

4 Análise dos Resultados

4.1. Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos nesta pesquisa. Serão apresentados a metodologia de análise de resultados e os dados obtidos dos ensaios. A forma de apresentar consiste em avaliar a influência da tensão confinante, do geossintético e das eficiências da interface. Em seguida, serão analisados os resultados em função do tipo de ensaio.

4.2. Metodologia de Análise de Resultados

Nesta dissertação foram utilizados três tipos de ensaios: rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado. Para cada um destes ensaios foi aplicada uma metodologia de análise diferente. Sobre cada uma podemos afirmar:

Ensaio de Rampa

Apesar de simples, este ensaio apresenta uma restrição no que se refere à aplicação da tensão normal. Com a inclinação gradual da rampa, a distribuição da tensão normal varia assumindo um formato aproximadamente trapezoidal (Palmeira *et al.* 2002). Porém, para efeito de análise dos resultados, assume-se uma tensão de confinamento média uniformemente distribuída.

A Figura 34 esquematiza o conjunto de forças atuantes no ensaio de rampa, onde P é a força vertical, $P \cdot \cos\alpha$ a componente normal e $P \cdot \sin\alpha$ a componente cisalhante. Q é a componente do peso da caixa superior que exerce apenas a componente tangencial, a componente vertical é resistida pela caixa inferior não exercendo força axial no ensaio.

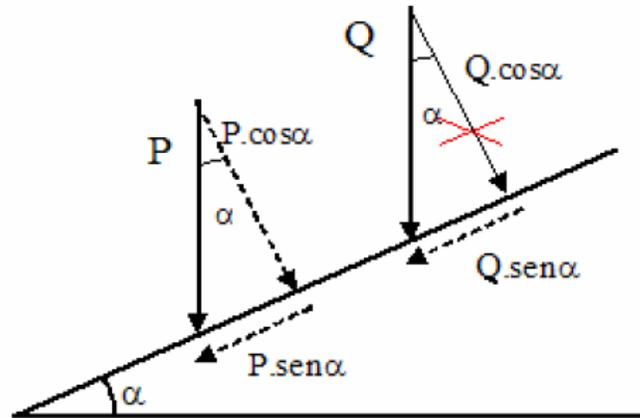


Figura 34 - Esquema de forças do Ensaio de Rampa. (Aguiar, 2003)

Desta forma tem-se:

$$\sigma = \frac{P \times \cos \alpha}{A} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{P \times \text{sen} \alpha + F}{A} \quad (10)$$

Onde:

σ = tensão normal na interface

τ = tensão cisalhante na interface

P = força vertical confinante

A = área de contato solo-geossintético

α = ângulo de inclinação da rampa

F = componente tangencial do peso da caixa superior

Q = peso da caixa superior

Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

No ensaio cisalhamento direto a tensão normal é a relação entre a força normal sobre a área de contato (Equação 9), sendo que a força normal, resultante do peso do solo mais o confinamento aplicado. A tensão cisalhante é força aplicada, através dos pesos na plataforma, sobre a área de contato da interface (Equação 12). Desta forma tem-se:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (11)$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (12)$$

Onde:

σ = tensão normal na interface

τ = tensão cisalhante na interface

N = força vertical confinante

A = área de contato solo-geossintético

T = componente tangencial do peso da caixa superior

Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

No ensaio de cisalhamento inclinado a tensão cisalhante é resultante do peso da caixa, solo, confinamento e peso aplicados na plataforma sobre a área de contato da interface. A tensão normal é a resultante do peso do conjunto caixa mais o solo e peso de confinamento sobre a área de contato (Equação 13) A tensão cisalhante é resultante das forças C, $P.\text{sen}\alpha$ mais $Q.\text{sen}\alpha$ (Equação 14). A Figura 35 apresenta as componentes das forças atuantes no ensaio de cisalhamento direto inclinado.

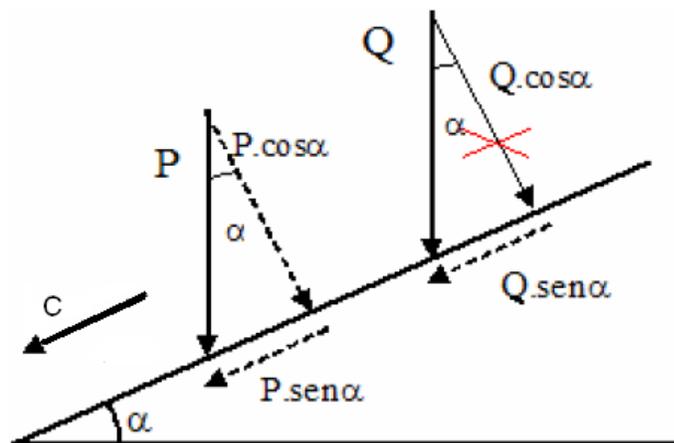


Figura 35 - Esquema de forças do Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado. (Aguiar, 2008)

Desta forma tem-se:

$$\sigma = \frac{P \times \cos \alpha}{A} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{P \times \sin \alpha + F + C}{A} \quad (14)$$

Onde:

C = carga aplicada na plataforma. $C = M \times g$, onde M é a massa depositada na plataforma de carga e g é a gravidade.

4.3. Apresentação dos Resultados

Adotou-se o critério de Coulomb para análise do estado tensões. Os resultados serão apresentados e padronizados através de dois tipos de gráficos: deslocamento da caixa superior *versus* tensão cisalhante e envoltórias de resistência de cada interface obtidas a partir de três submetidos a diferentes tensões confinantes.

As tabelas apresentam os valores da tensão normal inicial (σ_n), do deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), do ângulo de rampa na ruptura (α_{rup}), das tensões normais (σ_{rup}) e cisalhantes na ruptura (τ_{rup}), da relação entre as tensões e ângulos de atrito secante (ϕ_{sec}).

Também são empregados nas análises os valores de eficiências de interfaces. Koerner (1998) define dois parâmetros para de eficiência: eficiência em termos de coesão (E_c) e eficiência em termos de ângulo de atrito (E_ϕ). Como mostra a Equação 15, a eficiência na coesão relaciona a adesão na interface (a) e a coesão do solo (c) e a eficiência de atrito, relaciona as tangentes dos ângulos de atrito da interface (ϕ_{sg}) e do solo (ϕ) (Equação 16).

$$E_c = \frac{a}{c} \quad (15)$$

$$E_\phi = \frac{\tan \phi_{sg}}{\tan \phi} \quad (16)$$

Os valores de eficiência existentes na bibliografia geralmente variam de 0,60 a 1,0. Valores maiores que a unidade não são comuns, pelo fato de que

representariam uma interface com resistência maior que a do solo (Koerner, 1998). Neste caso a superfície de ruptura seria levada para dentro da massa de solo e a resistência ao deslizamento seria limitada pela resistência ao cisalhamento.

As tabelas apresentam os valores da tensão normal inicial (σ_n), do deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), do ângulo de rampa na ruptura (α_{rup}) do peso total aplicado à plataforma na ruptura (M_{rup}), das tensões normais (σ_{rup}) e cisalhantes na ruptura (τ_{rup}), da relação entre as tensões e ângulos de atrito secante (ϕ_{sec}).

Os resultados de cada tipo de ensaio serão apresentados e analisados em termos da influência da tensão confinante e a influência do geossintético. Em seguida, serão analisados os resultados em função do tipo de ensaio.

4.4. Ensaio de Rampa – RP

4.4.1. Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Solo

A Tabela 14 e a Figura 36 apresentam os resultados dos ensaios de rampa para a interface BR-BR. Pode-se observar que o aumento da tensão confinante implicou em um aumento do deslocamento até a ruptura, entretanto não se percebe este comportamento para o ângulo de rampa, que aumentou em 5° para as menores tensões e permaneceu constante para a maior. Verifica-se através dos crescentes valores de tensão cisalhante, que quanto maior a tensão confinante, maior o ângulo de atrito da interface, este comportamento deve-se à possibilidade de rearranjo e imbricamento entre os grãos da brita. Tal efeito pode ser observado durante o ensaio através do ruído provocado pelo contato entre as partículas.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de Rampa para as interfaces BR-BR

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (°)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR	1,0	18,5	30	0,89	0,76	0,85	40,4
	1,7	28,8	35	1,42	1,27	0,90	42,0
	2,4	31,5	35	1,99	1,67	0,84	40,0

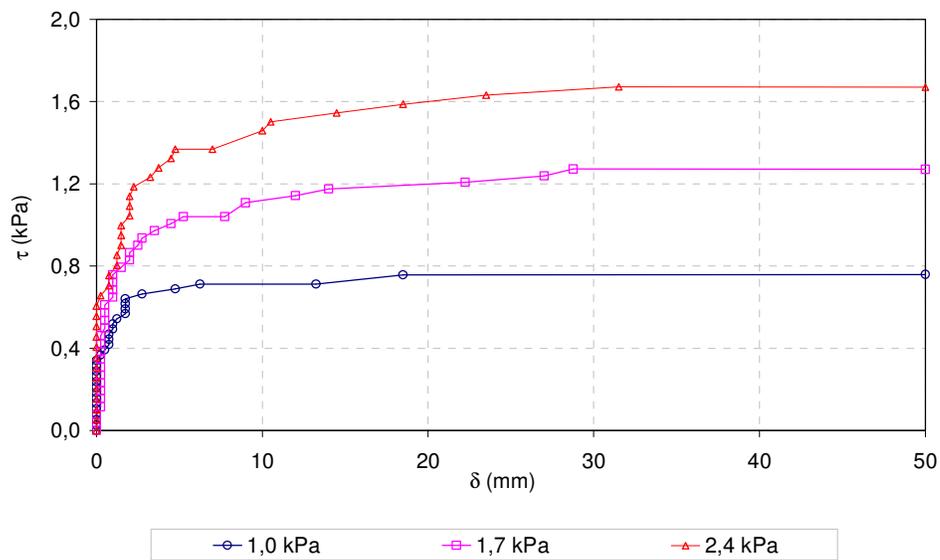


Figura 36 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-BR.
Ensaio de RP

A Figura 37 exibe a envoltória de resistência da interface BR-BR. Os valores obtidos foram: coesão (c) de 0 kPa e o ângulo de atrito (ϕ) de 40,7°.

