

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GEOSINTÉTICOS EM ESTRUTURAS DE SOLOS REFORÇADOS

Geossintéticos são produtos poliméricos (sintéticos ou naturais), cujas propriedades contribuem para melhoria de obras geotécnicas, nas quais eles desempenham, principalmente, funções de reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, controle de fluxo (impermeabilização) e controle de erosão superficial. (Palmeira e Vidal, 2001).

A respeito das funções de reforço, a técnica do solo reforçado com geossintéticos consiste na combinação destes dois materiais, de naturezas essencialmente distintas e funções complementares (Gomes, 1993a), visando a obtenção de um material composto mais resistente e menos deformável que o solo natural (Palmeira, 1993). O solo, que apresenta boa resistência à compressão e baixa resistência à tração, é reforçado com elementos geossintéticos que, geralmente, possuem boa resistência à tração, melhorando a resistência e reduzindo as deformações de obras como taludes íngremes, estruturas de contenção, aterros sobre solos moles, aterros sobre estacas, aterros sobre terrenos suscetíveis a subsidência, etc. (Palmeira, 1993). A Figura 2.1 apresenta alguns dos tipos de obras de reforço de solos.

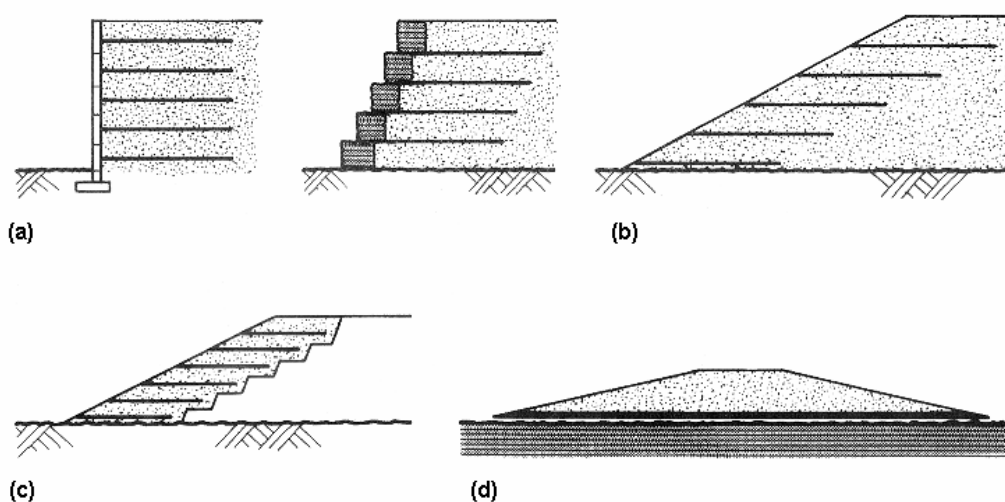


Figura 2.1 – Exemplos de aplicações de geotêxteis como reforço de solos (Jewell, 1996)
(a) estrutura de contenção de solo reforçado; (b) talude reforçado; (c) recuperação de escorregamento; (d) aterro sobre solo mole.

Segundo Aguiar e Vertematti (2004), os geossintéticos comumente especificados para atuar como reforço de estruturas geotécnicas são os geotêxteis tecidos e não tecidos, as geogrelhas, as geotiras e os geocompostos.

Os geotêxteis não tecidos caracterizam-se por apresentarem filamentos contínuos ou fibras cortadas dispostos em diversas direções, interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos (Aguiar e Vertematti, 2004), formando uma manta bidimensional permeável. Os geotêxteis tecidos são produtos obtidos do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas) segundo duas direções preferenciais denominadas “trama” e “urdume”, sentido transversal e longitudinal da manta respectivamente (Aguiar e Vertematti, 2004).

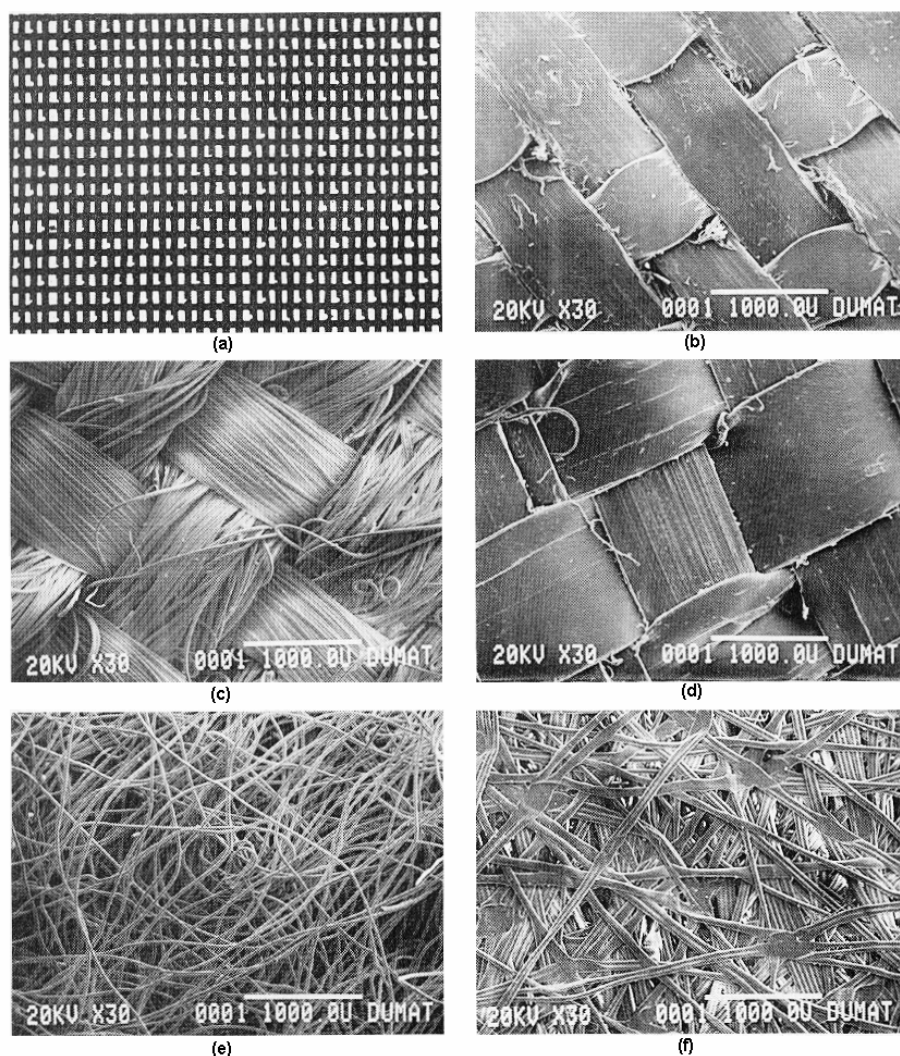


Figura 2.2 - Alguns tipos de geotêxteis (Koerner, 1994).

- (a) geotêxtil tecido de monofilamentos; (b) geotêxtil tecido de monofilamentos, calendrado;
(c) geotêxtil tecido de multifilamentos; (d) geotêxtil tecido de laminetes; (e) geotêxtil não tecido agulhado e (f) geotêxtil não tecido termoligado.

As geogrelhas caracterizam-se por serem bidimensionais e descontínuas, possibilitando a interação com o solo por mecanismos de ancoragem. De acordo com Aguiar e Vertematti, (2004) são formadas por elementos com elevada resistência à tração e, em função do processo de fabricação, podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas.

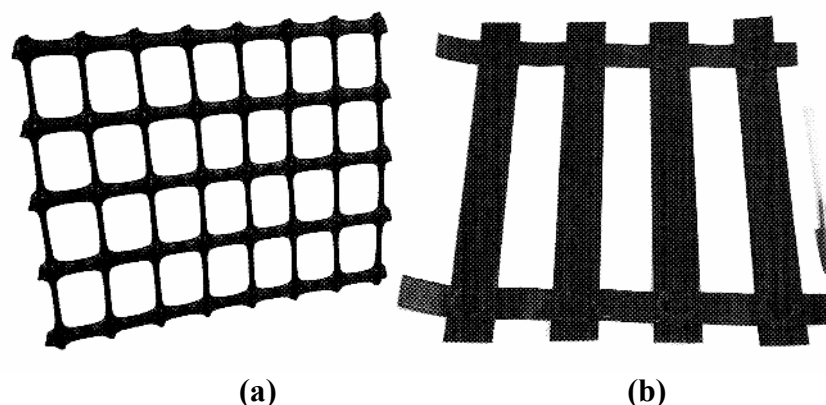


Figura 2.3 – Alguns tipos de geogrelha (Aguiar e Vertematti, 2004).

(a) geogrelha extrudada; (b) geogrelha soldada

As geotiras, como o nome indica, são produtos em forma de tira com função predominante de reforço (Aguiar e Vertematti, 2004). O dimensionamento de estruturas reforçadas com geotiras é feito de acordo com o procedimento de dimensionamento de estruturas do tipo “terra armada”. As geotiras podem ser lisas ou com ressaltos, que favorecem a interação solo-reforço por ancoragem (Palmeira, 1993).

Os geocompostos são produtos resultantes da associação entre dois ou mais tipos de geossintéticos entre si ou com outros produtos, buscando a otimização no desempenho de uma função específica, entre elas a função de reforço.

De acordo com Jewell (1996), as principais considerações de uma estrutura de solo reforçado são: admitir que ela tenha que deformar para que seja mobilizada sua resistência à tração; a estrutura continua a deformar com o decorrer do tempo e, como consequência, a resistência disponível não é constante e sim variável. Esta flexibilidade de estruturas de solos reforçados geralmente é vantajosa, visto que a estrutura comporta certo grau de movimentações melhor que estruturas de concreto, por exemplo.

No caso de solos reforçados com inclusões extensíveis, como geotêxteis, a rigidez da manta constitui um parâmetro de relevância primária na quantificação das deformações necessárias para a mobilização da resistência a tração no reforço, ou seja, o potencial de utilização do reforço é condicionado aos deslocamentos da estrutura (Gomes, 1993a).

2.2. DEFORMABILIDADE DE ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO

Em projetos correntes de estruturas de contenção com solo reforçado, não são comuns análises de deformabilidade, seja em termos de deslocamentos horizontais ou em termos de análises de recalques. Geralmente o dimensionamento é feito com base na avaliação do comportamento da estrutura em condições específicas de ruptura (Martins, 2000a).

Segundo Jewell (1996), a resistência do solo reforçado depende tanto da resistência ao cisalhamento do solo quanto da força de tração axial mobilizada no reforço. Estas duas grandezas são relacionadas por meio da compatibilidade de deformações entre o solo e o reforço (Figura 2.4). Assim, tanto a resistência quanto a rigidez do reforço são propriedades importantes para o dimensionamento das estruturas de solo reforçado.

No caso de reforços extensíveis, são necessárias maiores deformações para mobilizar esforços de tração nos reforços e no caso de reforços rígidos, as deformações necessárias para mobilizar os mesmos esforços são menores. Por isso, estruturas reforçadas com inclusões mais rígidas apresentam menores deformações que estruturas reforçadas com inclusões extensíveis, mesmo quando ambas apresentam a mesma resistência à tração.

No entanto, é necessário definir como classificar se o reforço é extensível ou rígido. A rigidez dos elementos de reforço pode ser determinada por meio de diversos ensaios, podendo apresentar resultados diferentes em cada um deles devido aos fatores que influenciam o comportamento carga-alongamento dos reforços ensaiados. A velocidade do ensaio, por exemplo, é um fator importante uma vez que dependendo do polímero constituinte do geossintético, sua resistência e rigidez à tração podem ser mais ou menos influenciados pela taxa de deformação imposta (Palmeira, 1999b). Boyle et al. (1996) e Palmeira (1999b) fazem uma discussão deste e outros fatores que afetam os resultados de ensaios na determinação das propriedades dos geotêxteis.

