

## 7

# Resultados dos Ensaio de Arrancamento

### 7.1.

#### Introdução

A resistência ao arrancamento de uma geogrelha é uma propriedade essencial para o dimensionamento de maciços reforçados. Segundo Amorim Jr. (1992), Palmeira e Milligan (1989) e Christopher e Berg (1990), o ensaio de arrancamento é o que melhor representa as situações reais de campo, quando são utilizadas geogrelhas como elementos de reforço.

Os ensaios de arrancamento permitem simular a situação em que um reforço, imerso na massa de solo, está sendo submetido a uma força de tração. Neste caso, dois mecanismos básicos de ruptura podem ser observados: 1) arrancamento da geogrelha da massa de solo ou 2) ruptura por tração da malha da grelha.

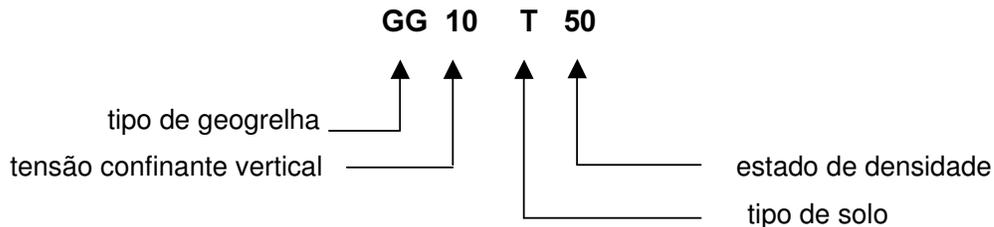
No primeiro mecanismo, observa-se o deslocamento de toda a malha em relação ao solo envolvente. A geogrelha é arrancada como uma lâmina e o deslocamento ocorre ao longo de todo o comprimento da amostra. Neste processo, ocorre a mobilização do atrito no contato solo-reforço e da resistência passiva dos elementos transversais da geogrelha.

O segundo mecanismo caracteriza-se pela ruptura da geogrelha e é resultado de uma tensão de tração excessiva. Neste caso, a força de arrancamento atinge a resistência à tração da geogrelha em algum ponto localizado da malha. No equipamento utilizado, a garra localiza-se fora da caixa de cisalhamento. Esta condição de contorno do ensaio leva à ocorrência da ruptura da malha na região não confinada

Neste capítulo, estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de arrancamento descritos no Capítulo 6. Uma análise da influência de diversos fatores na resposta ao arrancamento é apresentada, juntamente com os fatores de interação propostos para projeto e dimensionamento de maciços reforçados. O processo de mobilização das tensões e deformações durante o ensaio é discutido, com base nos resultados da instrumentação.

## 7.2. Apresentação dos Resultados

De modo a facilitar a identificação das diferentes variáveis envolvidas em cada um dos ensaios, foi adotada a seguinte convenção de nomenclatura:



onde:

<b>tipo de geogrelha:</b>	MH: Malha Hexagonal metálica
	MG: MacGrid
	PG: ParaGrid
<b>tensão confinante vertical:</b>	o valor indicado corresponde à tensão confinante atuante na geogrelha (em kPa)
<b>tipo de solo:</b>	A = areia
	S = silte argiloso
<b>estado de densidade:</b>	o valor indicado representa a densidade relativa da areia ou o grau de compactação do silte argiloso (em %)

A Tabela 30 apresenta os valores da força de arrancamento no instante da ruptura ( $P_{ult}$ ), o tipo de mecanismo de ruptura observado em cada ensaio (arrancamento ou tração da malha) e as principais características dos ensaios. O programa experimental objetivou estudar o efeito de 4 variáveis: tensão confinante, tipo de solo, tipo de geogrelha e densidade relativa.

Na mesma Tabela, estão apresentadas a instrumentação adotada e as alturas aproximadas de aterro correspondentes à tensão confinante aplicada.

Tabela 30 - Resumo dos Resultados dos Ensaios de Arrancamento

Grelha	Solo	Nº	Denominação	$P_{ult}$ (kN/m)	Instrumentação	Ruptura	h (m)
Malha Hexagonal Metálica	Areia	01	MH 05 A 80	27,9	TT	A	0,25
		02	MH 12 A 80	35,2	TT	A	0,63
		03	MH 25 A 80	44,2	TT	T	1,25
		04	MH 50 A 80	46,2	TT	T	2,50
		05	MH 05 A 60	20,9	TT	A	0,25
		06	MH 12 A 60	32,3	TT	A	0,63
		07	MH 25 A 60	42,4	TT	T	1,25
		08	MH 12 A 30	27,6	—	A	0,63
		09	MH 25 A 30	31,1	—	A	1,25
	Silte	10	MH 12 S 100	30,6	TT	A	0,63
		11	MH 25 S 100	39,6	TT	A	1,25
ParaGrid	Areia	12	PG 12 A 80	37,1	TT e SG	A	0,63
		13	PG 25 A 80	44,1	TT e SG	A	1,25
		14	PG 50 A 80	59,0	TT e SG	A	2,50
	Silte	15	PG 12 S 100	23,0	—	A	0,63
		16	PG 25 S 100	25,6	—	A	1,25
		17	PG 50 S 100	31,8	—	A	2,50
		MacGrid	Areia	18	MG 05 A 80	30,8	TT e SG
19	MG 12 A 80			43,5	TT e SG	A	0,63
20	MG 25 A 80			65,1	TT e SG	A	1,25
21	MG 50 A 80			76,6	TT e SG	T	2,50
22	MG 12 A 60			31,6	TT	A	0,63
23	MG 25 A 60			49,8	TT	A	1,25
24	MG 50 A 60			66,5	TT	T	2,50
25	MG 75 A 60			67,5	TT	T	3,75
Silte	26		MG 100 A 60	68,0	TT	T	5,00
	27		MG 05 S 100	33,7	TT	A	0,25
	28	MG 12 S 100	39,5	TT	A	0,63	
	29	MG 25 S 100	51,5	TT	A	1,25	
		30	MG 50 S 100	59,2	TT	T	2,50

**Legenda:** A = arrancamento da geogrelha      T = tração da malha  
 TT = *tell-tails*      SG = *strain-gages*  
 $P_{ult}$  = força de arrancamento na ruptura  
 h = altura equivalente de aterro

### 7.3.

#### Fatores que Influenciam os Ensaio de Arrancamento

O programa experimental teve como objetivo analisar a influência de fatores como tensão confinante, densidade relativa, tipo de solo e tipo de geogrelha na resposta ao arrancamento. Neste item, serão apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento, juntamente com uma discussão sobre a influência destes fatores.

A interpretação dos ensaios de arrancamento é bastante complexa. A força de arrancamento, aplicada em uma das extremidades da amostra, não se distribui uniformemente. Da mesma forma, não há uma distribuição uniforme das deformações e dos deslocamentos sofridos pela geogrelha. A geogrelha é um material deformável e observa-se, durante o arrancamento, tanto o deslocamento do corpo rígido, quanto a deformação da malha.

Como comentado no Capítulo 6, na maioria dos ensaios de arrancamento foram instalados *tell-tails* (medidores mecânicos de deslocamento) para o monitoramento dos deslocamentos internos em 4 pontos da geogrelha. Esta informação é extremamente importante, uma vez que a localização da garra, fora da caixa de ensaio, conduz a valores de deslocamentos frontais superiores à condição de ruptura. Os deslocamentos medidos na garra não correspondem, portanto, aos deslocamentos relativos solo-geogrelha necessários para a mobilização da resistência ao arrancamento. A região da geogrelha, localizada na zona não confinada, pode sofrer grandes deformações antes de ocorrer a mobilização da resistência na interface solo-geogrelha.

A Figura 76 apresenta os resultados do ensaio executado com a geogrelha MacGrid, embutida em solo arenoso ( $D_R = 80\%$ ) e submetida a uma tensão confinante de 25kPa. Na Figura 76(a) estão apresentados os valores de força de arrancamento em função dos deslocamentos frontais (medidos na garra). Observa-se que, na ruptura, a força de arrancamento máxima é de 65,1kN/m e o deslocamento frontal é de 170mm.

A partir da Figura 76(b), observa-se a evolução dos deslocamentos internos medidos ao longo da geogrelha em função do deslocamento frontal. Verifica-se que os deslocamentos ocorrem de maneira progressiva e decrescem à medida que o medidor de deslocamento (*tell-tail*) se afasta do ponto de aplicação da força de arrancamento. Cabe ressaltar, que no momento da ruptura, o deslocamento medido no  $TT_1$  foi de 82mm, enquanto o  $TT_4$  registrou um deslocamento de 14,3mm. O valor de deslocamento relativo solo-geogrelha,

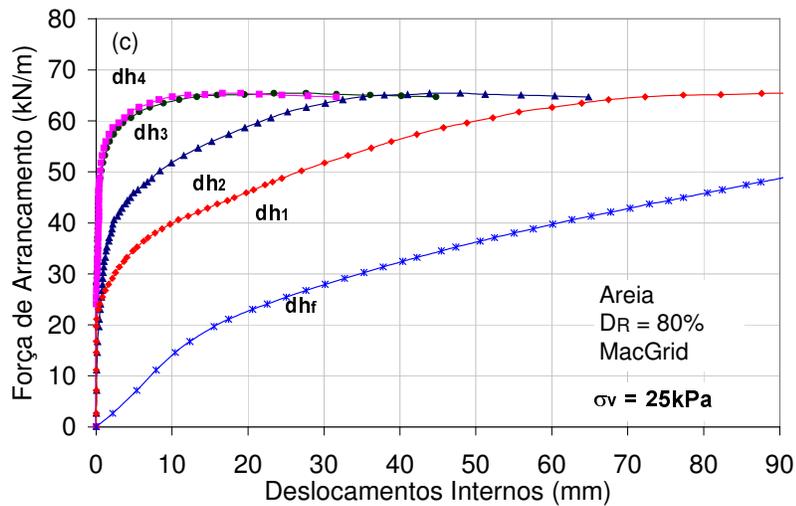
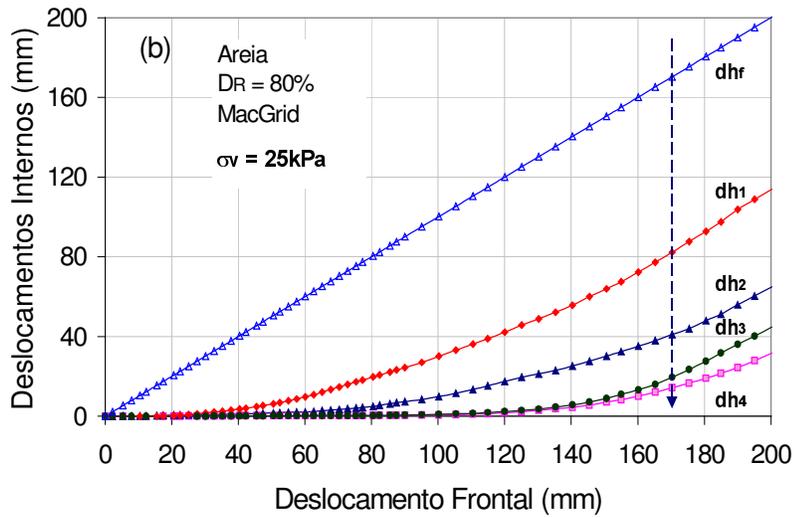
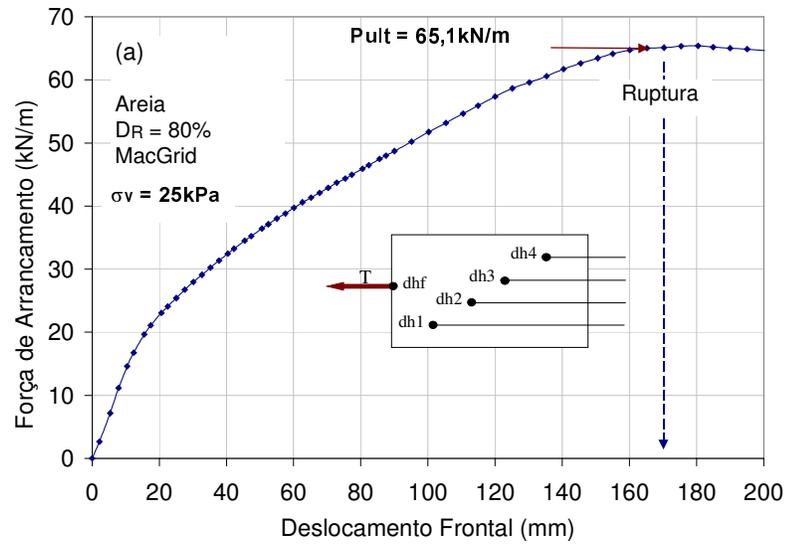


Figura 76 - Ensaio de Arrancamento com Geogrelha MacGrid em Areia ( $D_R = 80\%$ )

necessário para mobilizar a resistência ao arrancamento, corresponde ao deslocamento sofrido pelo ponto localizado na extremidade frontal confinada da geogrelha. No entanto, o monitoramento dos deslocamentos sofridos neste ponto é bastante complexo devido às condições de contorno do ensaio.

Finalmente, a Figura 76(c) ilustra a evolução dos deslocamentos sofridos internamente pela geogrelha em função da força de arrancamento aplicada. No instante da ruptura, os deslocamentos medidos ao longo da geogrelha são distintos. A instrumentação demonstra que os elementos da geogrelha não se deslocam igualmente. Além do deslocamento do corpo rígido, ocorre também uma deformação da geogrelha. Há uma distribuição decrescente de deformações desde o elemento frontal (mais próximo ao ponto de aplicação do esforço de arrancamento) até o elemento mais distante.

Neste item, optou-se por apresentar os resultados dos ensaios de arrancamento em função dos deslocamentos frontais. No entanto, é importante salientar que os deslocamentos registrados não correspondem aos deslocamentos relativos solo-geogrelha na condição de arrancamento. A discussão aqui apresentada baseia-se apenas na resistência ao arrancamento. O item 7.6 apresenta uma discussão sobre a mobilização dos deslocamentos ao longo da geogrelha.

### **7.3.1. Tensão Confinante**

A influência da tensão confinante na resistência da interface solo-geossintético foi estudada por diversos pesquisadores (Farrag et al, 1993; Yuan et al, 1998; Lopes e Ladeira, 1996; McGown et al, 1982; Juran et al, 1988; Díaz, 2000).

O efeito da tensão confinante vertical ( $\sigma'_v$ ) nos resultados dos ensaios de arrancamento pode ser verificado na Figura 77 e nas demais figuras deste item. Cada figura apresenta um conjunto de ensaios, executados com o mesmo tipo de geogrelha, mesmo tipo de solo, mesmo teor de umidade e mesmo estado de densidade, variando-se apenas o nível de confinamento. Observa-se que, a resistência ao arrancamento sempre aumenta com o aumento do confinamento.

O comportamento da malha metálica está apresentado nas Figuras 77 a 79. As curvas são suaves e alcançam o patamar de resistência sem apresentarem pico. A resistência ao arrancamento aumenta com o confinamento e é atingida para grandes deslocamentos frontais. A localização da garra, na região não

confinada, leva a uma distorção dos hexágonos da malha, resultando em grandes deformações, antes do início do processo de arrancamento. Comportamento similar foi reportado por Castro (1999).

Em solo arenoso, sob baixas tensões confinantes (5 e 12,5kPa), observa-se a ruptura por arrancamento da malha metálica, independente da densidade relativa do solo. Para maiores níveis de confinamento (25 e 50kPa), ocorre a ruptura por tração da malha.

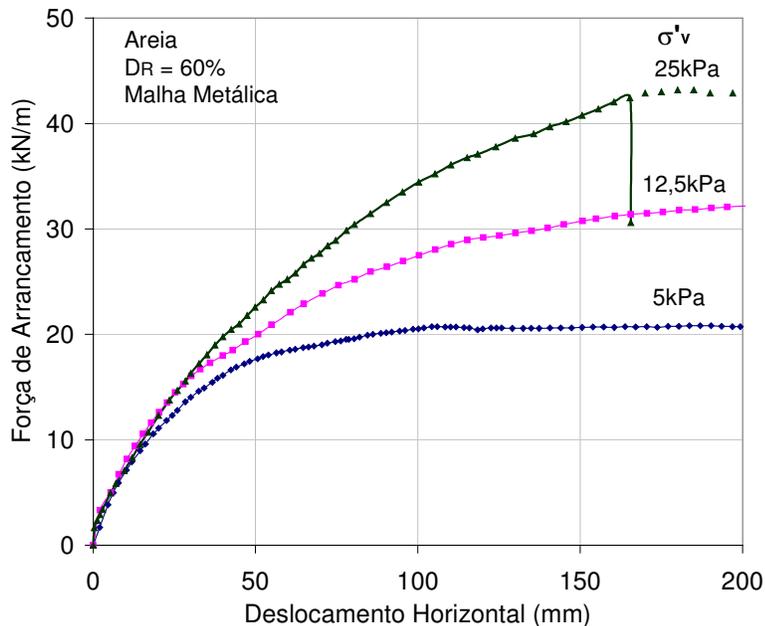
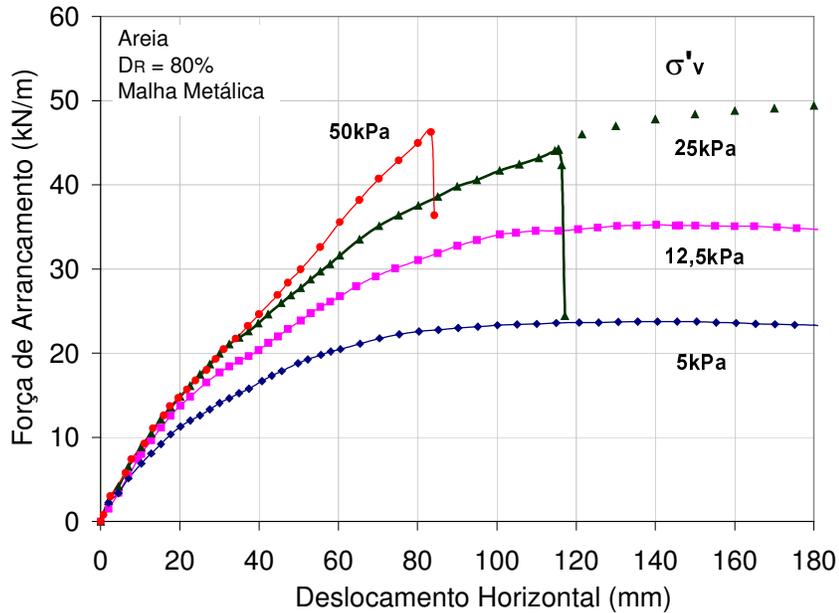


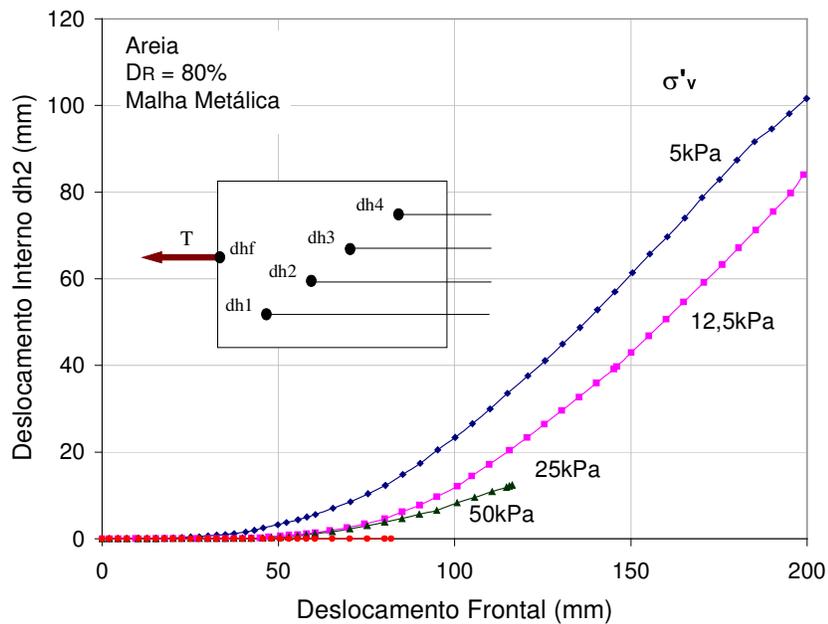
Figura 77 - Ensaio de Arrancamento: Malha Metálica em Areia ( $D_R = 60\%$ )

Ressalta-se que, nos ensaios executados para um valor de densidade relativa de 80% (Figura 78), a ruptura da malha para um nível de confinamento de 25kPa ocorreu para maiores deslocamentos e para um valor inferior de força de arrancamento quando comparado à ruptura da malha para tensão confinante de 50kPa. Este fato pode ser justificado com base nos deslocamentos internos da geogrelha durante o arrancamento. Na Figura 78(b), estão plotados os deslocamentos internos medidos no ponto 2, distante 40cm da face frontal da geogrelha. Para um nível de tensão confinante de 25kPa, ocorre uma ruptura composta, ou seja, observa-se inicialmente o arrancamento da geogrelha da massa de solo e posteriormente, a ruptura por tração da malha. Para uma tensão confinante de 50kPa, ocorre apenas a ruptura por tração da geogrelha, não havendo registro de deslocamentos internos da geogrelha. O aumento da tensão

confinante reduz o deslocamento da geogrelha, conduzindo à mobilização de esforços tangenciais elevados nos pontos próximos à aplicação da força de arrancamento.



(a) Variação da Força de Arrancamento com a Tensão Confinante.



(b) Deslocamentos Internos ao longo da Geogrelha

Figura 78 - Ensaios de Arrancamento: Malha Metálica em Areia ( $D_R = 80\%$ )

É importante salientar que a localização da garra, fora da caixa do equipamento, pode levar à ruptura antecipada da malha, sob condições não confinadas. Sendo assim, os ensaios onde este tipo de ruptura é observado não reproduzem por completo uma situação de arrancamento.

Nos ensaios executados com silte argiloso (Figura 79), verifica-se o arrancamento da geogrelha para um confinamento de 25kPa. Em solos finos, a geogrelha é arrancada mais facilmente da massa de solo, devido à menor interação entre o solo e o reforço.

Nas Figuras 77 e 78, as tendências de comportamento forma indicadas através da extrapolação dos resultados experimentais, desconsiderando a ruptura precoce das malhas metálicas na região não confinada.

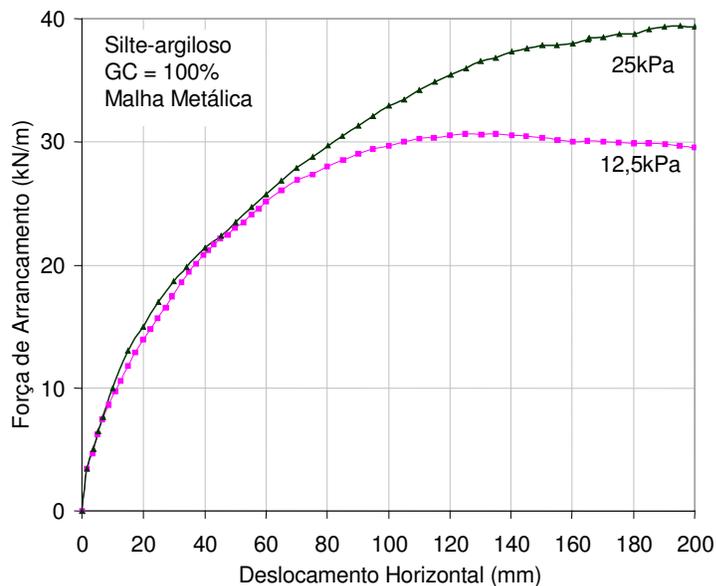


Figura 79 - Ensaios de Arrancamento: Malha Metálica em Silte Argiloso (GC = 100%)

A extrapolação dos resultados foi realizada a partir da curva força de arrancamento *versus* deslocamentos internos medidos no ponto 1 ( $dh_1$ ). Este ponto dista 20cm do ponto de aplicação da força de arrancamento. A Figura 80 apresenta uma curva típica que ilustra o procedimento adotado. Cabe comentar que foram extrapolados apenas os ensaios onde há registro de deslocamentos internos ( $dh_1$ ) até o momento da ruptura. Isto demonstra que a geogrelha é arrancada da massa de solo e, posteriormente, rompe por tração. Ensaios executados sob níveis de confinamento elevados não apresentaram deslocamentos internos até o instante da ruptura. Desta forma, não é possível

uma extrapolação dos resultados, uma vez que o mecanismo não representa o arrancamento.

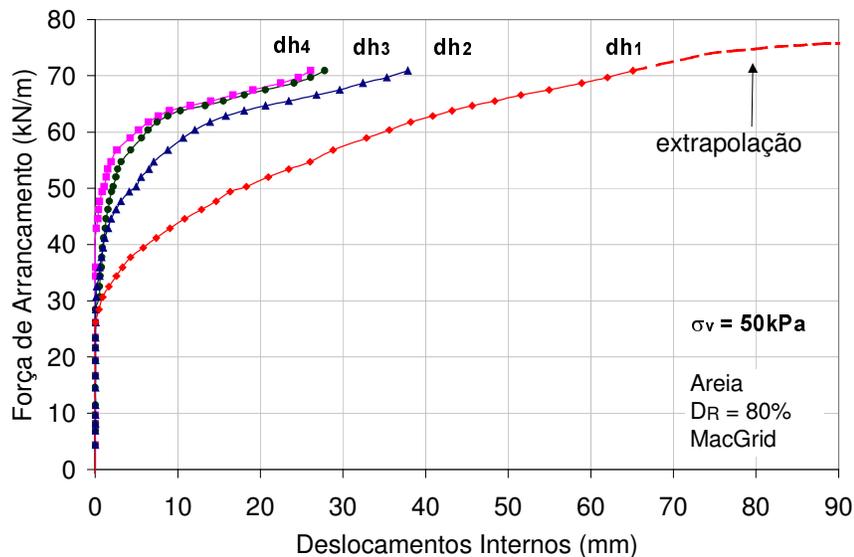


Figura 80 - Extrapolação dos Resultados em Ensaio de Arrancamento

O comportamento da geogrelha ParaGrid está apresentado nas Figuras 81 e 82. Da mesma forma, a resistência ao arrancamento aumenta com o aumento da tensão confinante. No entanto, observa-se uma perda considerável de resistência após atingida a força de arrancamento máxima nos ensaios em areia. Durante o arrancamento, os elementos transversais desta geogrelha se desprenderam dos longitudinais, o que poderia justificar tal perda de resistência.

Ressalta-se que, a geogrelha ParaGrid suporta valores mais elevados de confinamento (50kPa) sem ruptura dos elementos da malha. O mecanismo de ruptura por tração é governado pela resistência à tração da geogrelha. De acordo com o exposto no Capítulo 5, a ParaGrid apresenta resistência à tração superior às demais, o que explica tal comportamento durante os ensaios de arrancamento.

O efeito da tensão confinante nos resultados dos ensaios de arrancamento executados com a geogrelha MacGrid está apresentado nas Figuras 83 a 85. A força de arrancamento aumenta com a tensão confinante, com o valor máximo sendo atingido para grandes deslocamentos frontais da geogrelha.

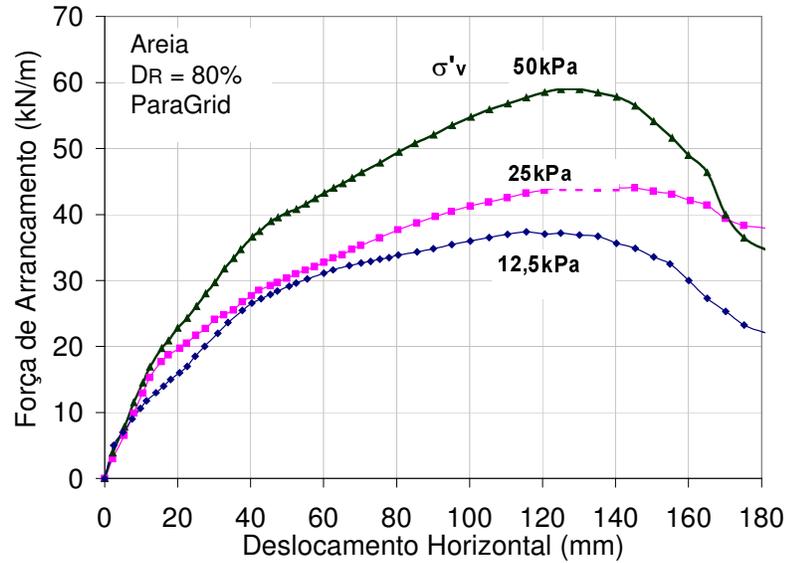


Figura 81 - Ensaio de Arrancamento: ParaGrid em Solo Arenoso ( $D_R = 80\%$ )

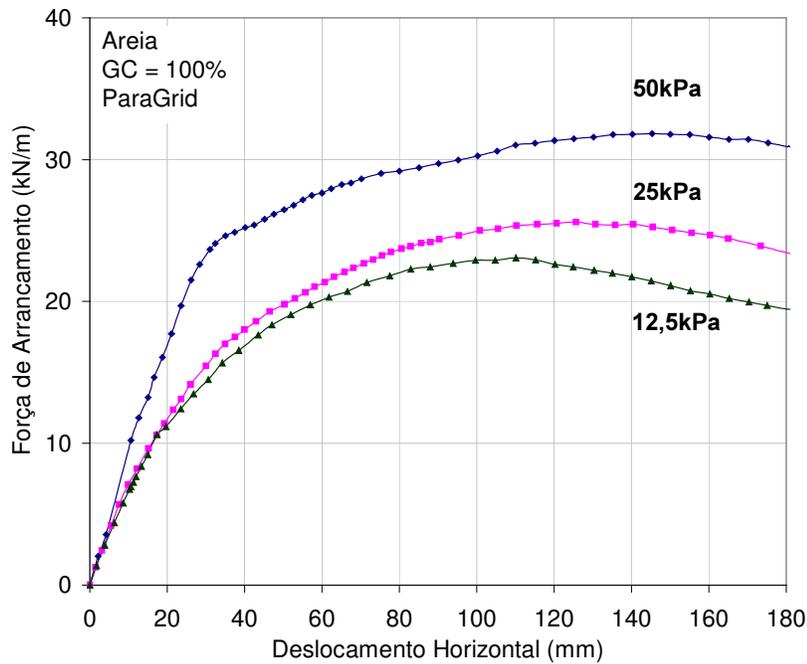


Figura 82 - Ensaio de Arrancamento: ParaGrid em Silte argiloso ( $GC = 100\%$ )

Nos ensaios executados sob tensões confinantes superiores a 50kPa, observou-se o mecanismo de ruptura por tração da malha, independente do tipo e da densidade relativa do solo. Esse valor de tensão confinante vertical corresponde a uma altura de aterro da ordem de 2,5m. Os resultados demonstram

que apenas a geogrelha ParaGrid é capaz de suportar tensões dessa magnitude sem romper por tração.

