

6

Metodologia e Programa de Ensaios

6.1.

Introdução

Para o estudo da interação solo-reforço utiliza-se, em geral, os ensaios de cisalhamento direto e os ensaios de arrancamento. A escolha por um ou outro tipo de ensaio depende do tipo de geossintético e do tipo de movimento relativo entre o geossintético e o solo.

Um programa detalhado de ensaios de laboratório foi executado com o objetivo de contribuir para a compreensão dos mecanismos de interação entre o solo e o reforço. O programa objetivou simular os diferentes mecanismos de interação desenvolvidos na interface solo-geogrelha, através de ensaios de arrancamento e de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões.

O programa de ensaios de arrancamento objetivou avaliar a influência de fatores como: tipo de geogrelha, tipo de solo, tensão confinante e densidade relativa no mecanismo de interação solo-geogrelha.

Os ensaios de cisalhamento direto foram executados para diferentes inclinações da geogrelha com o plano de ruptura. Desta forma, pode-se obter os parâmetros de interface e a variação da resistência ao cisalhamento com a inclinação do reforço.

O programa experimental constou, ainda, de ensaios triaxiais e de ensaios em amostras danificadas. Os ensaios triaxiais foram executados em amostras de solo reforçado com camadas de geogrelha, com o objetivo de avaliar o ganho de rigidez e resistência devido à introdução de camadas de reforço.

Os ensaios em amostras danificadas foram realizados com a finalidade de avaliar a influência do dano mecânico nas propriedades mecânicas das geogrelhas e no mecanismo de interação com o solo. O programa experimental constou de ensaios de tração simples, arrancamento e cisalhamento direto em amostras previamente danificadas.

Dois tipos diferentes de dano foram induzidos nos 3 tipos de geogrelhas utilizados no presente trabalho: o dano natural, obtido a partir de procedimentos

de instalação e compactação e o dano artificial, obtido a partir da ruptura física e artificialmente imposta de elementos da malha.

6.2. Ensaaios de Cisalhamento Direto

6.2.1. Descrição do Equipamento

O equipamento utilizado, denominado CIS₁₀₀, é capaz de ensaiar corpos de prova aproximadamente cúbicos de 1m de aresta. Este equipamento foi originalmente concebido para o estudo da resistência ao cisalhamento de materiais granulares grossos. No entanto, devido às grandes dimensões, o equipamento possibilita, também, a execução de ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto em corpos de prova contendo materiais geossintéticos. A Figura 52 apresenta o equipamento de cisalhamento direto utilizado no programa experimental.

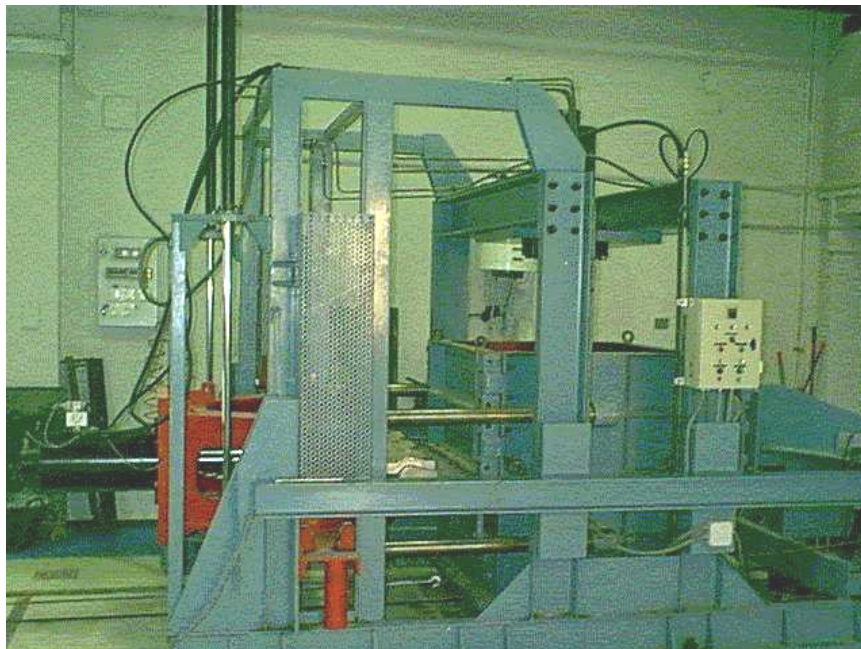


Figura 52 - Equipamento de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões

A decisão de executar ensaios de cisalhamento direto em um equipamento de grandes dimensões justifica-se devido às grandes aberturas das geogrelhas

selecionadas. O tamanho mínimo recomendado para a caixa de cisalhamento depende da abertura da malha da geogrelha. Segundo a ASTM D5321, a dimensão mínima da caixa deve ser 5 vezes maior que a abertura máxima da geogrelha ensaiada.

A caixa de cisalhamento é rígida, de alumínio, e constituída por duas metades, com seção quadrada, com dimensões internas de 1,0m de lado e altura de 0,60m. O equipamento é composto por dois sistemas de aplicação de carga: um macaco hidráulico vertical (Figura 53a) e um macaco hidráulico horizontal (Figura 53b). Cada sistema é constituído de um macaco hidráulico, um servo-controle, uma célula de carga e um transdutor de deslocamento.



(a) Vertical



(b) Horizontal

Figura 53 - Sistemas de Aplicação de Carga

O macaco hidráulico vertical possui uma capacidade de carga de até 1,0MPa. O servo-controle vertical assegura a constância da tensão vertical durante o ensaio. O sinal da carga aplicada sobre a amostra é continuamente comparado ao sinal de referência, que corresponde à tensão normal desejada. Mediante qualquer diferença entre ambos os sinais, o servo-controle aciona o macaco hidráulico vertical para corrigir a carga aplicada. Desta forma, há uma compensação das variações de tensão normal, produzidas por eventuais variações da área de contato entre as metades inferior e superior da caixa de cisalhamento.

O sistema de aplicação da tensão horizontal possui um funcionamento similar ao descrito anteriormente. O servo-controle horizontal garante uma velocidade de cisalhamento constante durante o ensaio. Ou seja, o cisalhamento ocorre a partir de um determinado deslocamento horizontal em um tempo pré-fixado. O deslocamento máximo do pistão do macaco hidráulico horizontal é de

300mm. Este deslocamento foi suficiente para produzir a ruptura por cisalhamento de todas as amostras ensaiadas no presente programa experimental.

O princípio de funcionamento do equipamento é o mesmo dos ensaios de cisalhamento direto convencionais. Durante os ensaios de cisalhamento, a metade superior da caixa permanece imóvel, enquanto a metade inferior se move impulsionada pelo macaco hidráulico horizontal.

A Figura 54 mostra a caixa de cisalhamento. Observa-se que a parte superior da caixa apoia-se na parte inferior através de 4 rolamentos que permitem o deslocamento de uma metade em relação à outra. A parte inferior desliza sobre trilhos fixos no chão. Desta forma, durante a montagem dos corpos de prova, a caixa pode ser retirada do equipamento, facilitando a preparação do ensaio.

O equipamento dispõe ainda, de um sistema de aquisição de dados automatizado. O programa de aquisição de dados é denominado *Picolog Data Logger* e recolhe um grupo de medições provenientes de canais de um conversor analógico digital (*ADC: Analog to Digital Convert*). O programa é provido de ferramentas capazes de converter os valores ADC em unidades de engenharia.