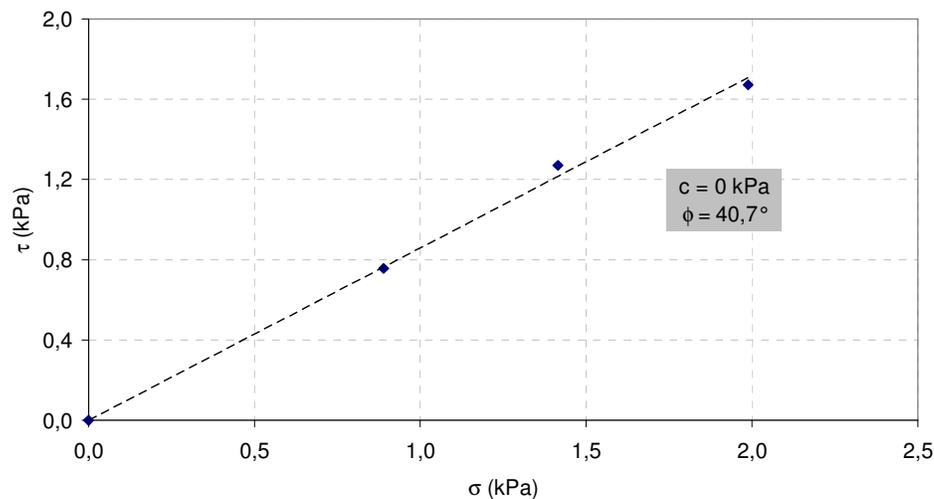


Figura 37 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio de RP

Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 15 resume os resultados dos ensaios de rampa da interface BR-GG, a Figura 38 apresenta graficamente estes resultados. Pode-se observar que o deslocamento na ruptura é menor para a tensão confinante intermediária e o acréscimo da tensão confinante corresponde em um aumento da resistência de interface, ou seja, aumento da tensão cisalhante. A diferença do ângulo de rampa da maior para a menor tensão confinante foi de 3°.

Este comportamento deve-se à possibilidade de rearranjo e imbricamento entre os grãos da brita.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de Rampa para a interface BR-GG

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (°)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GG	1,0	8,8	32	0,87	0,80	0,92	42,6
	1,7	7,8	35	1,42	1,27	0,90	42,0
	2,4	8,5	35	1,99	1,67	0,84	40,0

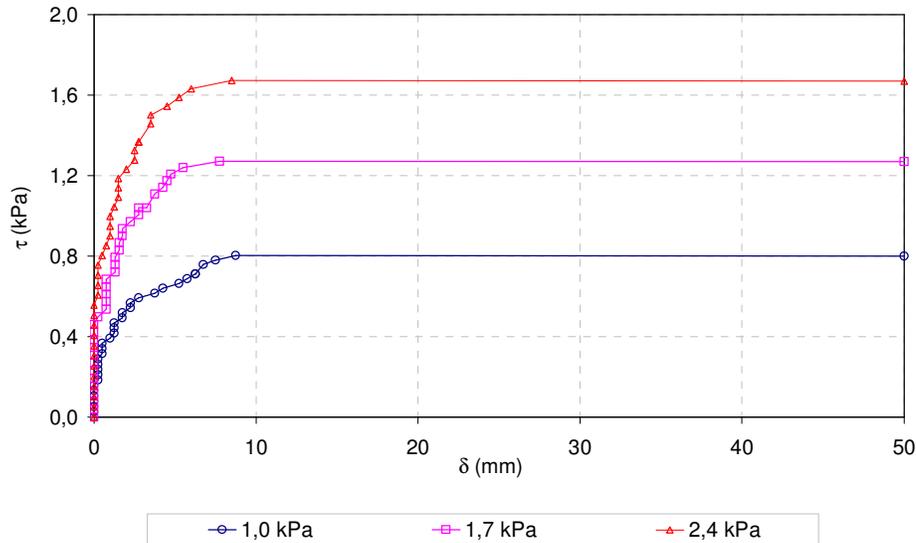


Figura 38 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GG. Ensaio de RP

A Figura 39 exibe a envoltória de resistência da interface BR-GG. Os valores obtidos foram: adesão (a) de 0 kPa e o ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de $40,9^\circ$.

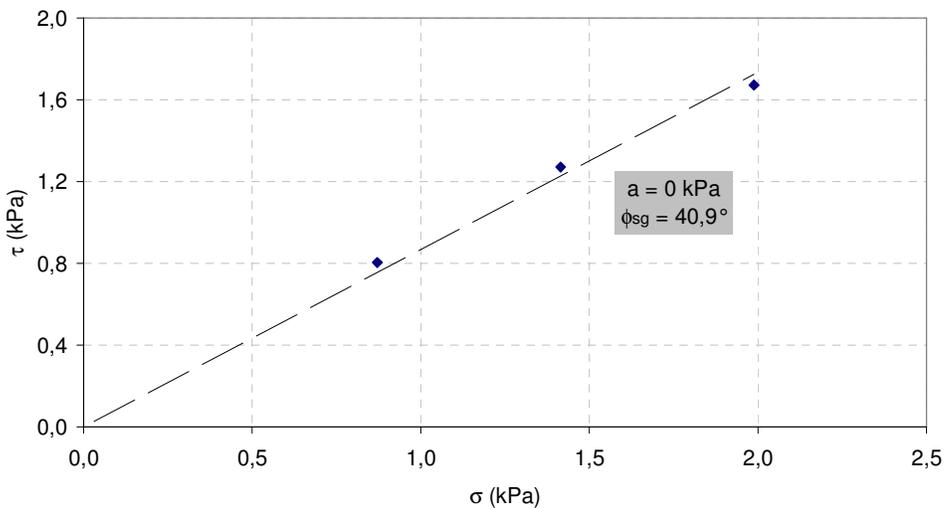


Figura 39 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio de Rampa

Interface Solo-Geomembrana

A Tabela 16 apresenta os resultados dos ensaios mais representativos da interface ensaiada, para as três tensões confinantes distintas.

De acordo com a Figura 40 pode-se observar que o aumento da tensão confinante tem como resposta o acréscimo do ângulo de atrito e do deslocamento até a ruptura. A diferença do ângulo de rampa e do deslocamento entre a maior e a menor tensão confinante foi de 6° e 11 mm, respectivamente. Por sua vez, a tensão cisalhante obteve um acréscimo correspondente ao aumento da resistência da interface. Este comportamento evidencia um entrosamento entre as partículas do solo e rearranjo dos grãos.

Nota-se que o valor de ϕ_{sec} é constante para as três tensões confinantes, sugerindo uma envoltória de resistência reta, para estes baixos valores de confinamento.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de Rampa para as interfaces BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} ($^\circ$)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} ($^\circ$)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GM	1,0	0,3	15	0,99	0,39	0,39	21,3
	1,7	8,5	19	1,65	0,65	0,39	21,3
	2,4	11,3	21	2,30	0,9	0,39	21,3

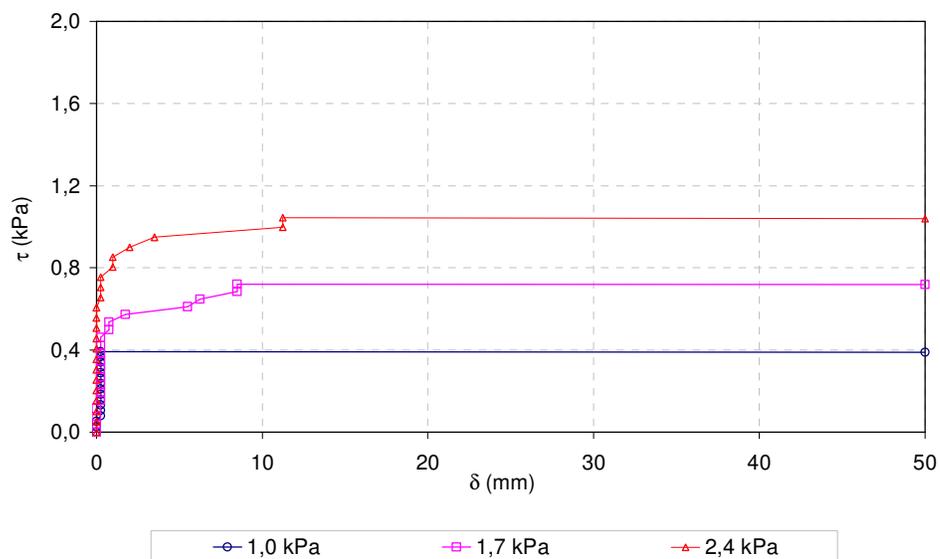


Figura 40 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GM. Ensaio de RP

A Figura 41 exibe a envoltória de resistência da interface BR-GM. Os valores obtidos foram: adesão (a) de 0 kPa e o ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de $24,1^\circ$.

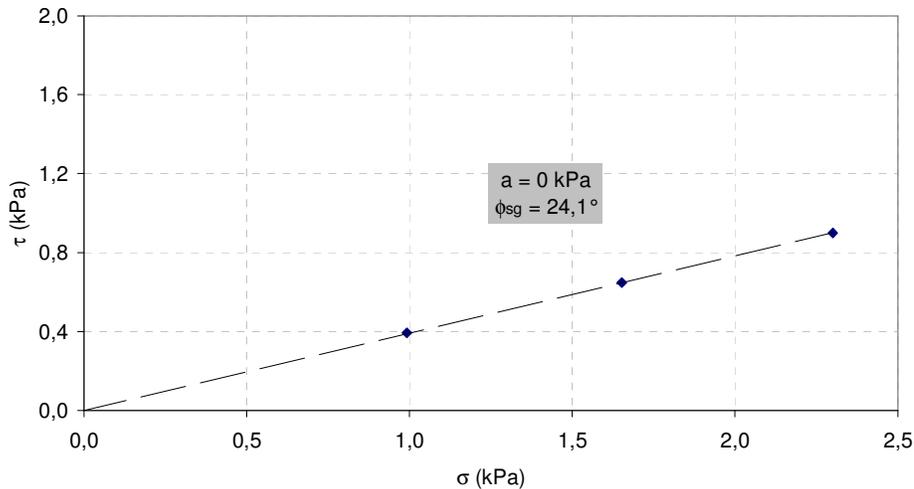


Figura 41 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio de RP

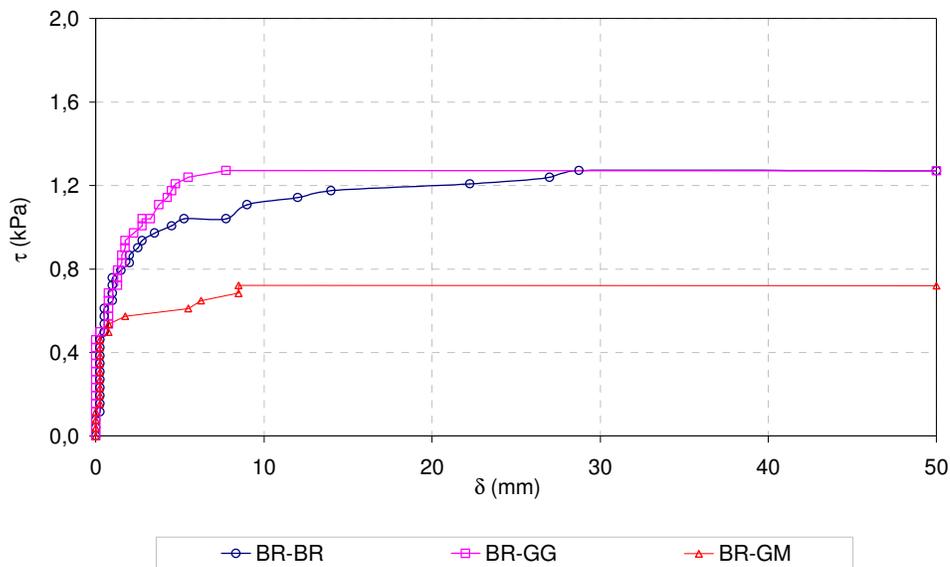
4.4.2. Influência do Geossintético

A Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Para a mesma tensão confinante comparou-se a influência da inserção de cada tipo de geossintético. As interfaces BR-BR e BR-GG apresentaram praticamente o mesmo ângulo de rampa e o mesmo deslocamento na ruptura, enquanto que para a interface BR-GM o ângulo e o deslocamento foram menores. Isto pode ser explicado em função da estrutura do geossintético, a geomembrana perde resistência por possuir uma superfície lisa, ao contrário da geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo nas aberturas da malha.

