

10. Resultados e Análises: Comparação dos Diferentes Ensaio

10.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são comparados os resultados dos ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado realizados nesta pesquisa. As análises foram realizadas em termos de envoltórias de resistência, utilizando os resultados obtidos a partir das configurações de ensaio RP25Q-10 (Rampa, caixa de 25, Quadrada) e CI25Q-10 (Cisalhamento Inclinado, caixa de 25, Quadrada). Avaliou-se a influência da variação da distribuição da tensão normal nos resultados.

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

Para a obtenção das envoltórias de resistência foram considerados os valores das tensões normais e cisalhantes 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.

Os ensaios são identificados por meio da mesma combinação de siglas apresentada nos capítulos anteriores: Ar para areia; GMPL para geomembrana Polimanta, GG35 para geogrelha Fortrac 35 e número 15 para a densidade relativa igual a 15%.

Os ensaios de cisalhamento direto inclinado foram realizados nas inclinações de 4,5°, 9° e 18°, envolvendo interfaces solo-solo e solo-geossintético. Adotou-se a seguinte nomenclatura para identificação destes ensaios: CI(4,5) representa o ensaio de cisalhamento inclinado a 4,5°; CI(9) corresponde ao

cisalhamento inclinado a 9° e CI(18), cisalhamento inclinado a 18°. Os ensaios de rampa foram denominados RP e os de cisalhamento direto convencional de CC.

10.2. Influência do Tipo de Ensaio

Para avaliar a influência do tipo de teste foram comparados ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado nas interfaces areia-areia com densidade relativa de 15% (Tabela 63). Apresenta-se os valores de tensão normal (σ), deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), ângulo de inclinação 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 258 apresenta uma comparação das relações entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal de todos os ensaios

Considerando a Tabela 63 e Figura 258, pode-se observar que os comportamentos das interfaces para os diferentes ensaios são semelhantes. Nas interfaces areia-areia a ruptura é atingida para valores reduzidos de deslocamento. Observa-se, também, que os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante para todos os ensaios.

Tabela 63 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xAr15

Ensaio	σ (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
RP	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
CI(18)	1,8	8,8	18	1,71	1,03	0,60	31,0
	3,2	5,5	18	3,03	1,66	0,55	28,7
	5,0	5,6	18	4,76	2,52	0,53	27,9
CI(9)	1,8	11,5	9	1,78	1,29	0,72	35,9
	3,2	7,5	9	3,15	1,90	0,60	31,1
	5,0	8,5	9	4,95	2,69	0,54	28,5

Tabela 63 (cont.) - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xAr15

Ensaio	σ (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
CI(4,5)	1,8	5,8	4,5	1,79	1,27	0,71	35,4
	3,2	6,0	4,5	3,18	2,03	0,64	32,6
	5,0	7,0	4,5	4,99	3,00	0,60	31,0
CD	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

Na Figura 258, observa-se, que independente do tipo de ensaio, os valores de ângulo de atrito se reduzem com o aumento da tensão normal. Esta redução é mais significativa para os ensaios de cisalhamento inclinado a 9°. Resultados semelhantes foram observados por Lalarakotoson *et al.* (1999) e Gourc *et al.* (1996).