6.2.2. Ensaio Executados

O programa de ensaios de cisalhamento direto constou de amostras de solo com reforço inclinado e com reforço horizontal. Os ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado têm o objetivo de obter a variação da resistência ao cisalhamento com a inclinação do reforço. Estes ensaios simulam a situação em que a superfície de ruptura intercepta o reforço, como ilustrado na Figura 55.

Os ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal têm a finalidade de obter os parâmetros de resistência da interface solo-geogrelha. Estes parâmetros podem ser comparados aos obtidos a partir dos ensaios de arrancamento. Como citado no capítulo 3, os parâmetros obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto e de ensaios de arrancamento podem variar significativamente, fornecendo resultados até conflitantes, em alguns casos. A Tabela 26 apresenta o programa completo de ensaios de cisalhamento direto.

Na Tabela 26, pode-se observar que os ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal ($\theta=0^\circ$) foram executados com os 3 tipos distintos de geogrelha, embutidas em areia (densidade relativa $D_R = 80\%$) ou em silte argiloso (grau de compactação $GC = 100\%$). Os ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado foram executados apenas com a geogrelha MacGrid (MG) embutida em

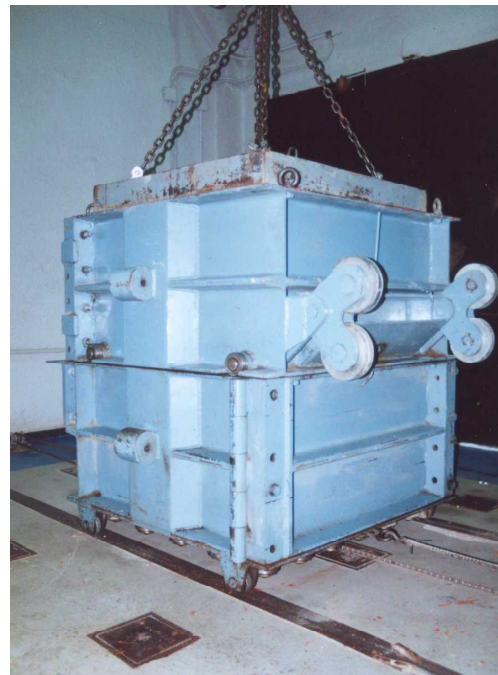
solo arenoso denso. O procedimento adotado para o cálculo da densidade relativa da areia e do grau de compactação do solo silto-argiloso será apresentado no item 6.2.3.



(a) caixa superior



(b) caixa inferior



(c) caixa de cisalhamento

Figura 54 - Detalhes da Caixa de Cisalhamento

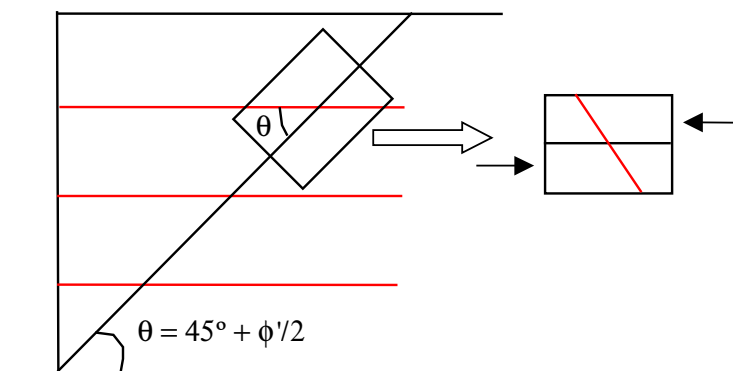


Figura 55 - Mecanismo de Interação Reproduzido nos Ensaio de Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado

Tabela 26 - Programa de Ensaios de Cisalhamento Direto

	Geogrelha	σ_N (kPa)	θ (°)
AREIA $D_R = 80\%$	MH	50	0
		100	
		200	
	PG	50	0
		100	
		200	
	MG	50	0
		100	
		200	
		50	30
		100	
		200	
		50	60
		100	
		200	
		50	90
		100	
		200	
SILTE ARGILOSO $GC = 100\%$	MH	50	0
		100	
		200	
	PG	50	0
		100	
		200	
	MG	50	0
		100	
		200	

D_R = densidade relativa GC = grau de compactação

θ = inclinação do reforço com o plano horizontal

6.2.3.

Procedimento de Ensaio

Devido às diferenças na montagem das amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento com reforço horizontal e nos ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado, faz-se necessária uma descrição detalhada dos 2 diferentes procedimentos de ensaio.

Inicialmente, serão apresentados os procedimentos comuns a ambos os ensaios. Posteriormente, serão descritos os detalhes pertinentes à montagem de cada um dos ensaios separadamente.

Antes de iniciar a montagem do corpo de prova, procedeu-se à calibração do macaco hidráulico horizontal. As curvas obtidas durante 3 calibrações estão apresentadas na Figura 56.

A velocidade de ensaio foi selecionada levando-se em consideração as características de adensamento do solo e o deslocamento total da caixa de grandes dimensões. Nos ensaios com solo arenoso, a velocidade adotada em todos os ensaios de cisalhamento direto foi de 2,0mm/min. No caso do solo silto-argiloso, a velocidade adotada foi de 1,0mm/min.

Após a calibração do macaco hidráulico horizontal e a seleção da velocidade de ensaio, iniciava-se a preparação do corpo de prova, com o valor de densidade relativa e grau de compactação estipulado.

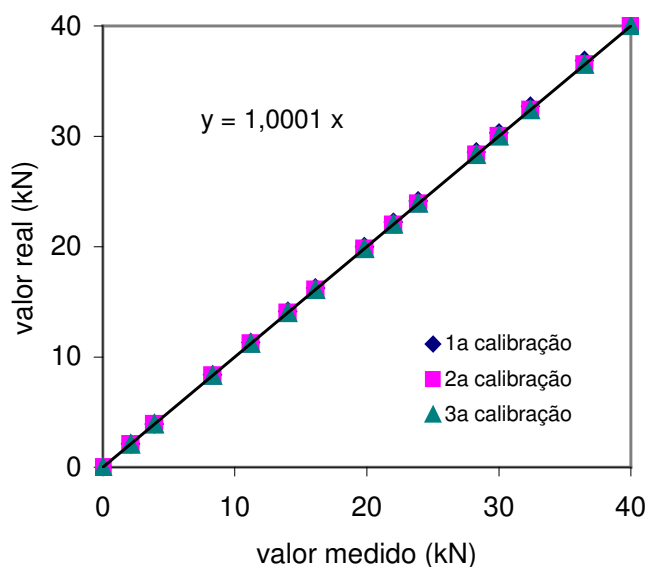


Figura 56 - Curva de Calibração do Macaco Hidráulico Horizontal

Nos ensaios de cisalhamento direto, a caixa não precisava ser totalmente preenchida (1,20m de altura). O corpo de prova atingia uma altura final de 0,70m, através da adaptação de um suporte metálico com altura de 0,25m na caixa inferior. Em relação à caixa superior, essa redução de altura foi realizada através da própria tampa da caixa. A Figura 57 ilustra esquematicamente a configuração final do corpo de prova. Com este procedimento, conseguiu-se diminuir o volume de solo e consequentemente, reduzir o tempo de preparação do ensaio.

