

## 9 Resultados dos ensaios de arrancamento

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento realizados no aterro experimental, bem como detalhes e características das rupturas que condicionaram o final dos ensaios.

Também são apresentadas análises dos resultados obtidos e ensaios adicionais realizados, em campo, para investigar a influência das condições de contorno dos ensaios de arrancamento na resistência à tração apresentada das geogrelhas ensaiadas.

### 9.1. Resultados dos ensaios de arrancamento

Devido às restrições impostas pelo cronograma da obra e aos atrasos na construção do aterro experimental não foi possível realizar os dezoito ensaios previstos. Ao invés disto, foram realizados dezesseis ensaios.

Nas Figura 152 a Figura 183 são apresentados os resultados dos dezesseis ensaios realizados. O ensaio piloto também é exibido, mas foi precocemente interrompido por uma ruptura na garra, conforme descrição apresentada no capítulo 6. em cada figura são indicados a umidade ótima, o desvio de umidade e a tensão vertical.

As Figuras de numeração ímpar apresentam os deslocamentos de cada *tell-tale* (ao longo do ensaio) vs. a carga distribuída por unidade largura medida pela célula de carga. Na maioria dos ensaios de arrancamento não foram mobilizados todos os *tell-tales*. Por esta razão, vários gráficos apresentam somente dados de quatro ou cinco *tell-tales*.

As Figuras de numeração par apresentam a distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* (ao longo da geogrelha) no momento em que foi atingido o máximo carregamento do ensaio.

Cabe ressaltar que, em dois ensaios não foram percebidos deslocamentos nas geogrelhas. Os resultados destes ensaios são apresentados nas Figuras 158, 159, 174 e 175.

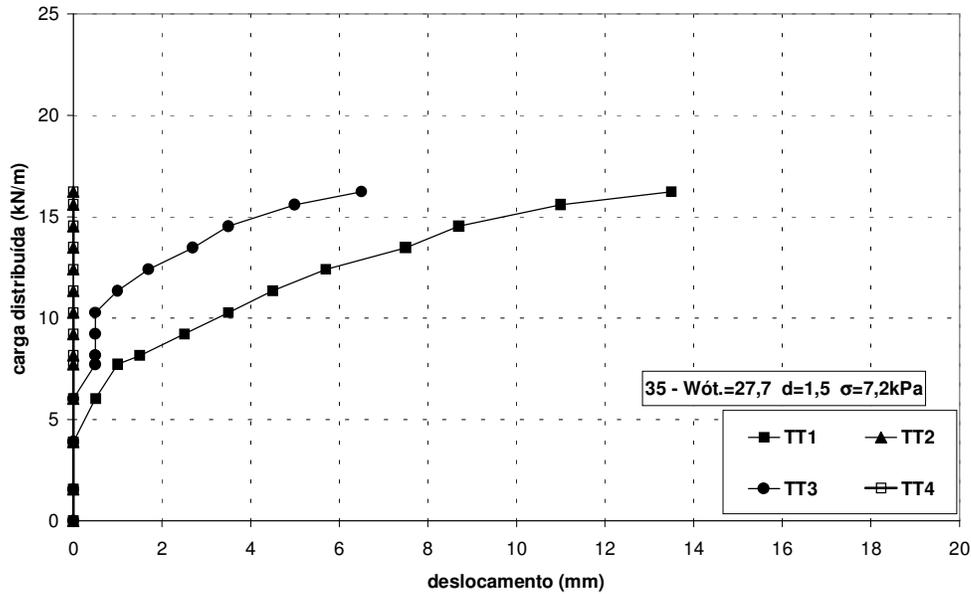


Figura 152- Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 35, lado seco e tensão confinante de 7,2kPa.

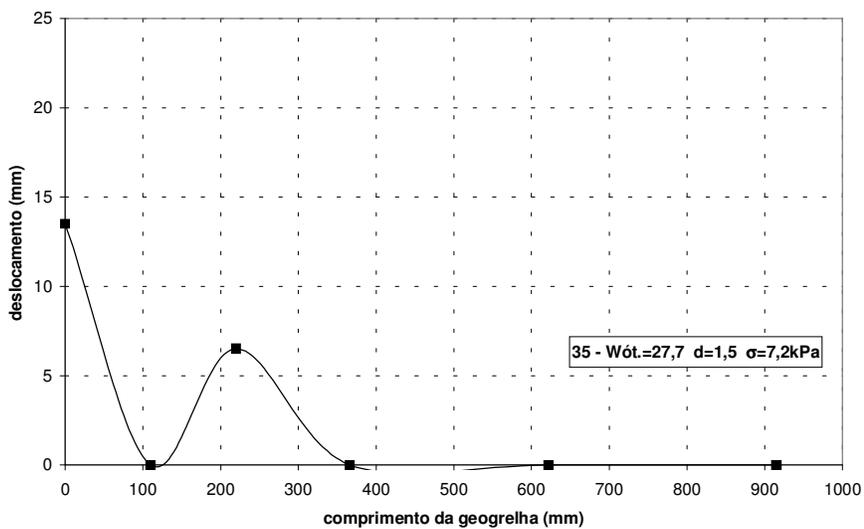


Figura 153 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 35, lado seco e tensão confinante de 7,2kPa.

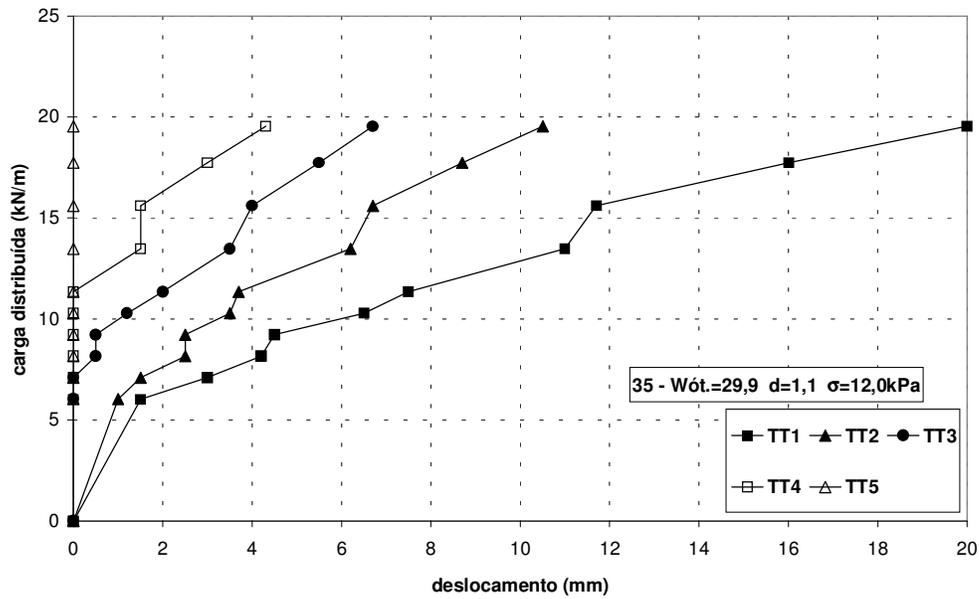


Figura 154 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 35, lado seco e tensão confinante de 12,0kPa.

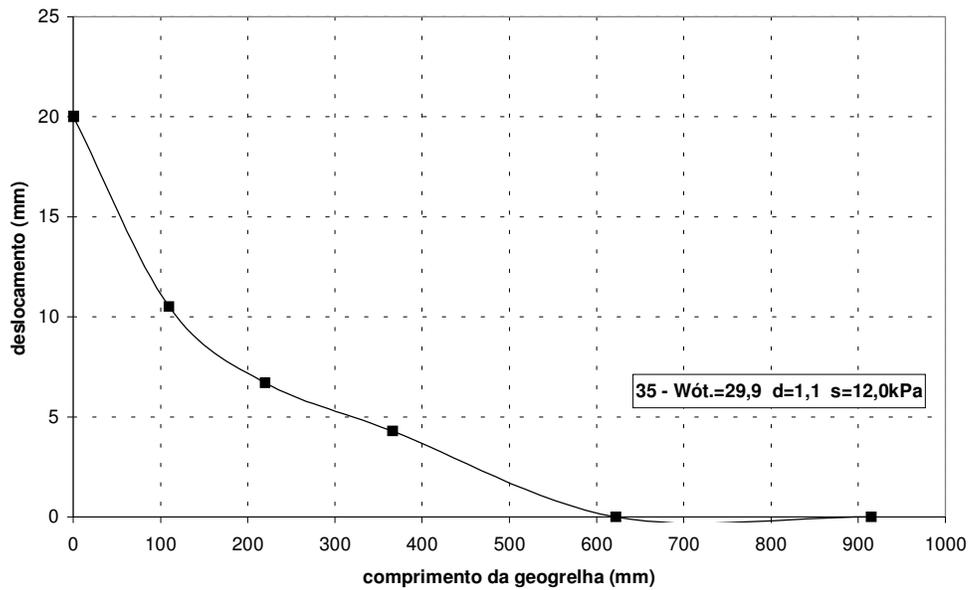


Figura 155 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 35, lado seco e tensão confinante de 12,0kPa.

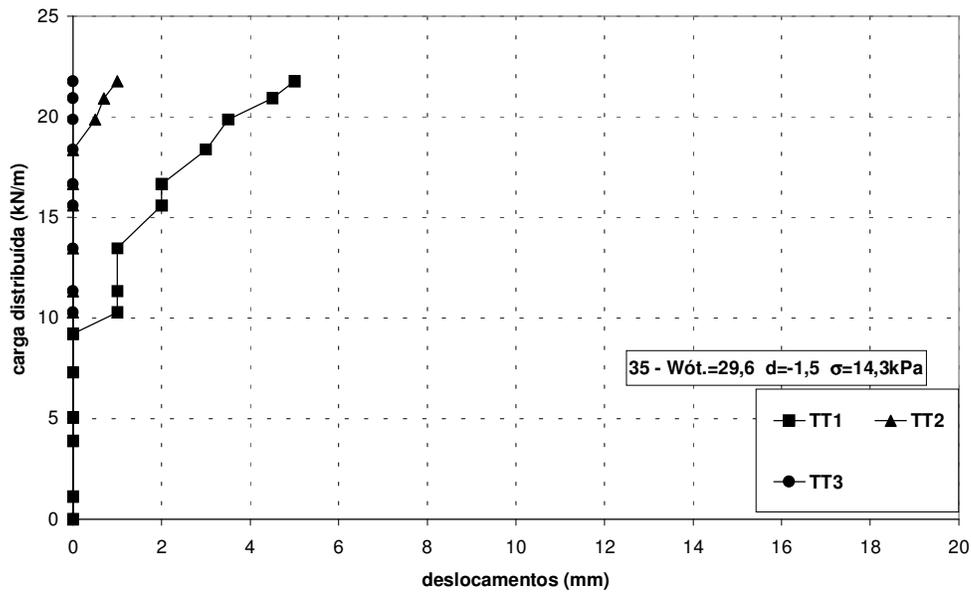


Figura 156 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 35, lado seco e tensão confinante de 14,3kPa.

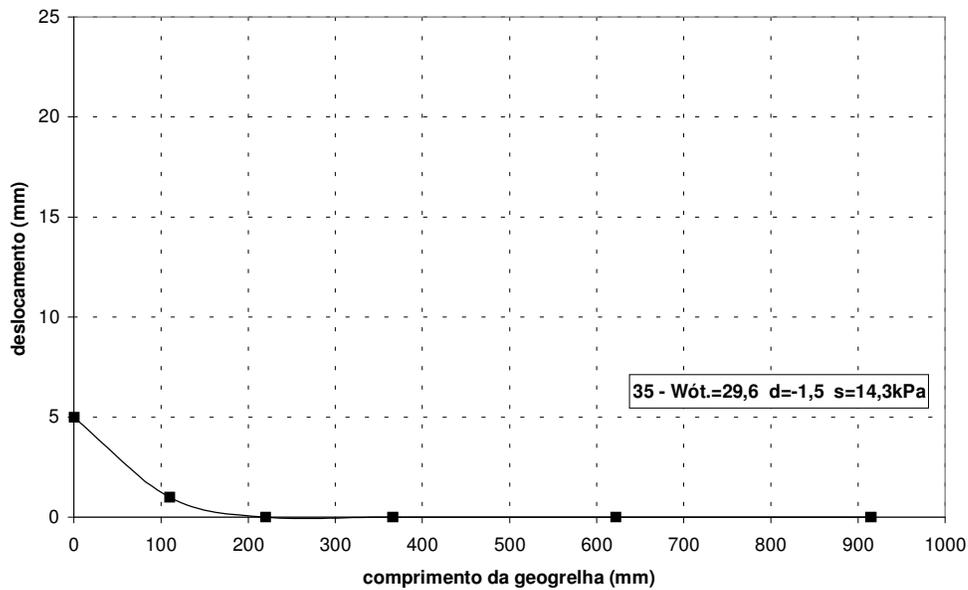


Figura 157 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 35, lado seco e tensão confinante de 14,3kPa.

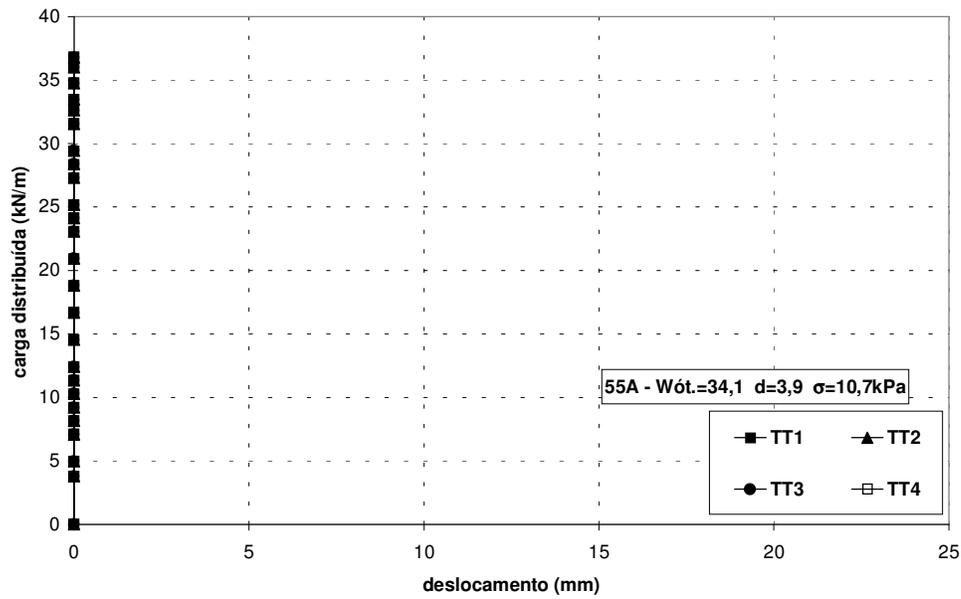


Figura 158 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado úmido e tensão confinante de 10,7kPa.

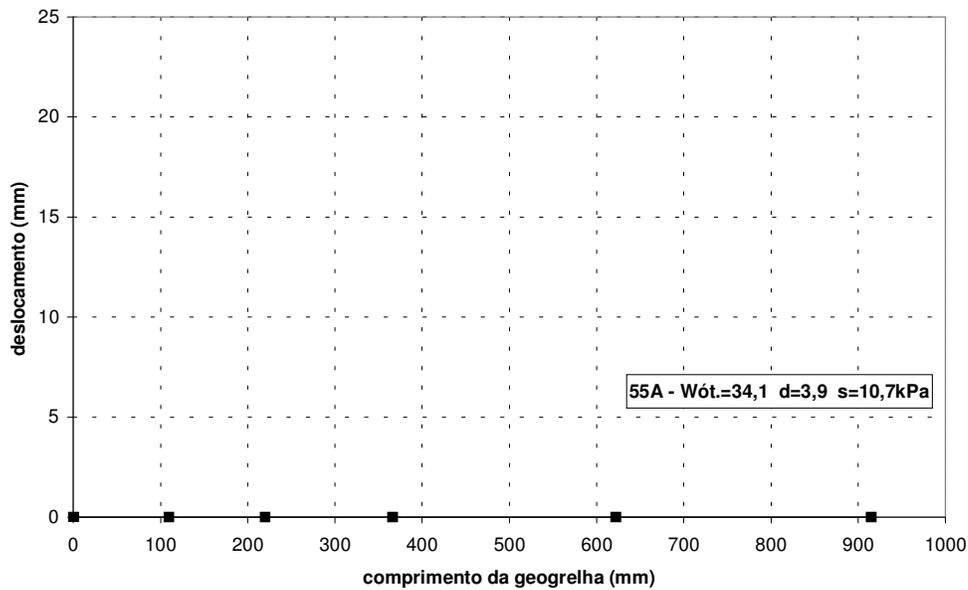


Figura 159 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado úmido e tensão confinante de 10,7kPa.