Outro fator que influencia sobremaneira os valores de rigidez determinados pelos ensaios de tração em geotêxteis é o efeito do confinamento do reforço devido ao peso do solo do aterro. Pesquisas comprovaram que o confinamento afeta substancialmente o comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos. Nestes, a deformabilidade é dominada pela estrutura interna entre os filamentos, e a interação solo-reforço e o intertravamento de grãos de solo entre os filamentos da manta dificultam a movimentação destes quando o reforço é solicitado à tração. (McGown et al., 1982, Wilson-Fahmy et al., 1993, citados por Koerner, 1994, Gomes, 1993a, Yuan et al., 1998 e Martins, 2000a).

Com base nestes conceitos, entende-se que estruturas reforçadas com geotêxteis, materiais considerados extensíveis, podem apresentar deformações menores que as esperadas, visto que, em geral, estas deformações são previstas a partir da consideração de valores de rigidez determinados em ensaios de tração em isolamento. Se o confinamento provoca um incremento de rigidez no geotêxtil não tecido, as deformações necessárias para mobilizar esforços de tração no reforço serão menores, como mostra a Figura 2.4. (considerando que o comportamento do geotêxtil sob confinamento é representado pela curva de linha pontilhada e o comportamento do geotêxtil em ensaios de tração em isolamento é representado pela curva de linha cheia).

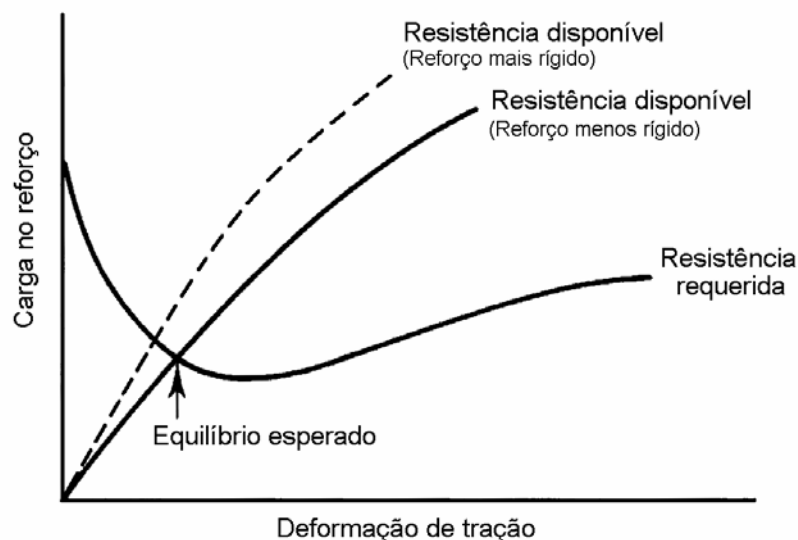


Figura 2.4 - Curva de compatibilidade para determinação do equilíbrio do solo reforçado
(Modificado - Jewell, 1996).

Comparando os valores de deslocamentos observados em modelos reduzidos instrumentados de estruturas de contenção de solo reforçado com os valores previstos pelo método de Jewell e Milligan (1989) para estas estruturas, Lanz (1992) verificou que os deslocamentos previstos foram maiores que os observados. Um dos motivos que, provavelmente, justificou a previsão de deslocamentos maiores foi a utilização da rigidez à tração do reforço obtida por meio de ensaios de tração em isolamento. Por não considerar o confinamento promovido pelo solo, o ensaio de tração isolada subestima os valores de rigidez à tração do geotêxtil não tecido, provocando a previsão de deslocamentos maiores em estruturas de solo reforçado com estes materiais.

Martins (2000a) retroanalisou o dimensionamento de três obras executadas em Minas Gerais utilizando parâmetros fornecidos por ensaios de tração confinada. Na retroanálise das condições de estabilidade das obras executadas, o autor utilizou o programa ReSlope (Leshchinsky, 1998). Martins (2000a) realizou também a análise de deformabilidade das estruturas mais íngremes por meio da metodologia de Jewell e Milligan (1989), levando-se em consideração as variações de rigidez dos reforços de acordo com as tensões de confinamento atuantes, cujos valores foram estimados por meio dos ensaios de tração confinada para deformações de 1 e 5%. Entre todas as análises feitas nas estruturas estudadas, não foram previstas deformações maiores que 4%, sendo que a maior parte destas previsões ficaram entre 2 e 3% de deformação. Os resultados de análises de deformação comprovaram que a utilização de parâmetros obtidos por meio de ensaios de tração confinada permitiriam uma redução de custos em torno de 30% com relação ao projeto executado e de 60% com relação ao projeto original em uma das obras retroanalisadas.

2.3. CASOS HISTÓRICOS DE SOLOS REFORÇADOS COM GEOTÊXTEIS

Tanto benefícios técnicos como econômicos podem ser obtidos por meio do uso de geotêxteis em obras de reforço. No entanto, a redução de custos é o que vem encorajando o uso desta alternativa (Jewell, 1996). A economia pode ser proveniente de vários fatores proporcionados pelo reforço do solo, entre eles: a redução de volumes de aterro, devido à possibilidade de estabilização de taludes íngremes; aumento da velocidade da construção devido à facilidade de instalação das inclusões e a possibilidade de uso de solos coesivos no “núcleo” do muro (Pinto e Oliveira, 1995), reduzindo os custos de transporte de materiais granulares necessários, pelo menos, nas camadas circundantes do muro para garantir boa drenagem.

A primeira obra instrumentada de grande porte executada em aterro reforçado com geotêxteis no Brasil foi descrita por Carvalho et al. (1986), Wolle e Carvalho (1992) e Ehrlich et al. (1997). Trata-se da recuperação de um aterro rodoviário situado no km 35 da SP 123 (Taubaté – Campos do Jordão), que se viabilizou tanto técnica quanto economicamente devido à impossibilidade de execução de um aterro convencional por falta de espaço e também porque outras alternativas não se mostraram competitivas em termos econômicos com a solução do aterro reforçado com geotêxtil. A Figura 2.5 apresenta a seção tipo e os detalhes construtivos desta obra.

A estrutura foi executada em 1984, com 40m de extensão e 11m de altura com inclinação do talude de 2V:1H sendo dividida em dois trechos: um reforçado com geotêxtil não tecido agulhado de filamentos contínuos de poliéster e gramatura de 300 g/m² e outro reforçado com geotêxtil tecido de laminetes de polipropileno com gramatura de 167 g/m², ambos com espaçamento vertical entre reforços de 60 cm. A resistência à tração não confinada dos dois geotêxteis empregados foi de 22 kN/m e a deformação na ruptura era igual a 10% para o geotêxtil tecido (ASTM D-1682) e 39% para o geotêxtil não tecido (AFNOR G38014). O material do aterro era uma areia siltosa pouco argilosa, selecionado para atender requisitos de elevada resistência ao cisalhamento e certa permeabilidade (para facilitar a drenagem e reduzir poropressões).

Por ser uma obra pioneira, foi feito um rigoroso controle com instrumentação. Foram instalados medidores de deslocamentos verticais (medidores de recalque magnéticos) e horizontais (extensômetros múltiplos de hastes), células de pressão total hidráulico-pneumáticas, e piezômetros. Após cada etapa construtiva as leituras dos instrumentos apresentavam tendências à estabilização e após a conclusão da obra a estabilização das medidas foi uniforme nos vários instrumentos e ocorreu em prazo relativamente curto. A relação entre os deslocamentos horizontais e a altura do talude reforçado foi menor que 1,2%.

A utilização de dois tipos de geotêxtil (tecido e não tecido) foi conveniente na medida em que o pioneirismo da obra e o controle com instrumentação da mesma permitiram a verificação da eficiência de cada tipo de reforço. Apesar de a rigidez do geotêxtil não tecido ser menor que a do geotêxtil tecido em ensaios de tração isolada, os deslocamentos horizontais medidos no talude foram sistematicamente menores no trecho reforçado com geotêxtil não tecido. O melhor desempenho observado no trecho do talude reforçado com geotêxtil não tecido está relacionado ao maior incremento de rigidez que o confinamento proporcionou a este tipo reforço.

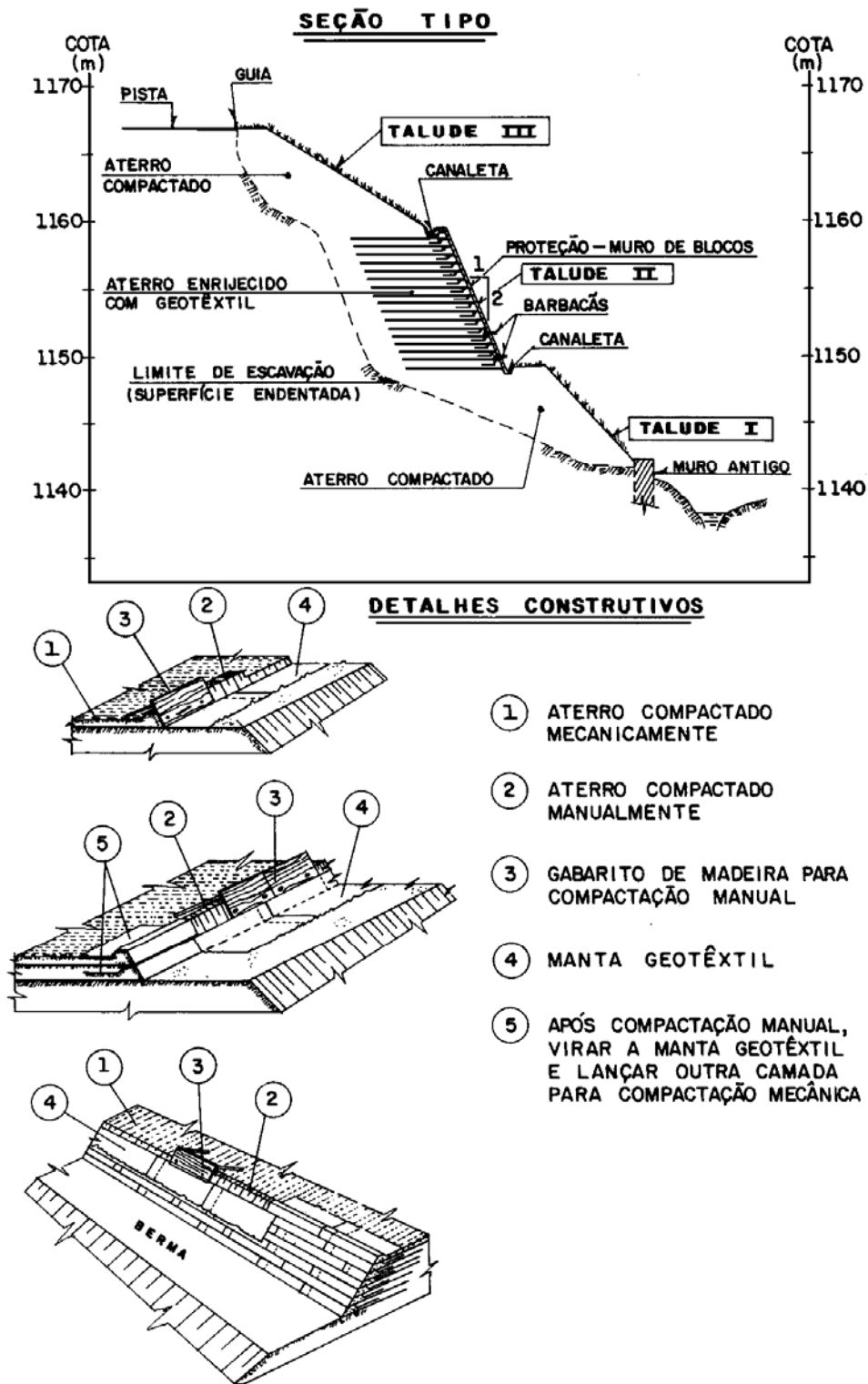


Figura 2.5 - Seção tipo e detalhes construtivos do aterro reforçado com geotêxteis da SP-123

(Modificado - Carvalho et al., 1986).