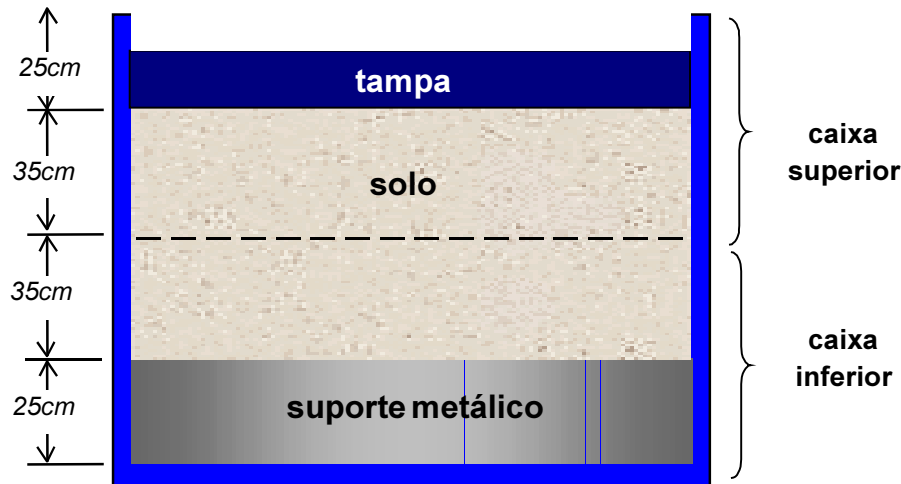


Figura 57 - Corte Esquemático da Caixa de Cisalhamento

Ensaio de Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado

Os ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado foram executados com a geogrelha MacGrid imersa em solo arenoso. Os ensaios foram executados para um valor de densidade relativa de 80%.

O cálculo da densidade relativa da areia foi realizado segundo a expressão (extraída de Lambe & Whitman, 1979):

$$D_R = \frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \times 100\% \quad (68)$$

onde: $\gamma_{d \max}$ e $\gamma_{d \min}$ são os pesos específicos secos máximo e mínimo da areia e γ_d é o peso específico dos corpos de prova de areia para a densidade relativa especificada.

Os valores de pesos específicos secos e índice de vazios máximos e mínimos para a areia utilizada no programa experimental foram apresentados na Tabela 23.

Uma vez conhecido o valor do peso específico seco correspondente à $D_R=80\%$, iniciava-se a preparação do corpo de prova.

A areia, utilizada no ensaio para encher a caixa, foi compactada na umidade de $10 \pm 0,2\%$, em 4 camadas sucessivas de 17,5cm de altura, após a compactação. Para ajustar a densidade relativa, pesava-se a quantidade de solo

necessária para se preencher uma camada e, por meio do macaco hidráulico vertical, compactava-se estaticamente a areia até se atingir a altura requerida.

Ressalta-se que nos ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado, a caixa era totalmente preenchida para depois proceder ao corte da amostra na inclinação desejada.

Finalizado o preenchimento total da caixa, uma das laterais da caixa de cisalhamento era cuidadosamente aberta e iniciava-se o corte do corpo de prova. O solo retirado era separado, para ser posteriormente colocado de volta à caixa. Com isso, garantia-se a densidade desejada.

Uma vez cortado o corpo de prova, posicionava-se a geogrelha e preenchia-se o restante da caixa. A Figura 58 apresenta uma vista superior do corpo de prova cortado a uma inclinação de 60° com a horizontal e com a geogrelha já posicionada.

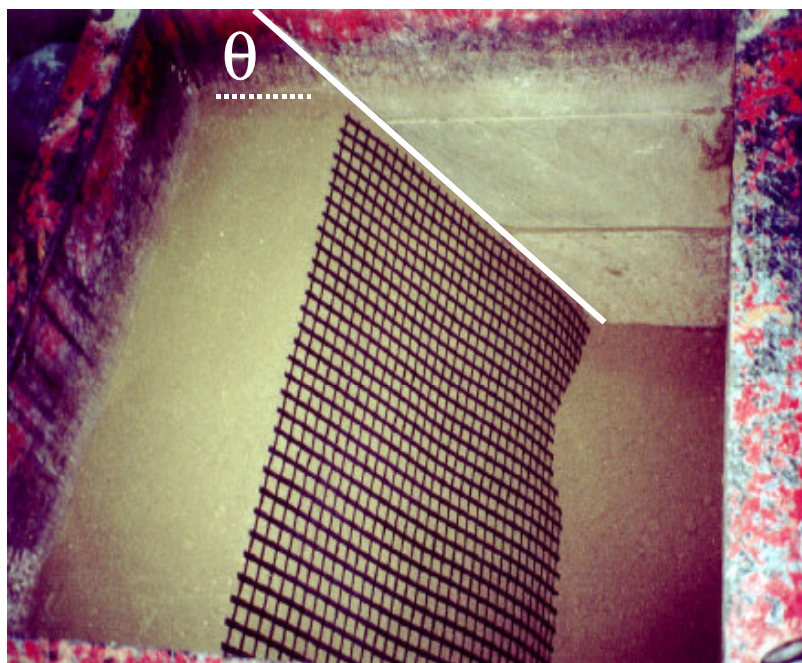


Figura 58 - Posicionamento da Geogrelha no Ensaio de Cisalhamento ($\theta=60^\circ$)

Após o preenchimento total da caixa, colocava-se a tampa e deslocava-se a caixa para o interior do equipamento. O macaco hidráulico era posicionado e o ensaio de cisalhamento direto podia ser então, iniciado.

As tensões verticais aplicadas durante os ensaios de cisalhamento direto foram de 50, 100 e 200kPa. Ressalta-se que as tensões verticais reportadas já

estão corrigidas pela sobrecarga imposta pelo peso da tampa. Esta parcela pode ser expressa por:

$$Q = \frac{W_t}{A_t} \quad (69)$$

onde: W_t é o peso da tampa e A_t é a área da tampa (1m^2).

Ensaio de Cisalhamento Direto com Reforço Horizontal

Estes ensaios foram executados com os 3 tipos distintos de geogrelha imersas tanto em solo arenoso, quanto em solo silto-argiloso. Estes ensaios objetivaram a obtenção dos parâmetros da interface solo-geogrelha.

Os ensaios com areia foram executados para um valor de densidade relativa de 80% e teor de umidade de $10 \pm 0,2\%$.

Os ensaios com silte argiloso foram executados para um grau de compactação de 100% e um teor de umidade da ordem de $16 \pm 0,2\%$. Na Figura 47 foi apresentada a curva de compactação obtida durante o ensaio de compactação Proctor Normal (UNE 103500/94).

Inicialmente, preenchia-se a parte inferior da caixa com 2 camadas de solo de 17,5cm de altura cada, após a compactação estática. A geogrelha era posicionada horizontalmente sobre o solo. A parte superior da caixa era então colocada sobre a inferior e preenchida também com 2 camadas de solo compactado, cada uma com 17,5cm de altura. Para ajustar o grau de compactação, utilizava-se o mesmo procedimento descrito em relação à densidade relativa. Conhecido o grau de compactação desejado, pesava-se a quantidade de solo necessária para se preencher uma camada e, por meio do macaco hidráulico vertical, compactava-se estaticamente o solo silto-argiloso até se atingir a altura requerida de 17,5cm.

Finalizados os procedimentos de compactação e preparação da amostra, a tampa era colocada e a caixa de cisalhamento era deslocada para o interior do equipamento.

Durante os ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal, é fundamental garantir uma perfeita fixação da geogrelha. Desta forma, pode-se obter parâmetros confiáveis de resistência na interface. A geogrelha não pode deslizar, nem “enrugar” durante o ensaio.

Para garantir essa condição de perfeita fixação, foi adaptada ao equipamento uma chapa metálica, que fixa a geogrelha na parte posterior do

equipamento. A Figura 59 mostra um detalhe do equipamento no final do ensaio de cisalhamento. Observa-se que a geogrelha está fixada por uma chapa acoplada ao equipamento. O cisalhamento ocorre, portanto, na interface solo-geogrelha. Na parte anterior da caixa de ensaio, nenhum sistema de fixação da geogrelha foi elaborado. Como a caixa inferior desliza em relação à superior, a geogrelha era mantida estirada durante todo o ensaio.