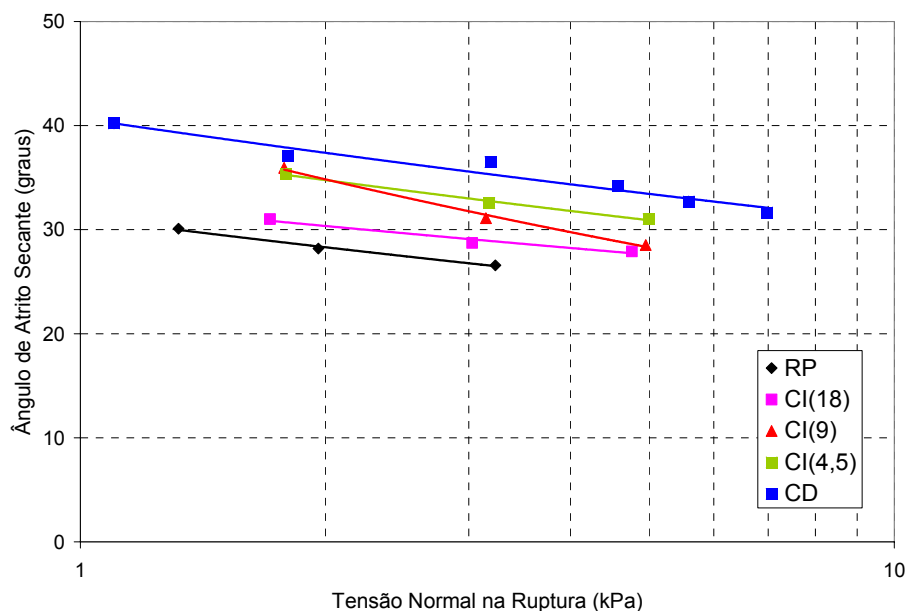


Figura 258 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15xAr15.

A Figura 259 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 24,0° para o ensaio de rampa, coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 26,1° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 18°, coesão de 0,5kPa e ângulo de atrito de 23,8° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 9°, coesão de 0,3kPa e ângulo de atrito de 28,4° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 4,5°, e coesão de 0,4kPa e ângulo de atrito de 30,1° para o ensaio de cisalhamento direto convencional. Desta forma, os valores obtidos indicam um decréscimo do ângulo de atrito de interface com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

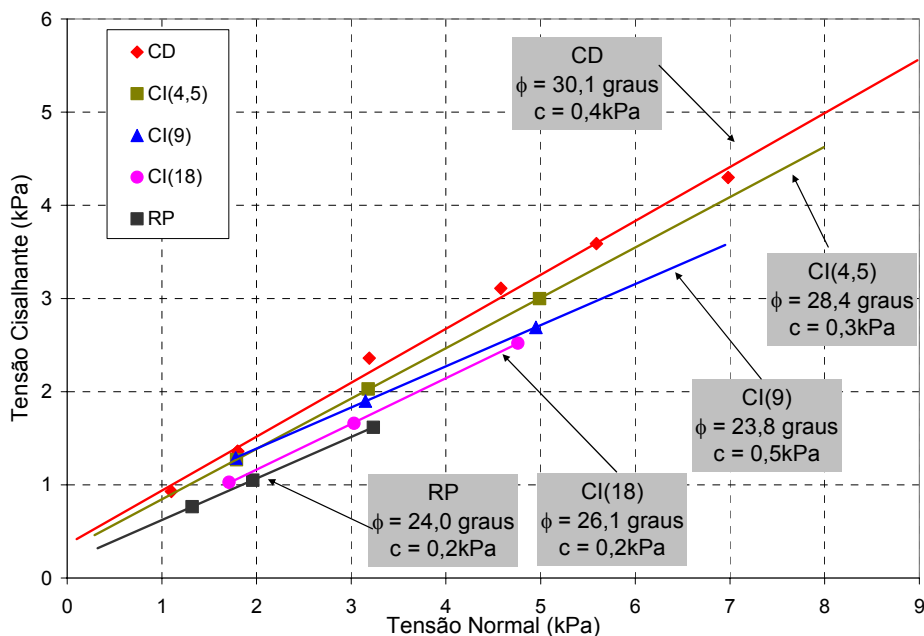


Figura 259 - Envoltórias de resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xAr15.

A avaliação da influência do tipo de ensaio (rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado) também é realizada para as interfaces areia-geogrelha com densidade relativa de 15% (Tabela 64). Apresenta-se os valores de tensão normal (σ), deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), ângulo de inclinação 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 260 apresenta as relações entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal de todos os ensaios.

Considerando a Tabela 64 e Figura 260, pode-se observar que os comportamentos das interfaces para os diferentes ensaios são diferentes. Nas

interfaces areia-geogrelha a ruptura também é atingida para valores reduzidos de deslocamento, porém não existe uma tendência geral definida de comportamento dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante para os diferentes tipos de ensaio. Para os ensaios de rampa, nota-se uma tendência de aumento de deslocamentos com o aumento da tensão normal. O contrário é observado para os ensaios CI(18). Para os outros dois ensaios não se identifica um padrão.

Tabela 64 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces areia-geogrelha na $D_r=15\%$

Ensaio	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
RP	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
CI(18)	1,8	9,5	18	1,71	1,17	0,68	34,4
	3,2	8,3	18	3,03	1,90	0,63	32,1
	5,0	4,3	18	4,76	2,85	0,60	30,9
CI(9)	1,8	8,3	9	1,78	1,25	0,70	35,1
	3,2	7,5	9	3,15	2,05	0,65	33,1
	5,0	9,3	9	4,95	3,16	0,64	32,6
CD	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

Na Figura 260, observa-se, da mesma forma que nas interfaces areia-areia, a redução do ângulo de atrito com o aumento da tensão normal, independentemente do tipo de ensaio.