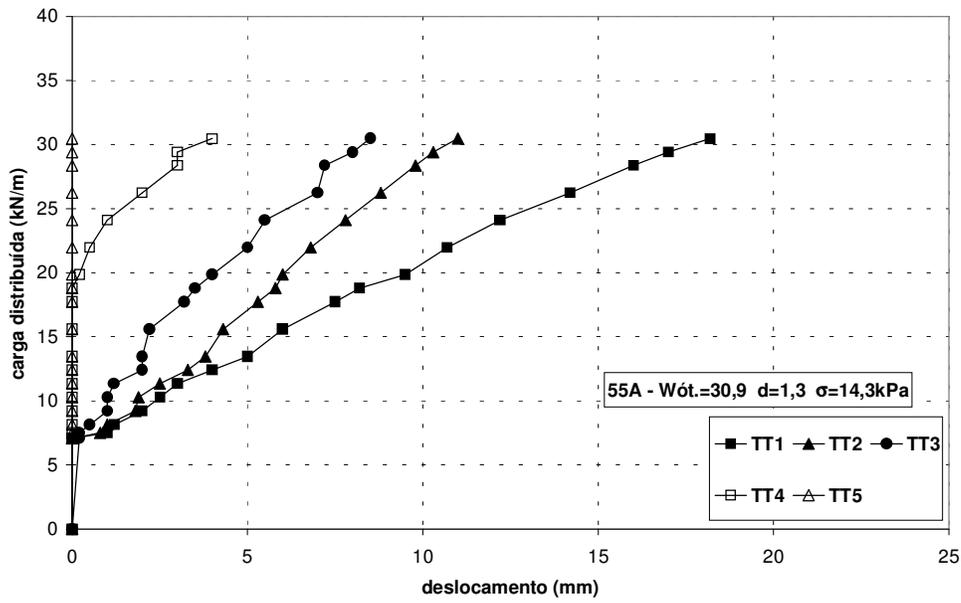


Figura 160 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado úmido e tensão confinante de 14,3kPa.

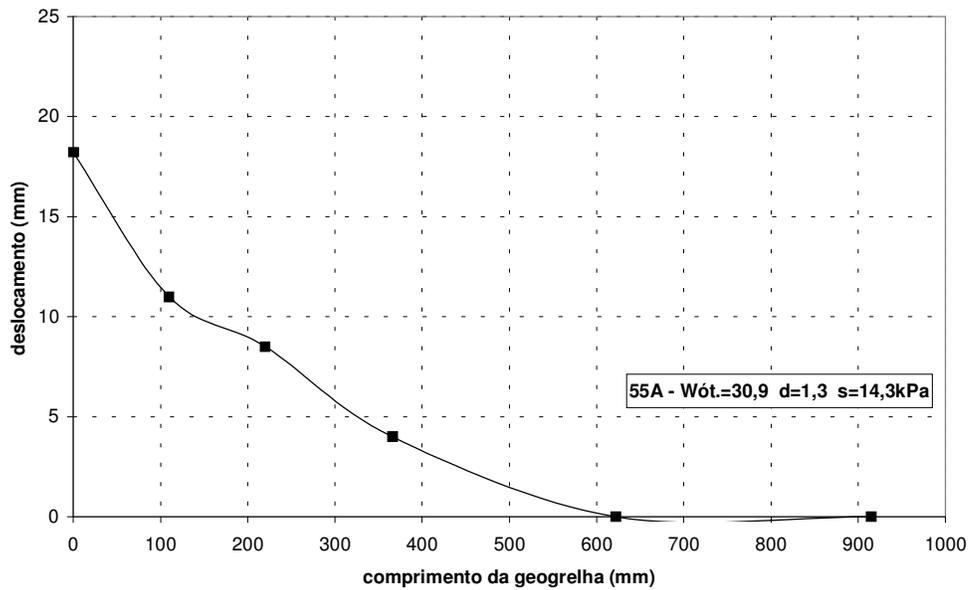


Figura 161 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado úmido e tensão confinante de 14,3kPa.

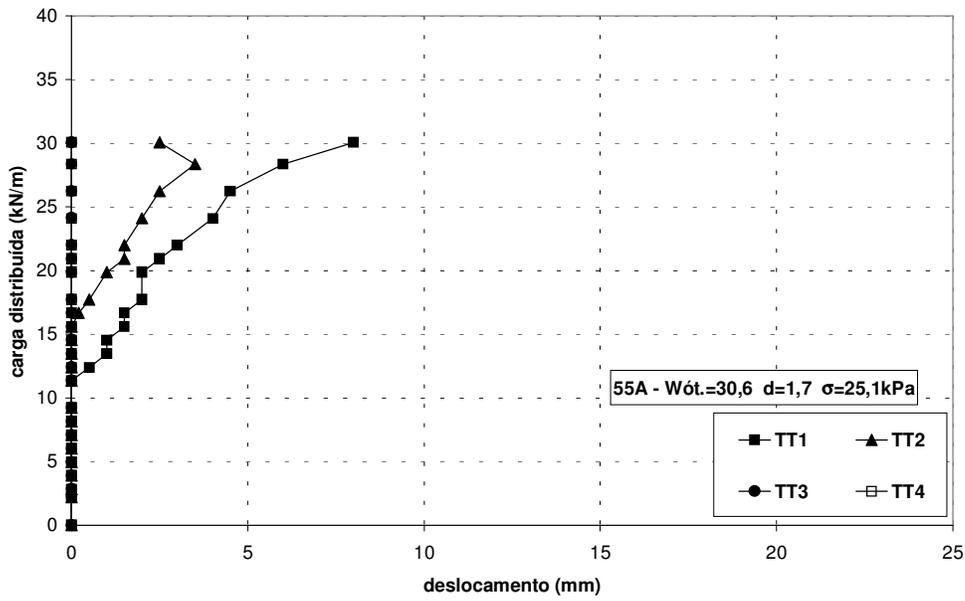


Figura 162 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado úmido e tensão confinante de 25,1kPa.

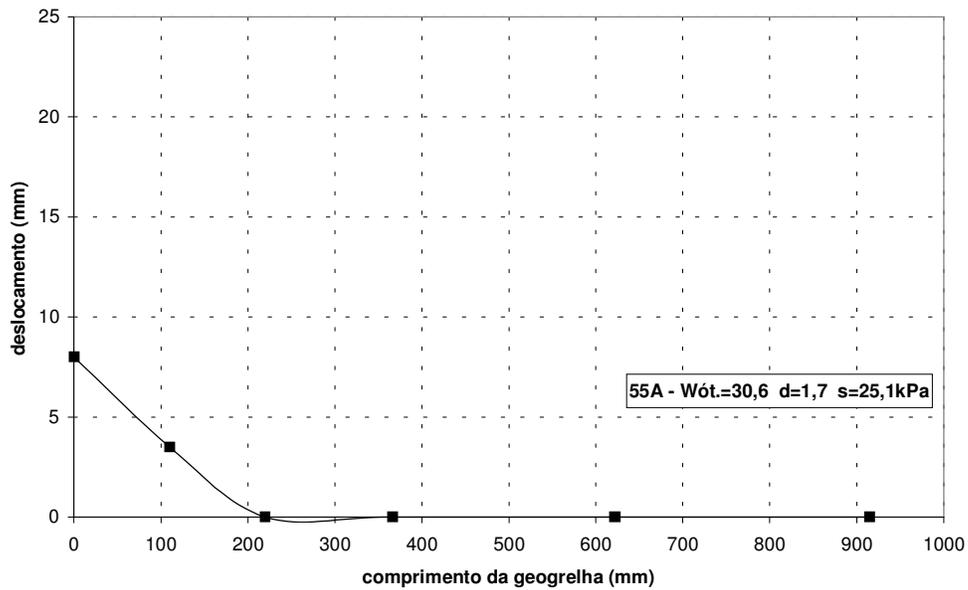


Figura 163 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado úmido e tensão confinante de 25,1kPa.

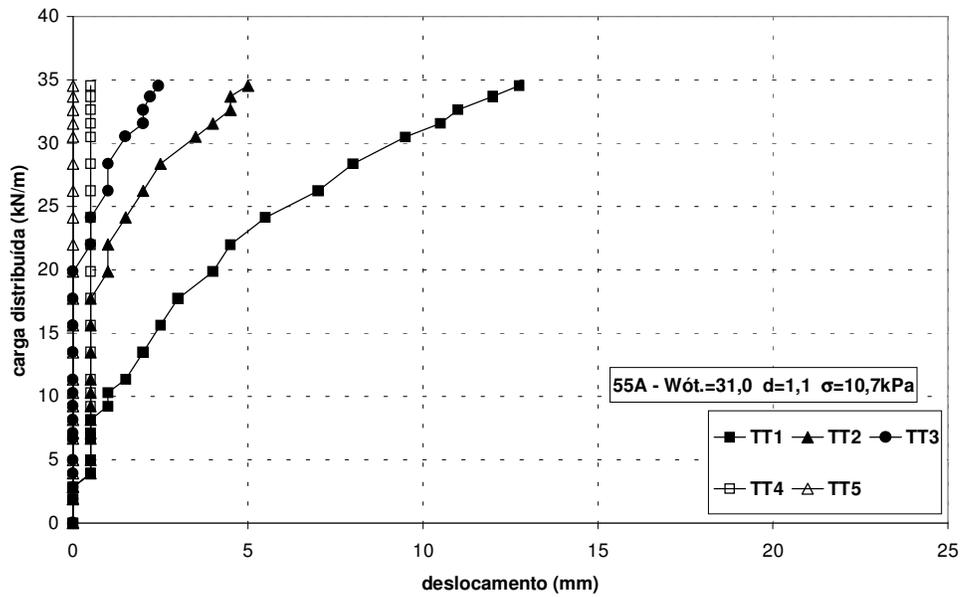


Figura 164 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 10,7kPa.

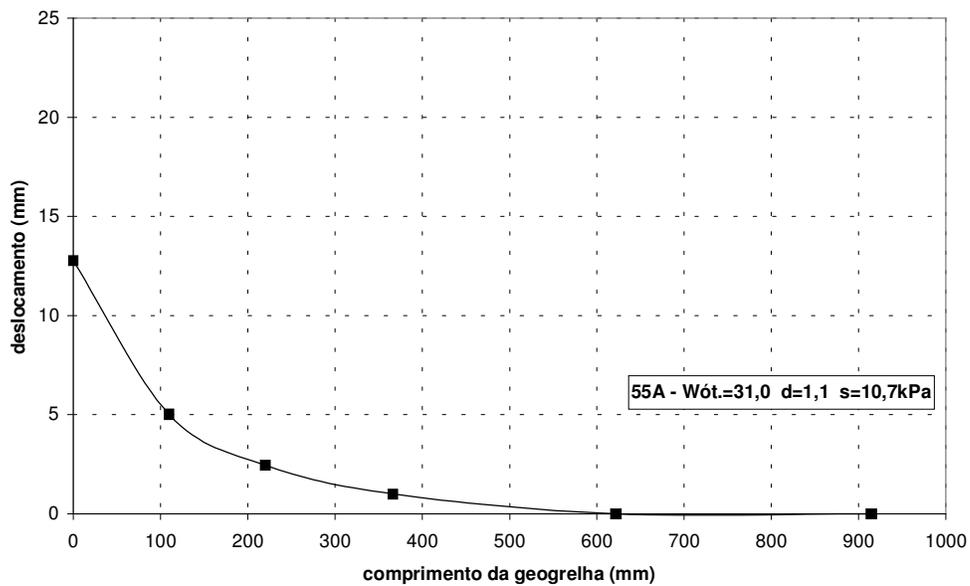


Figura 165- Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 10,7kPa.

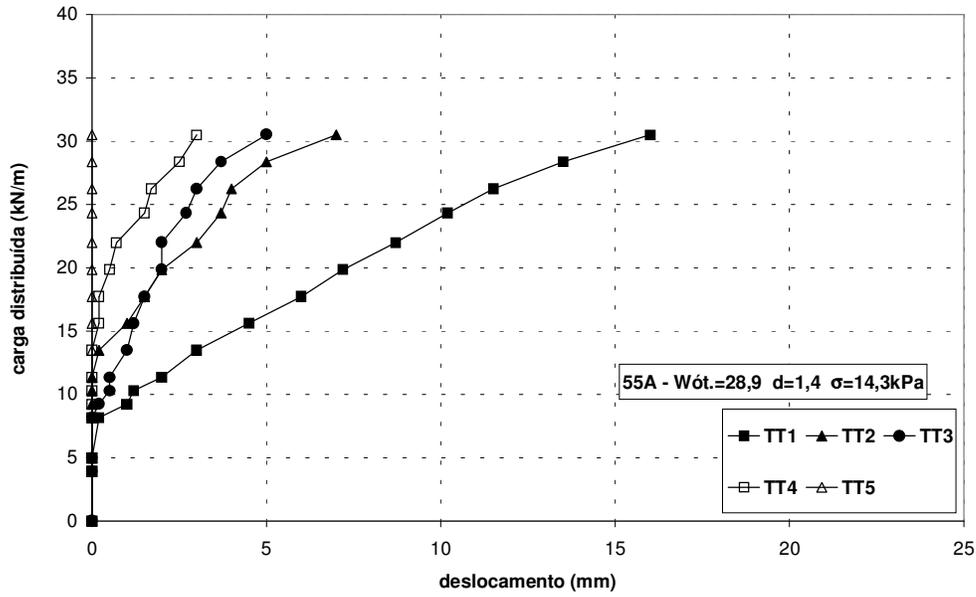


Figura 166 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 14,3kPa – Primeiro ensaio.

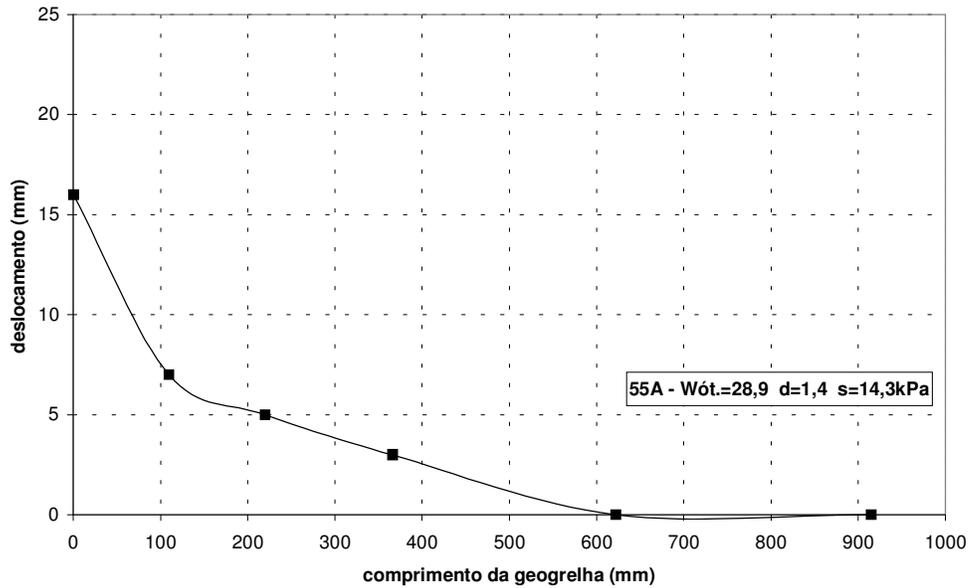


Figura 167 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 14,3kPa – Primeiro ensaio.

