

### **3. EQUIPAMENTO E MATERIAIS**

Neste capítulo estão descritos o equipamento utilizado para os ensaios de tração confinada e também os materiais utilizados nestes ensaios: geotêxteis não tecidos, materiais confinantes e solos granulares para impregnação.

#### **3.1. EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO CONFINADA**

O equipamento utilizado nos ensaios de tração confinada foi projetado por Palmeira (1998) e construído na oficina de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Foi utilizado na pesquisa de dissertação de mestrado de Martins (2000a), que avaliou o comportamento carga-alongamento de geotêxteis usados em obras reais, simulando as condições destas obras (materiais empregados e solicitações), e na tese de doutorado de Matheus (2002) que avaliou os efeitos dos danos mecânicos induzidos no comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos submetidos a ensaios de tração confinada. Gomes (1993a) e Tupa (1994) também fizeram estudos a respeito do comportamento carga-alongamento de geotêxteis submetidos ao confinamento com uma versão mais antiga deste equipamento (Palmeira, 1990), cuja descrição detalhada pode ser encontrada em Gomes (1993a). A principal inovação que o equipamento atual apresenta com relação ao anterior consiste na compatibilidade de deformações do geotêxtil e solo confinante, promovida pela movimentação das faces da célula de confinamento, restringindo o deslocamento relativo entre ambos. O equipamento antigo tracionava o geotêxtil confinado, já o atual provoca a movimentação da face da célula, junto com a amostra geotêxtil (Figura 2.11). De acordo com Wu (1991), a movimentação relativa entre o solo confinante e o geotêxtil mobiliza forças de atrito e adesão na interface. Sendo assim, o comportamento carga-alongamento não resulta apenas da ação do confinamento, mas também das forças de atrito e adesão, dificultando a interpretação dos resultados visto que a amostra geotêxtil fica submetida a cargas de tração diferentes ao longo de seu comprimento, inferiores àquela aplicada. Portanto, a inovação que o equipamento atual apresenta com relação ao anterior é muito importante na verificação do comportamento carga-alongamento do geotêxtil submetido à tração confinada.

A Figura 3.1 apresenta esquematicamente o equipamento de ensaios de tração confinada usado na pesquisa. Este é constituído de uma célula de tração confinada, sistema de garras, bolsa de borracha, sistema de tração e instrumentação (Figura 3.2), que serão descritos em seguida.

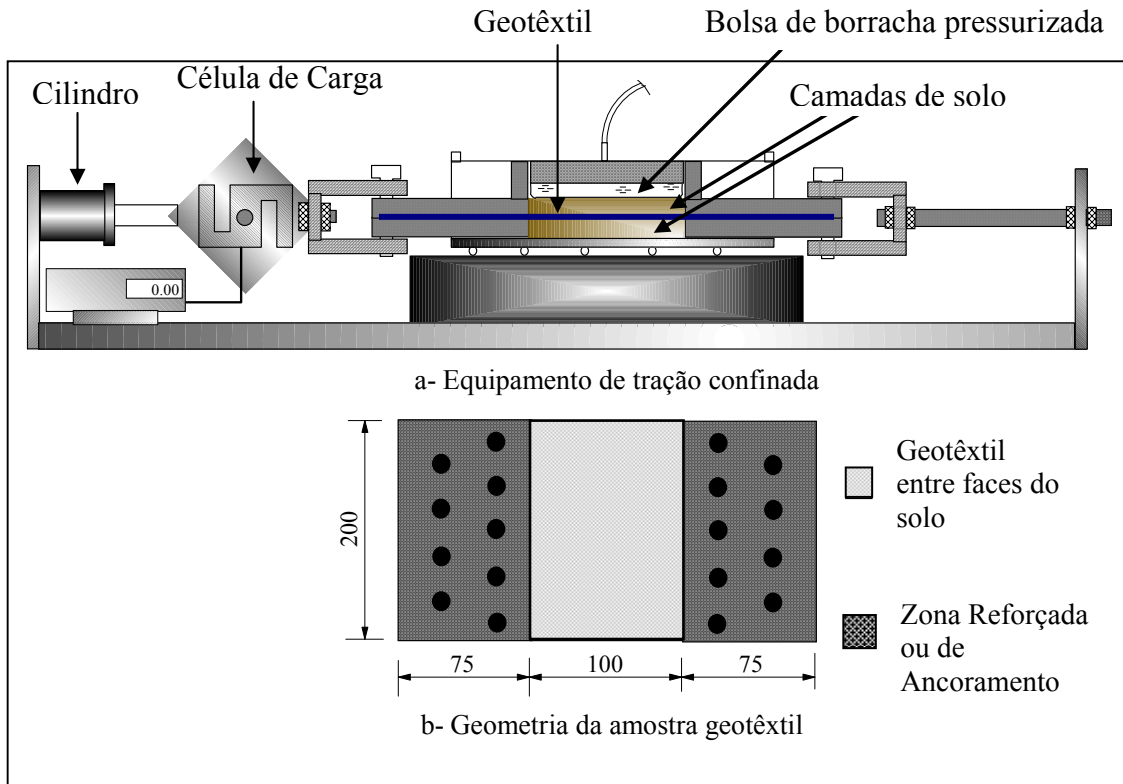


Figura 3.1- Desenho esquemático do equipamento com detalhe geométrico da amostra geotêxtil (Martins, 2000a).

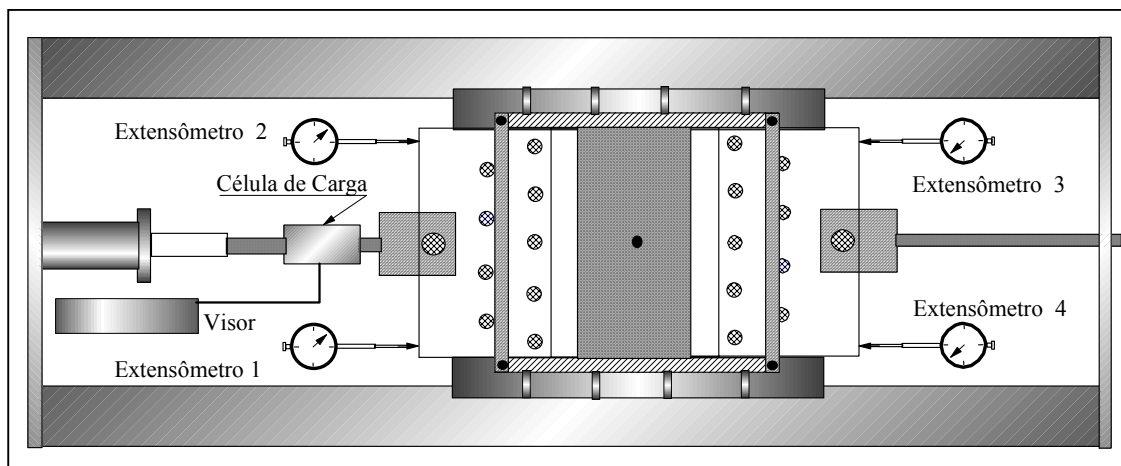


Figura 3.2 – Vista em planta mostrando o posicionamento dos extensômetros e célula de carga (Martins, 2000a).

A célula de tração confinada consiste em uma caixa metálica com 200 mm de largura, 220 mm de comprimento e 60 mm de altura, com aberturas laterais, por onde ocorre a movimentação do sistema de garras, como mostra a Figura 3.3. Esta caixa é apoiada em três roletes de 1,5 mm de diâmetro por 150 mm de comprimento que permitem a minimização do efeito do atrito entre a célula e o bloco rígido onde está apoiada, o que poderia provocar um aumento nas leituras das forças de tração pela célula de carga, que não corresponderiam à carga na amostra de geotêxtil.

As garras de cada extremo, móvel e fixo, são compostas por um sistema bipartido, com ambas as partes internas recartilhadas, e dois conjuntos de perfurações, num total de vinte furos. Desses vinte, o conjunto de dezoito furos permite a fixação da amostra de geotêxtil a ser ensaiada às garras. Outros dois furos, localizados nas extremidades das garras móvel e fixa, permitem a fixação destas ao sistema de tração.



Figura 3.3 – Célula de tração confinada e conjunto de garras recartilhadas (Matheus, 2002).

Para simular o confinamento do geotêxtil pelo solo aplica-se uma tensão normal sobre a camada superior de solo da célula. A tensão de confinamento é aplicada por meio de uma bolsa de borracha pressurizada por ar comprimido. Esta reage contra um sistema de reação que consiste em duas vigas metálicas ligadas entre si por duas barras rosqueadas. As pressões na bolsa de borracha são medidas por um sistema de manômetros e ajustadas por meio de válvulas reguladoras especiais.

O sistema de tração é composto por um circuito de dois cilindros hidráulicos de dupla ação, com capacidade de 100 kN e curso máximo de 50 mm, uma prensa convencional para

ensaios triaxiais, uma bomba hidráulica e três mangueiras hidráulicas interligando a bomba e os dois cilindros. O primeiro cilindro é posicionado na prensa e o segundo na parede interna do conjunto de tração confinada. A ligação entre os cilindros é feita por meio das mangueiras hidráulicas possibilitando que a compressão do primeiro cilindro pela prensa provoque o tracionamento do segundo com velocidade constante (2% de deformação por minuto) controlada pelo sistema de engrenagens da prensa. Esta ligação entre as mangueiras permite a livre movimentação dos êmbolos dos cilindros hidráulicos durante o ensaio além de possibilitar que os êmbolos retornem à posição inicial sem qualquer alteração nas ligações das mangueiras hidráulicas. O registro de saída de óleo da bomba permite que o sistema de garras seja travado, durante a preparação do ensaio, ou liberado, para iniciar o ensaio. A Figura 3.4 mostra uma vista geral do sistema de tração.



Figura 3.4 - Mecanismo de tração por meio de conjunto de cilindros hidráulicos – vista geral da interligação dos cilindros e bomba (Matheus, 2002).

O ensaio de tração confinada é instrumentado com o intuito de verificar a carga de tração no geotêxtil e os deslocamentos nas extremidades das garras móvel e fixa, dados necessários para obtenção das duas curvas relevantes: carga x alongamento e rigidez secante x alongamento. O procedimento de cálculo para a determinação destas curvas está apresentado no item 4.2. As forças de tração são medidas por meio de uma célula de carga fabricada pela KRATOS, de leitura automática, com capacidade máxima de 20 kN e precisão de 5 N. Os deslocamentos horizontais em cada extremidade das garras móvel e fixa são medidos por meio de quatro extensômetros de 0,01 mm/div e curso máximo de 50 mm, como mostra a Figura 3.5. A Figura 3.6 apresenta uma vista geral do equipamento montado, pronto para o ensaio, com todos os componentes descritos anteriormente: célula de tração confinada, sistema de garras, bolsa de borracha e seu sistema de reação, sistema de tração e instrumentação.

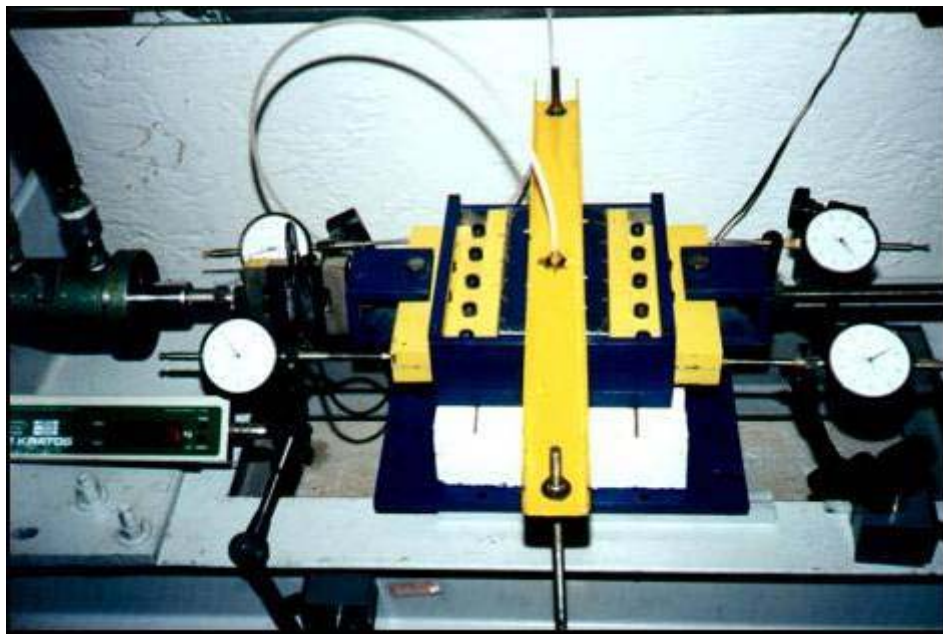


Figura 3.5 – Detalhe da instrumentação do equipamento de tração confinada (Martins,2000a).



Figura 3.6 – Vista geral do equipamento montado (Matheus, 2002).

## 3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1. GEOTÊXTEIS

A escolha do tipo de geotêxtil a ser ensaiado foi baseada na pesquisa de Gomes (1993a), que estudou a influência do confinamento no comportamento carga-alongamento de geotêxteis tecidos e não tecidos. Ele verificou que em geotêxteis tecidos o comportamento à tração é governado preferencialmente pelas propriedades resistentes dos filamentos que compõem a manta, sendo função, portanto, da natureza do polímero-base e da tecnologia de fabricação, entre outros fatores. O efeito do confinamento no desempenho à rigidez deste tipo de reforço é menos relevante do que nos reforços de geotêxtil não tecido, onde ocorre a interpenetração de partículas de solo no domínio da manta dificultando a movimentação dos filamentos e, assim, aumentando a rigidez da manta sob confinamento. De acordo com Ling et al. (1992), o efeito do confinamento também é influenciado pelo processo de ligação dos filamentos dos geotêxteis não tecidos: em geotêxteis termoligados o confinamento não é tão significativo quanto nos agulhados e ligados por rotação.

Os geotêxteis utilizados foram, portanto, do tipo não tecido agulhado de filamentos contínuos, 100% poliéster saturado, dispostos multidirecionalmente em forma de manta. O material é da marca Bidim e foi fornecido pela BIDIM - BBA. Foram estudados geotêxteis com três gramaturas, conhecidos como OP 20, OP 40 e OP 60, cujas informações fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características dos geotêxteis utilizados (Dados do fabricante).

<b>Geo-têxtil</b>	<b>Nomen-clatura</b>	<b><math>\mu</math> (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>t_{GT}</math> (mm)</b>	<b>Resistência a Tração Faixa Larga (kN/m)</b>	<b>Alongamento na Ruptura (%)</b>	<b><math>J_{sec2\%}</math> (kN/m)</b>
<b>GA</b>	OP 20	200	2,9	15	32	35*
<b>GB</b>	OP 40	400	3,8	29	33	51*
<b>GC</b>	OP 60	600	5,9	38	41	69*

$\mu$  = gramatura;  $t_{GT}$  = espessura do geotêxtil;  $J_{sec2\%}$  = Rigidez secante a 2% de deformação.