Além dessa obra pioneira, encontra-se na literatura as descrições de outros casos de aplicação de geotêxteis em estruturas de solo reforçado no Brasil. Azambuja e Strauss (1999) relataram vários projetos de reforço de taludes e muros de solos reforçados no Rio Grande do Sul, onde geotêxteis foram utilizados como inclusões. Os autores citam projetos que previam muros de flexão, muros de gravidade com blocos de rocha, cortinas ancoradas, muros de gabiões e outros, de 3 a 19 m de altura e extensões de 40 a 200 m, que foram substituídos por projetos de solo reforçado com geotêxteis não tecidos, apresentando reduções de custos de 15 a 50%, além da redução do tempo de execução das obras. Algumas das obras mencionadas pelos autores foram executadas em tempo bastante reduzido (10 dias) e utilizando equipamentos leves de terraplanagem. Os autores destacam que quanto ao reforço de taludes íngremes, os geotêxteis apresentam um desempenho mecânico tão satisfatório quanto as geogrelhas, o que conduz a decisão de que, nestes casos, a escolha do tipo de reforço a ser utilizado deve ser baseada na análise econômica do projeto.

Em muros de solos reforçados com geossintéticos usados em proteção de encostas de Petrópolis, foi documentado (Pinto e Oliveira, 1995, Ehrlich et al., 1994 e Ehrlich, 1995) que, apesar de a execução das obras ter demandado escavações que aumentaram os seus custos, a alternativa dos muros de solo reforçado com geotêxteis apresentou custos menores quando comparada a soluções convencionais. Além disso, a instrumentação destes muros registrou deslocamentos horizontais e verticais muito pequenos e não foram registradas poropressões positivas durante todo o período das leituras, mesmo durante o período chuvoso do verão.

Vários outros casos históricos de estruturas de solos reforçados com geossintéticos (no caso, muros de contenção) podem ser encontrados em Tatsuoka e Leshchinsky (1994), que fazem um apanhado de artigos, descrevendo obras executadas em diversos países: Canadá, Itália, Estados Unidos, França, Reino Unido, Japão, Taiwan, Alemanha e Bélgica. Wu (1992) também apresenta uma série de artigos com casos históricos de muros de solo reforçado.

2.4. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES RELEVANTES DE GEOSSINTÉTICOS PARA REFORÇO DE SOLOS

O comportamento global de uma estrutura de solo reforçado com geossintéticos está condicionado às propriedades do reforço, propriedades do solo e interação solo-geossintético. A especificação de um geossintético em uma obra de reforço de solo deve ser feita compatibilizando suas propriedades às solicitações impostas à obra: a resistência à tração e o

comportamento à fluência devem ser compatíveis com as tensões atuantes no reforço, rigidez compatível com as deformações admissíveis, resistência a esforços de instalação compatível com os materiais e equipamentos empregados na execução, grau de interação solo-reforço compatível com os comprimentos de ancoragem do reforço e durabilidade compatível com a vida útil da obra onde o reforço será empregado. (Palmeira, 1993).

Estas e outras propriedades dos geossintéticos são estudadas em laboratório por dois grupos básicos de ensaios (Vidal et al., 1999): ensaios de caracterização (ou ensaios índice) e ensaios de comportamento. Os ensaios de caracterização têm por objetivo determinar as características dos geossintéticos sem considerar sua interação com o meio ambiente nem o processo de solicitação imposto na obra. São propriedades inerentes aos produtos e independentes das condições de utilização cujos resultados são, geralmente, usados no controle tecnológico dos produtos. Os ensaios de comportamento permitem considerar as solicitações impostas pela obra: condições de instalação, modo, tempo e intensidade das solicitações, condições ambientes e interação com os meios adjacentes (Vidal et al., 1999).

Dentre os ensaios de caracterização, vários tipos de ensaios de tração em isolamento podem ser empregados na determinação de parâmetros de resistência do reforço geossintético. O item 2.4.1 faz uma breve descrição destes ensaios e suas ressalvas. Dentre os ensaios de comportamento, os mais empregados na determinação de propriedades relevantes para a utilização de geossintéticos em reforço de solos são os ensaios de cisalhamento direto com geossintéticos, arrancamento e tração confinada. Estes ensaios, apresentados no item 2.4.2, são comumente chamados de ensaios de interação solo geossintético por visarem simular solicitações comuns em estruturas de solos reforçados, considerando a interação entre os materiais.

2.4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO EM ISOLAMENTO

Os ensaios de tração de faixa estreita em isolamento são geralmente utilizados para o controle de qualidade dos produtos no processo de fabricação. São muito comuns em catálogos de fabricantes os parâmetros de resistência obtidos por meio de ensaios de tração de faixa estreita e o ensaio de tração localizada (“grab tensile test”) que, de acordo com Palmeira (1999b), devem ser usados quase que exclusivamente para o controle de qualidade dos produtos, devido a limitações como a estricção em amostras de geotêxteis não tecidos e larguras reduzidas para ensaios em geotêxteis tecidos e geogrelhas.

O ensaio de tração em isolamento que mais se aproxima às solicitações de campo é o ensaio em faixa larga normatizado pela NBR 12824/93 (Figura 2.6). Devido à maior relação entre a largura e a altura da amostra, (as normas brasileira e americana preconizaram $L/H=2$) a influência da estricção diminui, aproximando o comportamento do geotêxtil às condições de deformação plana que geralmente ocorrem no campo. Mesmo assim, os efeitos relativos ao confinamento não são simulados neste tipo de ensaio.

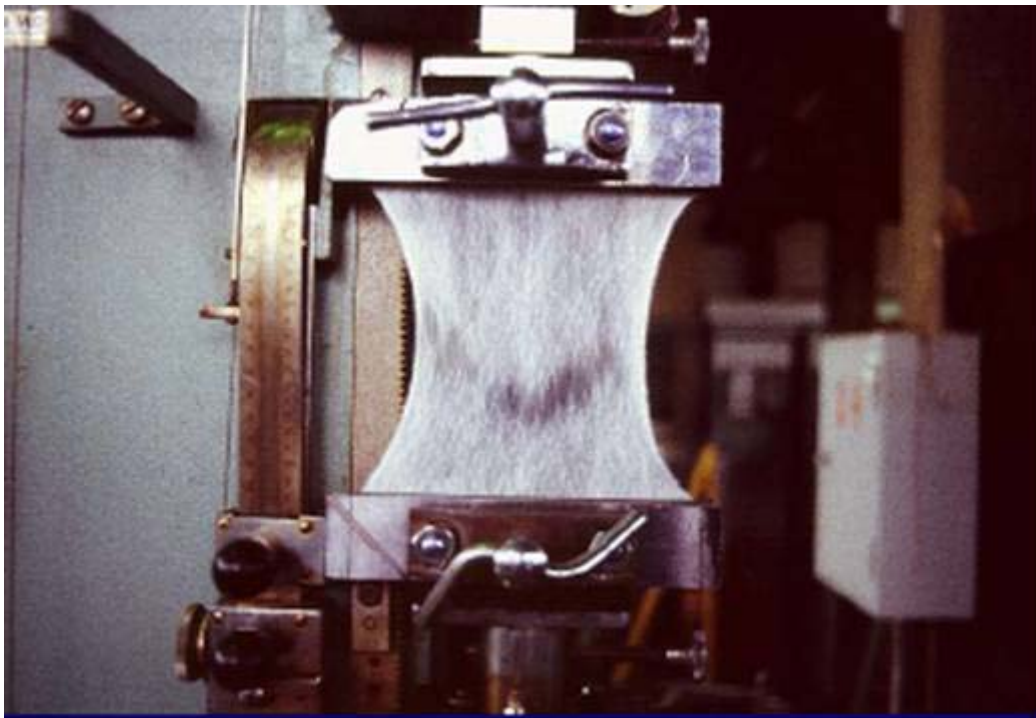


Figura 2.6 - Ensaio de tração em tira larga.

Nos ensaios de tração, geralmente as amostras de geossintéticos são submetidas a certa velocidade de deformação enquanto são feitas leituras da carga e dos deslocamentos das garras que tracionam a amostra. A partir dos valores medidos é plotado um gráfico da carga por unidade de largura (kN/m) em função da deformação (razão entre o deslocamento e o comprimento inicial da amostra, apresentado em %). A Figura 2.7. apresenta uma curva carga-alongamento típica e os parâmetros determinados a partir dela.

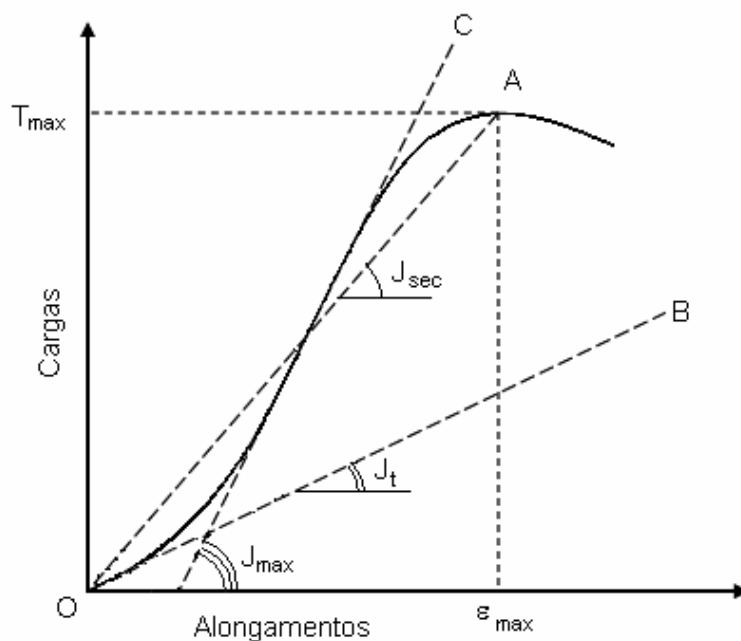


Figura 2.7 – Parâmetros determinados a partir do ensaio de tração
(Modificado - Gomes, 1993a).

A resistência à tração do geossintético corresponde à carga máxima suportada pelo geossintético, T_{max} , e a deformação máxima à tração, ϵ_{max} , corresponde à deformação da amostra no momento da ruptura. A rigidez à tração do geossintético é a relação entre a carga e o alongamento, e pode ser determinado de três formas:

- Rigidez à tração secante ($J_{sec \epsilon}$): coeficiente angular da reta secante que passa pela origem e pelo ponto da função carga-alongamento para a deformação ϵ , ou seja, J_{sec30} é o valor de rigidez à tração secante correspondente à deformação $\epsilon = 30\%$;
- Rigidez à tração tangente ou inicial (J_t ou J_i): coeficiente angular da reta tangente à curva carga-alongamento para $\epsilon = 0$;
- Rigidez à tração máxima (J_{max}): coeficiente angular da reta tangente ao trecho de máxima declividade da curva carga-alongamento.

Estes ensaios são de fácil execução e interpretação, sendo também úteis no controle de fabricação dos reforços geossintéticos. Entretanto, a utilização de valores de rigidez à tração obtidos em ensaios de tração em isolamento no dimensionamento de obras de reforço com geotêxteis pode levar a estimativas muito conservativas de deformações, uma vez que eles não simulam o confinamento promovido pelo solo do aterro subjacente. O efeito do

confinamento pode alterar de forma significativa o comportamento do reforço, especialmente dos geotêxteis não tecidos.

2.4.2. ENSAIOS DE INTERAÇÃO SOLO-GEOSINTÉTICO

De acordo com Palmeira (1999a), os métodos usuais para a avaliação de parâmetros de interação solo-reforço compreendem ensaios de laboratório e de campo. Dentre os ensaios de laboratório, os mais utilizados são os ensaios de cisalhamento direto, arrancamento e tração confinada. Cada um destes três tipos de ensaio visa simular de condições de carregamento encontradas em obras reais em solo reforçado, como esquematizado na Figura 2.8. Os ensaios de cisalhamento direto simulariam as condições ilustradas pelos elementos A e C da figura, os ensaios de arrancamento simulariam a condição D e ensaios de tração confinada, a condição B da mesma figura.

