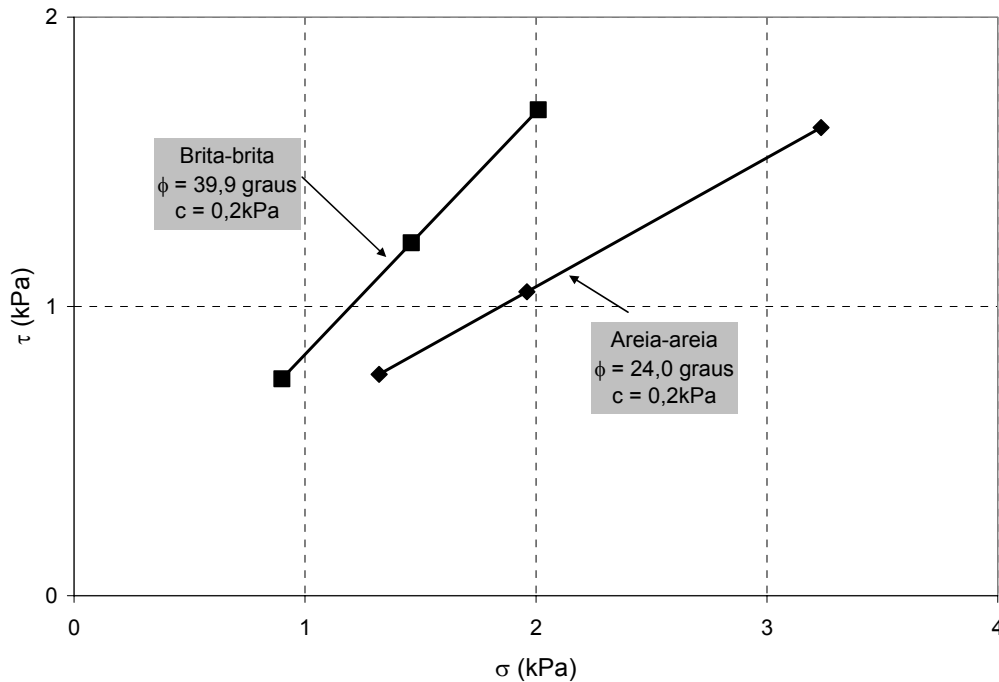


Figura 228 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita com densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa.

7.4.2. Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 44 apresenta os resultados de ensaios de rampa para interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha realizados nesta pesquisa e por Taveres (2008). A Figura 229 apresenta as curvas tensão cisalhante vs deslocamento para uma tensão confinante intermediária (2,1kPa para interface areia-geogrelha e 1,8kPa para interface brita-geogrelha).

Tabela 44 - Resultados dos ensaios de rampa para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
Areia	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
Brita (*)	1,1	8,8	32	0,87	0,85	0,98	44,4
	1,8	5,5	34	1,43	1,29	0,90	42,0
	2,5	6,0	34	2,01	1,68	0,84	39,9

(*) Tavares (2008)