\* Valores determinados por meio de ensaios de tração em faixa larga (Nascimento, 2006).

Recentemente o fabricante destes materiais modificou a nomenclatura comercial dos geotêxteis, classificando-os de acordo com a sua resistência à tração. No entanto, a utilização da nomenclatura anterior (baseada na gramatura dos geotêxteis) se justifica por dois aspectos: os geotêxteis utilizados na pesquisa foram adquiridos antes da modificação da nomenclatura, e considerou-se mais prudente manter a nomenclatura antiga dada pelo fabricante para evitar erros numa tentativa de correlacionar as propriedades dos materiais fabricados antes e depois da modificação da classificação; outro aspecto que favorecia a utilização da nomenclatura antiga é a facilidade de comparação dos resultados obtidos na presente pesquisa com os obtidos em pesquisas anteriores.

Os geotêxteis utilizados foram ensaiados em três condições diferentes: virgem, impregnados e com danos mecânicos induzidos. A Tabela 3.2 mostra em quais condições cada tipo de geotêxtil foi ensaiado.

Tabela 3.2 - Condições em que cada tipo de geotêxtil foi ensaiado.

	<b>Virgem</b>	<b>Impregnado</b>	<b>Dano mecânico induzido</b>
<b>GA</b>	X	X	X
<b>GB</b>	X	X	
<b>GC</b>	X		X

Os geotêxteis virgens foram úteis na verificação da influência de parâmetros como a gramatura, a tensão confinante e a interface de confinamento (solo confinante). A gramatura, relação entre a massa e a área do geotêxtil, é um parâmetro intimamente relacionado à quantidade de filamentos e à densidade do geotêxtil. À medida que aumenta a gramatura, aumenta o número de filamentos que devem se reorganizar durante a solicitação de tração, aumentando também a rigidez do geotêxtil. Gomes (1993a) e Matheus (2002) comprovaram a importância da gramatura no comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos, como discutido no item 2.5.2.

A tensão de confinamento promove a aproximação dos filamentos da manta, criando uma estrutura mais densa e dificultando a movimentação destes quando tracionados. O solo confinante também influencia a rigidez do geotêxtil submetido à tração confinada uma vez que, dependendo da sua granulometria, ocorre a interpenetração de grãos nos vazios da manta, dificultando o estiramento dos filamentos quando tracionados. A influência destes fatores no comportamento mecânico de geotêxteis não tecidos submetidos à tração sob confinamento foram discutidos mais detalhadamente nos itens 2.5.3 e 2.5.4.

A impregnação da manta geotêxtil causada durante o processo construtivo de estruturas de solos reforçados é um fator que pode influenciar a rigidez à tração de geotêxteis não tecidos, visto que os grãos de solo intrusos nos vazios da manta se tornam obstáculos para a movimentação dos filamentos quando solicitados à tração. O item 2.5.5 apresenta uma discussão a respeito do efeito do grau de impregnação nos valores de rigidez de geotêxteis não tecidos submetidos a solicitações de tração sob confinamento. Para verificar o efeito da impregnação do geotêxtil no seu comportamento carga-alongamento, algumas amostras foram impregnadas manualmente com material granular até atingir certo grau de impregnação preestabelecido, possibilitando o estudo da influência deste parâmetro na rigidez dos geotêxteis não tecidos submetidos à tração confinada. O controle do grau de impregnação preestabelecido foi feito por meio da pesagem das amostras geotêxteis antes e depois da impregnação, procedimento descrito no item 4.1.1.2.

Sendo a rigidez à tração do geotêxtil não tecido um parâmetro intimamente ligado à reorganização dos filamentos da manta, qualquer dano mecânico pode influenciar o comportamento carga-alongamento destes materiais, visto que a perda de seção de polímero e a perda de continuidade dos filamentos provocam uma desestruturação da manta, facilitando o deslocamento dos filamentos (Azambuja, 1994), como discutido no item 2.5.6. Neste contexto torna-se importante verificar o comportamento carga-alongamento de amostras com danos mecânicos induzidos, simulando danos que possam ocorrer em obras reais.



### 3.2.2. MATERIAIS CONFINANTES

Uma das finalidades dos ensaios com geotêxteis virgens, como mencionado no item anterior, era a verificação da influência do material confinante na rigidez à tração destes geotêxteis. Para este estudo foram selecionados três materiais para serem usados na interface de confinamento de amostras virgens: areia grossa Leighton Buzzard 14/25, uma areia fina a média proveniente do Rio Corumbá e blocos de madeira com superfície plana e lisa (para minimizar o atrito entre geotêxtil e interface de confinamento). A utilização das duas areias, de granulometrias diferentes, foi feita com o intuito de verificar a influência do embricamento e da intrusão de grãos nos vazios da manta na rigidez à tração dos geotêxteis. Os ensaios utilizando blocos de madeira nas interfaces com o geotêxtil permitem o estudo da influência da tensão confinante na rigidez à tração dos geotêxteis, livre destes efeitos de impregnação e embricamento.

O confinamento das amostras impregnadas manualmente foi promovido por blocos de madeira com o intuito de eliminar os efeitos de embricamento da interface de confinamento. Além disso, com esta interface de confinamento, elimina-se a impregnação adicional que ocorreria durante a preparação da amostra de solo de interface.

Nos ensaios com geotêxteis com danos mecânicos induzidos utilizou-se como material confinante uma areia grossa usada em filtros da CAESB (Companhia de Águas e Esgoto de Brasília), mesmo material empregado por Matheus (2002) em seus ensaios de tração confinada com geotêxteis danificados, usando o mesmo equipamento utilizado na presente pesquisa. A utilização da mesma areia permitiu a complementação dos resultados das duas pesquisas.

Na Tabela 3.3 estão sumariadas as interfaces usadas para cada tipo de ensaio e os itens seguintes apresentam as descrições de cada tipo de material confinante.

Tabela 3.3 – Interface de confinamento para cada tipo de ensaio.

	<b>Virgem</b>	<b>Impregnado</b>	<b>Dano Mecânico Induzido</b>
<b>Areia Leighton Buzzard 14/25 (ALB)</b>	X		
<b>Areia Rio Corumbá (ARC)</b>	X		
<b>Areia CAESB</b>			X
<b>Bloco de Madeira (Mad)</b>	X	X	

### 3.2.2.1. AREIA LEIGHTON BUZZARD 14/25

Um dos materiais usados na interface dos geotêxteis virgens ensaiados foi a areia Leighton Buzzard 14/25. Esta é uma areia grossa muito uniforme, segundo a NBR 6502 (1995) cujos grãos apresentam formato sub-arredondado (como se observa na Figura 3.8) com diâmetro variando de 0,6 a 1,18mm e índices de vazios máximo e mínimo iguais a 0,49 e 0,79, respectivamente (Palmeira, 1987). As características desta areia estão sumariadas na Tabela 3.4 e sua curva granulométrica está apresentada na Figura 3.7.

Tabela 3.4 – Características da Areia Leighton Buzzard 14/25 (Palmeira, 1987).

Descrição do material	ALB - Areia Leighton Buzzard 14/25
$G_s$ - Peso específico dos grãos	2,66
Peso específico máximo - $\gamma_{max}$ ( $kN/m^3$ )	17,85
Peso específico mínimo - $\gamma_{min}$ ( $kN/m^3$ )	14,86
Índice de vazios máximo - $e_{max}$	0,79
Índice de vazios mínimo - $e_{min}$	0,49
Intervalo de tamanho dos grãos (mm)	0,6 – 1,18
Diâmetro médio dos grãos - $D_{50}$ (mm)	0,8
Coefficiente de não-uniformidade - $C_u$	1,3

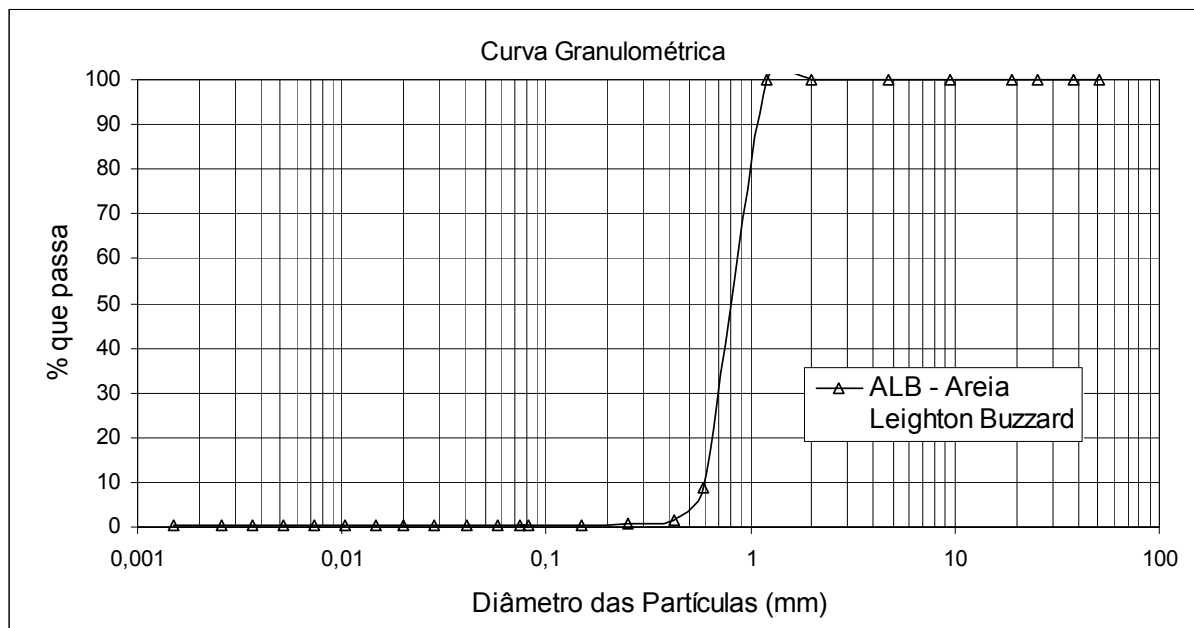


Figura 3.7 – Curva granulométrica da Areia Leighton Buzzard 14/25.

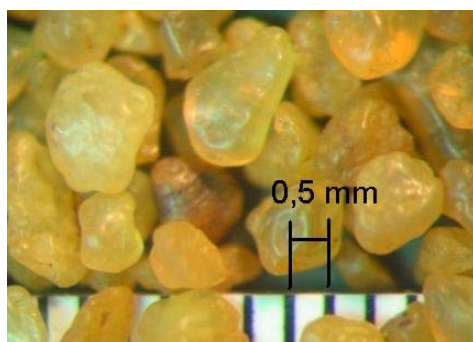


Figura 3.8 - Formato dos grãos da Areia Leighton Buzzard 14/25.

### 3.2.2.2. AREIA DO RIO CORUMBÁ

A areia do rio Corumbá, é um material usado, geralmente, para reboco na construção civil. Nos ensaios de tração confinada foi utilizada apenas a fração do material passante na peneira #40 (abertura de 0,42 mm). Este material é composto basicamente de quartzo sub arredondado, minerais máficos (o que explica o peso específico dos grãos ser ligeiramente maior que o peso específico do quartzo) e muscovita, prevalecendo o formato sub-angular dos grãos, como se verifica na Figura 3.10. Conforme a NBR 6502 (1995), é uma areia fina a média com granulometria uniforme. Sua curva granulométrica, apresentada na Figura 3.9, foi obtida por meio do granulômetro a laser disponível no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, modelo Mastersizer S. Standard Bench, produzido pela Malvern Instruments Ltda; na Inglaterra. Mais informações a respeito do equipamento podem ser encontradas em Manso (1999) e Prado et al. (2003) e o estudo detalhado do seu funcionamento pode ser obtido em seu manual: Malvern Instruments (1997).

Tabela 3.5 - Características da Areia Fina a Média do Rio Corumbá.

Descrição do material	ARC – Areia fina a média do Rio Corumbá
$G_s$ – Peso específico dos grãos	2,68
Peso específico máximo - $\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,03
Peso específico mínimo - $\gamma_{min}$ (kN/m <sup>3</sup> )	12,47
Índice de vazios máximo – $e_{max}$	1,15
Índice de vazios mínimo - $e_{min}$	0,91
Intervalo de tamanho dos grãos (mm)	0,06 – 0,42
Diâmetro médio dos grãos - $D_{50}$ (mm)	0,20
Coefficiente de não-uniformidade - $C_u$	4,1

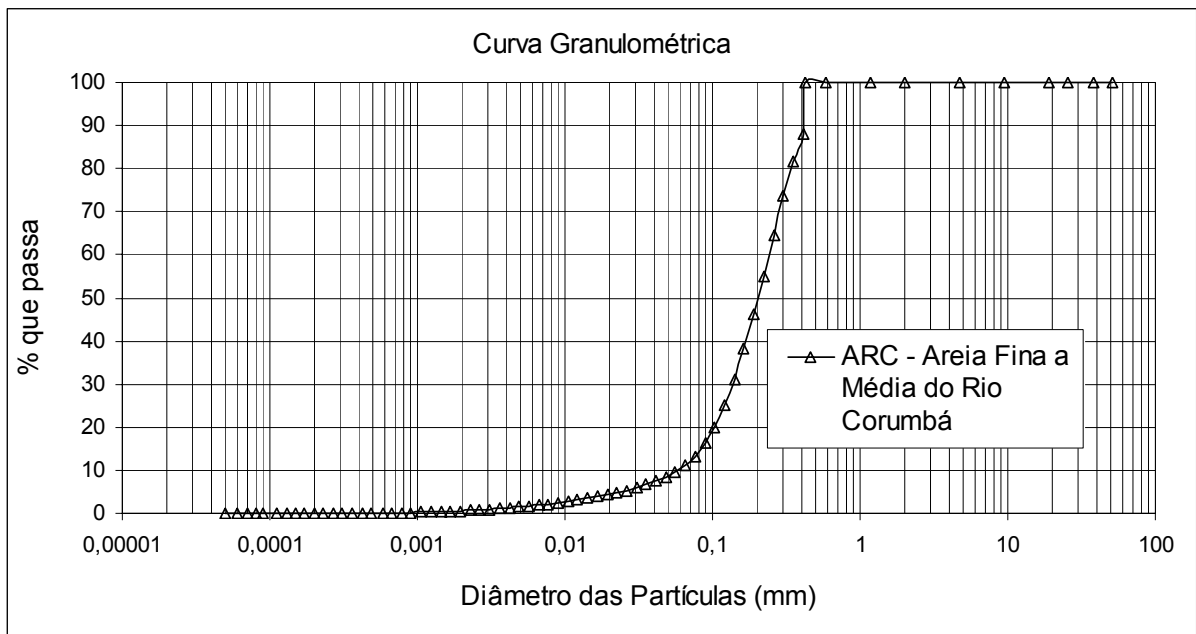


Figura 3.9 - Curva granulométrica da Areia Fina a Média do Rio Corumbá.