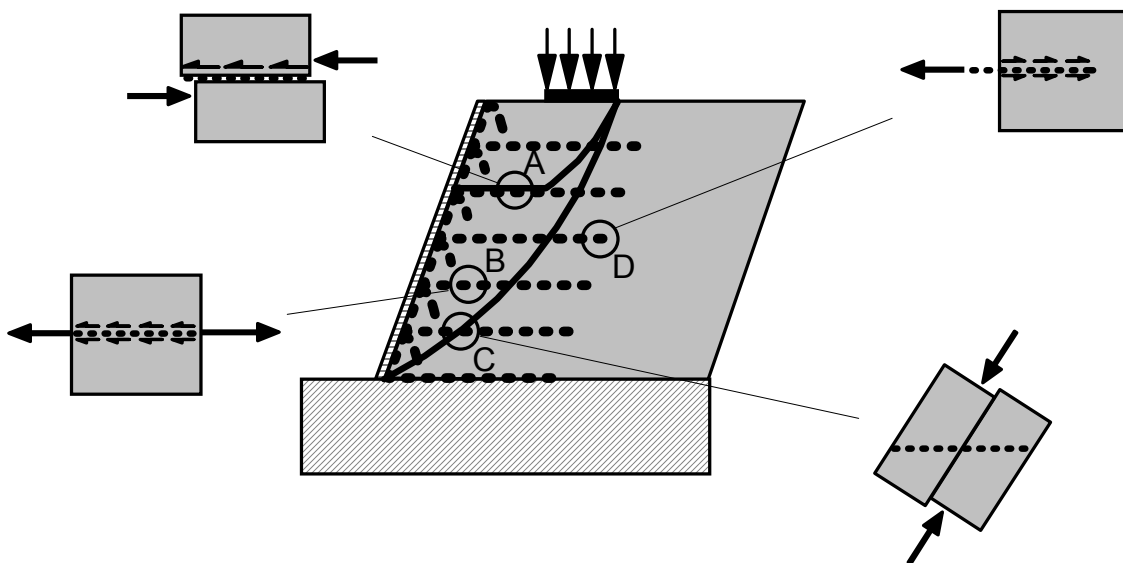


Figura 2.8 – Mecanismos de interação solo-reforço (Palmeira, 1999a).

Além das propriedades do solo e do reforço, isoladamente, serem importantes para o dimensionamento e previsão do comportamento das estruturas de solo reforçado, as propriedades de interação entre eles também são elementos essenciais nestes cálculos. Existem basicamente duas formas de interação entre o solo e o reforço: interação por atrito e por resistência passiva. No caso de tiras metálicas lisas, geotêxteis e geogrelhas com pequenas aberturas, predomina a interação por atrito e adesão e no caso de tiras com ressaltos e

geogrelhas com grandes aberturas, pode predominar a interação por resistência passiva (Palmeira, 1993). O coeficiente de interação por atrito solo-geossintético é determinado por meio de ensaios de cisalhamento direto (item 2.4.2.1) e o coeficiente de interação por resistência passiva é determinado por meio de ensaios de arrancamento (item 2.4.2.2).

Nos ensaios de tração confinada (item 2.4.2.3), a quantificação da interação solo-reforço é mais complexa (Palmeira, 1999b), por este motivo este ensaio é mais apropriado para a verificação do comportamento carga-alongamento dos geotêxteis submetidos a solicitações de confinamento impostas pela obra. O principal benefício que o ensaio de tração confinada pode prover é uma previsão mais realista do comportamento mecânico do geotêxtil.

2.4.2.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Dependendo do tipo de reforço introduzido no solo, pode-se desenvolver uma aderência dada pelo atrito e adesão entre as partículas de solo e a superfície do reforço e/ou pela resistência passiva devido a elementos transversais. Na interação entre o solo e reforços planos, do tipo geotêxteis, predominam os efeitos do atrito e adesão.

O ensaio de cisalhamento direto é um ensaio de fácil execução, necessário para a determinação da adesão entre o solo e o geossintético (a) e do ângulo de atrito de interface solo-geossintético (δ). Com estes dados determinam-se os coeficientes de interação por adesão (λ) e por atrito (f), respectivamente, expressos pelas Equações 2.1 e 2.2

$$\lambda = \frac{a}{c} \quad (2.1)$$

$$f = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \quad (2.2)$$

Onde:

λ = coeficiente de interação por adesão;

a = adesão entre solo e geossintético;

c = coesão do solo;

f = coeficiente de interação por atrito;

δ = ângulo de atrito de interface solo-geossintético;

ϕ = ângulo de atrito do solo.

A adesão (a) e o ângulo de atrito de interface (δ) entre o solo e geotêxteis podem ser determinados também por meio de ensaios de arrancamento. No entanto, devido à simplicidade do ensaio de cisalhamento direto, este é mais comumente empregado na determinação destes parâmetros.

Nestes ensaios o plano do cisalhamento geralmente é imposto na interface de contato entre o solo e o reforço, como apresentado na condição do elemento A da Figura 2.8. A realização de ensaios de cisalhamento direto com o geotêxtil inclinado em relação ao plano de cisalhamento (condição do elemento C da Figura 2.8) só se justifica em casos de estudos fundamentais de interação e em equipamentos que permitam a medição dos deslocamentos internos do solo e do reforço, uma vez que o estado de tensões no interior da amostra é bastante complexo (Palmeira, 1999b).

2.4.2.2. ENSAIO DE ARRANCAMENTO

Os ensaios de arrancamento são interessantes para a quantificação da interação por ancoragem entre solo e reforço, especialmente para reforços do tipo geogrelha. Nestes ensaios, o comprimento do reforço inserido no solo é arrancado por meio da aplicação de uma carga de tração na extremidade oposta do reforço.

O mecanismo de interação entre solo e geogrelha é diferente da interação entre o solo e um reforço com superfície plana contínua (geotêxteis tecidos e não tecidos, por exemplo). A interação solo-geogrelha é uma combinação de mecanismos de interação por atrito e por resistência passiva dos membros transversais, simultaneamente. Palmeira (1987) verificou que a predominância de um ou outro mecanismo de interação geralmente é definida pela geometria da grelha; mais precisamente pela abertura da malha, expressa em fração de área sólida da geogrelha em planta (α_s).

Para a quantificação da interação solo-geogrelha devido apenas ao efeito do *atrito*, Jewell et al. (1984, citado por Jewell, 1996) sugeriu a Equação 2.3. Para geogrelhas com α_s menor que 20% da área em planta, Palmeira (1987) sugere a Equação 2.4 para quantificar o coeficiente de aderência por *ancoragem* entre uma grelha rígida e um solo arenoso. Quando os mecanismos de atrito e de ancoragem atuam simultaneamente em uma grelha rígida, pode-se utilizar a combinação entre as Equações 2.3 e 2.4, obtendo-se uma equação geral (Equação 2.5) para a estimativa do valor do coeficiente de aderência (Palmeira, 1993).

$$f_{ds} = 1 - \alpha_s \cdot \left(1 - \frac{\tan \delta'}{\tan \phi} \right) \quad (2.3)$$

$$f_b = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} = \frac{(1 - DI)}{2} \cdot \left(\frac{b}{S} \right) \cdot \frac{\alpha_b \sigma_b}{\sigma_y \cdot \tan \phi} \quad (2.4)$$

$$f = 1 - \alpha_s \cdot \left(1 - \frac{\tan \delta'}{\tan \phi} \right) + \frac{(1 - DI)}{2} \cdot \left(\frac{b}{S} \right) \cdot \frac{\alpha_b \sigma_b}{\sigma_y \cdot \tan \phi} \quad (2.5)$$

Onde:

f_{ds} = coeficiente de aderência ao deslizamento sobre o plano da geogrelha;

α_s = porcentagem da parcela sólida em planta da geogrelha disponível para atrito de pele com o solo;

δ' = ângulo de atrito de interface entre o material constituinte da geogrelha e o solo;

ϕ = ângulo de atrito do solo;

f_b = coeficiente de aderência por ancoragem;

δ = ângulo de atrito “equivalente” entre o solo e a geogrelha;

DI = grau de interferência ($0 \leq DI \leq 1$). (Palmeira, 1987);

b = altura ou espessura dos membros de ancoragem da geogrelha;

S = espaçamento entre membros de ancoragem;

α_b = fração da área do membro transversal disponível para mobilização de resistência passiva no solo ($0 \leq \alpha_b \leq 1$);

σ_b = máxima resistência passiva para membros transversais testados ao arrancamento em isolamento;

σ_y = pressão normal no plano de instalação da geogrelha.

2.4.2.3. ENSAIO DE TRAÇÃO CONFINADA

De acordo com Gomes (1993a), a resistência à tração de projeto tem sido estabelecida por meio de ensaios de tração em faixa larga a partir da resistência de ruptura do geotêxtil ou com base no valor da resistência mobilizada para certa deformação. No entanto, este ensaio, assim como os outros ensaios de caracterização, não simula os efeitos da interação solo-

geotêxtil devido ao confinamento, comprometendo a previsão do comportamento de solos reforçados com esses materiais, principalmente no que diz respeito aos deslocamentos da estrutura.

Considerando que o confinamento diminui a deformabilidade de geotêxteis, especialmente dos não tecidos, ensaios de tração confinada em geotêxteis submetidos a diferentes tensões de confinamento são essenciais para assegurar uma simulação adequada das condições operacionais de uma estrutura de solo reforçado. Por considerarem os efeitos da interação solo-geotêxtil devido ao confinamento, os ensaios de tração confinada possibilitam a melhoria dos parâmetros de projeto, ampliando as possibilidades de utilização destes materiais em aplicações de reforço.

A ação do confinamento do geotêxtil consiste em uma combinação de dois mecanismos preponderantes que dificultam o processo de reorientação das fibras têxteis, fator que contribui para o aumento da sua rigidez à tração.

- A tensão de confinamento provoca uma densificação da estrutura aumentando o atrito entre os filamentos e reduzindo os espaços por onde estes poderiam se movimentar durante a solicitação de tração;
- A interpenetração de grãos de solo entre os filamentos ocupando parte dos vazios da manta geotêxtil (impregnação) cria mais obstáculos, dificultando a reorientação dos filamentos durante a solicitação de tração.

Os primeiros autores que ressaltaram a importância do confinamento no comportamento à tração de geotêxteis foram McGown et al. (1982), que desenvolveram o primeiro equipamento de ensaio de tração confinada. Segundo eles, a compressão das fibras e a impregnação das partículas de solo na manta geotêxtil constituem aspectos adicionais ao confinamento, influenciando de maneira significativa os mecanismos de interação solo-geotêxtil.

Basicamente, o equipamento usado por McGown et al. (1982) consistia em duas caixas metálicas com bolsas de ar pressurizado que eram posicionadas nas interfaces com a amostra geotêxtil (Figura 2.9). Duas finas camadas de solo granular com 20 cm de largura por 10 cm de comprimento, eram colocadas entre a amostra geotêxtil e a bolsa de borracha sendo esta última protegida por uma membrana para evitar possíveis perfurações da borracha pelas arestas dos grãos do solo confinante. Quando a bolsa era pressurizada por ar comprimido, uma tensão de confinamento lateral era aplicada nos dois lados da amostra pelo solo confinante. O equipamento foi projetado para aplicar uma tensão confinante máxima de 250 kPa, sendo usado para ensaios de tração e de fluência confinadas. As cargas eram medidas por

meio de 4 células de carga, 2 fixadas nas caixas metálicas e 2 fixadas nas garras fixa e móvel, presas à amostra geotêxtil. A deformação da amostra era determinada por meio de medidas de deslocamentos fornecidas por extensômetros (McGown et al, 1982).