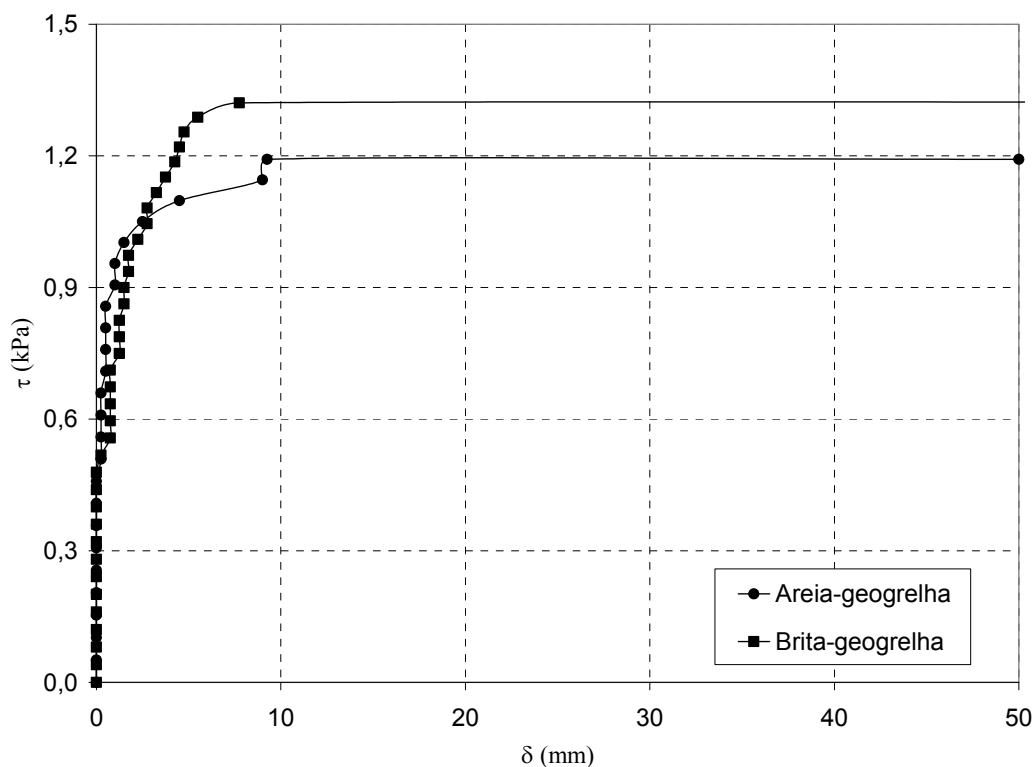


Figura 229 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha e tensão confinante intermediária, em ensaios de rampa.

Observando os resultados obtidos (Tabela 44 e Figura 229), percebe-se que a inclusão da geogrelha provoca uma redução dos deslocamentos e um aumento do ângulo de rampa quando comparado com a interface brita-brita. Desta forma,

conclui-se que o travamento da brita na malha da geogrelha aumenta o ângulo de rampa na ruptura.

Os resultados da Tabela 44 indicam que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo tanto dos valores de deslocamento quanto dos ângulos de rampa na ruptura.

Observa-se, também, que com aumento da tensão confinante, os valores dos ângulos de rampa aumentam 3° para interface areia-geogrelha e 2° para interface brita-geogrelha.

A Figura 230 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 25,9° para a interface areia-areia e adesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 36,0° para a interface brita-brita. Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de 10,1° no ângulo de atrito de interface.

