

8

Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto

8.1. Introdução

Os ensaios de cisalhamento direto executados na presente campanha experimental objetivaram a simulação de 2 fenômenos distintos que ocorrem na interface solo-geogrelha: (1) mobilização do atrito na interface e (2) mobilização da resistência à tração da geogrelha. Na

Figura 145, estão ilustrados os dois diferentes mecanismos para o caso de um muro reforçado.

No primeiro mecanismo, observa-se que a geogrelha permanece solidária com parte do solo envolvente, sendo a resistência da interface mobilizada pelo deslizamento de parte da massa de solo em relação à geogrelha. Neste caso, os parâmetros de resistência da interface (c'_a e δ') podem ser obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto com a geogrelha posicionada horizontalmente na caixa de ensaio.

O segundo mecanismo ocorre quando a superfície de ruptura intercepta a geogrelha. A simulação em laboratório pode ser efetuada a partir de ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado. A tração máxima no reforço ocorre no ponto em que a superfície de ruptura o intercepta. Neste mecanismo, as tensões cisalhantes na interface solo-reforço são absorvidas pelo reforço, que é então tracionado, conferindo ao solo uma resistência à tração.

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto descritos no Capítulo 6.

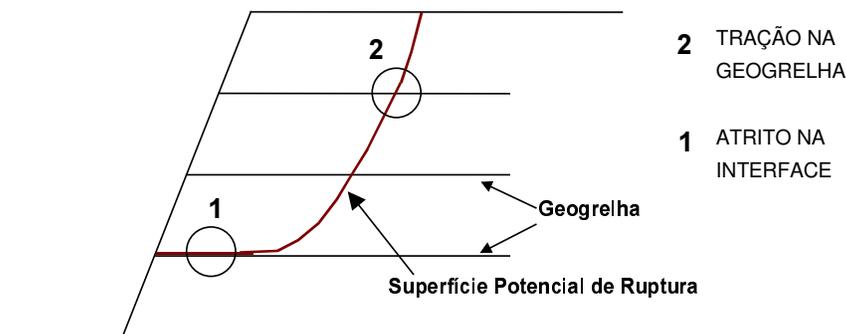


Figura 145 - Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha

8.2. Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal

No que se refere ao estudo da resistência ao cisalhamento de geogrelhas, é importante salientar que, no ensaio de cisalhamento direto, não é possível considerar a contribuição da mobilização da resistência passiva nos elementos transversais das geogrelhas. Esta contribuição é da maior relevância quando o movimento que tende a ocorrer na interface é o arrancamento (Lopes e Lopes, 1999).

Os coeficientes de interação (λ e f) podem ser obtidos a partir das equações 70 e 71, apresentadas no Capítulo 7. O coeficiente f ($\tan\delta'/\tan\phi'$) depende do mecanismo de interação mobilizado na interface solo-geossintético e do movimento relativo que ocorre nesta mesma interface.

Quando o movimento relativo corresponde ao cisalhamento direto, a resistência na interface solo-geogrelha é a soma de duas parcelas: (1) atrito solo-geogrelha e (2) atrito solo-solo. Desta forma, o coeficiente f pode ser escrito como:

$$f = f_{s/g} + f_{s/s} \quad (93)$$

com:

$$f_{s/g} = \alpha_s \left(\frac{\tan\phi'_{SR}}{\tan\phi'} \right) \quad (94)$$

$$f_{s/s} = (1 - \alpha_s) \quad (95)$$

onde: $f_{s/g}$ = parcela de f devido ao atrito superficial solo-geogrelha;

$f_{s/s}$ = parcela de f devido ao atrito solo-solo;

α_s = fração sólida da área superficial da geogrelha.

As Figuras 146 e 147 apresentam as curvas tensão-deslocamento (τ_{SG} vs d_h), obtidas em ensaios de cisalhamento direto com as geogrelhas posicionadas horizontalmente e imersas, respectivamente, em areia e em silte argiloso. Pode-se observar que, independente do tipo de solo e da tensão confinante vertical, as curvas não apresentam pico pronunciado, ou seja, revelam um comportamento dúctil.

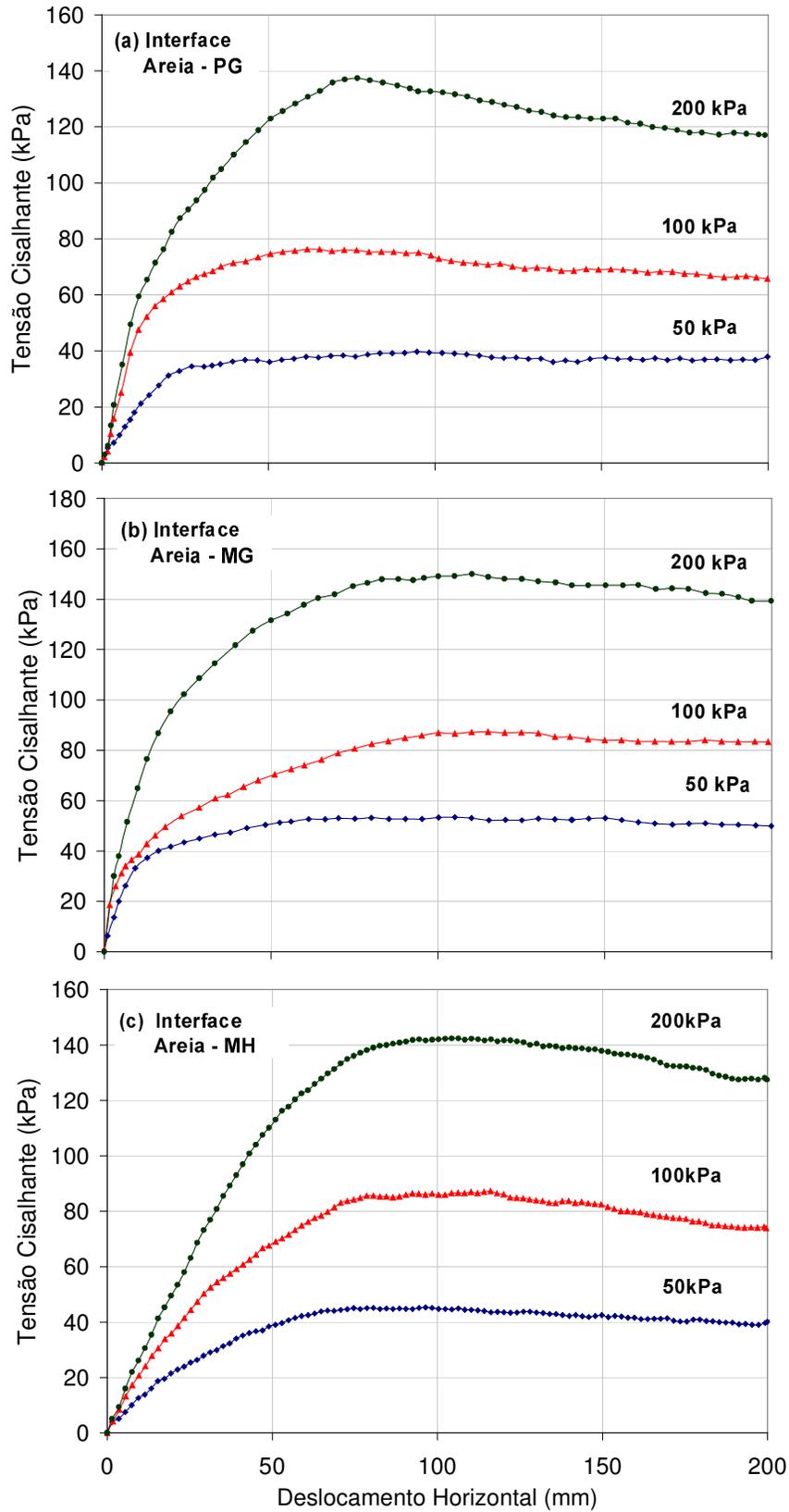


Figura 146 - Resultados dos Ensaio de Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal em Areia ($D_R = 80\%$)