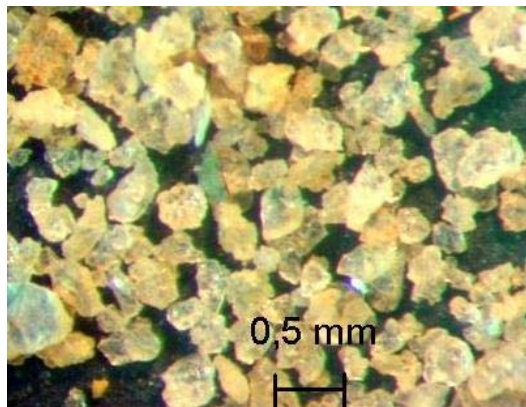


Figura 3.10 - Formato dos grãos da Areia Fina a Média do Rio Corumbá.

### 3.2.2.3. AREIA CAESB

O material intitulado “Areia CAESB” é uma areia grossa, limpa e uniforme, segundo classificação das areias NBR 6502 (1995), utilizada em filtros da Companhia de Águas e Esgoto de Brasília, CAESB. A Tabela 3.6 apresenta as características dessa areia e a Figura 3.11 apresenta a curva granulométrica da mesma. Os grãos desta areia apresentam formato sub-arredondado, como se verifica na Figura 3.12.

Tabela 3.6 - Características da Areia CAESB.

Descrição do material	A.CAESB – Areia grossa amarela para filtros
$G_s$ - Peso específico dos grãos	2,58
Peso específico máximo - $\gamma_{max}$ ( $kN/m^3$ )	15,82
Peso específico mínimo - $\gamma_{min}$ ( $kN/m^3$ )	13,87
Índice de vazios máximo - $e_{max}$	0,86
Índice de vazios mínimo - $e_{min}$	0,66
Intervalo de tamanho dos grãos (mm)	0,6 – 2,0
Diâmetro médio dos grãos - $D_{50}$ (mm)	1,14
Coefficiente de não-uniformidade - $C_u$	1,4

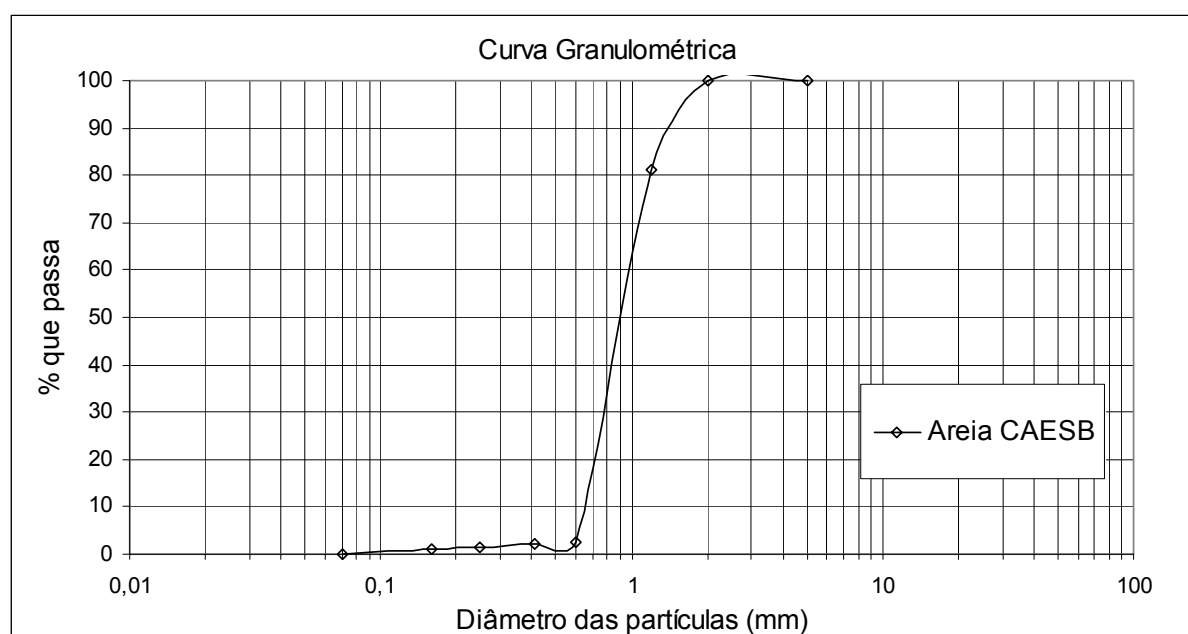


Figura 3.11 - Curva granulométrica da Areia CAESB.

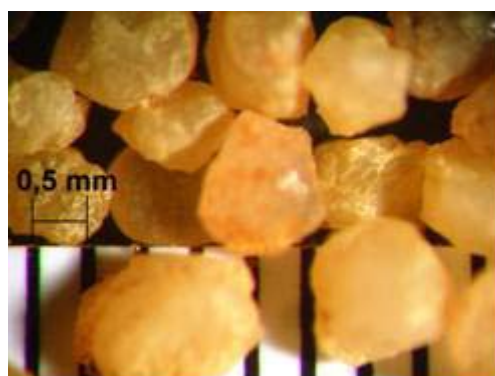


Figura 3.12 - Formato dos grãos da Areia CAESB.

A sobreposição das curvas granulométricas dos materiais granulares utilizados para promover o confinamento das amostras geotêxteis estão apresentadas no Apêndice A, facilitando a comparação da granulometria dos três diferentes materiais confinamento: areia Leighton Buzzard, areia do Rio Corumbá e areia de filtro da CAESB.

#### **3.2.2.4. BLOCOS DE MADEIRA**

Nos ensaios com amostras de geotêxtil impregnadas, o confinamento foi promovido por dois blocos de madeira nas interfaces inferior e superior da amostra geotêxtil, com o intuito de manter fixo o valor do grau de impregnação (razão entre a massa de solo impregnado e a massa dos filamentos), e minimizar a influência do embricamento no comportamento das amostras. Os blocos de madeira foram usados como interface de confinamento também em amostras virgens dos geotêxteis GA e GB servindo de comparação para os ensaios com geotêxteis impregnados e para geotêxteis confinados em outros materiais (ALB e ARC).

Os dois blocos de madeira, com 10 cm de comprimento, 20 cm de largura e 2 cm de espessura (mesmas dimensões das amostras de solo), eram colocados sob e sobre a amostra de geotêxtil sendo o contato geotêxtil-bloco de madeira protegido por duas camadas de filme plástico com uma camada de vaselina entre elas, para reduzir o atrito na interface de contato entre os dois materiais.

#### **3.2.3. MATERIAIS GRANULARES PARA IMPREGNAÇÃO**

Os materiais selecionados para promover a impregnação dos geotêxteis nos ensaios com amostras impregnadas foram microesferas de vidro e uma fração da areia do rio Corumbá, ambas com o tamanho dos grãos variando de 0,044 a 0,088 mm de forma que os dois materiais apresentam curvas granulométricas semelhantes (Apêndice A). A seleção destes dois materiais foi feita visando verificar se, além do grau de impregnação, o formato e textura dos grãos intrusos no geotêxtil também podem influenciar o comportamento à rigidez dos geotêxteis visto que, intuitivamente, os filamentos da manta encontram mais dificuldade em transpor uma partícula irregular e áspera do que uma partícula esférica e lisa.

### 3.2.3.1. MICROESFERAS DE VIDRO

O primeiro material utilizado na impregnação das amostras de geotêxtil foram microesferas de vidro fabricadas pela Potter Industrial Ltda., conforme a NBR 6831 (2001), com o tamanho dos grãos variando de 0,044 a 0,088 mm e granulometria muito uniforme, como se observa na Figura 3.13. Outras características relativas a este material estão resumidas na Tabela 3.7. As partículas das microesferas de vidro têm formato muito arredondado e textura lisa, como se observa na Figura 3.14.

Tabela 3.7 - Características das microesferas de vidro usadas na impregnação.

Descrição do material	EV - Microesferas de vidro - 0,044 a 0,088 mm
$G_s$ - Peso específico dos grãos	2,44
Intervalo de tamanho dos grãos (mm)	0,044 – 0,088
Diâmetro médio dos grãos - $D_{50}$ (mm)	0,0577
Coefficiente de não-uniformidade - $C_u$	1,43

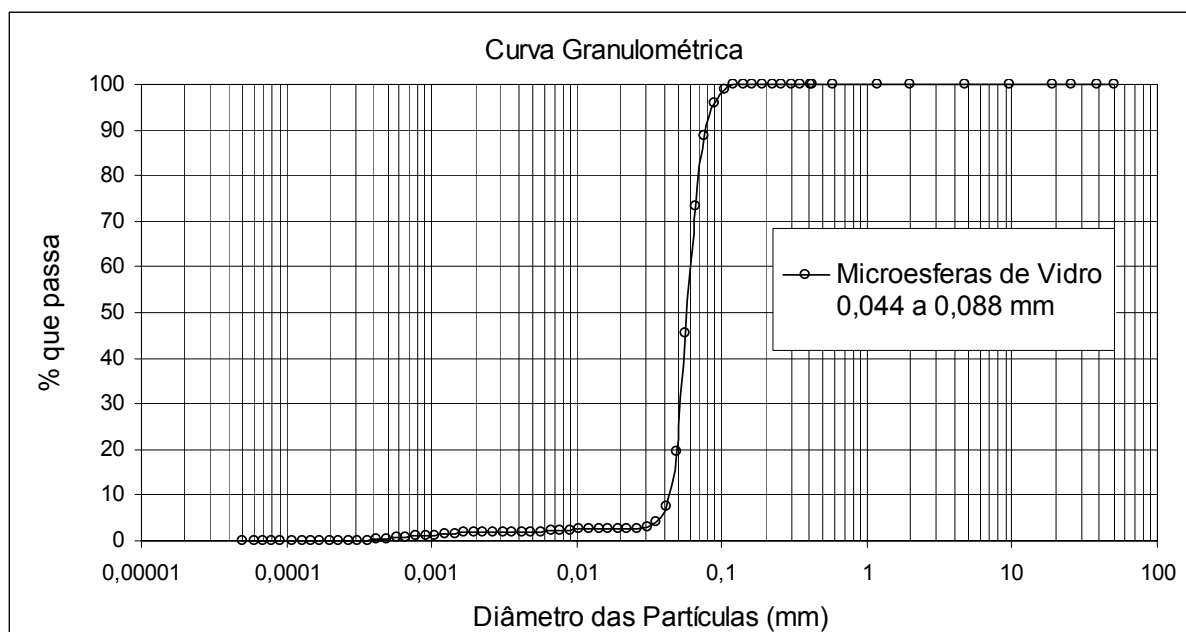


Figura 3.13 – Curva granulométrica das Microesferas de Vidro.

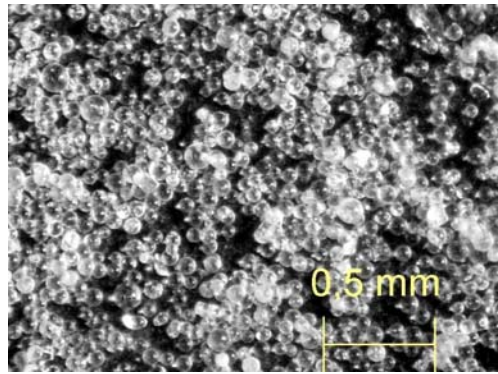


Figura 3.14 – Formato das Microesferas de Vidro de 0,044 a 0,088 mm.

### 3.2.3.2. AREIA FINA DO RIO CORUMBÁ

O segundo material usado para promover a impregnação das amostras de geotêxteis foi a areia do Rio Corumbá. Esta areia foi peneirada de forma a separar a fração de 0,044 a 0,088 mm (material passante na peneira # 170 e retido na peneira # 325) para obter a granulometria mais próxima à das microsferas de vidro, permitindo assim a verificação da influência do formato e textura dos grãos no comportamento carga-alongamento dos geotêxteis impregnados.

A Figura 3.15 apresenta a curva granulométrica da fração de 0,044 a 0,088 mm da areia fina, obtida por meio do granulômetro a laser sem uso do ultra-som. Note-se que o diâmetro máximo do material, de acordo com a curva granulométrica, é maior do que 0,1 mm, o que vai de encontro à abertura da peneira pelo qual o material passa: 0,088 mm. Essa discrepância pode ser entendida na medida em que se conhece o funcionamento do granulômetro a laser (Malvern Instruments, 1997). O equipamento determina a distribuição do tamanho das partículas por meio da obscuração e espalhamento da luz, registrados quando as partículas passam pelo laser. Com os dados registrados o software do equipamento determina, estatisticamente, o volume das partículas que é transformado em volumes esféricos equivalentes. Em seguida o software fornece curva granulométrica determinada a partir destes volumes esféricos equivalentes.

O formato dos grãos da areia fina do rio Corumbá favorece que as dimensões maiores das partículas (em especial as de muscovita) sejam registradas pelo sistema de aquisição e, provavelmente, o volume esférico calculado é maior do que o volume real. Talvez isso explique porque a curva granulométrica fornecida pelo equipamento acusa grãos maiores do que o tamanho máximo dos grãos definido pelo peneiramento. Esse problema não se verificou



na curva granulométrica das microesferas de vidro justamente devido ao formato esférico dos grãos.

Tabela 3.8 - Características da Areia Fina usada na impregnação.

Descrição do material	AF - Areia fina Rio Corumbá 0,044 a 0,088 mm
$G_s$ - Peso específico dos grãos	2,68
Intervalo de tamanho dos grãos (mm)	0,044 – 0,088 *
Diâmetro médio dos grãos – $D_{50}$ (mm)	0,0716
Coefficiente de não-uniformidade - $C_u$	2,36

\* Intervalo de acordo com peneiras pelas quais o material é passante e retido.