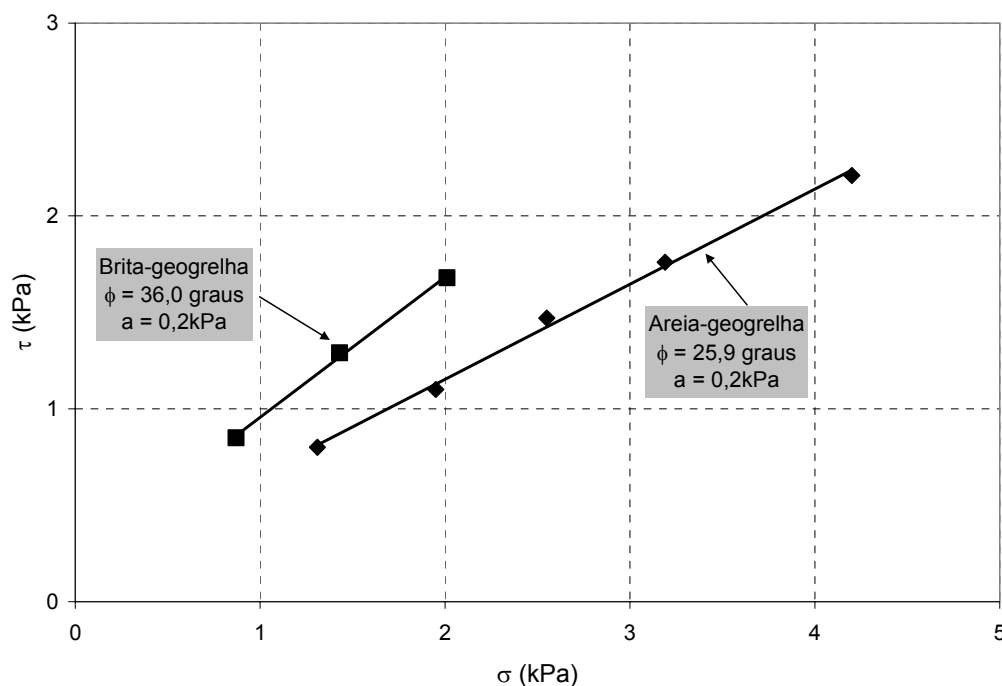


Figura 230 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa.

7.4.3. Interface Solo-Geomembrana

A Tabela 45 e Figura 231 apresentam uma comparação entre os resultados típicos das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana. A geomembrana utilizada nesta comparação foi a Polimanta, somente.

Tabela 45 - Resultados dos ensaios de rampa para as 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)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
Areia	1,4	2,25	9	1,39	0,35	0,25	14,2
	2,8	0,75	9	2,76	0,57	0,21	11,6
	4,6	0,25	9	4,56	0,85	0,19	10,6
Brita (*)	1,1	0,50	15	0,99	0,42	0,42	22,8
	1,8	6,25	17	1,66	0,68	0,41	22,2
	2,5	3,50	19	2,30	0,98	0,43	23,1

(*) Tavares (2008)

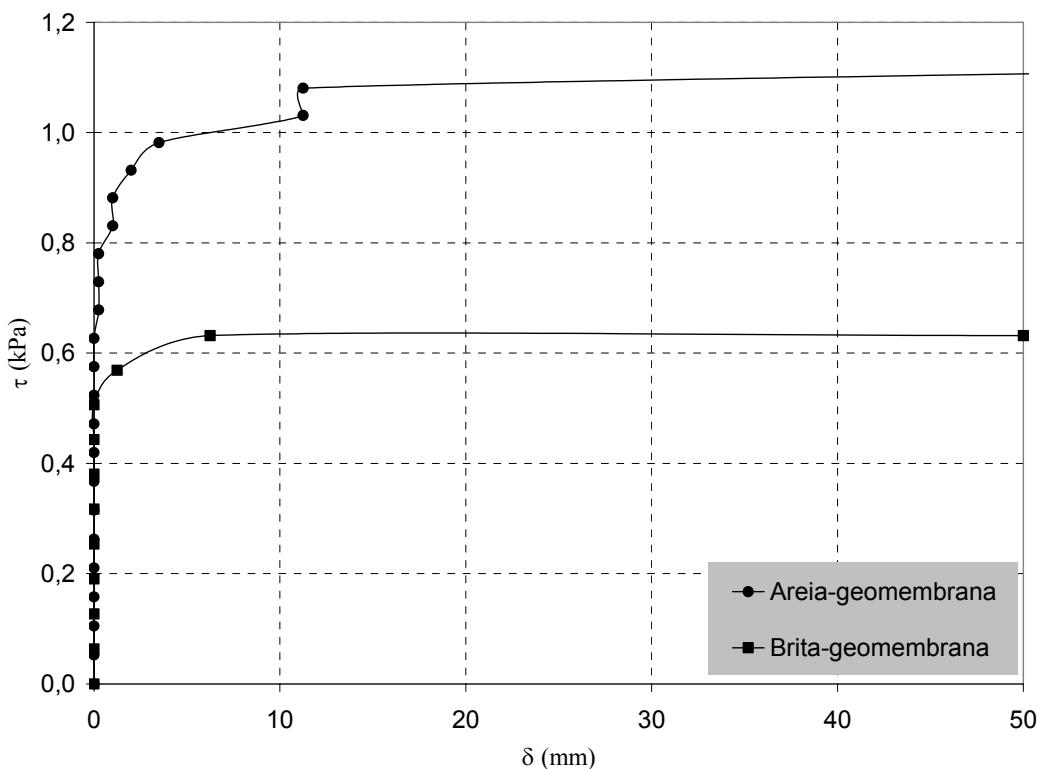


Figura 231 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geomembrana (2,8kPa) e brita-geomembrana (2,5kPa), em ensaios de rampa.