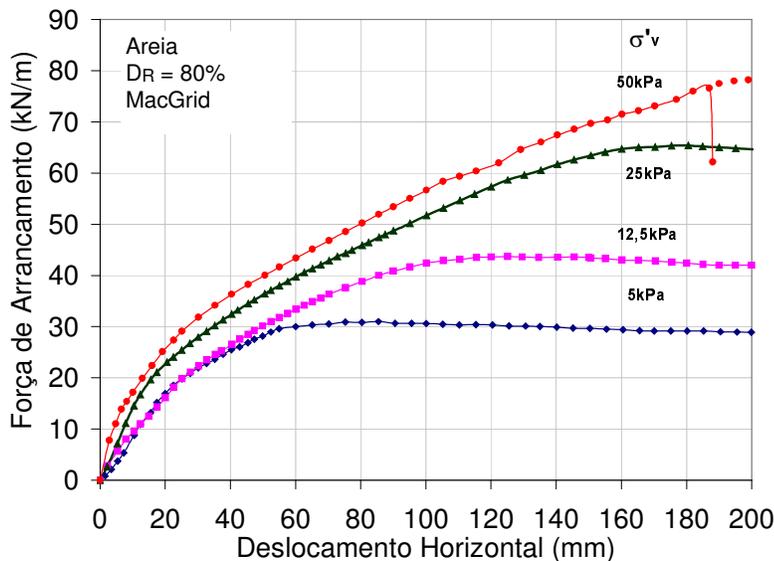
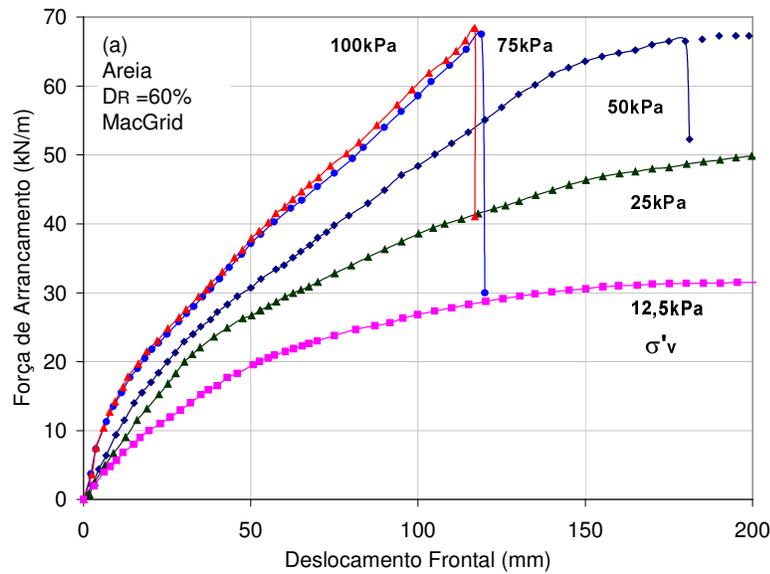


Figura 83 - Ensaio de Arrancamento: MacGrid em Solo Arenoso ( $D_R = 80\%$ )

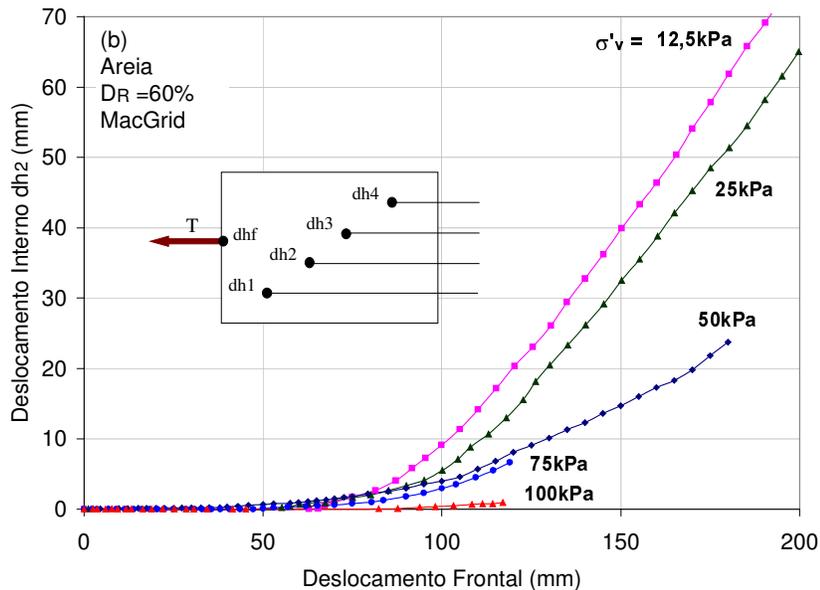
No caso de solo arenoso, com densidade relativa de 60%, foram executados ensaios para 5 níveis de tensão confinante (12,5; 25; 50; 75 e 100kPa). Analisando os resultados apresentados na Figura 84, pode-se concluir que:

- A tensão confinante governa o mecanismo de ruptura. Para baixos níveis de confinamento (12,5 e 25kPa), ocorre somente a ruptura por arrancamento. A geogrelha apresenta altos valores de deslocamentos internos;
- À medida que o confinamento aumenta, há uma transição do tipo de mecanismo. O ensaio executado sob tensão confinante de 50kPa apresenta um mecanismo de ruptura composta. Observa-se inicialmente, o deslocamento interno da geogrelha, até o momento em que ocorre a ruptura por tração.
- Nos ensaios executados para altos valores de confinamento (75 e 100kPa), o excesso de sobrecarga inibe os deslocamentos internos da geogrelha, ocasionando o aumento da resistência ao arrancamento e a ruptura da geogrelha na garra.
- A partir de uma determinada tensão confinante limite (75kPa), só ocorre a ruptura por tração da malha e as curvas obtidas são praticamente coincidentes. Neste caso, não foi possível uma extrapolação dos resultados,

uma vez que não há uma tendência de comportamento ao arrancamento. O mecanismo foi puramente de tração simples.



(a) Variação da Força de Arrancamento com a Tensão Confinante.



(b) Deslocamentos Internos ao longo da Geogrelha

Figura 84 - Ensaio de Arrancamento: MacGrid em Solo Arenoso ( $D_R = 60\%$ )

Na Figura 85, estão apresentados os resultados dos ensaios executados com a geogrelha MacGrid, embutida em silte argiloso. A geogrelha rompe por tração da malha para um nível de confinamento de 50kPa. A ruptura ocorre para

um deslocamento frontal da garra de 149mm. Para baixas tensões confinantes, observa-se o arrancamento da geogrelha da massa de solo.

Ressalta-se que, nos ensaios apresentados nas Figuras 83 e 84, a geogrelha MacGrid rompeu por tração para uma tensão confinante de 50kPa. No entanto, essa ruptura ocorreu para diferentes valores de deslocamentos frontais da garra de arrancamento. No ensaio executado com  $D_R$  igual a 80%, o deslocamento frontal na ruptura foi de 190mm. Para uma densidade relativa de 60%, a ruptura ocorreu para um deslocamento frontal de 178mm. Uma explicação para este fato pode estar relacionada com a deformação sofrida pela geogrelha durante o ensaio. Em ambos os casos, observou-se uma ruptura composta, ou seja, inicialmente a geogrelha se deforma, até o momento em que rompe por tração. O item 7.3.2 apresenta maiores detalhes sobre a influência da densidade relativa nos deslocamentos da geogrelha durante o arrancamento.

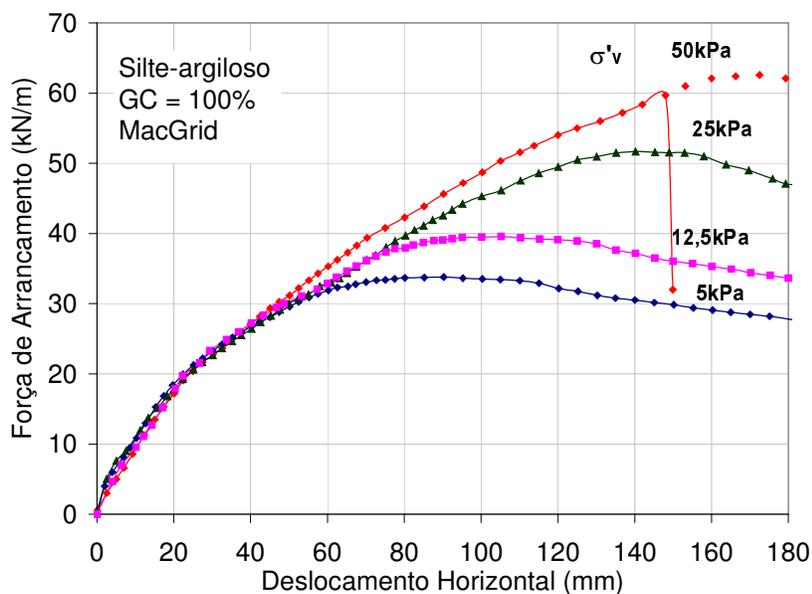


Figura 85 - Ensaios de Arrancamento: MacGrid em Silte Argiloso (GC = 100%)

As Figuras 86 e 87 mostram a variação da força de arrancamento em função da tensão confinante vertical, para os 3 tipos de geogrelha e os 2 tipos de solo. As linhas contínuas representam os ensaios onde observou-se a ruptura por arrancamento. As linhas pontilhadas indicam a ruptura por tração da malha e estes ensaios estão representados por pontos vazados (foram obtidos por extrapolação). Os resultados sugerem uma correlação aproximadamente linear

entre a tensão confinante vertical e a força de arrancamento, enquanto ocorre somente a ruptura por arrancamento da geogrelha.

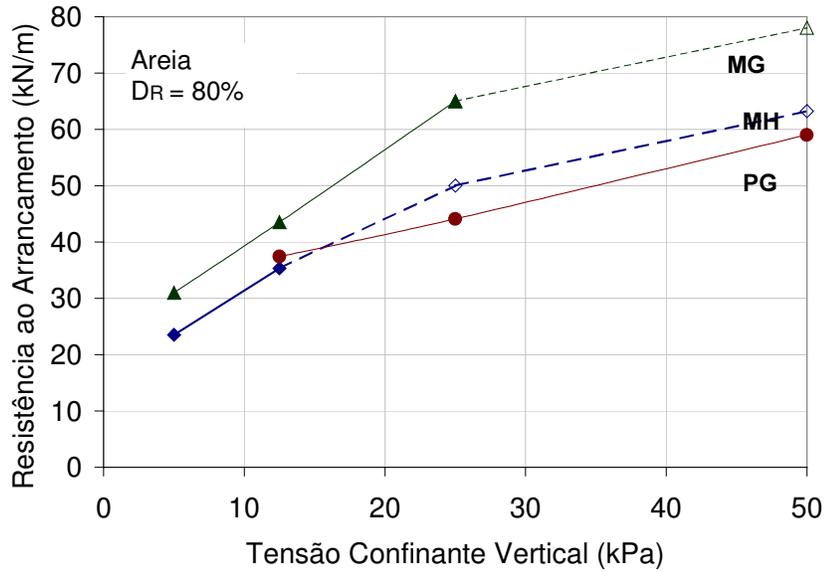


Figura 86 – Variação da Resistência ao Arrancamento com a Tensão Confinante: Areia

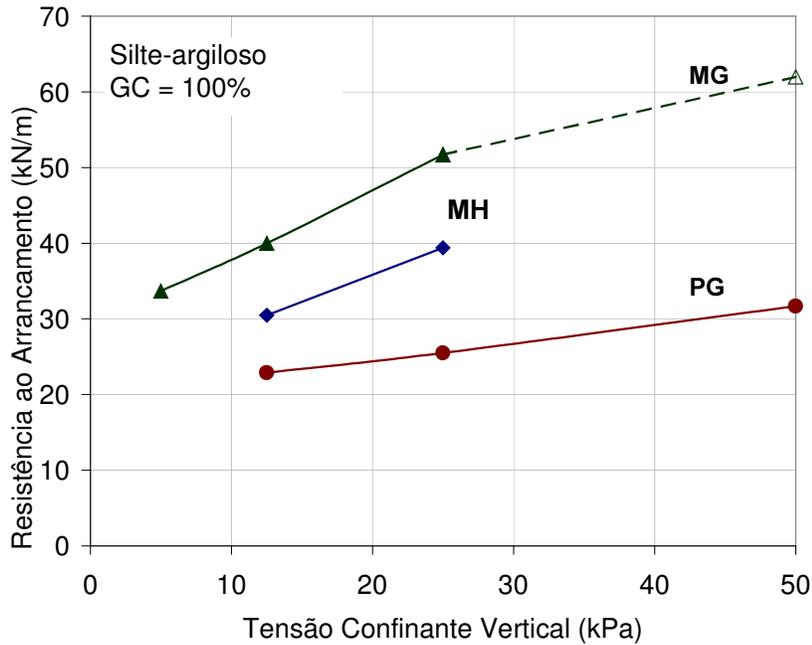


Figura 87 - Variação da Resistência ao Arrancamento com a Tensão Confinante: Silte Argiloso

É interessante observar que, quando os deslocamentos medidos no instante da ruptura são plotados em função da tensão confinante (Figura 88), o comportamento também é linear. Quanto maior o confinamento, maior o deslocamento necessário para induzir a ruptura da inclusão por arrancamento. Nesta figura, estão apresentados tanto os deslocamentos frontais, quanto os deslocamentos registrados no TT<sub>1</sub>, no ensaio executado com a geogrelha MacGrid, em areia ( $D_R=80\%$ ). Em ambos os casos, o comportamento é o mesmo, demonstrando existir uma correlação aproximadamente linear entre a tensão confinante vertical e os deslocamentos no instante da ruptura.

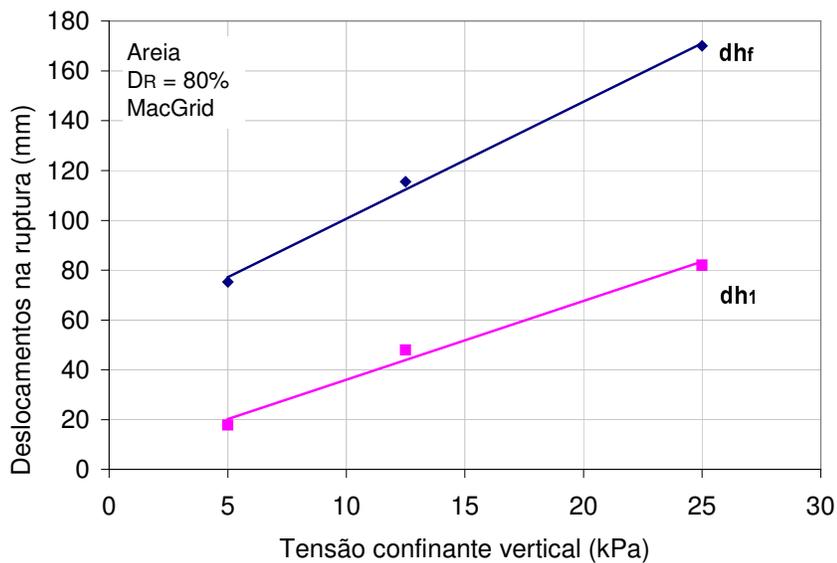


Figura 88 - Deslocamentos Horizontais Medidos no Instante da Ruptura por Arrancamento, em Função da Tensão Confinante

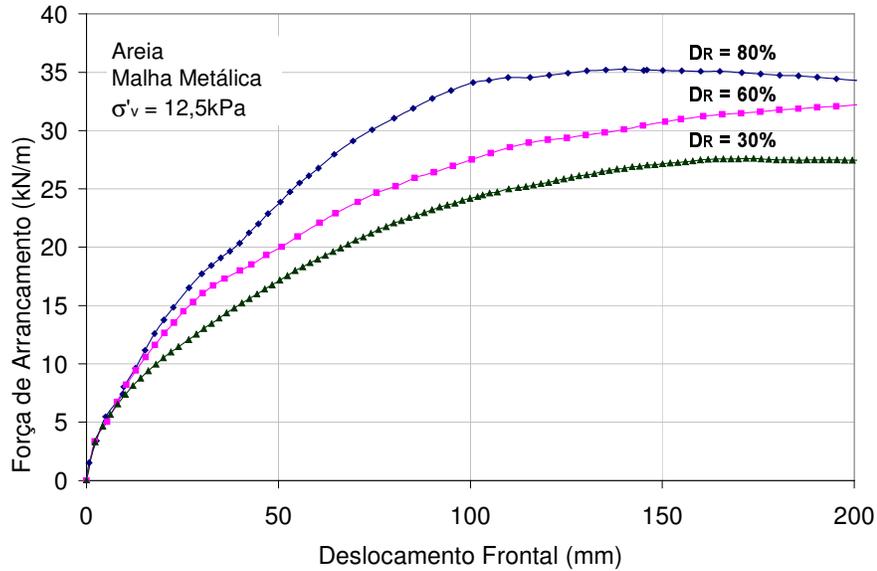
### 7.3.2. Densidade Relativa

As Figuras 89 e 90 apresentam a variação da força de arrancamento com o deslocamento frontal nos ensaios executados com a malha metálica, embutida em solo arenoso, sob diferentes valores de densidade relativa (30, 60 e 80%). Nestes ensaios, a amostra foi submetida a níveis de confinamento de 12,5 e 25kPa, respectivamente.

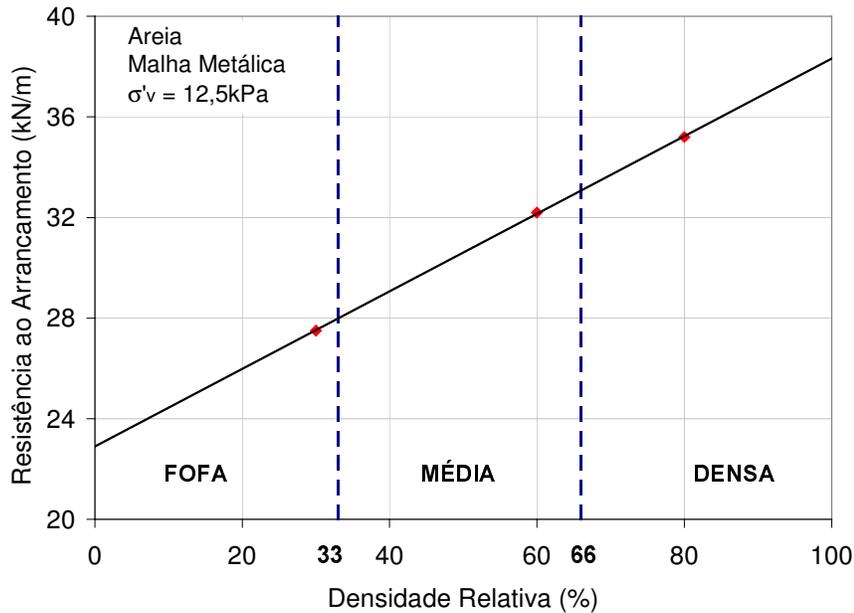
A densidade relativa tem efeito semelhante ao da tensão confinante na resistência da interface solo-geogrelha. O aumento da densidade relativa ocasiona um aumento na resistência ao arrancamento. Os solos densos são mais resistentes e rígidos do que os solos fofos. Como consequência, o deslocamento

da geogrelha diminui com o aumento da densidade, aumentando o módulo de deformabilidade e a força de arrancamento.

Para valores de tensão confinante de 12,5kPa (Figura 89), observa-se a ruptura por arrancamento da geogrelha, independente da densidade relativa da areia. A resistência ao arrancamento aumenta cerca de 30% quando a densidade do solo passa de 30 a 80%, sob esse nível de confinamento.



(a) Variação da Força de Arrancamento com os Deslocamentos Frontais



(b) Variação da Resistência ao Arrancamento com a Densidade Relativa

Figura 89 - Efeito da Densidade Relativa no Arrancamento com  $\sigma'_v = 12,5\text{kPa}$

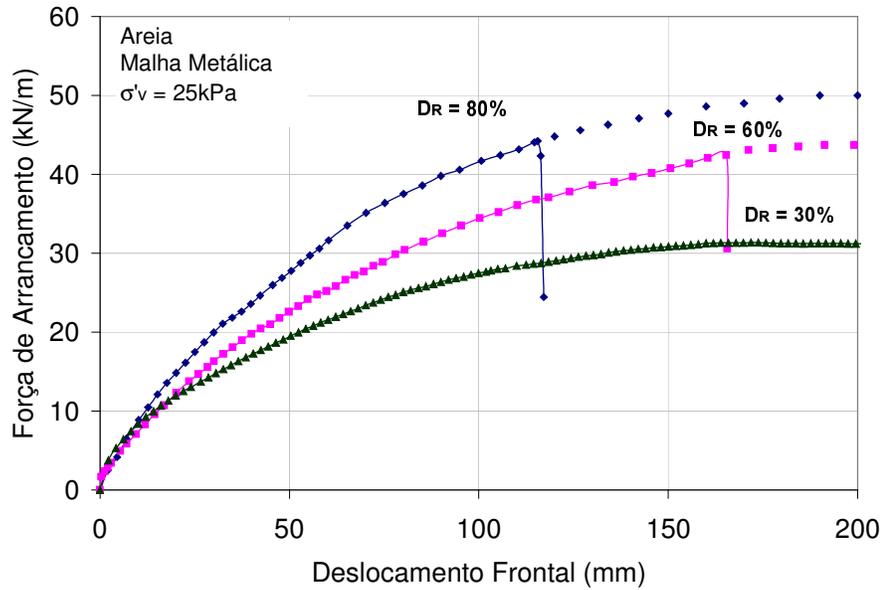
Quando a resistência ao arrancamento é plotada em função da densidade relativa (Figura 89b), nota-se que existe uma correlação aproximadamente linear entre elas. O comportamento observado indica um valor médio de resistência ao arrancamento de aproximadamente 25kN/m para a areia no estado fofo ( $D_R < 33\%$ ) e 37kN/m para areia densa ( $D_R > 66\%$ ). Cabe ressaltar que esses valores são válidos apenas para o tipo de areia ensaiado, sob condições de confinamento de 12,5kPa.

Nos ensaios executados sob uma tensão confinante de 25kPa (Figura 90), observa-se que no estado mais fofo da areia ( $D_R=30\%$ ), a geogrelha rompe por falta de aderência com o solo (arrancamento) para uma força de arrancamento de 31,3kN/m. No entanto, nos estados mais densos ( $D_R=60$  e  $80\%$ ), a geogrelha rompe por falta de resistência à tração. A força de arrancamento máxima registrada para os solos mais densos foi de 42,4kN/m para uma densidade relativa de 60% e 44,2kN/m para  $D_R=80\%$ . Mais uma vez, observa-se um aumento de 30% na resistência da interface solo-geogrelha quando a densidade relativa do solo passa de 30% a 80%.

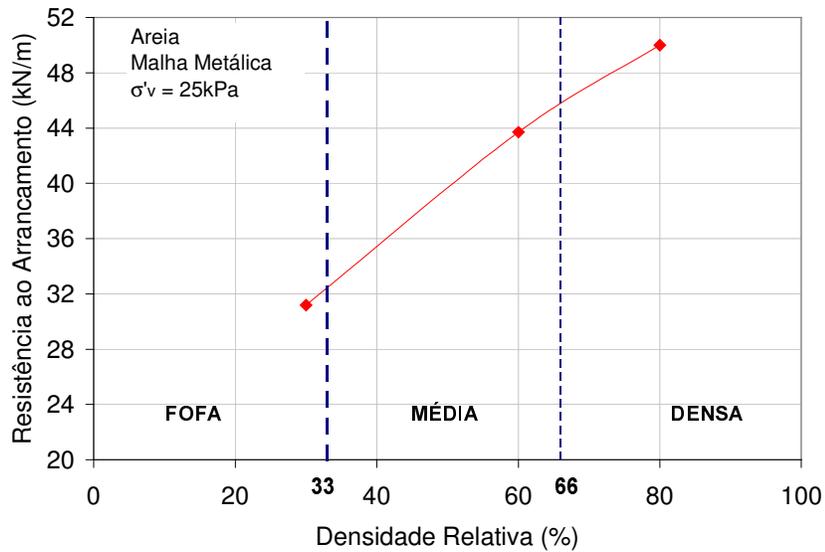
Na Figura 90(b), apresenta-se a variação da força de arrancamento máxima em função da densidade relativa. A resistência ao arrancamento aumenta com o aumento da densidade relativa, enquanto ocorre somente a ruptura por arrancamento da geogrelha. A partir de um valor limite de densidade relativa, ocorre a ruptura por tração da malha e a curva torna-se assintótica na horizontal.

A Figura 91 mostra os deslocamentos internos ( $dh_3$ ) medidos no ponto 3 (localizado a 40mm da extremidade posterior da grelha). Pode-se constatar que, similar ao efeito da tensão confinante, o aumento da densidade relativa inibe os deslocamentos ao longo da geogrelha, gerando altos esforços tangenciais nos pontos próximos à aplicação da força de arrancamento.

As leituras do *tell-tail* 3 ( $TT_3$ ) indicam que o aumento da densidade relativa dificulta o início do processo de deslocamento da geogrelha na região confinada. Para baixos valores de densidade relativa ( $D_R=30\%$ ), o ponto 3 começa a se deslocar para um deslocamento frontal de 28mm. No entanto, no estado mais denso ( $D_R=80\%$ ), este mesmo ponto só se desloca quando o deslocamento frontal atinge 60mm. Isso significa que, até este momento, os deslocamentos internos da geogrelha estão impedidos, conseqüentemente, a resistência ao arrancamento aumenta.



(a) Variação da Força de Arrancamento com os Deslocamentos Frontais



(b) Variação da Resistência ao Arrancamento com a Densidade Relativa

Figura 90 - Efeito da Densidade Relativa no Arrancamento com  $\sigma'_v = 25\text{kPa}$

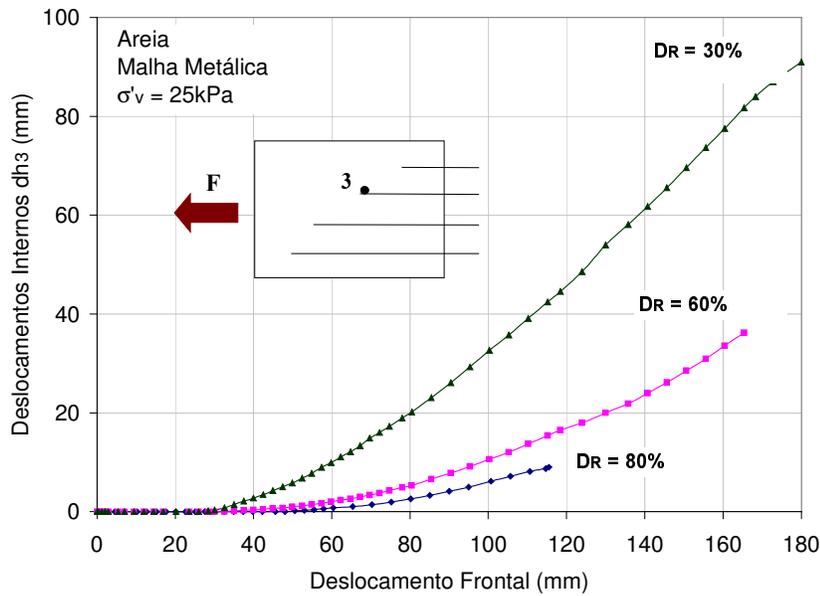


Figura 91 - Deslocamentos Internos no Ponto 3 durante o Arrancamento da Malha Metálica em Areia.

### 7.3.3. Tipo de Solo

A granulometria do solo é um dos fatores que afeta o comportamento das interfaces solo-geossintético (Gomes et al, 1994; Lopes e Lopes, 1999; Díaz, 2000; etc.). Esta influência ainda é mais acentuada quando o geossintético é uma geogrelha.

No programa experimental, foram utilizados 2 tipos distintos de solo, com o objetivo de avaliar a influência da granulometria do solo no mecanismo de interação solo-geogrelha. Os solos utilizados foram apresentados e caracterizados no Capítulo 5 e consistem em uma areia média siltosa e um solo silto-argiloso.