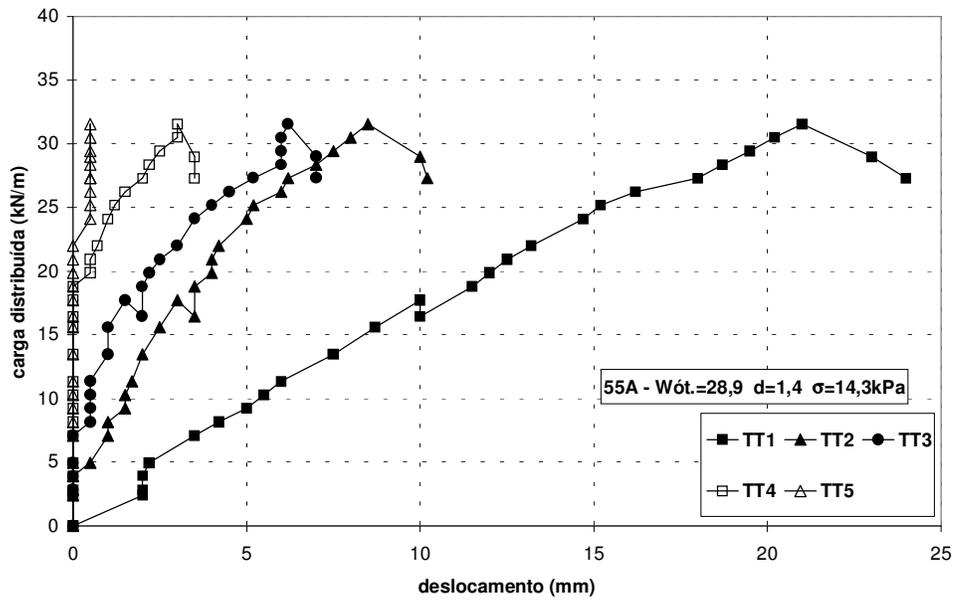


Figura 168 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 14,3kPa – Segundo ensaio.

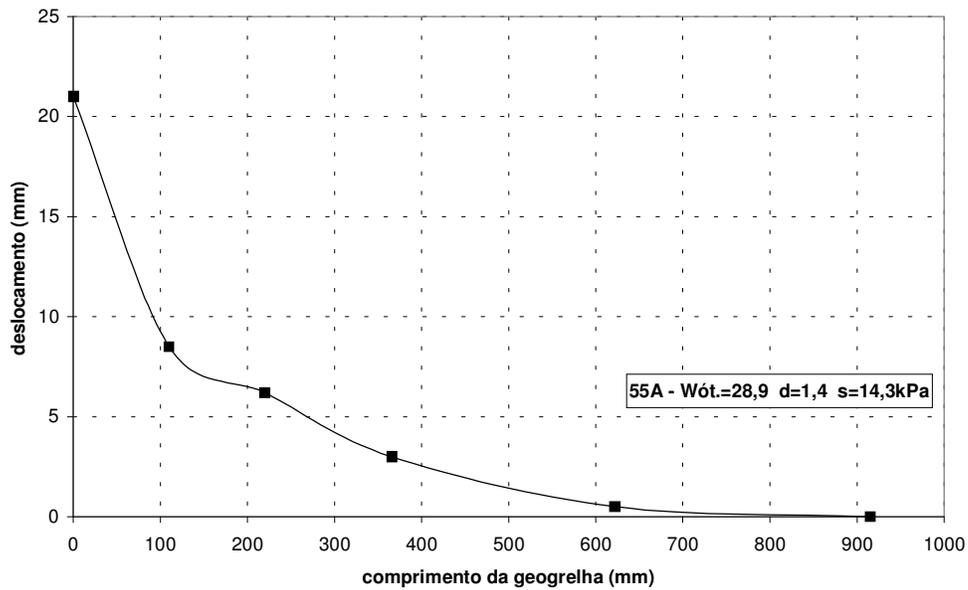


Figura 169 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 14,3kPa – Segundo ensaio.

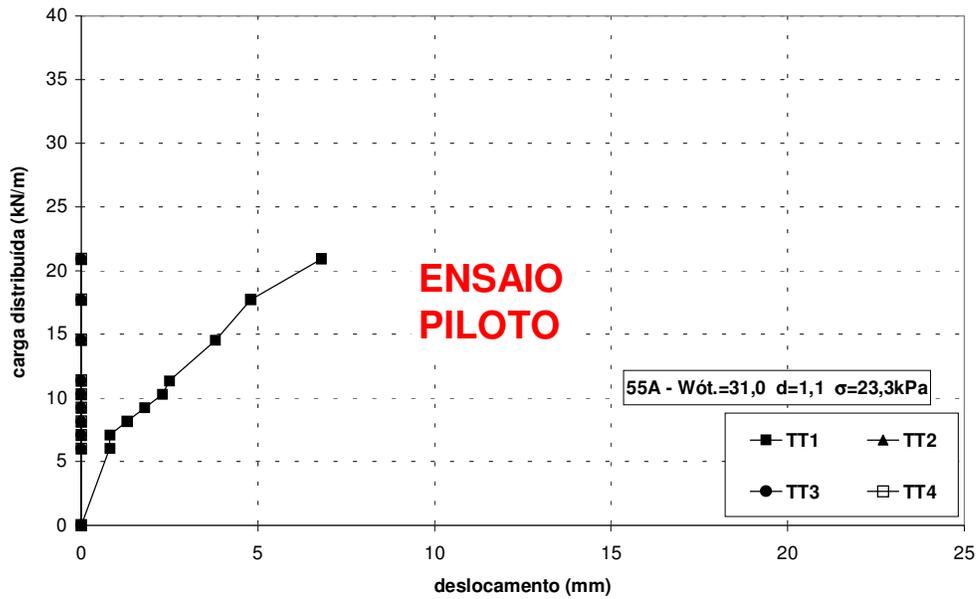


Figura 170 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 23,3kPa – Ensaio piloto.

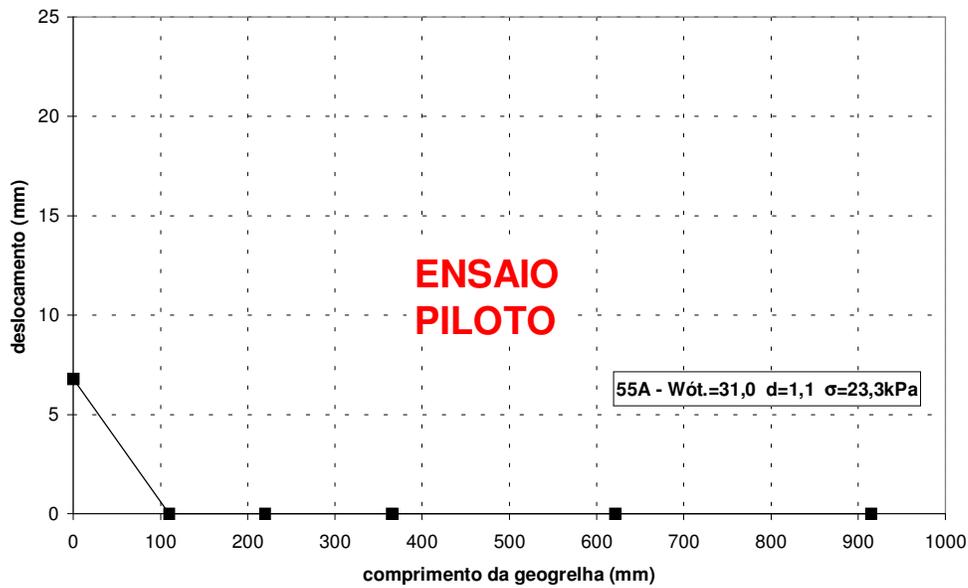


Figura 171 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 23,3kPa – Ensaio piloto.

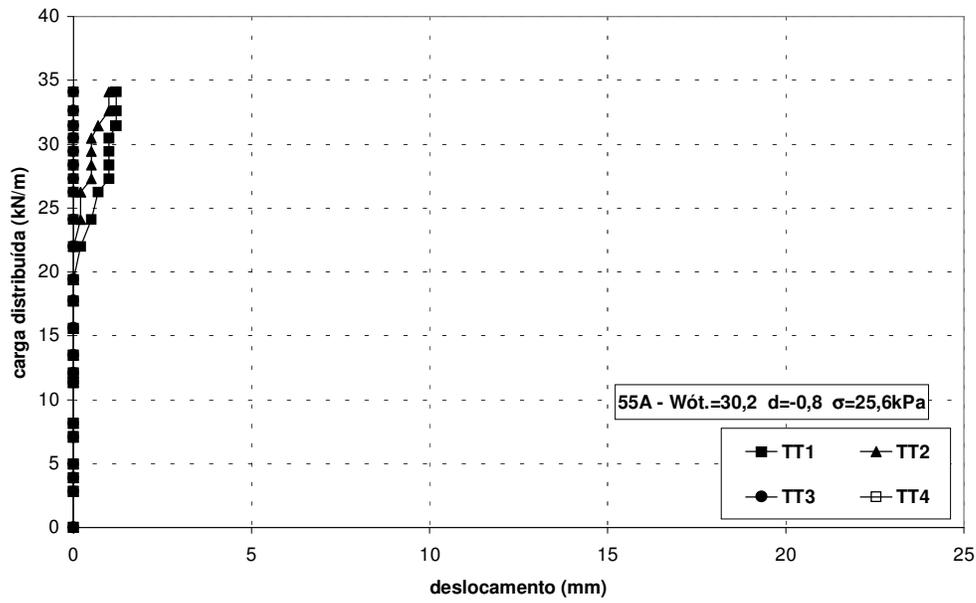


Figura 172 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 25,6kPa.

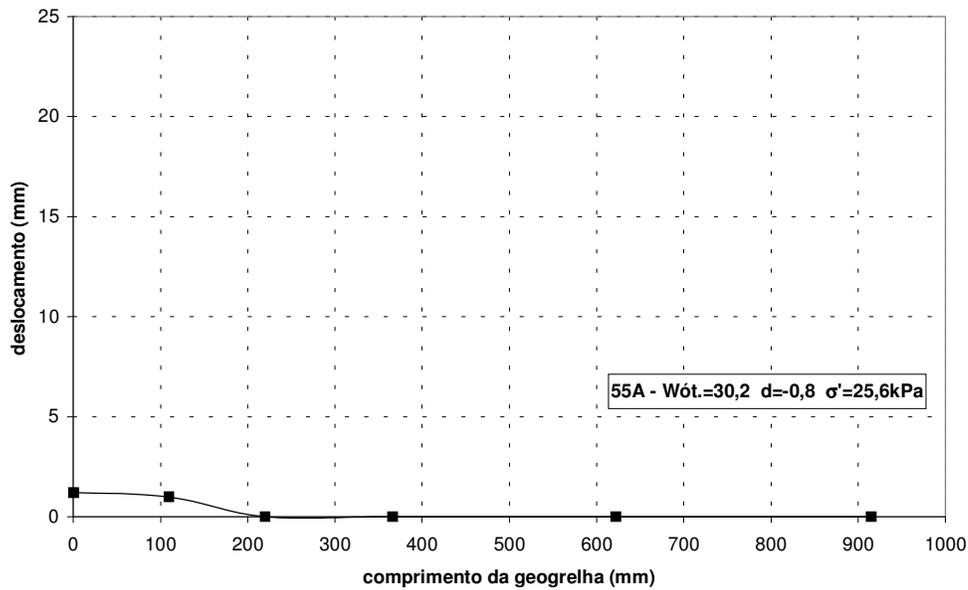


Figura 173 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 25,6kPa.

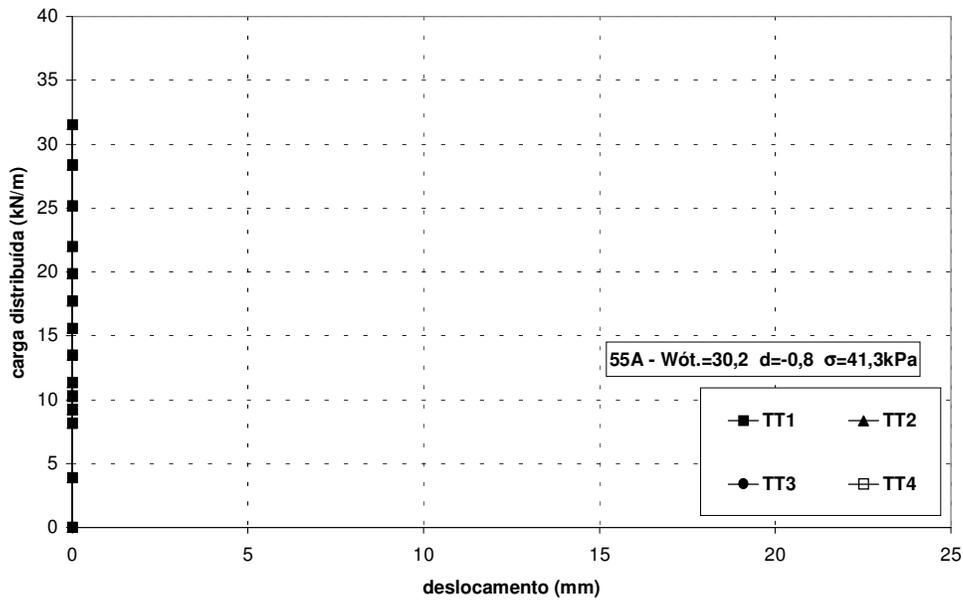


Figura 174 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 41,3kPa.

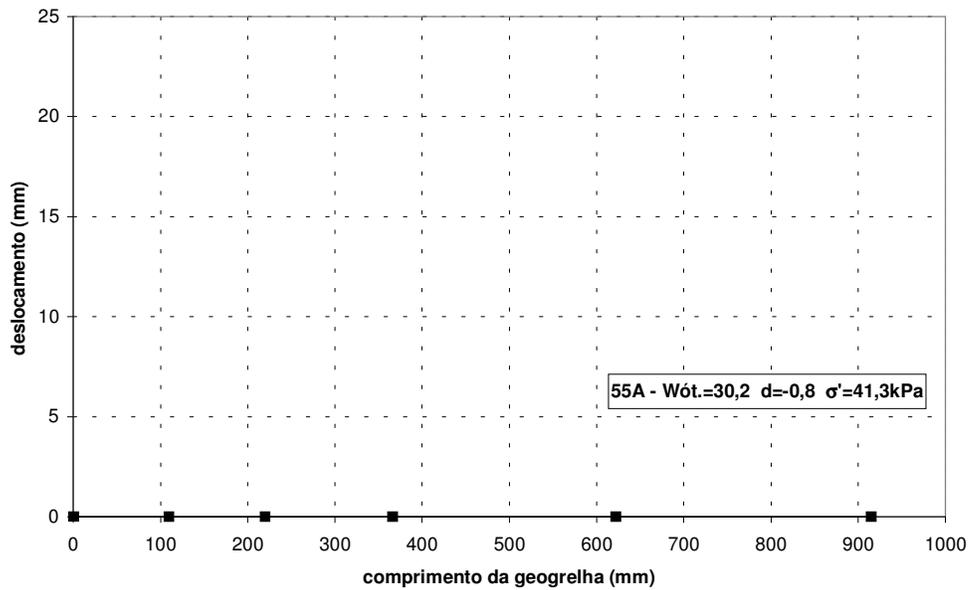


Figura 175 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 41,3kPa.