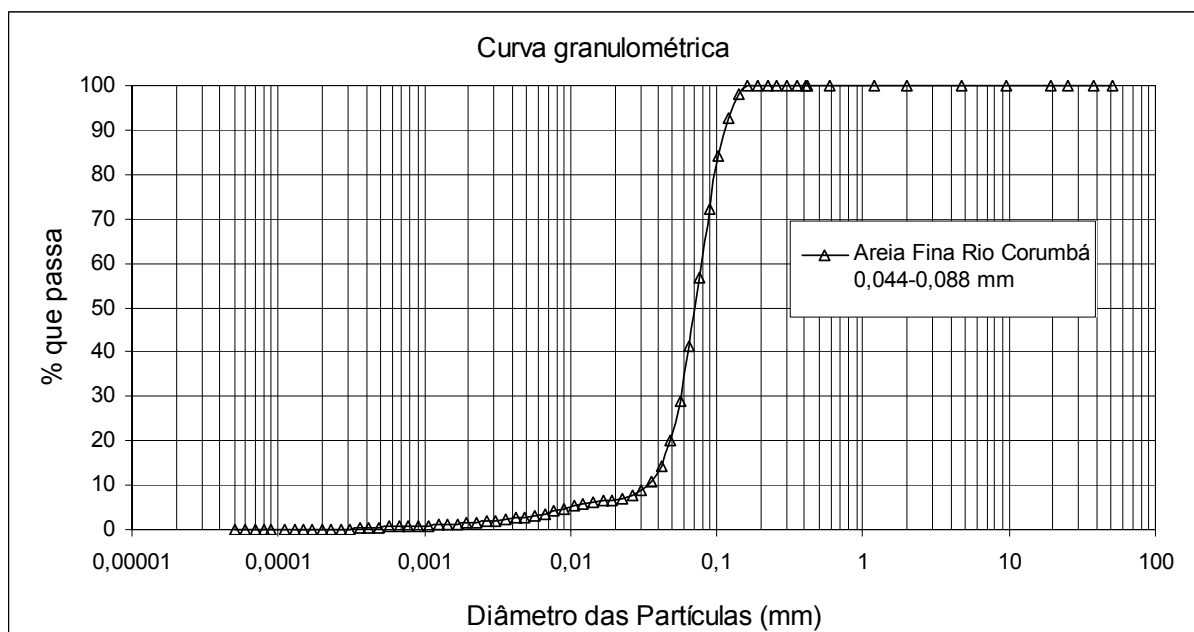


Figura 3.15 – Curva granulométrica da Areia Fina.

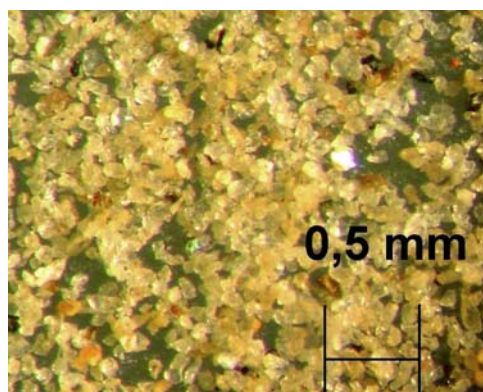


Figura 3.16 – Formato dos grãos da Areia Fina do Rio Corumbá.

### **4. METODOLOGIA DA PESQUISA**

Neste capítulo está apresentada a metodologia da pesquisa, que consiste na metodologia do ensaio (englobando a preparação das amostras de geotêxteis e a preparação do ensaio) e o procedimento de determinação das curvas relevantes.

#### **4.1. METODOLOGIA DO ENSAIO**

O ensaio de tração confinada ainda não foi normalizado e por isso a metodologia adotada para os ensaios foi a mesma descrita por outros autores que desenvolveram suas pesquisas no mesmo equipamento de tração confinada utilizado neste trabalho, seja na sua versão mais antiga (Palmeira, 1990) ou na mais recente (Palmeira, 1998).

##### **4.1.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE GEOTÊXTIL**

###### **4.1.1.1. AMOSTRAS VIRGENS**

A preparação das amostras virgens foi feita de acordo com o procedimento definido por Gomes (1993a), primeiro autor a utilizar o equipamento de tração confinada desenvolvido na UnB. Este procedimento também foi seguido pelos demais autores que usaram este equipamento na sua primeira versão, Tupa (1994), ou na segunda, Martins (2000a) e Matheus (2002).

Para cada tipo de geotêxtil a ser ensaiado foram feitas marcações na manta para o corte de amostras de 20 cm de largura por 25 cm de comprimento, observando-se a distância de 10 cm da borda, segundo preconiza a NBR 12593 (1992). Deve-se observar a direção da marcação: a direção da maior dimensão da amostra deve ser normal à direção da bobina, para que a solicitação de tração do ensaio ocorra na mesma direção que em geral ocorre no campo.

Após serem cortadas, as amostras foram pesadas e selecionadas de acordo com a gramatura real de cada uma (massa por unidade de área de cada amostra), que deve ser igual à gramatura nominal  $\pm 5\%$ , com a finalidade de minimizar a influência deste parâmetro na dispersão dos resultados de um mesmo tipo de geotêxtil ensaiado. Estas amostras foram

etiquetadas informando o tipo de geotêxtil (GA, GB ou GC), a gramatura real, a massa da amostra e a condição em que ela seria ensaiada (virgem, com dano mecânico induzido ou impregnada).

Na amostra de geotêxtil (20 cm de largura por 25 cm de comprimento) apenas a parte central de 10 cm por 20 cm é que corresponde à área útil do ensaio (Figura 3.1). As extremidades são reforçadas com resina epóxi de elevada resistência do tipo Araldite M + Endurecedor HY956 da Ciba-Geigy na proporção de 5:1, ou similar, de acordo com as recomendações de Gomes (1993a). Nesta pesquisa utilizou-se o conjunto CMR 303 + Endurecedor 041 da Casa da Resina (Belo Horizonte, MG), na proporção de 10:1 em peso. As extremidades eram totalmente embebidas pela resina e postas para secar por 24 horas, tempo de cura da resina, e depois eram feitas as marcações do conjunto de 18 furos necessários para fixação das extremidades reforçadas às garras do equipamento por meio de parafusos. Os furos eram feitos utilizando-se uma furadeira de bancada. As duas extremidades reforçadas permitem uma melhor aderência entre as garras do equipamento de tração confinada e a amostra e dificultam a ocorrência de deformações fora da área útil do ensaio (faixa central de 10 cm).

#### 4.1.1.2. AMOSTRAS IMPREGNADAS COM MATERIAL GRANULAR

O grau de impregnação de um geotêxtil ( $\lambda$ ) é definido como a razão entre a massa de solo e a massa dos filamentos que compõem o geotêxtil, de acordo com a Equação 4.1.

$$\lambda = \frac{M_s}{M_f} \quad (4.1)$$

Onde:

$\lambda$  = grau de impregnação do geotêxtil;

$M_s$  = massa de solo;

$M_f$  = massa dos filamentos que compõem o geotêxtil.

Os geotêxteis GA e GB foram impregnados com areia fina com grãos sub-angulares (AF) e microesferas de vidro (EV) em dois graus de impregnação diferentes:  $\lambda_1 = 4$  e  $\lambda_2 = 8$ . O processo de impregnação era feito de acordo com o procedimento descrito a seguir. Uma amostra virgem, preparada de acordo com a descrição do item anterior, era pesada obtendo-se

a massa da amostra resinada ( $M_2$ ). Com a massa da amostra resinada e o grau de impregnação desejado, calcula-se a massa da amostra resinada e impregnada ( $M_3$ ), por meio da Equação 4.5, desenvolvida a seguir.

$$M_s = M_3 - M_2 \quad (4.2)$$

$$M_f = \mu \cdot A \quad (4.3)$$

Substituindo-se as Equações 4.2 e 4.3 na Equação 4.1, tem-se a Equação 4.4.

$$\lambda = \frac{M_3 - M_2}{\mu \cdot A} \quad (4.4)$$

Donde:

$$M_3 = (\lambda \cdot \mu \cdot A) + M_2 \quad (4.5)$$

Onde:

$\lambda$  = grau de impregnação da amostra;

$M_s$  = massa do solo impregnado (g);

$M_f$  = massa dos filamentos do geotêxtil na área impregnada (g);

$M_3$  = massa da amostra de geotêxtil (25 cm x 20 cm) + resina + solo impregnado (g);

$M_2$  = massa da amostra de geotêxtil (25 cm x 20 cm) + resina (g);

$\mu$  = gramatura da amostra de geotêxtil (g/m<sup>2</sup>);

$A$  = 0,02 (área da amostra em m<sup>2</sup>).

Após determinado o valor de  $M_3$ , a amostra geotêxtil era impregnada manualmente. O material granular era colocado sobre a área útil da amostra geotêxtil que era vibrada manualmente promovendo a intrusão de grãos nos vazios da manta. Quando necessário, os grãos eram pressionados contra a manta, com cuidado para não alterar de forma significativa a disposição dos filamentos do geotêxtil. A amostra impregnada era então pesada para verificar a massa da amostra geotêxtil + resina + solo impregnado. Este processo era repetido até que a massa da amostra resinada e impregnada atingisse o valor  $M_3$  calculado pela Equação 4.5.

#### 4.1.1.3. AMOSTRAS COM DANOS MECÂNICOS INDUZIDOS

Os geotêxteis usados nos ensaios com danos mecânicos induzidos foram GA e GC. Os tipos de danos adotados nos ensaios foram definidos de acordo com os adotados por Matheus (2002) que, em sua pesquisa, procurou simular nas amostras danos observados em geotêxteis exumados de obras reais.

Os geotêxteis eram submetidos a danos mecânicos do tipo rasgo horizontal de 10 e 25 mm (RH10 e RH25 respectivamente) e rasgo em “Y” de 12,5 mm (RY12,5). No geotêxtil do tipo GA ainda foram feitos danos maiores: RH50 e RY25, para facilitar a interpretação de resultados. A Figura 4.1 apresenta um desenho esquemático dos tipos de danos mecânicos induzidos nos geotêxteis.

As amostras eram inicialmente preparadas seguindo o procedimento de preparação das amostras virgens (item 4.1.1.1). Posteriormente era feita a marcação do tipo de dano em cada amostra e este dano era provocado por meio de formão de madeira com dimensão apropriada para provocar cada tipo dano.

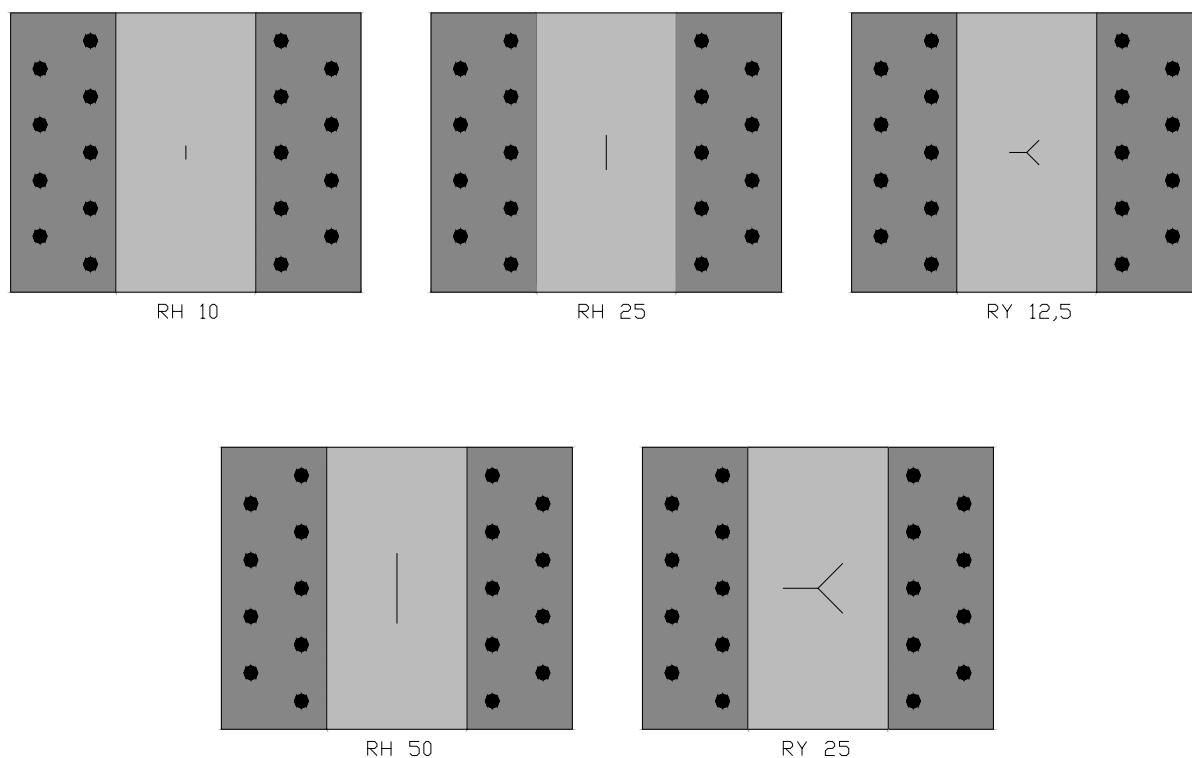


Figura 4.1 - Tipos de danos mecânicos induzidos nos geotêxteis.

#### 4.1.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Como mencionado anteriormente, o ensaio de tração confinada ainda não foi normalizado e por isso o procedimento adotado para os ensaios foi o mesmo descrito por Martins (2000b), primeiro autor a utilizar esta versão, mais atual, do equipamento de tração confinada da UnB. Este procedimento também foi adotado por Matheus (2002).

A base e as laterais de contato entre a caixa da célula e as garras são lubrificadas com vaselina, graxa ou óleo motor e duas camadas de papel alumínio também untadas, com o intuito de reduzir o atrito entre a célula e as garras móvel e fixa. O par de garras inferior é então posicionado, deixando livre a parte central de 10 cm de comprimento e 20 cm de largura.

O sistema de garras é travado fechando-se o registro de saída de óleo na bomba, com o intuito de impedir qualquer movimentação destas durante a preparação da amostra de solo. Por meio do método de “chuva de areia” a amostra de solo é distribuída no espaço de 20 cm de largura por 10 cm de comprimento por 2 cm de altura. A amostra de geotêxtil é posicionada sobre a primeira camada de solo e em seguida o par de garras superior também é posicionado. É feita a fixação entre as garras inferiores, as extremidades reforçadas da amostra de geotêxtil e garras superiores utilizando-se 18 parafusos. Ainda com o registro de saída de óleo da bomba fechado, repete-se o processo de “chuva de areia” para a camada de solo granular sobre o geotêxtil, com as mesmas dimensões da camada inferior.

Sobre a última camada de solo é posicionada uma membrana protetora da bolsa de borracha, que evita uma eventual perfuração desta pelos grãos do solo confinante. Posiciona-se a bolsa de borracha sobre esta membrana, trava-se o sistema por meio das vigas metálicas de reação presas por barras rosqueadas e conecta-se a mangueira de ar comprimido à bolsa de borracha.

Posteriormente é feito o posicionamento de quatro extensômetros responsáveis pela medição dos deslocamentos das garras: dois nas extremidades da garra móvel (extensômetros 1 e 2) e mais dois nas extremidades da garra fixa (extensômetros 3 e 4), todos presos à estrutura fixa do equipamento por meio de bases magnéticas. Depois é instalada a leitora da célula de carga. Na Figura 4.2 é apresentada a seqüência de montagem do ensaio de tração confinada.