O efeito do tipo e da granulometria do solo na resposta ao arrancamento está apresentado nas Figuras 92 a 94. Cada gráfico apresenta um conjunto de ensaios, executados com o mesmo tipo de geogrelha, mesmo nível de confinamento e diferentes tipos de solo. O solo silto-argiloso foi compactado na umidade ótima, atingindo um grau de compactação de 100%. A areia foi preparada para uma umidade de aproximadamente 10% e densidade relativa de 80%. Sob estas condições, pode-se dizer que ambos os solos encontram-se em estado denso.

No caso da malha metálica embutida em solo arenoso, sob 12,5kPa de confinamento (Figura 92a), a resistência ao arrancamento aumenta cerca de 16% quando comparada à resistência da mesma geogrelha, imersa em solo silto argiloso. Para um nível de tensão confinante de 25kPa (Figura 92b), a geogrelha rompe por tração no ensaio executado em areia. Este comportamento não foi observado no solo silto-argiloso. A força de arrancamento cresce continuamente até o momento em que ocorre a ruptura por arrancamento.

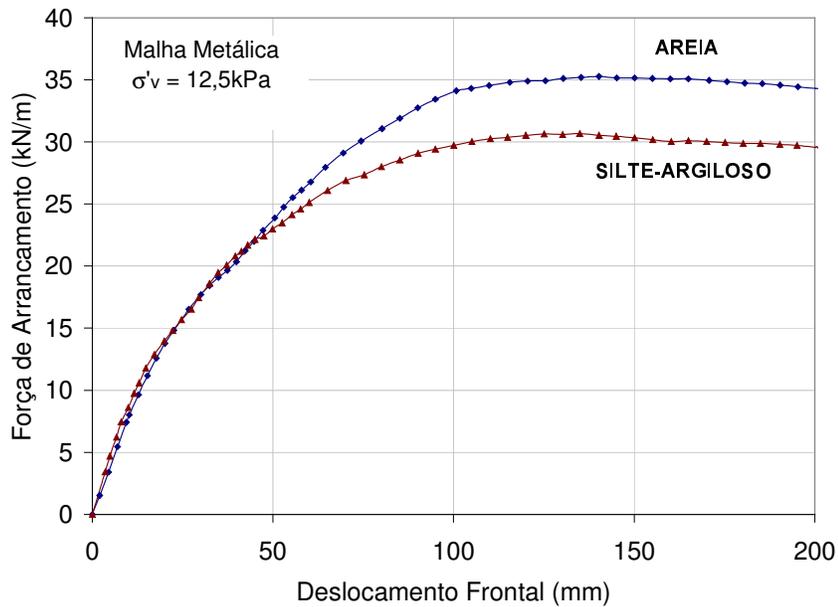
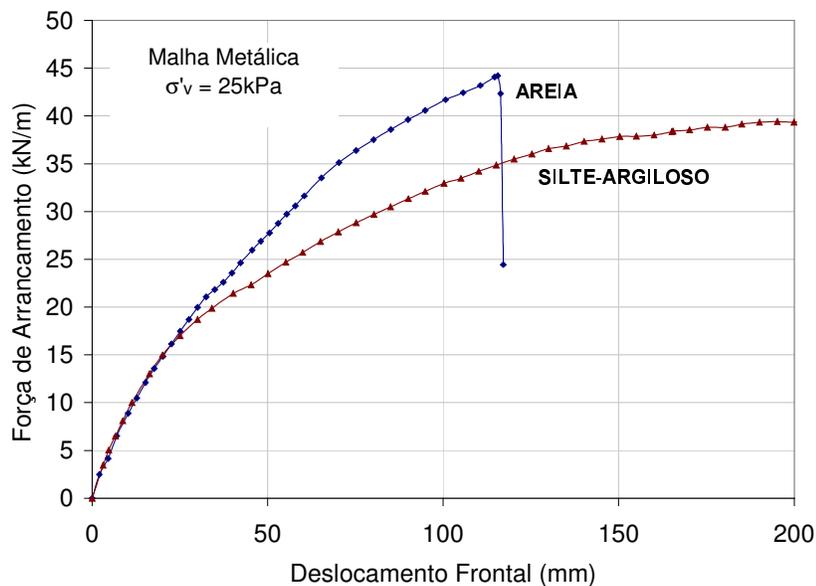
(a)  $\sigma'_v = 12,5\text{kPa}$ (b)  $\sigma'_v = 25\text{kPa}$ 

Figura 92 - Efeito do Tipo de Solo no Arrancamento: Malha Metálica

Nos ensaios executados com a geogrelha ParaGrid (Figura 93), percebe-se um ganho de resistência significativo, para os 2 níveis de tensão confinante vertical. Durante os ensaios executados com o silte argiloso, observou-se que esta geogrelha deslizava com facilidade, apresentando altos valores de deslocamentos internos e pouca resistência ao arrancamento. O ganho de resistência registrado foi de aproximadamente 60% nos ensaios executados a 12,5kPa, e 70% nos ensaios executados sob um confinamento de 25kPa.

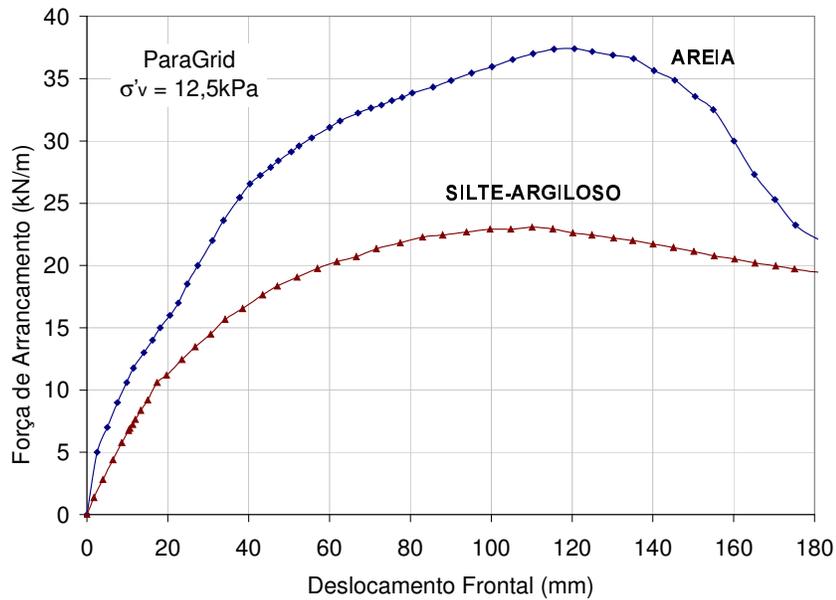
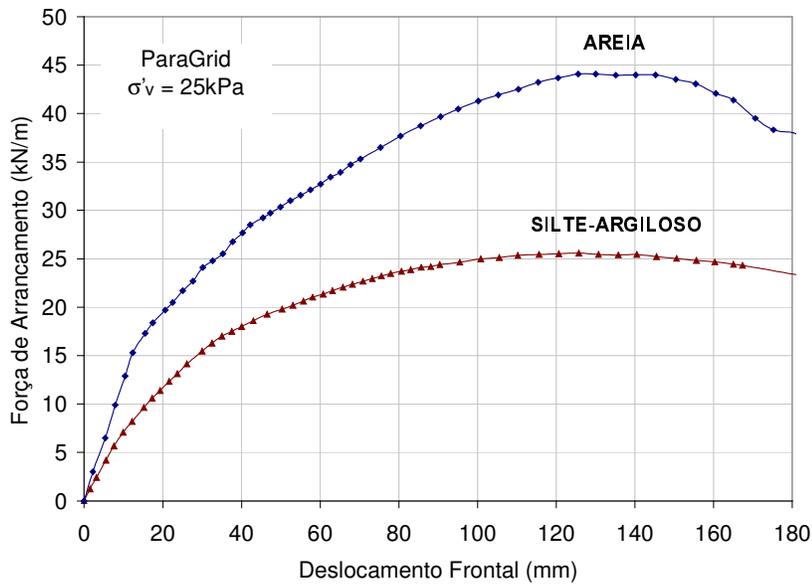
(a)  $\sigma'_v = 12,5\text{kPa}$ (b)  $\sigma'_v = 25\text{kPa}$ 

Figura 93 - Efeito do Tipo de Solo no Arrancamento: ParaGrid

A Figura 94 ilustra o efeito do tipo de solo na resistência ao arrancamento da geogrelha MacGrid. O ganho de resistência é mais uma vez constatado, quando se utiliza o solo arenoso. Observa-se também, que o arrancamento da geogrelha imersa em silte argiloso ocorre para deslocamentos frontais menores. Este fato demonstra a menor aderência existente entre este tipo de geogrelha e o solo mais fino.

Os resultados mostram que os ensaios executados com a areia apresentam uma resistência ao arrancamento superior, independente do tipo de geogrelha ensaiada e do nível de confinamento aplicado à geogrelha. A partir desta observação, pode-se concluir que a dimensão dos grãos do solo influencia a resistência ao arrancamento. A Tabela 31 apresenta algumas características referentes à granulometria dos solos ( $D_{50}$ ) e à geometria das geogrelhas ( $S$ ). Nesta Tabela,  $D_{50}$  indica o diâmetro médio das partículas de solo e  $S$  representa a menor abertura da malha da geogrelha.

A Figura 95 apresenta a variação da resistência ao arrancamento em função do diâmetro médio das partículas de solo ( $D_{50}$ ) para as 3 geogrelhas, sob diferentes níveis de confinamento. Os valores plotados foram obtidos dos gráficos apresentados nas Figuras 86 e 87.

Os resultados sugerem que a resistência ao arrancamento aumenta com o aumento da dimensão dos grãos. Cabe comentar que para baixos níveis de confinamento, o ganho de resistência ao arrancamento é proporcional ao aumento da tensão confinante vertical ( $\sigma'_v$ ). As curvas obtidas são aproximadamente paralelas. No entanto, à medida que o confinamento aumenta, verifica-se um ganho de resistência mais acentuado quando a dimensão dos grãos é maior. Os resultados indicam que há uma maior dificuldade de se produzir o arrancamento da geogrelha quando se utilizam solos de maior granulometria, sob níveis de confinamento mais elevados.

É importante salientar que a análise em termos do diâmetro médio só é válida quando os solos apresentam curvas granulométricas paralelas. O parâmetro  $D_{50}$  isolado não é representativo do solo, uma vez que dois tipos de solo podem apresentar o mesmo valor de  $D_{50}$  e possuírem uma distribuição granulométrica completamente distinta.

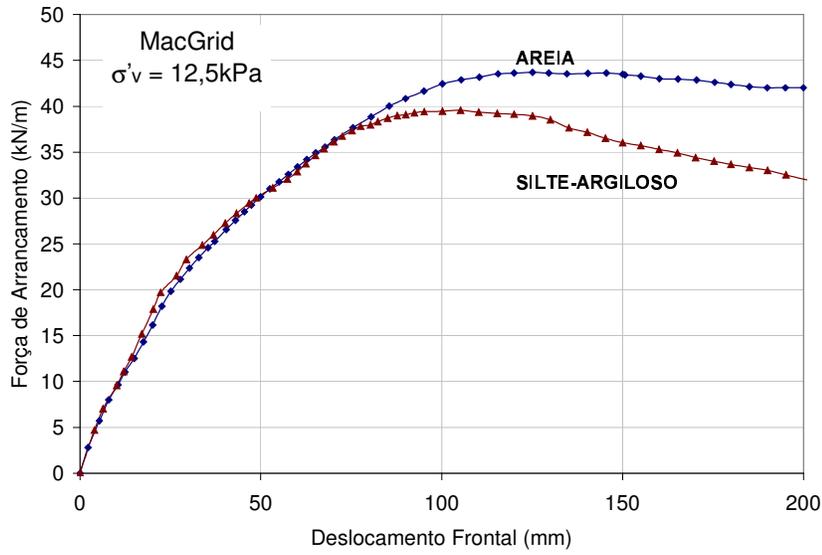
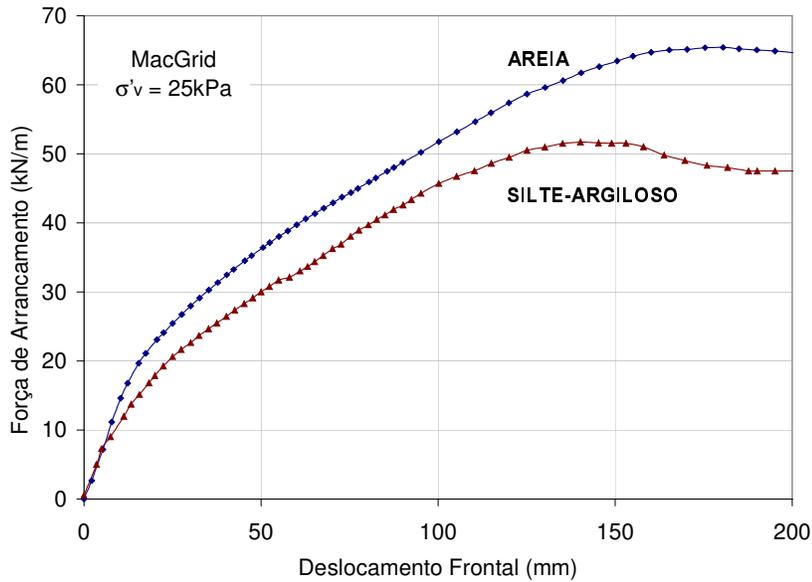
(a)  $\sigma'_v = 12,5\text{kPa}$ (b)  $\sigma'_v = 25\text{kPa}$ 

Figura 94 - Efeito do Tipo de Solo no Arrancamento: MacGrid

Tabela 31 - Características Físicas dos Solos e das Geogrelhas

$D_{50}$ (mm)		S (mm)		
Areia	Silte argiloso	MH	PG	MG
0,7	0,1	80	75	20

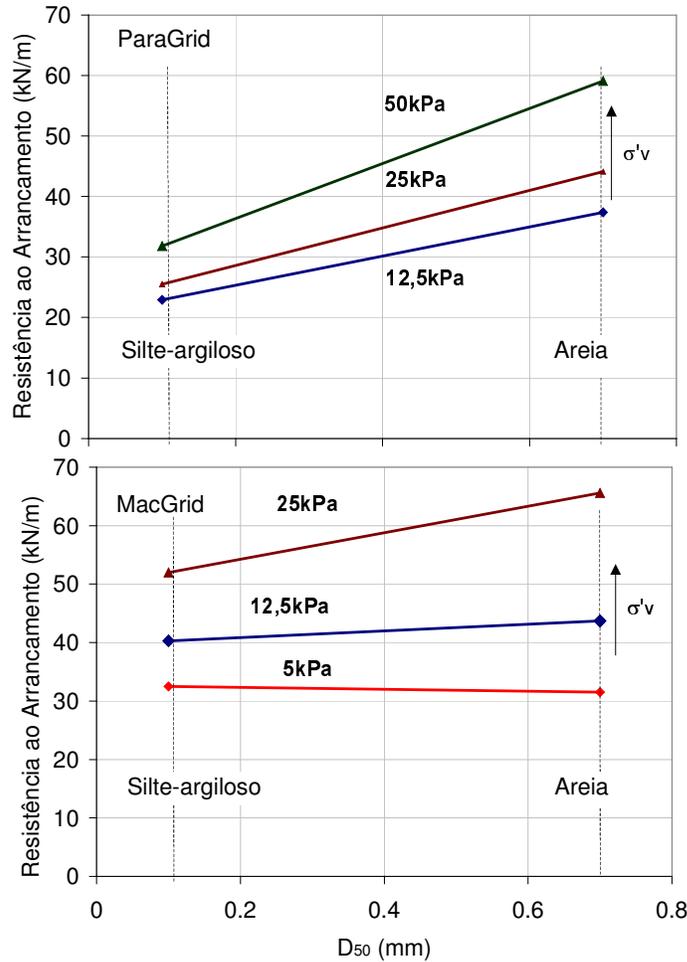


Figura 95 - Variação da Resistência ao Arrancamento com o Diâmetro dos Grãos ( $D_{50}$ )

Ressalta-se que, dependendo do tipo de geogrelha, o aumento da resistência ao arrancamento com o aumento do tamanho dos grãos é mais acentuado. A dimensão das aberturas das geogrelhas (dimensão da malha) e o tipo de polímero constituinte influenciam a resistência da interface e consequentemente, a resposta ao arrancamento.

#### 7.3.4. Tipo de Geogrelha

As geogrelhas utilizadas no programa experimental apresentam características distintas em relação à estrutura, padrão de malha, tipo de polímero constituinte, rigidez e resistência à tração sob condições não-confinadas. As

principais características das geogrelhas utilizadas no programa experimental estão listadas na Tabela 15.

Além das diferenças geométricas e de resistência à tração, as geogrelhas ensaiadas não possuem a mesma porcentagem de área aberta. O grande número de variáveis dificulta conclusões definitivas a respeito da influência da rigidez ou das características geométricas nos resultados dos ensaios. Entretanto, é possível apresentar uma discussão qualitativa a respeito do comportamento dos três tipos de geogrelha em solicitações de arrancamento.

As Figuras 96 e 97 ilustram o comportamento de cada uma das geogrelhas embutidas tanto em solo arenoso, quanto em solo silto-argiloso. Nestes ensaios, a tensão confinante vertical atuante nas geogrelhas foi de 12,5kPa e 25kPa, respectivamente. Pode-se observar que a geogrelha tecida MacGrid apresentou resistência ao arrancamento superior às demais, para ambos os tipos de solo.

Nos ensaios executados em solo arenoso, os resultados das geogrelhas ParaGrid e Metálica não apresentaram diferenças significativas em termos de resistência ao arrancamento. No entanto, no caso da geogrelha ParaGrid, observou-se uma perda brusca de resistência, após atingida a força de arrancamento máxima. Como comentado anteriormente, durante o arrancamento, os elementos transversais desta geogrelha se desprenderam dos longitudinais, o que poderia justificar tal comportamento.

Nos ensaios executados com solo silto-argiloso, a Malha Metálica apresentou uma resistência ao arrancamento superior à da ParaGrid. Durante o ensaio com solo silto-argiloso, a geogrelha ParaGrid era facilmente arrancada da massa de solo. Uma vez atingida a resistência ao arrancamento, a geogrelha deslizava com facilidade, demonstrando pouca interação com este tipo de solo.

A Figura 98 resume a resposta das 3 geogrelhas com relação à força de arrancamento no momento da ruptura, para um nível de confinamento de 12,5kPa. O gráfico apresentado demonstra que a geogrelha MacGrid mobiliza a maior resistência na interface, com ambos os tipos de solo. A menor interação ocorre com a geogrelha ParaGrid embutida em silte argiloso.

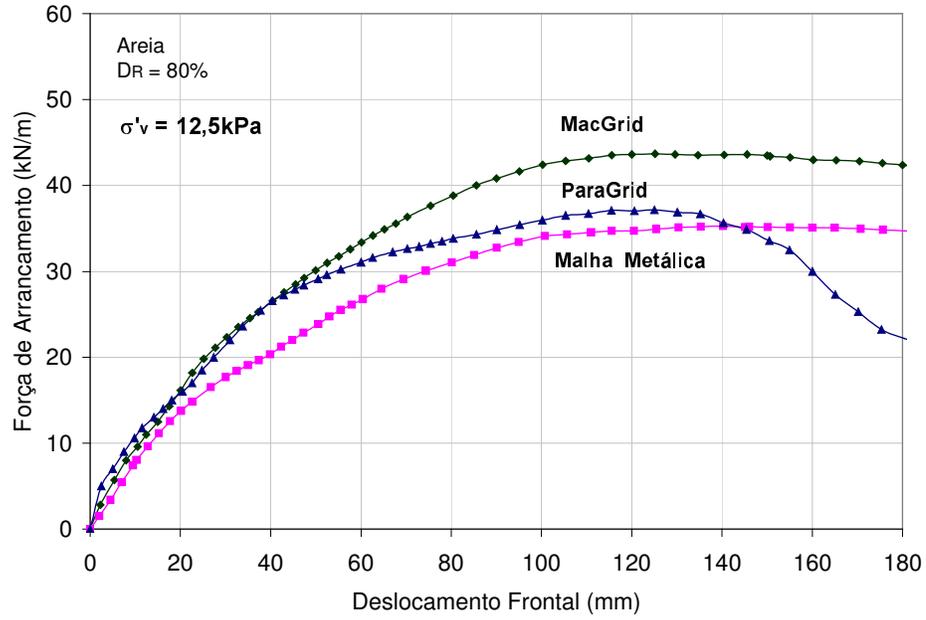


Figura 96 - Efeito do Tipo de Geogrelha: Arrancamento em Solo Arenoso

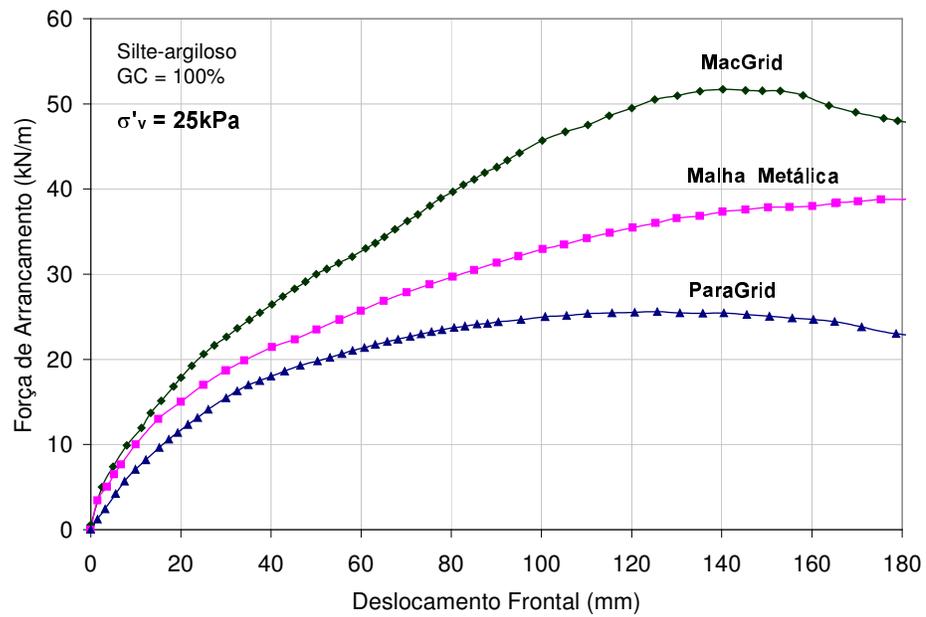


Figura 97 - Efeito do Tipo de Geogrelha: Arrancamento em Solo Silto-Argiloso

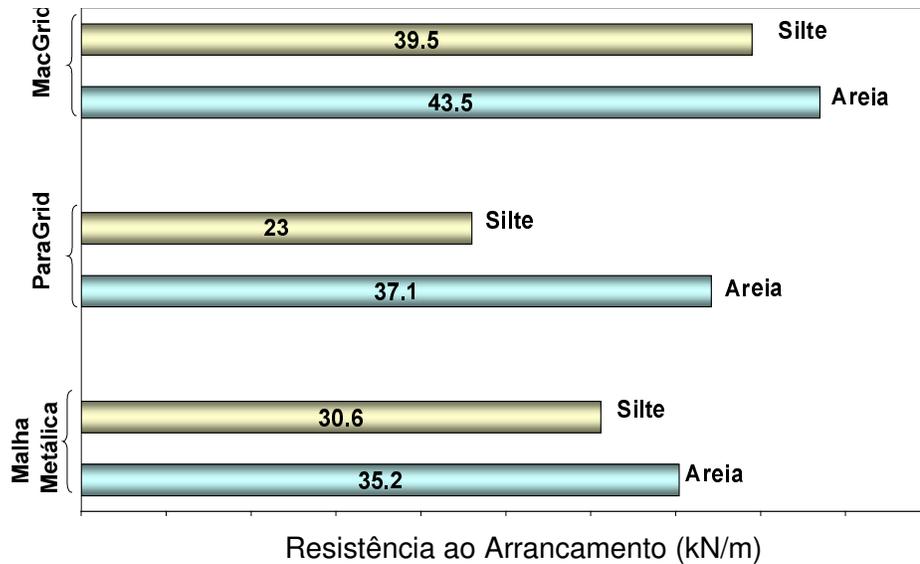


Figura 98 - Efeito do Tipo de Geogrelha na Resistência ao Arrancamento ( $\sigma'_v=12,5\text{kPa}$ )

A mesma comparação foi realizada em termos dos deslocamentos medidos no momento da ruptura. Na Figura 99, estão plotados os deslocamentos medidos no ponto 1 (localizado a 20cm da face frontal da geogrelha), na região confinada e os deslocamentos frontais, medidos na garra. Percebe-se que a Malha Metálica apresenta maiores deslocamentos frontais, independente do tipo de solo. Os deslocamentos frontais podem ser atribuídos à rigidez da geogrelha. Espera-se que, quanto maior a rigidez à tração da geogrelha, menor a diferença entre os deslocamentos frontais e os deslocamentos medidos na região confinada ( $\Delta dh = dh_f - dh_1$ ). Ou seja, menor a deformação do trecho não confinado. Isso pode ser comprovado com base nos resultados da ParaGrid. Esta geogrelha é a que apresenta o menor valor de  $\Delta dh$ , indicando que ela se desloca sem sofrer deformações significativas. De fato, como apresentado no Capítulo 5, a ParaGrid apresenta rigidez à tração superior às demais geogrelhas. Contrariamente, a malha metálica apresentou as maiores deformações na região não confinada, durante o processo de arrancamento. Como comentado anteriormente, a Malha Metálica sofre deformações significativas antes de iniciar o processo de arrancamento. Segundo Teixeira e Bueno (2002), as inclusões com rigidez baixa são incapazes de oferecer elevadas resistências ao arrancamento sem provocar grandes deformações no ponto de aplicação da carga.

Na Figura 99, pode-se observar também, que a geogrelha MacGrid mobiliza a resistência máxima ao arrancamento para menores deslocamentos relativos ( $dh_1$ ).

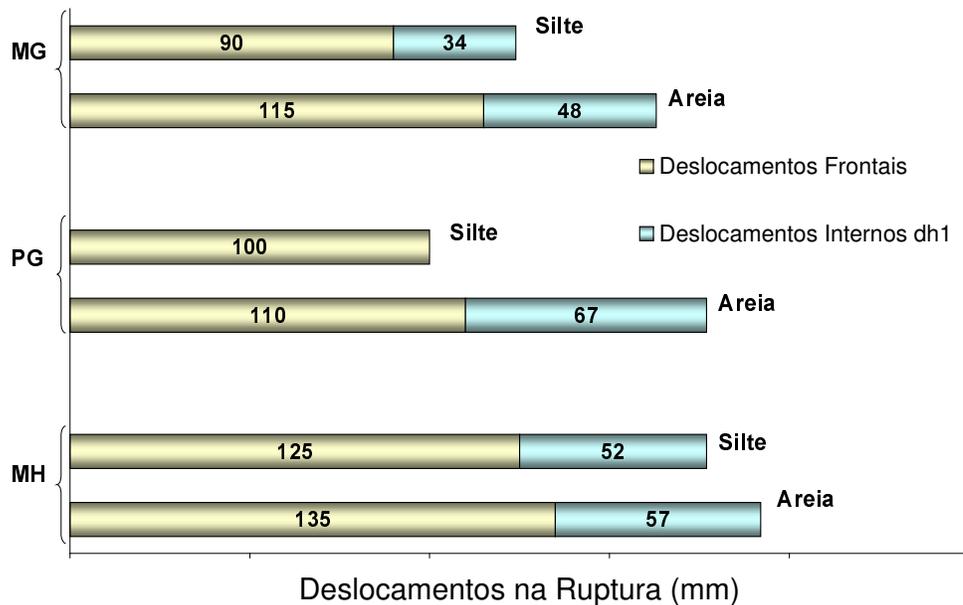


Figura 99 - Efeito do Tipo de Geogrelha nos Deslocamentos na Ruptura em Ensaios de Arrancamento

A declividade da curva Força de Arrancamento *versus* Deslocamento fornece uma idéia da rigidez da interface solo-geogrelha. No presente trabalho, optou-se por definir o parâmetro de rigidez  $K_{50}$ . Geometricamente,  $K_{50}$  é expresso pela declividade da reta secante para 50% da força máxima de arrancamento ( $P_{50}$ ). O parâmetro de rigidez  $K_{50}$  é obtido a partir da razão entre a força  $P_{50}$  e o deslocamento correspondente.

Esse parâmetro foi calculado a partir dos gráficos Força de Arrancamento *versus* Deslocamento Frontal e Força de Arrancamento *versus* Deslocamento Interno  $dh_1$ . Cabe ressaltar que o deslocamento interno  $dh_1$  é igual a zero até um determinado valor de força de arrancamento. Dessa forma, o parâmetro  $K_{50}$  será calculado como indica a Figura 100.

Os valores de  $K_{50}$ , calculados para os ensaios executados sob confinamento de 12,5kPa, estão apresentados na Figura 101. Percebe-se uma diferença significativa entre o valor de  $K_{50}$  calculado a partir dos deslocamentos internos e dos deslocamentos frontais. Essa diferença é mais acentuada para as geogrelhas

menos rígidas. Se as geogrelhas se comportassem como corpos rígidos, a rigidez da interface solo-grelha seria a mesma, independente da localização do ponto de medição dos deslocamentos.