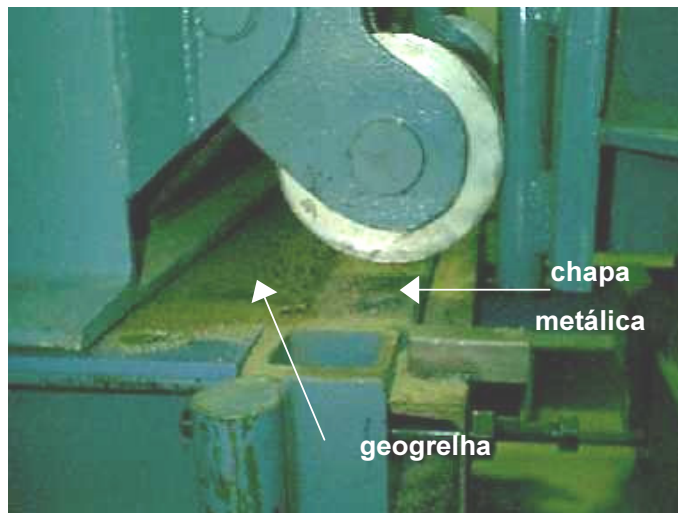


Figura 59 - Sistema de Fixação da Geogrelha - Ensaios de Cisalhamento Direto com Geogrelha Horizontal

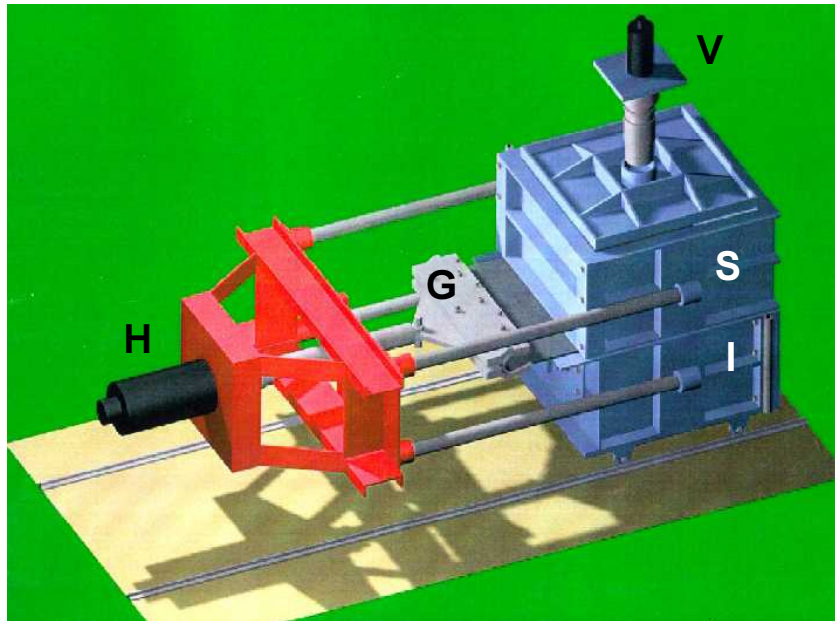
6.3. Ensaios de Arrancamento

6.3.1. Descrição do Equipamento

Durante os ensaios de arrancamento, foi utilizado o mesmo equipamento apresentado anteriormente para os ensaios de cisalhamento direto (Figura 60). No entanto, para os ensaios de arrancamento, uma garra especial era adaptada ao macaco hidráulico horizontal, com a finalidade de produzir o deslocamento horizontal da geogrelha. Além disso, nos ensaios de arrancamento, ambas as metades da caixa ficavam imóveis, espaçadas verticalmente de 50mm, enquanto a garra impõe os deslocamentos horizontais de arrancamento.

Esta garra foi especialmente projetada para a execução de ensaios de arrancamento com geogrelhas (Castro, 1999). A geogrelha era abraçada pela

garra, de tal forma que, quanto maior o esforço de tração aplicado, maior a fixação da geogrelha. Além disso, a garra garante uma distribuição uniforme da força de tração em toda a largura da amostra, como mostrado na Figura 61.



H = Macaco Hidráulico Horizontal

S = Caixa Superior

G = Garra

V = Macaco Hidráulico Vertical

I = Caixa Inferior

Figura 60 - Esquema do Equipamento de Arrancamento (Castro, 1999)

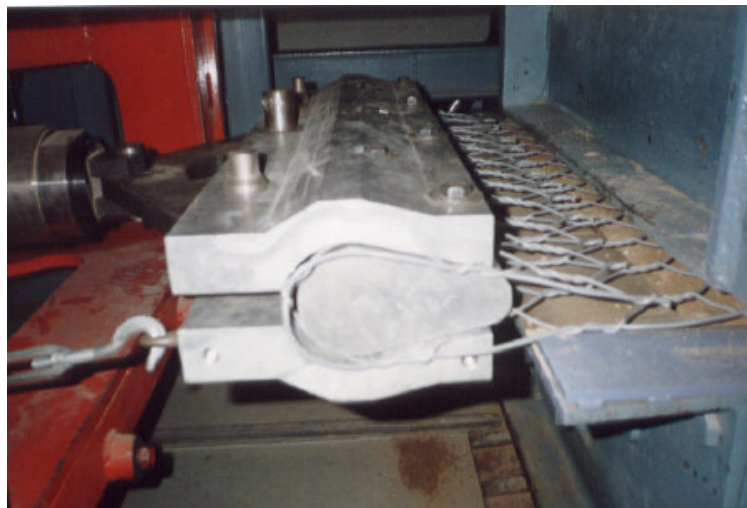


Figura 61 - Detalhe da Garra

6.3.2. Ensaio Executados

O programa experimental constou de 30 ensaios de arrancamento com 3 tipos de geogrelhas e 2 tipos de solos. O objetivo destes ensaios consistiu em avaliar a resistência ao arrancamento dos diferentes tipos de geogrelhas e analisar os mecanismos de interação solo-geogrelha, segundo diferentes condições de confinamento e densidade.

A Tabela 27 apresenta os detalhes do programa de ensaios de arrancamento. Observa-se que as variáveis do programa são: tensão confinante, tipo de geogrelha, tipo de solo e densidade relativa.

6.3.3. Procedimento de Ensaio

A montagem dos corpos de prova é similar à descrita no item 6.2.3. para os ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal.

Inicialmente, a caixa de cisalhamento é deslocada para fora da estrutura fixa de reação. A parte inferior da caixa é preenchida com solo compactado em 2 camadas de 17,5cm de altura, cada uma. As condições de umidade foram semelhantes às dos ensaios de cisalhamento direto, ou seja, nos corpos de prova de areia, o teor de umidade foi de $10,0 \pm 0,2\%$ e no silte argiloso, a umidade de compactação foi de $16,0 \pm 0,2\%$.

Finalizada a compactação do solo no interior da metade inferior da caixa de cisalhamento, procede-se à colocação da geogrelha. As amostras de geogrelha possuíam, na sua maioria, 0,90m de largura e 1,80m de comprimento. Ressalta-se que, após a adaptação da geogrelha na garra, o comprimento enterrado da geogrelha era de 1,00m. Castro (1999) executou ensaios de arrancamento no mesmo equipamento, variando a largura das amostras. A análise destes ensaios demonstrou que não há diferenças significativas nos resultados em termos de força de arrancamento.

Em seguida, a metade superior da caixa era colocada sobre a inferior, com o auxílio de um guindaste fixado a um sistema de pontes rolantes localizado no teto do laboratório.