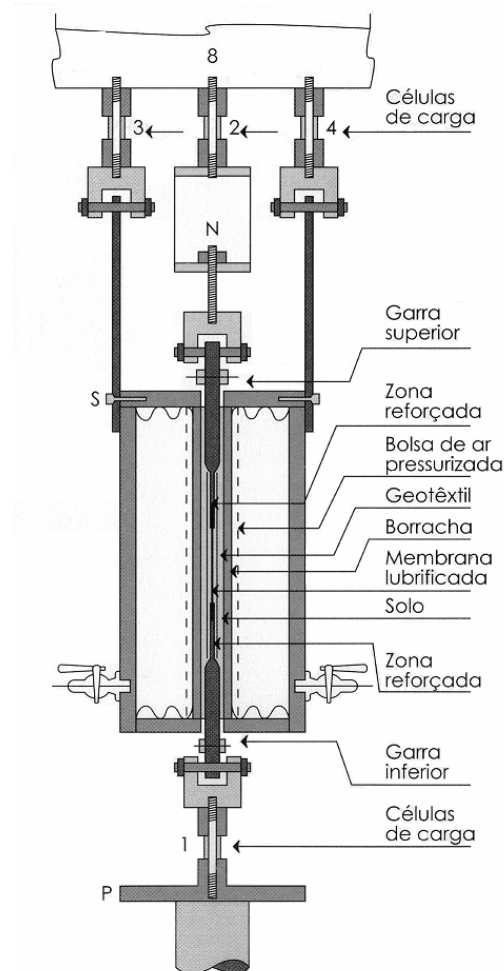


Figura 2.9 - Lay-out do equipamento de tração confinada desenvolvido por McGown et al. (1982). (Bueno e Vilar, 2004).

Desde então, outros equipamentos de tração confinada foram desenvolvidos por outros autores. El-Fermaoui e Nowatzki (1982), Siel et al. (1987), construíram equipamentos com base na caixa de cisalhamento direto e Leshchinsky e Field (1987), Fabian e Fourie (1988) Kokkalis e Papacharisis (1989), Palmeira (1990), Azambuja (1994) e Yuan et al. (1998), construíram equipamentos baseados no equipamento de McGown et al. (1982). Wu e Arabian (1990, citados por Wu, 1991), desenvolveram um equipamento triaxial modificando possibilitando a aplicação de esforços de tração na amostra geotêxtil confinada no solo. Uma descrição sumariada da maioria destes equipamentos pode ser encontrada em Gomes (1993a) e a Figura 2.10 apresenta o escopo de alguns deles.

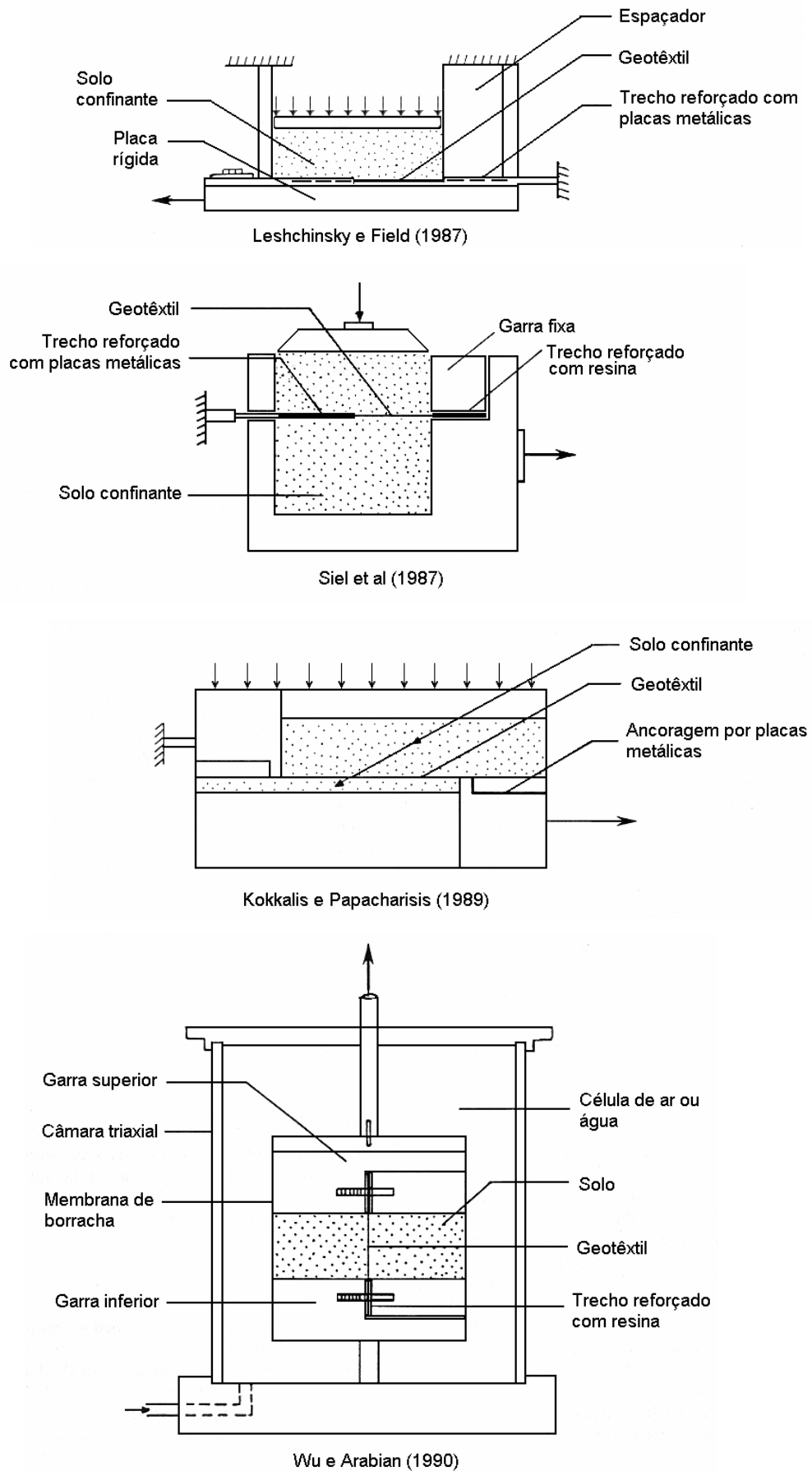


Figura 2.10 – Alguns equipamentos de tração confinada (Modificado – Wu, 1991).

Apesar do avanço pela iniciativa de considerar o confinamento do solo na previsão do comportamento carga-alongamento dos geossintéticos usados em estruturas de solos reforçados, a maioria destes equipamentos esbarram em dois problemas principais que dificultam a interpretação dos resultados obtidos.

O primeiro problema diz respeito à movimentação relativa entre o solo e o reforço, ou seja, durante a solicitação à tração do reforço, o solo confinante permanece estacionário, não acompanhando a evolução dos alongamentos do geotêxtil. De acordo com Wu (1991) e Gomes (1993a e 1993b), a movimentação relativa mobiliza o atrito solo-reforço antes do desenvolvimento das deformações por tração, mascarando os efeitos do confinamento no comportamento carga-alongamento o geossintético.

Outro problema encontrado na maioria dos equipamentos mencionados é referente ao confinamento de parte do trecho reforçado (extremidades enrijecidas para evitar deformações fora da área útil da amostra). A diferença de rigidez à compressão entre a área útil a ser ensaiada e o trecho reforçado pode afetar a distribuição de tensões normais por arqueamento do solo, concentrando tensões nas extremidades enrijecidas, reduzindo a tensão de confinamento na área útil, como comprovado por Tupa (1994) e Palmeira et al. (1996) por meio de modelagem numérica do ensaio de tração confinada por elementos finitos.

Ling et al. (1992), Boyle et al. (1996) e Palmeira (1998) desenvolveram equipamentos que asseguram a movimentação do solo concomitantemente ao geotêxtil. Além disso, nestes equipamentos as zonas reforçadas das amostras ficam limitadas às bordas das garras de tracionamento do equipamento, não invadindo a célula de confinamento e evitando que a extremidade enrijecida altere a distribuição de tensões verticais sobre a área útil da amostra. Neste contexto, as metodologias propostas por estes autores parecem ser as mais consistentes no sentido de minimizar a influência de fatores alheios ao confinamento, facilitando a interpretação dos resultados.

No Brasil, além do equipamento utilizado na presente pesquisa, desenvolvido por Palmeira (1998) e de sua versão anterior (Palmeira, 1990), outros dois equipamentos para ensaios de tração e fluência confinadas foram desenvolvidos por Azambuja (1994) e Costa e Bueno (2000), respectivamente.

O primeiro equipamento desenvolvido por Palmeira (1990) consistia em uma caixa metálica bipartida, convencional de ensaio de cisalhamento direto de grande porte, modificada para permitir a instalação de um geotêxtil entre as duas camadas de solo. A amostra geotêxtil era enrijecida com resina nas extremidades e presas a um sistema de garras responsável pelo tracionamento. O segundo equipamento (Palmeira, 1998), utilizado na presente pesquisa,

difere do primeiro basicamente devido à compatibilização de deslocamentos entre solo e reforço, minimizando o incremento de rigidez provocado pelo atrito solo-geotêxtil (Figura 2.11). Uma descrição completa deste equipamento será apresentada no Capítulo 3. A Figura 2.12 ilustra a importância em minimizar o movimento relativo entre o solo e o geotêxtil, que magnifica a rigidez confinada dos geotêxteis.

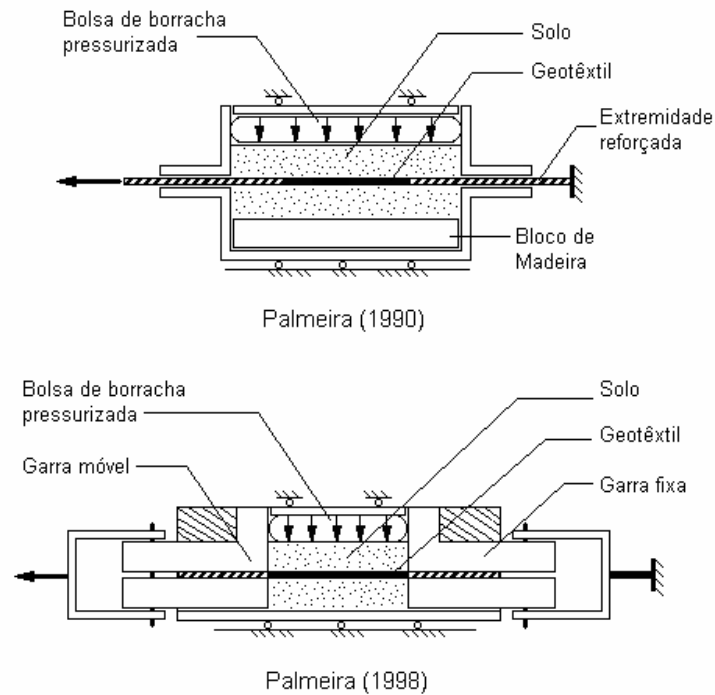


Figura 2.11 – Equipamentos de tração confinada desenvolvidos por Palmeira (1990 e 1998).

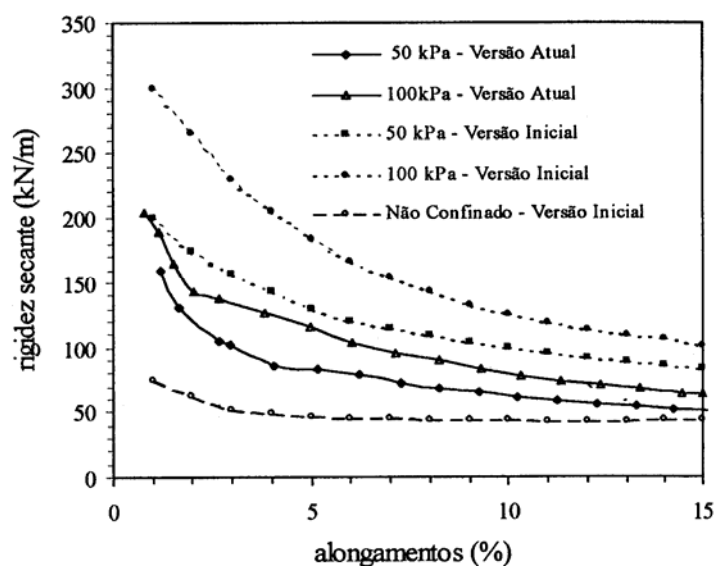


Figura 2.12 – Valores de rigidez obtidos pelas duas versões do equipamento desenvolvido por Palmeira (1990 e 1998) (Martins, 2000a).