A Figura 261 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 26,2° para o ensaio de rampa, coesão de 0,2kPa e

ângulo de atrito de $28,8^\circ$ para o ensaio de cisalhamento inclinado a 18° , coesão de $0,2\text{kPa}$ e ângulo de atrito de $31,1^\circ$ para o ensaio de cisalhamento inclinado a 9° e coesão de $0,2\text{kPa}$ e ângulo de atrito de $31,7^\circ$ para o ensaio de cisalhamento direto convencional. Portanto, os valores indicam um decréscimo do ângulo de atrito de interface com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

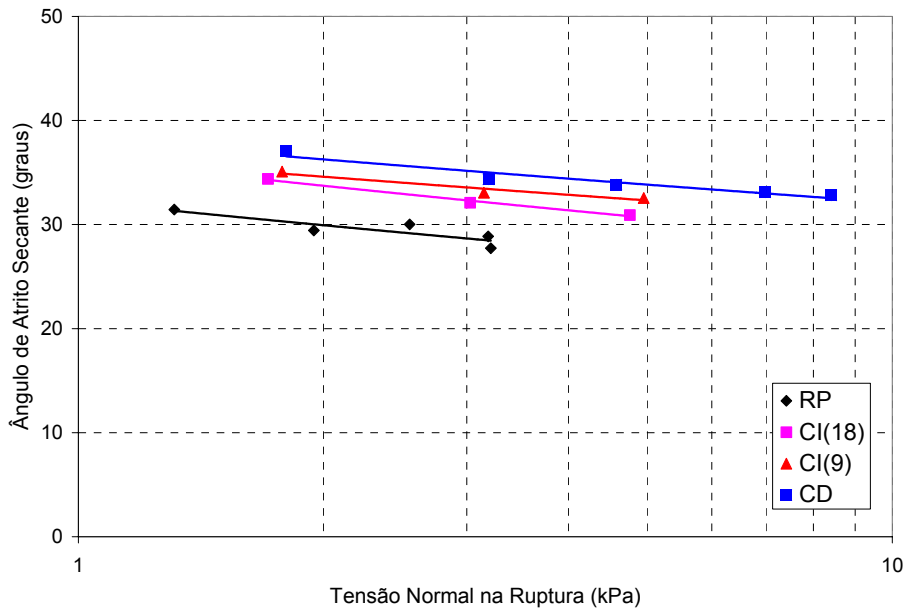


Figura 260 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15XGG35.

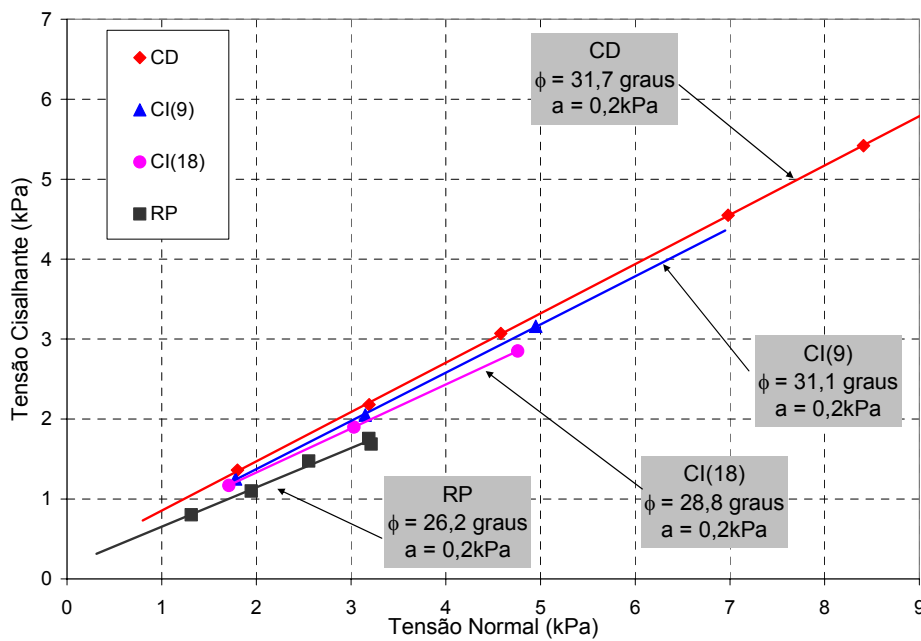


Figura 261 - Envoltórias de Resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15XGG35.