Tabela 27 - Programa de Ensaios de Arrancamento

Grelha	Solo	Nº	σ_v (kPa)	D_R ou GC (%)
Malha Metálica Hexagonal	Areia	01	5,0	80
		02	12,5	80
		03	25,0	80
		04	50,0	80
		05	5,0	60
		06	12,5	60
		07	25,0	60
		08	12,5	30
		09	25,0	30
	Silte	10	12,5	100
		11	25,0	100
ParaGrid	Areia	12	12,5	80
		13	25,0	80
		14	50,0	80
	Silte	15	12,5	100
		16	25,0	100
		17	50,0	100
MacGrid	Areia	18	5,0	80
		19	12,5	80
		20	25,0	80
		21	50,0	80
		22	12,5	60
		23	25,0	60
		24	50,0	60
		25	75,0	60
		26	100,0	60
	Silte	27	5,0	100
		28	12,5	100
		29	25,0	100
		30	50,0	100

Da mesma forma descrita para a caixa inferior, preenchia-se a caixa superior com solo compactado e posicionava-se a caixa sobre o solo. Neste momento, a caixa era deslocada para o interior da estrutura de reação. A geogrelha era, então, conectada à garra. Finalmente, a tensão vertical era

aplicada e iniciava-se o arrancamento da geogrelha da massa de solo. A Figura 62 apresenta detalhes do procedimento de ensaio.



(a) Preenchimento da caixa com solo



(b) Posicionamento da geogrelha



(a) Colocação da caixa superior

Figura 62 - Procedimentos de Montagem dos Ensaios de Arrancamento

6.3.4. Instrumentação

(a) *Força Horizontal*

A força horizontal de tração era aplicada por um macaco hidráulico com capacidade de até 0,3MN. As medidas de força de tração eram registradas a cada 15 segundos e transferidas diretamente ao computador.

(b) Deslocamento Horizontal da Garra

Um transdutor de deslocamento, com precisão de 0,1mm, localizado no pistão do macaco hidráulico horizontal, enviava um sinal para o sistema de leitura do equipamento. A aquisição dos deslocamentos horizontais da garra era feita a cada 15 segundos, da mesma forma que o controle da força horizontal.

(c) Força Vertical

A força vertical era também aplicada por meio de um macaco hidráulico. O sistema de aplicação da força vertical era dotado de um servo-controle capaz de garantir que a tensão de confinamento permanecesse constante durante todo o ensaio. A aquisição de dados da força vertical era feita diretamente no sistema de leitura do equipamento.

(d) Deslocamentos Verticais

O deslocamento do macaco hidráulico vertical era medido diretamente no sistema de leitura do equipamento, que registra o sinal enviado por um transdutor de deslocamento. Este transdutor era localizado no pistão do macaco hidráulico, possuindo uma precisão de 0,1mm.

(e) Deslocamentos Horizontais Internos

Os deslocamentos horizontais internos eram medidos em 4 pontos ao longo da geogrelha, como esquematizado na Figura 63.

O monitoramento destes deslocamentos internos era executado através de fios inextensíveis (*"tell-tails"*) protegidos por tubos de vinil para evitar perturbações ou atrito com o solo confinante, que poderiam prejudicar as leituras.

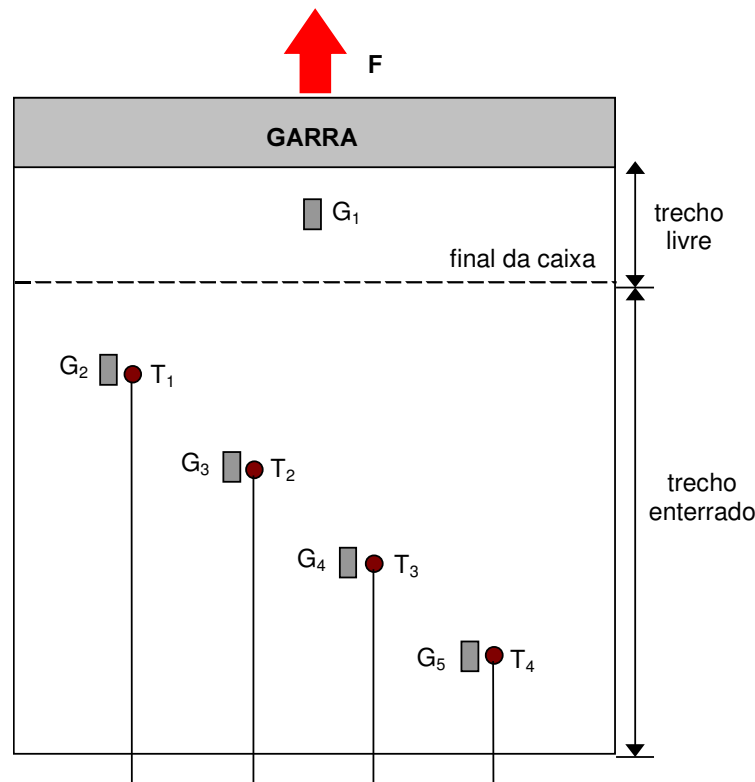
As extremidades dos fios eram conectadas a transdutores de deslocamento (LVDTs) acoplados a uma banqueta fixa, na parte posterior do equipamento. Foram utilizados LVDTs com precisão de 0,1mm.

(f) Deformações Horizontais Internas

As deformações horizontais sofridas pelas geogrelhas durante os ensaios de arrancamento foram monitoradas por 5 *strain gages* instalados ao longo da geogrelha, como ilustrado na Figura 63.

Os *strain gages* usualmente disponíveis no mercado admitem até 2% de deformação. No entanto, as geogrelhas ensaiadas são altamente extensíveis e podem atingir deformações de até 12%. Tanto os *strain gages* quanto a cola

adesiva foram escolhidos de forma criteriosa, levando-se em consideração o tipo de material e o nível de tensões. Os *strain gages* utilizados foram do tipo YL-60, da TML. Esses *strain gages* possuem 60mm de comprimento e 10mm de largura e são específicos para ensaios com polímeros, pois são capazes de suportar até 20% de deformação.



G_i = strain-gage T_i = tell-tails F = força de arrancamento

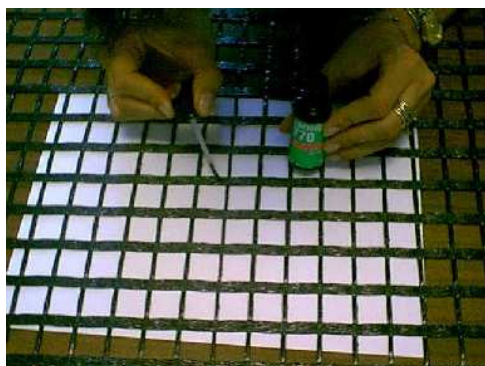
Figura 63 - Posicionamento dos tell-tails e dos strain-gages

A maneira como o *strain gage* é colado é fundamental para a garantia de uma medição adequada das deformações. Quando se coloca muita cola, corre-se o risco de enrijecer a zona instrumentada e, com isso, obter leituras não confiáveis de deformação. No entanto, a utilização de pouca cola pode fazer com que os *strain gages* sejam descolados da geogrelha durante os processos de compactação e até mesmo durante o arrancamento.

O procedimento adotado para a colagem dos *strain gages* foi baseado em Díaz (2000). Foram ensaiadas várias experiências com o mesmo tipo de *strain gage*, variando-se o método de colagem. Em conclusão, o método mais apropriado consiste em colar apenas as extremidades dos *strain gages*.