De acordo com a Tabela 45, nota-se que o aumento da tensão confinante provoca uma diminuição dos deslocamentos máximos na ruptura. Não há alteração no ângulo de rampa de ruptura para a interface areia-geomembrana. Já para a interface brita-geomembrana observa-se que os deslocamentos na ruptura aumentam, assim como os ângulos de rampa na ruptura.

Observa-se que o efeito da granulometria do solo é maior com o aumento da tensão confinante, visto que o aumento do ângulo de rampa é de apenas 6° para as menores tensões, atingindo 10° para as maiores tensões.

A Figura 232 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de $0,1\text{kPa}$ e ângulo de atrito de 9° para a interface areia-geomembrana e adesão de 0kPa e ângulo de atrito de $22,8^\circ$ para a interface brita-geomembrana. Assim, conclui-se que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de $13,8^\circ$ no ângulo de atrito de interface.

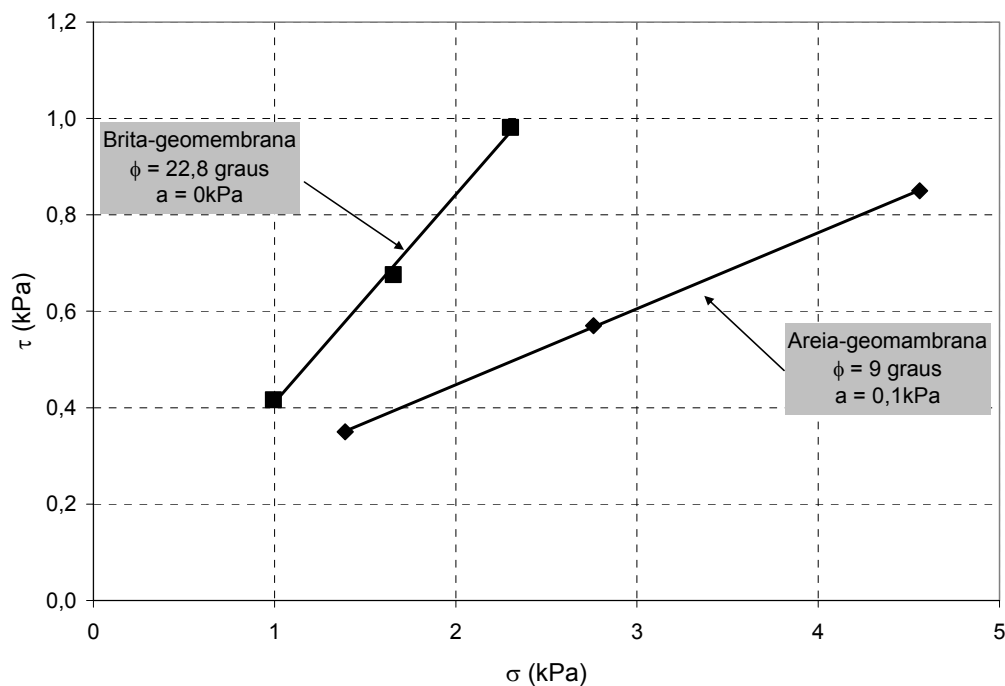
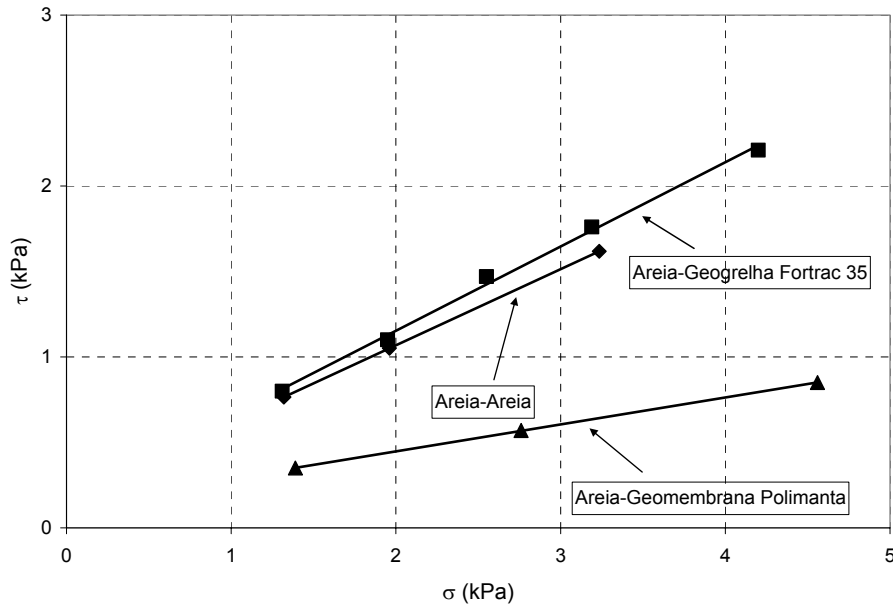