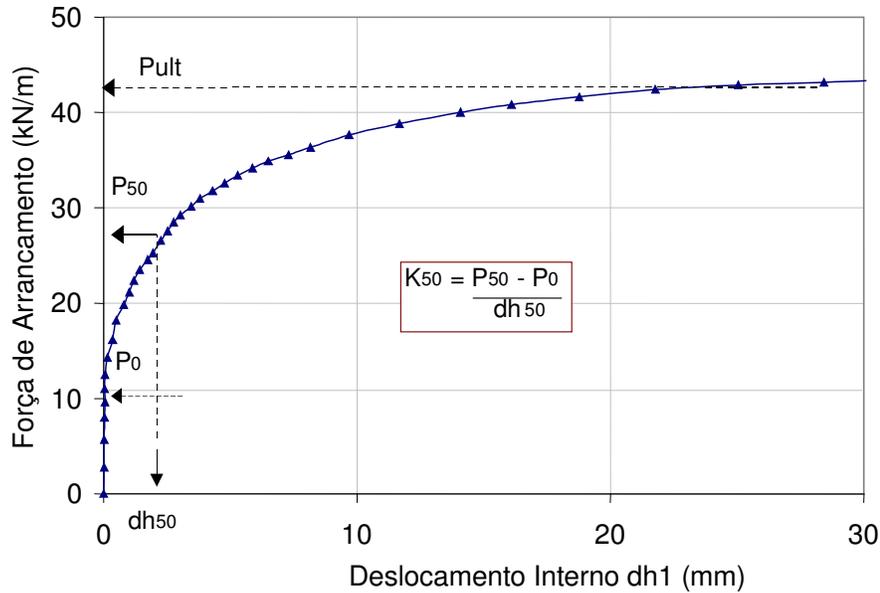


Figura 100 – Cálculo do parâmetro  $K_{50}$  a Partir dos Deslocamentos Internos  $dh_1$

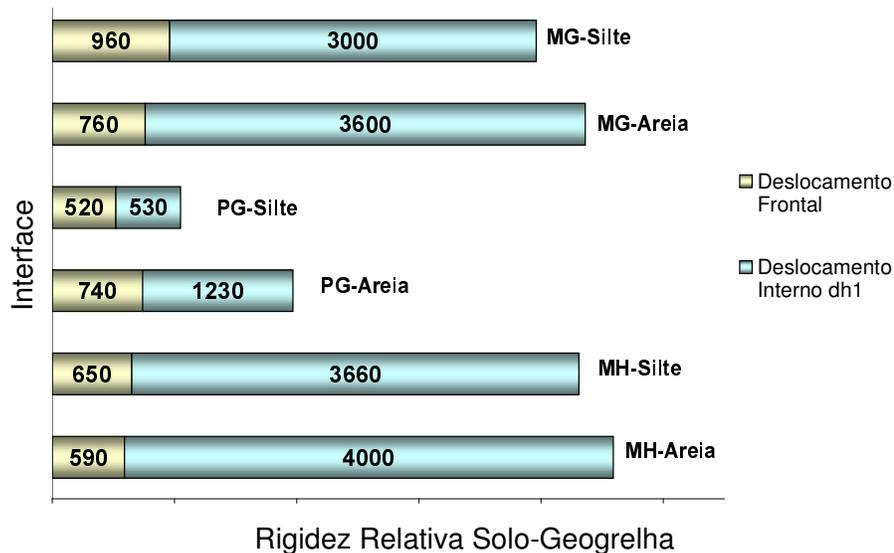


Figura 101 - Efeito do Tipo de Geogrelha no Parâmetro  $K_{50}$  ( $\sigma'_v=12,5\text{kPa}$ )

É interessante observar que a geogrelha ParaGrid, apesar de possuir rigidez à tração superior, apresenta uma rigidez  $K_{50}$  na interface inferior à MacGrid e à Malha Metálica. Esta observação sugere que a rigidez na interface possui uma

relação direta com a interação solo-reforço e não, com a rigidez à tração da geogrelha. No dimensionamento de maciços reforçados, a escolha do tipo de geogrelha deve levar em consideração a interação da inclusão com o tipo de solo envolvente e não apenas, a rigidez e a resistência à tração da geogrelha. Os ensaios de arrancamento sugerem que a geogrelha ParaGrid, apesar de possuir resistência e rigidez à tração elevadas, apresenta a menor interação com ambos os solos ensaiados. Esta geogrelha é, portanto, mais indicada quando se utilizam solos de granulometria mais grosseira, uma vez que as grandes aberturas da malha permitem um maior entrosamento com solos mais granulares.

Na tentativa de relacionar o tipo de geogrelha com a granulometria do solo, a Figura 102 ilustra a influência da razão  $S/D_{50}$  na resposta ao arrancamento. Observa-se um aumento na resistência ao arrancamento quando a dimensão média ( $D_{50}$ ) dos grãos aumenta e a razão  $S/D_{50}$  diminui. Lopes (1998) chegou a conclusão semelhante a partir de resultados de ensaios de arrancamento com geogrelhas em areia.

Comparando-se as três geogrelhas ensaiadas, observa-se que a maior resistência ao arrancamento é atingida com a geogrelha MacGrid embutida em solo arenoso. Essa geogrelha é a que apresenta as menores aberturas e, portanto, a menor relação  $S/D_{50}$ . Jewell et al (1984) sugerem que a máxima interação ocorre quando a razão entre a menor abertura da geogrelha ( $S$ ) e o diâmetro médio dos grãos ( $D_{50}$ ) decresce para valores próximos à unidade.

Segundo os autores, quando o solo tem partículas com dimensões muito inferiores às aberturas das geogrelhas, a superfície de ruptura adapta-se à superfície lateral da grelha. À medida que a dimensão dos grãos aumenta, mantendo-se ainda inferior às aberturas da geogrelha, a superfície de ruptura é tangente aos elementos transversais da geogrelha. Quando a dimensão dos grãos é idêntica à das aberturas da grelha, as partículas de solo colocam-se de encontro aos elementos transversais do reforço, e a ruptura ocorre no interior da massa de solo. Neste caso, o coeficiente de interação atinge o valor máximo. A menor interação ocorre quando a dimensão das partículas de solo é tão grande que inibe a penetração dos grãos de solo nas aberturas da grelha.

Um fator também responsável pelo aumento da resistência ao arrancamento é a contribuição da resistência passiva do solo ao longo dos elementos transversais da geogrelha. Esta contribuição depende de fatores tais como a tensão de confinamento, a geometria da geogrelha, a granulometria do solo, etc. O item 7.5 discute detalhadamente esta questão.

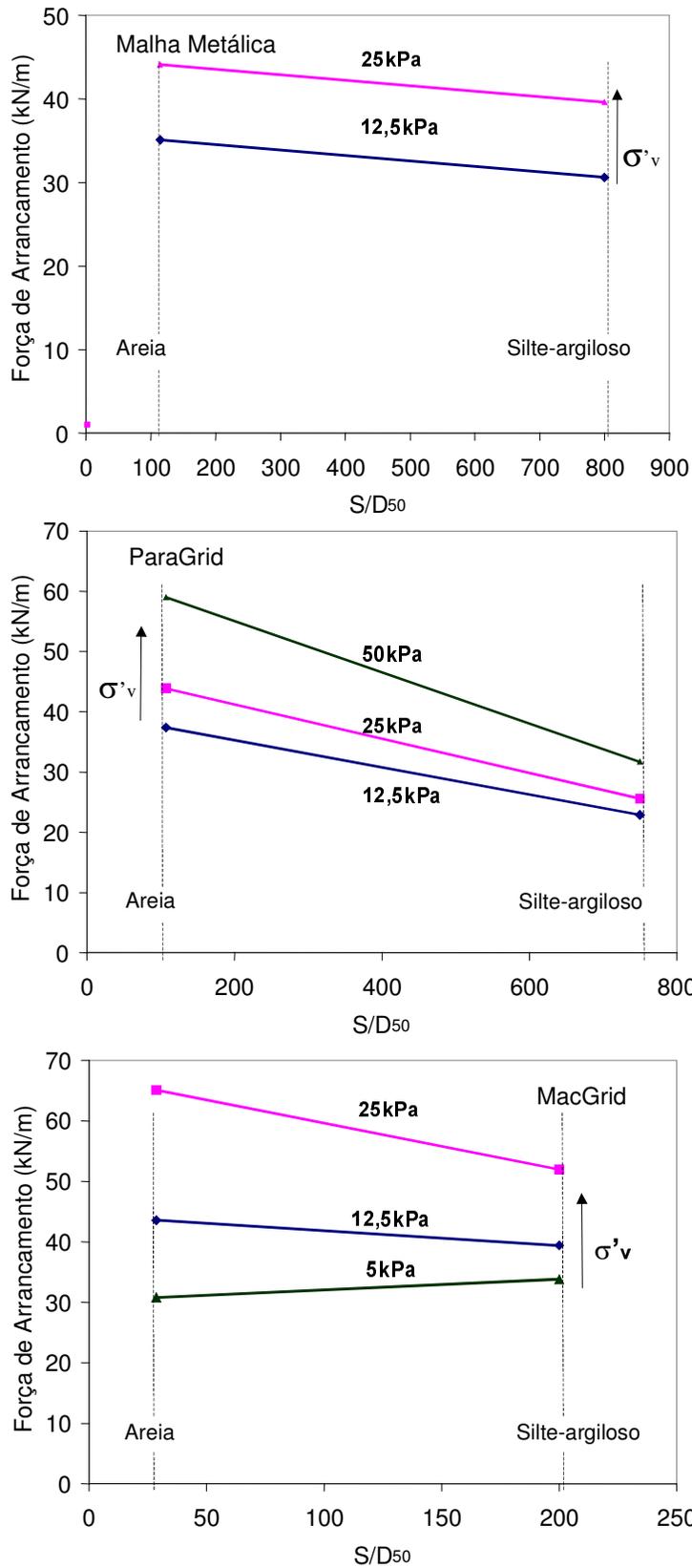


Figura 102 - Variação da Resistência ao Arrancamento com a Razão S/D<sub>50</sub>

#### 7.4. Obtenção da Tensão Cisalhante na Interface

Apesar do número significativo de publicações internacionais sobre os ensaios de arrancamento, os procedimentos para a obtenção da resistência ao arrancamento ainda não estão bem definidos ou normalizados. Dos ensaios de arrancamento obtém-se, por retro-análise, os parâmetros de atrito e adesão, necessários para projeto de maciços reforçados. Nas análises usuais de interação entre o solo e o reforço, propostas por Koerner (1998), pressupõe-se que as tensões cisalhantes na interface solo-geossintético são constantes e uniformemente distribuídas durante a sollicitação, e obedecem ao critério de Mohr-Coulomb.

A tensão de cisalhamento na interface é definida como a relação entre a força de arrancamento e a área da inclusão sollicitada ao arrancamento. Ressalta-se que a área sollicitada ao arrancamento varia durante o ensaio, uma vez que a geogrelha se desloca no interior da massa de solo. Sendo assim, a tensão de cisalhamento na interface deve ser calculada a partir da expressão:

$$\tau_{SG} = \frac{P_{ult}}{2B(L - dh)} \quad (71)$$

onde:  $P_{ult}$  = força de arrancamento máxima;  $B$  = largura da geogrelha;  
(L-dh) = comprimento da geogrelha na direção do arrancamento.

Uma vez monitorados os deslocamentos internos da geogrelha durante o arrancamento, a variação de comprimento da geogrelha (L-dh) foi calculada em função dos deslocamentos medidos no ponto 4. Como os deslocamentos na geogrelha não são uniformes devido às deformações sofridas, a correção de área deve ser realizada a partir dos deslocamentos medidos no ponto mais próximo à extremidade posterior da geogrelha.

A Figura 103 apresenta uma comparação entre as curvas tensão vs deslocamento na interface, calculadas em função da área inicial da geogrelha e das áreas corrigidas em função dos deslocamentos frontais ( $dh_f$ ) e dos deslocamentos medidos nos pontos 1 e 4 ( $dh_1$  e  $dh_4$ , respectivamente). Cabe recordar que o ponto 1 localiza-se a 20cm da extremidade frontal da geogrelha e o ponto 4 situa-se a 20cm da extremidade posterior. Estes resultados foram obtidos

a partir dos ensaios executados com a geogrelha MacGrid em areia ( $D_R = 80\%$ ), sob uma tensão confinante de 12,5kPa.

Pode-se perceber que a correção de área em função dos deslocamentos frontais conduz a uma superestimativa da tensão cisalhante na interface. Na realidade, os deslocamentos registrados na garra e no ponto 1 não devem ser considerados na correção da área, uma vez que a geogrelha não se desloca como um corpo rígido, e não há uma distribuição uniforme dos deslocamentos internos ao longo do seu comprimento. A correção de área deve ser realizada com base nos deslocamentos medidos na extremidade posterior da geogrelha. Quando não há monitoramento dos deslocamentos internos, deve-se considerar a área inicial. Desta forma, obtém-se resultados conservadores.

Os resultados indicam que a correção da área em função dos deslocamentos frontais superestima em 18% o valor da resistência ao cisalhamento, quando comparado ao valor obtido em função da área inicial. Quando a comparação é feita com a área corrigida em função dos deslocamentos na extremidade posterior da grelha, a superestimativa é de 13%.

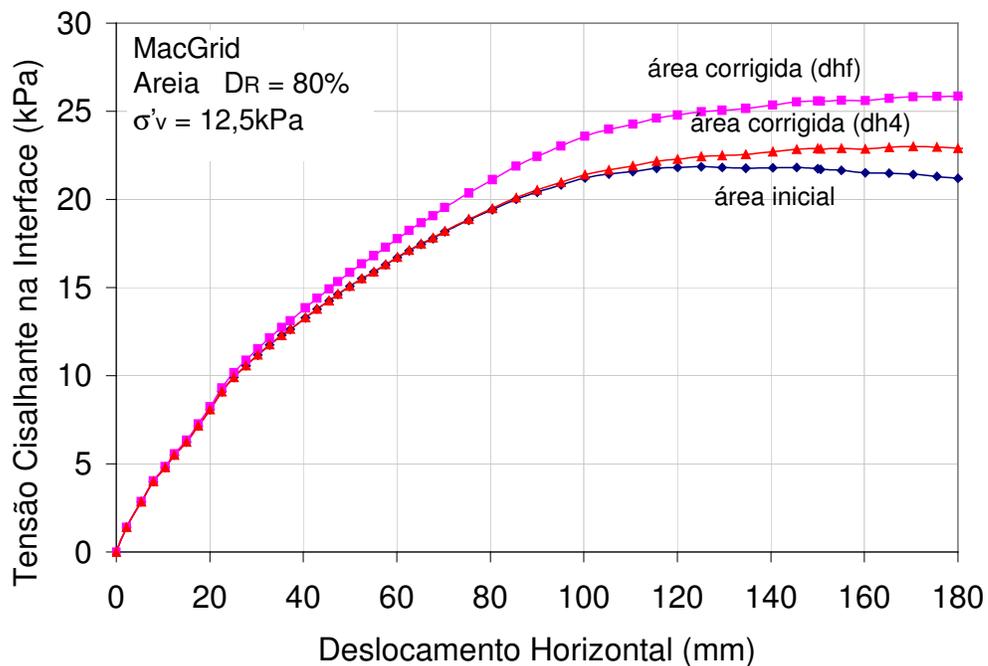


Figura 103 – Comparação dos Resultados de Arrancamento para as Diferentes Opções de Correção de Área da Geogrelha

## 7.5. Envoltórias de Resistência

Os valores máximos de tensão cisalhante na interface podem ser lançados em função da tensão confinante vertical  $e$ , assim, obter a envoltória de resistência ao arrancamento:

$$\tau_{SG} = c'_a + \sigma'_v \tan \delta' \quad (72)$$

onde:  $\tau_{SG}$  = tensão cisalhante média na interface (kN/m<sup>2</sup>);

$c'_a$  = adesão solo-geossintético (kN/m<sup>2</sup>);

$\sigma'_v$  = tensão normal efetiva (kN/m<sup>2</sup>);

$\delta'$  = ângulo de atrito na interface (°).

Os parâmetros de resistência de interface,  $c'_a$  e  $\delta'$ , são usualmente expressos em função dos parâmetros de resistência do solo em contato ( $c'$  e  $\phi'$ ), através dos coeficientes de interação ( $\lambda$  e  $f$ ), definidos como:

$$\lambda = \frac{c'_a}{c'} \quad (73)$$

$$f = \frac{\tan \delta'}{\tan \phi'} \quad (74)$$

Deste modo, a equação 72 pode ser reescrita como:

$$\tau_{SG} = \lambda c' + f \cdot \sigma'_v \cdot \tan \phi' \quad (75)$$

As Figuras 104 a 111 exibem as envoltórias de resistência para os 3 tipos de geogrelha e os 2 tipos de solo em ensaios de arrancamento. Observa-se que a resistência ao arrancamento aumenta com o aumento da tensão confinante de forma não linear.

A resistência à tração da geogrelha influencia a forma da envoltória. Até determinado nível de tensões verticais ocorre somente a ruptura por arrancamento da geogrelha da massa de solo. A partir de uma determinada tensão limite, ocorre a ruptura do material polimérico e a envoltória tende a se tornar assintótica na horizontal. A transição é governada pela resistência à tração da geogrelha.

Como comentado anteriormente, as condições de contorno do ensaio provocam a antecipação da ruptura da malha na região não confinada. Desta forma, os resultados dos ensaios em que a geogrelha rompeu por tração não

podem ser utilizados na obtenção dos parâmetros de resistência, por não representarem uma situação de arrancamento.

A partir das curvas força de arrancamento vs deslocamento frontal, procedeu-se a extrapolação dos resultados destes ensaios com base em uma tendência de comportamento (item 7.3.1). Nas envoltórias, estão ilustradas portanto 2 situações distintas do ensaio:

- 1) arrancamento da geogrelha da massa de solo;
- 2) ruptura por tração da malha.

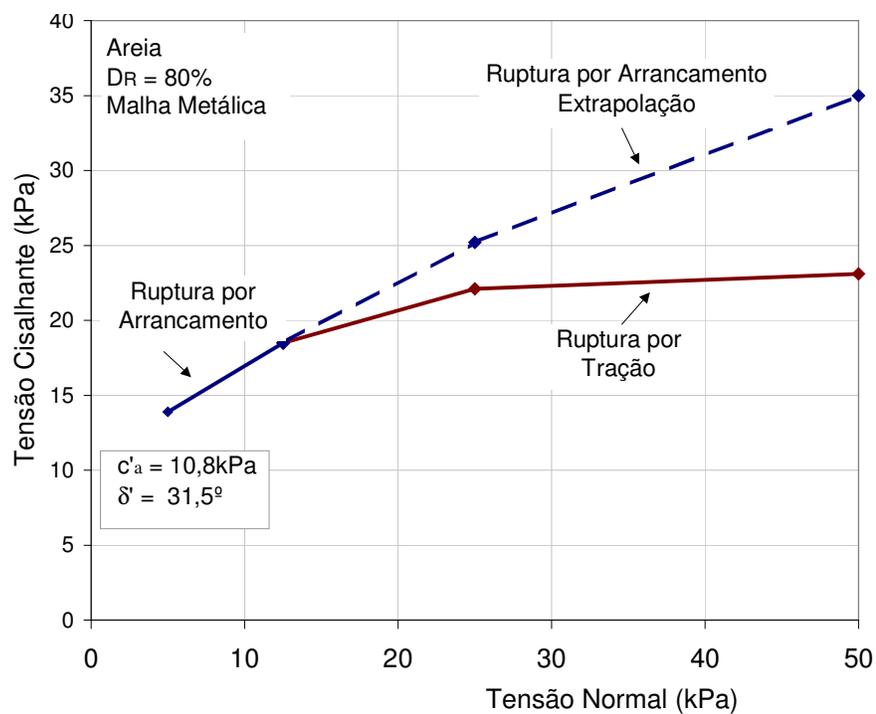


Figura 104 - Envoltória de Resistência ao Arrancamento: Malha Metálica em Areia ( $D_R=80\%$ )

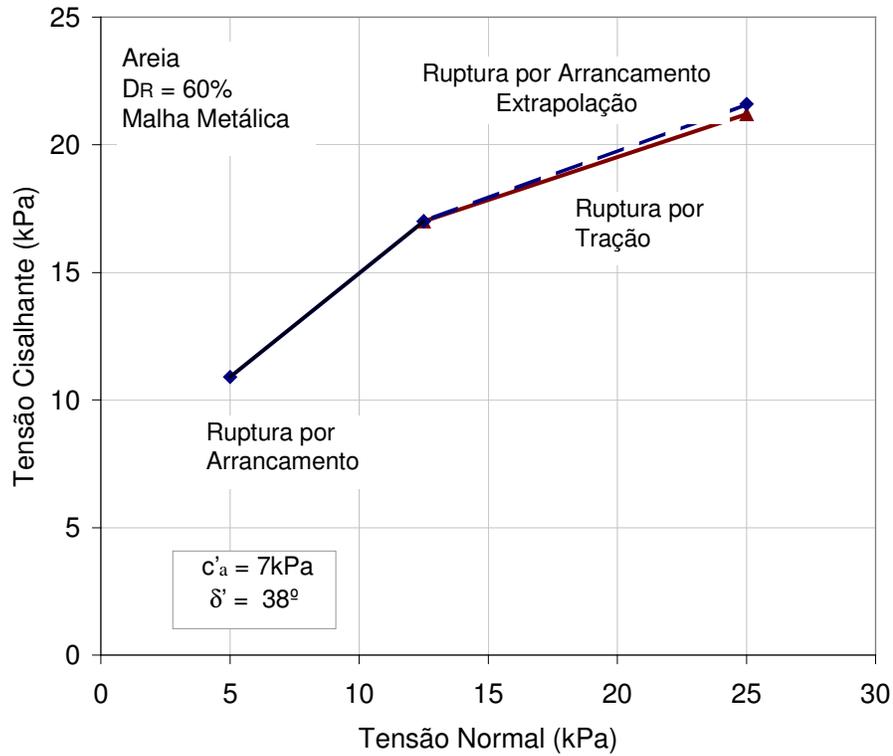


Figura 105 - Envoltória de Resistência: Malha Metálica em Areia ( $D_R = 60\%$ )

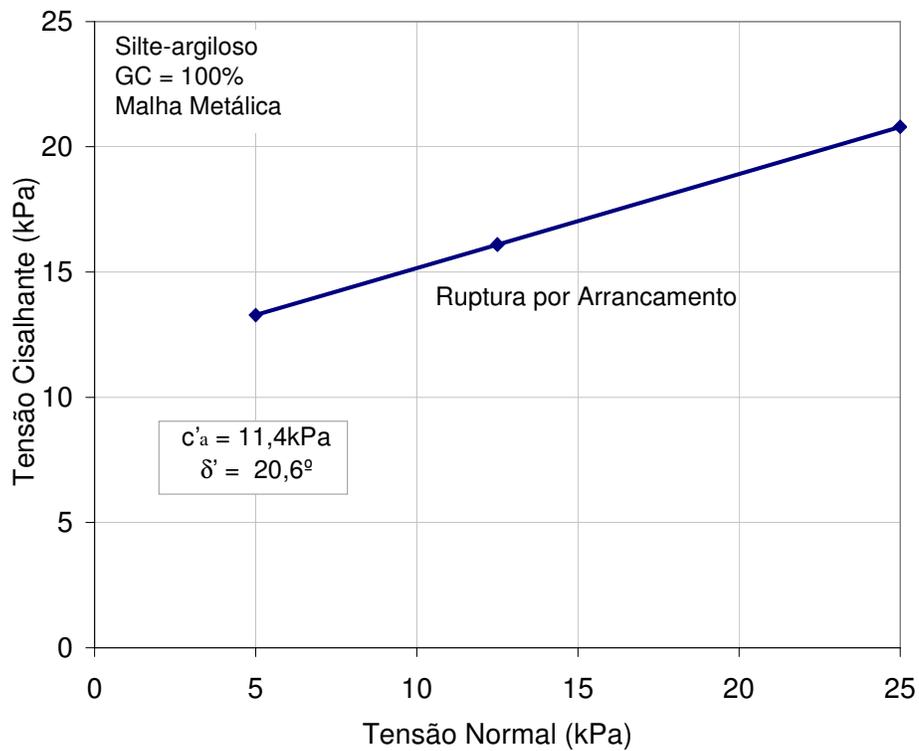


Figura 106 - Envoltória de Resistência: Malha Metálica em Silte Argiloso ( $GC = 100\%$ )

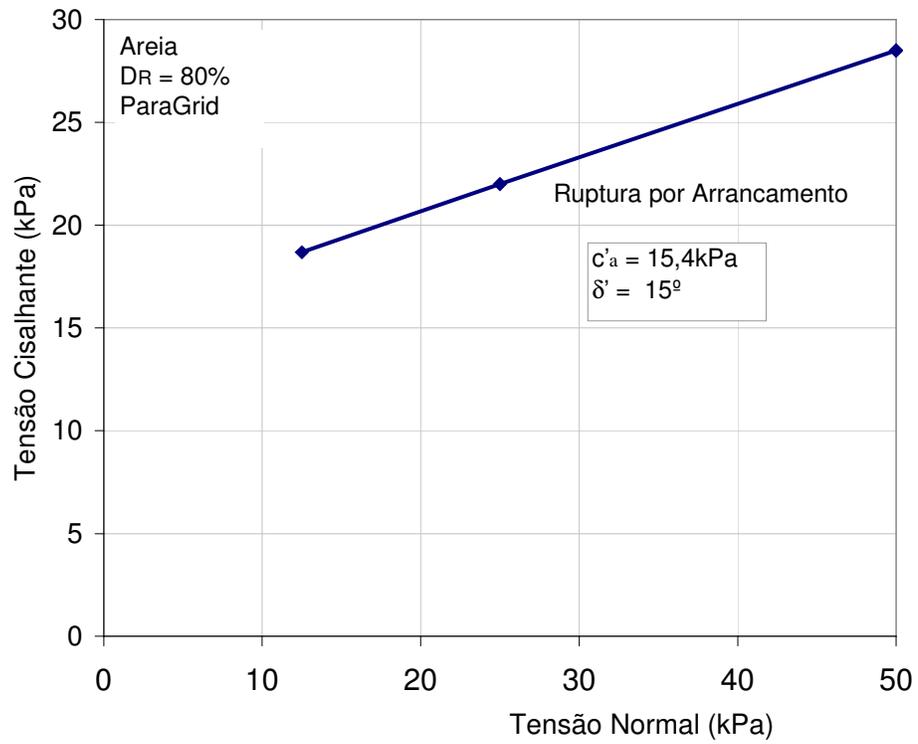


Figura 107 - Envoltória de Resistência: ParaGrid em Areia ( $D_R = 80\%$ )

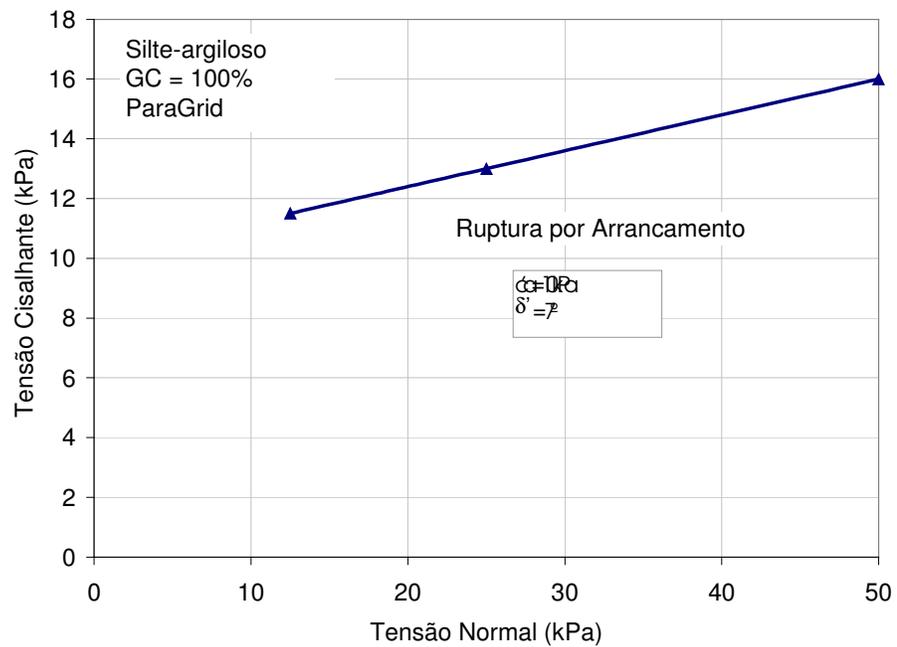


Figura 108 - Envoltória de Resistência: ParaGrid em Silte Argiloso ( $GC = 100$ )

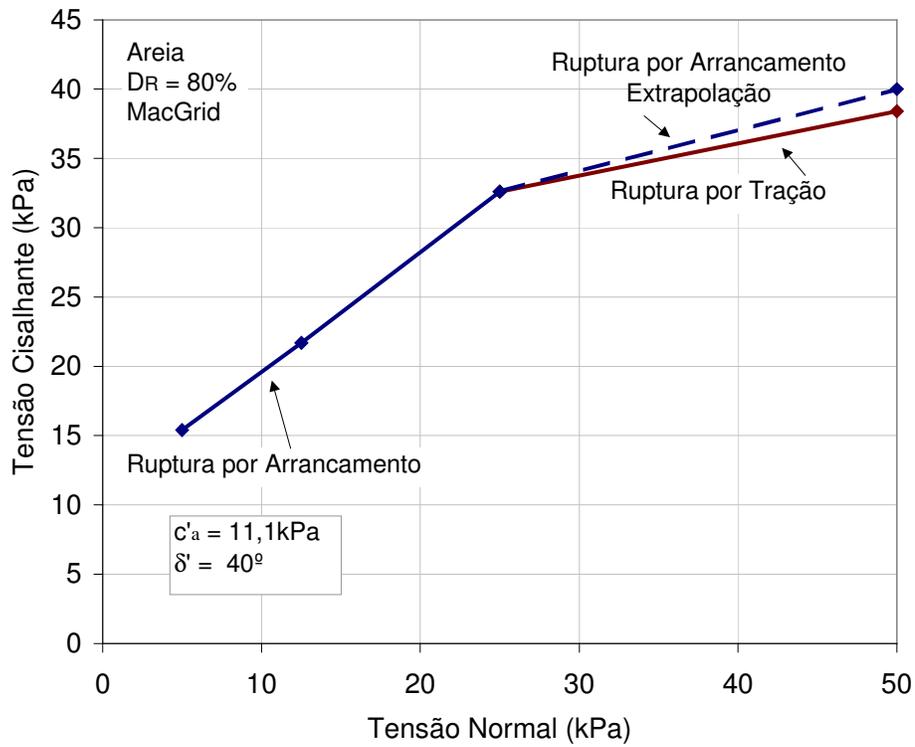


Figura 109 - Envoltória de Resistência: MacGrid em Areia ( $D_R = 80\%$ )