A Figura 42 revela as curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) dos ensaios mais representativos de cada interface sob a tensão confinante intermediária ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Vale ressaltar que o gráfico do comportamento das interfaces para as demais tensões confinantes (máxima e mínima) é análogo à tensão intermediária.

Tabela 17 - Resultados dos ensaios de Rampa para interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (°)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR		18,5	30	0,89	0,76	0,85	40,4
BR-GG	1,0	8,8	32	0,87	0,80	0,92	42,6
BR-GM		0,3	15	0,99	0,39	0,40	21,8
BR-BR		28,8	35	1,42	1,27	0,90	42,0
BR-GG	1,7	7,8	35	1,42	1,27	0,90	42,0
BR-GM		8,5	19	1,63	0,72	0,44	23,8
BR-BR		31,5	35	1,99	1,67	0,84	40,0
BR-GG	2,4	8,5	35	1,99	1,67	0,84	40,0
BR-GM		11,3	21	2,27	1,04	0,46	24,7

Figura 42 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR;BR-GG e BR-GM ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio de RP

A Figura 43 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces, nota-se que a interface BR-GM apresenta menor resistência quando comparada às interfaces BR-BR e BR-GG. Este comportamento pode ser explicado pelo tipo de estrutura do geossintético, onde a interface da geomembrana perde resistência em virtude da sua superfície lisa, ao contrário da interface com geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo com as aberturas da malha.

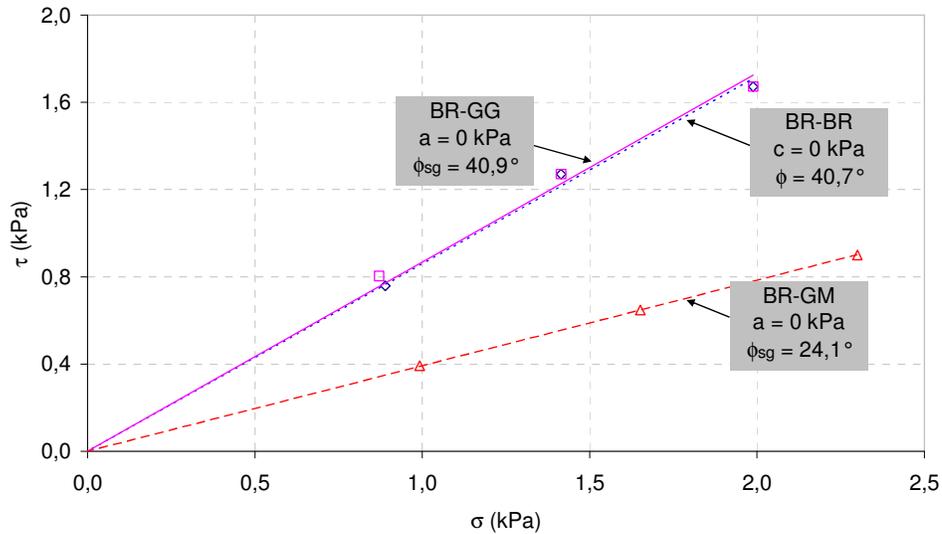


Figura 43 - Envoltórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio RP

4.4.3. Eficiência

A Tabela 18 revela os parâmetros de resistência e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) de cada interface, em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço no ensaio de rampa. Pode-se concluir que as interfaces com geogrelha possuem valores de E_ϕ maiores do que as interfaces com geomembrana, ou seja, a interface BR-GG possui maior resistência ao cisalhamento do que a interface BR-GM o que comprova a função destes dois geossintéticos.

Para todas as interfaces a E_c foi nula devido à coesão nula da brita.

Tabela 18 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de Rampa

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (°)	E_c	E_ϕ
BR-GG	0,0	40,9	0,0	1,0
BR-GM	0,0	24,1	0,0	0,4

4.5. Ensaio Cisalhamento Direto Convencional – CC

Os resultados do ensaio CC serão apresentados e analisados avaliando a influência da tensão confinante e a inserção dos geossintéticos para cada tipo de interface: solo-solo; solo-geogrelha e solo-geomembrana.

4.5.1. Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Solo

A Tabela 19 e a Figura 44 apresentam os resultados dos ensaios BR-BR. Pode-se observar que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante necessária para romper a interface, chegando a aproximadamente 1kPa de diferença entre a menor e a maior tensão cisalhante na ruptura. Este comportamento, possivelmente, deve-se ao processo de escorregamento, rolagem dos grãos entre si e rearranjo, aumentando a resistência de interface.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Convencional para a interface BR-BR

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	M_{rup} (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR	1,0	8,0	34,1	1,02	0,78	0,77	33,6
	1,7	5,0	64,7	1,72	1,31	0,76	23,7
	2,4	8,5	85,2	2,42	1,77	0,73	24,7

A Figura 45 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-BR, tendo sido obtidos os seguintes parâmetros: coesão $c = 0$ kPa e ângulo de atrito de $36,6^\circ$.

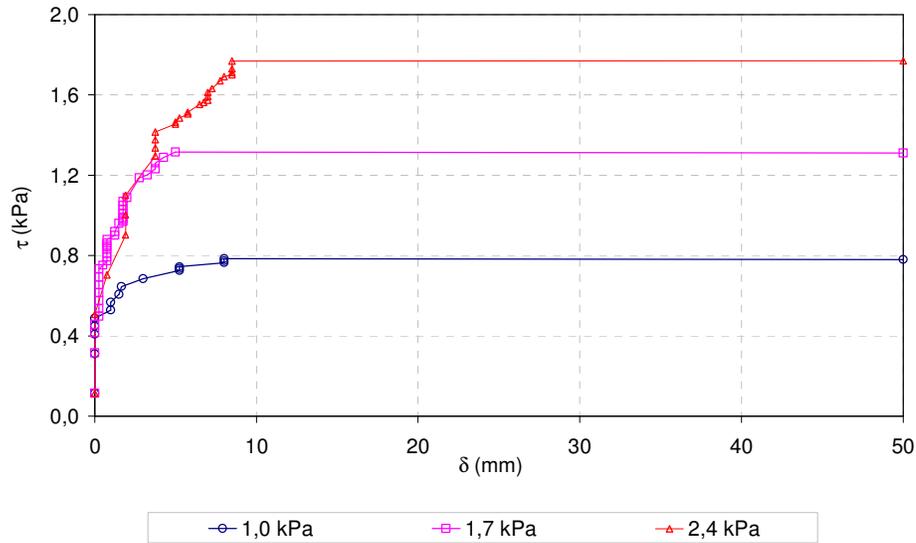


Figura 44 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-BR. Ensaio CC

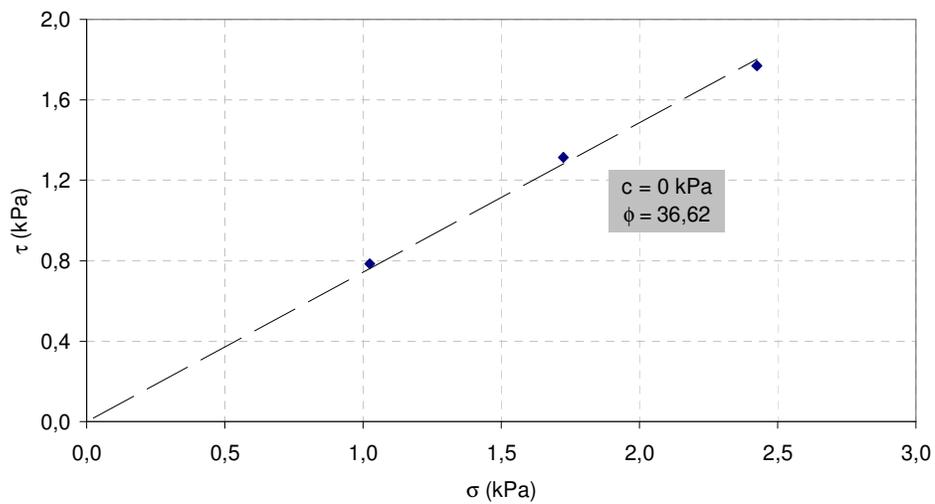


Figura 45 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio CC

Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 20 resume os resultados dos ensaios de cisalhamento direto da interface BR-GG para as três tensões confinantes. A Figura 46 compara e ilustra os resultados mais representativos.

Verifica-se através dos crescentes valores de tensão cisalhante, que quanto maior a tensão confinante, maior a resistência da interface, este comportamento deve-se, possivelmente, ao rearranjo e travamento entre os grãos.

O valor de ϕ_{sec} diminui com o aumento da tensão confinante, este comportamento sugere uma envoltória curva, um comportamento real da resistência dos grãos de brita.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GG

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GG	1,0	5,5	40,1	1,02	0,88	0,86	40,7
	1,7	2,3	66,0	1,72	1,37	0,80	38,6
	2,4	6,5	92,0	2,42	1,92	0,79	38,3

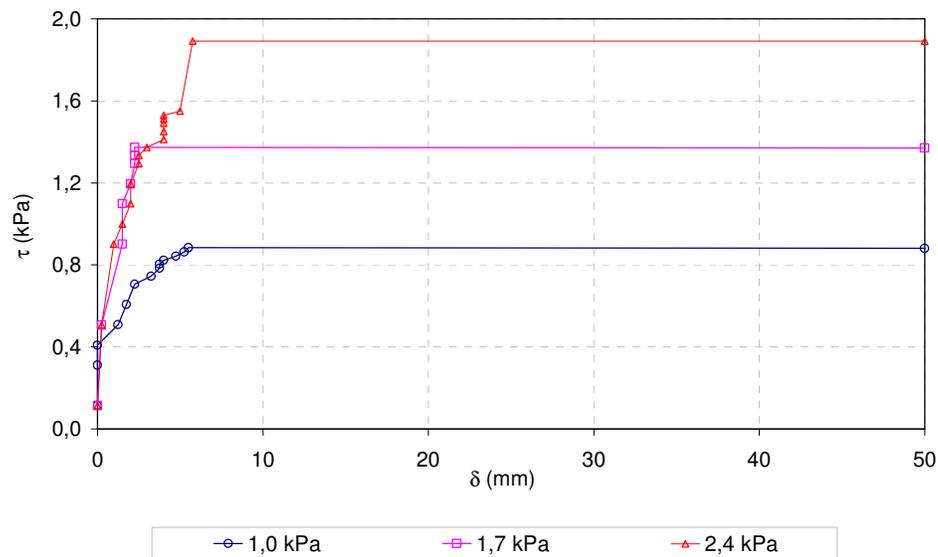


Figura 46 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GG. Ensaio CC

A Figura 47 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-GG. Os valores obtidos foram: adesão (a) de 0 kPa e ângulo de atrito de 38,4°.