O equipamento desenvolvido por Azambuja (1994) permite ensaios de elementos de reforço de 30 x 30 cm, tanto em ensaios de arrancamento como de tração confinada. O diferencial que este equipamento apresenta é a capacidade de ensaiar geotêxteis utilizando solos de granulometrias maiores (na pesquisa foi utilizada brita de basalto) como material confinante, permitindo que fossem provocados danos mecânicos devido à compactação deste material sobre a amostra geotêxtil.

Costa e Bueno (2000) desenvolveram um equipamento para ensaios de fluência confinada que consiste em uma caixa metálica apoiada sobre uma mesa sendo o carregamento aplicado por meio de um conjunto de pesos semelhante aos empregados nos ensaios de fluência sem confinamento. A tensão confinante é aplicada por meio de uma bolsa de ar pressurizada por ar comprimido. Note-se que com exceção do equipamento usado na presente pesquisa (Palmeira, 1998), os outros equipamentos brasileiros ainda apresentam problemas devido à movimentação relativa entre o solo e o reforço e também com relação à alteração da distribuição de tensões sobre a amostra geotêxtil devido ao confinamento de parte do trecho enrijecido.

2.5. FATORES QUE INFLUENCIAM A RIGIDEZ À TRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS CONFINADOS

Os geotêxteis não tecidos agulhados apresentam uma estrutura composta de fibras cortadas ou filamentos contínuos interligados de forma que a deformação da manta depende da reorientação destes filamentos. A facilidade ou dificuldade de deslocamentos destes filamentos é função primariamente do entrelaçamento entre eles, especialmente quando são contínuos. Em ensaios de tração simples, fatores como o polímero constituinte dos filamentos, processo de fabricação do geotêxtil, gramatura, presença de danos mecânicos, entre outros, influenciam o comportamento carga-alongamento dos geotêxteis. O confinamento do geotêxtil não tecido pelo solo agrega outros fatores capazes de alterar as condições de deslocamento dos filamentos, como por exemplo a tensão confinante, o material de interface e o grau de impregnação, influenciando diretamente o comportamento carga-alongamento destes materiais.

Em geotêxteis tecidos, caracterizados pela matriz mais fechada, composta de fios, filamentos ou laminetes entrelaçados em duas direções principais, o comportamento carga-alongamento da manta é condicionado pela natureza mais rígida que esta estrutura apresenta,

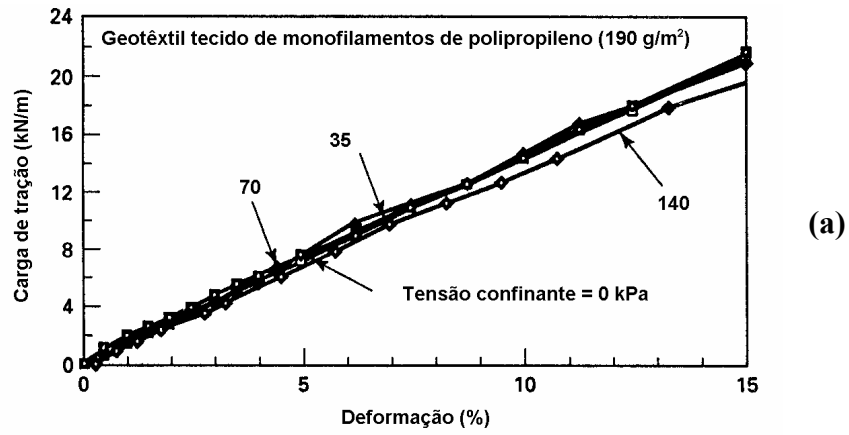
reduzindo a relevância do confinamento na sua deformabilidade. Portanto, o tipo de geotêxtil empregado como reforço de solos também é um fator fundamental na determinação do potencial do confinamento em influenciar a rigidez à tração do geotêxtil.

2.5.1. INFLUÊNCIA DO TIPO DE GEOSSINTÉTICO

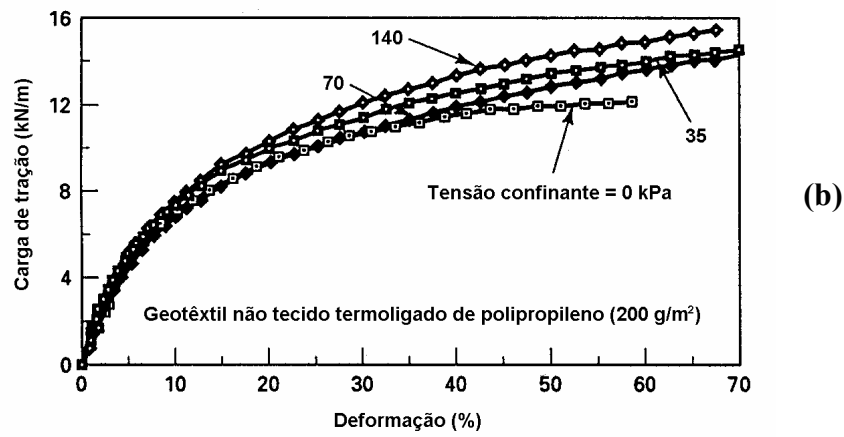
Desde a construção dos primeiros equipamentos de tração confinada, vários tipos de geossintéticos vêm sendo ensaiados com o intuito de verificar a influência do confinamento do solo nos parâmetros de resistência (resistência e rigidez à tração) em diferentes materiais. McGown et al (1982), que construíram o equipamento pioneiro de tração confinada, apresentaram os resultados de ensaios com geotêxteis tecidos, geotêxteis não tecidos (termoligado e agulhado) e um geocomposto. Os resultados comprovam que em geotêxteis tecidos o confinamento não promove um aumento significativo da resistência e rigidez à tração destes materiais.

Wilson-Fahmy et al. (1993, citados por Koerner, 1994) utilizaram o equipamento desenvolvido por McGown et al (1982) ampliando a variedade de materiais geossintéticos ensaiados. Nestes estudos eles verificaram que o confinamento não promoveu melhoria do comportamento carga-alongamento de geogrelhas, geomembranas e GCLs (“geosynthetic clay liner”). Entre os geotêxteis, eles verificaram que os maiores incrementos de rigidez foram observados nos não tecidos agulhados de poliéster (Figura 2.13 (d)). Geotêxteis não tecidos agulhados de polipropileno também apresentaram incrementos significativos de rigidez (Figura 2.13 (c)). Geotêxteis não tecidos termoligados de polipropileno se mostraram pouco influenciados pelo confinamento e os tecidos de monofilamentos de polipropileno apresentaram incremento de rigidez insignificante devido ao confinamento (Figura 2.13 (b) e (a), respectivamente).

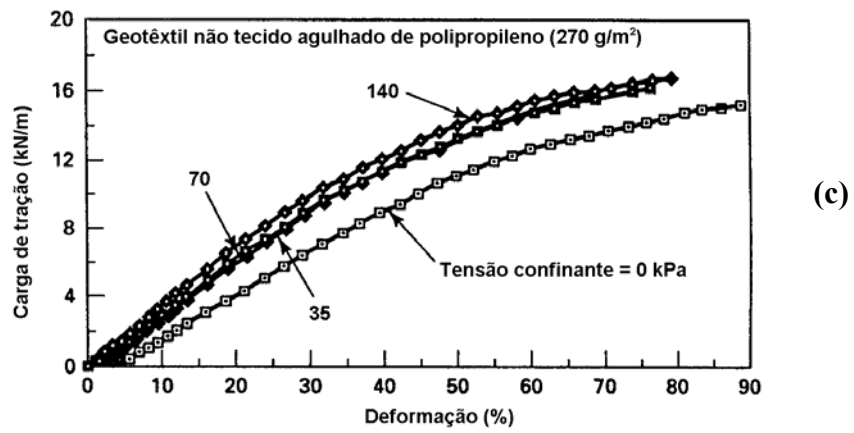
Em pesquisa mais recente Yuan et al. (1998) fizeram ensaios de tração confinada com alguns dos tipos de geossintéticos mais comuns em estruturas de solo reforçado: geotêxteis não tecidos agulhados de polipropileno, geotêxteis tecidos de laminetes, multifilamentos e monofilamentos de polipropileno e geogrelhas de polipropileno e poliéster. Confirmando os resultados de Wilson-Fahmy et al. (1993, citados por Koerner, 1994), aqueles autores verificaram que apenas em geotêxteis não tecidos o confinamento promoveu um aumento significativo da sua rigidez à tração. Nos demais geossintéticos ensaiados (geotêxteis tecidos e geogrelhas), não se verificou um efeito significativo do confinamento em seus parâmetros de resistência.



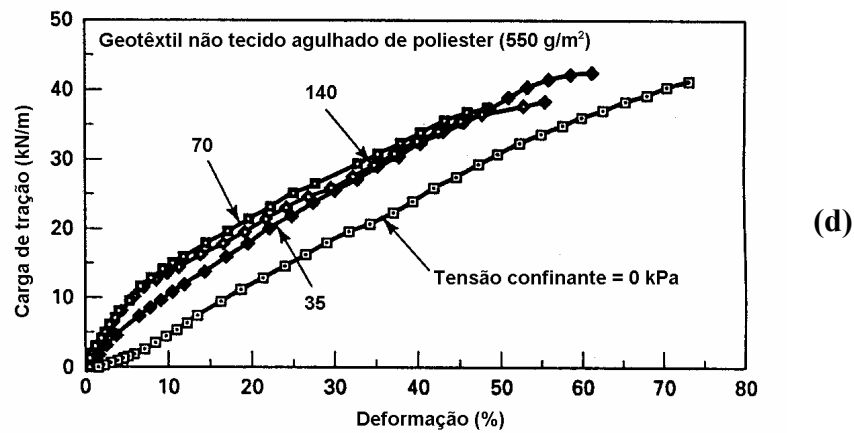
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.13 - Curvas carga-alongamento de geotêxteis submetidos à tração confinada (Wilson-Fahmy et al., 1993, citado por Koerner, 1994).

Alguns autores brasileiros pesquisaram a influência do confinamento em geotêxteis tecidos e não tecidos. Gomes (1993a e 1993b), observou incrementos de rigidez em torno de 300% ou mais para deformações da ordem de 5%, da condição não confinada para uma tensão confinante de 100 kPa de um geotêxtil não tecido, enquanto que a mesma tensão confinante promoveu um aumento de “apenas” 40% na rigidez de um geotêxtil tecido. Os resultados obtidos por Martins (2000a) também demonstram uma maior influência do confinamento nos geotêxteis não tecidos.

O incremento de rigidez devido ao confinamento de geotêxteis não tecidos se deve, entre outros fatores, às dificuldades para os filamentos (dispostos em múltiplas direções) se estirarem criadas pela tensão confinante e pelos grãos impregnados entre os filamentos. Portanto, o confinamento provoca uma redução significativa das deformações de tração do material e, conseqüentemente, aumenta sua rigidez à tração. Em geotêxteis tecidos, os filamentos, fios ou laminetes que o compõem encontram-se originalmente estirados e por este motivo o comportamento à tração é governado pelas propriedades resistentes das unidades têxteis de fiação sendo função, portanto, da natureza do polímero base e da tecnologia de fabricação da manta (Gomes, 1993a).

Apesar da comprovação de que os efeitos do confinamento são mais significativos em geotêxteis não tecidos, é importante lembrar que, dependendo do processo de ligação dos filamentos, o efeito do confinamento pode ser mais ou menos intenso. Ling et al. (1992) fizeram ensaios de tração confinada com geotêxteis não tecidos termoligados, agulhados e ligados por rotação, verificando que o efeito do confinamento no comportamento carga-alongamento foi significativo em geotêxteis agulhados e ligados por rotação, o que não ocorreu com os geotêxteis termoligados.

2.5.2. INFLUÊNCIA DA GRAMATURA

A gramatura de um geotêxtil é definida como a relação da massa por unidade de área da manta, geralmente expressa em g/m^2 . Dentro deste conceito, não é difícil entender porque a rigidez à tração de geotêxteis é diretamente proporcional à sua gramatura: para certa taxa de deformação imposta (sob confinamento ou não), quanto maior o número de filamentos compondo a manta, maior o esforço necessário para o rompimento e/ou movimentação destes filamentos.