Inicialmente, selecionavam-se os pontos onde os *strain gages* seriam colados. A superfície da geogrelha deve estar bem limpa antes de se iniciar o processo de colagem. Procedia-se então, à aplicação (imprimação) de um produto, denominado Loctite 770, que é utilizado para melhorar a aderência e a durabilidade da união entre o *strain gage* e a geogrelha.

Após preparado o local, aplicava-se a cola nas 2 extremidades do *strain gage* e procedia-se à colagem do mesmo. É importante salientar que o *strain gage* deve ficar bem estirado para que não haja variação nas leituras. A Figura 64 ilustra o procedimento de colagem dos *strain gages*.



(a) Preparação da Superfície da Geogrelha



(b) Colagem do *Strain gage*



(d) Detalhe do *Strain gage* Após a Colagem

Figura 64 - Procedimento de Colagem dos *Strain gages*

A escolha da cola é fundamental para o sucesso da instrumentação. A cola deve ser capaz de promover uma distribuição uniforme das cargas, ao invés de concentrá-las nos pontos de máxima tensão.

O último passo era a proteção dos *strain gages* para evitar que o solo e a compactação danificassem os instrumentos ou prejudicassem as leituras. A Figura 65 apresenta uma geogrelha MacGrid totalmente instrumentada.

A aquisição de dados é feita utilizando-se o software *Picolog Data Logger*. A resolução das medidas foi de $\pm 0,003\%$.

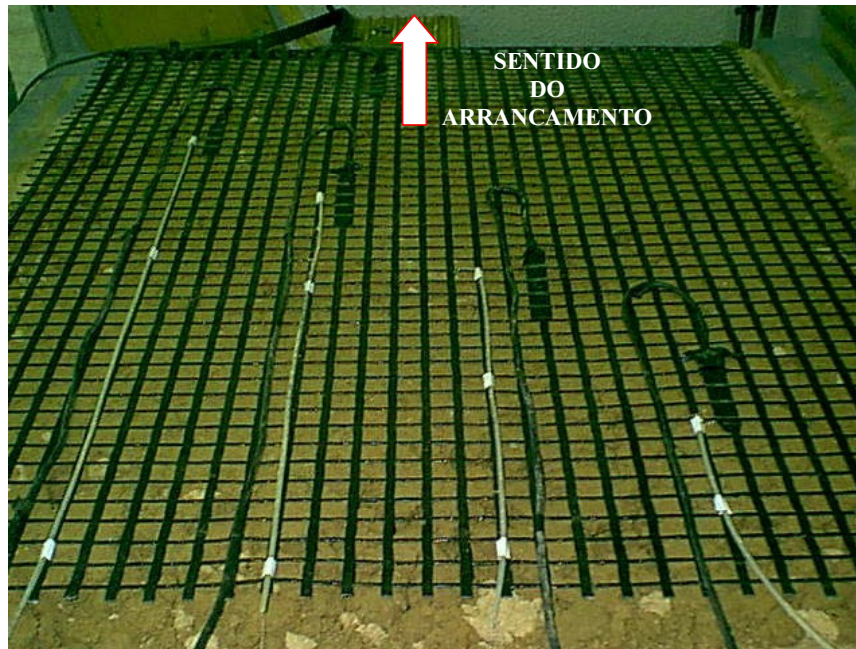


Figura 65 - Geogrelha Instrumentada para Ensaio de Arrancamento

6.4. Ensaio Triaxiais

6.4.1. Descrição do Equipamento

O equipamento utilizado para a série de ensaios triaxiais permite ensaiar corpos de prova com 22,9cm (9") de diâmetro e 45,7cm (18") de altura. Devido às grandes dimensões, é possível ensaiar amostras cilíndricas de solo reforçado com camadas horizontais de geossintéticos. No entanto, no caso de geogrelhas, deve-se verificar a relação entre a abertura da malha (S) e o diâmetro da amostra (ϕ). A razão S/ϕ deve ser inferior a 1/5 (ASTM D5321).

O equipamento (Figura 66a) era constituído de uma célula triaxial metálica, capaz de suportar uma tensão confinante de até 1,0GPa, aplicada através de colunas de mercúrio (Figura 66b). Uma prensa hidráulica, utilizada para carregamento axial, era capaz de aplicar uma carga máxima de 980kN (100t), com o controle da velocidade de carregamento. Um sistema de aquisição de dados automatizado era dedicado ao equipamento triaxial.



(a) Equipamento Triaxial



(b) Colunas de Mercúrio

Figura 66 - Detalhes do Equipamento Triaxial de Grandes Dimensões

6.4.2. Ensaio Executados

O programa experimental constou de 21 ensaios triaxiais consolidados-drenados (CD), com carregamento axial, com corpos de prova de areia e silte argiloso reforçados com camadas de geogrelha. O programa está apresentado na Tabela 28. O objetivo destes ensaios foi avaliar o ganho de resistência e rigidez do conjunto solo-geogrelha com a introdução das camadas horizontais de reforço.

Os ensaios triaxiais foram executados apenas com a geogrelha MacGrid, tendo em vista que as demais (ParaGrid e a Malha Metálica) apresentam uma razão S/ϕ (abertura da malha / diâmetro do corpo de prova) superior ao valor máximo estipulado por norma ($S/\phi = 1/5$).

Tabela 28 - Programa de Ensaios Triaxiais com a Geogrelha MacGrid

Solo	Nº de Camadas de Reforço	Tensão Confinante (kPa)
Areia	0 , 1 , 2 ou 4	50, 150 ou 300
Silte Argiloso	0 , 1 ou 4	50, 150 ou 300

6.4.3. Procedimento de Ensaio

O processo de moldagem dos corpos de prova foi realizado em um molde metálico cilíndrico, que se encontrava acoplado a um compactador mecânico, como ilustrado na Figura 67.

Uma vez definidos os valores de peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima (ω_{ot}), iniciava-se o processo de compactação. Os corpos de prova foram compactados em 5 camadas, sendo aplicados 60 golpes em cada camada. A energia de compactação imposta aos corpos de prova era igual à energia do ensaio de Proctor Modificado (2,632J/cm³).

A fim de garantir a estabilidade do corpo de prova durante a retirada do molde metálico, utilizou-se uma membrana de borracha (látex) dentro do molde (Figura 68a). Terminado o processo de compactação, o molde era retirado do compactador e iniciava-se a colocação do corpo de prova na célula triaxial. Procede-se à colocação de uma placa porosa sobre o corpo de prova, com a finalidade de permitir a drenagem. Adicionalmente, bandas de papel filtro eram colocadas na superfície lateral do corpo de prova, de modo a reduzir o caminho máximo de drenagem.

O corpo de prova era colocado rapidamente sobre uma placa porosa, evitando-se a oclusão de ar. Com o auxílio de um aparelho de sucção, envolvia-se o corpo de prova com uma membrana de borracha.

Finalmente, a célula triaxial era preenchida com água desaerada, deixando sair o ar por um tampão situado no topo da célula. A Figura 68b apresenta o corpo de prova após a preparação.

Neste momento, iniciava-se o processo de saturação do corpo de prova. Esta etapa tinha a finalidade de permitir leituras corretas das variações de volume

durante o ensaio. O processo de saturação utilizado foi por contrapressão de 600kPa com uma pressão confinante externa de 620kPa.

Em geral, a amostra era considerada saturada após 24h, com contrapressão de 600kPa.



Figura 67 - Compactador Mecânico



(a) Colocação da Membrana



(b) Corpo de Prova Preparado para o Ensaio

Figura 68 - Detalhes da Montagem do Corpo de Prova: Ensaio Triaxiais

O programa experimental constou de ensaios triaxiais drenados (tipo CD). A velocidade de cisalhamento adotada foi estimada a partir dos dados obtidos durante a fase de adensamento isotrópico do corpo de prova.