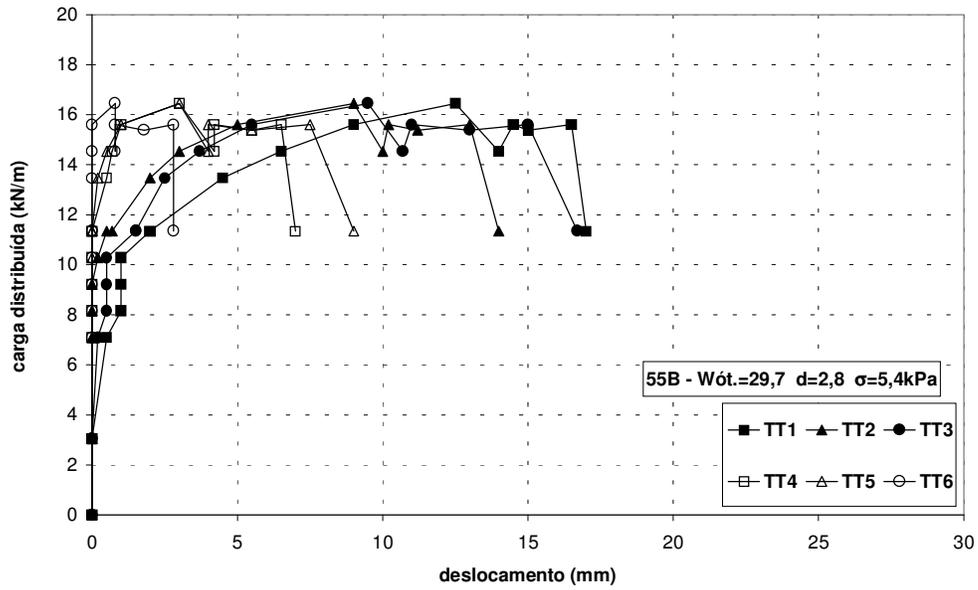


Figura 176 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 5,4kPa.

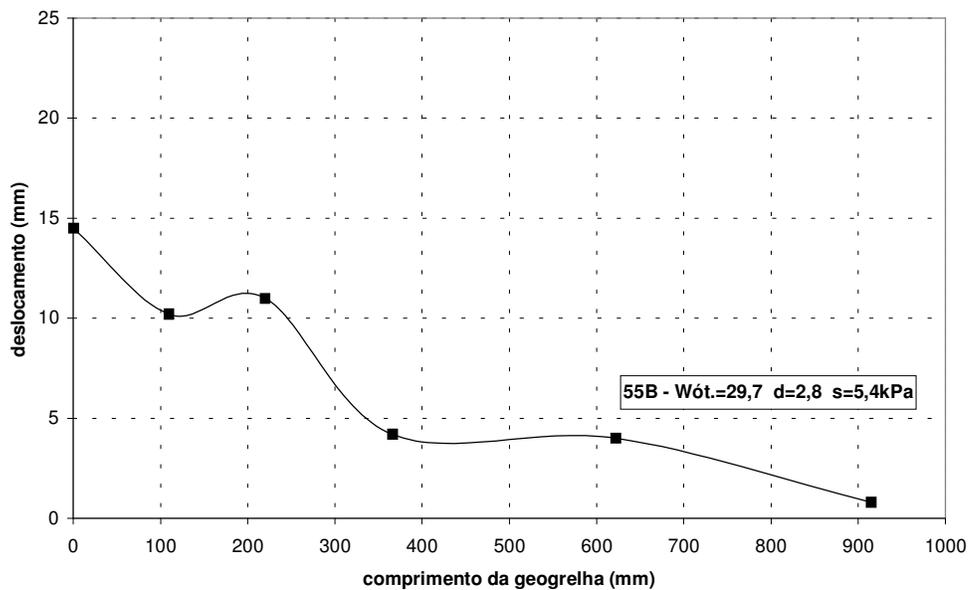


Figura 177 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales*, ao longo da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 5,4kPa.

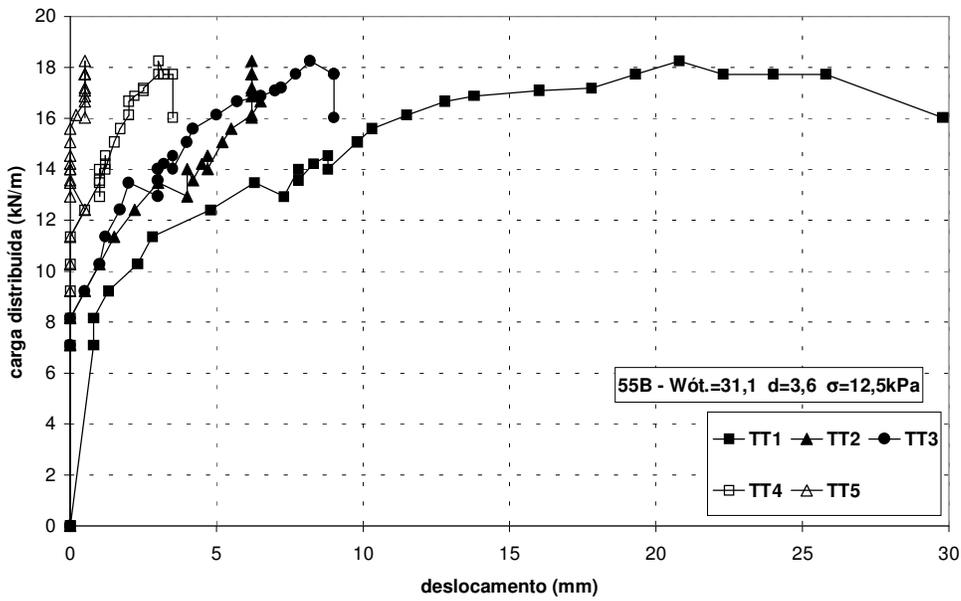


Figura 178 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 12,5kPa.

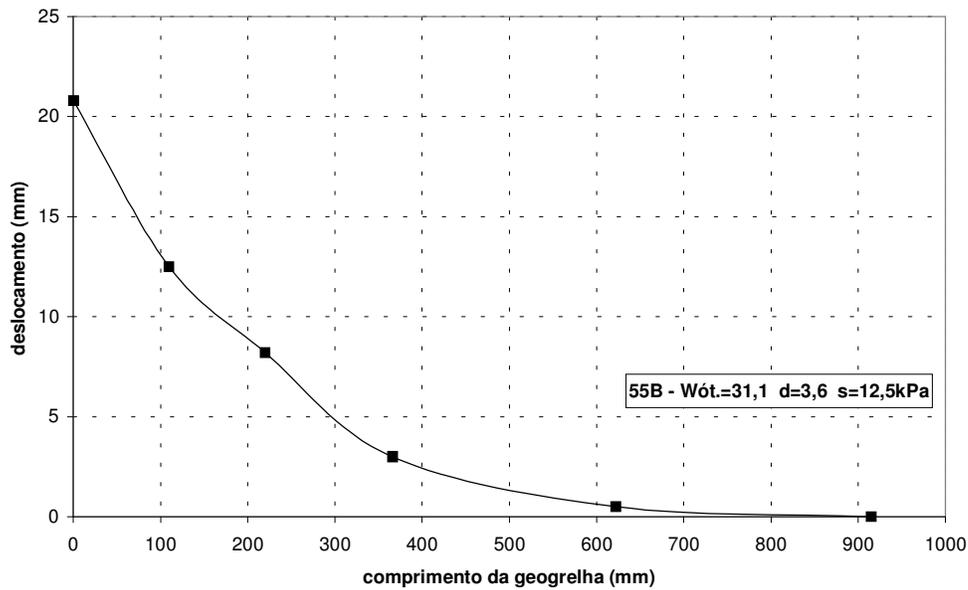


Figura 179 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 12,5kPa.

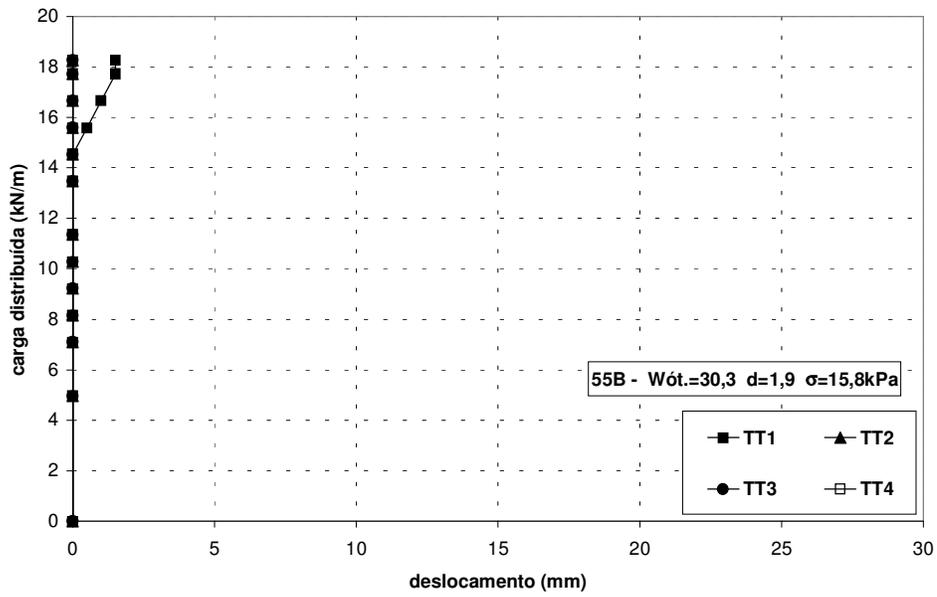


Figura 180 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 15,8kPa.

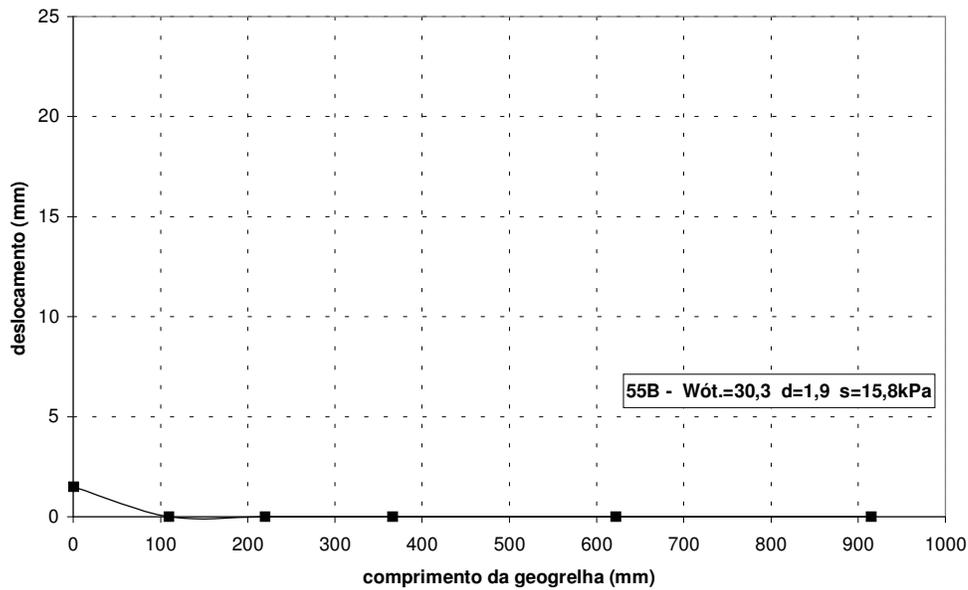


Figura 181 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 15,8kPa.

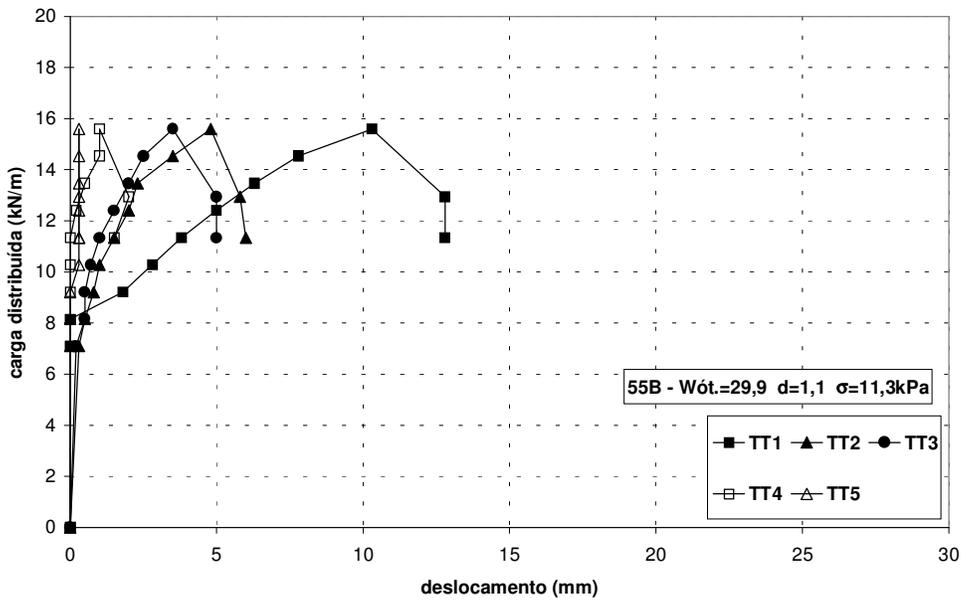


Figura 182 - Carga distribuída em função do deslocamento dos *tell-tales* da geogrelha 55B, lado seco e tensão confinante de 11,3kPa.

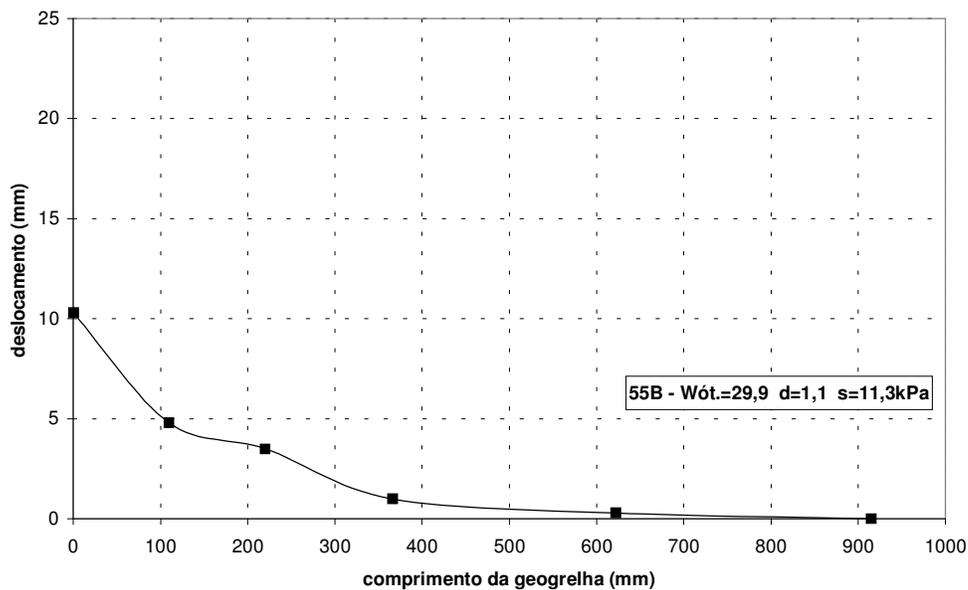


Figura 183 - Distribuição dos deslocamentos dos *tell-tales* ao longo da geogrelha 55B, lado seco e tensão confinante de 11,3kPa.

O comprimento das amostras de geogrelha e as alturas de solo sobrejacente foram dimensionados, antes da construção do aterro, de maneira a garantir o arrancamento das amostras. Para tanto, foram utilizadas formulações tradicionais para cálculo da resistência ao arrancamento (Jewell et al., 1984, Peterson e

Anderson, 1980 e Christopher et al., 1980). Os valores obtidos estão apresentados na Figura 184. Pode-se observar que, com qualquer formulação utilizada, mesmo para as tensões verticais mais elevadas, a resistência ao arrancamento prevista seria menor que a resistência à tração da geogrelha, exceto para a geogrelha 35, no ensaio com maior tensão.

Entretanto, durante a realização dos primeiros ensaios, constatou-se que a resistência ao arrancamento real superava claramente a prevista. Ocorreram, também, rupturas por tração abaixo da resistência nominal das geogrelhas.

Decidiu-se, então, alterar a configuração do aterro construído, reduzindo-lhe a altura. Assim, a Tabela 21 apresenta as condições de ensaio para todas as geogrelhas efetivamente ensaiadas no aterro experimental. Umidade, grau de compactação (G.C.) e desvio de umidade em relação à umidade ótima apresentados são a média entre os valores das camadas acima e abaixo de cada geogrelha.

Tabela 21 - Condições e resultados dos ensaios das geogrelhas do aterro experimental.