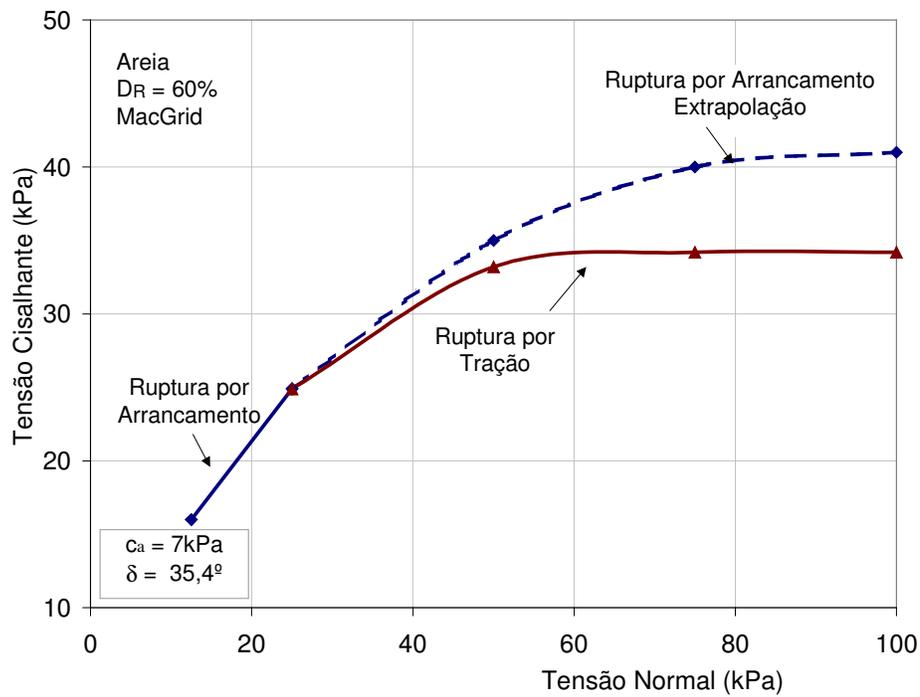


Figura 110 - Envoltória de Resistência: MacGrid em Areia ( $D_R = 60\%$ )

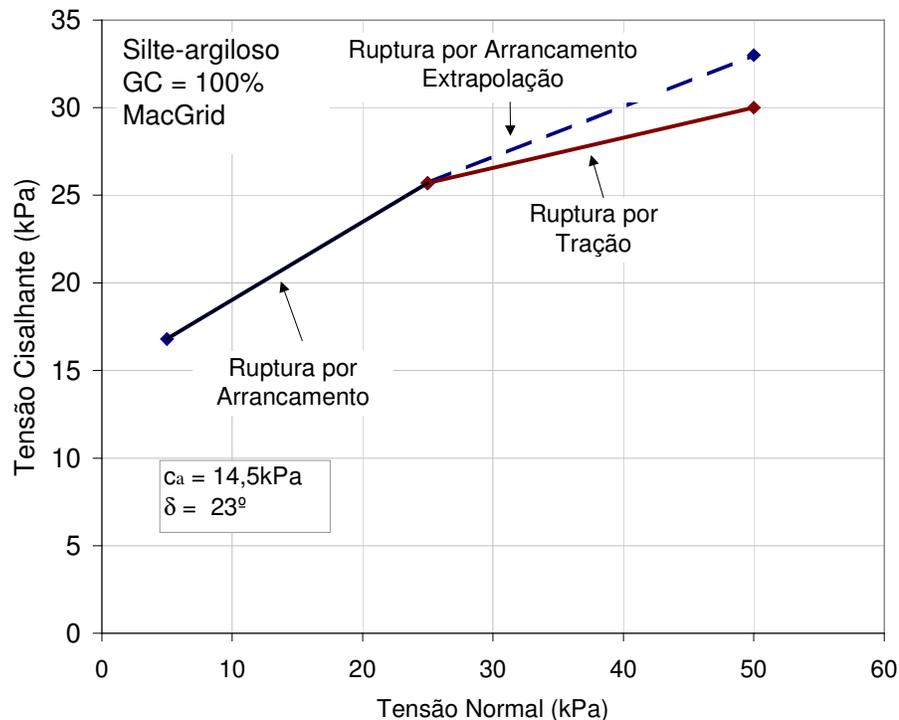


Figura 111 - Envoltória de Resistência: MacGrid em Silte Argiloso (GC = 100%)

A Figura 112 agrupa as envoltórias obtidas em todos os ensaios. Sendo assim, pode-se analisar a influência de fatores como densidade relativa, tipo de solo e tipo de geogrelha na resposta ao arrancamento. Cabe aqui constatar, mais uma vez, que:

- Observa-se um aumento da resistência quando o solo encontra-se em estado mais denso;
- As geogrelhas ensaiadas apresentaram valores superiores de resistência ao arrancamento quando imersas em solo arenoso. As envoltórias de resistência dos ensaios em areia encontram-se acima das envoltórias obtidas em silte argiloso, independente da geogrelha utilizada;
- A geogrelha MacGrid mobilizou a maior interação na interface para tensões confinantes inferiores a 25kPa. A partir deste valor, ocorre a ruptura por tração da malha e a redução do coeficiente de interação  $f$ . Este coeficiente pode ser obtido pela eq. 74 e é proporcional à inclinação do trecho inicial da curva  $\tau_{SG}$  vs  $\sigma'$ .
- A geogrelha ParaGrid apresentou coeficiente  $f$  reduzido, com ambos os tipos de solo. No entanto, os ensaios não indicaram ruptura da malha, mesmo para

altas tensões confinantes (50kPa). Este fato pode ser justificado pela maior resistência à tração desta geogrelha na direção longitudinal;

- Mesmo em areia fofa ( $D_R = 30\%$ ), a Malha Metálica apresentou resistência ao arrancamento superior à ParaGrid imersa em silte argiloso. Como já salientado, a geogrelha ParaGrid é arrancada com facilidade da massa de solo silto-argiloso, demonstrando baixa aderência com este tipo de solo.

Desta forma, pode-se concluir que a geogrelha MacGrid é a que desenvolve a maior interação na interface solo-geogrelha, seguida da Malha Metálica Hexagonal. No entanto, a ParaGrid é a que apresenta a maior resistência à tração.

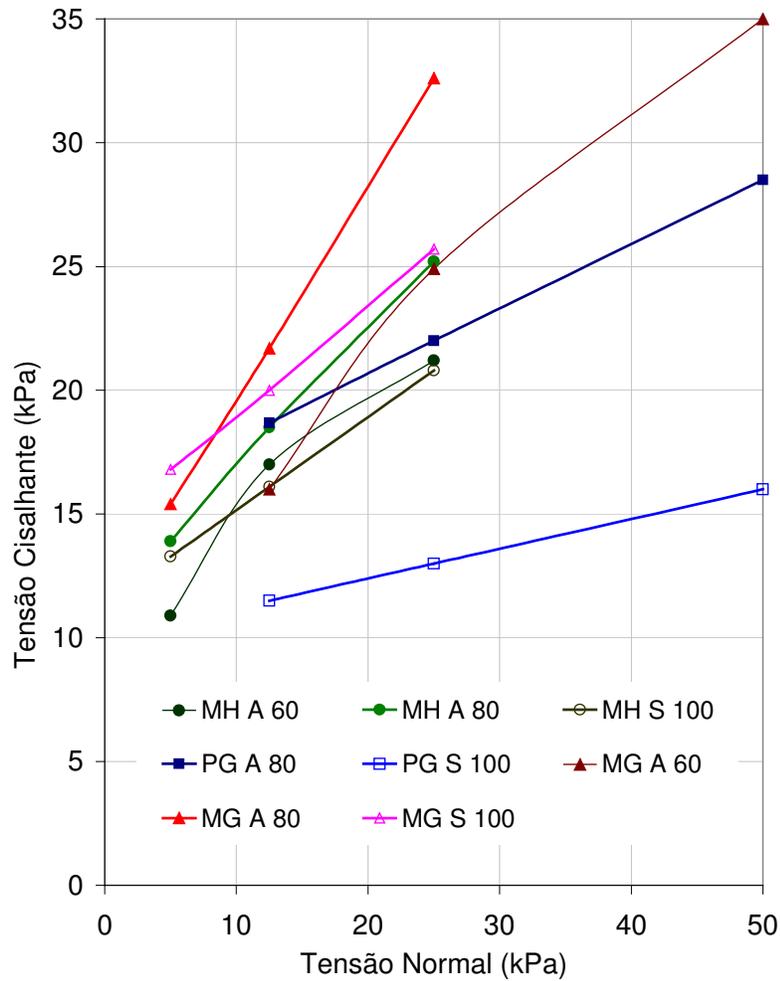


Figura 112 - Envoltórias de Resistência Obtidas nos Ensaio de Arrancamento

## 7.6.

### Parâmetros de Resistência da Interface Solo-Geogrelha

A partir das envoltórias de resistência obtidas nos ensaios de arrancamento, pode-se calcular os coeficientes de interação  $\lambda$  e  $\delta$  segundo as equações 73 e 74. O coeficiente  $f$  ( $=\tan\delta'/\tan\phi'$ ) depende do mecanismo de interação e do movimento relativo que ocorrem na interface solo-geossintético.

No caso das geogrelhas, quando o movimento é de arrancamento, a resistência ao cisalhamento na interface é devida à mobilização do atrito superficial no contato solo-geogrelha e do empuxo passivo nos elementos transversais das geogrelhas. Neste caso, o coeficiente  $f$  pode ser escrito como:

$$f = f_{s/g} + f_p \quad (76)$$

com :

$$f_{s/g} = \alpha_s \cdot \frac{\tan\phi'_{SR}}{\tan\phi'} \quad (77)$$

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

$f_p$  = parcela de  $f$  devido ao empuxo passivo dos elementos transversais;

$\alpha_s$  = fração sólida da área superficial da geogrelha.

$\phi'_{SR}$  = ângulo de atrito entre o solo e a superfície sólida da geogrelha.

**A Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresenta os parâmetros de interface obtidos a partir das envoltórias dos ensaios de arrancamento. Ressalta-se que o valor apresentado de  $\delta$  foi calculado a partir da inclinação da porção linear da envoltória e corresponde ao valor máximo do coeficiente  $f$ . A envoltória obtida nos ensaios de arrancamento torna-se assintótica à direção horizontal a partir de um determinado nível de tensão confinante vertical. Isto corresponde a uma redução da inclinação ( $\delta$ ) e conseqüentemente, a uma redução do coeficiente  $f$ . Os valores de  $\alpha_s$  foram fornecidos no Capítulo 5.

O parâmetro  $f_{s/g}$  foi calculado admitindo-se que  $\phi'_{SR}$  é influenciado pela rugosidade da geogrelha. Existe uma tendência na literatura em se considerar  $\phi'_{SR}=2/3\phi'$  (Teixeira, 1999 e Bonczkiewicz et al, 1988). No entanto, no presente trabalho, os resultados dos ensaios de arrancamento e cisalhamento direto permitem uma estimativa mais precisa do ângulo de atrito entre o solo e a

superfície sólida da geogrelha ( $\phi'_{SR}$ ). Com base no comportamento das geogrelhas durante os ensaios, estimou-se  $\phi'_{SR}$  igual a  $0,80\phi'$  para a geogrelha MacGrid,  $0,67\phi'$  para a Malha Metálica e  $0,50\phi'$  para a geogrelha ParaGrid. Uma discussão mais detalhada do critério utilizado na estimativa destes valores está apresentada no Capítulo 8.

Os resultados apresentados na Tabela 32 sugerem que, independente do tipo de solo, a geogrelha MacGrid é a que apresenta maiores valores de ângulo de atrito solo-geogrelha, e conseqüentemente do coeficiente de interação  $f$ . Em todos os ensaios, a adesão solo-geogrelha assumiu valores entre 10 e 15kPa.

Tabela 32 - Parâmetros de Interface: Ensaio de Arrancamento

Interface		$c'$ (kPa)	$\phi$ (°)	$c_a$ (kPa)	$\delta$ (°)	$\lambda$	$f$	$f_{s/g}$	$f_p$
Areia $D_R=80\%$	MH	15,0	37	10,8	31	0,72	0,80	0,06	0,74
	PG	15,0	37	15,0	15	1,00	0,36	0,26	0,10
	MG	15,0	37	11,1	40	0,74	1,10	0,23	0,87
Silte Argiloso $GC=100\%$	MH	30,0	21	11,4	20	0,38	0,95	0,07	0,88
	PG	30,0	21	10,0	7	0,33	0,32	0,28	0,04
	MG	30,0	21	14,5	23	0,48	1,10	0,24	0,86

Observa-se que, em alguns casos,  $f$  assume valores maiores que a unidade. Este fato pode estar relacionado com a parcela de resistência mobilizada nos elementos transversais da geogrelha. Devido à grande área vazada das geogrelhas ensaiadas, a parcela correspondente à mobilização do empuxo passivo dos elementos transversais é bastante significativa.

No caso de reforços planos contínuos, como os geotêxteis, o coeficiente  $f$  assume valores entre 0 e 1, pois o único mecanismo de interação mobilizado é o atrito. No entanto, no caso de geogrelhas, o mecanismo de interação por ancoragem dos elementos transversais pode ser muito mais relevante que o atrito mobilizado nas superfícies superior e inferior da grelha. Neste caso,  $f$  pode assumir valores maiores do que a unidade.

## 7.7. Resistência ao Arrancamento

A magnitude da resistência ao cisalhamento mobilizada na interface solo-geossintético depende do tipo de reforço (Farrag et al,1993). No caso das geogrelhas, a mobilização da resistência ao arrancamento ocorre inicialmente devido ao atrito e à adesão superficial, que necessitam apenas de um pequeno deslocamento relativo para serem totalmente mobilizados. A resistência passiva dos elementos transversais é mobilizada posteriormente, e ocorre para maiores deslocamentos.

Sendo assim, na ruptura, a força de arrancamento ( $P$ ) de uma geogrelha é composta pelas parcelas de adesão superficial ( $P_a$ ), de atrito solo-geogrelha ( $P_{s/g}$ ) e de resistência passiva mobilizada nos elementos transversais ( $P_p$ ). Ou seja,

$$P = P_a + P_{s/g} + P_p \quad (78)$$

com:

$$P_a = 2.B.L. \alpha_s a \quad (79)$$

$$P_{s/g} = 2.B.L.\sigma'_n. \alpha_s.tan\phi_{SR} \quad (80)$$

$$P_p = \frac{L}{S}.\sigma'_p.\alpha_p.B.e \quad (81)$$

onde:

$a$  = adesão entre o solo e a superfície sólida da geogrelha;

$\alpha_s$  = fração sólida da área superficial da geogrelha;

$\phi_{SR}$  = ângulo de atrito entre o solo e a superfície sólida da geogrelha;

$B$  e  $L$  = largura e comprimento da geogrelha;

$S$  = distância entre elementos transversais;

$\alpha_p$  = fração da largura da geogrelha disponível para a mobilização da resistência passiva;

$e$  = espessura dos elementos transversais da geogrelha;

$\sigma'_p$  = tensão passiva mobilizada nos elementos transversais (em termos de tensões efetivas).

A avaliação da tensão passiva ( $\sigma'_p$ ) pode ser feita considerando que os elementos transversais são análogos a uma série de sapatas alongadas sucessivas que fazem  $90^\circ$  com a direção do arrancamento (Bergado et al, 1994).

Como descrito no Capítulo 3, dois mecanismos foram propostos para a estimativa dos limites de resistência ao arrancamento, denominados de modo de

ruptura geral e modo de ruptura por puncionamento (Jewell et al, 1984). As expressões utilizadas para estes mecanismos fornecem os limites superior e inferior dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento.

A tensão passiva ( $\sigma'_p$ ) pode ser estimada a partir da eq. (54). Os valores de  $N_q$  para os modos de ruptura geral e ruptura por puncionamento podem ser obtidos pelas eqs. (55) e (56), respectivamente. O valor de  $P_p$  foi obtido a partir da eq. 78.

$$P_p = P - P_a - P_{s/g} \quad (82)$$

A adesão entre o solo e a superfície sólida da geogrelha foi considerada igual ao intercepto coesivo do solo, seguindo uma tendência da literatura de se considerar a razão  $a/c'$  igual a 1 (Teixeira, 1999 e Bonczkiewicz et al, 1988).

A seguir é apresentada uma comparação entre os valores limites de resistência passiva e os resultados experimentais. As Figuras 113 a 114 mostram esta comparação para os ensaios de arrancamento, executados com geogrelha MacGrid imersa em areia e em solo silto-argiloso, respectivamente. Em ambos materiais, a parcela da força de arrancamento, mobilizada nos elementos transversais, encontra-se entre os limites teóricos, com uma tendência dos valores experimentais se aproximarem do modo de ruptura por puncionamento (limite inferior), a medida que a tensão normal reduz.

A Figura 115 apresenta os resultados da geogrelha ParaGrid embutida em areia. Observa-se que os pontos encontram-se acima do limite superior. No caso do solo silto-argiloso, a utilização da razão  $a/c'$  igual à unidade conduziu a valores de  $P_p$  negativos. Este resultado sugere uma superestimativa desta razão, uma vez que  $P_p$  é obtido pela eq. 82. Qualquer outro valor arbitrado para a razão  $a/c'$  poderia ser considerado fortuito.

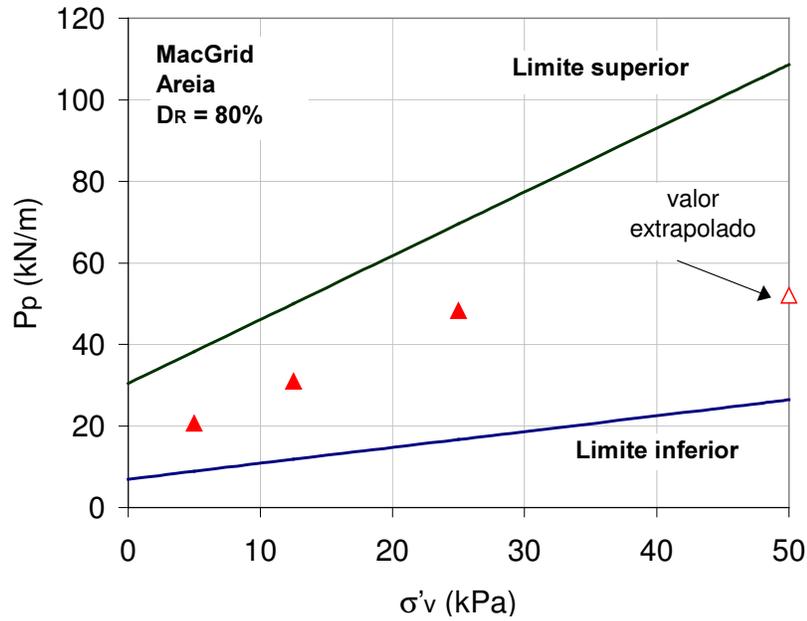


Figura 113 - Força de Arrancamento: Parcela de Resistência Passiva para a Geogrelha MacGrid em Areia

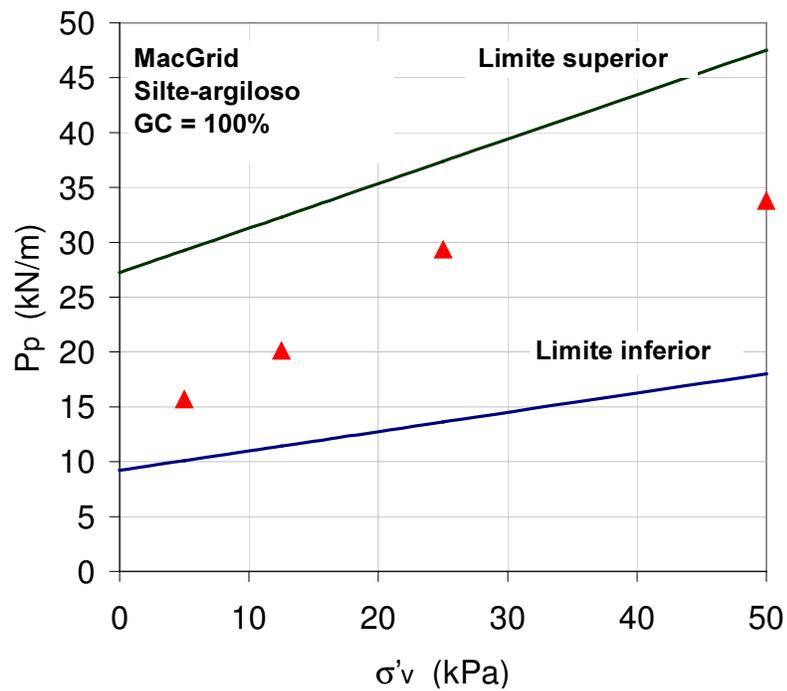


Figura 114 - Força de Arrancamento: Parcela de Resistência Passiva para Geogrelha MacGrid em Silte Argiloso

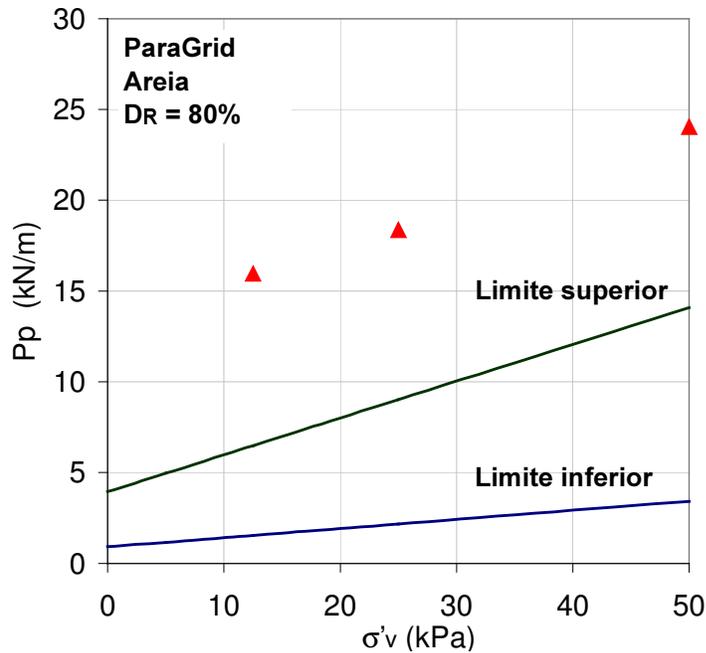


Figura 115 - Força de Arrancamento: Parcela da Resistência Passiva para Geogrelha ParaGrid em Areia

Na Figura 116, estão ilustradas as diferentes parcelas que compõem a resistência ao arrancamento da geogrelha MacGrid, em areia e em silte argiloso. A geogrelha MacGrid possui uma alta parcela de resistência devido à contribuição dos elementos transversais. Essa parcela predomina sobre as parcelas de adesão e atrito solo-grelha. Em relação à ParaGrid, os resultados não foram incluídos nesta figura, em virtude das incertezas na estimativa de cada uma das parcelas.

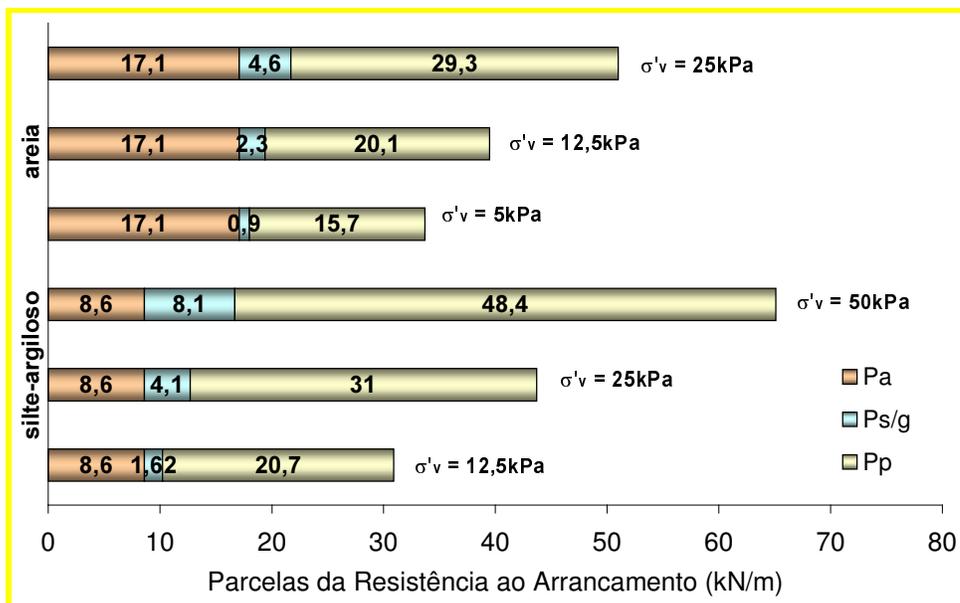


Figura 116 - Parcelas que compõem a resistência ao arrancamento na geogrelha MacGrid

## 7.8.

### Mobilização da Resistência ao Arrancamento ao Longo da Geogrelha

A metodologia adotada para a análise da distribuição da força de arrancamento ao longo do comprimento da geogrelha é similar à proposta por Ochiai et al (1996). Esta análise requer o conhecimento dos deslocamentos internos da geogrelha durante o ensaio de arrancamento.

#### 7.8.1.

##### Metodologia Adotada

A partir dos resultados dos ensaios de arrancamento, plotam-se os valores de deslocamento em função da posição de medida ao longo do reforço. Obtém-se desta forma, a distribuição dos deslocamentos ao longo do comprimento da geogrelha. Pode-se, então, obter a deformação específica em trechos do reforço. Esta deformação foi calculada para os trechos da geogrelha mostrados na Figura 117, através da expressão:

$$\varepsilon_{i,i+1} = \frac{(X_i - X_{i+1})}{d} \quad (82)$$

onde: d = distância entre dois medidores de deslocamento (*tell-tail*) consecutivos;

$X_i$  = deslocamento medido no i-ésimo *tell-tail* ( $TT_i$ );

Em alguns ensaios, foram instalados *strain-gages* para o monitoramento das deformações em 5 pontos ao longo da inclusão. Desta forma, além das deformações calculadas a partir das leituras dos medidores mecânicos (*tell-tails*), dispõe-se das deformações registradas diretamente através dos medidores eletrônicos (*strain-gages*). Sempre que possível, estes resultados foram confrontados de modo a se obter uma melhor distribuição das deformações sofridas pela geogrelha.

De posse da deformação e da curva força vs deformação da geogrelha, pode-se encontrar a força que atua em qualquer seção transversal da geogrelha. Apesar dos ensaios de arrancamento serem executados sob condições confinadas, utiliza-se a curva força vs deformação obtida nos ensaios de tração simples. Segundo Koerner (1998), a resistência à tração de geogrelhas não varia com o confinamento.

Finalmente, a resistência ao arrancamento pode ser obtida a partir da variação da força ao longo da geogrelha.

Ressalta-se que a deformação sofrida ao longo do reforço deve ser decrescente à medida que se afasta da extremidade frontal de arrancamento. No entanto, algumas vezes, as deformações calculadas a partir dos resultados fornecidos pelos *tell-tails* não obedecem a essa condição. Uma explicação para tal ocorrência é o fato dos medidores de deslocamento serem instalados em elementos longitudinais distintos da geogrelha. No decorrer do ensaio, esses elementos podem sofrer deslocamentos distintos ou até, deslizamentos relativos (Teixeira, 1999).