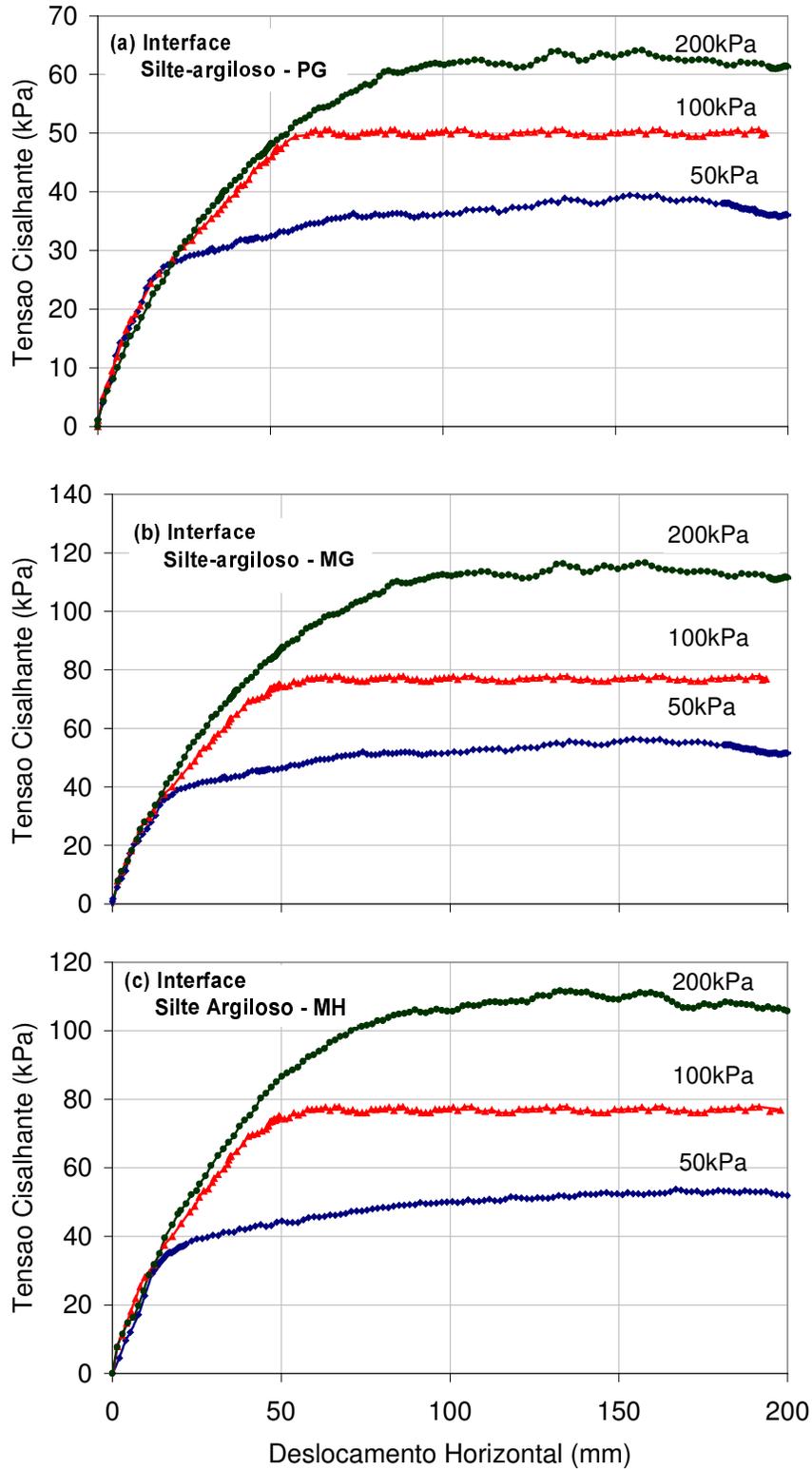


Figura 147 - Resultados dos Ensaio de Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal em Silte Argiloso (GC = 100%)

As envoltórias de resistência obtidas a partir destes ensaios estão ilustradas na Figura 148. Em ambos os tipos de solo, a envoltória de resistência da geogrelha MacGrid encontra-se acima das demais, ou seja, a geogrelha MacGrid mobilizou valores mais elevados de resistência ao cisalhamento nas interfaces com os solos.

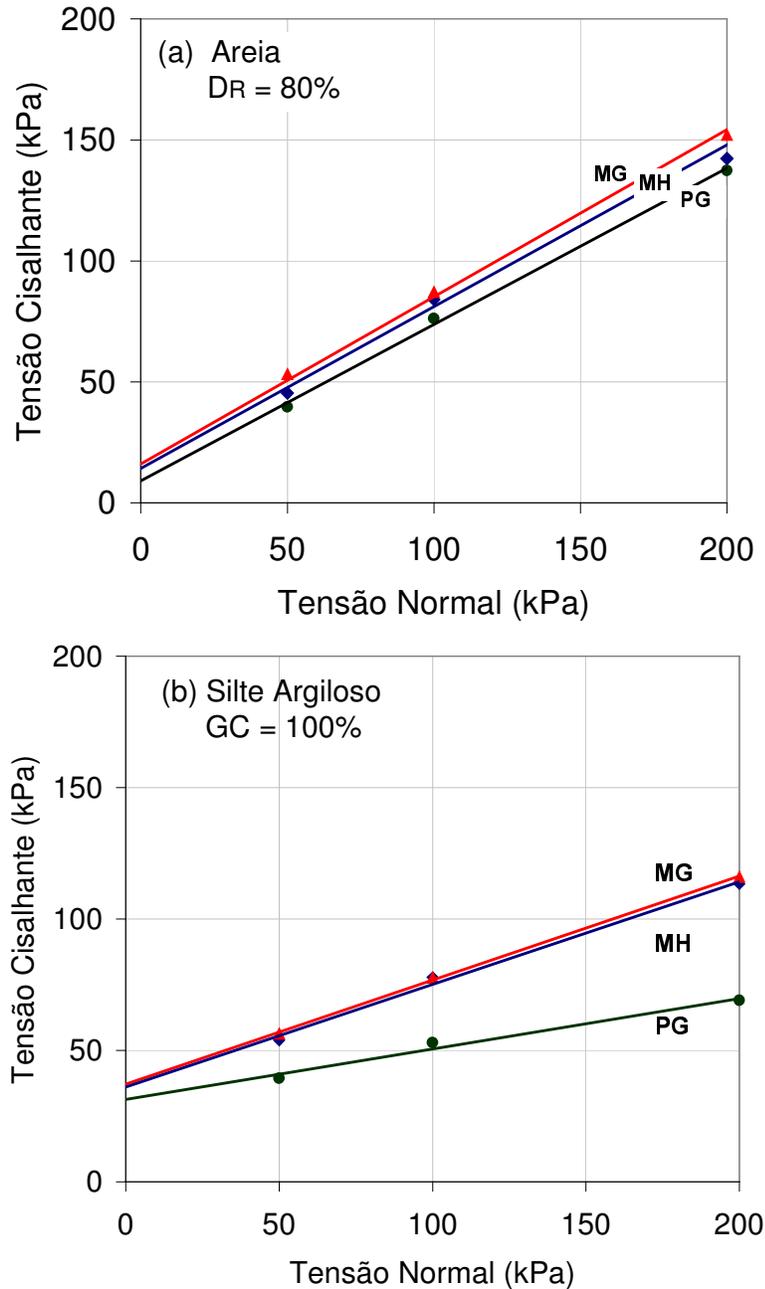


Figura 148 - Envoltórias de Resistência: Ensaio de Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal

As envoltórias de resistência na interface com solo arenoso apresentaram-se aproximadamente paralelas, indicando pouca variação em termos de ângulo de atrito de interface. No entanto, nota-se uma diferença considerável em termos de adesão solo-geogrelha.

Em solo silto-argiloso, as envoltórias de resistência das geogrelhas MacGrid e Metálica mostraram-se praticamente coincidentes, apresentando apenas uma pequena variação em termos de ângulo de atrito solo-geogrelha.

A Tabela 34 mostra os valores dos coeficientes de interação obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto. Pode-se comprovar que a geogrelha MacGrid apresenta os maiores valores de adesão e atrito solo-geogrelha, para ambos os tipos de solo. A geogrelha ParaGrid apresentou um valor bastante reduzido de ângulo de atrito na interface com solo silto-argiloso ($\delta'=11^\circ$). Uma discussão entre os parâmetros de resistência da interface obtidos a partir de ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto será apresentada no item 8.4.

Em solo silto argiloso, os valores de adesão foram superiores aos valores de intercepto coesivo do solo, fornecendo valores de λ maiores do que a unidade. Este resultado não é usual e pode ser afetado por pequenas diferenças nas características dos corpos de prova reforçados e não reforçados.