Figura 232 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa.

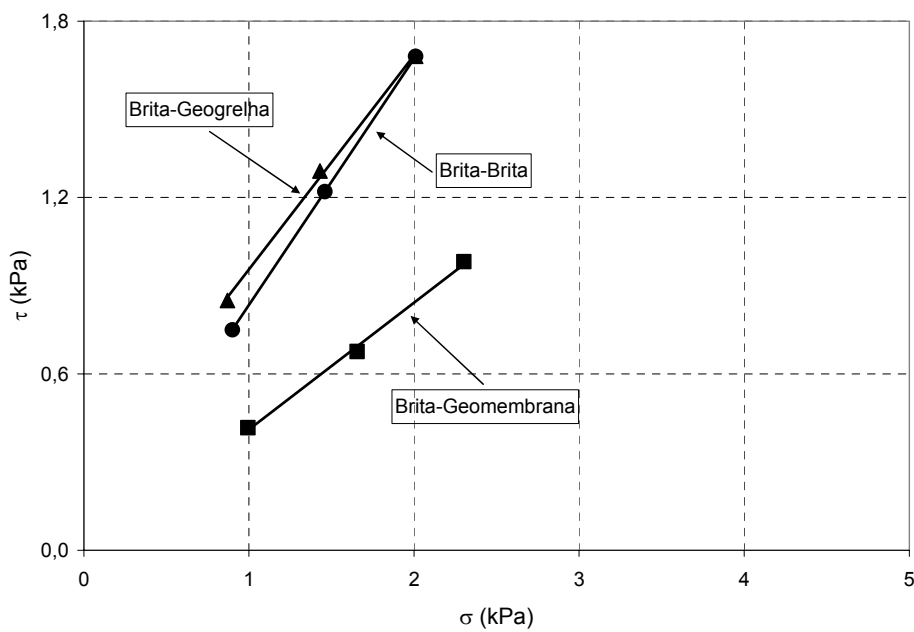
7.4.4. Eficiências de Interface

A Figura 233 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces areia-geossintético e brita-geossintético estudadas nesta pesquisa.

A Tabela 46 resume os parâmetros de resistência obtidos e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ).



(a)



(b)

Figura 233 - Envoltórias de resistência das interfaces com: (a) areia e (b) brita.

Tabela 46 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces.