A mesma análise da influência do tipo de ensaio nos resultados é realizada para as interfaces solo-geomembrana. A Tabela 65 apresenta os valores de tensão normal (σ), deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), ângulo de inclinação 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 262 apresenta a comparação das relações entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal de todos os ensaios.

Tabela 65 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces areia-geomembrana na $D_r=15\%$

Ensaio	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	σ_{rup} (kPa)	
RP	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
CI(4,5)	1,8	1,3	4,5	1,79	0,36	0,20	11,4
	3,2	0,3	4,5	3,18	0,62	0,20	11,1
	5,0	0,3	4,5	4,99	0,99	0,20	11,2
CI(9)	1,8	0	9	1,78	0,28	0,16	9,0
	3,2	0	9	3,15	0,50	0,16	9,0
	5,0	0	9	4,95	0,78	0,16	9,0
CD	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

Considerando a Tabela 65 e a Figura 262, pode-se observar que os comportamentos das interfaces para os diferentes ensaios são semelhantes. Nas interfaces areia-geomembrana a ruptura é atingida para valores reduzidos de deslocamento. Considerando todos os ensaios, nota-se que não há um comportamento geral definido dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante para todos os ensaios. Para os ensaios de rampa e CI(4,5) existe uma tendência de diminuição dos deslocamentos com o aumento da tensão normal. Já para os outros ensaios CI(9) e CD, não se verifica variação dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante.

A Figura 262 apresenta os resultados de resistência de interfaces para os diferentes ensaios em termos de ângulo de atrito secante. Observa-se, que nos ensaios de cisalhamento não há variação significativa do ângulo de atrito secante com a tensão normal. O contrário é observado nos ensaios de rampa, onde o aumento da tensão normal resulta em uma redução do ângulo de atrito secante.

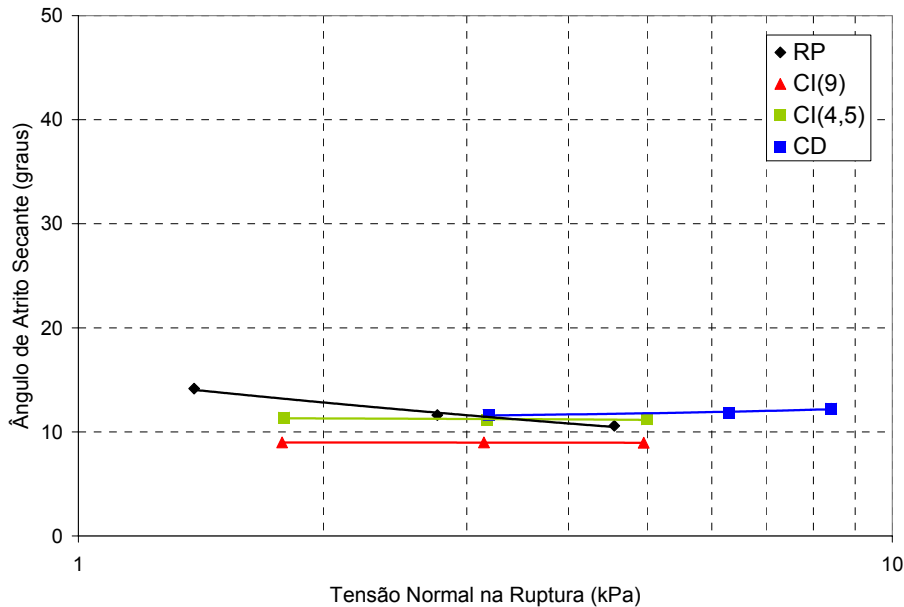


Figura 262 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15xGMPL.