Tabela 34 - Parâmetros de Interface: Ensaio de Cisalhamento Direto

Interface		c' (kPa)	ϕ (°)	c_a	δ	λ	f	$f_{s/g}$	$f_{s/s}$
Areia $D_R=80\%$	MH	15,0	37	14,2	33,7	0,95	0,88	0,00	0,88
	MG	15,0	37	15,7	34,6	1,04	0,92	0,22	0,70
	PG	15,0	37	10,0	32,7	0,63	0,85	0,43	0,42
Silte Argiloso $GC=100\%$	MH	30,0	21	35,0	20,6	1,16	0,98	0,08	0,90
	MG	30,0	21	36,7	20,8	1,20	0,99	0,29	0,70
	PG	30,0	21	30,0	11,0	1,05	0,50	0,09	0,42

Na Figura 149, a resistência ao cisalhamento normalizada (τ_{SG}/τ_S) está plotada em função dos deslocamentos relativos solo-geogrelha. Observa-se, nos ensaios em areia, um decréscimo da razão τ_{SG}/τ_S à medida que o deslocamento relativo aumenta, ou seja, à medida que o ensaio se aproxima da condição de ruptura. Nos ensaios em silte argiloso, não foi observada uma tendência nítida de

comportamento. A razão τ_{SG}/τ_S representa a parcela da resistência ao cisalhamento do solo (τ_S) que é mobilizada durante o cisalhamento. Ao término dos ensaios, a resistência mobilizada na interface solo-geogrelha (τ_{SG}) é inferior à resistência ao cisalhamento do solo ($\tau_{SG}/\tau_S < 1,0$).

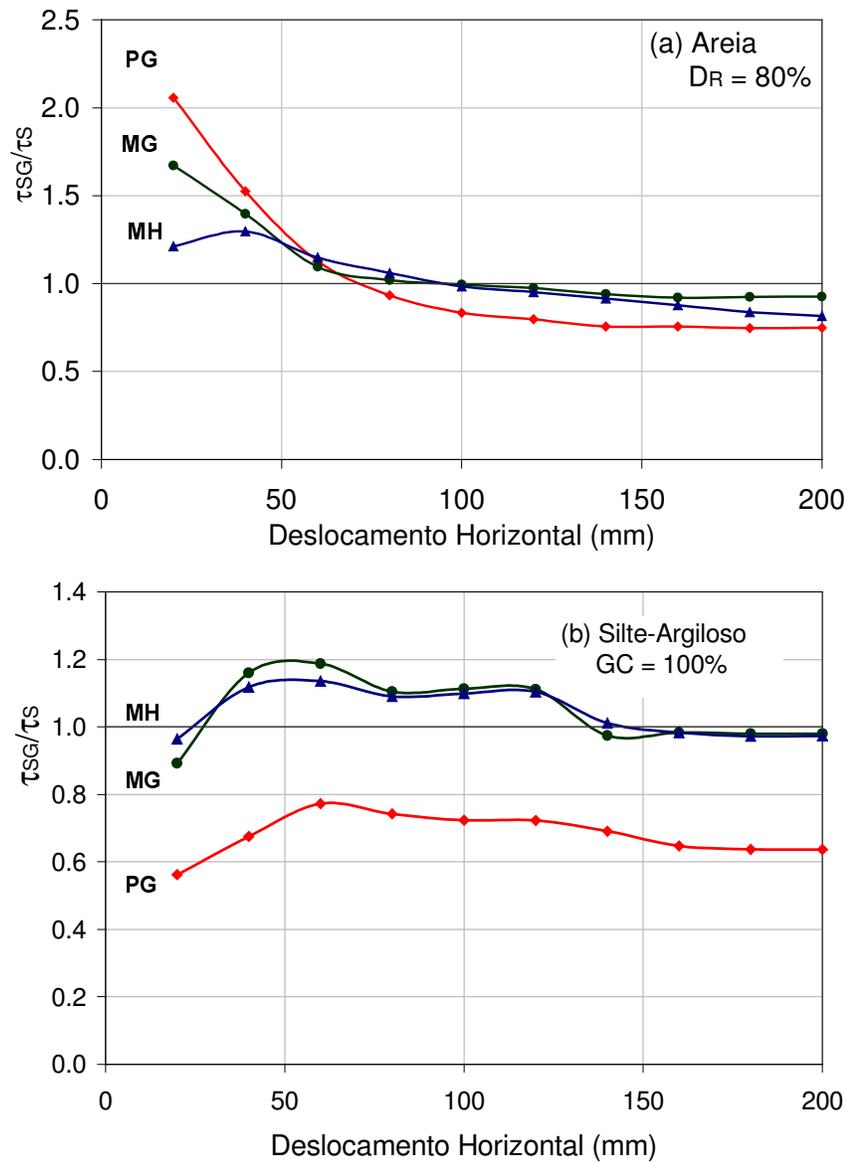


Figura 149 - Variação da Razão τ_{SG}/τ_S com o Deslocamento na Interface

Quando os solos apresentam uma componente coesiva, a razão τ_{SG}/τ_S é conceitualmente mais consistente do que o parâmetro f ($\tan\delta'/\tan\phi'$) para representar a interação solo-geogrelha. Sob baixas tensões confinantes, a parcela

de adesão predomina sobre a parcela de atrito (Gomes et al, 1994). O parâmetro f não considera a interação devido à adesão solo-geogrelha.

Os ensaios executados na presente campanha experimental foram realizados sob condições não saturadas, similares às existentes em maciços de solos tropicais. A presença de água, em condições de não saturação, provoca a existência de uma poropressão negativa; denominada de sucção. Isto confere ao solo um acréscimo de resistência. A envoltória de resistência do solo não saturado situa-se acima da envoltória que corresponderia ao solo saturado. As envoltórias são aproximadamente paralelas e o acréscimo de resistência pode ser considerado como consequência de um aumento no intercepto coesivo (Fredlund, 1993; Sousa Pinto, 2000). A Figura 150 apresenta envoltórias de resistência típicas de solos com diferentes condições de saturação.

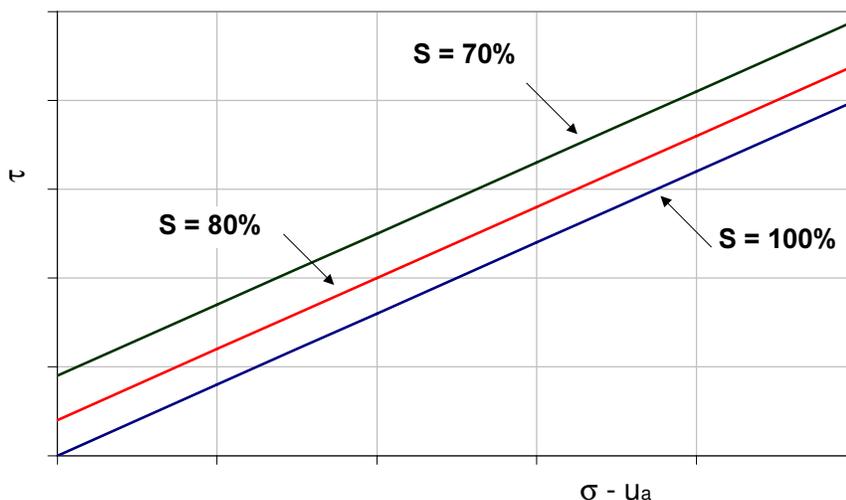


Figura 150 - Efeito da Saturação nas Envoltórias de Resistência

Para considerar uma condição limite no campo, de chuvas intensas e saturação do solo, executou-se uma análise para avaliar o efeito da saturação na razão τ_{SG}/τ_S . Foram atribuídos valores para a variação do intercepto coesivo ($\Delta c'$), decorrente da saturação do solo.

Optou-se por estabelecer uma igualdade entre a variação de intercepto coesivo verificada nos ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova reforçados ($\Delta c'_a$) e a variação verificada em corpos de prova não reforçados ($\Delta c'$), ou seja, $\Delta c'_a = \Delta c'$.

A razão τ_{SG}/τ_S para o solo em condições próximas à saturação pode ser então calculada pela expressão:

$$\frac{\tau_{SG}}{\tau_S} = \frac{(c_a - \Delta c_a) + \sigma \cdot \tan \delta}{(c' - \Delta c') + \sigma \cdot \tan \phi'}$$

(96)

onde: $\Delta c'_a$ é a variação da parcela de adesão decorrente da saturação do solo;

$\Delta c'$ é a variação do intercepto coesivo decorrente da saturação do solo.