Interface	Dr (%)	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c	E_ϕ
Ar x GG35	15	0,2	25,9	1,00	1,08
B0 x GG35	15	0,2	36,0	1,00	0,90
Ar x GMPL	15	0,1	9,00	0,50	0,38
B0 x GMPL	15	0,0	22,8	0,00	0,57

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 rampa. Na Tabela 46, observa-se que o aumento da granulometria tem efeitos diferentes para as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana. Para a interface solo-geogrelha, este aumento corresponde a uma redução de eficiência em termos de ângulo de atrito, sem variação de eficiência em termos de coesão. Nas interfaces solo-geomembrana, observa-se que o aumento da granulometria corresponde a um aumento de eficiência em termos de ângulo de atrito e uma redução em termos de coesão.

7.5. 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 rampa sob tensão de confinamento intermediária (2,6kPa). A Tabela 47 apresenta os resultados dos ensaios. A geomembrana utilizada foi a Polimanta.

Tabela 47 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para a tensão confinante de 2,6kPa e Dr=15%, em ensaio de rampa

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	5,5	24	2,55	1,47	0,58	30,0
	Brita(*)	6,0	34	2,01	1,68	0,84	39,9
Geomembrana	Areia	0,8	9	2,76	0,57	0,21	11,6
	Brita(*)	3,5	19	2,30	0,98	0,43	23,1

(*) Tavares (2008)

Na Tabela 48, pode-se observar que, para cada tipo de interface, os maiores valores de ângulo de rampa na ruptura correspondem à geogrelha. As duas interfaces (geogrelha e geomembrana) apresentaram uma diferença de ângulo de rampa de ruptura igual a 10°. Os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da granulometria.

Tabela 48 - Comparação entre os parâmetros de resistência das interfaces com $D_r = 15\%$, em ensaios de rampa

Geossintético	Solo	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)
Geogrelha	areia	0,2	25,9
	brita	0,2	36,0
Geomembrana	areia	0,1	9,0
	brita	0,0	22,8

7.6.

Considerações Finais

O capítulo apresentou uma análise das resistências de interfaces solo-geossintético obtidas em ensaios de rampa. Nestes estudos foram avaliados a influência da densidade relativa, 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 desta pesquisa e de Tavares (2008).

O programa experimental envolveu ensaios de rampa em três tipos de geossintéticos e um solo (areia). A areia foi utilizada nas densidades relativas de 15, 45 e 90%. 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 calculados os valores de eficiência da interface.

Analisou-se a influência da tensão confinante e concluiu-se que seu aumento tem conseqüências distintas. Nas interfaces solo-solo, solo-geogrelha e solo-geomembrana Cipageo o aumento da tensão confinante corresponde a um aumento do ângulo de rampa. Entretanto, para a interface areia-geomembrana Polimanta, independente da densidade relativa, não há variação do ângulo de

rampa na ruptura. O comportamento desta interface é condicionado pela estrutura da geomembrana lisa e polida.

Com relação a influência da densidade relativa do solo, têm-se como principais conclusões que o aumento de 15 para 90% corresponde a um aumento de 2,7° no ângulo de atrito de interface para a geogrelha. Para as duas interfaces com geomembranas, não se observou variação significativa no ângulo de atrito. Desta forma, conclui-se, que para todas as interfaces ensaiadas há uma perda de eficiência, sendo mais acentuada nas interfaces solo-geomembrana. Nas três interfaces, o aumento da densidade relativa corresponde a uma redução dos deslocamentos na ruptura. Entretanto, não se observa tendência quanto à variação do ângulo de rampa, pois a interface areia-geogrelha apresenta uma tendência de elevação do ângulo de rampa, a interface solo-geomembrana Cipageo uma redução e na interface solo-geomembrana Polimanta não se observa variação.

Quanto à influência do tipo de solo, observou-se nas interfaces ensaiadas que o aumento da granulometria corresponde a um aumento do ângulo de atrito. Verifica-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 às interfaces solo-geogrelha. Isto pode ser explicado pelo tipo de estrutura do geossintético, já que a geomembrana perde resistência pelo fato de possuir uma superfície lisa, ao contrário da geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo com as aberturas da malha da geogrelha.