6.5.

Investigação do Dano Mecânico

O dano mecânico pode ser definido como o resultado da transformação ocorrida na estrutura do geossintético, provocada pela compactação, tráfego de veículos, lançamento de agregados pontiagudos, rasgos, etc. Estes danos, geralmente sofridos no processo de instalação do geossintético no campo, podem reduzir significativamente as propriedades mecânicas do produto.

O programa experimental constou de ensaios de tração simples, cisalhamento direto e arrancamento em amostras danificadas. Dois tipos diferentes de dano foram considerados: o dano natural, obtido a partir de procedimentos de compactação e o dano artificial, obtido a partir da ruptura mecânica de um ou mais elementos da malha geossintética.

6.5.1.

Ensaio de Tração Simples: Amostras Danificadas Naturalmente

Ensaio de simulação do dano foram executados com o objetivo de investigar a perda de resistência resultante dos processos de compactação. As geogrelhas utilizadas neste programa de ensaios foram a Malha Metálica Hexagonal (MH), a MacGrid (MG) e a ParaGrid (PG).

Para a simulação do dano mecânico nas geogrelhas MacGrid e ParaGrid, utilizou-se uma caixa metálica quadrada de 30cm de lado e 15cm de altura. Inicialmente, colocava-se uma camada de solo de 7cm de altura de forma a cobrir a metade inferior da caixa. A geogrelha era então posicionada e coberta com solo até completar toda a caixa. Neste instante, iniciava-se o processo de compactação (Figura 69). Nestes ensaios, foram utilizados 3 tipos de solo (silte argiloso, areia siltosa e brita) e 2 métodos distintos de compactação. O primeiro método de compactação utilizou um soquete manual de 4,5kg que aplicava energia igual à do ensaio de compactação do tipo Proctor Modificado ($2,632\text{J}/\text{cm}^2$). O outro método utilizou um compactador dinâmico que aplicava uma energia 4 vezes superior ($10,52\text{J}/\text{cm}^2$).



(a) Posicionamento da geogrelha

(b) Compactação com soquete

Figura 69 - Simulação Experimental do Dano Mecânico – Geogrelhas Poliméricas

Para a geogrelha metálica (MH), devido à grande abertura dos orifícios da malha, os ensaios de simulação do dano foram executados em uma caixa de 1,0m de lado (Figura 70). Terminada a simulação, as geogrelhas foram cuidadosamente exumadas para evitar danos adicionais. As geogrelhas foram submetidas à inspeção microscópica (Figura 71), com o objetivo de verificar o dano ocorrido na superfície das mesmas. Posteriormente, as geogrelhas danificadas foram submetidas a ensaios de tração de faixa larga (NBR 12824).

As consequências do dano mecânico foram avaliadas através do fator de redução (f_d) definido como:

$$f_d = \frac{\text{resistência da amostra intacta}}{\text{resistência da amostra exumada}} \quad (70)$$



Figura 70 - Simulação Experimental do Dano Mecânico – Malha Metálica



Figura 71 - Inspeção Microscópica das Geogrelhas Exumadas

Para a execução dos ensaios de tração simples, foram utilizados os equipamentos de tração simples do Laboratório de Estruturas e Materiais do Cedex, apresentados no Capítulo 5. Os ensaios foram realizados segundo a norma NBR 12824.

6.5.2.

Ensaio Tração Simples: Amostras Danificadas Artificialmente

Estes ensaios foram executados com o objetivo de avaliar a perda de resistência ao se utilizar amostras com danos intensos, capazes de causar a ruptura de um ou mais elementos da malha. Os ensaios foram executados apenas com as geogrelhas MacGrid e Metálica. O dano foi produzido artificialmente através da ruptura de elementos da malha.

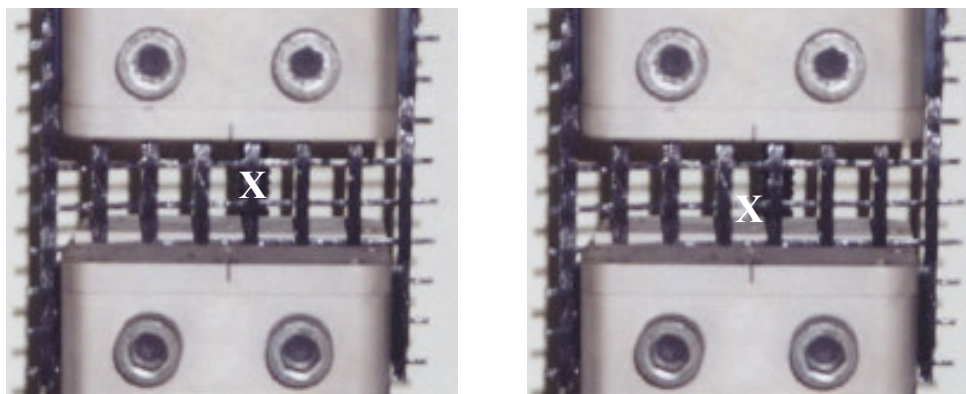
A geogrelha ParaGrid apresenta elevada rigidez e dificilmente um procedimento de compactação resultará na ruptura de um elemento longitudinal. Os elementos transversais da geogrelha ParaGrid funcionam apenas como elementos de união das tiras longitudinais. A ruptura de elementos transversais não ocasiona perda de resistência.

Geogrelha MacGrid

Para estes ensaios, foram utilizadas 6 amostras intactas de 30cm x 30cm. Estas amostras, após serem posicionadas no equipamento de tração simples, tiveram o dano mecânico imposto artificialmente pelo corte (ruptura) de um ou mais elementos da malha. Foram ensaiadas 3 amostras com um dano no elemento transversal central e 3 amostras com um dano no elemento longitudinal central. A Figura 72 apresenta a localização dos danos nas amostras.

Malha Metálica

Os ensaios de tração simples foram executados em 6 amostras danificadas da malha metálica. Mais uma vez, após posicionadas no equipamento, as amostras ensaiadas tiveram alguns elementos danificados. Foram ensaiadas 3 amostras com um elemento danificado na região central da malha, e 3 amostras com 3 elementos danificados, como indicado na Figura 73. Observa-se que, nos ensaios executados com 3 elementos danificados, estes elementos estavam posicionados na região central da amostra, na direção perpendicular à força de tração.



(a) Tira longitudinal

(b) Tira transversal

Figura 72 - Localização dos Elementos Danificados – Geogrelha MacGrid



(a) 1 elemento danificado

(b) 3 elementos danificados

Figura 73 - Localização dos Elementos Danificados – Geogrelha MH

6.5.3.

Ensaio de Arrancamento: Amostras Danificadas Artificialmente

Uma série de ensaios de arrancamento foi também executada com amostras danificadas de geogrelha. Estes ensaios tiveram o objetivo de avaliar a influência do dano na resposta ao arrancamento. Os ensaios foram executados em amostras de 1,0m de lado, danificadas mecanicamente. O dano foi produzido através da ruptura de elementos da malha. A Tabela 29 apresenta o programa de ensaios de arrancamento em amostras danificadas e a Figura 74 apresenta a localização dos elementos danificados.

Com a Malha Metálica, foram executados ensaios em areia ($D_R=30\%$ e $D_R=80\%$) e em silte argiloso ($GC=100\%$), em amostras com 1 ou 3 elementos rompidos. Foram realizados ensaios com os 3 elementos distribuídos na direção do arrancamento e na direção perpendicular ao arrancamento. Todos os ensaios com amostras danificadas foram executados sob um nível de tensão confinante vertical de 25kPa.