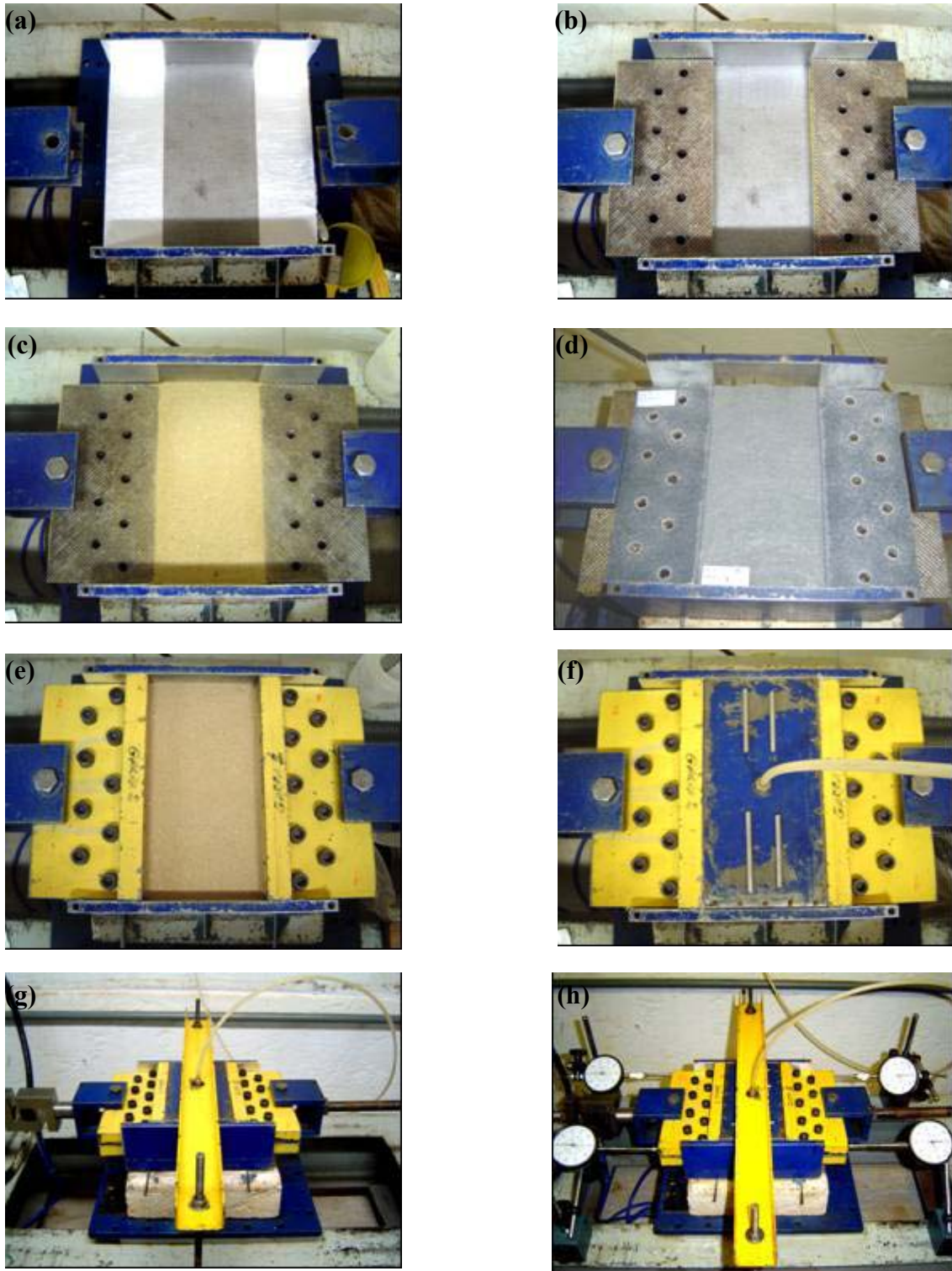


Figura 4.2 – Seqüência de Preparação do ensaio: a) Lubrificação da base e laterais de contato da caixa com as garras; b) Posicionamento do par de garras inferior; c) Colocação da camada inferior de solo; d) Posicionamento da amostra geotêxtil; e) Posicionamento do par de garras superior e colocação da camada superior de solo confinante; f) Posicionamento da bolsa de borracha com roletes para apoio da viga de reação; g) Montagem do sistema de reação da bolsa de borracha e h) Posicionamento dos extensômetros.

Com o sistema todo montado, extensômetros zerados e célula de carga ligada, aplica-se a pressão na bolsa de borracha ajustando-a por meio das válvulas reguladoras. O registro de saída da bomba de óleo é, então, aberto e faz-se a leitura da carga inicial do ensaio fornecida pelo leitor da célula de carga. Em seguida este leitor deve ser zerado e inicia-se a compressão do cilindro hidráulico pela prensa numa taxa de deformação de 2,0 % de deformação por minuto (velocidade de 2,0 mm/min), controlada pelo sistema de engrenagens da prensa. Para alguns valores específicos de deslocamento medidos no extensômetro 1 são feitas leituras dos deslocamentos nos demais extensômetros e da carga de tração na célula de carga. O ensaio termina quando o extensômetro 1 registra um deslocamento de 20 mm, o que corresponde a uma deformação de 20% para a amostra de 10 cm de largura.

A finalidade do ensaio não é de levar o geotêxtil à ruptura, pois para grandes deslocamentos o ensaio não simularia o confinamento em toda extensão do geotêxtil, uma vez que a bolsa de borracha para aplicação da tensão de confinamento atua em uma área limitada sobre a amostra. Com o ensaio de tração confinada pretende-se apenas estudar o comportamento carga-alongamento do geotêxtil confinado a baixas deformações, uma vez que em obras reais de reforço de solos com geotêxteis não têm sido verificadas deformações maiores que 2% a 3% (Lanz, 1992 e Martins, 2000a). Sendo assim, provocar deformações de até 20% é mais que suficiente, uma vez que uma obra que atinja um nível tão alto de deformações já estaria operacionalmente comprometida.

#### **4.2. DETERMINAÇÃO DAS CURVAS RELEVANTES**

Durante o ensaio de tração confinada, são feitas leituras das cargas de tração no geotêxtil, por meio da célula de carga, e dos deslocamentos nas extremidades das garras móvel e fixa, por meio de quatro extensômetros. Com estas leituras, é possível determinar a curva Carga de tração (kN/m) x Deformação (%), com a qual determina-se a curva Rigidez secante (kN/m) x Deformação (%). São curvas também obtidas nos ensaios de tração simples (faixa larga), no entanto os valores da rigidez secante observada nos ensaios de tração confinada geralmente são bem superiores.



#### 4.2.1. CURVA CARGA DE TRAÇÃO X DEFORMAÇÃO

O alongamento da amostra de geotêxtil é determinado a partir da média das diferenças entre as leituras de deslocamentos feitas nos extensômetros das garras fixa e móvel, conforme mostrado na Equação 4.6.

$$\Delta L = \frac{[(\Delta l_1 - \Delta l_4) + (\Delta l_2 - \Delta l_3)]}{2} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Onde:

$\Delta L$  = deslocamento médio da amostra em milímetros;

$\Delta l_1$  = deslocamento da garra móvel na extremidade do extensômetro 1;

$\Delta l_2$  = deslocamento da garra móvel na extremidade do extensômetro 2;

$\Delta l_3$  = deslocamento da garra fixa na extremidade do extensômetro 3;

$\Delta l_4$  = deslocamento da garra fixa na extremidade do extensômetro 4.

O deslocamento medido em cada extensômetro é dado pela diferença entre a leitura final e leitura inicial do extensômetro, de acordo com a Equação 4.7.

$$\Delta L_i = (l_{f(i)} - l_{o(i)}) \cdot 100 \quad (4.7)$$

Onde:

$\Delta L_i$  = deslocamento medido no extensômetro (i);

$l_{f(i)}$  = leitura final do extensômetro (i);

$l_{o(i)}$  = leitura inicial do extensômetro (i).

O alongamento ( $\varepsilon$ ) é a relação entre o deslocamento médio e o comprimento inicial da amostra ensaiada (100 mm), expressos em porcentagem.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i} \cdot 100 \quad (4.8)$$

Sabendo-se que  $L_i = 100$  mm tem-se, portanto:

$$\varepsilon \equiv \Delta L \quad (4.9)$$

Onde:

$\varepsilon$  = deformação;

$\Delta L$  = deslocamento médio da amostra (mm);

$L_i$  = 100 mm: comprimento inicial da are útil da amostra.

O cálculo da carga de tração atuante no geotêxtil é feito por meio da Equação 4.10.

$$T = \frac{F}{B} \quad (4.10)$$

Onde:

T = força de tração por unidade de comprimento (kN/m);

F = força total de tração na amostra de geotêxtil (kN);

B = largura da amostra de geotêxtil (0,20 m).

Com os valores de deformação ( $\varepsilon$ ), dados pela Equação 4.9 e da força de tração por unidade de comprimento (T), dada pela Equação 4.10, determina-se a curva Carga de tração (kN/m) x Deformação (%), ou curva carga-alongamento.

#### 4.2.2. CURVA RIGIDEZ X DEFORMAÇÃO

Por meio da curva carga-alongamento é possível determinar a rigidez secante à tração do geotêxtil ( $J_{sec}$ ) para cada valor de alongamento (deformação).

$$J_{sec} = \frac{T}{\varepsilon} \quad (4.11)$$

Onde:

$J_{sec}$  = rigidez secante (kN/m);

T = força de tração por unidade de comprimento (kN/m);

$\varepsilon$  = deformação correspondente a T.

Com os valores de rigidez secante calculados para cada deformação, determina-se a segunda curva relevante do ensaio: Rigidez secante (kN/m) x Deformação (%).

Estas curvas são úteis na análise do comportamento mecânico dos geotêxteis submetidos à tração confinada, que deve ser diferente do comportamento do geotêxtil em ensaios de tração em isolamento, uma vez que o confinamento dificulta a movimentação dos filamentos da manta geotêxtil, aumentando sua rigidez à tração.

### **4.3. REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS**

A verificação da repetibilidade dos ensaios de tração confinada é importante para se ter uma idéia da precisão dos resultados obtidos. Uma vez que o procedimento do ensaio ainda não é normalizado, procurou-se verificar a precisão dos resultados por meio da repetição de alguns ensaios para consolidar o procedimento adotado.

Em geral, as repetições demonstraram que o equipamento, a instrumentação e o procedimento adotado no ensaio são eficientes para garantir a precisão dos resultados. A repetibilidade de ensaios com geotêxteis GA virgens em diferentes interfaces de confinamento está ilustrada nas Figuras 4.3 a 4.5. A Figura 4.6 apresenta a precisão do ensaio com geotêxtil GA impregnado, mostrando que o método adotado para a impregnação dos geotêxteis não alterou de forma significativa a estrutura dos filamentos que compõem o geotêxtil a ponto de modificar o comportamento de amostras submetidas às mesmas solicitações.

A repetibilidade dos ensaios com geotêxteis GB virgens confinados em areia do Rio Corumbá (ARC) está apresentada na Figura 4.7. Verifica-se que as curvas dos dois ensaios nas mesmas condições de confinamento (tensão e material confiante) são quase coincidentes, confirmando a precisão já observada na repetibilidade dos ensaios com geotêxteis GA.

Como os geotêxteis GC foram utilizados apenas na avaliação dos efeitos do dano mecânico, a verificação da repetibilidade dos ensaios com estes geotêxteis foi feita com amostras danificadas com RY12,5. Por meio da Figura 4.8 verifica-se que as curvas também são praticamente coincidentes.

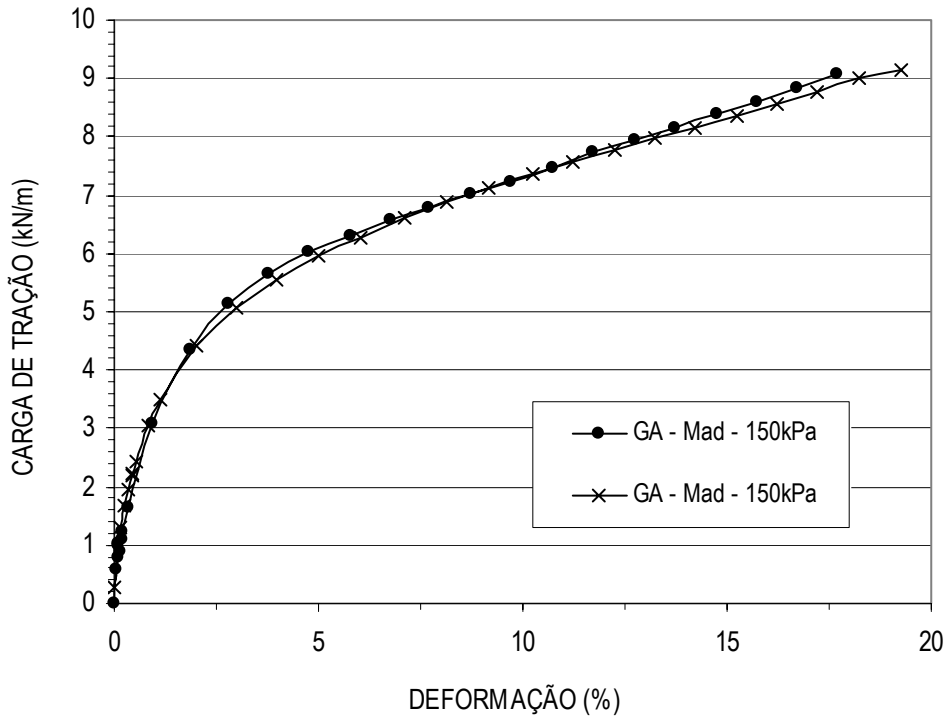


Figura 4.3 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GA virgens confinados por Madeira.

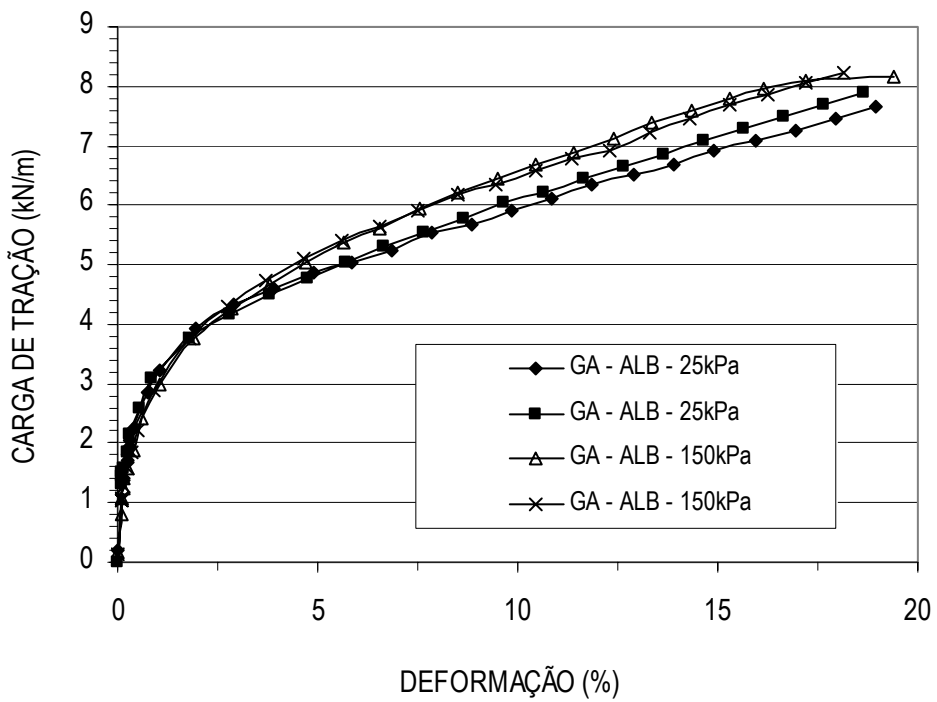


Figura 4.4 – Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GA virgens confinados por Areia Leighton Buzzard.