Na Figura 263 são exibidas as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de 0kPa e ângulo de atrito de 9° para o ensaio de rampa, coesão de 0kPa e ângulo de atrito de 9° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 9°, adesão de 0kPa e ângulo de atrito de 11,1° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 4,5° e adesão de 0kPa e ângulo de atrito de 12,6° para o ensaio de cisalhamento direto convencional. Os valores indicam um decréscimo do ângulo de atrito de interface com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

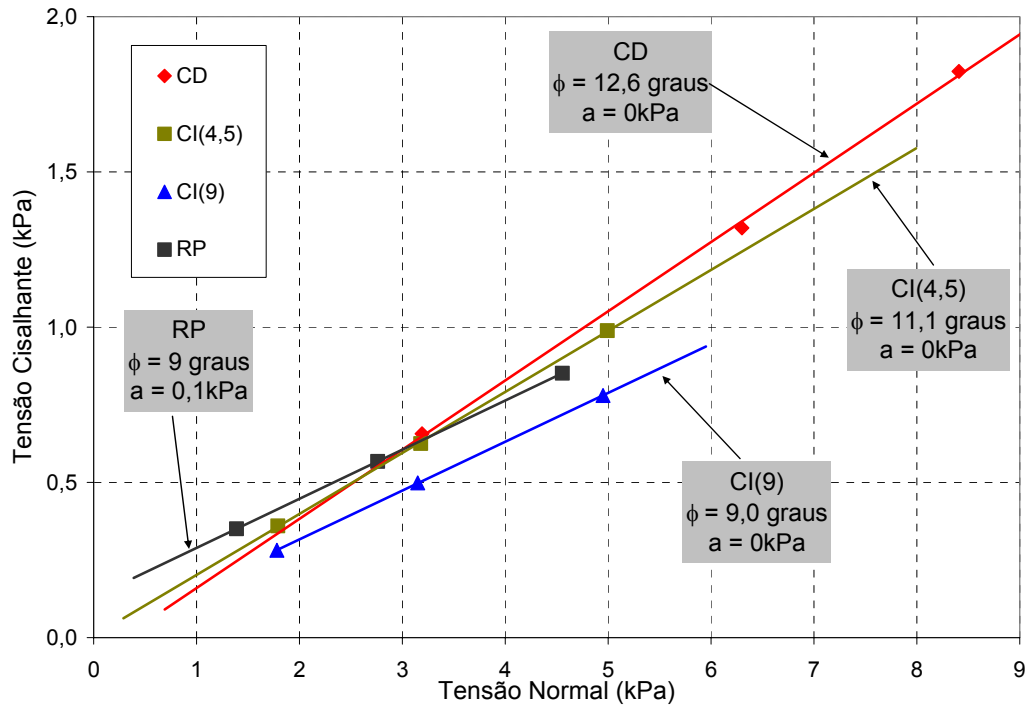


Figura 263 - Envoltórias de Resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xGMPL.

Considerando-se todos os tipos de testes, observa-se, de forma geral, que os ensaios de cisalhamento direto convencional apresentam os maiores valores de parâmetros de interface. Os menores valores são obtidos por meio dos ensaios de rampa. Os ensaios de cisalhamento direto inclinado representam uma condição intermediária.

Uma possível explicação para este comportamento é esquematizada na Figura 264, onde são apresentadas as variações das tensões normais e cisalhantes durante os ensaios de rampa (RP), cisalhamento direto convencional (CC) e inclinado (CI). Nela são apresentadas três envoltórias de ruptura hipotéticas e suas respectivas trajetórias de variação de tensões (normal e cisalhante), baseadas nos resultados apresentados neste capítulo.

Para uma dada tensão normal inicial σ_3 , por exemplo, o procedimento de ensaio de rampa consiste em bascular a plataforma de ensaio até que ocorra o escorregamento da caixa de ensaio superior em relação à inferior. Neste caso, tanto a tensão normal média como a tensão cisalhante variam. A trajetória de tensões é curva até a ruptura (trajetória 1). Observa-se que a tensão normal diminui enquanto a tensão cisalhante aumenta.

No caso do ensaio de cisalhamento direto convencional, o procedimento consiste em cisalhar a amostra até que ocorra a ruptura. Desta forma, somente a tensão cisalhante varia, enquanto a tensão normal permanece constante (trajetória 2). Já o ensaio de cisalhamento direto inclinado (trajetória 3) pode ser considerado um híbrido de ensaios de rampa e cisalhamento convencional. Neste ensaio a plataforma de ensaio é basculada até um ângulo pré-determinado (fase rampa) e, em seguida, cisalhada até a ruptura (fase cisalhamento).