No caso da geogrelha MacGrid, foram realizados ensaios em areia ($D_R=80\%$) e em silte argiloso ($GC=100\%$), com amostras que tiveram 3 ou 5 elementos longitudinais danificados. O aumento do número de elementos

danificados está relacionado à configuração da malha. Um ensaio preliminar (Figura 75) demonstrou que a ruptura de apenas 1 elemento não afeta a resposta da geogrelha MacGrid ao arrancamento.

Tabela 29 - Ensaios de Arrancamento: Amostras Danificadas Artificialmente

GEOGRELHA	Ensaio N°	SOLO	DR ou GC (%)	N° de danos	Danos
Malha Metálica	1	Areia	30	0	_____
	2	Areia	30	1	_____
	3	Areia	30	3	A, B, C
	4	Areia	30	3	D, B, E
	5	Areia	80	0	_____
	6	Areia	80	1	_____
	7	Areia	80	3	A, B, C
MacGrid	8	Areia	80	0	_____
	9	Areia	80	3	B, C, D
	10	Areia	80	5	A, B, C, D, E
	11	Areia	80	3	G, H, I
	12	Areia	80	5	F, G, H, I, J
	13	Silte Argiloso	100	0	_____
	14	Silte Argiloso	100	3	B, C, D
	15	Silte Argiloso	100	5	A, B, C, D, E

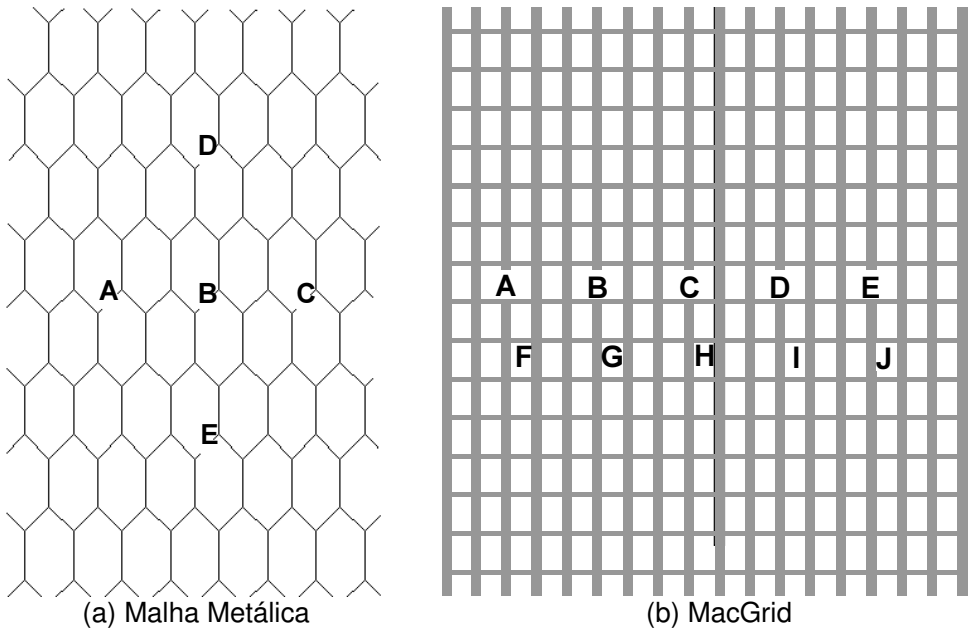


Figura 74 - Localização dos Elementos Danificados Artificialmente

Com a geogrelha MacGrid, foram executados também, ensaios de arrancamento com elementos transversais danificados, com o objetivo de avaliar a contribuição destes elementos em solicitações de arrancamento.

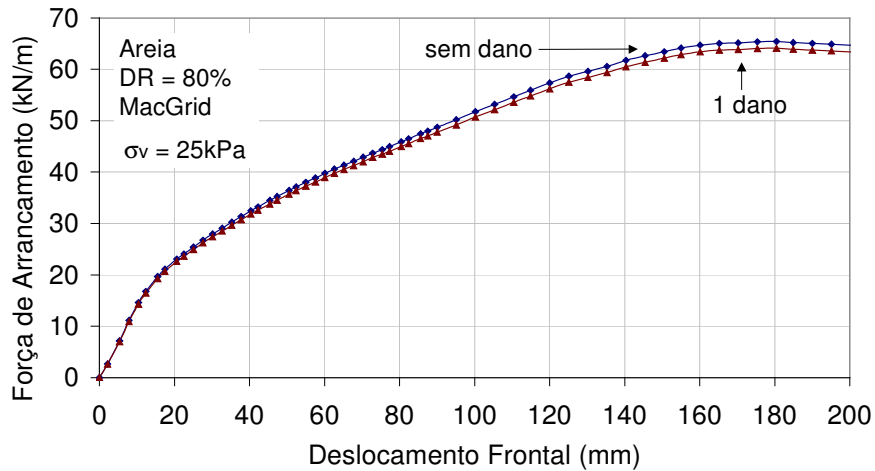


Figura 75 - Ensaios de Arrancamento: MacGrid com 1 Elemento Danificado x MacGrid Intacta

O fator de redução devido ao dano mecânico é usualmente calculado a partir da razão entre as resistências da amostra intacta e da amostra danificada, em condições não confinadas.

A perda de resistência sob condições de confinamento pode ser adequadamente investigada a partir dos ensaios de arrancamento com amostras danificadas.

6.5.4.

Ensaios de Cisalhamento Direto: Amostras Danificadas Artificialmente

Ensaios de cisalhamento direto com amostras danificadas foram executados com o objetivo de avaliar a influência do dano em solicitações de cisalhamento. O dano foi produzido pela ruptura artificial de um elemento, localizado no centro da tira longitudinal.

Os ensaios de cisalhamento direto foram executados no equipamento de $(30 \times 30)\text{cm}^2$, apresentado no Capítulo 5. Estes ensaios foram executados apenas com a geogrelha MacGrid, por ser a única grelha que atende aos requisitos da

norma. Segundo a ASTM D5321, a dimensão mínima da caixa deve ser 5 vezes maior que a abertura máxima da malha.

A geogrelha era posicionada verticalmente na caixa de cisalhamento. A tensão vertical aplicada foi de 100kPa. O programa experimental constou de ensaios com o solo arenoso e com o solo silto-argiloso.

6.6.

Considerações Finais

Este capítulo apresentou o programa experimental proposto para a compreensão dos mecanismos de interação solo-geogrelha. Uma descrição detalhada do funcionamento dos diferentes equipamentos e dos procedimentos de ensaio foi apresentada, destacando-se os equipamentos de grandes dimensões utilizados nos ensaios com geogrelhas.

A utilização de ensaios de grandes dimensões justifica-se devido às grandes aberturas das geogrelhas ensaiadas. O programa experimental constou de ensaios de arrancamento, ensaios de cisalhamento direto, ensaios triaxiais e ensaios para a avaliação do dano mecânico. Um resumo de todos os ensaios constantes do programa experimental está apresentado no Apêndice 1.

Os ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto procuraram reproduzir os diferentes mecanismos de interação possíveis de ocorrer na interface solo-geogrelha, buscando-se os parâmetros de resistência da interface.

Os ensaios triaxiais objetivaram a avaliação do ganho de resistência e de rigidez ocasionado pela introdução de camadas de reforço.

Adicionalmente, foram executados ensaios em amostras de geogrelhas previamente danificadas buscando-se avaliar a influência do dano mecânico no mecanismo de interação solo-geogrelha.