τ_{SG}/τ_S representa a parcela da resistência ao cisalhamento do solo que é mobilizada durante o cisalhamento;

c'_a e δ' são os parâmetros de resistência da interface solo-geogrelha;

c' e ϕ' são os parâmetros de resistência do solo não reforçado.

A variação de τ_{SG}/τ_S em função da variação de intercepto coesivo está apresentada na Figura 151. Os valores de τ_{SG} e τ_S correspondem aos valores máximos das curvas τ vs dh , para uma tensão confinante vertical de 100kPa. No solo arenoso (Figura 151a), observa-se uma ligeira redução na razão τ_{SG}/τ_S à medida que se aumenta o valor de Δc_a e $\Delta c'$, ou seja, à medida que o solo se aproxima de uma condição de saturação.

Em solo silto-argiloso, a razão τ_{SG}/τ_S aumenta com a saturação do solo nas interfaces com as geogrelhas MacGrid e Metálica. Esta tendência de acréscimo da razão τ_{SG}/τ_S está relacionada a valores de λ maiores do que a unidade. Na interface com a geogrelha ParaGrid, observa-se um decréscimo significativo da razão τ_{SG}/τ_S à medida que o solo aproxima-se da condição de total saturação.

Os resultados mostram que um acréscimo de intercepto coesivo, decorrente de uma condição não saturada, provoca um acréscimo na razão τ_{SG}/τ_S . Este aumento de intercepto coesivo, provocado pela sucção do solo não saturado, fornece parâmetros de interação τ_{SG}/τ_S maiores do que sob condições saturadas. Espera-se que a resistência mobilizada na interface solo-geogrelha (τ_{SG}) seja inferior à resistência ao cisalhamento do solo (τ_S). O gráfico da Figura 151 mostra que a razão τ_{SG}/τ_S é influenciada pelo valor de sucção do solo. Os valores de τ_{SG}/τ_S maiores do que a unidade podem ser atribuídos à presença de ar nos vazios do solo, ou seja, podem estar relacionados à sucção do solo.

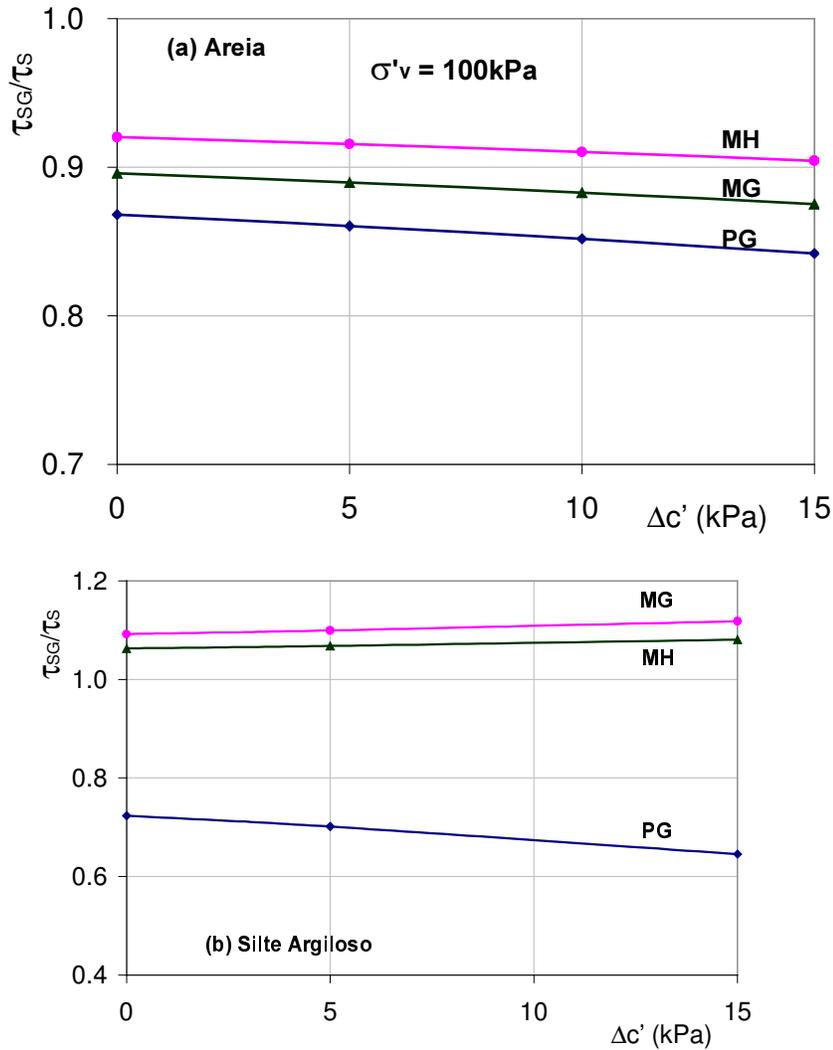


Figura 151 - Efeito da Sucção no Valor da Razão τ_{SG}/τ_S .

8.3. Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado

O programa experimental constou de 9 ensaios com a geogrelha MacGrid imersa em solo arenoso, com diferentes inclinações em relação ao plano de ruptura. Os ensaios de cisalhamento direto foram executados sob condições drenadas e tensões confinantes verticais de 50, 100 e 200kPa. A geogrelha foi posicionada com inclinações de 30, 60 e 90° em relação ao plano de ruptura.

A Tabela 35 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados na campanha experimental. Estes ensaios foram executados para o estudo da variação da resistência ao cisalhamento com a inclinação (θ) do reforço.

Tabela 35 - Ensaio de Cisalhamento Direto com a Geogrelha MacGrid Inclinada

θ (°)	σ_v (kPa)	τ (kPa)	c'_a (kPa)	δ' (°)
30	50	68,1	26,8	36
	100	110,2		
	200	192,8		
60	50	76,6	36,2	39
	100	118,4		
	200	199,0		
90	50	52,8	19,2	35
	100	89,3		
	200	156,7		

8.3.1. Parâmetros de Resistência

A variação dos parâmetros de resistência (c'_a e δ') com a inclinação do reforço está ilustrada na Figura 152. Em ambos os casos, o gráfico apresenta um valor máximo, que corresponde a uma inclinação da geogrelha da ordem de 60° em relação ao plano de cisalhamento. Para esta inclinação, são obtidos os maiores valores dos parâmetros de resistência, e conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento atinge um valor máximo.

Os parâmetros c'_a e δ' não representam a adesão e o atrito solo-geogrelha, uma vez que nos ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado, não ocorre o cisalhamento na interface. Neste caso, os parâmetros c'_a e δ' quantificam o ganho de resistência ocasionado pela introdução de um esforço de tração na massa de solo que está sendo submetida ao cisalhamento. Durante o ensaio, pode ocorrer tanto o deslizamento na interface solo-geogrelha, quanto a tração da geogrelha.

A variação da resistência ao cisalhamento com a inclinação do reforço está apresentada na Figura 153 para os três níveis de tensão vertical. A variação da resistência com a inclinação do reforço pode ser aproximada por uma função do 3º grau, apresentando um pico que corresponde à inclinação ótima da geogrelha. Para esta inclinação, a resistência ao cisalhamento atinge o valor máximo. É importante observar que, no caso de taludes verticais, a teoria de Rankine prevê uma superfície de ruptura plana, inclinada de $45^\circ + \phi'/2$ com a horizontal (plano principal maior). Tendo em vista que o solo ensaiado apresenta um ângulo de atrito de 37°, a inclinação teórica da camada de reforço em relação ao plano de ruptura seria então da ordem de 63° ($45^\circ + \phi'/2$).

Os resultados sugerem, portanto, que em projetos de maciços de solo-reforçado, as camadas de reforço (geogrelha) devem ser posicionadas na direção horizontal. Desta forma, é atingida a resistência ao cisalhamento máxima, pois o ângulo entre a geogrelha e a superfície potencial de ruptura seria de aproximadamente 60° .

Palmeira (1999) apresenta uma série de ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado. Segundo o autor, as diferenças de ganhos de resistência com a orientação do reforço podem ser explicadas pelo fato de que a orientação de 60° com a horizontal coincide aproximadamente com a direção de incrementos de deformações de tração na amostra sem reforço. Esta é, portanto, a orientação mais favorável para a instalação do elemento de reforço. Conclusão semelhante foi apresentada por Jewell e Wroth (1987).