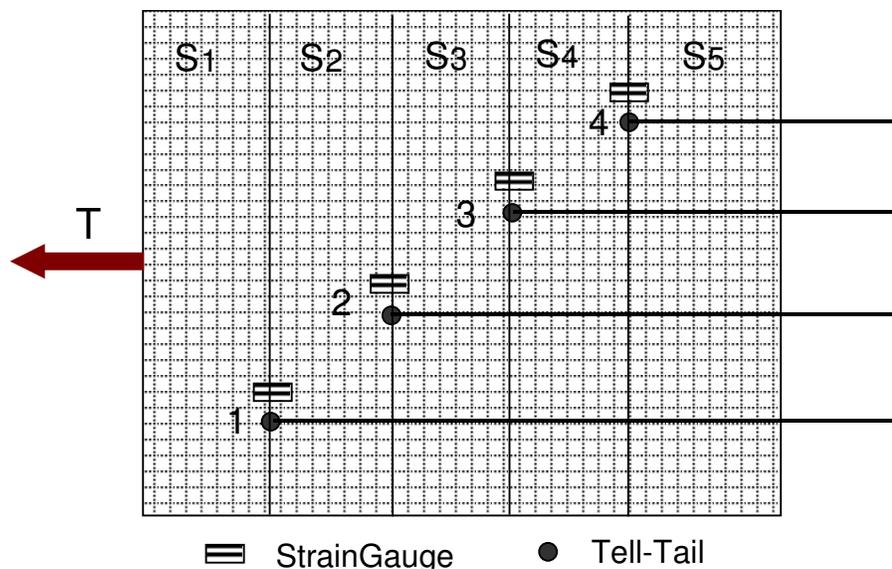


Figura 117 - Seções da Geogrelha e Posição da Instrumentação

### 7.8.2. Análise dos Resultados

Inicialmente, serão analisados os resultados dos ensaios executados com a geogrelha MacGrid embutida em solo arenoso ( $D_R = 80\%$ ). Nestas condições, foram executados ensaios sob níveis de confinamento de 5, 12,5 e 25kPa. Os ensaios com tensões confinantes de 5 e 12,5kPa foram instrumentados com medidores mecânicos de deslocamentos horizontais (*tell-tails*) e com medidores de deformação (*strain-gages*). No ensaio executado para uma tensão confinante vertical de 25kPa, foram monitorados apenas os deslocamentos horizontais.

Na Figura 118, estão plotados os valores de força de arrancamento em função dos deslocamento interno ao longo da geogrelha. Observa-se que a

ruptura por arrancamento ocorre para valores diferentes de deslocamentos internos. Quanto mais próximo do ponto de aplicação da força de arrancamento, maior o deslocamento horizontal medido. Este fato pode ser comprovado a partir da Figura 119, que apresenta os deslocamentos internos da geogrelha em função do deslocamento frontal, medido na garra. O decréscimo dos deslocamentos horizontais indica que a força de arrancamento não se distribui uniformemente ao longo da geogrelha. Na Figura 120, apresenta-se as medidas de deformação, fornecidas pelos strain-gages, ao longo da grelha. Nota-se que as deformações também decrescem à medida que se afasta do ponto de aplicação da força de arrancamento.

A partir da Figura 119, pode-se plotar os deslocamentos internos medidos no instante da ruptura, em função da localização do instrumento (*tell-tail*). Obtém-se desta forma, a distribuição dos deslocamentos ao longo da geogrelha (Figura 121). Pode-se perceber que, quanto maior a tensão confinante, maior o deslocamento medido no momento da ruptura por arrancamento.

Uma vez conhecida a distribuição dos deslocamentos, pode-se estimar as deformações em cada trecho da geogrelha. Alguns strain-gages não funcionaram durante o ensaio, pois a proteção foi destruída durante o arrancamento. A combinação entre as leituras dos *tell-tails* e dos *strain-gages* resulta em uma distribuição mais coerente das deformações ao longo do comprimento da grelha (Figura 122).

Nos ensaios executados sob níveis de tensão confinante de 5 e 12,5kPa, a instrumentação funcionou de forma satisfatória, possibilitando a obtenção das deformações em vários pontos da geogrelha. A partir dos pontos experimentais, foi possível obter uma curva que representa a distribuição das deformações ao longo do comprimento da geogrelha, no momento da ruptura.

As deformações da geogrelha aumentam com o confinamento. No ensaio executado com  $\sigma'_v = 5\text{kPa}$ , observa-se que a região frontal da geogrelha atingiu um nível de deformação de 14%. Para uma tensão confinante de 12,5kPa, a deformação neste trecho chegou a 16%. Este aumento da deformação com o aumento da tensão confinante explica a ruptura por tração da malha para tensões confinantes mais elevadas.

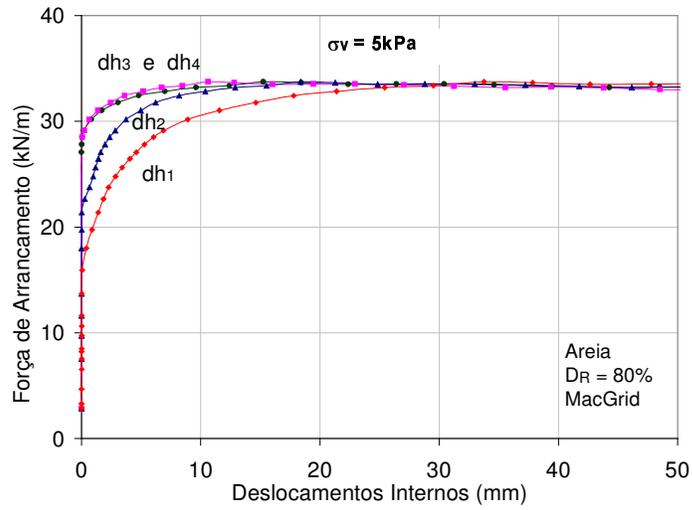
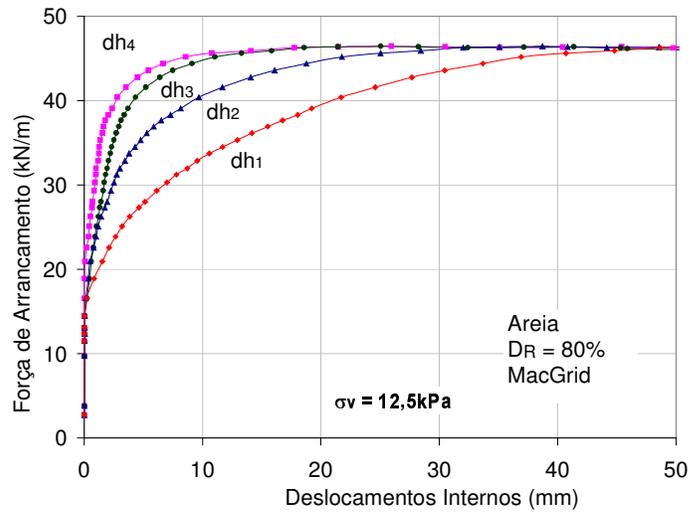
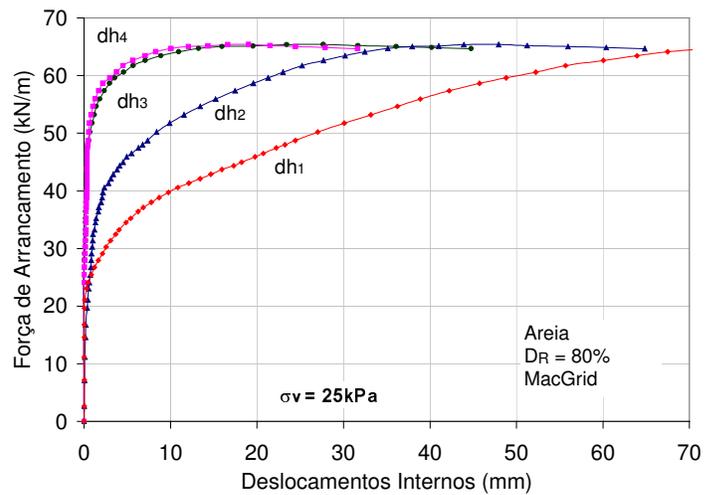
(a)  $\sigma'_v = 5 \text{ kPa}$ (b)  $\sigma'_v = 12,5 \text{ kPa}$ (c)  $\sigma'_v = 25 \text{ kPa}$ 

Figura 118 - Força de Arrancamento vs Deslocamentos Internos: MacGrid em Areia (DR = 80%)

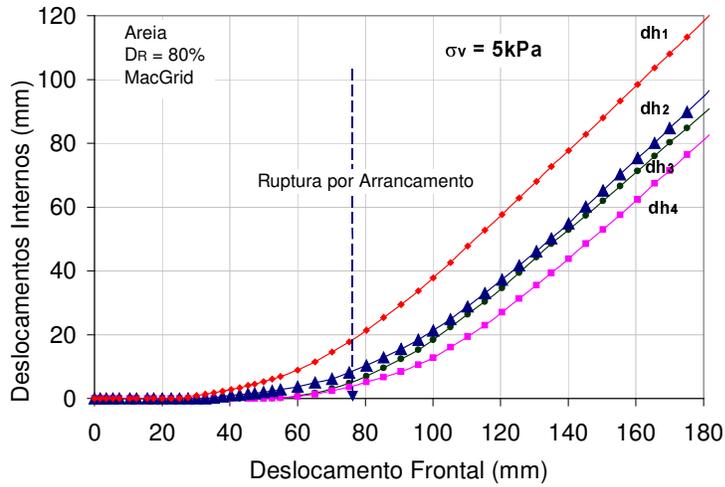
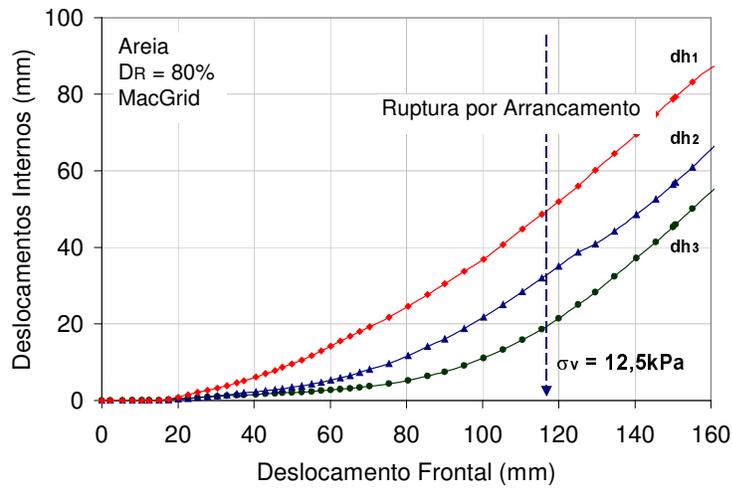
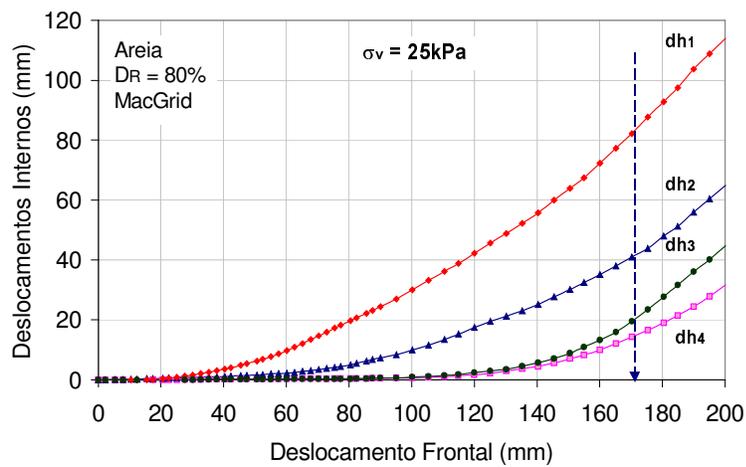
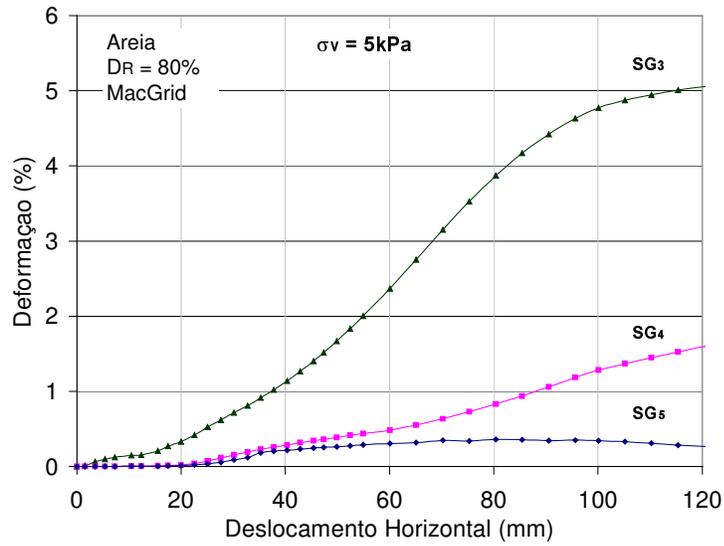
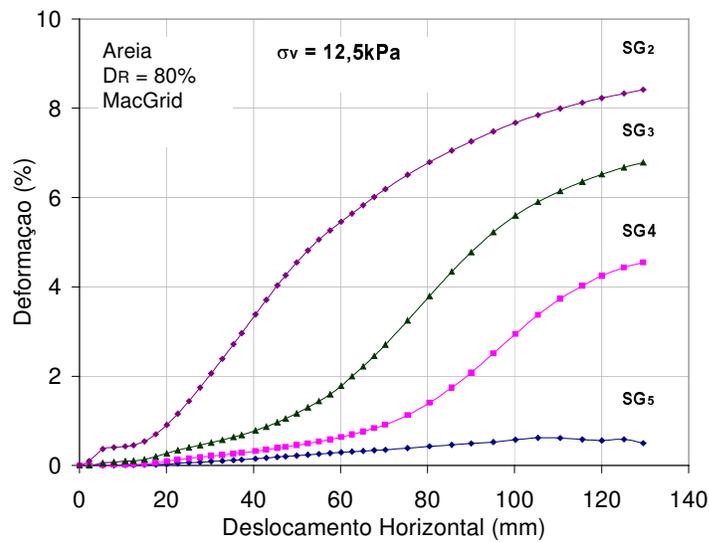
(a)  $\sigma'_v = 5\text{kPa}$ (b)  $\sigma'_v = 12,5\text{kPa}$ (c)  $\sigma'_v = 25\text{kPa}$ 

Figura 119 - Deslocamentos Internos vs Deslocamento Frontal: MacGrid em Areia ( $D_R = 80\%$ )

(a)  $\sigma'_v = 5 \text{ kPa}$ (b)  $\sigma'_v = 12,5 \text{ kPa}$ Figura 120 - Deformação vs Deslocamento Frontal: MacGrid em Areia ( $D_R = 80\%$ )

Para tensões confinantes mais elevadas (25kPa), a instrumentação não forneceu leituras confiáveis e a análise das deformações sofridas pela geogrelha não foi realizada.

De posse dos resultados da instrumentação e da curva força vs deformação da geogrelha, pode-se obter a força de arrancamento em qualquer ponto da geogrelha.

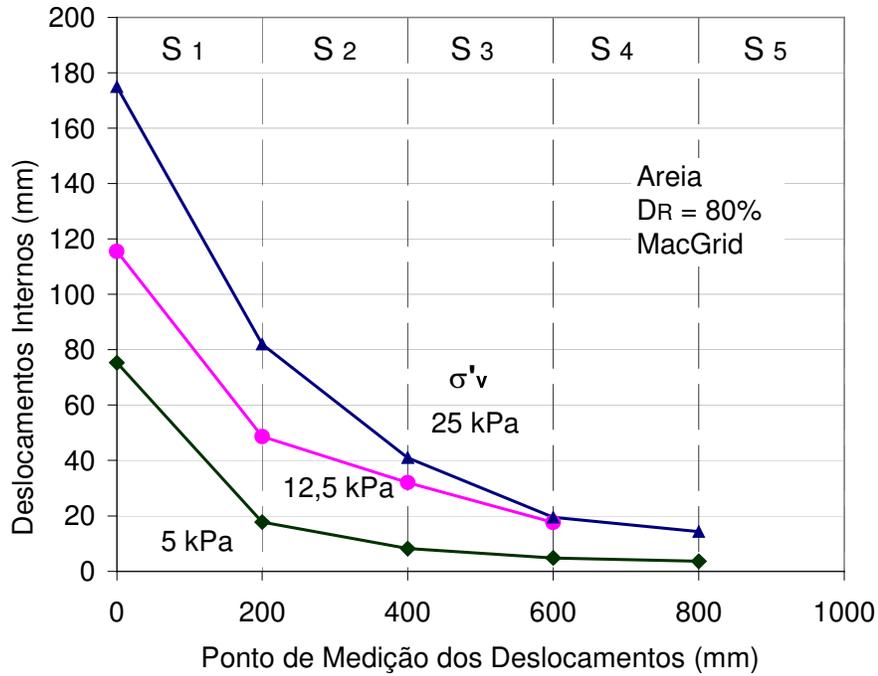


Figura 121 - Deslocamentos Internos na Ruptura por Arrancamento da Geogrelha MacGrid em Areia

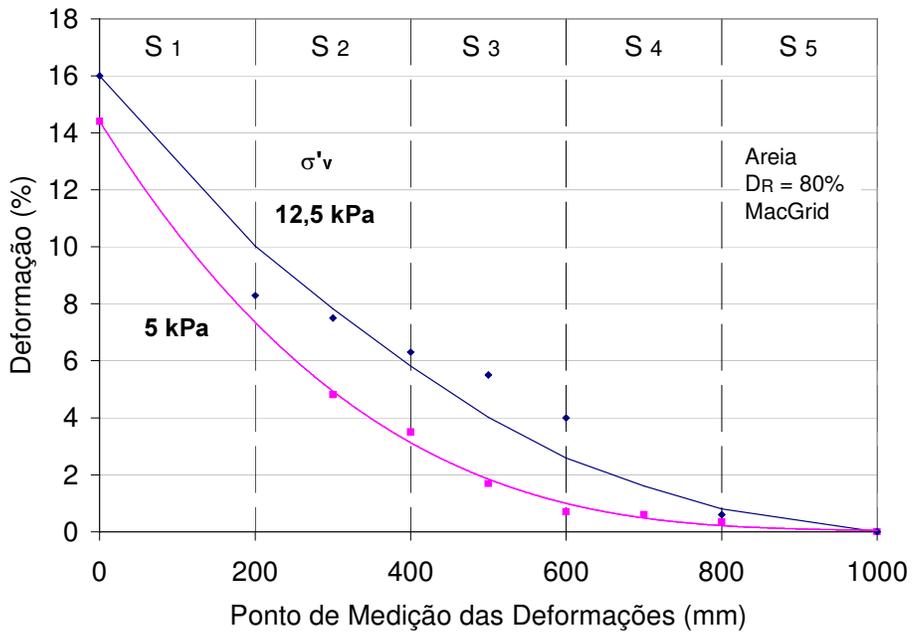


Figura 122 - Deformações na Ruptura por Arrancamento da Geogrelha MacGrid em Areia

A Figura 123 apresenta a distribuição da força de arrancamento ao longo da inclusão nos ensaios executados com  $\sigma'_v$  igual a 5 e 12,5kPa. Observa-se uma

diminuição gradativa da força de arrancamento ao longo do comprimento da geogrelha.

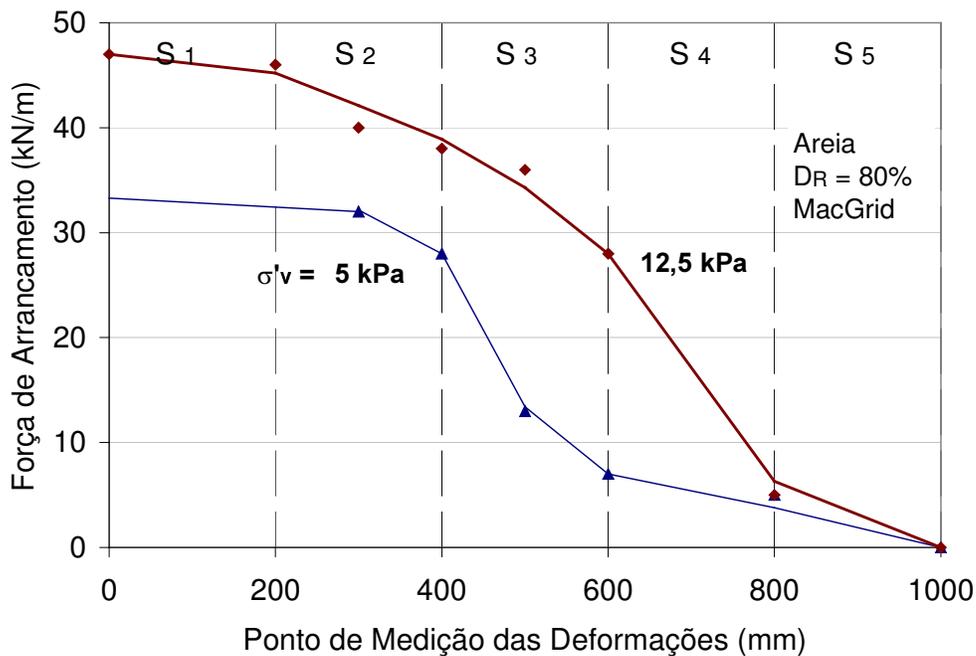
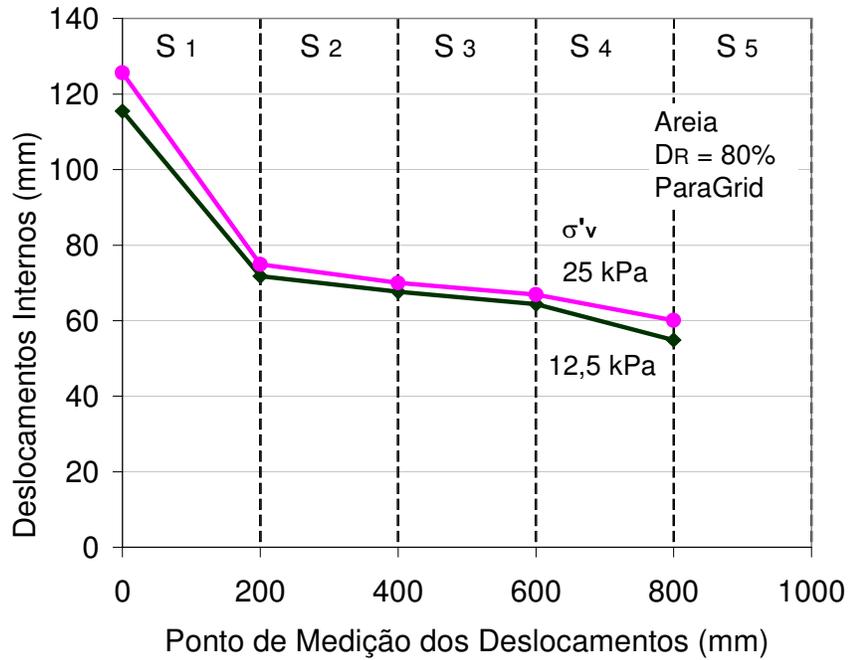


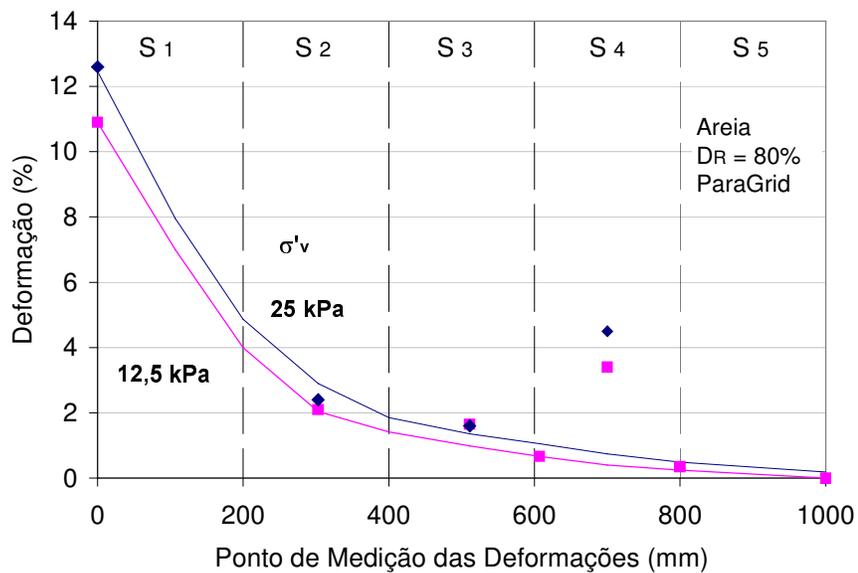
Figura 123 - Distribuição da Força de Arrancamento ao Longo da Geogrelha MacGrid em Areia

O mesmo procedimento foi adotado para o tratamento dos resultados dos demais ensaios. A distribuição dos deslocamentos e das deformações sofridas pela geogrelha ParaGrid durante o arrancamento em areia ( $D_R=80\%$ ) estão ilustrados na Figura 124. Cabe comentar que na seção 4 os deslocamentos internos crescem em maiores proporções do que na seção anterior. Desta forma, a condição de que as deformações decrescem à medida que o ponto de medição se afasta da extremidade frontal da geogrelha não é atendida.

Na estimativa das deformações, estes pontos foram desprezados por não serem representativos de uma situação do ensaio. A geogrelha ParaGrid apresentou um comportamento muito particular nos ensaios de arrancamento. Durante o deslocamento da geogrelha, ocorreu a ruptura da união entre os elementos transversais e longitudinais. Ao final do arrancamento, os elementos longitudinais estavam soltos, principalmente na extremidade posterior da geogrelha. Este fato pode justificar as leituras errôneas de deslocamentos, registradas na seção 4.



(a) Deslocamentos Internos Medidos no Instante da Ruptura



(b) Deformações Sofridas pela Geogrelha no Instante da Ruptura

Figura 124 - Deslocamentos e Deformações na Ruptura por Arrancamento da Geogrelha ParaGrid em Areia ( $D_R = 80\%$ )

A geogrelha ParaGrid apresenta valores baixos de deformação nas seções 2, 3 e 4. Esta geogrelha apresenta rigidez elevada à tração, o que justifica as pequenas deformações sofridas.

Foi efetuada uma análise da distribuição dos deslocamentos para diferentes percentuais de carga aplicada (Figura 125). Nota-se que os deslocamentos internos apresentavam-se razoavelmente uniformes, devido à rigidez à tração da geogrelha. Quanto mais rígida for a geogrelha, mais uniformes serão os deslocamentos, pois a inclusão se desloca como um corpo rígido.

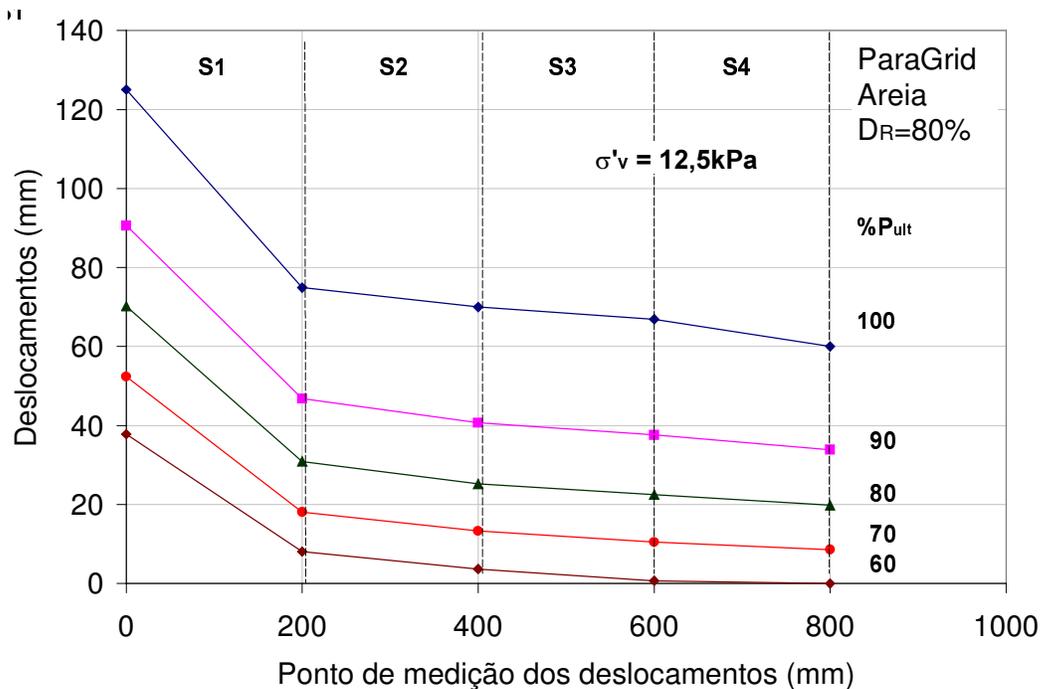


Figura 125 - Deslocamentos da Geogrelha para Diversos Percentuais da Resistência no Arrancamento da Geogrelha ParaGrid em Areia

Na Figura 126, estão apresentados os deslocamentos medidos nos 4 pontos de leitura da Malha Metálica, embutida em solo arenoso. Estes valores correspondem às medições efetuadas no instante da ruptura por arrancamento (ensaios com  $\sigma'_v = 5$  e  $12,5\text{kPa}$ ) e no instante anterior à ruptura por tração da malha (ensaio com  $\sigma'_v = 25\text{kPa}$ ).

Como já mencionado, as deformações sofridas pela grelha em cada seção são obtidas a partir da inclinação da curva de deslocamentos. Nota-se que a deformação na seção 4, nos ensaios sob confinamento de 5 e  $12,5\text{kPa}$ , é superior à obtida na seção 3. Este comportamento é incoerente e pode ser atribuído aos seguintes fatores:

- a deformação da Malha Metálica não ocorreu apenas ao longo da direção longitudinal de arrancamento. Observa-se que os hexágonos da malha se

distorceram e o ponto de medição se deslocou também na direção transversal ao arrancamento. A

- Figura 127 ilustra a configuração deformada da malha;
- os medidores de deslocamento foram instalados em diferentes elementos longitudinais, permitindo erros devido aos deslizamentos relativos.