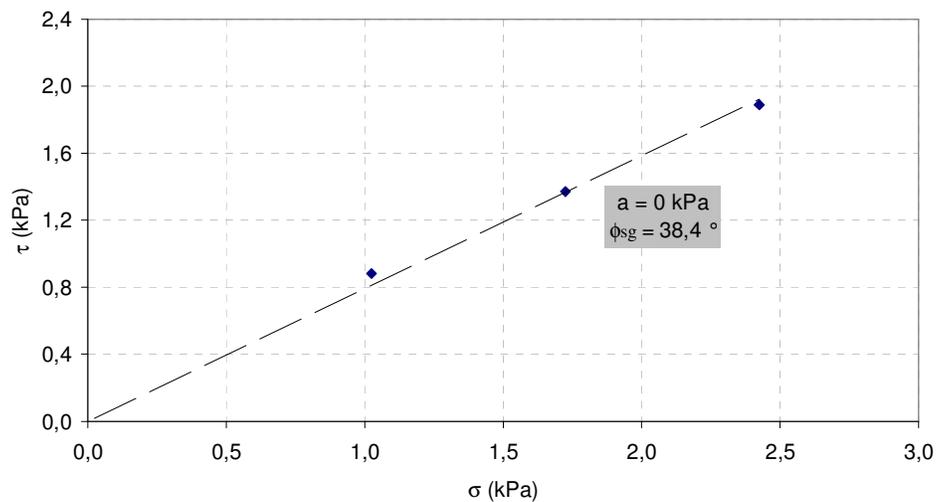


Figura 47 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CC.

Interface Solo-Geomembrana

A Tabela 21 e a Figura 48 resumem os resultados obtidos dos ensaios. Pode-se observar que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante até a ruptura. Este comportamento pode ser explicado devido o rearranjo dos grãos e ao imbricamento que provocam um aumento do atrito de interface. O deslocamento, neste caso, diminui com o aumento da tensão confinante.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
	1,0	28,5	25,00	1,02	0,59	0,57	31,5
BR-GM	1,7	12,5	39,00	1,72	0,86	0,50	29,6
	2,4	8,0	58,70	2,42	1,23	0,51	27,0

A Figura 49 mostra a envoltória de resistência da interface BR-GM. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão nula e ângulo de atrito de 27,1°.

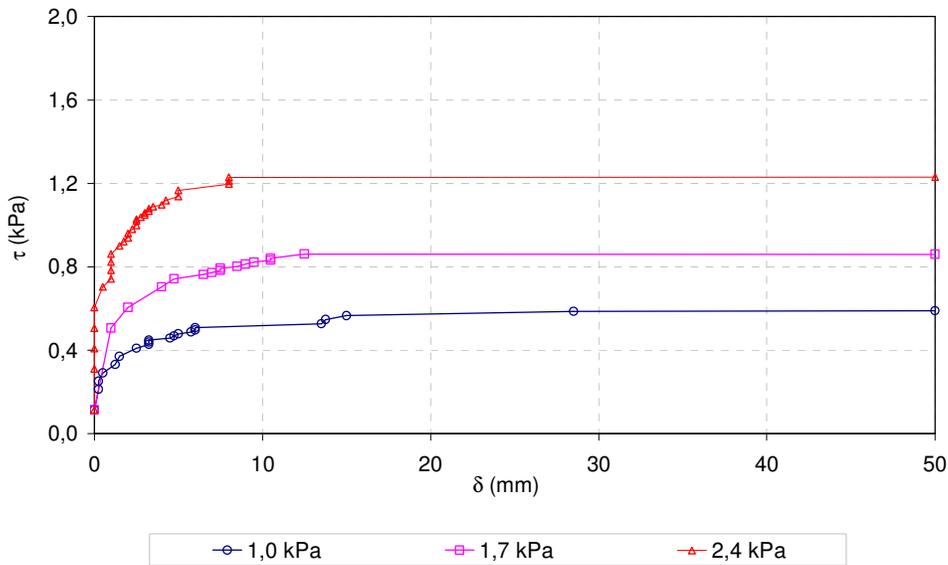


Figura 48 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GM. Ensaio CC

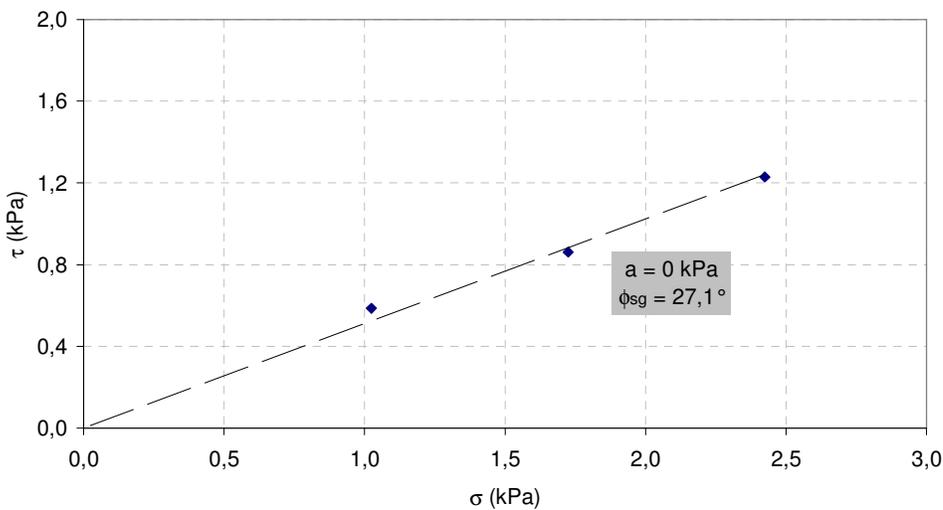


Figura 49 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio Cisalhamento Direto

4.5.2. Influência do Tipo Geossintético

A Tabela 22 e a Figura 50 apresentam os resultados dos ensaios das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Pode-se observar que, para uma mesma tensão confinante, as interfaces BR-BR e BR-GG possuem valores da tensão cisalhante maiores do que para a interface BR-GM. Os maiores valores observados são para interface BR-GG, chegando a 42° . Este 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 22 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Convencional ara as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR		8,0	30,0	0,89	0,76	0,85	40,4
BR-GG	1,0	5,5	40,1	1,02	0,88	0,86	40,7
BR-GM		28,5	25,0	1,02	0,59	0,57	29,7
BR-BR		5,0	64,7	1,72	1,31	0,76	37,2
BR-GG	1,7	2,3	66,0	1,72	1,37	0,80	42,0
BR-GM		12,5	39,00	1,72	0,86	0,50	23,8
BR-BR		8,5	85,2	2,42	1,77	0,73	40,0
BR-GG	2,4	6,5	92,0	2,42	1,92	0,79	40,0
BR-GM		8,0	58,70	2,42	1,23	0,51	24,7

Na Figura 51, pode-se observar que as interfaces BR-BR e BR-GG têm valores maiores de parâmetros de resistência do que a interface BR-GM, o que condiz com a respectiva função de resistência ao cisalhamento da geogrelha e a função de revestimento da geomembrana.

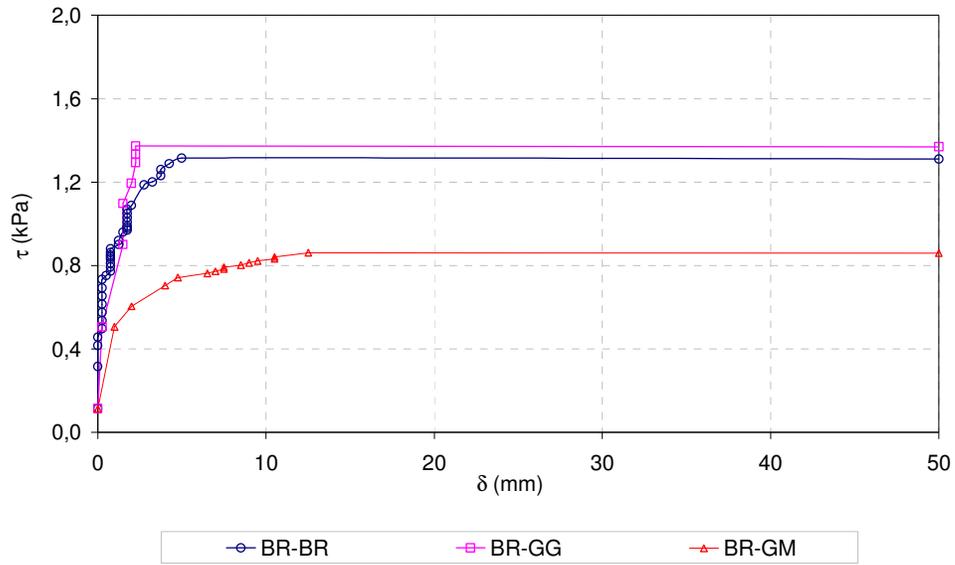


Figura 50 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio CC

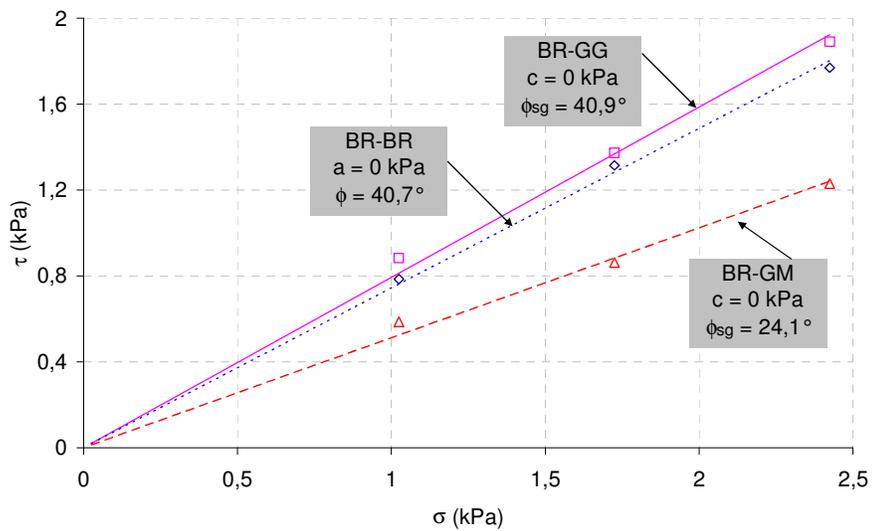


Figura 51 - Envolvórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio CC

4.5.3. Eficiência das Interfaces

A Tabela 23 revela os parâmetros de resistência e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) de cada interface, em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço no ensaio de rampa. Pode-se concluir que a interface utilizando geogrelha possui valores de E_ϕ maiores do que as interfaces utilizando geomembrana. Como o esperado, pois a função da geomembrana é de revestimento e não de reforço como a malha de geogrelha.