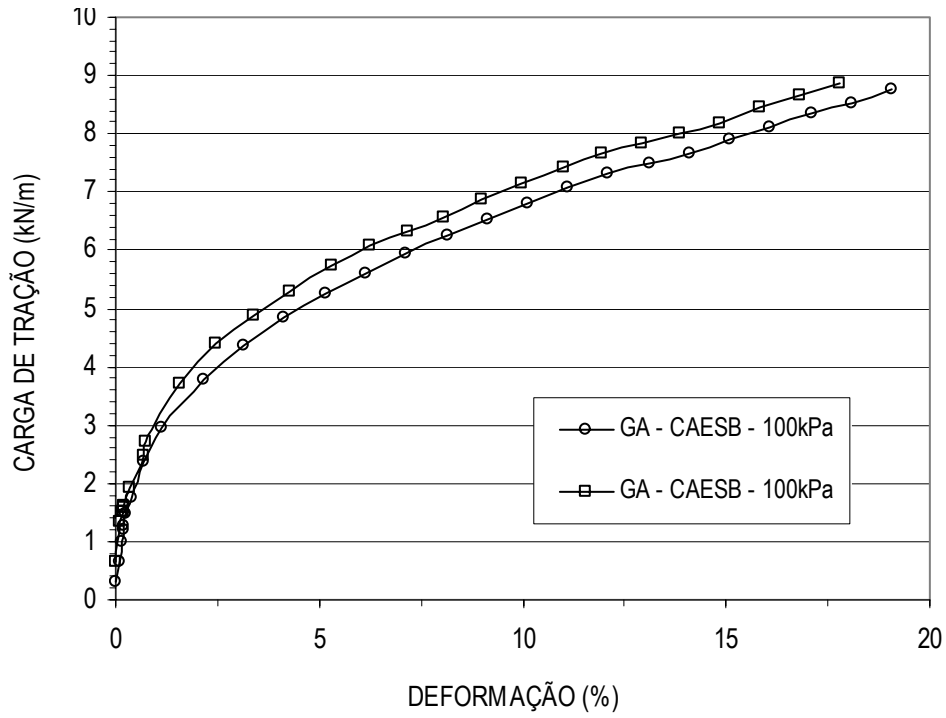


Figura 4.5 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GA virgens confinados por Areia da CAESB.

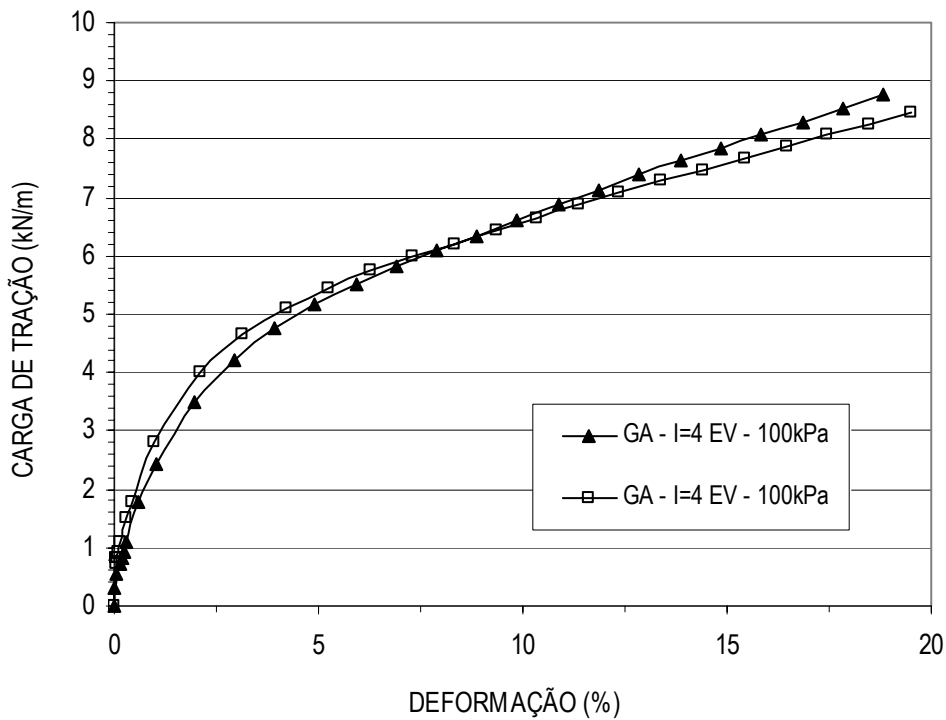


Figura 4.6 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GA impregnados com microesferas de vidro ( $\lambda=4$ ) confinados por Madeira.

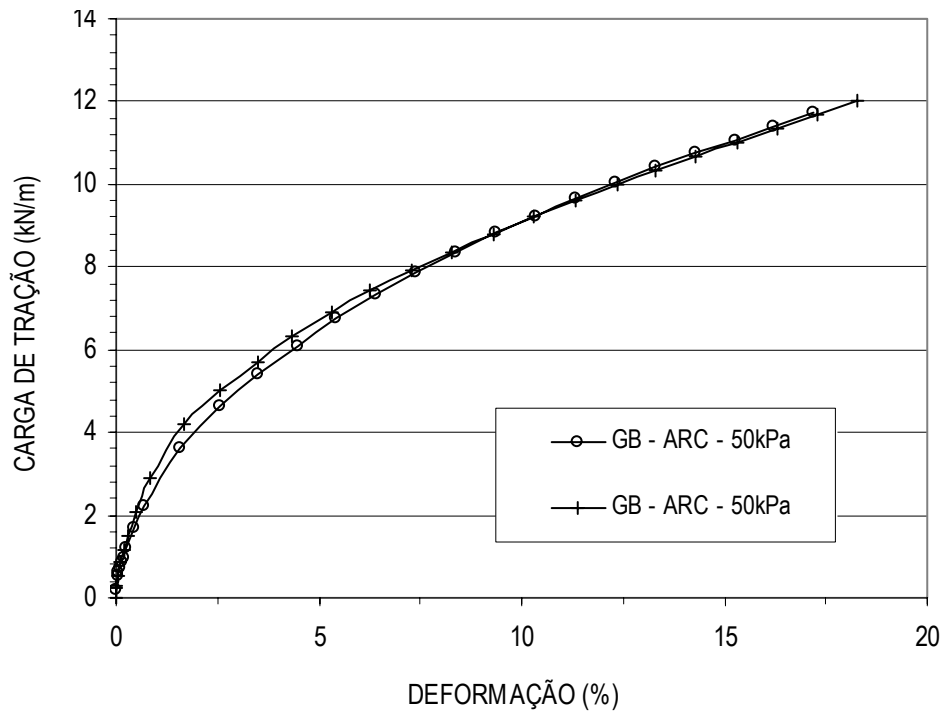


Figura 4.7 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GB virgens confinados por Areia do Rio Corumbá.

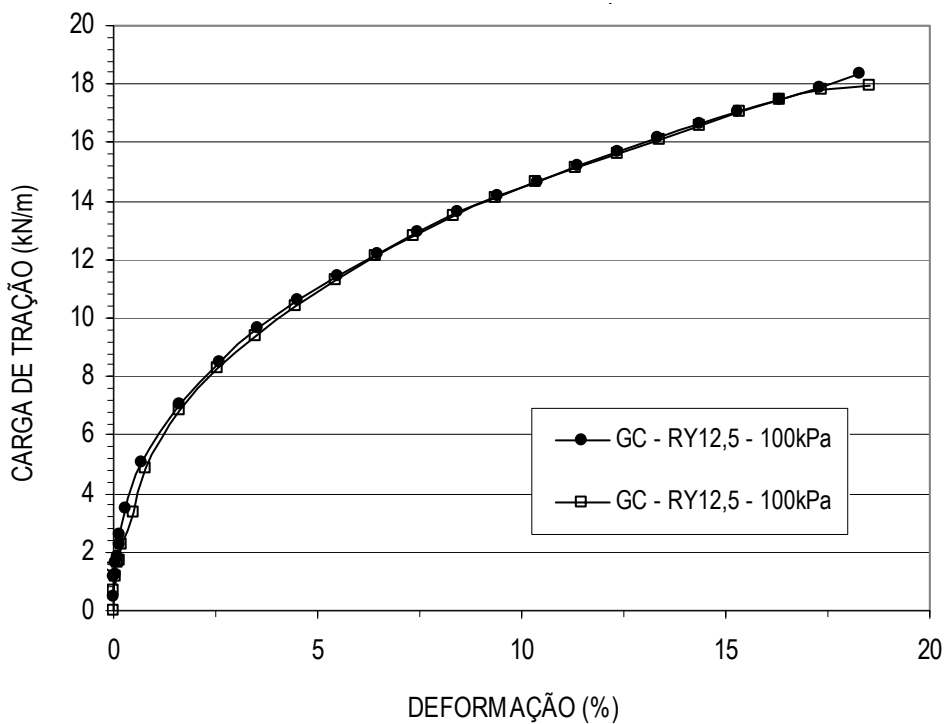


Figura 4.8 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GC danificados (com danos do tipo RY12,5) confinados por Areia CAESB.

O conjunto dos resultados levantam a suspeita de que a precisão dos resultados aumenta com a gramatura do geotêxtil, o que é coerente, visto que a não uniformidade da gramatura ao longo das mantas têxteis tende a afetar mais o comportamento de geotêxteis mais leves e menos densos. No entanto, ressalta-se que esta análise é apenas preliminar e obviamente seriam necessárias mais repetições para verificar a real precisão, desvio padrão e outros parâmetros estatísticos com relação aos resultados dos ensaios de tração confinada. A princípio, para os estudos feitos na presente pesquisa, considera-se a precisão excelente.

### **5. RESULTADOS E ANÁLISES**

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios de tração confinada com amostras geotêxteis em três condições diferentes: virgens, impregnadas e danificadas mecanicamente. Os ensaios com amostras virgens permitiram a verificação da influência da gramatura, tensão confinante e interface de confinamento no comportamento à tração de geotêxteis não tecidos confinados. Os ensaios com amostras impregnadas foram úteis na verificação da influência de fatores como o grau de impregnação e a forma dos grãos impregnados nas amostras. Por fim, com os ensaios de amostras com danos mecânicos foi possível estudar a influência dos danos no comportamento carga-alongamento de geotêxteis abordando os efeitos da forma e da dimensão destes danos.

#### **5.1. ENSAIOS COM GEOTÊXTEIS VIRGENS**

Os ensaios de tração confinada com geotêxteis virgens permitiram o estudo do comportamento à tração destes materiais quando submetidos a diferentes condições de confinamento. Foram feitos ensaios com amostras virgens dos geotêxteis não tecidos variando-se a gramatura, a tensão confinante e a interface de confinamento. Os geotêxteis usados nestes ensaios foram GA e GB, cujas gramaturas são  $200 \text{ g/m}^2$  e  $400 \text{ g/m}^2$ , respectivamente. Os materiais empregados na interface de confinamento foram blocos de madeira (Mad), areia Leighton Buzzard (ALB) e areia fina a média do Rio Corumbá (ARC), com o intuito de verificar a influência do material confinante no comportamento carga-alongamento do geotêxtil. As tensões confinantes aplicadas foram de 50, 100 e 150 kPa, sendo que no caso das amostras confinadas com areia Leighton Buzzard ainda foram feitos ensaios aplicando tensão de 25 kPa. A Tabela 5.1 sumaria o programa de ensaios de tração confinada feitos com geotêxteis virgens e os respectivos valores de rigidez à tração determinados para deformações de 2%.



Tabela 5.1 – Ensaios com amostras virgens.

Tipo de Geotêxtil	Material confinante	Tensão Confinante (kPa)	J <sub>sec</sub> 2% de deformação (kN/m)		Número de ensaios
			GA	GB	
GA GB	-	0	35*	51*	-
	Madeira (Mad)	50	167	243	6
		100	193	271	
		150	212	306	
	Areia Rio Corumbá (ARC)	50	182	232	6
		100	196	245	
		150	232	271	
	Areia Leighton Buzzard (ALB)	25	161	196	8
		50	181	226	
		100	204	260	
		150	231	297	

\* Rigidez do geotêxtil submetido a ensaio de tração em faixa larga segundo NBR 12824/93 (Nascimento, 2006).

### 5.1.1. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GRAMATURA

Gomes (1993a) e Matheus (2002) verificaram que a gramatura dos geotêxteis submetidos a ensaios de tração confinada exerce grande influência no comportamento carga-alongamento destes materiais, sendo os maiores valores de rigidez à tração observados nos geotêxteis de maior gramatura e os maiores *incrementos* de rigidez devido ao confinamento observados nos geotêxteis de menor gramatura, devido à sua matriz original “frouxa” (Gomes, 1993a).

Os ensaios com amostras virgens dos geotêxteis GA e GB, confinados em blocos de madeira de 20 cm de largura, 10 cm de comprimento e 2 cm de altura (mesmas dimensões das amostras de solo), permitiram a verificação da influência da gramatura no comportamento carga-alongamento dos geotêxteis, livre de outras influências como o embricamento e impregnação do material confinante. As Figuras 5.1 a 5.6 apresentam os gráficos da carga de tração em função da deformação e também da rigidez secante em função da deformação. As figuras mostram a diferença do comportamento à tração entre os geotêxteis GA e GB, quando confinados em blocos de madeira sob três tensões confinantes diferentes: 50, 100 e 150 kPa.

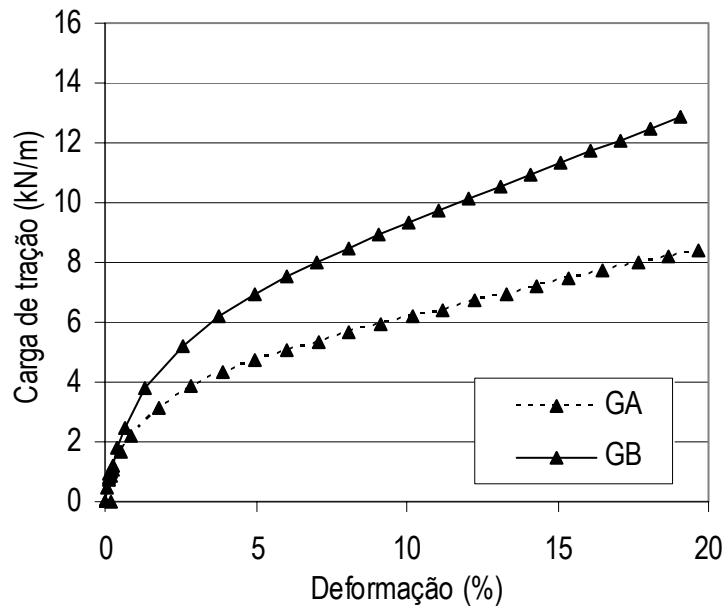


Figura 5.1 - Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 50 kPa em blocos de madeira.