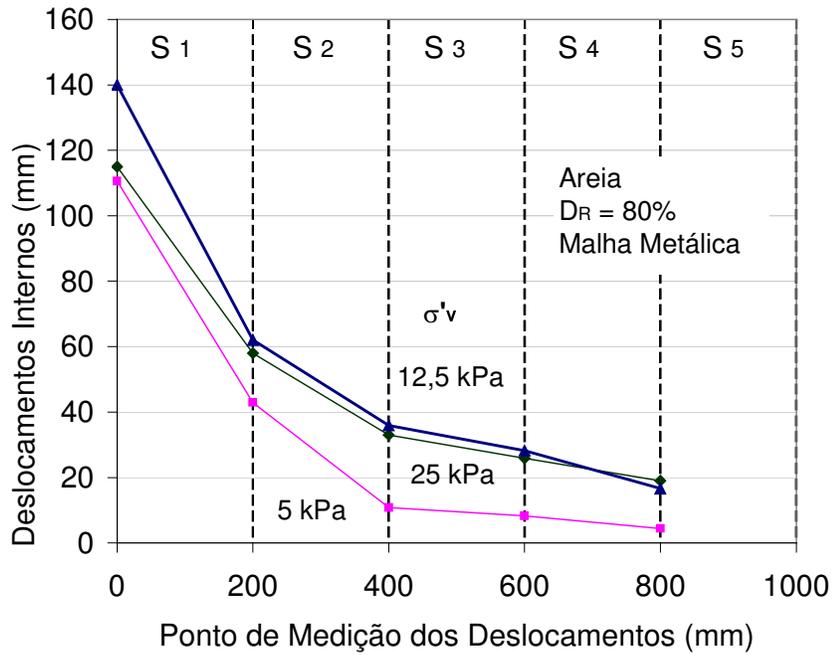


Figura 126 - Deslocamentos Internos na Ruptura por Arrancamento da Malha Metálica em Areia ( $D_R = 80\%$ )

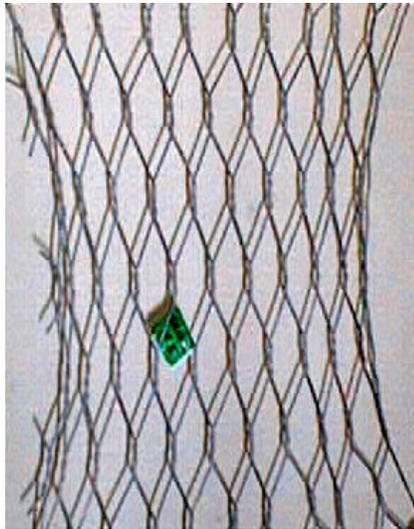


Figura 127 - Configuração Deformada Típica da Malha Metálica no Final de um Ensaio de Arrancamento

O ponto correspondente à deformação na seção 4 foi desprezado nas análises de distribuição das deformações ao longo da geogrelha, como indica a Figura 128. Para níveis de confinamento de 5 e 12,5kPa, a deformação nesta seção foi superior à deformação nas demais seções. Sob um nível de confinamento de 25kPa, a metade posterior da geogrelha praticamente não sofreu deformações.

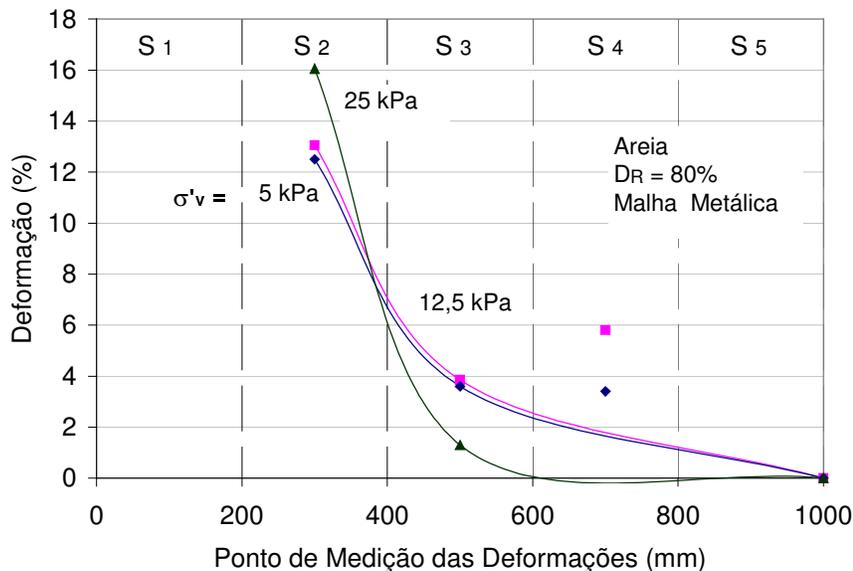


Figura 128 - Deformações na Ruptura por Arrancamento da Malha Metálica em Areia

A Figura 129 apresenta os deslocamentos sofridos pela Malha Metálica no ensaio executado sob uma tensão confinante de 12,5kPa. Foram analisados os percentuais de carga aplicada variando de 60% a 100% da força máxima de arrancamento.

Observa-se que os deslocamentos cresceram com a carga aplicada, principalmente na extremidade frontal da malha. Além disso, nota-se que os deslocamentos nas seções finais da geogrelha foram muito reduzidos até a carga de 80% da força de ruptura. Verifica-se que a maior parte dos deslocamentos ocorreu entre 90% e 100% da carga de ruptura.

Os resultados dos ensaios em solo silto argiloso estão apresentados nas Figuras 129 a 133. A análise dos deslocamentos, deformações e força de arrancamento ao longo da geogrelha ParaGrid não foi realizada, uma vez que a instrumentação forneceu resultados inconsistentes. A razão desta inconsistência está relacionada

à ruptura da união entre os elementos longitudinais e transversais, durante o ensaio de arrancamento, provocando a perda da instrumentação.

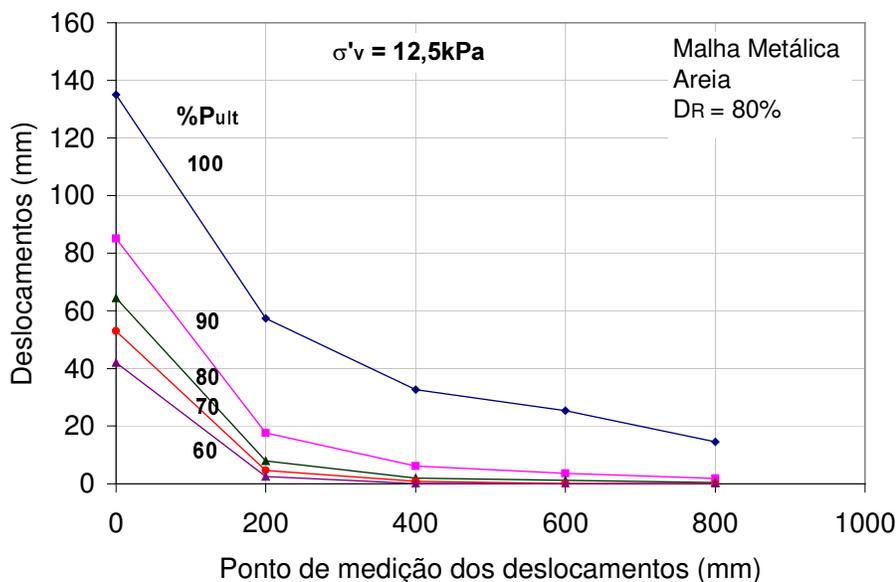


Figura 129 - Deslocamentos da Geogrelha para Diversos Percentuais da Resistência ao Arrancamento da Malha Metálica em Areia

Nas Figuras 132 e 133, nota-se que a condição de deformações decrescentes com a distância do ponto de aplicação da força de arrancamento foi atendida. Sob um confinamento de 25kPa, a extremidade posterior da geogrelha não sofreu deformações, indicando que o excesso de confinamento inibiu os deslocamentos da geogrelha. Houve um aumento acentuado das deformações no trecho frontal da geogrelha. O mesmo comportamento foi observado nos ensaios em areia.

A partir da Figura 132, pode-se perceber que a maior parcela dos deslocamentos ocorreu entre 90% e 100% da carga de ruptura. O efeito foi mais acentuado na extremidade final da amostra que, até este nível de carregamento, havia sofrido deslocamentos reduzidos. Até a aplicação de 70% do valor da carga de arrancamento máxima, só foram registrados deslocamentos nos primeiros 200mm da geogrelha.

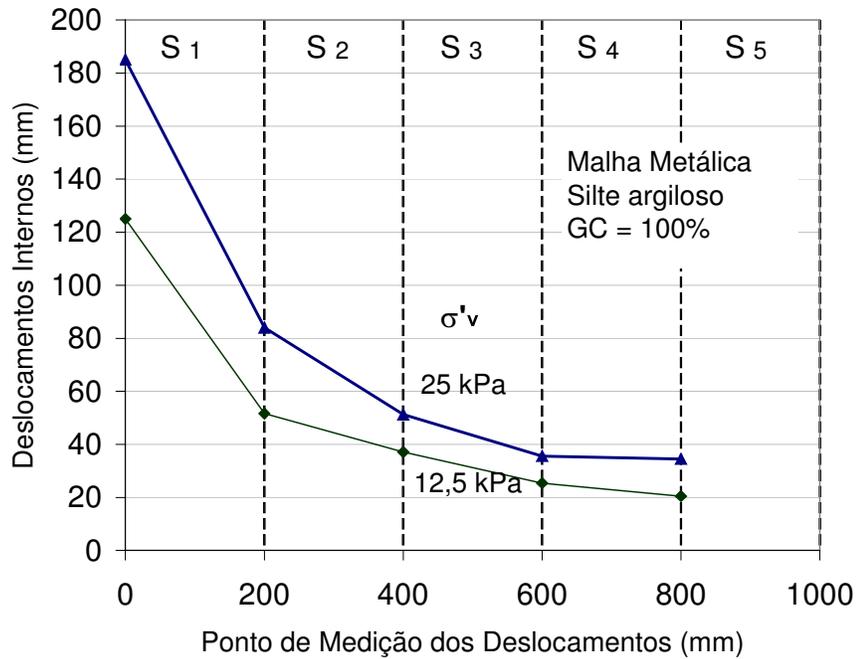


Figura 130 - Deslocamentos na Ruptura por Arrancamento da Malha Metálica em Silte Argiloso

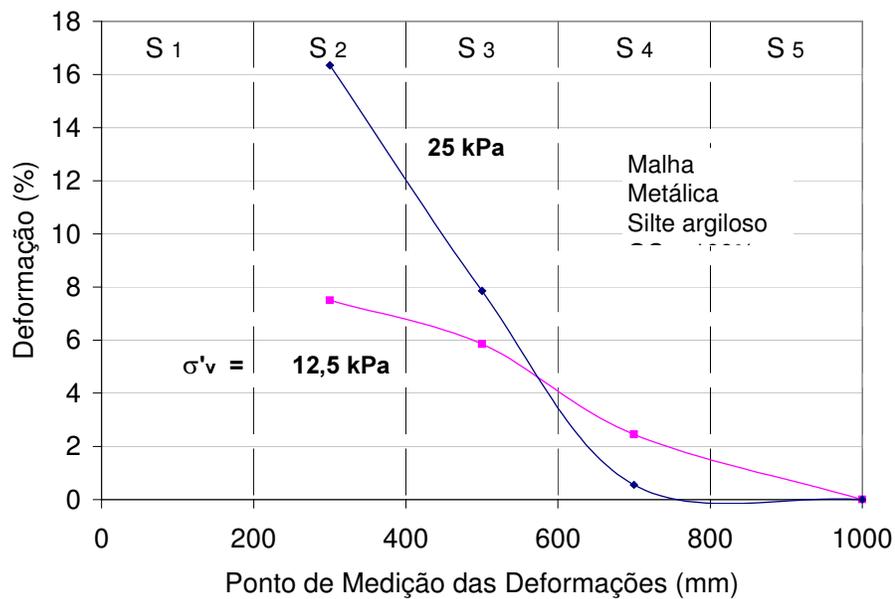


Figura 131 - Deformações na Ruptura por Arrancamento da Malha Metálica em Silte Argiloso

A Figura 133 apresenta os deslocamentos da geogrelha MacGrid, para diferentes percentuais de carga aplicada, durante os ensaios em solo silte argiloso. Para percentuais de carga inferiores a 70%, a geogrelha não sofreu

deslocamentos significativos nas seções 2, 3 e 4. Mais uma vez, nota-se que a maior parte dos deslocamentos ocorre a partir de 90% da força de arrancamento máxima. Comportamento distinto foi observado com a geogrelha ParaGrid em areia (Figura 125).

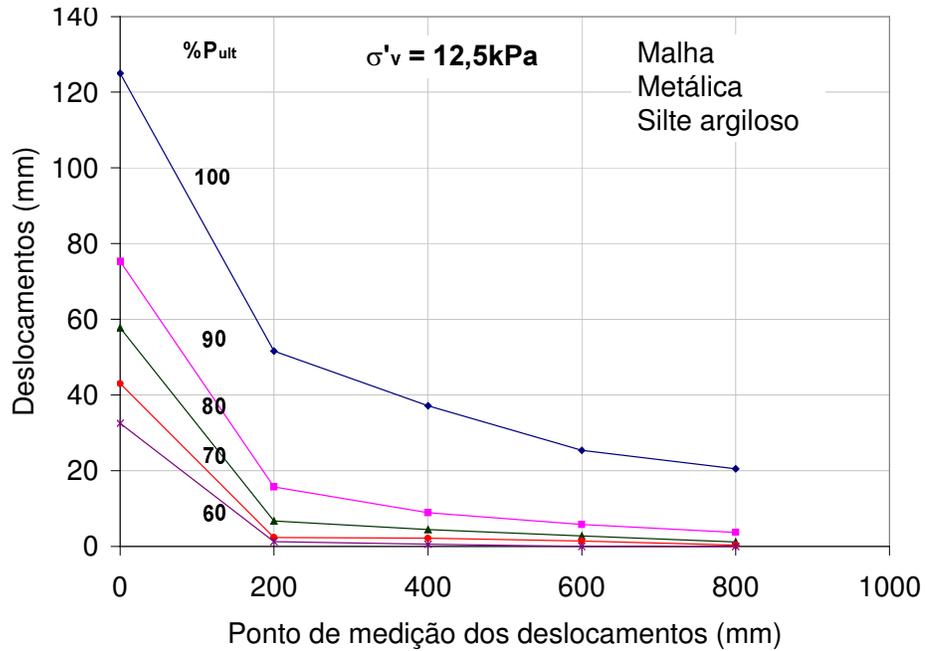


Figura 132 - Deslocamentos da Geogrelha para Diversos Percentuais da Resistência ao Arrancamento da Malha Metálica em Silte Argiloso

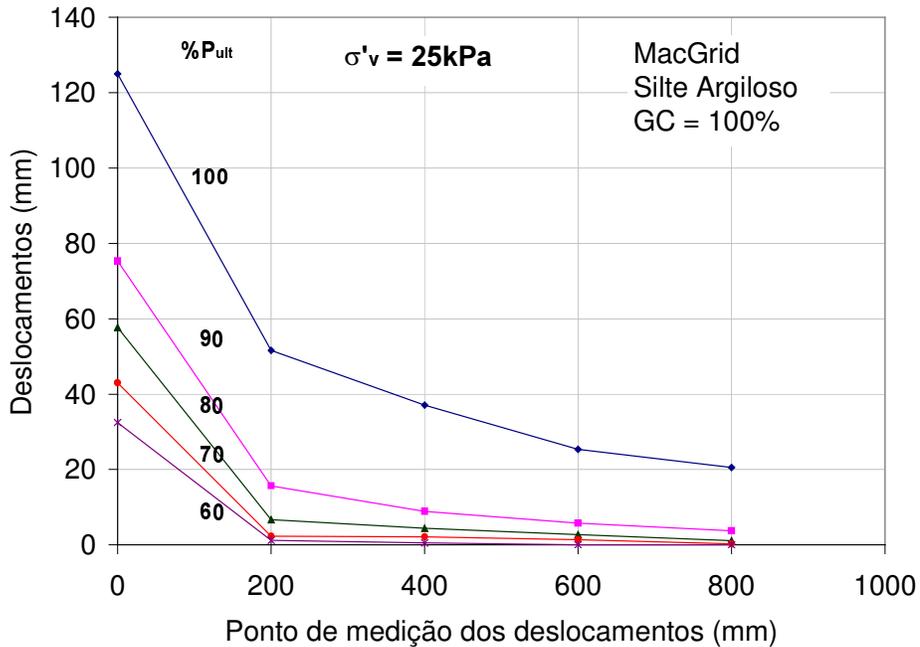


Figura 133 - Deslocamentos da Geogrelha para Diversos Percentuais da Resistência ao Arrancamento da MacGrid em Silte Argiloso

Os resultados sugerem que, quanto maior a rigidez à tração da geogrelha, mais uniforme é a distribuição dos deslocamentos em função do esforço de arrancamento aplicado. As geogrelhas menos rígidas apresentam deformações acentuadas na extremidade frontal com a aplicação da carga, porém, só apresentam deslocamentos significativos para a condição próxima à ruptura por arrancamento.

## 7.9. Modelagem dos Ensaios de Arrancamento

O modelo hiperbólico, desenvolvido por Clough e Duncan (1971) para simular a curva tensão *versus* deformação de solos, pode ser utilizado para a modelagem dos ensaios de arrancamento.

A partir da curva Tensão Cisalhante na Interface *versus* Deslocamento Horizontal, pode-se obter a rigidez cisalhante inicial ( $K_{sf}$ ), que se relaciona à tensão normal, através de uma equação do tipo:

$$K_{sf} = k_1 \cdot \gamma_w \left( \frac{\sigma'_v}{Pa} \right)^{n_1} \quad (83)$$

onde:  $k_1$  = número da rigidez no cisalhamento

$n_1$  = expoente da rigidez no cisalhamento

$\gamma_w$  = peso específico da água

$Pa$  = pressão atmosférica

Os valores de  $k_1$  e  $n_1$  são obtidos plotando-se os dados experimentais de  $K_{sf}/\gamma_w$  versus  $\sigma'/Pa$  em escala logarítmica. Os pontos são ajustados por uma reta. O parâmetro  $n_1$  corresponde ao coeficiente angular e o parâmetro  $k_1$  é o intercepto da reta ajustada.

Uma vez determinado o valor de  $K_{sf}$ , verificou-se que os pares de valores experimentais  $\tau_{SG} \times dh_f$  ajustam-se adequadamente a uma função do tipo (Teixeira e Bueno, 2002) :

$$\tau_{SG} = \tau_{ult} \left( 1 - e^{-\frac{K_{sf} \cdot dh_f}{\tau_{ult}}} \right) \quad (84)$$

onde:  $dh_f$  é o deslocamento medido na garra.

O valor de  $\tau_{ult}$  pode ser obtido a partir da envoltória de resistência:

$$\tau_{ult} = c'_a + \sigma'_v \tan \delta'$$

De posse da envoltória de resistência e das eqs. 83 a 85, pode-se obter a rigidez inicial ( $K_{sf}$ ) e a resistência ao cisalhamento na interface ( $\tau_{SG}$ ), para qualquer valor de tensão confinante vertical ( $\sigma'_v$ ) e qualquer deslocamento ( $dh_f$ ).

As Figuras 134 a 139 confrontam os valores experimentais com os valores ajustados pela equação 84. Cabe salientar que o modelo foi calibrado a partir da curva de menor tensão confinante vertical. A localização da garra conduz a menores valores de rigidez inicial ao cisalhamento. Desta forma, o modelo permite corrigir a rigidez inicial dos ensaios executados sob níveis de confinamento mais elevados. Os ensaios com as geogrelhas MacGrid e Metálica, imersas em solo silto-argiloso, sob um confinamento de 25kPa (Figuras 138 e 139) evidenciam a correção da rigidez realizada pelo modelo utilizado. Nos ensaios executados com a geogrelha ParaGrid, a correção não é tão acentuada, tendo em vista que esta geogrelha apresenta elevada rigidez à tração.

Ressalta-se que a modelagem dos ensaios de arrancamento permite a previsão dos resultados dos ensaios onde ocorreu a ruptura antecipada da malha, como indica a Figura 135. Pode-se verificar que o modelo utilizado reproduz satisfatoriamente os resultados experimentais. A Tabela 33 apresenta as equações utilizadas para a modelagem das interfaces solo/geogrelha. Ressalta-se que as equações da Tabela 33 aplicam-se apenas aos solos e geogrelhas utilizados no programa experimental.

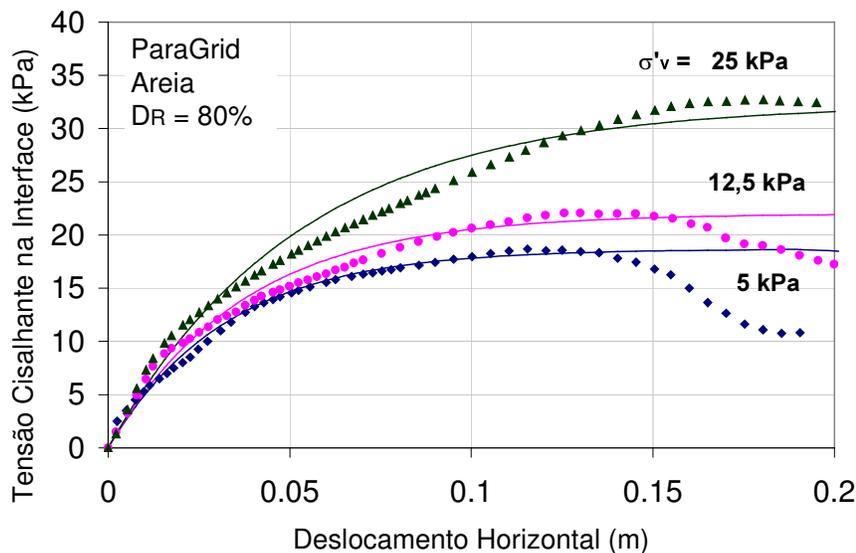


Figura 134 - Ajuste dos Ensaios com a Geogrelha ParaGrid em Areia

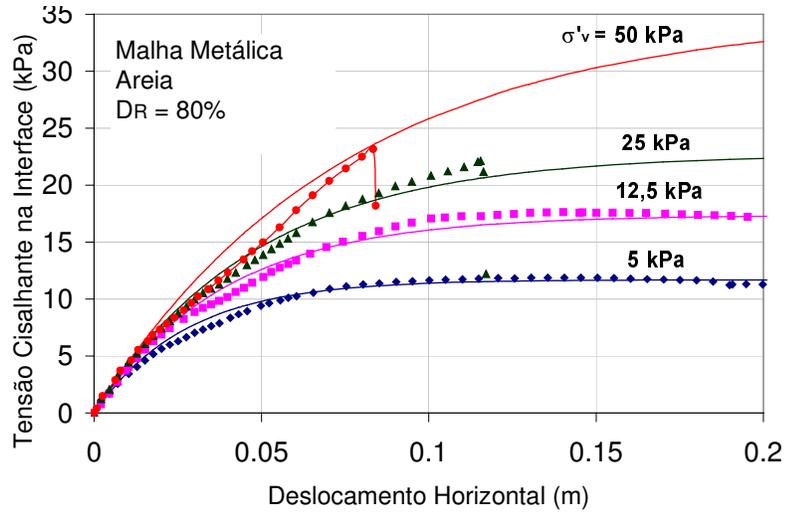


Figura 135 - Ajuste dos Ensaios com a Malha Metálica em Areia

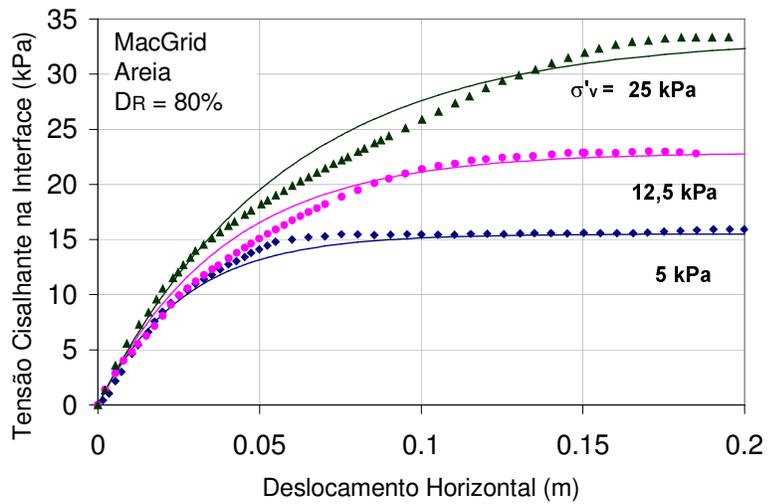


Figura 136 - Ajuste dos Ensaios com a Geogrelha MacGrid em Areia

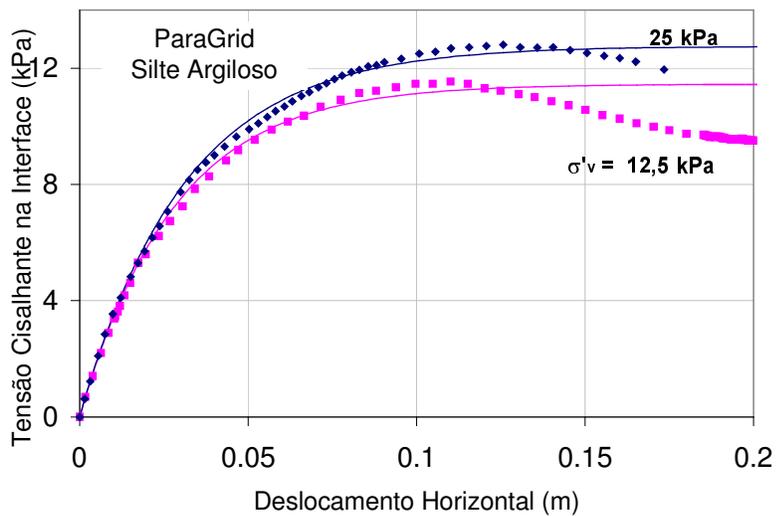


Figura 137 - Ajuste dos Ensaios com a Geogrelha ParaGrid em Silte Argiloso

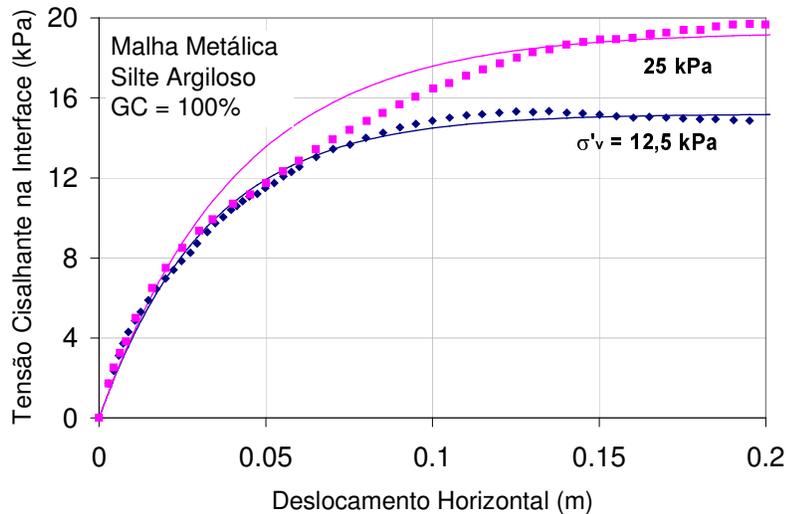


Figura 138 - Ajuste dos Ensaios com a Malha Metálica em Silte Argiloso

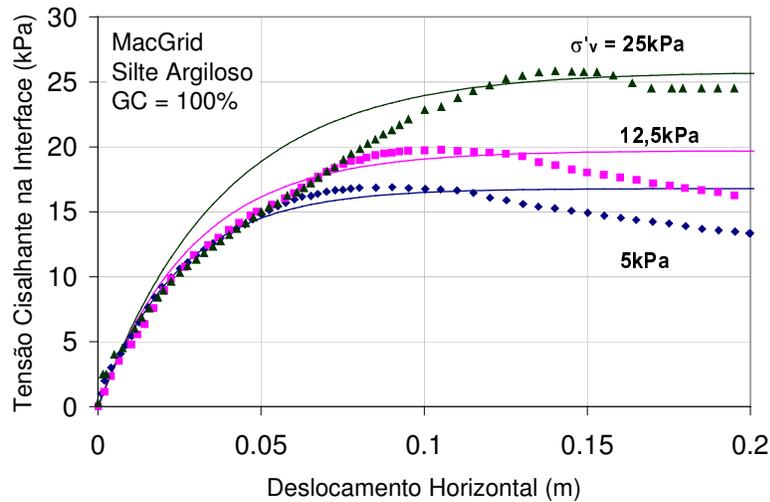


Figura 139 - Ajuste dos Ensaios com a Geogrelha MacGrid em Silte Argiloso

Tabela 33 - Parâmetros do Modelo: Ensaios de Arrancamento

Interface		$k_1$	$n_1$	$K_{sf}$	$\tau_{ult}$ (kPa)
Areia	ParaGrid	65	0,05	$K_{sf} = 65 \cdot \gamma_w \cdot (\sigma'_v / Pa)^{0,05}$	$\tau_{ult} = 15,0 + \sigma'_v \cdot \tan 15^\circ$
	Malha Metálica	52	0,06	$K_{sf} = 52 \cdot \gamma_w \cdot (\sigma'_v / Pa)^{0,06}$	$\tau_{ult} = 10,8 + \sigma'_v \cdot \tan 31^\circ$
	MacGrid	60	0,001	$K_{sf} = 60 \cdot \gamma_w \cdot (\sigma'_v / Pa)^{0,001}$	$\tau_{ult} = 11,1 + \sigma'_v \cdot \tan 40^\circ$
Silte Argiloso	ParaGrid	42	0,005	$K_{sf} = 42 \cdot \gamma_w \cdot (\sigma'_v / Pa)^{0,005}$	$\tau_{ult} = 10 + \sigma'_v \cdot \tan 7^\circ$
	Malha Metálica	100	0,008	$K_{sf} = 100 \cdot \gamma_w \cdot (\sigma'_v / Pa)^{0,008}$	$\tau_{ult} = 11,4 + \sigma'_v \cdot \tan 20^\circ$
	MacGrid	70	0,008	$K_{sf} = 70 \cdot \gamma_w \cdot (\sigma'_v / Pa)^{0,008}$	$\tau_{ult} = 14,5 + \sigma'_v \cdot \tan 23^\circ$

**Legenda:**  $K_{sf}$  = rigidez cisalhante inicial       $\sigma'_v$  = tensão confinante vertical  
 $\tau_{ult}$  = tensão cisalhante na ruptura  
 $k_1, n_1$  = parâmetros adimensionais do modelo

Com os dados da Tabela 33, pode-se obter a tensão cisalhante na ruptura e a rigidez cisalhante, para qualquer nível de tensão confinante vertical. A resistência ao cisalhamento na interface ( $\tau_{SG}$ ) é obtida substituindo-se os valores de  $\tau_{ult}$  e  $k_{sf}$  na equação 86.