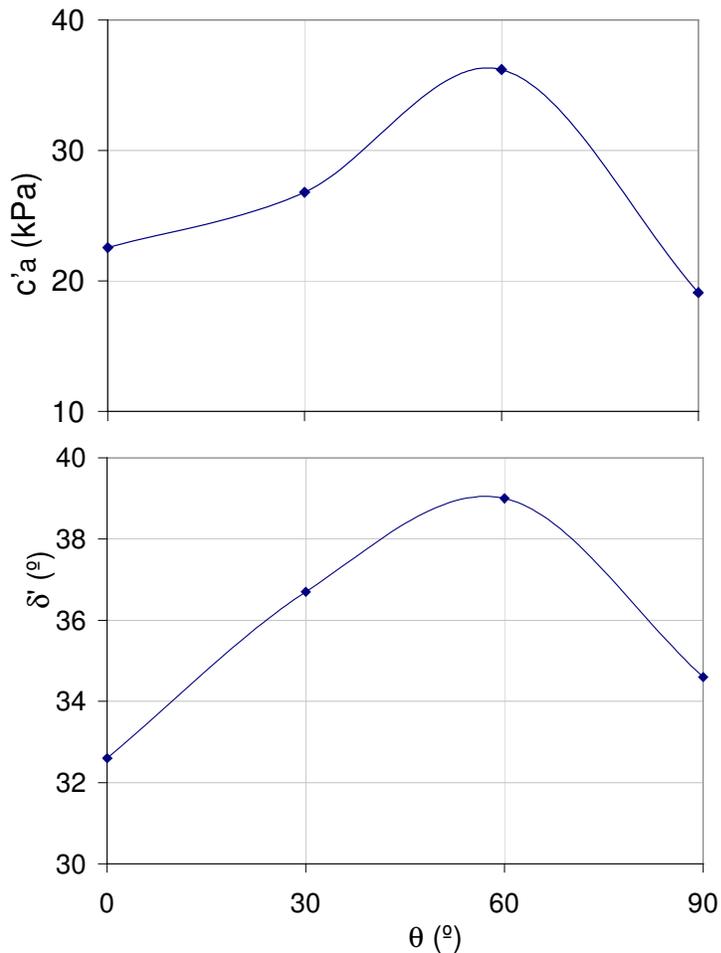


Figura 152 - Variação dos Parâmetros de Resistência com a Inclinação da Geogrelha

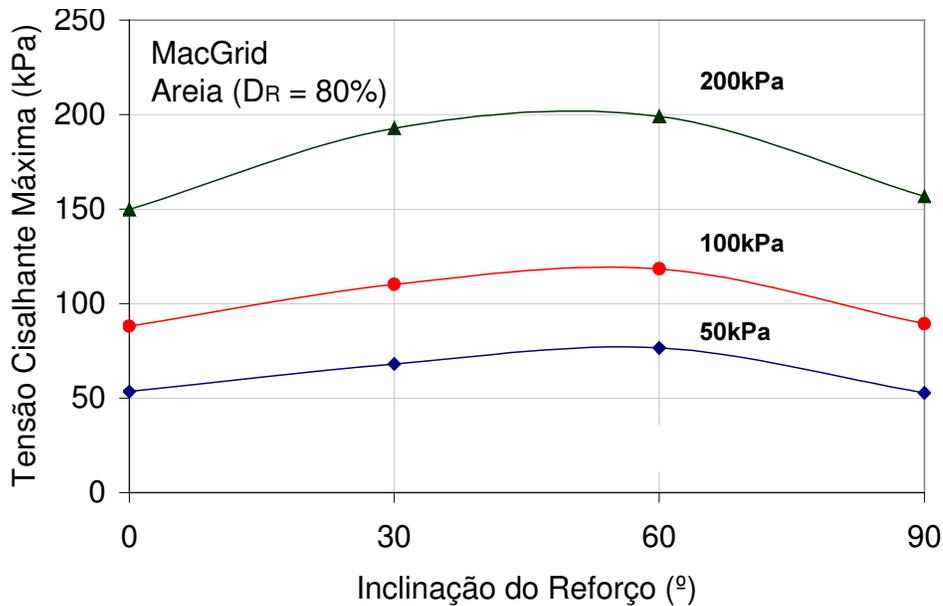


Figura 153 - Resistência ao Cisalhamento com a Inclinação da Geogrelha

Na Figura 154, estão apresentadas as envoltórias de resistência obtidas nos ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado e a envoltória de resistência do solo sem reforço. As envoltórias com a geogrelha inclinada de 30° e 60° são aproximadamente paralelas à envoltória do solo não reforçado, demonstrando variação não significativa em termos de ângulo de atrito. A introdução do reforço ocasiona um aumento no valor do intercepto coesivo (efeito similar ao de uma coesão aparente). Long (1990) chegou a conclusão semelhante, a partir de ensaios em amostras reforçadas com camadas horizontais de pneus. Em projetos de maciços reforçados, considera-se que o conjunto solo-geogrelha apresenta uma coesão adicional igual à coesão aparente indicada nos resultados. É interessante ressaltar que, nos ensaios com a geogrelha vertical ($\theta=90^\circ$), a envoltória foi praticamente coincidente com a envoltória da areia não reforçada.

A partir das envoltórias de resistência, foram traçados os círculos de Mohr representativos da condição de ruptura de cada ensaio. Com o círculo de Mohr, pode-se obter as tensões atuantes na geogrelha, ou seja, as tensões atuantes em um plano que forma um ângulo θ com o plano de ruptura.

A Figura 155 ilustra o método gráfico de obtenção das tensões (σ_θ e τ_θ) atuantes no plano θ . Com as tensões atuantes no plano de ruptura (σ_R e τ_R) e a envoltória de resistência, pode-se traçar o círculo de Mohr e obter as tensões principais (σ_1 e σ_3). Traçando-se uma reta paralela ao plano de ruptura, obtém-se

o pólo do círculo de Mohr. A partir do pólo, pode-se traçar uma reta com a inclinação θ , interceptando o círculo de Mohr no ponto que indica as tensões no plano da geogrelha (σ_θ e τ_θ).

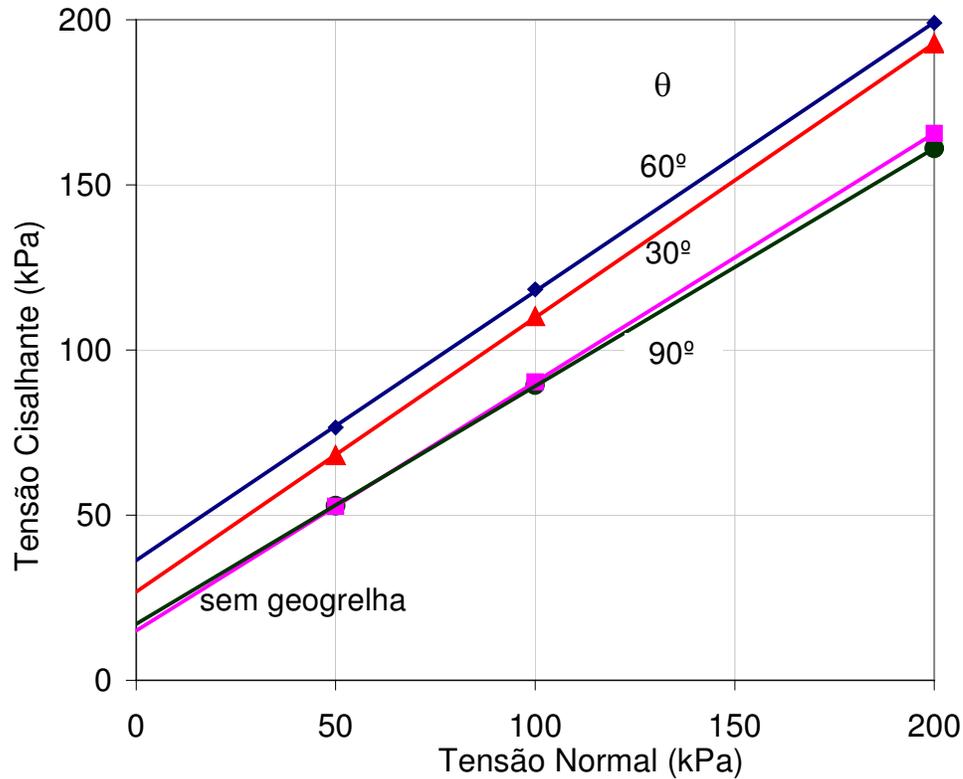


Figura 154 - Envoltórias de Resistência: Ensaios de Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado

A Figura 156 apresenta a tensão atuante na geogrelha em função da inclinação θ , para os três níveis de tensão vertical. Observa-se que σ_θ é máximo para $\theta=60^\circ$. Nota-se, também, que as tensões normais (σ_θ) atuantes na geogrelha inclinada de 30° são aproximadamente iguais às tensões normais atuantes quando a geogrelha encontra-se na posição vertical ($\theta=90^\circ$).