Para todas as interfaces a E_c foi nula devido à coesão nula da brita.

Tabela 23 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (°)	E_c	E_ϕ
BR-GG	0,0	38,4	0,0	1,0
BR-GM	0,0	27,1	0,0	0,7

4.6. Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a 4,5° – (CI-4,5)

Os resultados do ensaio CC-4,5 serão apresentados e analisados avaliando a influência da tensão confinante na interface solo-geomembra.

4.6.1. Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Geomembrana

Os resultados dos ensaios de rampa da interface BR-GM foram resumidos na Tabela 24 e apresentados graficamente na Figura 52. Observa-se que quanto maior a tensão cisalhante necessária para mobilizar o conjunto até a ruptura da interface. Este comportamento reflete o efeito do entrosamento entre os grãos e acomodação das partículas. Percebe-se que o deslocamento mínimo deu-se para a tensão confinante intermediária.

Tabela 24 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto (4,5°) para interface BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GM	1,0	22,7	15,6	1,02	0,54	0,53	27,9
	1,7	7,7	22,1	1,72	0,72	0,42	22,8
	2,4	16,2	41,7	2,42	1,16	0,48	25,6

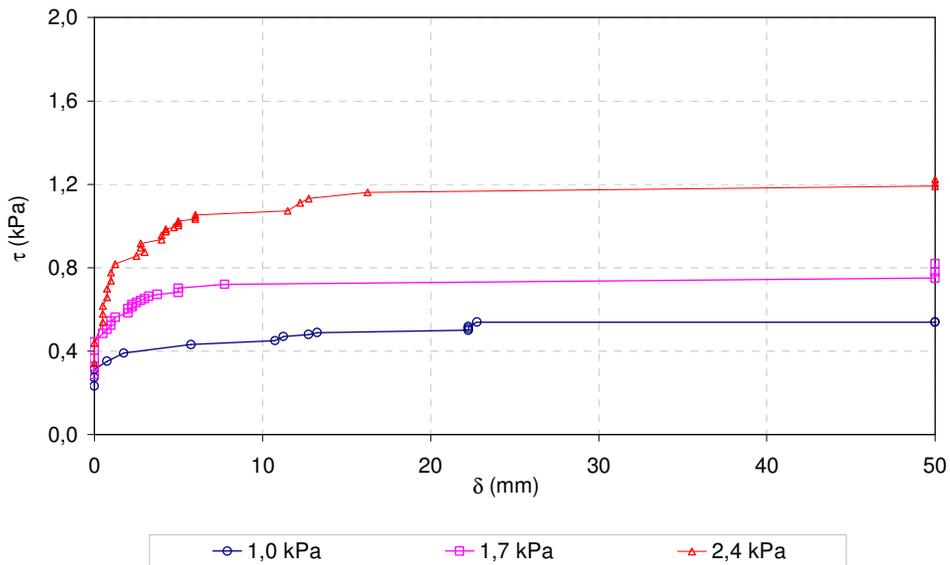


Figura 52 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GM.
Ensaio CI-4,5

A Figura 53 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-GM. Os parâmetros obtidos foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de 25,0°.

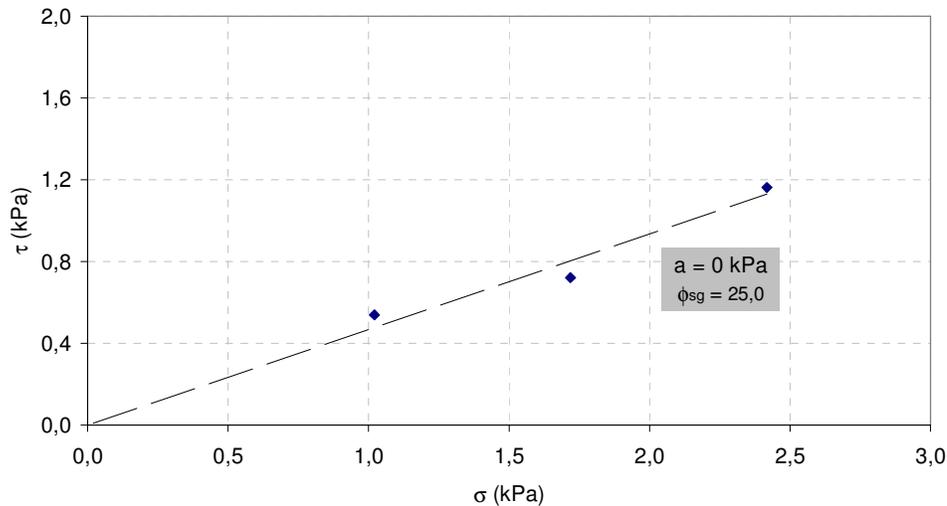


Figura 53 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio CI-4,5

4.7.

Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a 9,0° – (CI-9,0)

As análises serão apresentadas considerando a influência da tensão confinante e a inserção dos geossintéticos para cada tipo de interface: solo-solo; solo-geogrelha e solo-geomembra.

4.7.1.

Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Solo

Os resultados dos ensaios CI-9,0 da interface BR-BR foram resumidos na Tabela 25 e apresentados graficamente na Figura 54. Pode-se observar que o aumento da tensão confinante acarreta um acréscimo da tensão cisalhante. Este comportamento deve-se à possibilidade do imbricamento entre os grãos da brita. Nota-se que o menor deslocamento na ruptura deu-se para a tensão confinante intermediária.

Percebe-se que o valor de ϕ_{sec} diminui com o aumento da tensão confinante, indicando que a envoltória de resistência tende a ser curva, porém, para análise adota-se a envoltória reta. Contrariando a conclusão de Lopes (2001)

Tabela 25 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado (9,0°) para a interface BR-BR

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR	1,0	7,7	27,0	1,01	0,88	0,87	41,0
	1,7	6,7	51,0	1,70	1,46	0,86	40,7
	2,4	11,0	72,5	2,39	2,00	0,83	39,7

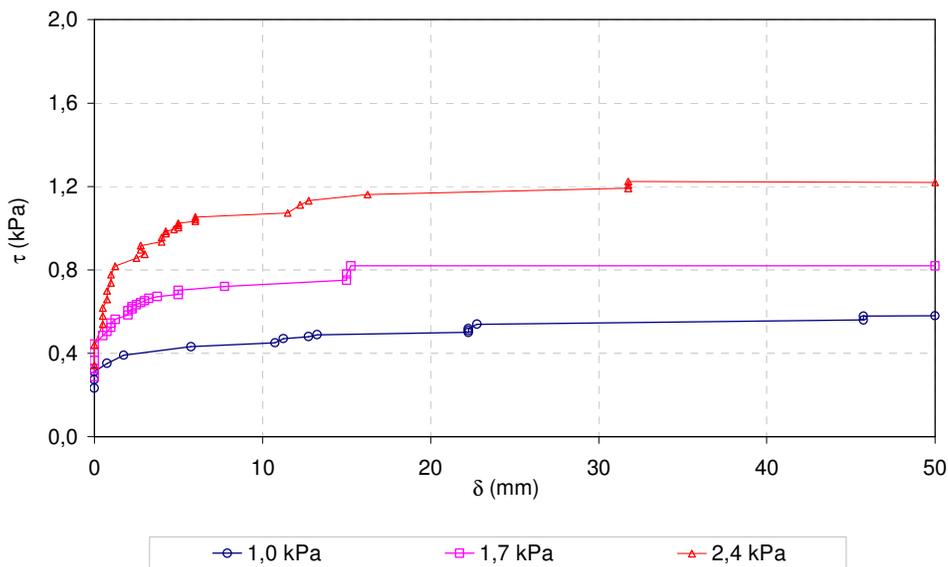


Figura 54 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-BR. Ensaio CI-9,0

A Figura 54 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-BR. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito (ϕ) de 40,2°.

Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 26 resume os resultados dos ensaios da interface BR-GG. Verifica-se que, como nas interfaces anteriormente apresentadas, o aumento da tensão confinante provoca a elevação dos valores dos deslocamentos e dos ângulos de rampa na ruptura. Este comportamento possivelmente é decorrente do rearranjo entre os grãos e imbricamento da brita com a malha da geogrelha.

Tabela 26 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GG

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GG	1,0	4,5	22,0	1,01	0,74	0,74	36,5
	1,7	6,0	49,5	1,70	1,42	0,84	40,0
	2,4	8,3	81,0	2,39	2,10	0,88	41,3

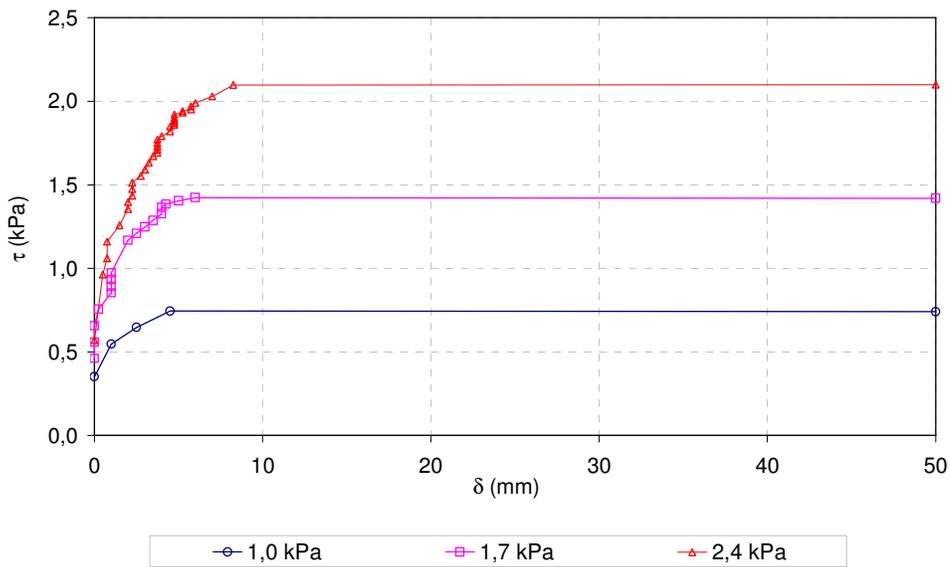


Figura 55 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GG.
Ensaio CI-9,0

A Figura 56 exibe a envoltória de resistência da interface BR-GG. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de $40,3^\circ$.