Ensaio	Grelha	Lado do aterro	Desvio médio (p.p.)	W ót. Média (%)	G.C. médio (%)	$\sigma'v$ (kPa)	Data ensaio	Vel. TT1 (mm/min)	T máx. (kN/m)	% Trup.
1	35	seco	1,5	27,7	97,6	7,2	17/dez	1,2	16,23	46
2	35	seco	1,1	29,9	99,4	12,0	03/dez	0,9	19,53	56
3	35	seco	-1,5	29,6	100,2	14,3	18/dez	0,42	21,76	62
4	55B	seco	1,1	29,9	99,4	11,3	04/dez	0,7	15,60	28
5	55B	úmido	2,8	29,7	98,5	5,4	17/dez	0,4	16,45	30
6	55B	úmido	3,6	31,1	94,0	12,5	05/dez	1,1	18,25	33
7	55B	úmido	1,9	30,3	99,1	15,8	19/dez	0,1	18,25	33
8	55A	seco	1,1	31,0	98,7	10,7	14/dez	0,6	34,52	63
9	55A	seco	1,4	28,9	98,4	14,3	12/dez	1,0	31,55	57
10	55A	seco	1,4	28,9	98,4	14,3	22/nov	0,8	30,48	55
11 <sup>(1)</sup>	55A	seco	1,1	31,0	98,7	23,3	16/nov	0,2	20,91	38
12	55A	seco	-0,8	30,2	99,2	25,6	20/dez	0,05	34,10	62
13	55A	seco	-0,8	30,2	99,2	41,3	21/nov	0,0	31,55	57
14	55A	úmido	3,9	34,1	95,6	10,7	15/dez	0,0	36,76	67
15	55A	úmido	1,3	30,9	98,0	14,3	06/dez	1,2	30,48	55
16	55A	úmido	1,7	30,6	99,2	25,1	20/dez	0,4	30,06	55

(1): ensaio piloto.

Há dois tipos básicos de ruptura que podem ser considerados em ensaios de arrancamento. Se a geogrelha tiver resistência à tração maior que a resistência ao arrancamento da interface solo-reforço ocorrerá a ruptura generalizada da interface. Este tipo de ruptura caracteriza-se por um movimento de corpo rígido da

geotelha durante o arrancamento e por um aumento dos deslocamentos sem que ocorra aumento da resistência. Outra possibilidade é a resistência ao arrancamento supere a resistência à tração da amostra. Neste caso não ocorrerá o movimento de corpo rígido e a amostra sofrerá ruptura precoce, antes de ser arrancada, não sendo possível determinar exatamente sua resistência ao arrancamento.

Cabe ressaltar que, no caso de amostras extensíveis, a mobilização da resistência ao arrancamento e dos deslocamentos não é constante ao longo da amostra. Em algumas situações, os deslocamentos no trecho inicial são tão grandes que pode ocorrer ruptura da interface, enquanto em outras regiões da amostra a ruptura não ocorre ou até mesmo os deslocamentos são nulos.

Infelizmente é difícil determinar se houve ruptura localizada em algum trecho da amostra observando-se os gráficos carga vs. deslocamento dos *telltales*, pois só ocorrerá a estabilização da carga quando a amostra estiver toda mobilizada.

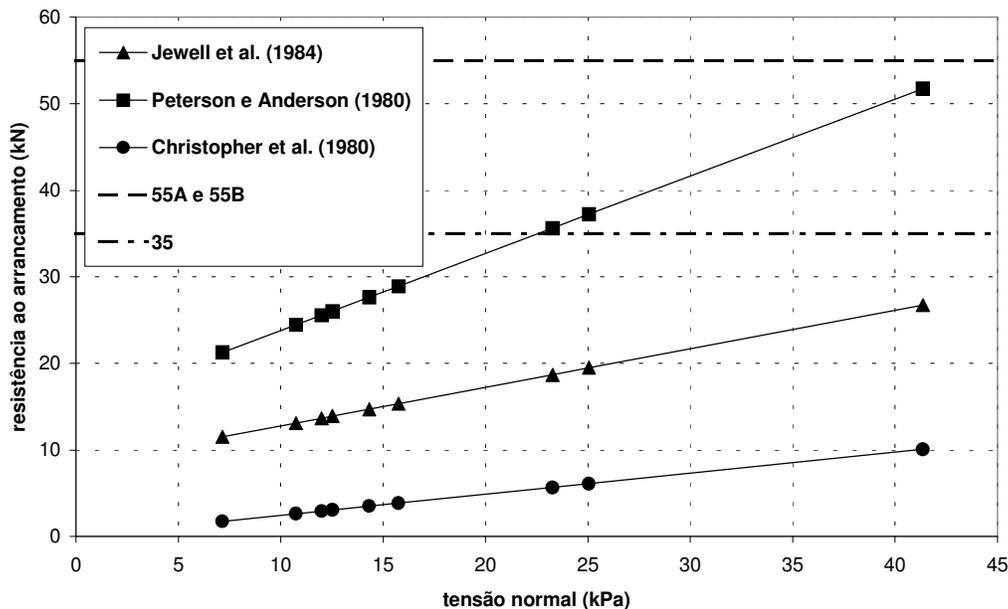


Figura 184 – Estimativa preliminar da resistência ao arrancamento por três métodos.

Nos ensaios com geogrelhas tipo 35 observou-se dispersão relativamente pequena nos desvios de umidade e graus de compactação, conforme percebe-se na Tabela 21.

Observando-se as Figura 152 a Figura 157, percebe-se que, nos ensaios com geogrelhas 35, não houve ruptura generalizada da interface solo-reforço. É possível que, no ensaio 1, com tensão vertical de 7,2kPa, tenha ocorrido ruptura localizada da interface no trecho inicial da amostra, pois, conforme se observa na **Figura 152**, as curvas carga vs. deslocamento dos dois *telltales* TT1 e TT3 já encontravam-se bastantes abatidas quando o ensaio foi interrompido.

As curvas de distribuição de deslocamento ao longo da geogrelha apresentam formatos semelhantes, com o deslocamento sendo máximo no trecho no trecho inicial e decrescendo em direção à extremidade livre. A curva da Figura 153 foi prejudicada pelo não funcionamento do TT2 e pelo fato da geogrelha ter rompido com carga inferior às outras duas. Percebe-se também que os deslocamentos diminuem significativamente com o aumento da tensão vertical.

Nos ensaios com geogrelhas do tipo 55A há uma grande dispersão nos desvios de umidade medidos nas camadas de solo. O grau de compactação, entretanto, é relativamente homogêneo para a maioria das amostras, em torno de 99%. Devido à dispersão observada e outros fatores, alguns ensaios serão desconsiderados para efeitos de comparação.

Em alguns ensaios foi verificada ausência deslocamentos, conforme citado anteriormente.

O ensaio 14, cujos resultados estão apresentados nas Figura 158 e Figura 159, realizado no lado úmido do aterro, com tensão vertical de 10,7kPa. Não apresentou deslocamentos. Entretanto, este ensaio foi realizado em condições favoráveis à ocorrência de deslocamentos razoáveis, ou seja, desvio de umidade muito acima da umidade ótima, (+3,9p.p.) e grau de compactação abaixo da média (G.C.= 95,6%). A ausência de deslocamentos deve-se provavelmente a algum problema nos *telltales* e, por isto, o ensaio será excluído das comparações.

O ensaio piloto, apresentado nas Figura 170 e Figura 171 também será excluído das comparações, devido à influência representada pela configuração inicial da garra na ruptura da geogrelha.

Para os ensaios restantes, os valores de desvio de umidade e grau de compactação foram relativamente próximos.

Todos os ensaios com geogrelhas 55A foram interrompidos por ruptura à tração. Não houve ruptura generalizada da interface solo-reforço e movimento das mostras como corpo rígido. Pode ter havido rupturas localizadas nas interfaces próximas ao início das amostras nos ensaios com menores tensões confinantes, pois os TT1 das Figuras 160, 164, 166 e 168 apresentam movimentos de mais de 12mm.

A distribuição dos deslocamentos ao longo das amostras é curvilínea e decrescente, na maioria dos ensaios, como no caso das geogrelhas 35.

Geralmente, a medida que a tensão vertical aumenta, os deslocamentos diminuem. Entretanto, o ensaio com a menor tensão vertical (ensaio 8), ou seja, 10,7kPa, não apresentou os maiores deslocamentos, talvez devido ao fato de que seu desvio de umidade foi menor que os desvios dos ensaios 9, 10 e 15, com tensão vertical de 14,3kPa.

Nos ensaios realizados com tensão vertical de aproximadamente 25kPa (ensaios 12 e 16), percebe-se claramente a influência do teor de umidade nos deslocamentos. Pode-se observar, na Figura 163 e na Figura 173 que, no solo mais seco, os deslocamentos são significativamente menores.

A geogrelha ensaiada com tensão vertical de 41,3kPa (ensaio 13) não apresentou deslocamentos mensuráveis. Este comportamento não é necessariamente devido à falhas nos teltales.

É possível que os deslocamentos ocorridos tenham sido menores que a precisão dos instrumentos. Cabe ressaltar que, no ensaio 12, com mesmo desvio de umidade e grau de compactação, o deslocamento máximo medido foi de apenas 1mm.

Os ensaios realizados com geogrelhas do tipo 55B podem ser divididos em dois grupos, em função da umidade do solo, independentemente do lado do aterro onde as amostras foram instaladas.

Os resultados dos ensaios com desvio de umidade menor que 2p.p. (ensaios 4 e 7) são apresentados nas Figuras 180 a 183. Pode-se observar que, nestes ensaios, os deslocamentos são menores e não há sinais de ruptura generalizada da interface. O aumento da tensão vertical acarretou diminuição dos deslocamentos.

Os ensaios com desvios de umidade acima de 2p.p. (ensaios 5 e 6) apresentam sinais de ruptura generalizada da interface solo-reforço, especialmente no ensaio com menor tensão vertical no qual a geogrelha apresenta movimento de corpo rígido no final do ensaio, conforme pode-se observar na Figura 176. Nos dois ensaios as geogrelhas romperam após apresentarem deslocamentos significativos.

Não foi constatado diminuição dos deslocamentos com o aumento da tensão vertical, mas este fenômeno deve-se, provavelmente ao aumento simultâneo do desvio de umidade do solo (de +2,8p.p. para +3,6p.p.).

## **9.2. Descrição das rupturas e ensaios adicionais**

Nas Figuras 185 a 194, são apresentados, de forma esquemática, os modos de ruptura observados durante alguns ensaios de arrancamento ou após exumação das amostras.

Cabe ressaltar que a maioria dos ensaios não resultou em arrancamento de toda a amostra.

Em certos ensaios a geogrelha sofreu ruptura por tração de seus elementos longitudinais antes que fossem constatados movimentos importantes. Em outros ensaios, a ruptura por tração ocorreu após expressivos movimentos da geogrelha, sugerindo que, em certas partes da amostra, já havia ocorrido deslizamentos na interface solo-geossintético.

As rupturas por tração ocorreram principalmente no início da parte enterrada das amostras e, eventualmente, próximo à garra.

Quando o ensaio é finalizado por uma ruptura por tração antes do arrancamento da geogrelha não é possível determinar a resistência última ao arrancamento para o comprimento total da amostra.

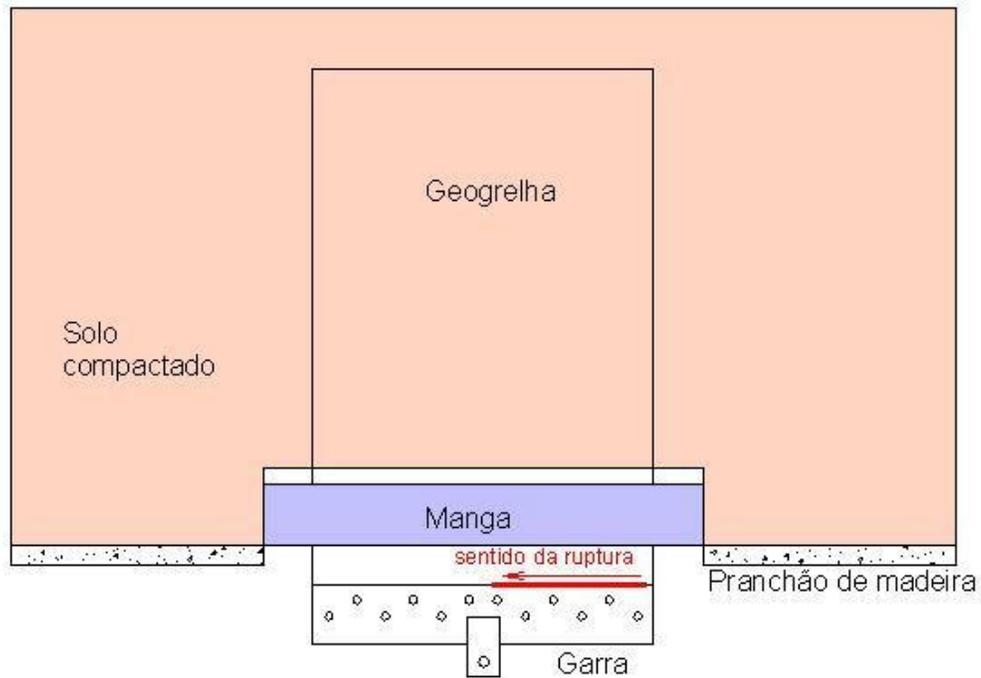


Figura 185 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 35, lado seco e tensão confinante de 7,2kPa.

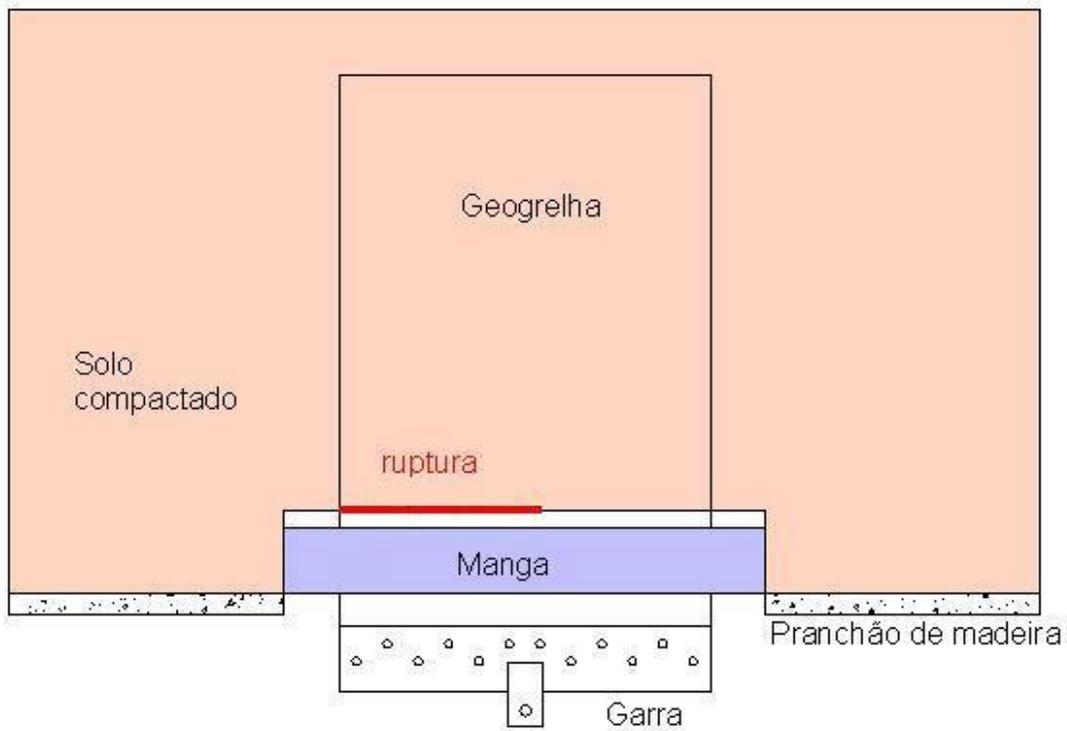


Figura 186 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 35, lado seco e tensão confinante de 14,3kPa.