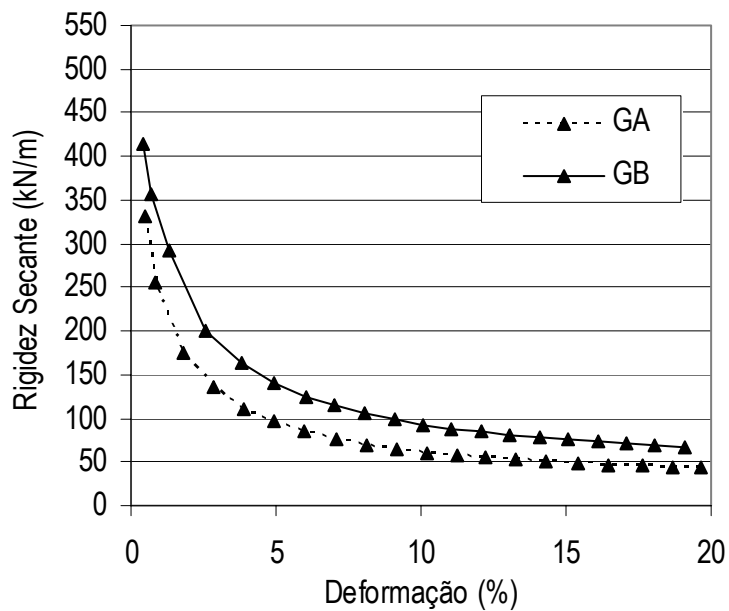


Figura 5.2 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 50 kPa em blocos de madeira.

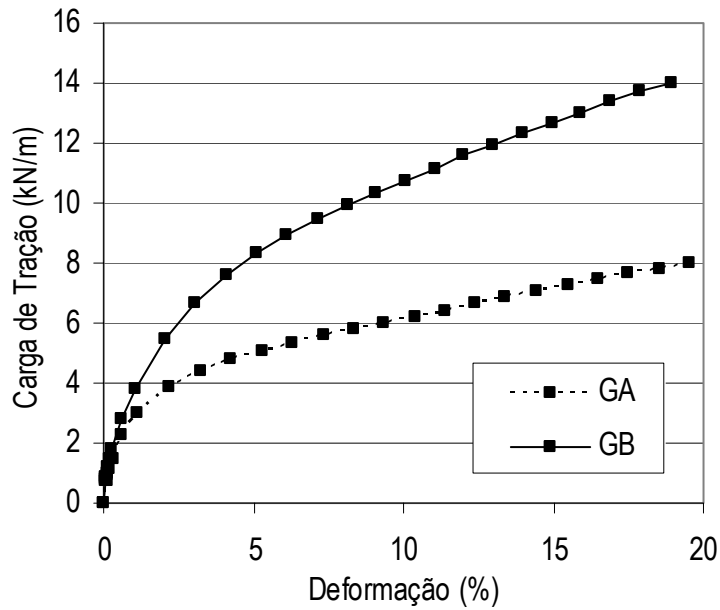


Figura 5.3 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em blocos de madeira.

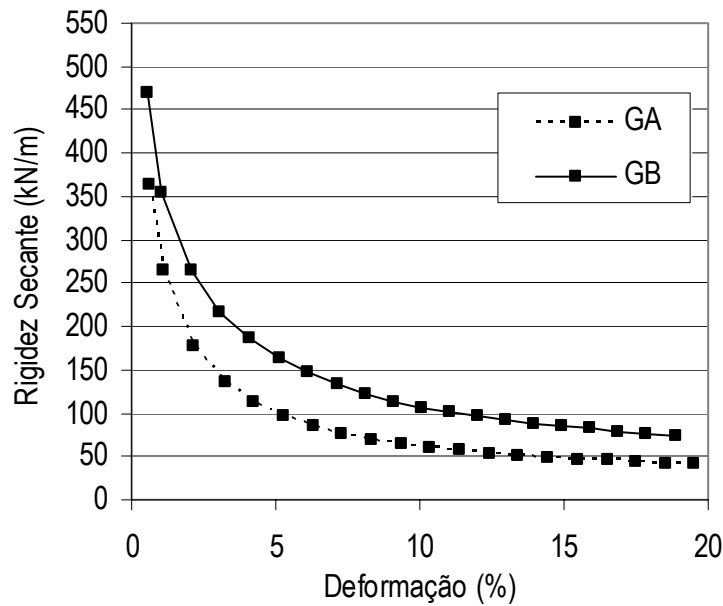


Figura 5.4 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em blocos de madeira.

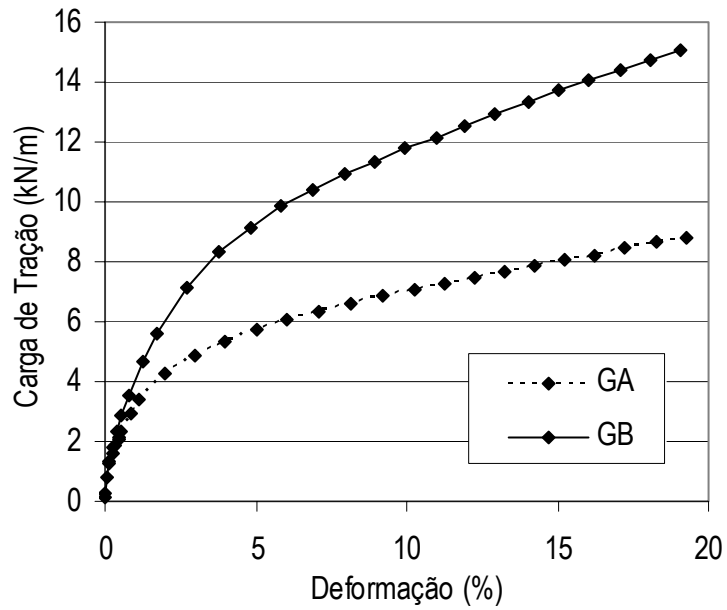


Figura 5.5 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 150 kPa em blocos de madeira.

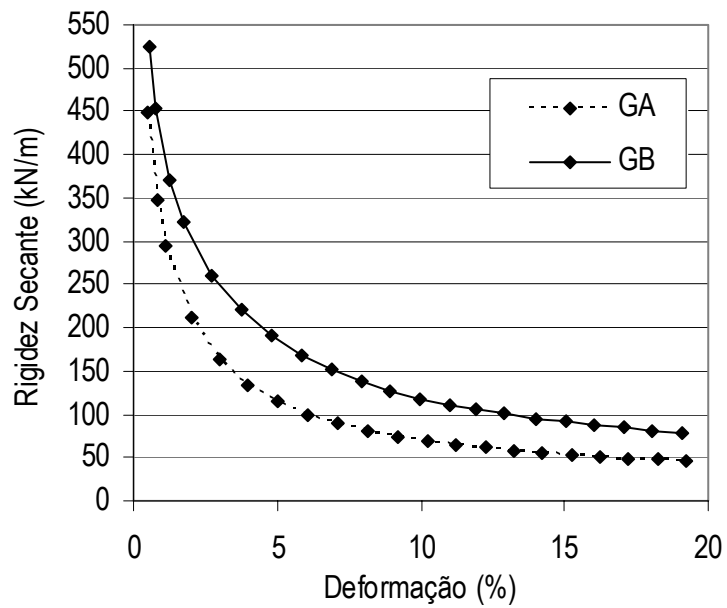


Figura 5.6 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 150 kPa em blocos de madeira.

Para deformações de 2%, a rigidez à tração dos geotêxteis GB foi de 40 a 45% (dependendo da tensão confinante) maior que a rigidez dos geotêxteis GA, um aumento significativo. Pode-se afirmar que este aumento se deve basicamente à diferença de gramatura, uma vez que o material de interface utilizado, madeira lisa com a interface protegida por duas camadas de filme plástico lubrificadas, elimina os efeitos do embricamento e da impregnação, fatores que também poderiam influenciar os valores de rigidez à tração de geotêxteis não tecidos, no caso de confinamento em materiais granulares. Por isto considera-se que, nestes resultados, apenas a gramatura foi responsável pela diferença nos valores de rigidez à tração entre os geotêxteis GA e GB.

Além de ensaios usando blocos de madeira no confinamento das amostras geotêxteis, foram feitos ensaios com a areia do Rio Corumbá e areia Leighton Buzzard. Nos ensaios utilizando materiais granulares, a interação solo-reforço influencia o comportamento carga-alongamento dos geotêxteis. Por esse motivo, a diferença dos valores de rigidez observados entre os geotêxteis GA e GB varia de acordo com o material confinante.

Nos ensaios usando a areia do Rio Corumbá, ARC, como material confinante, observou-se que os valores de rigidez dos geotêxteis GB, para deformações de 2%, foram 16 a 28% maiores que os valores de rigidez obtidos para os geotêxteis GA. A Figura 5.7 apresenta a curva carga-deformação e a Figura 5.8 apresenta a curva rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados na areia do Rio Corumbá sob tensão de 100 kPa. As curvas obtidas para as demais tensões de confinamento (50 e 150 kPa) estão apresentadas no Apêndice B (Figuras B.1 a B.4).

Verifica-se que as curvas dos geotêxteis GA e GB confinados em areia diferem menos que as curvas destes geotêxteis confinados em blocos de madeira sob certa tensão confinante. Estes resultados indicam que a areia fina a média (ARC) pode estar promovendo alguma interação entre o solo e o reforço, reduzindo a importância da gramatura no comportamento carga-alongamento dos geotêxteis confinados. Fatores como o embricamento e a impregnação, devidos ao confinamento do reforço em materiais granulares, também podem influenciar o comportamento a tração confinada dos geotêxteis, reduzindo a influência da gramatura no incremento de rigidez destes materiais. É importante destacar que o comportamento apresentado por estas amostras não deve ser extrapolado para outros tipos de geotêxteis, com outros polímeros constituintes, outros processos de fabricação, etc.

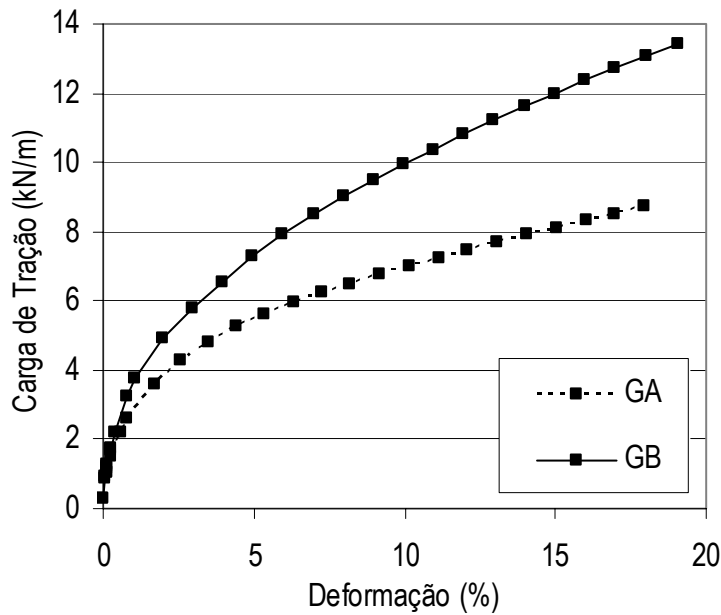


Figura 5.7 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em ARC.

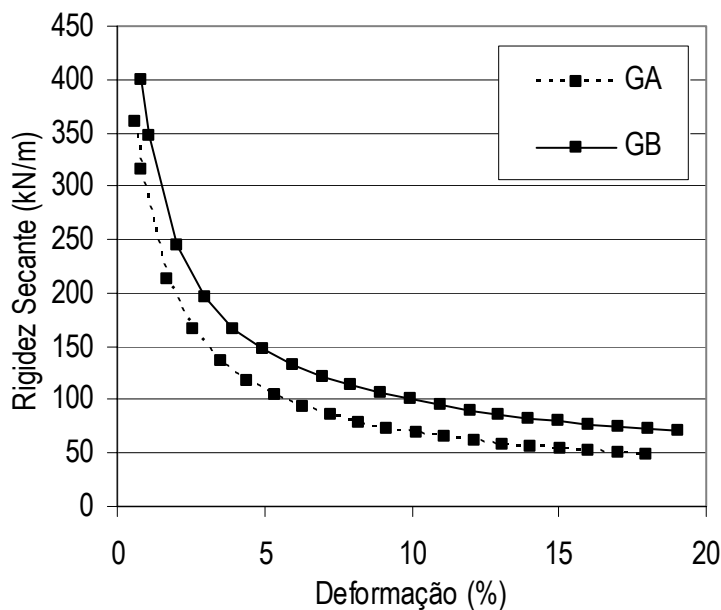


Figura 5.8 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em ARC.

Nos ensaios utilizando areia Leighton Buzzard no confinamento dos geotêxteis, observou-se que os valores de rigidez dos geotêxteis GB, para deformações de 2%, foram de 22 a 29% maiores que os valores de rigidez observados nos geotêxteis GA. Novamente, os resultados de ensaios com amostras confinadas em material granular comprovam que a interação solo-geotêxtil reduziu a influência da gramatura no comportamento carga-

alongamento do reforço. As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam, respectivamente, as curvas carga-deformação e rigidez-deformação para os geotêxteis GA e GB confinados na areia Leighton Buzzard sob tensão de 100 kPa. As curvas obtidas para as tensões confinantes de 25, 50 e 150 kPa estão apresentadas no apêndice B (Figuras B.5 a B.10).

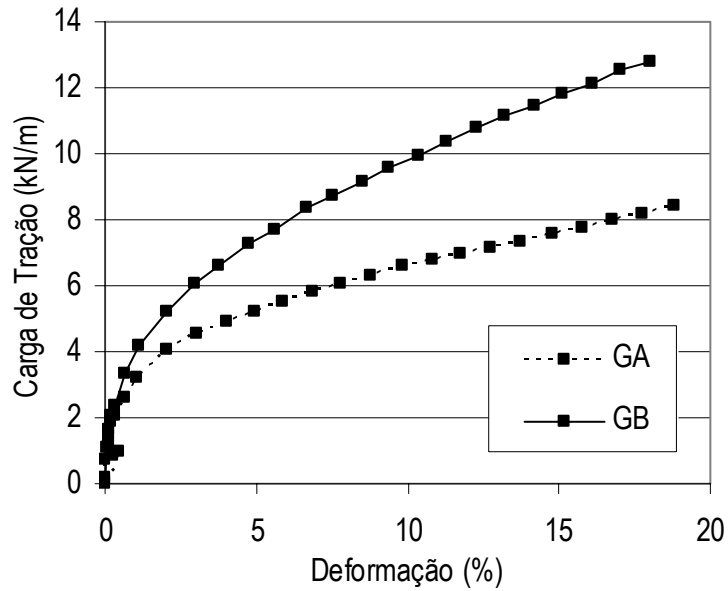


Figura 5.9 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em ALB.