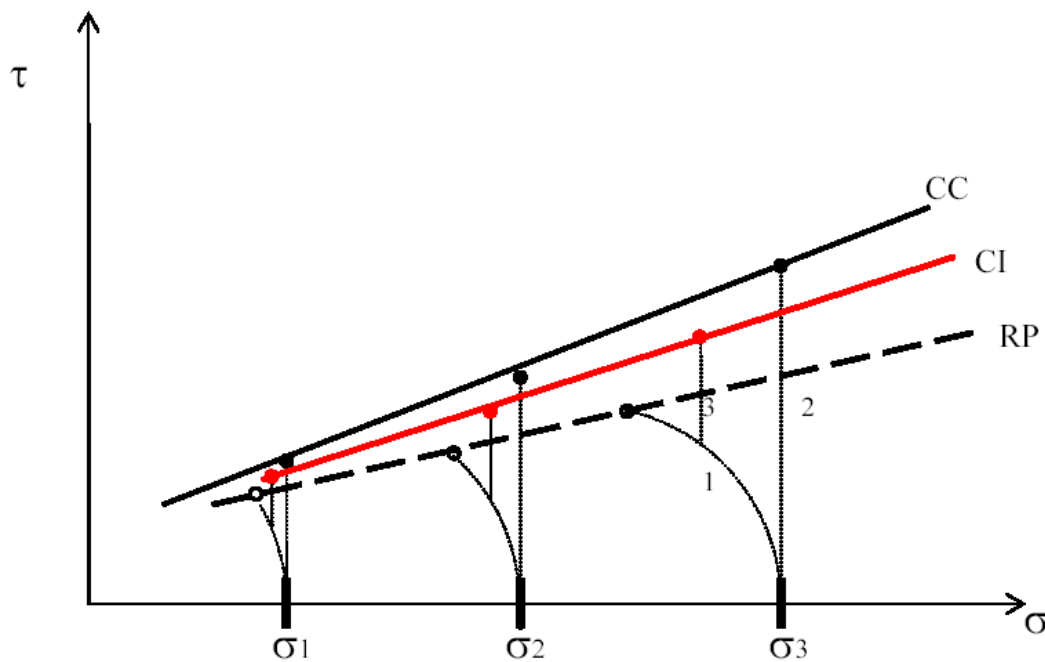


Figura 264 - Trajetória das tensões normais e cisalhantes nos ensaios de rampa (RP), cisalhamento direto convencional (CC) e inclinado (CI).

A variação da tensão normal durante os ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado parece condicionar a resistência final da interface. Isso foi observado nos resultados apresentados neste capítulo para as três interfaces ensaiadas e em diferentes condições de ensaio.

10.3. Considerações Finais

Neste capítulo foram comparados os resultados dos ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado realizados nesta pesquisa. As

análises foram realizadas em termos de envoltórias de resistência, utilizando os resultados obtidos a partir das configurações de ensaio RP25Q-10 e CI25Q-10.

Considerando todos os ensaios realizados com as interfaces areia-areia, observou-se que a ruptura é atingida para valores reduzidos de deslocamento, os deslocamentos e os ângulos de atrito tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante, independentemente do tipo de ensaio. Os valores obtidos indicam ainda um decréscimo do ângulo de atrito de interface com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

Nas interfaces areia-geogrelha, a ruptura também é atingida para valores reduzidos de deslocamento, porém não existe uma tendência geral definida de comportamento dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante para os diferentes tipos de ensaio. Entretanto, nota-se a redução do ângulo de atrito com o aumento da tensão normal, independentemente do tipo de ensaio. Além disto, o ângulo de atrito de interface diminui com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

Nos ensaios das interfaces areia-geomembrana a ruptura também é atingida para valores reduzidos de deslocamento. Nota-se que não há um comportamento geral definido dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante para todos os ensaios. Nos ensaios de cisalhamento não há variação significativa do ângulo de atrito secante com a tensão normal. O contrário é observado nos ensaios de rampa, onde o aumento da tensão normal resulta em uma redução do ângulo de atrito secante. De forma análoga ao comportamento das outras interfaces, o ângulo de atrito diminui com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

Considerando-se todos os tipos de testes, observa-se, de forma geral, que os ensaios de cisalhamento direto convencional fornecem os maiores valores de parâmetros de interface. Os menores valores são obtidos por meio dos ensaios de rampa. Os ensaios de cisalhamento direto inclinado representam uma condição intermediária.