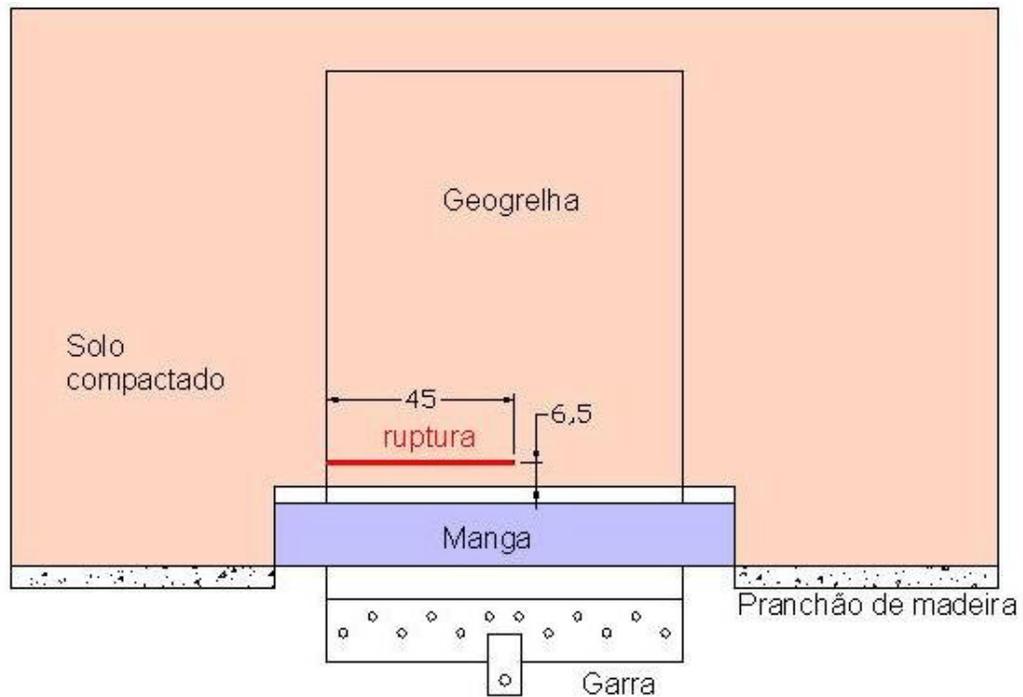


Figura 187 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 55B, lado seco e tensão confinante de 11,3kPa.

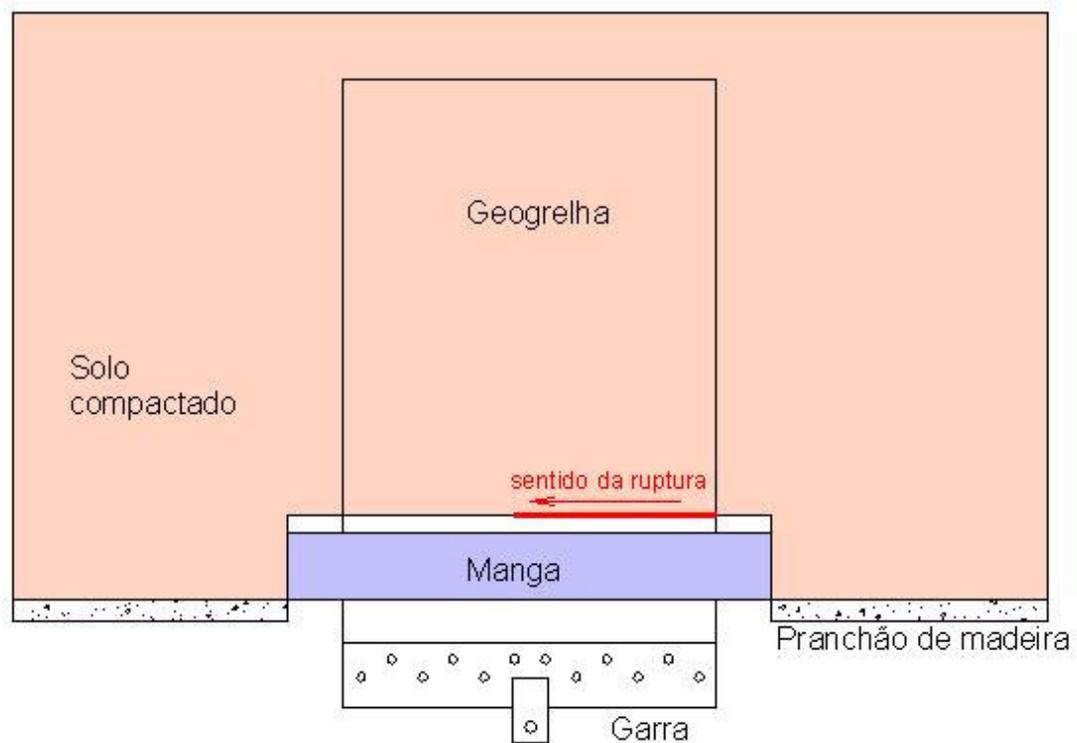


Figura 188 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 5,4kPa.

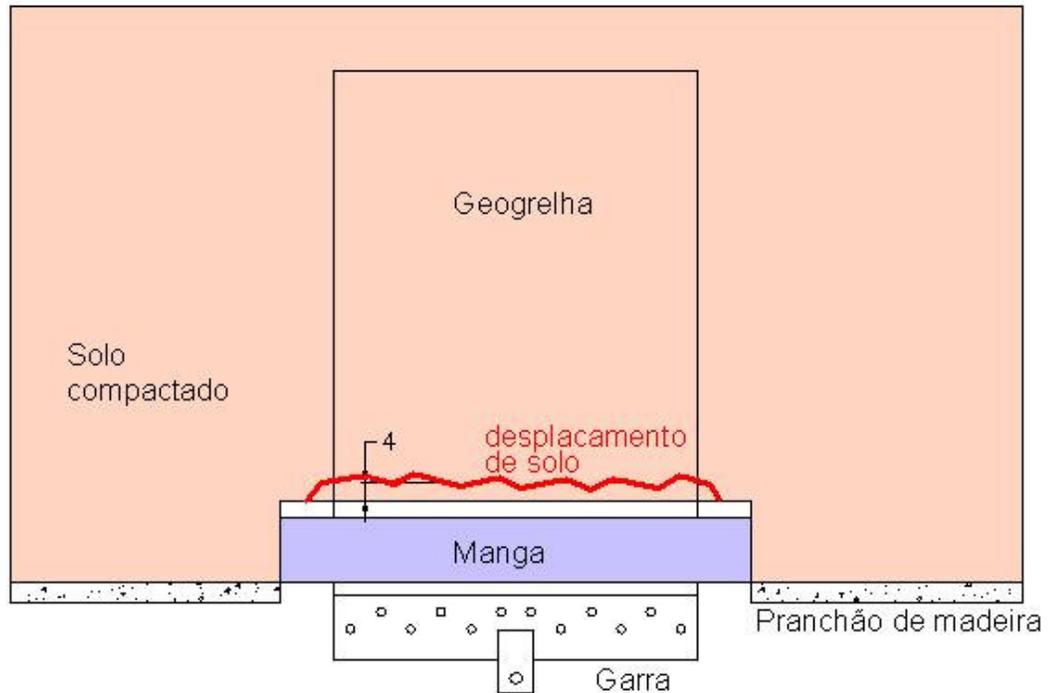


Figura 189 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 12,5kPa.

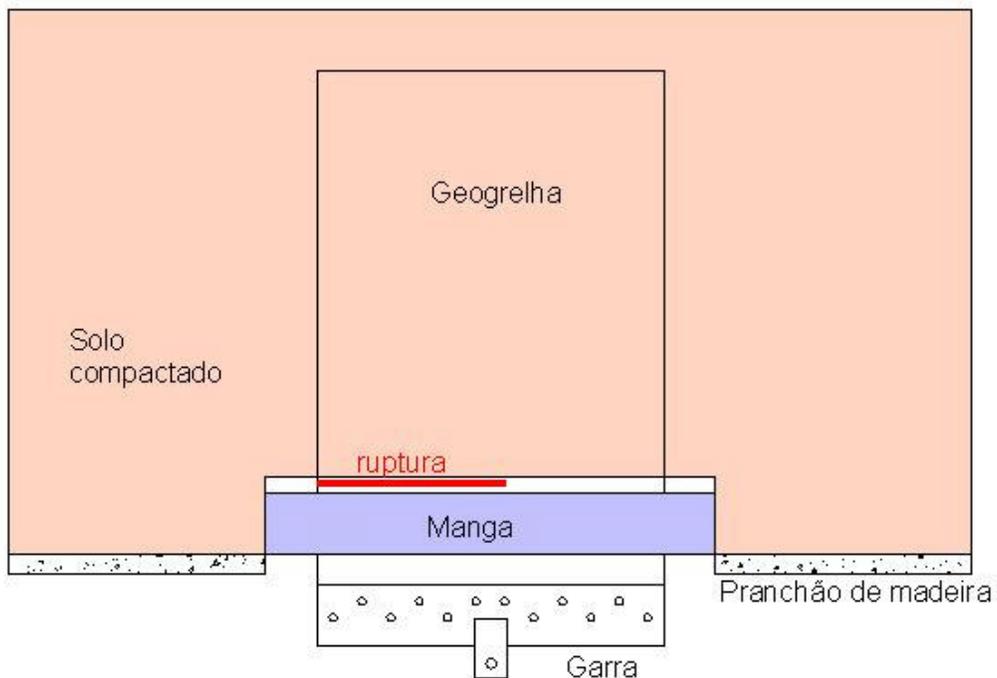


Figura 190 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 55B, lado úmido e tensão confinante de 15,8kPa.

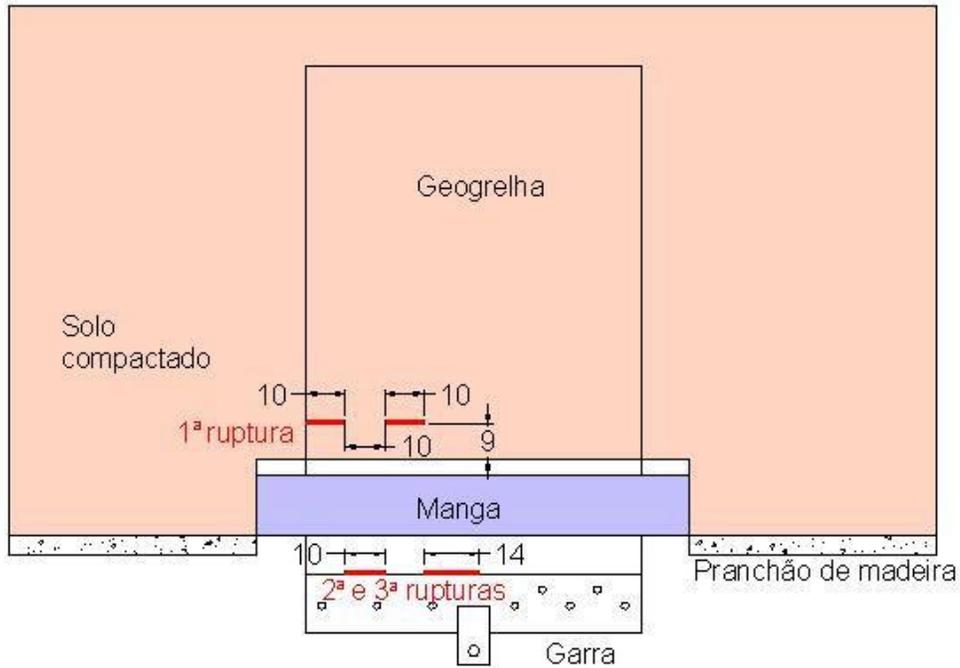


Figura 191 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 10,7kPa.

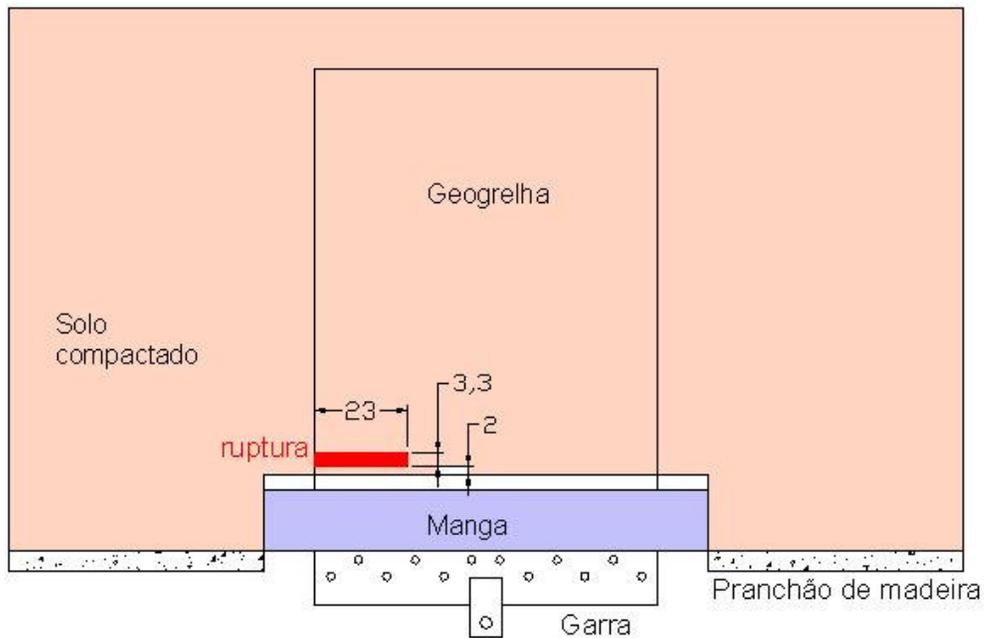


Figura 192 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 55A, lado seco e tensão confinante de 14,3kPa.

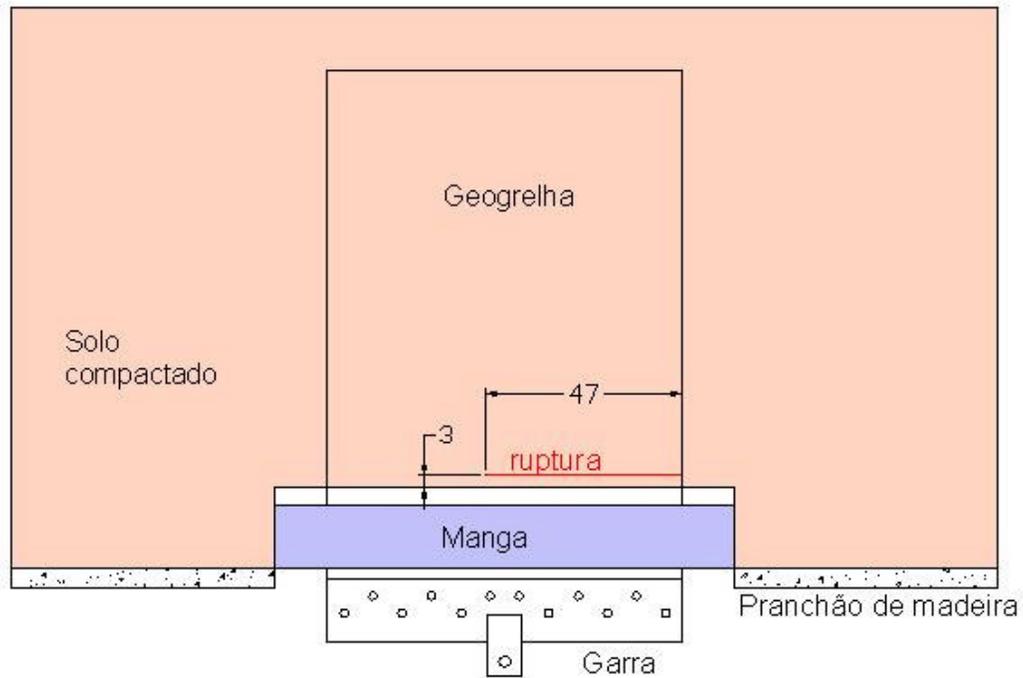


Figura 193 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 55A lado seco e tensão confinante de 41,3kPa.