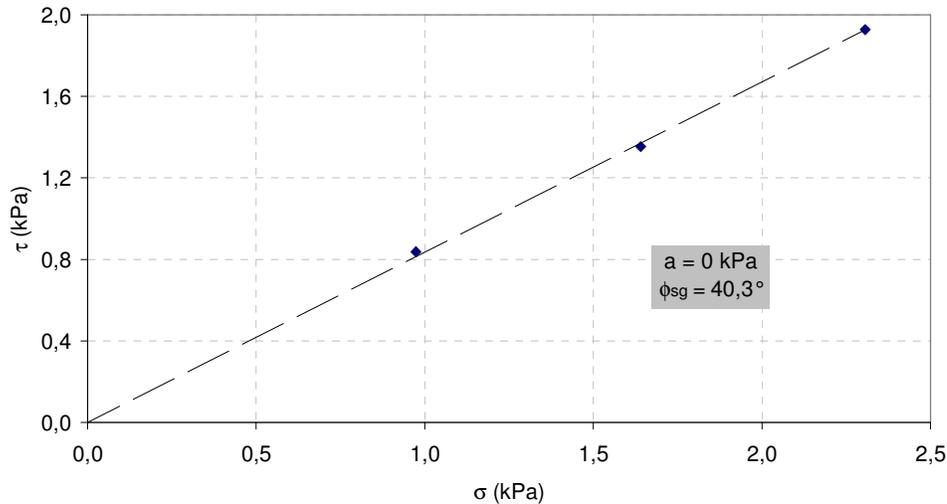


Figura 56 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CI-9,0

Interface Solo-Geomembrana

Os resultados obtidos no ensaio CI-9,0 para a interface BR-GM estão resumidos na Tabela 27. Pode-se observar que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante aplicada até a ruptura e maior o deslocamento. Este comportamento deve-se ao entrosamento e imbricamento entre os grãos. Nota-se um decréscimo do ϕ_{sec} , isto indica uma tendência à envoltória curva, entretanto, considera-se para análise, envoltória de resistência reta.

A Figura 57 compara os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado ($9,0^\circ$) na interface BR-GM em função dos níveis de confinamento.

Tabela 27 - Resultados dos ensaios CI-9,0 para a interface BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} ($^\circ$)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GM	1,0	31,2	8,0	1,01	0,51	0,50	25,6
	1,7	22,5	18,5	1,70	0,82	0,48	25,6
	2,4	27,8	26,6	2,39	1,09	0,46	24,7

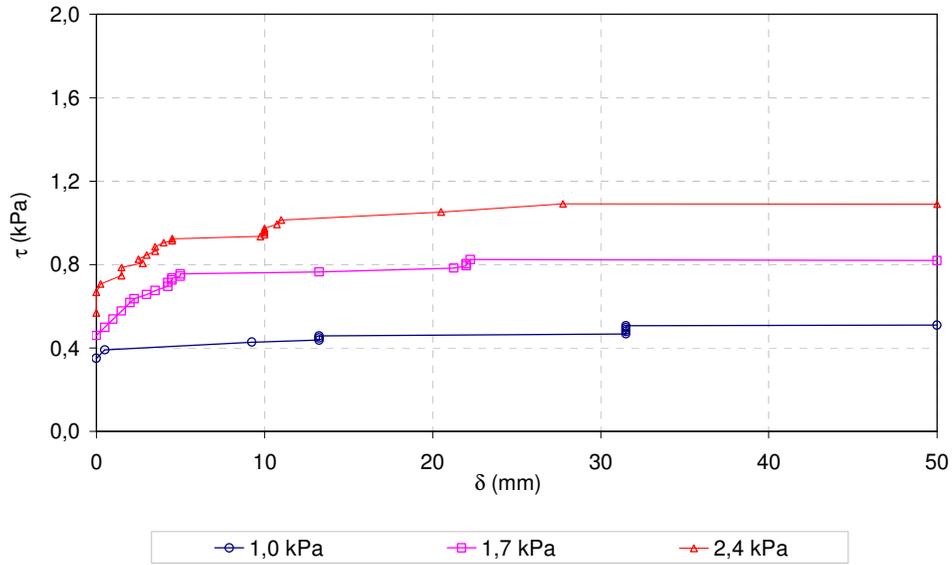


Figura 57 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GM. Ensaio CI-9,0

A Figura 58 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-GM. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de $25,1^\circ$.

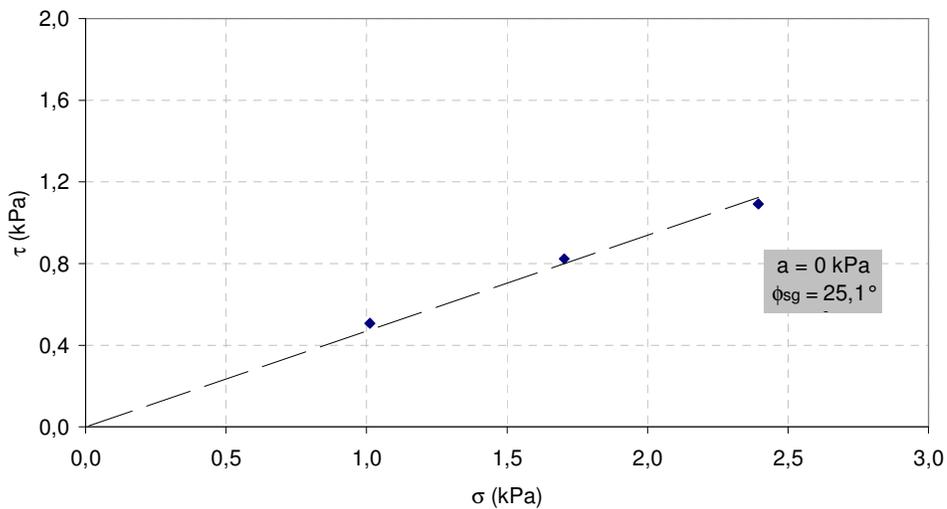


Figura 58 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio CI-9,0

4.7.2. Influência do Geossintético

A Tabela 28 aponta os resultados dos ensaios CI-9,0 das interfaces BR-BR; BR-GG E BR-GM, pode-se analisar a influência da inserção dos geossintéticos.

A caixa superior da interface BR-GG desliza mais lentamente até a ruptura do que na interface BR-BR. O imbricamento dos grãos da brita na malha do geossintético provavelmente aumenta a tensão cisalhante na ruptura, necessitando de uma força maior para mobilizar o deslizamento da caixa superior em relação à inferior. A Figura 59 representa os resultados comparativos entre as três interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM.

A inserção da geomembrana diminui a resistência ao cisalhamento da interface. Os deslocamentos na ruptura são maiores na interface BR-GM do que na interface BR-BR e BR-GG. Este comportamento deve-se à superfície lisa da geomembrana, que se encontra superfície de ruptura imposta no ensaio, ou seja, entre a caixa superior e a inferior. O imbricamento entre os grãos da brita e a geomembrana é menor do que na malha aberta da geogrelha. Nas duas interfaces, BR-BR e BR-GG, os deslocamentos são menores nas tensões confinantes intermediárias. A Figura 60 representa os resultados comparativos entre as três envoltórias de resistência BR-BR; BR-GG e BR-GM.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios CI-9,0 para as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR		7,7	27,0	1,01	0,88	0,87	41,0
BR-GG	1,0	4,5	22,0	1,01	0,74	0,74	36,5
BR-GM		31,2	8,0	1,01	0,51	0,50	25,6
BR-BR		6,7	51,0	1,70	1,46	0,86	40,7
BR-GG	1,7	6,0	49,5	1,70	1,42	0,84	40,0
BR-GM		22,5	18,5	1,70	0,82	0,48	25,6
BR-BR		11,0	72,5	2,39	2,00	0,83	39,7
BR-GG	2,4	8,2	81,0	2,39	2,10	0,88	41,3
BR-GM		27,8	26,6	2,39	1,09	0,46	24,7

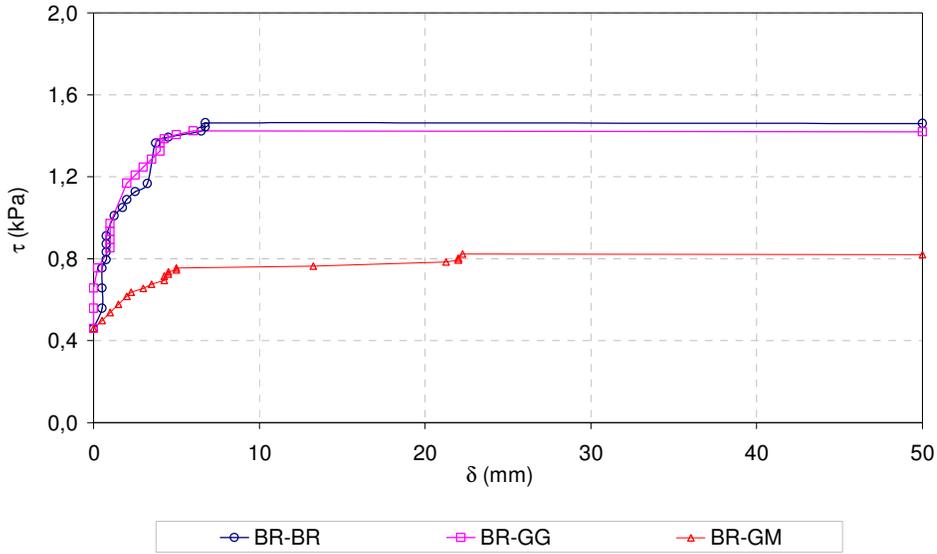


Figura 59 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio CI-9,0

Percebe-se que as interfaces BR-BR e BR-GG têm valores nitidamente maiores de parâmetros de resistência do que a interface BR-GM o que condiz com a respectiva função de resistência ao cisalhamento da geogrelha e a função de revestimento da geomembrana.

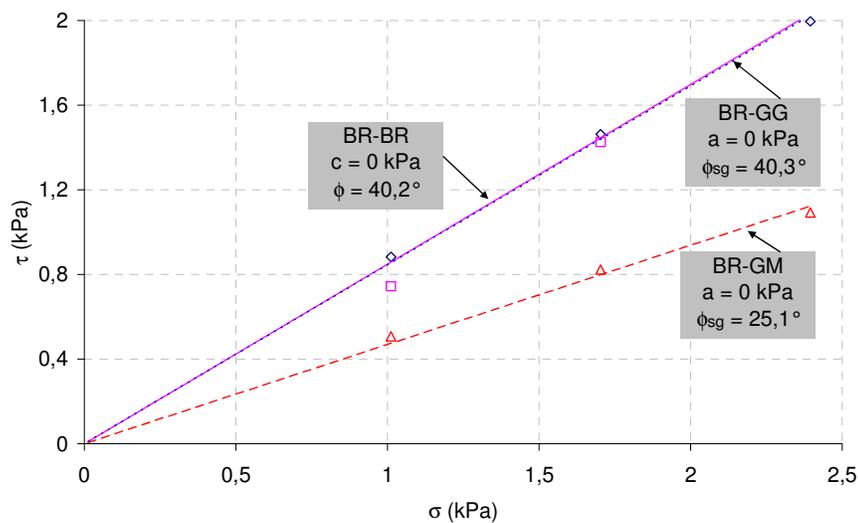


Figura 60 - Envolvórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio CI-9,0

4.7.3. Eficiência das Interfaces

A Tabela 29 revela os parâmetros de resistência e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) de cada interface, em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço no Cisalhamento Direto Inclinado ($9,0^\circ$). Pode-se concluir que as interfaces com geogrelha possuem valores de E_ϕ maiores do que as interfaces com geomembrana, ou seja, a interface BR-GG possui maior resistência ao cisalhamento do que a interface BR-GM o que comprova a função destes dois geossintéticos.