### 7.10. Obtenção de Ábacos de Dimensionamento

No dimensionamento de maciços reforçados, a força máxima ( $P_{ult}$ ) atuante na geogrelha para evitar o arrancamento da mesma da massa de solo em que está inserida é dada por:

$$P_{ult} = 2 \cdot A \cdot \tau_{SG} \quad (86)$$

onde:  $A$  é a área embutida da geogrelha e  $\tau_{SG}$  corresponde à tensão cisalhante na interface solo/geogrelha.

A área embutida da geogrelha, por unidade de largura do maciço, pode ser expressa por:

$$A = 1 \cdot L_a \quad (87)$$

onde:  $L_a$  é o comprimento de ancoragem do reforço.

Neste caso, a equação 86 pode ser reescrita como:

$$P_{ult} = 2 \cdot 1 \cdot L_a \cdot \tau_{SG} \quad (88)$$

No presente trabalho, optou-se por estabelecer um parâmetro  $F^*$ , como o parâmetro único de resistência. Este parâmetro, equivale à tensão cisalhante normalizada na interface, e é expresso por:

$$F^* = \frac{\tau_{SG}}{\sigma'_v} \quad (89)$$

Assim, para os solos e geogrelhas utilizados no programa experimental, pode-se obter a força máxima de arrancamento, para determinado nível de confinamento.

A utilização do parâmetro  $F^*$ , no dimensionamento de maciços reforçados, leva em consideração a adesão e o atrito solo/geogrelha, uma vez que  $F^*$  é obtido a partir de  $\tau_{SG}$ .

Para a verificação do fator de segurança contra o arrancamento ( $FS_a$ ) do reforço, utiliza-se a expressão:

$$FS_a = \frac{P_{ult}}{T_i} \quad (90)$$

onde:  $P_{ult}$  é a força máxima de arrancamento e  $T_i$  é o esforço de tração no reforço considerado.

A partir da adoção do parâmetro  $F^*$ , a eq. (90) pode ser rescrita como:

$$FS_a = \frac{2.1.L_a.F^*.\sigma'_v}{T_i} \quad (91)$$

Admitindo-se que o esforço no reforço ( $T_i$ ) é igual à resistência à tração de dimensionamento ( $T_d$ ), obtém-se:

$$T_i = T_d = \frac{T_{ref}}{f_f \cdot f_d \cdot f_a \cdot f_e} \quad (92)$$

onde:  $T_{ref}$  = resistência à tração obtida em ensaios índice;  
 $f_f$  = fator de redução devido a deformações por fluência;  
 $f_d$  = fator de redução devido a danos de instalação;  
 $f_a$  = fator de redução devido à degradação pelo meio ambiente (química e biológica);  
 $f_e$  = fator de redução devido a eventuais emendas.

As Figuras 140 a 142 apresentam a variação do parâmetro  $F^*$ , em função do nível de confinamento, para os três tipos de geogrelha e os dois tipos de solo ensaiados. Cada gráfico representa um tipo de geogrelha e cada curva apresentada refere-se a um fator de segurança de projeto.

Observa-se que o parâmetro  $F^*$  diminui com a aumento do confinamento e do fator de segurança. É importante salientar que a resistência ao arrancamento de uma geogrelha não pode exceder a resistência à tração da mesma. Desta forma, nos ábacos apresentados para a geogrelha ParaGrid, o nível de confinamento chega a 50kPa ( $h_{aterro} \cong 2,5m$ ). Nos ábacos das geogrelhas MacGrid e Metálica, a tensão confinante máxima é de 35kPa ( $h_{aterro} \cong 1,75m$ ), e 25kPa ( $h_{aterro} \cong 1,25m$ ), respectivamente, uma vez que níveis superiores de confinamento conduzem à ruptura da malha por tração.

Nos ábacos apresentados para a ParaGrid (Figura 140), observa-se que o parâmetro  $F^*$  para a areia é significativamente superior ao  $F^*$  obtido com silte argiloso. O parâmetro  $F^*$  é calculado a partir dos parâmetros de resistência na interface ( $c'_a$  e  $\delta'$ ). A geogrelha ParaGrid apresentou reduzida interação com o solo silto-argiloso, e portanto, parâmetros reduzidos de resistência na interface.

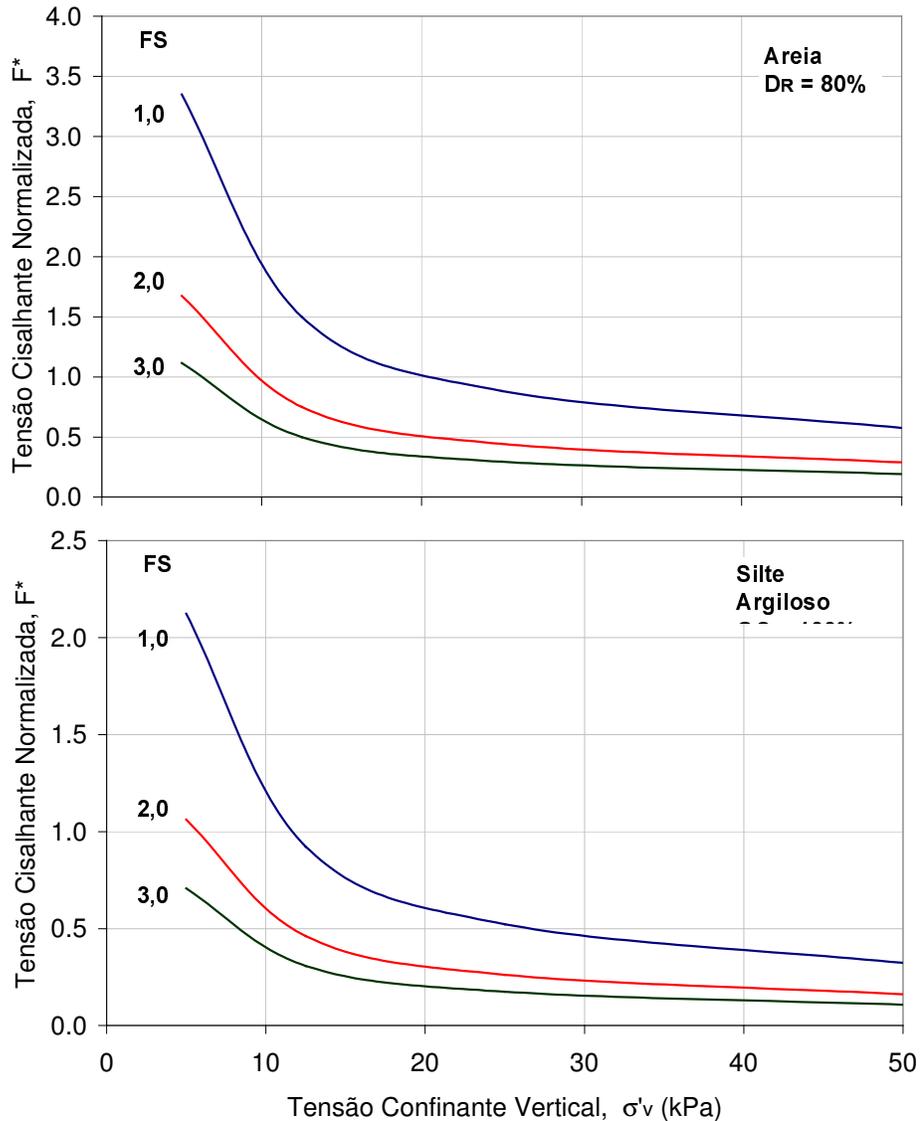


Figura 140 - Parâmetro  $F^*$  para Maciços Reforçados com a Geogrelha PG

Nos ábacos apresentados para a Malha Metálica Hexagonal (Figura 141), o parâmetro  $F^*$  assume valores bem próximos para ambos os tipos de solo, sob baixos níveis de confinamento. Com o aumento da tensão confinante,  $F^*$  atinge

valores mais elevados na interface MH/areia. O aumento de  $F^*$  é devido ao ângulo de atrito na interface MH/areia ser superior ao ângulo de atrito na interface MH/silte argiloso.

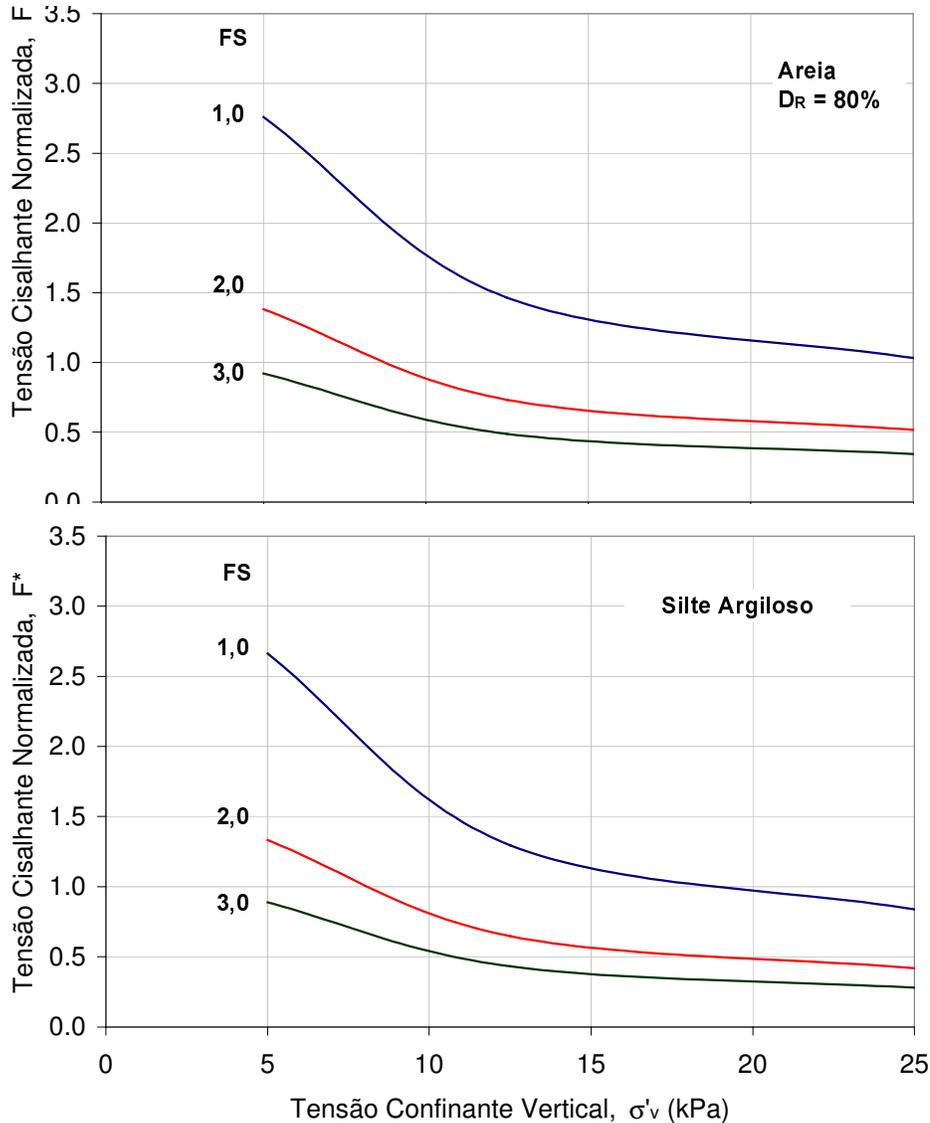


Figura 141 - Parâmetro  $F^*$  para Maciços Reforçados com a Geogrelha MH

No caso da geogrelha MacGrid (Figura 142), nota-se que  $F^*$  assume valores mais elevados em silte argiloso do que em areia, sob baixos níveis de confinamento. Este fato está relacionado aos parâmetros de interface ( $c'_a$  e  $\delta'$ ). Para baixas tensões confinantes, a parcela de adesão ( $c'_a$ ) predomina sobre a parcela de atrito ( $\sigma'_v \cdot \tan \delta'$ ).

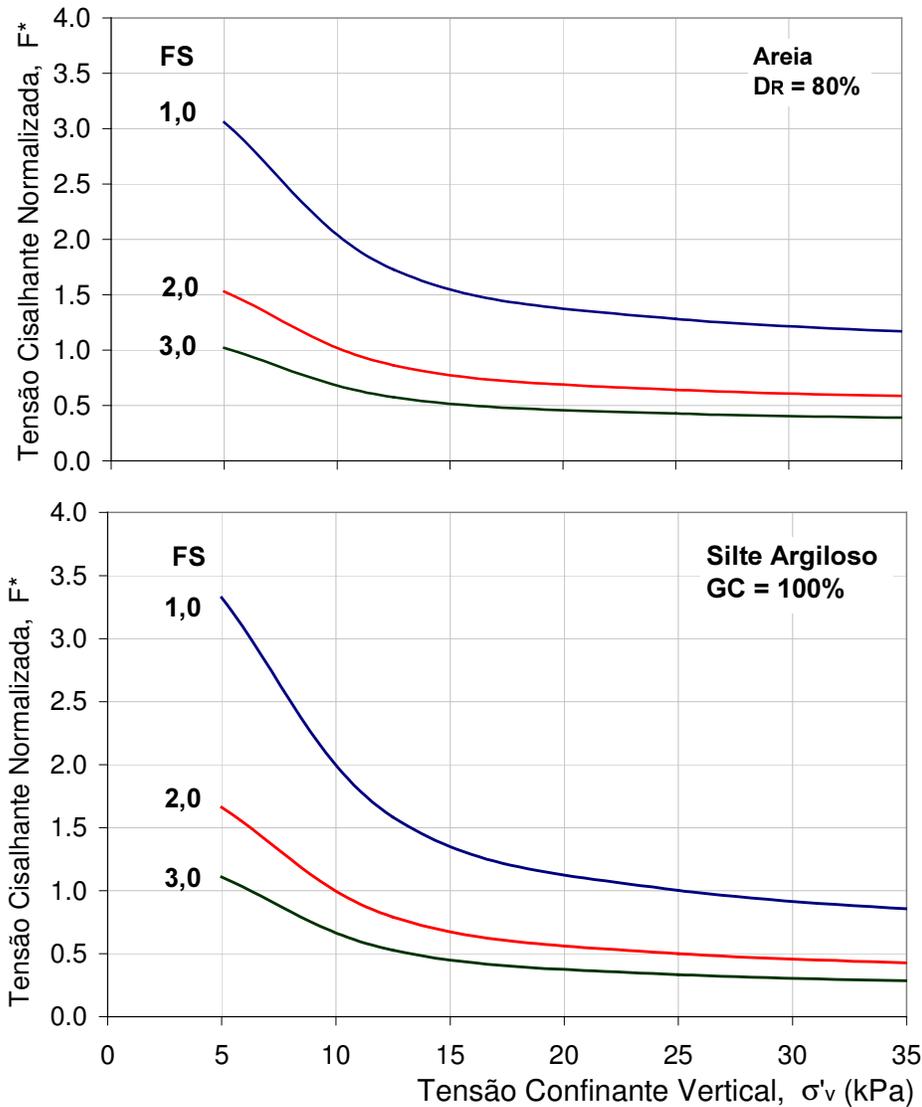


Figura 142 - Parâmetro  $F^*$  para Maciços Reforçados com a Geogrelha MG

Adicionalmente, foram desenvolvidos ábacos em função do deslocamento admissível de projeto. Estes ábacos foram obtidos a partir das curvas experimentais e do modelo proposto. Para um dado valor de deslocamento relativo  $dh_1$ , verificou-se o deslocamento frontal correspondente  $dh_f$ , nas curvas Deslocamento Frontal *versus* Deslocamentos Internos dos ensaios de arrancamento. Este procedimento foi utilizado, tendo em vista que os deslocamentos frontais não correspondem aos deslocamentos relativos na interface. Existe uma parcela de deslocamento devido à deformação inicial do trecho não confinado. Como o modelo adotado foi calibrado em função dos

deslocamentos frontais, faz-se necessário o conhecimento do deslocamento frontal  $dh_f$  correspondente ao deslocamento relativo  $dh_1$ .

A tensão cisalhante na interface foi obtida através da eq. 84, em função do deslocamento frontal correspondente ( $dh_f$ ) e da tensão confinante vertical ( $\sigma'_v$ ). Os ábacos propostos, tendo em vista o deslocamento admissível de projeto, estão apresentados nas Figuras 143 e 144.

Observa-se que, quanto maior o deslocamento relativo na interface solo/geogrelha, maior a resistência mobilizada na interface, e conseqüentemente, maior o parâmetro  $F^*$ .

Em solo arenoso, nota-se que  $F^*$  varia sensivelmente com o deslocamento relativo admissível. No entanto, em solo silto-argiloso, esta variação não é tão significativa, principalmente no caso das geogrelhas MacGrid e Metálica.

Nos ensaios de arrancamento, observa-se que a curva Tensão Cisalhante na Interface *versus* Deslocamento atinge um patamar de resistência, para determinado valor de deslocamento. Os ábacos apresentados indicam que, a partir de um determinado valor de  $dh$ , o parâmetro  $F^*$  tende a um valor constante, para um mesmo valor de tensão confinante.

Ressalta-se que os ábacos apresentados são válidos apenas para as geogrelhas (PG, MH e MG) e os solos utilizados no programa experimental. Além disso, deve-se levar em consideração as mesmas condições de compactação do solo silto-argiloso ( $GC=100\%$ ) ou de densidade relativa da areia ( $D_R=80\%$ ). Nas discussões apresentadas nos itens 7.3.2 a 7.3.4, verificou-se que o tipo de geogrelha, o tipo de solo e o estado de densidade do solo influenciam de forma marcante a resistência ao arrancamento.

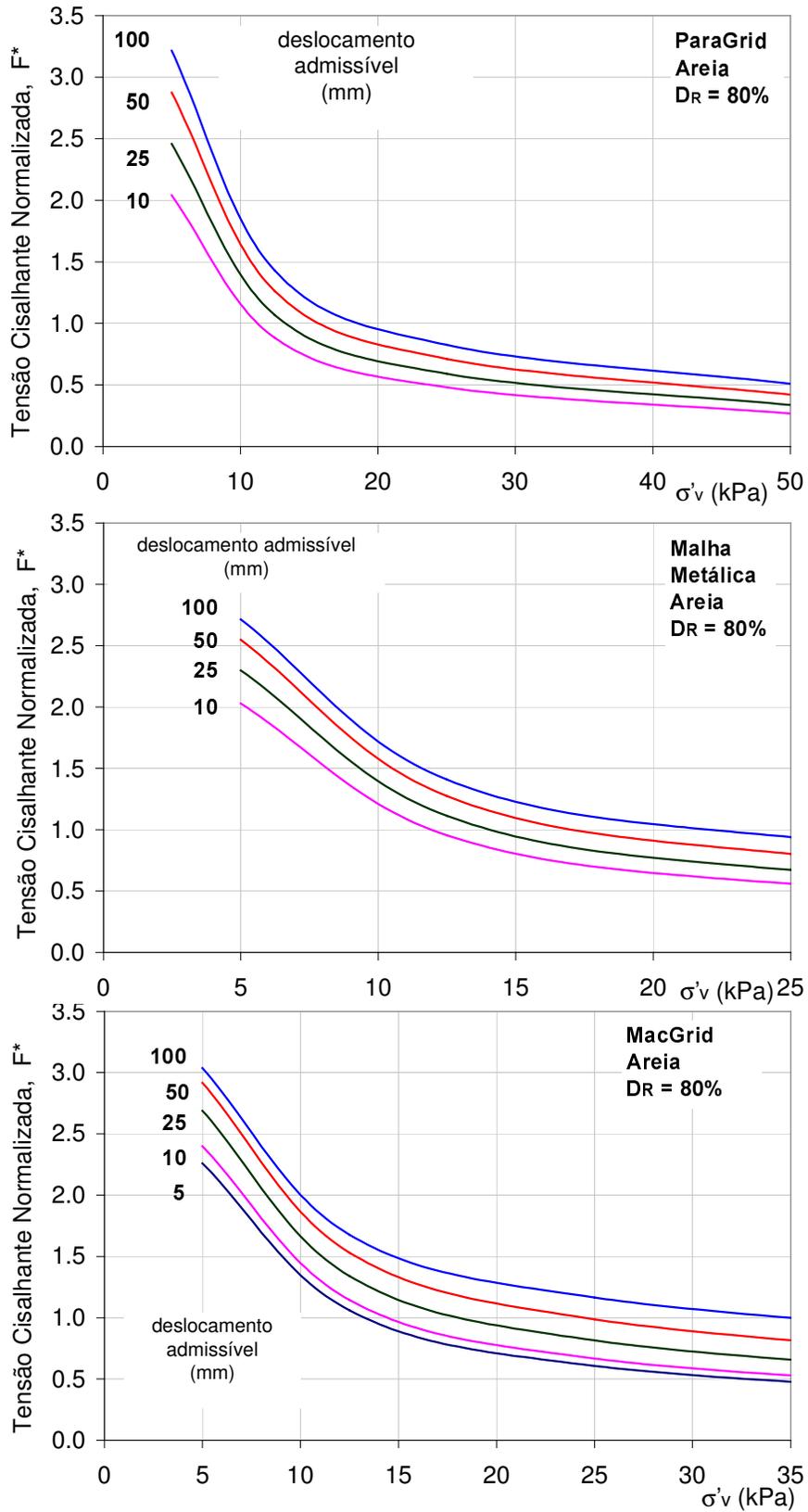


Figura 143 - Parâmetro  $F^*$  em Função do Deslocamento Admissível de Projeto: Solo Arenoso

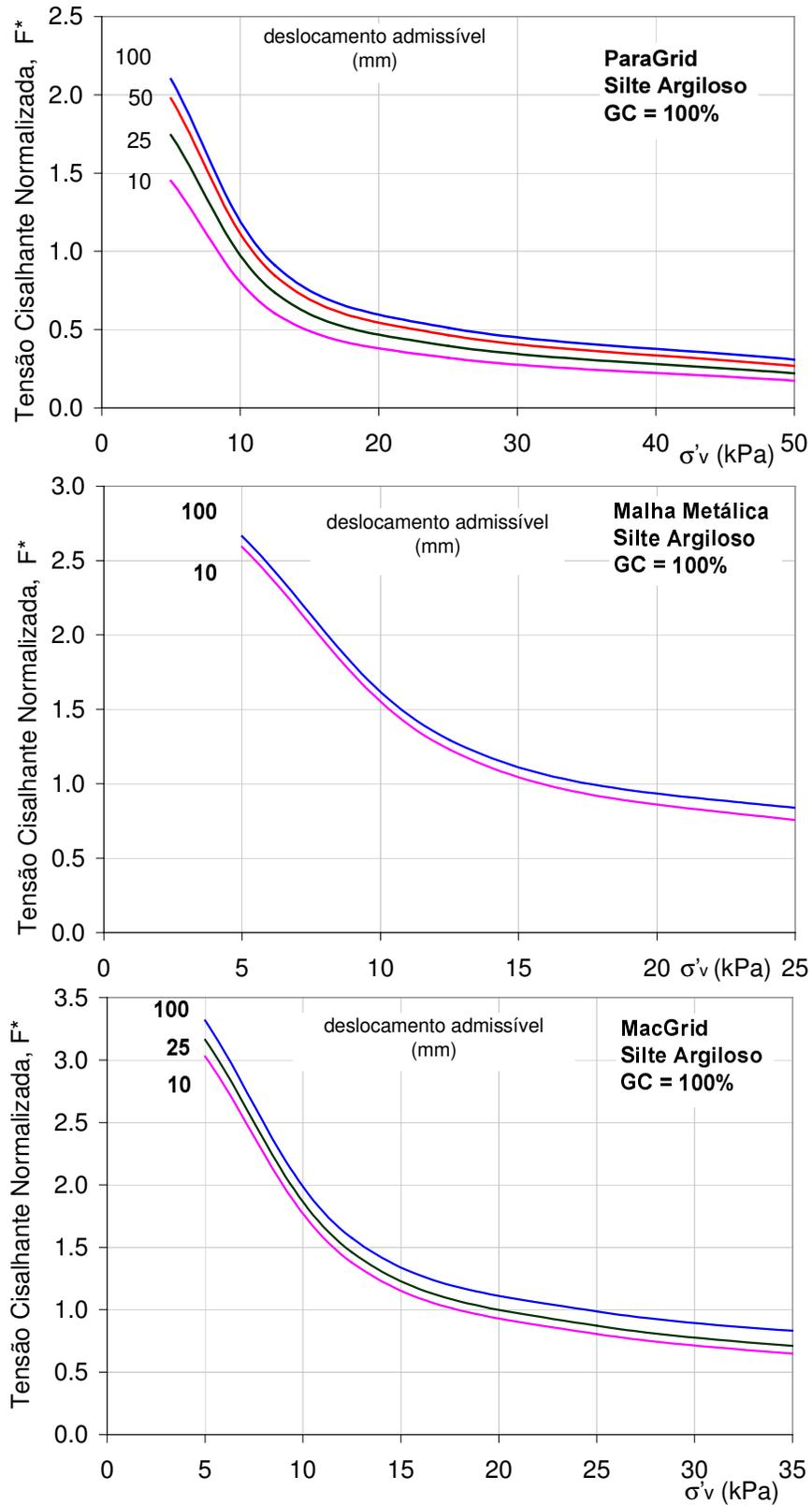


Figura 144 - Parâmetro  $F^*$  em Função do Deslocamento Admissível de Projeto: Solo Silto-Argiloso

## 7.11. Considerações Finais

Neste Capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de arrancamento executados no presente programa experimental. Uma análise da influência da tensão confinante, da densidade relativa, do tipo de solo e do tipo de geogrelha na resistência ao arrancamento foi apresentada, juntamente com os fatores de interação propostos para o dimensionamento de maciços reforçados.

O processo de mobilização de tensões e deformações ao longo das geogrelhas foi analisado com base na instrumentação adotada, que consistiu em *tell-tails* e *strain-gages*. Um modelo simples foi apresentado para a previsão da tensão cisalhante na ruptura e da rigidez ao cisalhamento, para qualquer nível de tensão confinante vertical.

Como principais conclusões ressalta-se que, quanto maior a tensão confinante, maior a resistência e o deslocamento necessário para induzir a ruptura da inclusão por arrancamento. Um incremento da tensão de confinamento conduz a um aumento da resistência ao arrancamento, devido ao aumento da resistência de atrito na interface e da resistência passiva dos elementos transversais.

A densidade relativa tem efeito semelhante ao da tensão confinante na resistência da interface solo-geogrelha. O aumento da densidade relativa ocasiona um aumento na resistência ao arrancamento. Pode-se observar uma correlação aproximadamente linear entre a densidade relativa e a resistência ao arrancamento.

Os ensaios executados com areia apresentaram sempre valores superiores de resistência ao arrancamento, independente do tipo de geogrelha e do nível de confinamento, indicando que a dimensão dos grãos do solo influencia a resistência ao arrancamento.

A geogrelha MacGrid mobilizou a maior interação com ambos os tipos de solo, para tensões confinantes inferiores a 25kPa. No caso de maciços reforçados, a escolha do tipo de geogrelha deve considerar a interação da inclusão com o solo envolvente, e não apenas, a rigidez e a resistência à tração da geogrelha.

A magnitude da resistência ao arrancamento pode ser desmembrada em parcelas que correspondem à mobilização do atrito e da adesão superficial e à mobilização da resistência passiva dos elementos transversais. Dependendo do tipo de geogrelha, observa-se a predominância de uma ou outra parcela. O atrito na interface depende do tipo de solo, da rugosidade da grelha e da tensão normal.

A resistência passiva depende fundamentalmente da geometria da geogrelha e do tipo de solo envolvente.

Quanto ao processo de mobilização de tensões e deformações durante o arrancamento, observou-se uma diminuição gradativa da força de arrancamento ao longo do comprimento da geogrelha. Os deslocamentos internos, medidos em pontos distintos da grelha, diminuem à medida que aumenta a distância ao ponto de aplicação da força de arrancamento. Quanto mais rígida for a geogrelha, mais uniformes devem ser os deslocamentos, pois o reforço se desloca como um corpo rígido.

Finalmente, foram propostos ábacos para o dimensionamento de maciços reforçados com base nos resultados dos ensaios de arrancamento. Estes ábacos são válidos apenas para as geogrelhas (PG, MG e MH) e solos utilizados no programa experimental.