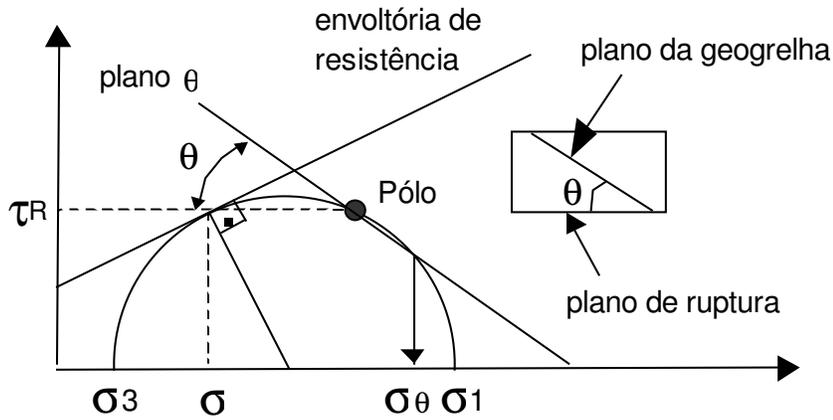


Figura 155 – Procedimento Gráfico para Obtenção de σ_θ

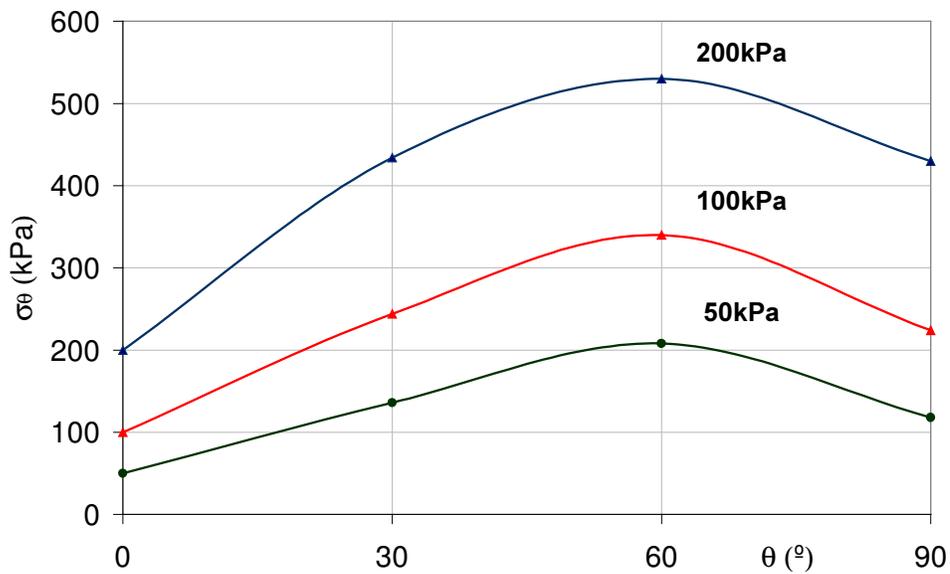


Figura 156 - Tensão Atuante no Plano da Geogrelha

8.3.2. Distorção da Geogrelha Durante o Cisalhamento

Ao final de cada um dos ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado, procedia-se à desmontagem cuidadosa da amostra e à medição do posicionamento final de diferentes pontos da geogrelha na caixa de ensaio. O posicionamento final da geogrelha indica a região onde ocorre o cisalhamento, ou seja, onde ocorre a distorção da mesma.

A Figura 157 apresenta esquematicamente a configuração da geogrelha antes e depois do ensaio. Os pontos A, B e C representam o posicionamento da

geogrelha na caixa de cisalhamento, no início do ensaio. Os pontos A', B' e C' representam a configuração deformada da geogrelha ao final do cisalhamento.

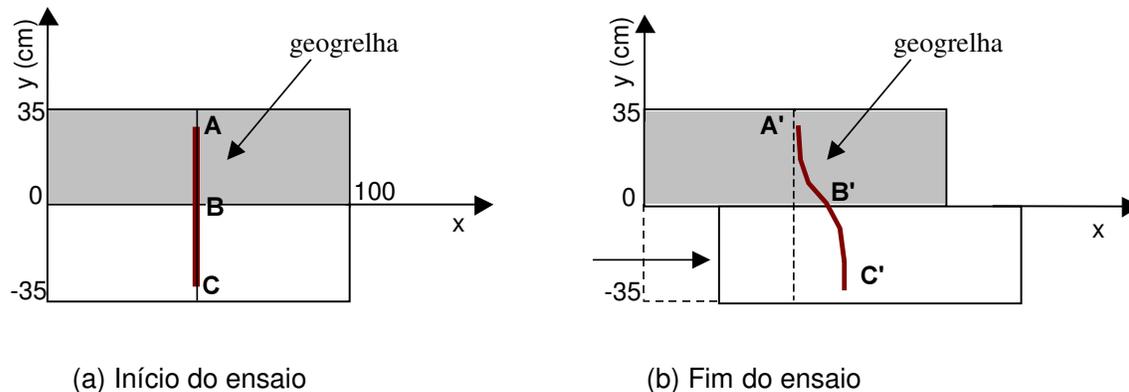


Figura 157 - Configuração Deformada da Geogrelha na Caixa de Cisalhamento

As Figuras 158 a 160 ilustram as posições iniciais e finais da geogrelha para ensaios com diferentes níveis de tensão vertical e diferentes inclinações (θ) do reforço em relação à horizontal. Nestes gráficos, está ilustrada apenas a metade superior da caixa de ensaio, ou seja, a metade que se encontra sombreada na Figura 157. Considera-se que, na metade inferior da caixa, os deslocamentos sejam anti-simétricos em relação aos deslocamentos medidos na caixa superior. Ressalta-se que o valor de d_h indicado nas figuras corresponde ao deslocamento total da caixa ao final do cisalhamento.

Nestas figuras, pode-se observar que a região central, onde ocorre o cisalhamento, corresponde a aproximadamente 40% da altura da caixa. Nas regiões externas, correspondentes aos 60% restantes, praticamente não ocorre distorção do solo e da geogrelha. Observa-se apenas a translação deste trecho da malha devido ao deslocamento da caixa. Esta conclusão indica que uma redução da altura da caixa não influenciaria os resultados, tendo em vista que a zona sujeita a cisalhamento restringe-se à região interna do corpo de prova.

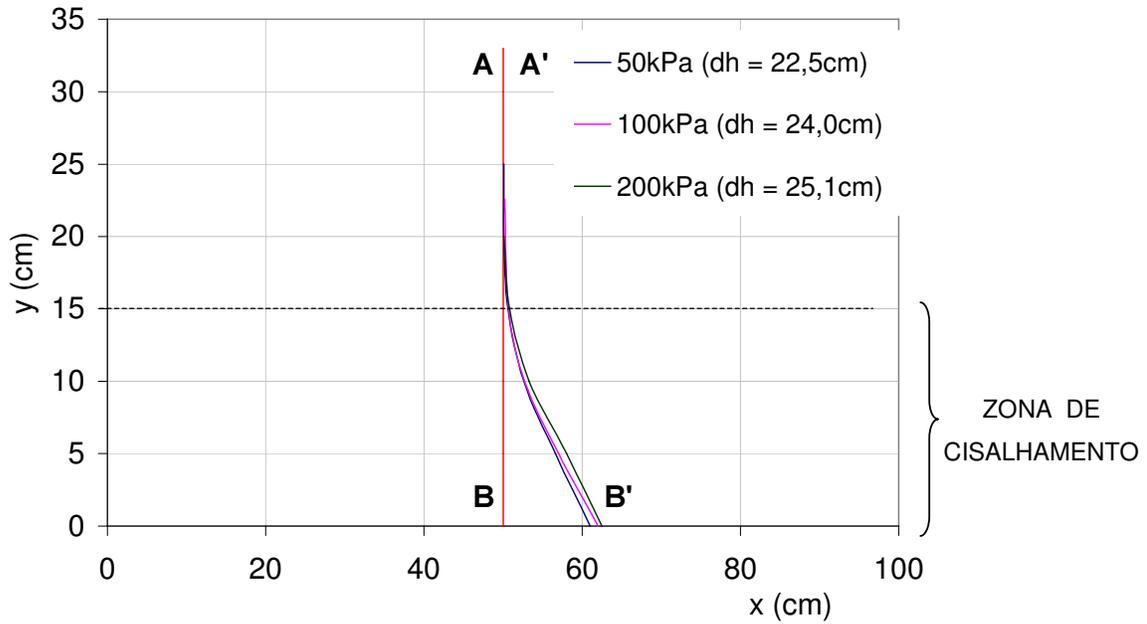


Figura 158 - Posicionamento Final da Geogrelha ($\theta = 90^\circ$)