Para todas as interfaces, o valor de E_c foi nulo devido à coesão nula da brita.

Tabela 29 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio CI-9,0

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} ($^\circ$)	E_c	E_ϕ
BR-GG	0,0	40,3	0,0	1,00
BR-GM	0,0	25,1	0,0	0,62

4.8. Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a $18,0^\circ$ – (CI-18,0)

As análises serão apresentadas considerando a influência da tensão confinante e a inserção dos geossintéticos para cada tipo de interface: solo-solo e solo-geomembrana.

4.8.1. Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Solo

Os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado ($18,0^\circ$) utilizando a interface BR-BR estão resumidos e apresentados na Tabela 30 e na Figura 61. Observa-se que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante e maior o deslocamento até a ruptura. Este comportamento pode se explicado através da análise do efeito do imbricamento e rearranjo estrutural dos grãos.

Tabela 30 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado (18,0°) para a interface BR-BR

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	W (Kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR	1,0	6,0	13,02	0,97	0,84	0,86	40,7
	1,7	11,7	46,50	1,64	1,35	0,83	39,7
	2,4	15,0	28,25	2,31	1,93	0,84	40,0

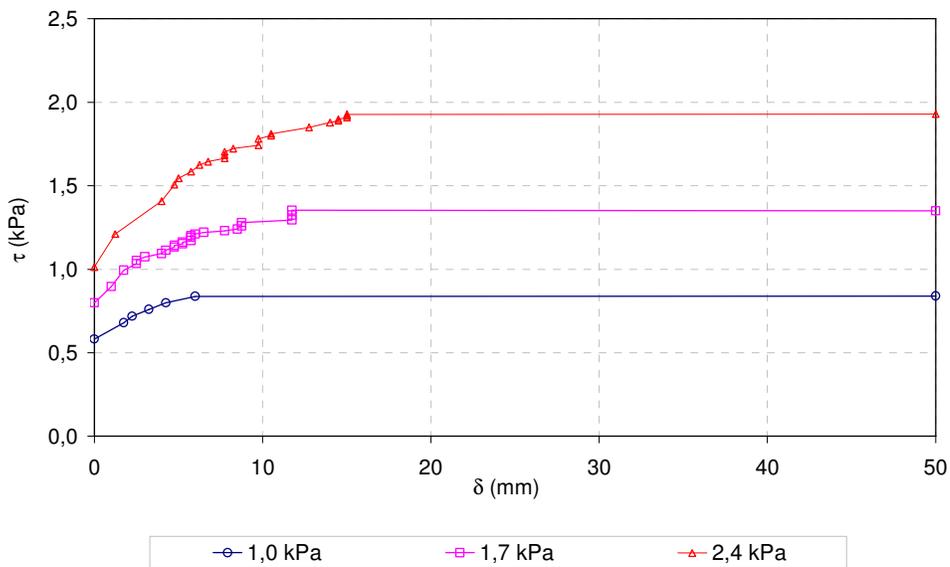


Figura 61 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR. Ensaio CI-18,0

A Figura 62 mostra a envoltória de resistência da interface BR-BR. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: coesão (c) nula e ângulo de atrito (ϕ) de 39,9°.

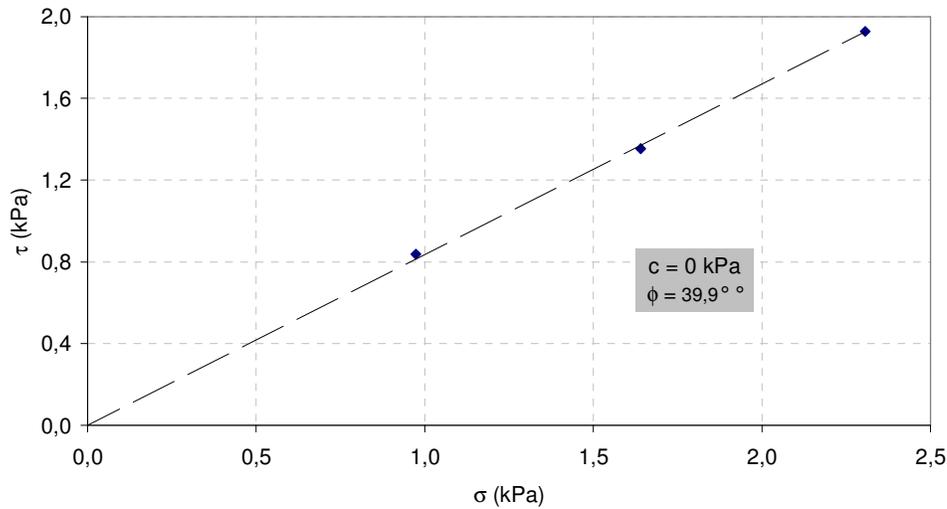


Figura 62 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio CI -18,0

Interface Solo-Geogrelha

Os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado (18,0°) utilizando a interface BR-GG estão resumidos e apresentados na Tabela 31 e na Figura 63. Observa-se que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante na ruptura. Este comportamento reflete o efeito do imbricamento e rearranjo estrutural dos grãos. O deslocamento até a ruptura é mínimo para a tensão confinante intermediária.

O valor de ϕ_{sec} decresce com o aumento da tensão confinante, isto indica uma envoltória curva, mas consideraremos envoltória reta por aproximação.

Tabela 31 - Resultados dos ensaios CI-18,0 para a interface BR-GG

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	W (Kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
	1,0	6,2	15,5	0,97	0,88	0,90	42,0
BR-GG	1,7	4,0	32,1	1,64	1,43	0,87	41,0
	2,4	5,5	39,0	2,40	1,77	0,77	37,6

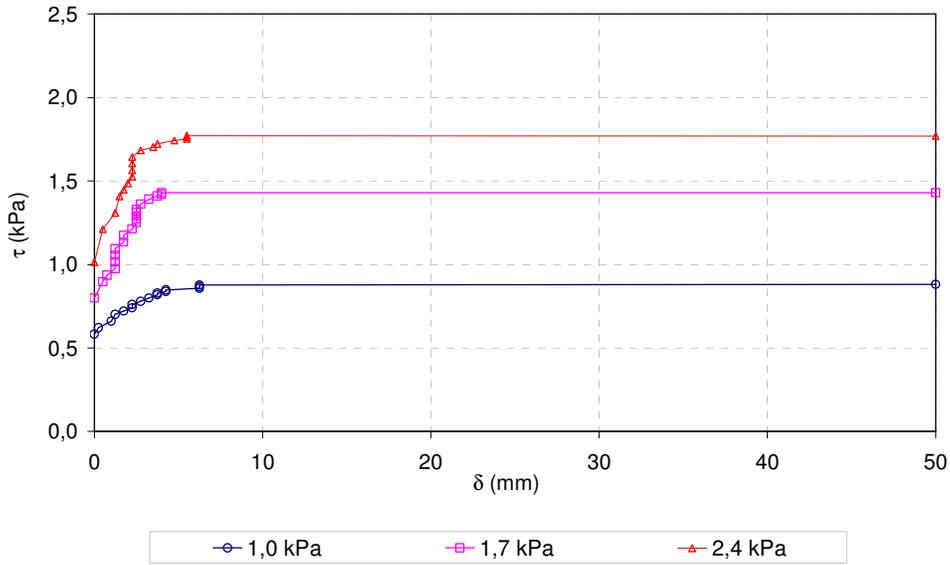


Figura 63 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-GG. Ensaio CI-18,0

A Figura 64 revela a envoltória de resistência da interface BR-GG. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito de $39,1^\circ$.

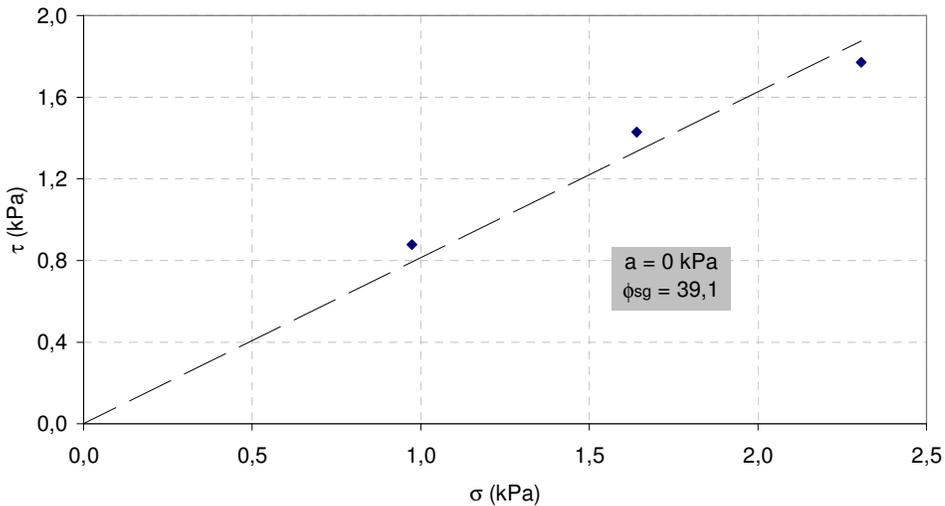


Figura 64 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CI-18,0

4.8.2. Eficiência da Interface

A Tabela 32 revela os parâmetros de resistência e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) da interface BR-GG, em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço no ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado ($18,0^\circ$).

A interface apresentou E_c nula devido à coesão nula da brita

Tabela 32 - Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de CI-18,0

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} ($^\circ$)	E_c	E_ϕ
BR-GG	0,00	$39,1^\circ$	0,0	0,99

4.9. Comparação dos Ensaio de Interface

As análises da influência do tipo de ensaio nos resultados de resistência das interfaces (solo-solo; solo-geogrelha e solo-geomembrana) foram realizadas em termos de envoltória de resistência. Estas envoltórias foram obtidas seguindo os procedimentos anteriores, através de, no mínimo, três ensaios com tensões normais diferentes.

4.9.1. Interface Solo-Solo

A Tabela 33 apresenta os resultados dos ensaios RP; CC; CI-9,0 e CI-18 para a mesma interface BR-BR. O objetivo é comparar o comportamento da mesma interface sob os diferentes ensaios do realizados no presente trabalho.