Gomes (1993a) verificou que embora em valores absolutos os valores de rigidez à tração de geotêxteis submetidos a ensaios de tração isolada e confinada sejam diretamente

proporcionais à sua gramatura, o *incremento* de rigidez promovido pelo confinamento é maior em geotêxteis de menor gramatura. Segundo o próprio autor, isto se deve ao fato destes geotêxteis apresentarem uma estrutura originalmente mais “frouxa” que a dos geotêxteis com maiores gramaturas. Em outras palavras, por serem menos densos (a espessura das mantas não é proporcional à gramatura do geotêxtil não tecido), os geotêxteis de menor gramatura permitem uma maior densificação da estrutura têxtil devido à aplicação da tensão vertical promovida pelo confinamento do reforço na massa de solo.

Matheus (2002) constatou por meio da repetição de ensaios e da análise estatística dos resultados obtidos, que a não uniformidade da gramatura de geotêxteis não tecidos ao longo da manta contribui para a dispersão dos resultados de ensaios de tração simples ou confinada nestes materiais, comprovando a importância deste parâmetro no comportamento carga-alongamento destes materiais.

2.5.3. INFLUÊNCIA DA TENSÃO CONFINANTE

A rigidez à tração de geotêxteis não tecidos agulhados deve-se especialmente ao intertravamento entre os filamentos que constituem a manta geotêxtil e a continuidade dos filamentos desempenha um papel importante neste contexto (Azambuja, 1994). Quando o reforço geotêxtil está submetido a uma tensão de confinamento, promovida pelo peso do solo do aterro sobre a manta, os filamentos que a compõem se aproximam reduzindo os espaços vazios entre eles, densificando a estrutura. Verifica-se na Figura 2.14 que para baixos níveis de tensão confinante, a manta (geotêxtil não tecido com gramatura igual a 200 g/m²) apresenta poucos contatos entre os filamentos e para níveis maiores de tensão confinante, particularmente para 1000 kPa, identifica-se um número considerável de aglomerações de filamentos (Gardoni e Palmeira, 2002). Dentro desta estrutura densificada, os filamentos que compõem o reforço encontram mais dificuldades em se deslocar quando a manta é solicitada à tração devido ao aumento do atrito entre os filamentos e redução do volume de vazios.

Por serem contínuos e dispostos em diversas direções, os filamentos que compõem o geotêxtil não tecido demandam a mobilização de um grande número de filamentos para se deslocar. A aproximação dos filamentos causada pela tensão de confinamento aumenta o *atrito* entre eles, restringindo o deslocamento relativo entre estes filamentos e, conseqüentemente, aumentando a rigidez à tração da manta.

A densificação da estrutura provoca uma redução do *volume de vazios* por onde os filamentos poderiam se deslocar. Portanto, mesmo depois de vencido o atrito entre os

filamentos, a estrutura densificada impõe outros obstáculos para a continuidade de deformação da manta.

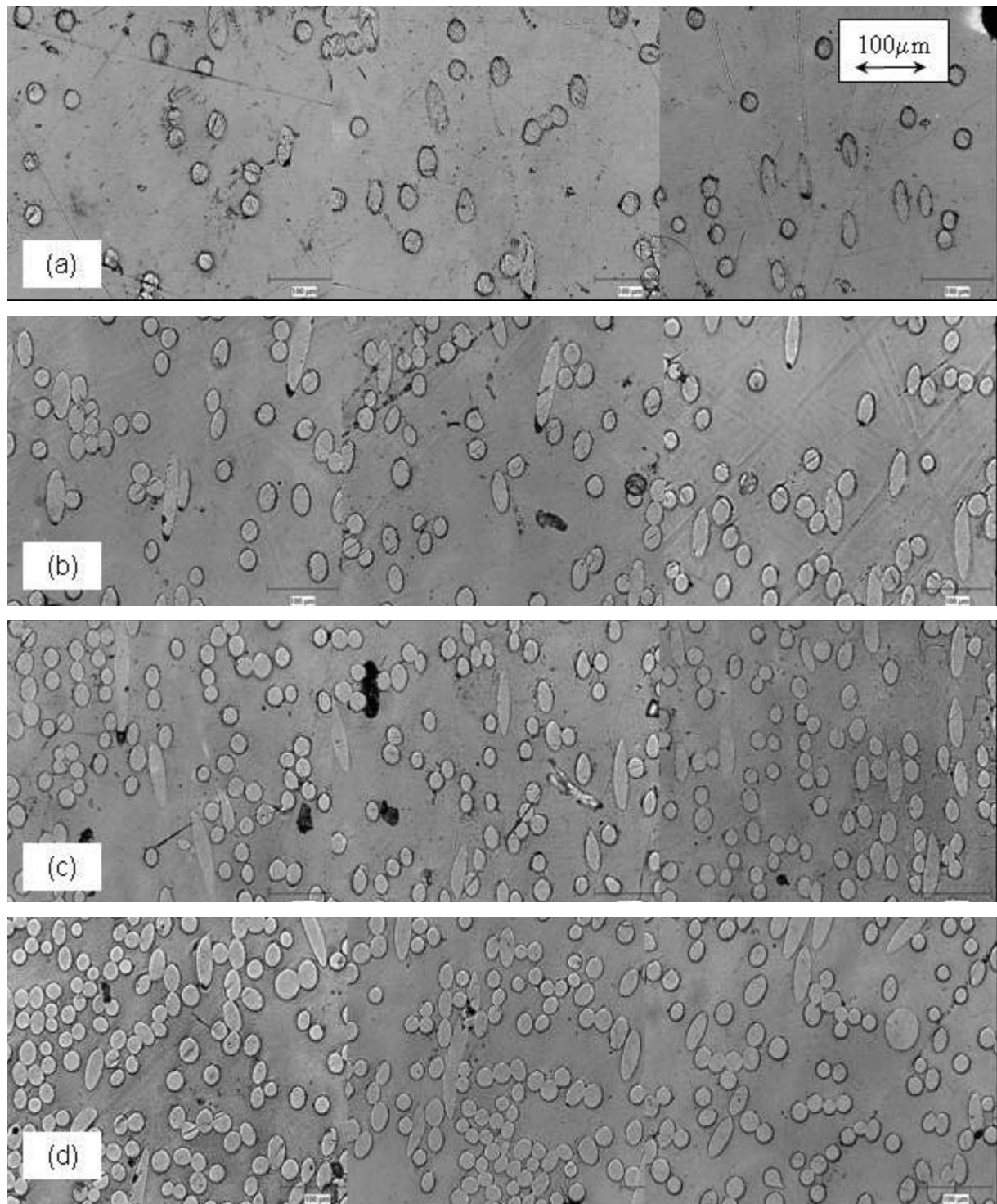


Figura 2.14 - Seção transversal de geotêxteis submetidos a tensões confinantes diferentes.

(a) 2 kPa; (b) 200 kPa; (c) 550 kPa; (d) 1000 kPa. (Gardoni e Palmeira, 2002).

Algumas pesquisas apresentam a relação entre a rigidez à tração em função da tensão confinante de geotêxteis submetidos a ensaios de tração confinada: Gomes (1993a e 1993b), Tupa (1994), Tupa e Palmeira (1995), Palmeira et al. (1996), Yuan et al. (1998) e Martins (2000a). Observa-se nestas pesquisas que, geralmente, uma função linear se ajusta bem aos pontos que relacionam a rigidez com a tensão confinante. As outras pesquisas envolvendo ensaios de tração confinada em geotêxteis, embora não apresentem graficamente esta relação, também evidenciam a proporcionalidade entre estas duas grandezas (McGown, 1982, El Fermaoui e Nowatzki, 1982, Siel et al., 1987, Wilson-Fahmy et al. 1993, citados por Koerner, 1994 e Boyle et al. 1996).

Além de afetar a rigidez à tração de geotêxteis não tecidos, a tensão confinante influencia outros parâmetros importantes para geossintéticos utilizados em reforço de solos. De acordo com Abramento (1995), apesar de a fluência e a durabilidade dos geossintéticos serem afetadas principalmente pelo tipo de polímero, estas características são fortemente influenciadas pelas condições de confinamento do geossintético no solo, pelo nível de tensões no material, entre outros fatores. McGown et al. (1982) e Costa e Bueno (2000) comprovaram o efeito da tensão de confinamento na fluência de geotêxteis não tecidos; por meio de ensaios de *fluência confinada* estes autores verificaram reduções da taxa de deformação e das deformações iniciais e totais ao longo do tempo.

2.5.4. INFLUÊNCIA DO MATERIAL CONFINANTE

Os efeitos do confinamento nas propriedades da manta geotêxtil não se limitam à densificação provocada pela tensão confinante devida ao peso do solo subjacente. O material do aterro, dependendo da sua granulometria e angularidade também exerce influência no comportamento carga-alongamento dos geotêxteis utilizados como reforço devido a efeitos de impregnação e embricamento.

De acordo com Azambuja (1994), em geotêxteis confinados por solos de granulometria fina, predomina o efeito do aumento do atrito entre os filamentos devido à tensão confinante enquanto que em solos grossos, devido à não continuidade da área de contato entre o solo e o reforço (os contatos são pontuais), o efeito do embricamento se sobressai sobre o confinamento. O autor verificou que para uma mesma tensão confinante a rigidez secante do geotêxtil confinado por areia é superior à do geotêxtil confinado por brita. No caso de geotêxteis confinados por materiais mais grossos, como brita, a rigidez da manta geotêxtil provavelmente é mais alterada devido aos danos causados pela concentração de tensões nos

pontos de contato do que pelo próprio confinamento. Um estudo detalhado a respeito deste assunto pode ser encontrado em Azambuja (1994 e 1999).

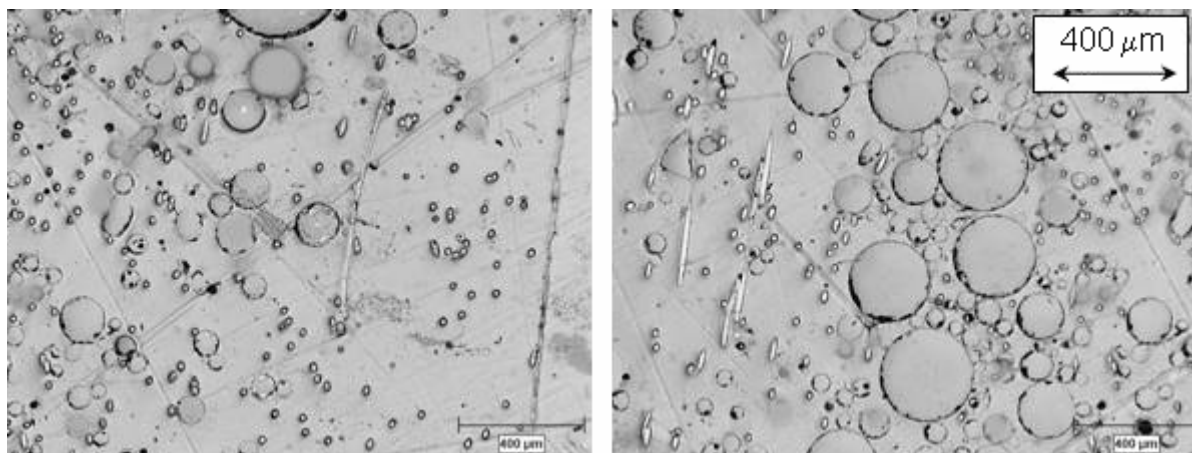
Se por um lado os solos grossos reduzem o efeito do confinamento sobre a rigidez de geotêxteis não tecidos, os solos finos podem colaborar para o incremento de rigidez à tração destes materiais devido a efeitos da impregnação. Tupa (1994) e Palmeira et al. (1996) verificaram maiores incrementos de rigidez em geotêxteis confinados por siltes do que pelos confinados por areias e relacionaram esse comportamento a uma possível impregnação dos grãos de silte nos vazios da manta têxtil durante a preparação da amostra de solo.