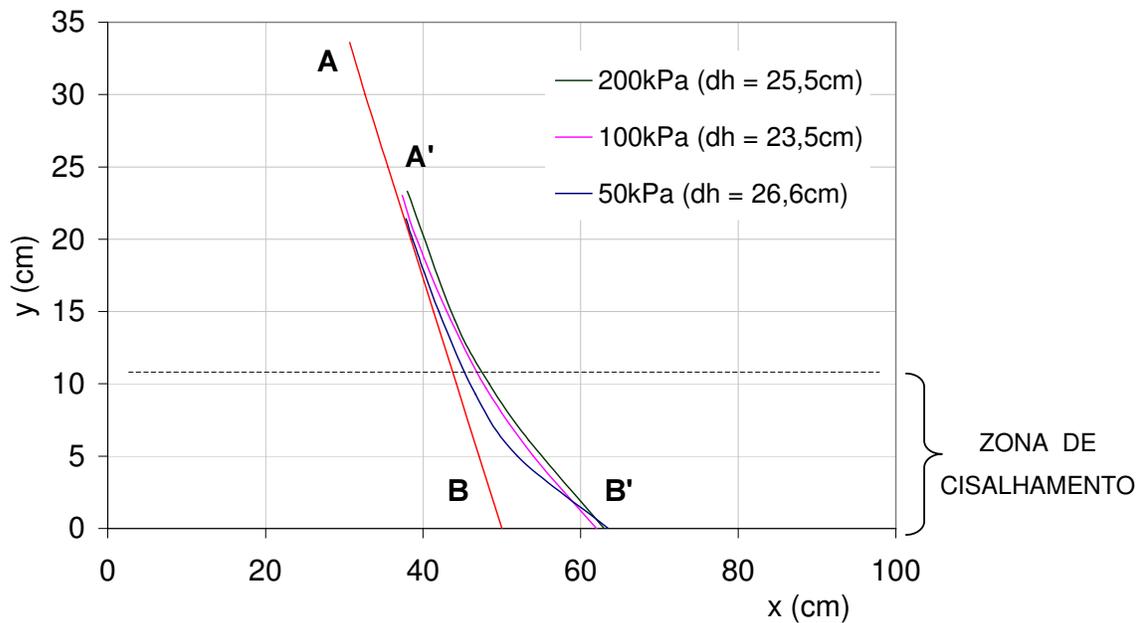


Figura 159 - Posicionamento Final da Geogrelha ($\theta = 60^\circ$)

Nota-se que, quanto maior a tensão normal, maior o deslocamento da geogrelha na zona de cisalhamento, apesar dos valores de deslocamento não serem muito diferentes. De fato, um aumento da tensão normal corresponde a um aumento da tensão cisalhante, e portanto, a maiores distorções da geogrelha. Sendo assim, o esforço de tração atuante na geogrelha é maior para maiores níveis de tensão normal.

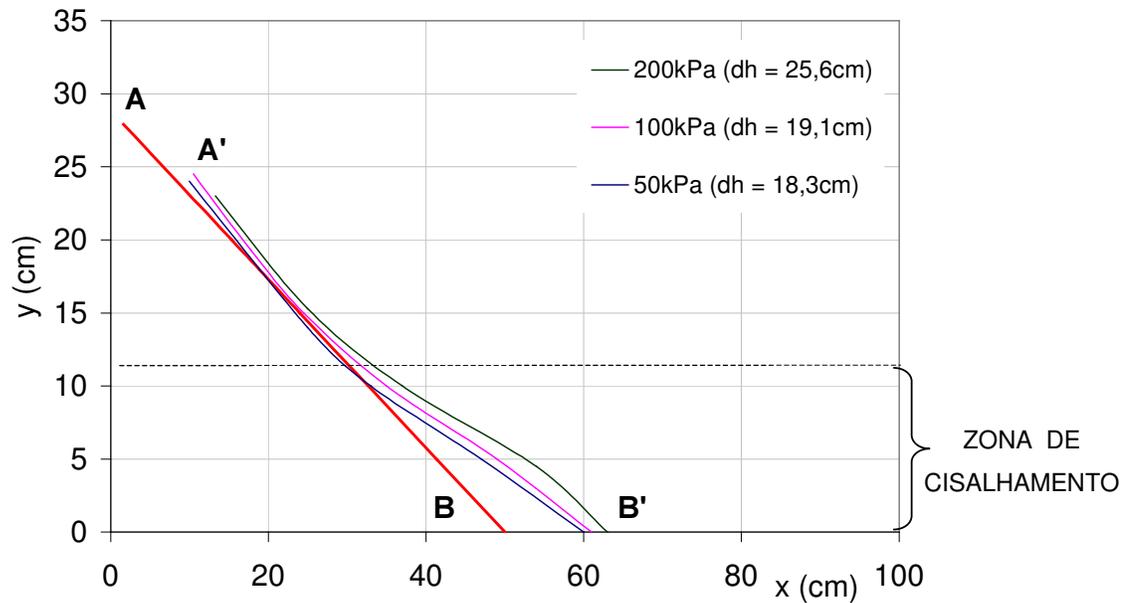


Figura 160 - Posicionamento Final da Geogrelha ($\theta = 30^\circ$)

8.4

Discussão: Arrancamento x Cisalhamento Direto

Os coeficientes de atrito f obtidos nos ensaios de arrancamento e nos ensaios de cisalhamento direto estão apresentados na Tabela 36.

Observa-se que os valores de f obtidos para a Malha Metálica nos ensaios de cisalhamento direto foram próximos aos obtidos nos ensaios de arrancamento. Para a geogrelha ParaGrid, os parâmetros obtidos a partir dos diferentes ensaios apresentaram diferenças significativas.

Tabela 36 - Parâmetro de Interação f : Cisalhamento Direto x Arrancamento

Interface		Cisalhamento Direto			Arrancamento		
		f	$f_{s/g}$	$f_{s/s}$	f	$f_{s/g}$	f_p
Areia $D_R=80\%$	MH	0,88	0,00	0,88	0,80	0,06	0,74
	MG	0,92	0,22	0,70	1,10	0,23	0,87
	PG	0,85	0,43	0,42	0,36	0,26	0,10
Silte Argiloso $GC=100\%$	MH	0,98	0,08	0,90	0,95	0,07	0,88
	MG	0,99	0,29	0,70	1,10	0,24	0,86
	PG	0,50	0,08	0,42	0,32	0,28	0,04

Para a geogrelha MacGrid, observa-se maiores valores de f nos ensaios de arrancamento executados com ambos os tipos de solo. No capítulo 7, verificou-se que esta geogrelha apresenta uma grande contribuição da resistência passiva dos elementos transversais, o que justifica os maiores valores do coeficiente f nos ensaios de arrancamento.

A geogrelha ParaGrid apresentou valores de f superiores nos ensaios de cisalhamento direto. Ressalta-se que esta geogrelha apresentou baixa interação com ambos os tipos de solo durante os ensaios de arrancamento. Além disso, a ocorrência de ruptura da solda dos elementos transversais reduziu a contribuição do empuxo passivo.