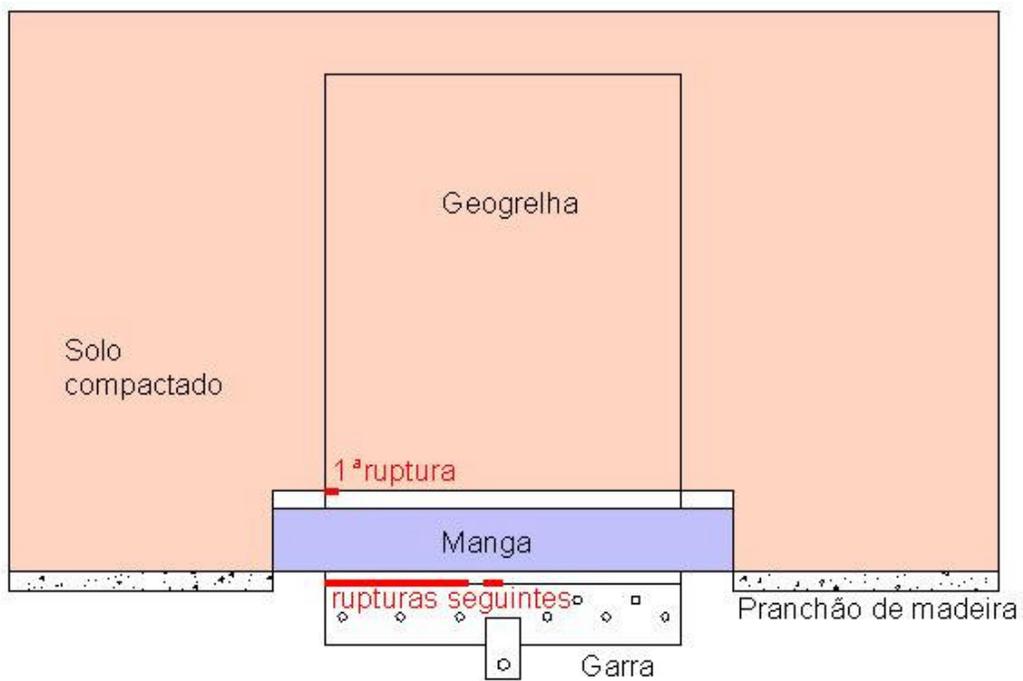


Figura 194 - Esquema do modo de ruptura da geogrelha 55A, lado úmido e tensão confinante de 10,7kPa.

Após o término dos ensaios, o aterro foi desmontado. Aproveitou-se esta ocasião para realizar a exumação de algumas das amostras que foram ensaiadas. A Figura 195 apresenta um detalhe de uma geogrelha exumada, correspondente ao esquema de ruptura apresentado na Figura 187, próximo à manga metálica. Pode-se perceber a ruptura das longarinas no início do trecho enterrado.



Figura 195 - Geogrelha exumada após ensaio de arrancamento.

Observa-se, na Tabela 21, que as geogrelhas não foram capazes de suportar as cargas correspondentes a suas resistências nominais à tração. As rupturas por tração ocorreram com valores médios de carga distribuída máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) de 31%, 55% e 59% da resistência à tração ( $T_{rup}$ ) para as geogrelhas 55B, 35 e 55A, respectivamente.

Conforme citado anteriormente, o método de ensaio empregado não permitiu o controle direto da velocidade. Entretanto, procurou-se aplicar os carregamentos no macaco hidráulico de maneira a produzir uma velocidade de deslocamento aproximadamente uniforme no primeiro tell-tale (TT1). A velocidade média obtida para o TT1 foi de 0,6mm/min, valor próximo ao recomendado pela norma alemã ( $2\pm 0,2$ mm/min) e a vários trabalhos da literatura citados no Capítulo 3.

A Figura 196 apresenta os valores de carga distribuída no momento da ruptura das três amostras da geogrelha 35, além do valor médio. A carga

distribuída é apresentada como uma porcentagem da resistência à tração nominal da geogrelha (35kN/m).

A Figura 197 e a Figura 198 apresentam os valores de carga distribuída e média para as geogrelhas 55B (4 amostras) e 55A (8 amostras), com resistências nominais à tração de 55kN/m.

Depois de alguns ensaios com rupturas abaixo da resistência à tração nominal das geogrelhas, foi decidido interromper a realização dos ensaios de arrancamento e reavaliar os procedimentos empregados.

Para afastar a possibilidade de erros de leitura, a calibração da célula de carga foi verificada, mas não foi detectada nenhuma anormalidade.

Para avaliar o comportamento do sistema de aplicação de carregamentos, a repetibilidade dos resultados e a influência de algumas condições de contorno, sem realizar novos ensaios de arrancamento, foram inseridas três amostras de geogrelha em um bloco de concreto. A inserção cuidadosa das amostras no bloco, durante a concretagem, procurou evitar que houvesse vincos ou dobras nas amostras e fazer com que o eixo das geogrelhas ficasse alinhado com a direção de aplicação do carregamento.

As amostras foram posicionadas em diferentes alturas, atravessando o bloco, de maneira a proporcionar a possibilidade de seis ensaios.

Na realização dos ensaios de tração das geogrelhas ancoradas no bloco, foram utilizados a mesma garra, o mesmo cavalete de reação e o mesmo sistema hidráulico empregado nos ensaios de arrancamento.

O arranjo assim obtido permitiu a realização dos ensaios listados na Tabela 22. Nos ensaios de tração no bloco de concreto obteve-se, em média, 63% de  $T_{rup}$  para a geogrelha 55A e 67% para a geogrelha 55B. Se forem consideradas somente as amostras com largura de 0,85m, obteve-se 60% de  $T_{rup}$ , para a geogrelha 55A. A Figura 199 apresenta os resultados obtidos com as geogrelhas 55A.

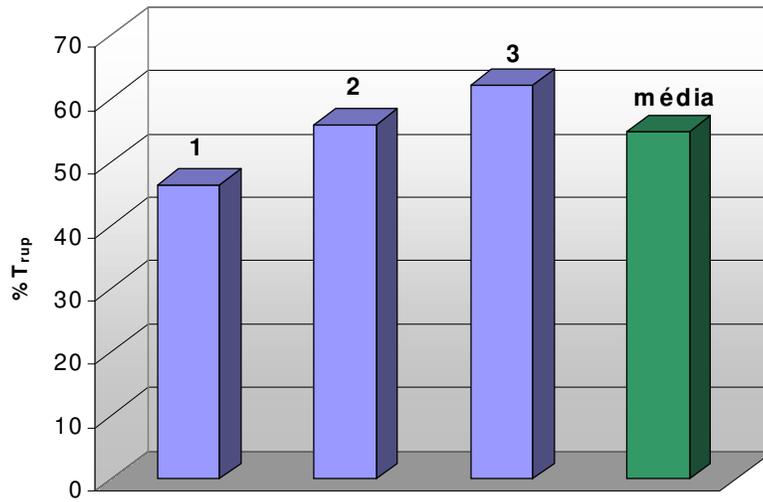


Figura 196 - Porcentagem da resistência à tração das geogrelhas 35 na ruptura.

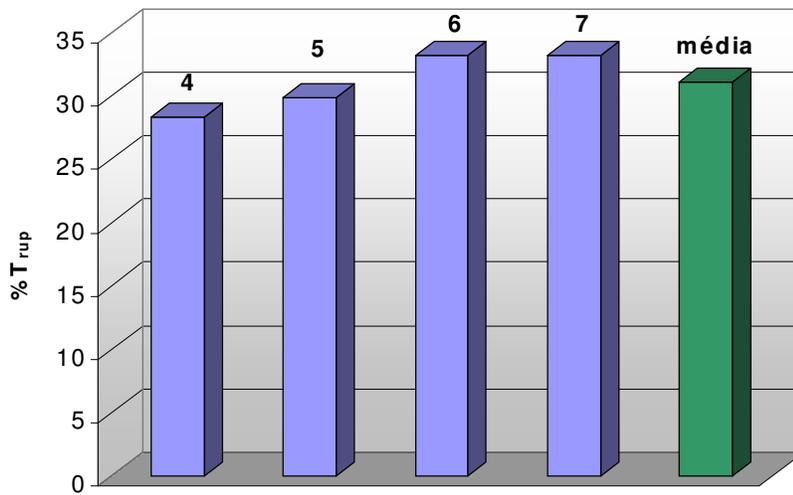


Figura 197 - Porcentagem da resistência à tração das geogrelhas 55B na ruptura.

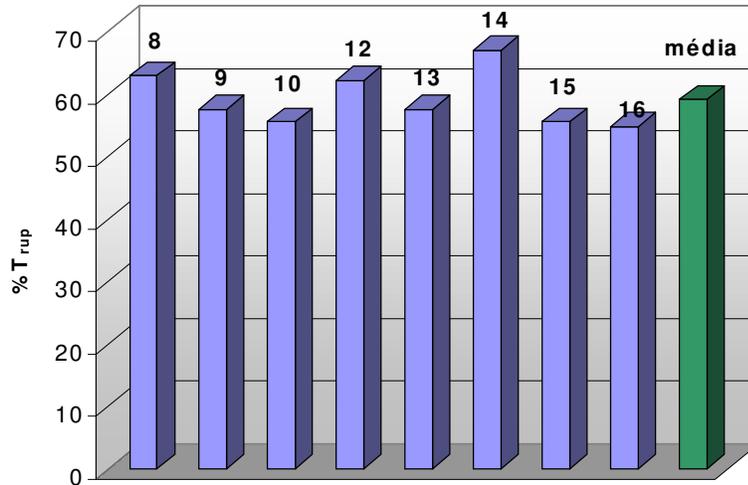


Figura 198 - Porcentagem da resistência à tração das geogrelhas 55A na ruptura.

A Figura 200 apresenta esquematicamente o arranjo do ensaio. A Figura 201 apresenta o aspecto de uma ruptura típica da geogrelha ancorada no bloco de concreto. Pode-se observar que os 5cm de grelha mais próximos da face do bloco foram protegidos por duas camadas de geotêxtil, de modo a não sofrerem danos durante a concretagem.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de tração das geogrelhas ancoradas em concreto

Ensaio	Geogrelha	Largura amostra (m)	Comprimento amostra (m)	Veloc. de ensaio (%/min)	T <sub>máx</sub> (kN/m)	% T <sub>rup</sub>
1	55A	0,85	0,22	0,48	33,8	61,4
2	55A	0,85	0,20	1,10	32,4	58,9
3	55B	0,85	0,21	0,53	36,9	67,0
4	55A	0,20	0,20	0,80	37,8	68,8
5	55A	0,20	0,10	1,25	35,1	63,8

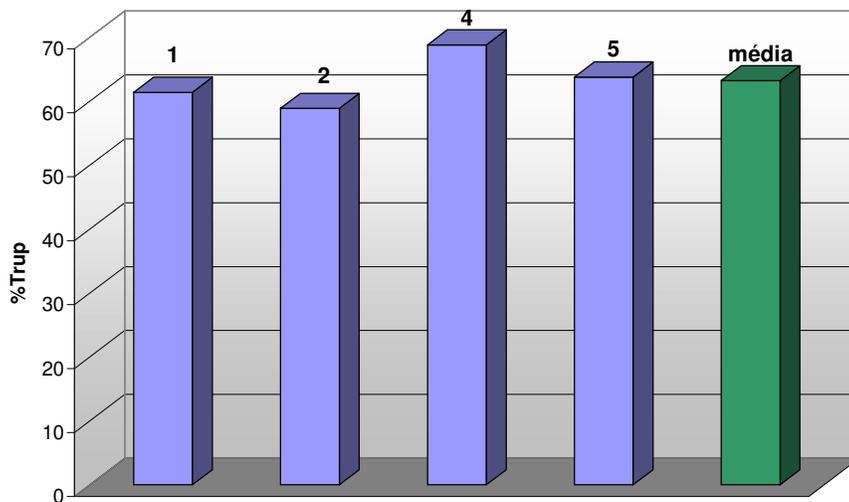


Figura 199 - Porcentagem da resistência à tração das geogrelhas 55A na ruptura dos ensaios com bloco de concreto.

As rupturas ocorreram nos trechos de geogrelha mais próximos ao concreto, sugerindo que, aparentemente, eventuais danos gerados nas amostras pela garra não influenciaram de forma preponderante na resistência apresentada pelas geogrelhas nos ensaios de tração no bloco de concreto.

Os ensaios com amostras de diferentes tamanhos, conforme os resultados apresentados na Tabela 22, realizados no bloco de concreto, demonstram uma tendência de aumento da resistência com a diminuição do tamanho da amostra. Entretanto, este efeito não é suficiente para explicar a diferença constatada.

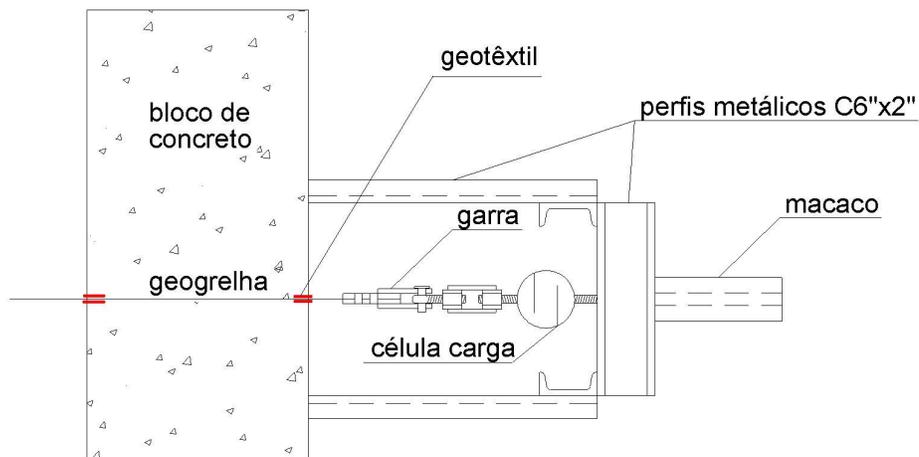


Figura 200 - Esquema dos ensaios de tração das geogrelhas ancoradas no bloco de concreto.



Figura 201 – Ruptura das longarinas da geogrelha ancorada no bloco de concreto no ensaio de tração.

É possível que os parafusos da garra tenham afetado os resultados dos ensaios. A garra foi projetada para prender a geogrelha somente por atrito, por isto a necessidade de apertar firmemente e por igual os parafusos. Caso um parafuso seja menos apertado que os vizinhos pode haver um pequeno escorregamento da geogrelha nas suas vizinhanças. O elemento transversal mais próximo do parafuso será, então, pressionado e a transmitirá o esforço para o elemento longitudinal adjacente. Desta forma, a força não será igual em cada elemento longitudinal, havendo um ou mais sobrecarregados. Este efeito fará com que o elemento rompa precocemente e, sobrecarregando os vizinhos, gere uma ruptura global.

A Figura 202 apresenta um caso de ruptura precoce do elemento longitudinal da geogrelha no ensaio no bloco de concreto.

Outra possibilidade estudada para as rupturas precoces da geogrelha foi o efeito da montagem da garra em posição não perpendicular ao eixo da geogrelha. Caso isto aconteça, um dos lados da amostra será mais tracionado que o outro. A Figura 203a) representa a configuração de um ensaio hipotético no qual ocorreu um erro de montagem da garra, representado por “e”. Na Figura 203b), os somatórios das reações dos lados direito e esquerdo da geogrelha são denominadas  $R_d$  e  $R_e$ , respectivamente.



Figura 202 – Ruptura precoce de um elemento longitudinal de geogrelha.

O ponto de aplicação de carregamento é considerado uma rótula, por permitir a sua rotação. Por equilíbrio de forças e momentos, para pequenos valores de  $a$ , obtêm-se as seguintes equações para  $R_d$  e  $R_e$ :

$$R_e = \frac{T}{\left(1 + \frac{L/4 + X_1}{L/4 - X_1}\right)} \quad (9.1)$$

$$R_d = T - R_e \quad (9.2)$$

onde

$R_e$  somatório das reações do lado esquerdo da geogrelha;

$R_d$  somatório das reações do lado direito da geogrelha;

$L$  largura da amostra;

$X_1$  afastamento da força de arrancamento em relação ao eixo da amostra.