No confinamento promovido por materiais arenosos graúdos (materiais frequentemente utilizado em taludes íngremes e estruturas de contenção de solo reforçado, devido às suas propriedades drenantes) o efeito mais relevante no incremento de rigidez à tração do geotêxtil é a própria tensão confinante. Os efeitos de embricamento e impregnação são irrelevantes neste caso, como comprovam várias pesquisas. Siel et al. (1987) utilizaram duas areias de granulometrias diferentes como materiais confinantes em ensaios de tração confinada de geotêxtil não tecidos e verificaram que não houve diferença significativa dos valores de rigidez das amostras para os dois solos utilizados. Ling et al. (1992) verificaram que o comportamento de geotêxteis confinados por areia e por membrana foi similar, concluindo que a utilização de membranas no confinamento em ensaios de tração confinada é suficiente para a avaliação do comportamento carga-alongamento dos geotêxteis. Martins (2000a) também constatou a pouca influência do material confinante no comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos. Os resultados de ensaios de tração confinada utilizando areia em contato direto com o geotêxtil foram similares aos resultados com a interface de contato areia-geotêxtil protegida por duas membranas lubrificadas.

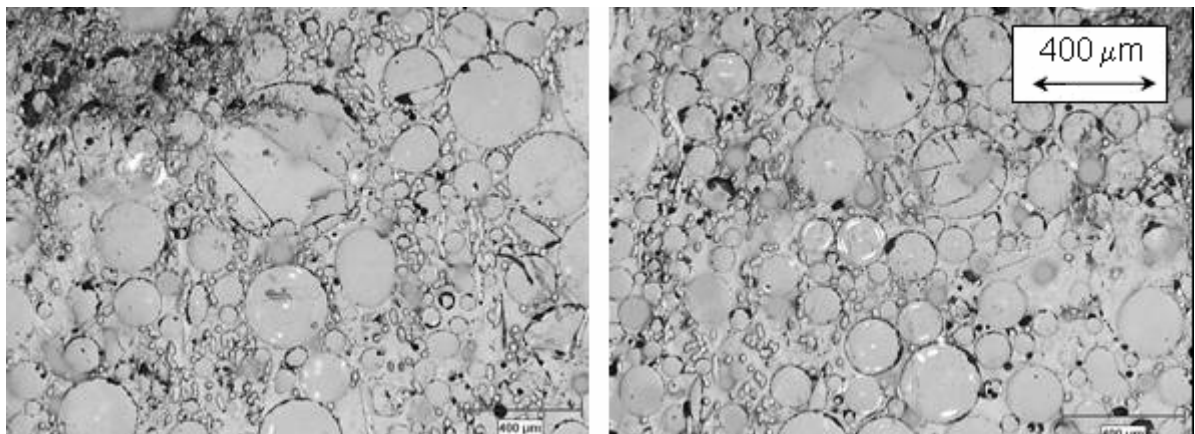
2.5.5. INFLUÊNCIA DA IMPREGNAÇÃO

Durante o lançamento e/ou a compactação do solo do aterro sobre o reforço geotêxtil, algumas partículas podem penetrar entre os filamentos da manta, ocupando parte de seus vazios. Estes grãos intrusos entre os filamentos funcionam como mais um tipo de obstáculo para filamentos na tentativa de estiramento durante a solicitação de tração. Como discutido anteriormente, no item a respeito da influência da tensão confinante na rigidez à tração de geotêxteis, a redução dos vazios entre os filamentos é um dos fatores determinantes na restrição de deslocamento relativo entre eles contribuindo para o incremento de rigidez à tração da manta geotêxtil.

O grau de impregnação de um geotêxtil, λ , é definido como a relação entre a massa de grãos impregnados e a massa de filamentos que compõem a manta. Certos graus e impregnação reduzem de forma significativa os vazios da manta geotêxtil e não é difícil constatar que, desta forma, a movimentação dos filamentos é dificultada, especialmente quando os altos graus de impregnação estão combinados com o confinamento do reforço. A Figura 2.15 ilustra o que foi discutido por meio de seções transversais de geotêxteis não tecidos agulhados de gramatura igual a 200 g/m^2 impregnados com microesferas de vidro sob tensões confinantes diferentes.



(a) Tensão confinante de 2 kPa



(b) Tensão confinante de 1000 kPa

Figura 2.15 - Seção transversal de geotêxteis impregnados ($\lambda = 8$) submetidos a tensões confinantes diferentes (Gardoni e Palmeira, 2002).

Como as pesquisas de comportamento carga-alongamento de geotêxteis submetidos a tração confinada são relativamente recentes, ainda não foram registradas pesquisas que

estudassem o efeito da impregnação nos parâmetros de resistência e rigidez à tração de geotêxteis. No entanto, Costa e Bueno (2000) deram o primeiro passo no sentido de estudar os efeitos da impregnação na *fluência* confinada destes materiais, despertando o interesse pela verificação da influência da impregnação na rigidez confinada.

No procedimento descrito por Costa e Bueno (2000), amostras de geotêxtil não tecido foram impregnadas por meio de dois processos distintos, ambos utilizando um mesmo solo argiloso. No primeiro processo, uma camada do solo argiloso era compactada sobre a amostra geotêxtil buscando-se atingir as condições de umidade ótima e peso específico seco máximo. Após este procedimento o corpo de prova era cuidadosamente retirado e submetido ao ensaio de fluência, confinado apenas com a membrana de borracha. O segundo processo consistia na preparação de uma lama (a partir do mesmo solo argiloso) que era despejada sobre as duas faces da amostra geotêxtil até que fosse atingido um nível de impregnação satisfatório, segundo critérios visuais e subjetivos. Após a secagem da lama sobre a amostra, esta era submetida ao ensaio de fluência confinada com membranas nas interfaces de confinamento (Costa e Bueno, 2000).

Os resultados mostraram que amostras impregnadas por meio do segundo processo de preparação apresentaram reduções nas deformações imediatas, mas não foram verificadas alterações significativas de comportamento do geotêxtil ao longo do tempo. Com relação ao primeiro processo de impregnação, tanto as inspeções visuais quanto os resultados dos ensaios de fluência confinada mostraram que a impregnação de solo na manta foi desprezível. Para uma melhor interpretação destes resultados, no entanto, seria útil relacionar as reduções nas deformações iniciais com os graus de impregnação obtidos nos dois processos.

A redução das deformações iniciais e totais devido à impregnação de lama verificada nos resultados de Costa e Bueno (2000) é um indicativo de que em ensaios de tração confinada, a impregnação seria capaz de promover um incremento de rigidez ao geotêxtil não tecido.

2.5.6. INFLUÊNCIA DOS DANOS MECÂNICOS

Segundo Matheus (2002), os danos mecânicos podem ser definidos como todo tipo de alteração que o geossintético sofre devido a esforços de instalação, manuseio, compactação do solo subjacente e outros esforços ocorridos durante a fase de serviço. As conseqüências do dano nos parâmetros de resistência dos geotêxteis não tecidos vão além da perda de seção de polímero: a maior repercussão do dano está relacionada à perda da continuidade dos

filamentos, resultando em uma desestruturação da manta na região que circunda a lesão (Azambuja, 1994).

A maioria das pesquisas já desenvolvidas na tentativa de quantificar valores plausíveis para fator de dano mecânico, avalia a perda de resistência por meio de ensaios de tração não confinados (na maioria das vezes empregando ensaios de tração de faixa larga). No entanto, de acordo com Azambuja (1994 e 1999), se a repercussão do dano está associada à reorganização de filamentos que perderam a continuidade em decorrência de uma lesão, então os efeitos do confinamento e embricamento podem exercer influência nas propriedades mecânicas remanescentes de amostras danificadas.

Matheus (2002) estudou a influência de danos mecânicos *induzidos* (furos, rasgos horizontais e rasgos em “Y”) no comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos submetidos a ensaios de tração confinada e não confinada. Em ensaios de tração simples (não confinada) com geotêxteis danificados o autor verificou que as quedas na resistência e rigidez à tração são mais afetadas pela dimensão do que pelas formas dos danos, enquanto que os resultados dos ensaios de tração confinada mostram que a forma, orientação e a dimensão do dano afetaram a relação carga-alongamento do geotêxtil. Comparando-se as perdas de rigidez observadas em ensaios de tração simples e confinada, os resultados comprovam que o confinamento da amostra geotêxtil reduz os prejuízos causados pelos danos mecânicos, indicando que a tensão confinante contribui para melhorar as propriedades remanescentes dos geotêxteis danificados.

Apesar de o confinamento prover a melhoria das propriedades remanescentes dos geotêxteis danificados, é importante destacar que muitos destes danos ocorrem, justamente, durante o processo de compactação do aterro responsável pelo confinamento do reforço. Azambuja (1994 e 1999) verificou a influência da energia de compactação na resistência à tração do geotêxtil não tecido de poliéster por meio de ensaios de tração confinada utilizando brita nº 2 na interface de confinamento em três energias de compactação diferentes. O autor observou que geotêxteis confinados com a brita compactada com baixa e elevada energias de compactação apresentaram resistências semelhantes, enquanto que o geotêxtil confinado com brita submetida a um nível médio de energia de compactação apresentou resistências maiores.

Segundo o autor, a baixa resistência à tração verificada nas amostras confinadas em brita compactada com nível elevado de energia justifica-se pela maior severidade dos danos provocados durante a compactação do solo sobre o geotêxtil. No caso dos geotêxteis confinados em brita compactada com baixa energia, sua baixa resistência à tração não se deveu a essa natureza de dano, mas sim ao menor embricamento do conjunto, que permitiu

certo deslocamento relativo entre o geotêxtil e o material de enchimento, gerando a propagação de pequenos rasgos e crescimento de outras lesões em decorrência da concentração de tensões. Mesmo assim, o autor constatou que a rigidez dos geotêxteis aumenta substancialmente com a tensão confinante (carga estática), qualquer que seja a energia de compactação aplicada no material confinante.

A comparação dos diversos resultados de ensaios de tração confinada encontrados na literatura e descritos sumariamente nos itens anteriores, permitiu a enumeração dos fatores mais relevantes na modificação dos valores de rigidez à tração dos geotêxteis:

- Tipo de geotêxtil: O potencial do confinamento no incremento de rigidez à tração de geotêxteis não tecidos agulhados é maior do que para os não tecidos termoligados e desprezível em geotêxteis tecidos e outros geossintéticos comumente utilizados em reforço de solos;
- Gramatura: Quanto maior a gramatura do geotêxtil, maior é sua rigidez à tração sob confinamento (em termos de valores absolutos) e quanto menor a gramatura, maior o potencial do confinamento no incremento de rigidez à tração (em termos de percentual de aumento);
- Tensão confinante: A rigidez à tração dos geotêxteis não tecidos é diretamente proporcional à tensão confinante aplicada;
- Material confinante: Quanto menor a dimensão dos grãos do solo confinante (no caso de materiais não coesivos), maiores são os incrementos de rigidez observados em geotêxteis não tecidos, provavelmente devido à interpenetração de grãos na manta, provocando certa impregnação (Tupa, 1994);
- Formato dos grãos: A angularidade dos grãos tende a intensificar os efeitos de bloqueio e travamento em geotêxteis não tecidos (Gomes, 1993b), aumentando a influência do confinamento na rigidez à tração do reforço;
- Danos mecânicos: Os danos mecânicos reduzem os valores de rigidez à tração de geotêxteis não tecidos, mas o confinamento atua nas propriedades remanescentes da manta reduzindo as perdas de rigidez devidas aos danos;
- Energia de compactação: A energia de compactação do solo influencia a danificação e propagação dos danos: altas energias de compactação de aterros com solos grossos (brita) provocam danos e baixas energias de compactação reduzem o intertravamento do material confinante, favorecendo a propagação de danos (Azambuja, 1994).

Dentre estes fatores, a presente pesquisa apresenta outros estudos envolvendo ensaios de tração confinada para a verificação da influência da gramatura, tensão confinante, material confinante, impregnação e danos mecânicos, no comportamento mecânico de geotêxteis não tecidos agulhados submetido a solicitações de tração sob confinamento.