A Figura 65 apresenta os parâmetros obtidos através das envoltórias de resistência. Pode-se observar que o maior ângulo de atrito obtido foi no ensaio de RP e o menor ângulo de atrito deu-se para o ensaio CC, a diferença entre os valores dos parâmetros de resistência chega a $4,1^\circ$.

Tabela 33 - Resultados dos ensaios RP; CC; CI-9,0 e CI-18,0 para a interface BR-BR

Interface	Ensaio	Parâmetros de Resistência	
		c (kPa)	ϕ (°)
BR-BR	RP	0	40,7
	CC	0	36,6
	CI-9,0	0	40,2
	CI-18,0	0	39,9

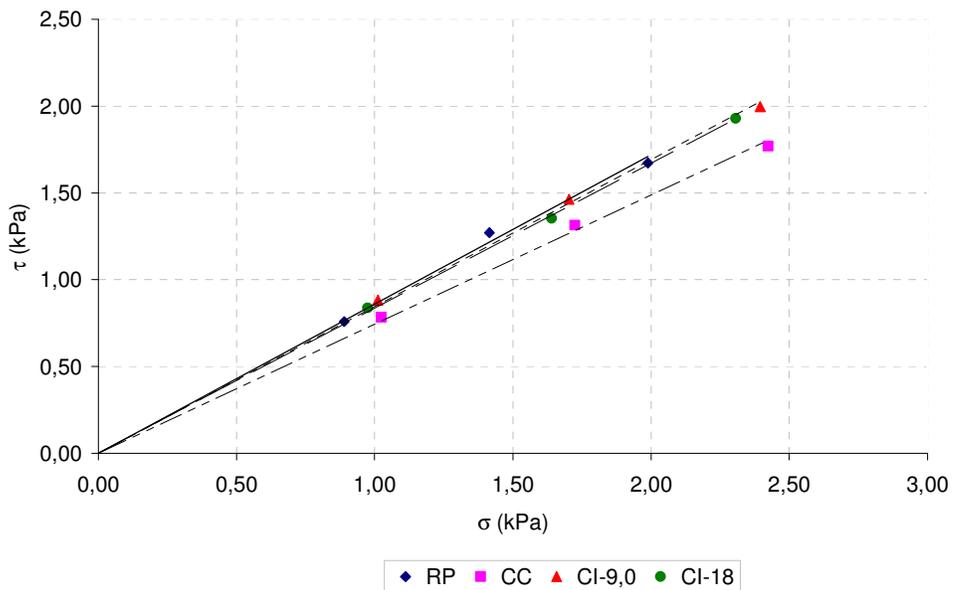


Figura 65 - Envoltórias de resistência da interface BR-BR. Ensaios de RP, CC, CI-9,0 e CI-18

4.9.2. Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 34 apresenta os parâmetros obtidos através das envoltórias de resistência representadas na Figura 66. Pode-se dizer que os valores obtidos representam um decréscimo do ângulo de atrito de interface para os ensaios CC e CI-18,0. A diferença entre os valores dos parâmetros de resistência chega a 2,5° entre os ensaios de RP e CC.

Tabela 34 - Resultados dos ensaios RP; CC; CI-9,0 e CI-18,0 para a interface BR-GG

Interface	Ensaio	Parâmetros de Resistência	
		a (kPa)	ϕ_{sg} (°)
BR-GG	RP	0	40,9
	CC	0	38,4
	CI (9,0°)	0	40,3
	CI (18,0°)	0	39,1

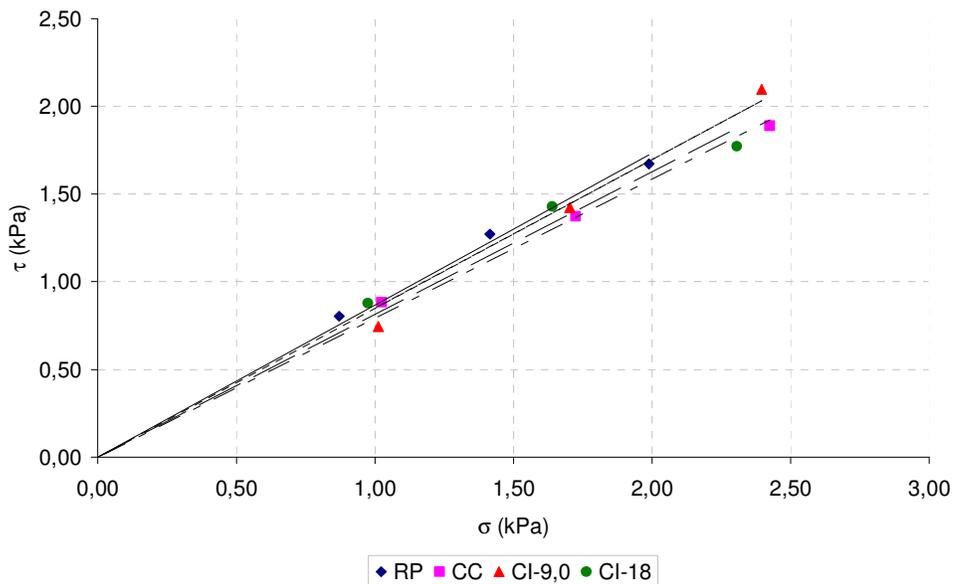


Figura 66 - Envoltórias de resistência da interface BR-GG. Ensaios de RP, CC, CI (9,0°) e CI (18°)

4.9.3. Interface Solo-Geomembrana

Os parâmetros de resistência apresentados na Tabela 35 foram obtidos através das envoltórias representadas na Figura 67. Pode-se dizer que os valores obtidos representam um decréscimo do ângulo de atrito de interface para os ensaios CC e RP. A diferença entre os valores dos parâmetros de resistência chegam a 3,0° entre os ensaios de CC e RP.

Tabela 35 - Resultados comparativos entre uma mesma interface submetidos aos diferentes ensaios

Interface	Ensaio	Parâmetros de Resistência	
		a (kPa)	ϕ_{sg} (°)
BR-GM	RP	0	24,1
	CC	0	27,1
	CI (4,5°)	0	26,7
	CI (9,0°)	0	25,1

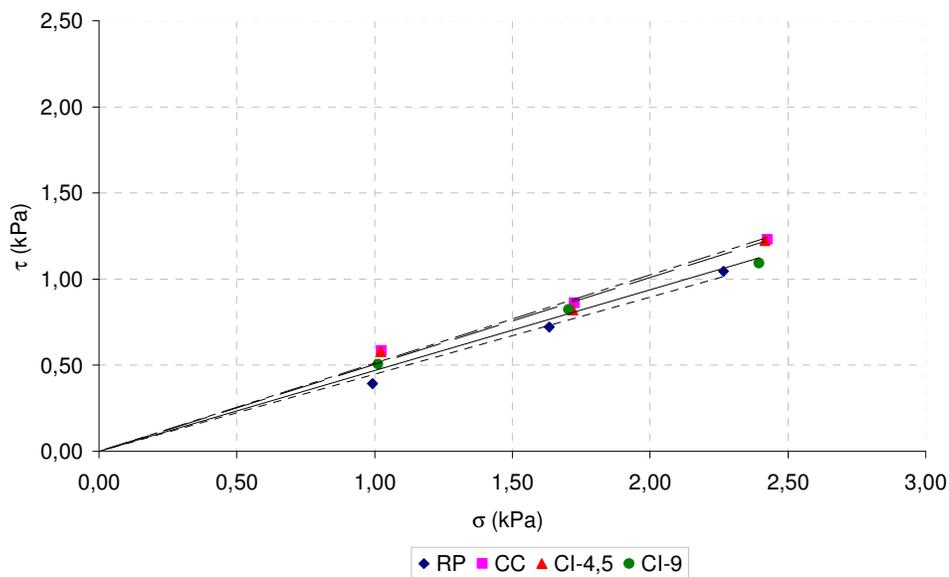


Figura 67 - Envoltórias de resistência da interface BR-GM. Ensaio de RP, CC, CI-4,5 e CI-9,0

Considerando todos os ensaios, pode-se perceber que para as interfaces BR-BR e BR-GG os ensaios de rampa apresentaram maiores valores de parâmetros de interface e os menores valores foram obtidos pelos ensaios de cisalhamento direto convencional. Os ensaios de cisalhamento direto inclinado apresentam uma condição intermediária.

Uma das restrições do ensaio de rampa e cisalhamento direto inclinado é a vibração da plataforma provocada pelo basculamento do conjunto. Esta vibração pode ter ocasionado uma densificação da brita aumentando assim a resistência da interface e por isso os valores dos parâmetros de resistência tiveram maiores valores para os ensaios de RP e CI para as interfaces BR-BR e BR-GG. Ao

contrário destes ensaios, o ensaio CC não acarreta esta vibração, permanecendo o solo com a mesma densidade inicial.

Na interface BR-GM também ocorre a densificação durante os ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado, porém, esta densificação é reduzida em função da estrutura da geomembrana, já que o rearranjo entre os grãos é reduzido pela sua superfície lisa.

4.10. Considerações Finais

Este capítulo apresentou um estudo de resistência da interface solo geossintético em ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado. Foi avaliada uma série de fatores que influenciam os resultados dos ensaios: a tensão confinante, a inserção do geossintético, o tipo de geossintético e o tipo de ensaio.

O programa experimental envolveu ensaios em dois tipos de geossintéticos (geogrelha e geomembrana) e um solo (brita). Foram realizados ensaios de interface solo-solo; solo-geogrelha e solo-geomembrana, em um equipamento que realiza os três tipos de ensaio, alterando apenas a sua configuração. Através destes ensaios foram obtidos os parâmetros de resistência e os valores de eficiência da interface.

Quanto à influência da tensão confinante, pode-se concluir que o aumento da σ_n tem como conseqüência maiores ângulos de atrito na ruptura em todas as interfaces ensaiadas. Com relação aos deslocamentos, não se pode tirar maiores conclusões, visto que algumas interfaces apresentam dispersões. Como a instrumentação utilizada para medir os deslocamentos tem precisão de 0,5mm, o efeito do aumento da tensão confinante não ficou bem definido.

Com relação à influência do tipo de geossintético, observou-se que as interfaces com geomembrana apresentaram menores ângulo de atrito na ruptura em todos os ensaios, quando comparadas às interfaces BR-BR e BR-GG. Isto pode ser explicado pela 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 inter-travamento dos grãos com a abertura da malha da geogrelha.

Por fim, analisou-se os tipos de ensaio. Para as interfaces BR-BR e BR-GG os ensaios de RP obtiveram maiores valores de resistência do que para os ensaios CC. Para a interface BR-GM, o comportamento foi contrário, os ensaios de CC obtiveram maiores valores do que para RP. Para todas as interfaces os ensaios de CI apresentaram valores intermediários aos obtidos para RP e CC.