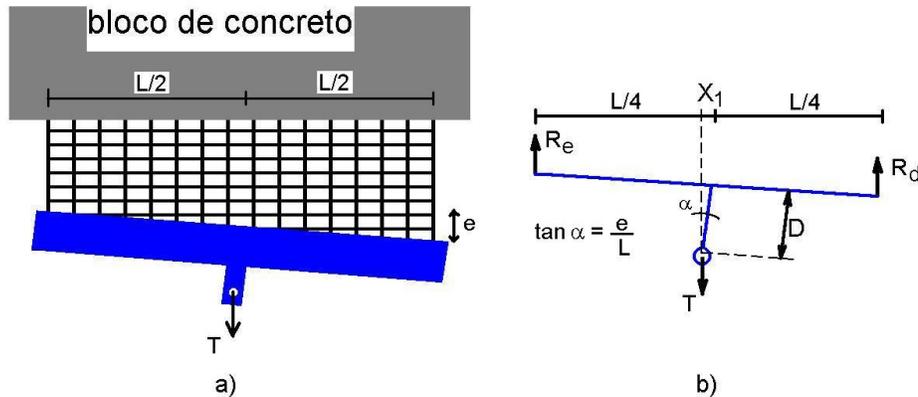


Figura 203 – Esquema de um ensaio hipotético com garra não perpendicular ao eixo da amostra.

Conforme fica claro nas Equações 9.1 e 9.2, apesar do giro permitido pela rótula, as forças  $R_d$  e  $R_e$  não são iguais. Entretanto, devido à grande largura da amostra em relação à distância “e”, a diferença é muito pequena. Por exemplo, para  $e=2\text{cm}$ ,  $L=85\text{cm}$  e  $T=30\text{kN}$ , a diferença entre  $R_d$  e  $R_e$  é de apenas 4%, o que não é suficiente para justificar as rupturas precoces ocorridas.

Deve ser considerada também a possibilidade de redução da resistência à tração da geogrelha devido ao dano mecânico. Segundo Azambuja (1994), o fator de redução da resistência à tração para geogrelhas de tiras tecidas em meio de agressividade baixa deve variar de 1,05 a 1,15. Allen (1991) apresentou uma classificação para a severidade do meio, em função do tipo de equipamento de compactação, da espessura da camada de solo subjacente e da forma dos grãos. Segundo o autor, solos finos compactados por equipamentos pesados auto-propelidos em camadas de espessura maior que 15 cm podem ser considerados como meio de baixa severidade.

Sieira (2003) realizou ensaios de tração em amostras de geogrelha submetida a esforços de compactação em laboratório. A geogrelha utilizada possui malha regular e é constituída por tiras tecidas, compostas por filamentos de poliéster revestidos com PVC. A resistência à tração é de 97kN/m no sentido longitudinal. Nos ensaios com solo silto-argiloso compactado por compactador

dinâmico em camadas de 7cm de espessura, não foi percebida redução na resistência à tração após exumação da amostra.

Considerando os trabalhos citados e as condições de severidade do meio desta pesquisa (solo silto-argiloso, camadas de 20cm de espessura, e emprego de rolo compactador vibratório), pode-se supor que os danos de instalação, se existentes, são limitados.

Quanto ao efeito de redução da resistência à tração, por fluência, também pode-se supor que foi limitado, tendo em vista que os ensaios realizados foram relativamente rápidos.

Apesar das várias hipóteses levantadas, não foi possível precisar a razão da ocorrência de rupturas precoces. É possível que a redução na resistência seja devida à contribuição conjunta dos vários fatores citados. Entretanto, tendo em vista que as geogrelhas inseridas no muro trabalham com tensões e deformações inferiores às da condição de arrancamento, pode-se utilizar os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento para comparações com o muro sem prejuízos.

Cabe ressaltar que, durante ensaios de arrancamento em geogrelhas, para valores elevados de tensão vertical (50kPa), Sieira (2003) constatou rupturas precoces por tração das amostras, no trecho externo, sem que ocorressem deslocamentos mensuráveis no trecho interno.

### 9.3.

#### **Influência da tensão vertical na resistência ao arrancamento**

A Figura 204 apresenta a máxima força de arrancamento por unidade de largura (carga distribuída) aplicada às geogrelhas vs. a tensão vertical efetiva atuante no plano da geogrelha, devida ao peso do solo sobrejacente.

Apesar de um crescimento da resistência ao arrancamento nos ensaios da geogrelha 35, não é possível perceber claramente na Figura 204 a influência da tensão vertical na resistência ao arrancamento nas outras geogrelhas. Certamente as rupturas precoces ocorridas prejudicam a análise, por impedirem que os ensaios fossem levados até o fim. Entretanto, sabe-se que a resistência ao arrancamento tende a aumentar com o crescimento da tensão vertical, conforme Bonckiewicz et

al. (1988), Lentz e Pyatt (1988), Farrag et al. (1993), Lopes e Ladeira (1996), Sieira (2003) e Palmeira (2004).

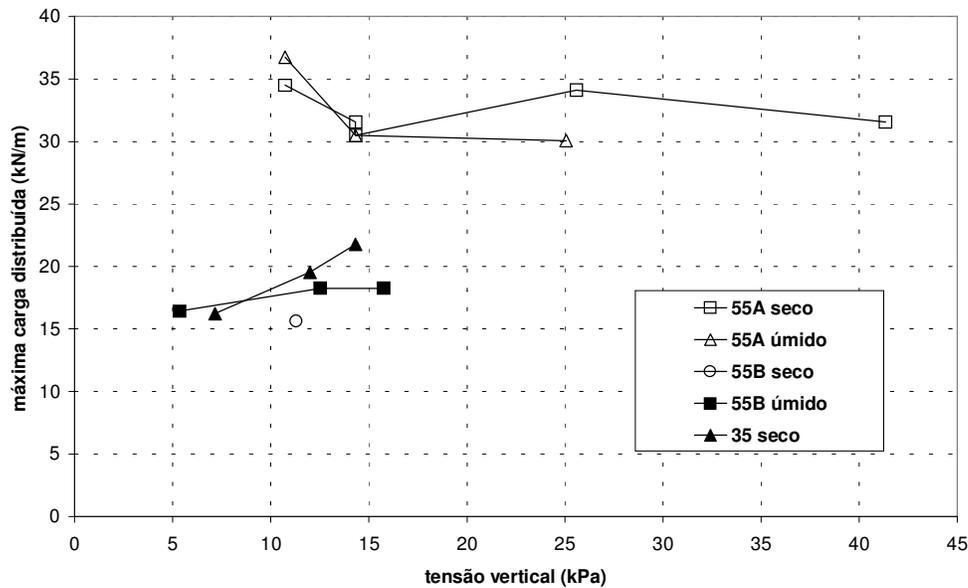


Figura 204 – Curvas de máxima carga distribuída atuante nas geogrelhas vs. tensão vertical.

Cabe ressaltar, entretanto, que é possível que o solo exiba comportamento não drenado na interface, tendo em vista a velocidade do ensaio.

Também sabe-se que a relação entre resistência ao arrancamento e tensão vertical, para geogrelhas extensíveis, pode ser não linear (Lopes e Ladeira, 1996).

Pode-se observar, nos gráficos de distribuição de deslocamentos e de carga distribuída vs. deslocamento, apresentados nas Figuras 152 a 183, que, geralmente, o aumento da tensão vertical provoca redução no comprimento mobilizado, conforme reportado por outros autores (Farrag et al., 1993 e Lopes e Ladeira, 1996).

Devido à extensibilidade da geogrelha, as deformações foram decrescentes ao longo da amostra, fazendo com que a resistência ao cisalhamento mobilizada no solo não seja uniforme e, nos trechos finais seja nula. Assim, pode-se definir um comprimento mobilizado da geogrelha, como sendo aquele em que ocorrem deslocamentos perceptíveis e, portanto, mobilização da resistência do solo.

Neste trabalho, optou-se por considerar todo o trecho de geogrelha que, no momento da carga de arrancamento máxima, tenha se deslocado mais de 1mm, como sendo parte do comprimento mobilizado.

Considerando o comprimento mobilizado, pode-se definir uma tensão cisalhante equivalente média na interface solo-geossintético, (Bonczkiewicz et al., 1988 e Ochiai et al., 1996), dada por:

$$\tau_{\text{mob}} = T_{\text{máx}} / 2L_{\text{mob}} \quad (9.1)$$

Onde:

$t_{\text{mob}}$  tensão cisalhante equivalente média na interface solo-geossintético, no comprimento mobilizado;

$T_{\text{máx}}$  máxima carga distribuída, por unidade de largura, atingida durante o ensaio;

$L_{\text{mob}}$  comprimento mobilizado.

Observa-se que a parcela de empuxo passivo mobilizado pelos elementos transversais da geogrelha não é explicitamente considerada nesta formulação.

Conforme mencionado anteriormente, a empresa construtora teve dificuldade em controlar o teor de umidade do solo durante a construção do aterro. Tendo em vista que a umidade de compactação pode afetar as propriedades do solo, uma parcela da variabilidade apresentada pode ser creditada à heterogeneidade das propriedades do solo do aterro experimental.

A Figura 205 apresenta a tensão cisalhante equivalente média na interface solo-geossintético, no comprimento mobilizado, vs. a tensão vertical. Foram selecionados somente ensaios com desvio de umidade, grau de compactação e umidade ótima semelhantes. Para a geogrelha 55A foram empregados os ensaios 8, 9, 10, 15 e 16 e para a geogrelha 55B os ensaios 4, 5 e 7, conforme indicados na Tabela 21. Para a geogrelha 35 foram empregados todos os três ensaios.

Observa-se, na Figura 205, uma tendência de aumento da tensão cisalhante à medida que a tensão vertical aumenta. A relação aparenta ser não linear, mas não é possível determiná-la claramente, devido à dispersão dos pontos.

A difícil interpretação dos resultados também pode conseqüência das rupturas por tração precoces da geogrelha antes que ocorresse o arrancamento e a total mobilização da resistência da interface solo geossintético.

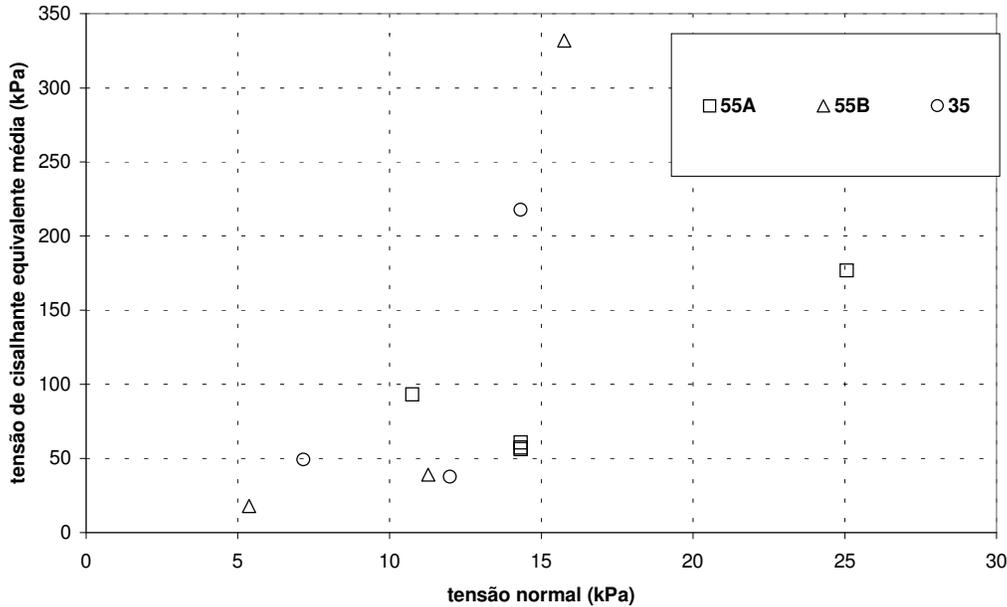


Figura 205 – Variação da tensão cisalhante equivalente média na interface solo-geossintético, no comprimento mobilizado, em função da tensão vertical efetiva.

Em função das rupturas precoces, a comparação entre as resistências ao arrancamento prevista e a medida fica prejudicada. Portanto, a comparação foi realizada em termos de tensão cisalhante equivalente. A Figura 206 apresenta uma comparação entre tensão cisalhante equivalente mobilizada e prevista, em função da tensão vertical.

Pode-se observar que as tensões medidas são bastante superiores às previsões realizadas. Para todas os tipos de geogrelhas testadas a tensão cisalhante equivalente média calculada, para a tensão vertical intermediária, foi mínima. Cabe ressaltar que, para a geogrelha 55A, sob tensão vertical de 14,3kPa, todos os ensaios considerados apresentaram tensão cisalhante calculada em torno de 60kPa.

Nos ensaios com as maiores tensões verticais, as tensões cisalhantes calculadas são muito elevadas, devido à concentração de deslocamentos no trecho inicial das geogrelhas.

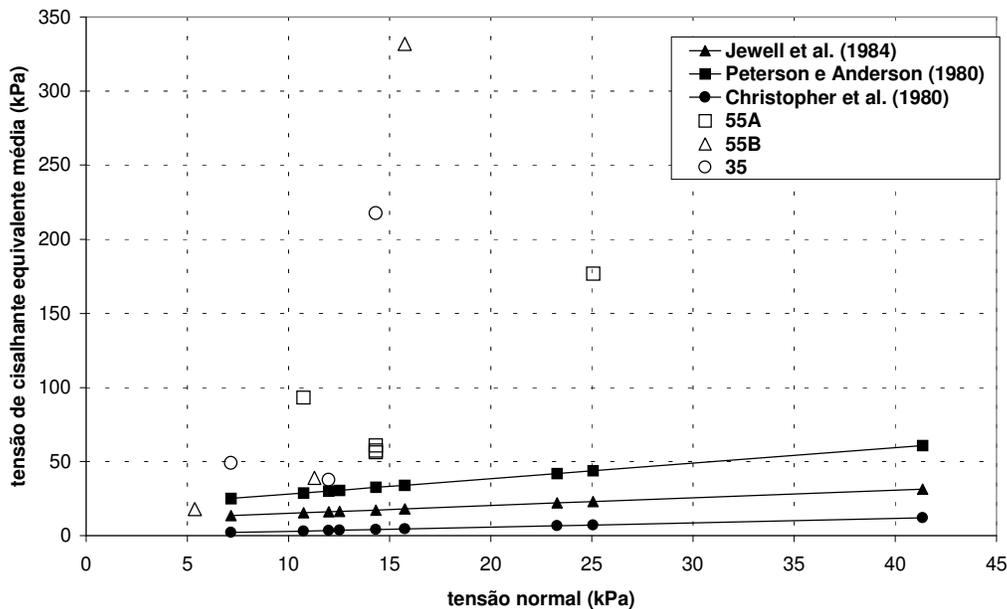


Figura 206 – Tensões cisalhantes equivalente prevista e mobilizada na interface vs. tensão vertical.

#### 9.4. Considerações finais

Foram apresentados os resultados de dezesseis ensaios de arrancamento realizados no aterro experimental.

Ocorreram rupturas precoces das amostras, abaixo da resistência à tração nominal. Foram realizados ensaios adicionais para investigar a causa das rupturas e foi verificada a calibração da célula de carga. Foram apresentados os diversos fatores que podem contribuir para o fenômeno, mesmo assim, não foi possível determinar a causa das rupturas precoces.

As amostras exumadas apresentaram, na maioria dos casos, ruptura por tração da geogrelha no início do trecho enterrado.

Apesar das rupturas precoces, constatou-se que a resistência ao arrancamento obtida foi superior às previsões baseadas em métodos tradicionais da literatura.

O aumento da tensão vertical, de maneira geral, ocasionou aumento da concentração dos deslocamentos no trecho mais próximo à garra.

Observou-se uma tendência de aumento da resistência ao arrancamento com o crescimento da tensão vertical. Entretanto, a ocorrência de rupturas precoces prejudicou a definição de uma correlação.

De maneira geral, pode-se afirmar que os deslocamentos diminuem quando a tensão vertical aumenta ou o teor de umidade diminui.

Foi proposto o uso de uma tensão cisalhante equivalente média para comparação entre os ensaios, considerando a força distribuída de arrancamento no final do ensaio e a área mobilizada da amostra. Os valores mínimos obtidos para esta tensão, nos ensaios realizados, são da ordem de 60kPa para geogrelhas tipo 55A e 40kPa para as demais geogrelhas, sob tensões verticais acima de 10kPa.