Embora sejam apresentadas as diferentes parcelas do coeficiente f , é importante salientar que, no caso dos ensaios de arrancamento, os diferentes fenômenos (atrito superficial e mobilização da resistência passiva dos elementos transversais) não ocorrem simultaneamente. Para pequenos deslocamentos relativos solo-geogrelha, ocorre a mobilização do atrito ao longo das superfícies inferior e superior da grelha. Posteriormente, para maiores deslocamentos relativos na interface, ocorre a mobilização da resistência passiva dos elementos transversais. Desta forma, é razoável esperar que a parcela de f correspondente à contribuição do empuxo passivo (f_p) seja superior à apresentada na Tabela 36.

Como comentado no Capítulo 3, os ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto fornecem valores diferentes para o coeficiente f . Cabe aqui uma discussão sobre as razões que podem justificar essa divergência de resultados.

Nos ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento, são impostos diferentes tipos de movimento relativo entre o solo e o elemento de reforço. A adequação de cada um dos ensaios para a definição das características da interface baseia-se no movimento relativo mais provável de ocorrer na interface solo-geogrelha.

Nos ensaios de cisalhamento direto, a geogrelha não se desloca em relação ao solo envolvente. Existe um movimento relativo entre a porção superior de solo e a geogrelha. Durante estes ensaios, o cisalhamento deve ocorrer exatamente na interface solo-geogrelha. Se a geogrelha for mal posicionada durante a montagem do ensaio, o cisalhamento pode ocorrer fora da interface solo-geogrelha e os parâmetros obtidos serão análogos aos parâmetros de resistência do solo utilizado. Esta é a principal dificuldade associada aos ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal executado com geogrelhas. No caso de geotêxteis, a inexistência de elementos vazados, permite que o geotêxtil

seja colado à superfície de um bloco rígido, e o solo seja colocado em apenas uma metade caixa de cisalhamento. Neste caso, pode-se garantir que o cisalhamento ocorra na interface solo-geotêxtil.

Nos ensaios de arrancamento, a geogrelha se desloca em relação ao solo envolvente. De acordo com Collios et al (1980), no caso de maciços reforçados, predomina o deslocamento de arrancamento das inclusões. Neste caso, a opção pelos ensaios de arrancamento seria a mais adequada para caracterizar as interfaces.

No caso de geogrelhas, os mecanismos de interação mobilizados durante o arrancamento são significativamente diferentes dos mobilizados durante o cisalhamento direto. No arrancamento, ocorre a mobilização do empuxo passivo dos elementos transversais da geogrelha e o atrito ao longo da superfície sólida da geogrelha. Através de ensaios de cisalhamento direto, não é possível considerar a contribuição da resistência passiva nos elementos transversais das grelhas.

Nos ensaios de cisalhamento direto, o mecanismo de interação das geogrelhas com o solo pode ser significativamente alterado, por causa da supressão ou, pelo menos, da restrição das deformações dos reforços. Nos ensaios de arrancamento, a geogrelha se deforma durante a solicitação de tração. Desta forma, existe uma variação da área disponível para atrito superficial no decorrer do ensaio.

Nos ensaios de arrancamento, o esforço de tração é máximo em uma das extremidades da geogrelha, diminuindo ao longo do comprimento. Desta forma, a distribuição de esforços cisalhantes não é uniforme e a resistência máxima não é atingida simultaneamente ao longo do comprimento da geogrelha.

Finalmente, os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento apresentam trajetórias de tensão, condições de contorno e mecanismos de ruptura bem distintos. Todas essas variáveis, envolvidas em ambos os tipos de ensaio, tornam difícil a comparação direta entre os resultados. No entanto, no caso de geogrelhas, os parâmetros obtidos em ensaios de arrancamento são mais representativos da situação que ocorre em maciços reforçados no campo.

Quanto ao coeficiente de aderência λ , os ensaios de arrancamento forneceram valores inferiores aos ensaios de cisalhamento. Ingold (1983) investigou os parâmetros de resistência de geogrelhas segundo 3 tipos de ensaios: arrancamento, cisalhamento direto e cisalhamento direto com reforço inclinado. Seus resultados indicaram que λ é altamente dependente do método de

ensaio, sendo que o ensaio de arrancamento também forneceu os menores valores.

No Capítulo 7, optou-se por definir um parâmetro de resistência F^* , que equívale à razão entre a resistência na interface (τ_{SG}) e a tensão confinante vertical (σ'_v). O mesmo parâmetro de resistência foi utilizado na análise dos ensaios de cisalhamento direto. No entanto, sugere-se adotar um símbolo distinto para diferenciar o parâmetro obtido a partir de ensaios de cisalhamento direto (F^*_{CD}). A Figura 163 apresenta a variação do parâmetro de resistência F^*_{CD} com o nível de confinamento. Observa-se que o parâmetro F^*_{CD} diminui com o nível de confinamento, da mesma forma que o parâmetro F^* (obtido dos ensaios de arrancamento). Para baixos níveis de confinamento, a parcela de adesão predomina sobre a parcela de atrito.

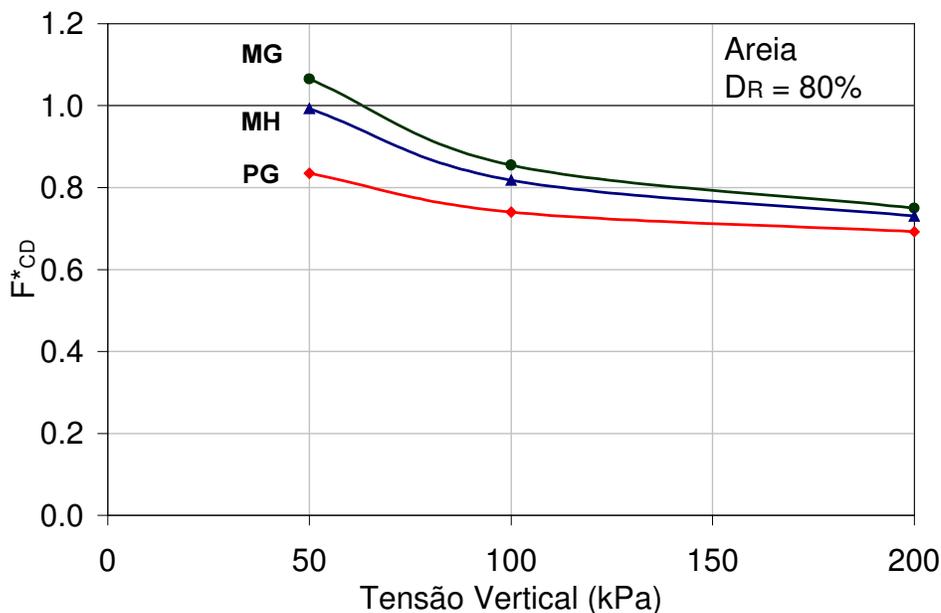


Figura 161 - Variação do Parâmetro de Resistência F^*_{CD} com a Tensão Vertical

Cabe ressaltar que os parâmetros F^* e F^*_{CD} representam diferentes mecanismos de interação possíveis de ocorrer na interface e foram obtidos para níveis de confinamento distintos. Nos ensaios de arrancamento, a tensão vertical variou de 5 a 50kPa. Nos ensaios de cisalhamento direto, o nível de confinamento variou de 50 a 200kPa.

Nos ensaios de arrancamento, observou-se que, as geogrelhas MacGrid e Metálica suportam tensões confinantes máximas de 35 e 25kPa, respectivamente. Níveis superiores de confinamento conduzem à ruptura da malha por tração.

8.5

Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto. O programa experimental constou de ensaios de cisalhamento direto com diferentes inclinações da geogrelha em relação à superfície horizontal de ruptura.

Nos ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal não é possível considerar a contribuição da resistência passiva dos elementos transversais. Desta forma, os parâmetros de interação obtidos referem-se à adesão e ao atrito superficial.

A partir dos ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado, analisou-se a variação da resistência ao cisalhamento com a inclinação da geogrelha. Os resultados mostraram que o ganho de resistência é mais acentuado quando a geogrelha está posicionada com uma inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura.

Os resultados sugerem que, em projetos de estruturas de solo-reforçado, a geogrelha deve ser posicionada na direção horizontal. Desta forma, é atingida a resistência ao cisalhamento máxima, pois o ângulo entre a geogrelha e a superfície de ruptura fica no entorno de 60°.

Uma análise da configuração deformada da geogrelha é apresentada, com base nas medições dos deslocamentos de pontos distintos da grelha ao término dos ensaios.

Finalmente, apresenta-se uma comparação entre os parâmetros de resistência obtidos a partir de ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto, apontando-se as principais razões para as divergências de resultados.