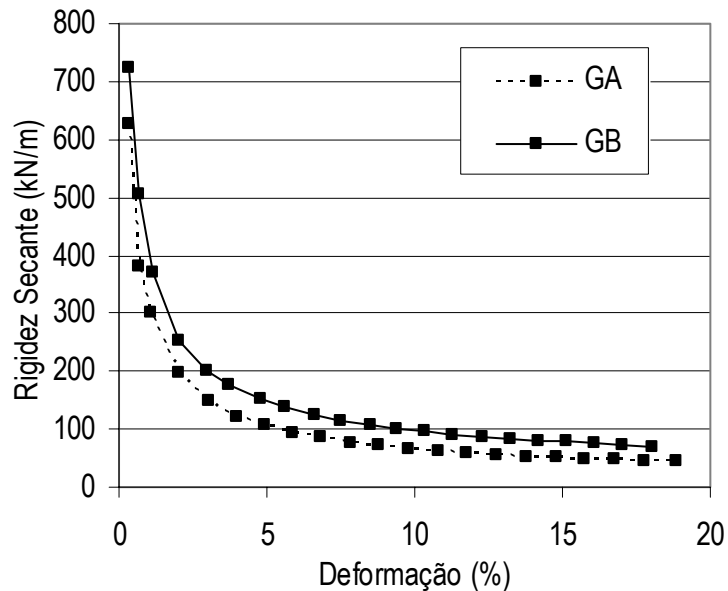


Figura 5.10 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em ALB.

Note-se, ainda, que o incremento de rigidez devido à gramatura foi menor para os geotêxteis confinados em ARC (16 a 28%) do que nos confinados em ALB (22 a 29%). Isto talvez seja um indicativo de que o confinamento provocado por areia do Rio Corumbá proporcione uma maior interação entre o solo e o geotêxtil, comparado aos outros materiais confinantes, de forma que o comportamento à tração confinada de geotêxteis de gramaturas diferentes seja a menos discrepante.

### **5.1.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO CONFINANTE**

A tensão de confinamento também influencia o comportamento carga-alongamento dos geotêxteis, sendo observado o aumento da rigidez à tração à medida que aumenta a tensão. Comparando-se os resultados obtidos com os geotêxteis submetidos a tensões confinantes diferentes (0, 25, 50, 100 e 150 kPa), foi possível verificar a influência deste parâmetro na rigidez à tração dos geotêxteis ensaiados. Em geral, os resultados mostraram que o incremento de rigidez devido ao aumento da tensão confinante é maior para o geotêxtil GA, uma vez que, devido a menor gramatura deste geotêxtil, a tensão confinante atua de forma mais expressiva na aproximação dos filamentos, promovendo uma maior densificação da estrutura, como observado por Gomes (1993a). Com os filamentos mais próximos, diminuem os espaços vazios por onde eles poderiam se movimentar durante a solicitação de tração, e aumenta o atrito entre os filamentos, aumentando também a rigidez à tração do geotêxtil.

Inicialmente, comparando-se os valores de rigidez confinada e não confinada a 2% de deformação dos geotêxteis GA e GB verifica-se um aumento significativo da rigidez devido ao efeito do confinamento. Comparando-se os valores de rigidez apresentados na Tabela 5.1 apresentada no início deste capítulo, determinam-se os acréscimos de rigidez devido ao confinamento, com relação aos valores de rigidez obtidos em ensaios de tração simples (ensaios de tração em faixa larga, portanto sem confinamento). Os acréscimos de rigidez devido à tensão confinante, com relação aos valores de rigidez não confinadas para geotêxteis GA e GB (considerando a rigidez para deformações de 2%) estão apresentados na Tabela 5.2.

Verifica-se que a amostra de geotêxtil GA confinada em madeira a 50 kPa apresenta um valor de rigidez 377% maior que a da amostra do mesmo geotêxtil submetida à tração simples. As amostras confinadas a 100 kPa e 150 kPa apresentam rigidezes 451 e 506% maiores que a do geotêxtil sem confinamento. Nos ensaios feitos com geotêxteis GB confinados em madeira, os aumentos da rigidez devido ao confinamento também foram significativos: tensões confinantes de 50, 100 e 150 kPa promoveram incrementos de rigidez



de 376, 431 e 500% respectivamente, com relação à condição sem confinamento (Ensaio de tração em faixa larga). Verifica-se, portanto, que para geotêxteis confinados em madeira sob a mesma tensão confinante, os incrementos de rigidez são praticamente os mesmos nos geotêxteis GA e GB, como discutido acima.

Tabela 5.2 – Acréscimos de rigidez devido à tensão confinante com relação à rigidez não confinada (%).

Tipo de geotêxtil	Tensão confinante	Materiais confinantes		
		Madeira	ARC	ALB
GA	25	-	-	360
	50	377	420	417
	100	451	460	483
	150	506	563	560
GB	25	-	-	284
	50	376	355	343
	100	431	380	410
	150	500	431	482

Comparando-se os valores de rigidez dos geotêxteis confinados na areia do Rio Corumbá e areia Leighton Buzzard com os valores obtidos por meio de ensaios de tração simples, verificou-se que o efeito do confinamento promovido por estes materiais na rigidez foi ainda mais significativo para os geotêxteis GA. Os filamentos deste geotêxtil, por serem um pouco mais afastados que dos geotêxteis GB, permitem a influência de certa impregnação e embricamento devido ao contato dos grãos com a manta geotêxtil. Nos geotêxteis GB, o incremento de rigidez devido ao confinamento promovido por estes materiais é, ainda, muito alto, mas os incrementos verificados em amostras confinadas em madeira foram um pouco maiores. Neste caso, a estrutura dos filamentos que compõem este geotêxtil é mais fechada, reduzindo a influência da impregnação e embricamento e aumentando a importância da superfície contínua de contato entre a amostra geotêxtil e o material confinante, madeira. Entretanto, devido à proximidade dos valores de rigidez dos geotêxteis GB confinados em diferentes materiais pode ser apenas reflexo de uma possível dispersão dos resultados.

A utilização de blocos de madeira na interface de confinamento elimina os efeitos de embricamento e impregnação do solo confinante no geotêxtil, como já mencionado anteriormente. Portanto, comparando-se os resultados de ensaios de um *mesmo geotêxtil* confinado em blocos de madeira sob diversas tensões confinantes, é possível verificar apenas o efeito da tensão no incremento de rigidez à tração dos geotêxteis ensaiados, uma vez que estão eliminados os efeitos da interação entre solo e geotêxtil.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam os gráficos da rigidez à tração dos geotêxteis GA e GB, respectivamente, confinados em madeira para várias deformações, em função da tensão confinante. Nos ensaios com geotêxteis GA (Figura 5.11), verificou-se que o aumento da tensão confinante de 50 para 100 kPa promoveu um incremento de 15% na rigidez à tração do geotêxtil e o aumento da tensão de 100 para 150 kPa promoveu um incremento de quase 10% na rigidez (considerando valores de rigidez para deformação de 2%). Os incrementos de rigidez verificados nas amostras de geotêxtil GB (Figura 5.12) foram um pouco menores: em torno de 12 e 13%, respectivamente, para os mesmos incrementos de tensão confinante aplicados no geotêxtil GA. As curvas carga-deformação e rigidez-deformação dos ensaios com amostras virgens confinadas em madeira estão apresentadas nas Figuras B.11 a B.16 no Apêndice B. Os gráficos da rigidez em função da tensão confinante são derivados das curvas rigidez versus deformação.

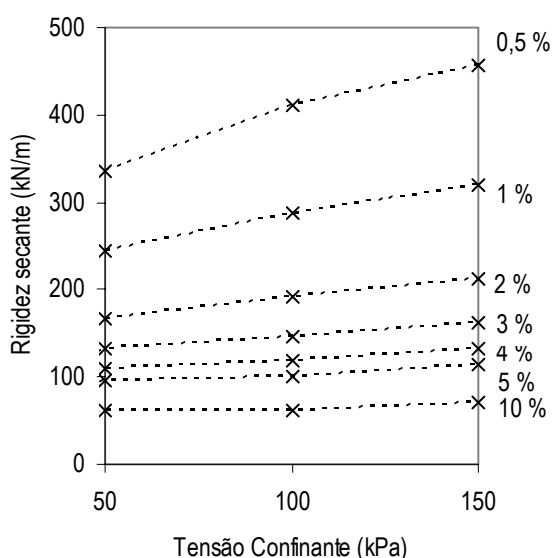


Figura 5.11 – Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GA confinado em madeira.

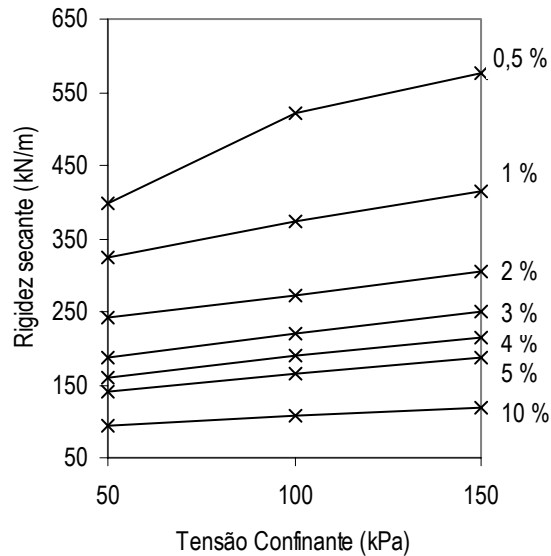


Figura 5.12 - Rigidez versus tensão confinante para geotêxtil GB confinado em madeira.

É importante observar nas curvas da rigidez em função da tensão confinante que para níveis maiores de deformação do geotêxtil, os incrementos de rigidez promovidos pelo aumento da tensão confinante são menores, ou seja, para grandes deformações, o aumento da tensão confinante não promove incrementos significativos de rigidez à tração de geotêxteis.

Além das curvas rigidez em função da tensão confinante para os geotêxteis confinados em madeira, foram traçadas as curvas para as amostras confinadas em materiais granulares: ARC e ALB. A relação entre a rigidez à tração e a tensão confinante foi diferente para as três interfaces de confinamento, uma vez que cada material confinante promove um tipo de interação diferente com o geotêxtil, o que modifica a influência da tensão no comportamento à tração confinada destes materiais.

Nos ensaios com geotêxteis GA confinados em areia do Rio Corumbá (Figura 5.13), o aumento da tensão confinante de 50 para 100 kPa promoveu um incremento de 8% na rigidez à tração para uma deformação de 2%. Ao aumentar a tensão confinante de 100 para 150 kPa, esse incremento foi de 18%.

Nos ensaios com geotêxteis GB confinados na mesma areia, o aumento da tensão confinante de 50 para 100 kPa promoveu um incremento de 6% na rigidez à tração para uma deformação de 2% e para o aumento da tensão confinante de 100 para 150 kPa, esse incremento foi de 10%, como mostram as curvas da Figura 5.14.

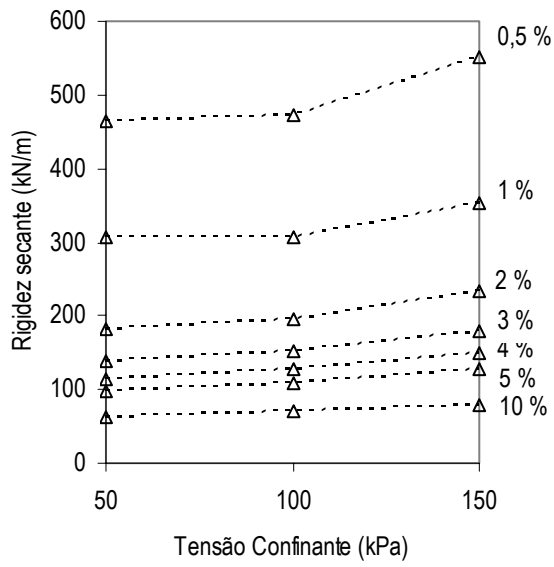


Figura 5.13 - Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GA confinado em areia do Rio Corumbá.

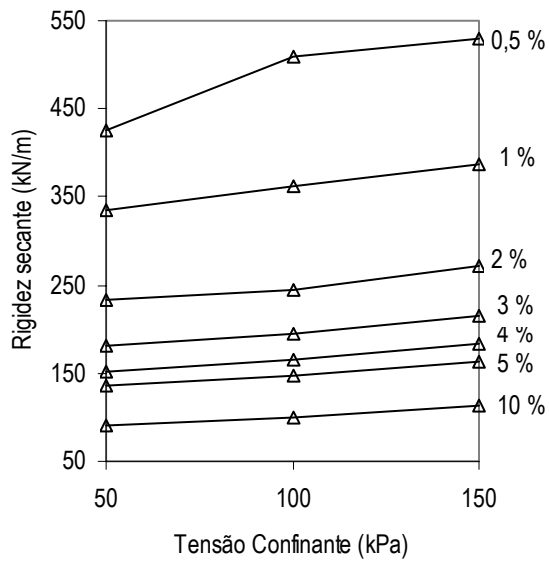


Figura 5.14 - Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GB confinado em areia do Rio Corumbá.

Novamente, a relação entre a rigidez à tração e a tensão de confinamento destes dois geotêxteis mostra que os maiores incrementos de rigidez promovidos pelo aumento da tensão confinante são observados para níveis menores de deformação.

Nos ensaios com geotêxteis GA usando areia Leighton Buzzard na interface de confinamento, o aumento da tensão confinante de 25 para 50 kPa promoveu um incremento de 12% na rigidez à tração do geotêxtil. Aumentando a tensão de 50 para 100 kPa o incremento foi de cerca de 13% e de 100 para 150 kPa, também 13% (incrementos verificados para deformações de 2%). Verifica-se, portanto uma relação quase linear de incremento de tensões com o aumento da tensão confinante a partir de 50 kPa, como mostra o gráfico da Figura 5.15. Vários autores também observaram uma relação praticamente linear entre a rigidez à tração e a tensão confinante do geotêxtil: Gomes (1993a e 1993b), Tupa (1994), Tupa e Palmeira (1995), Palmeira et al. (1996), Yuan et al. (1998) e Martins (2000a).

Nos ensaios com geotêxteis GB verificou-se a mesma tendência de linearidade da função rigidez versus tensão confinante observada nos resultados obtidos para os geotêxteis GA, como mostra o gráfico da Figura 5.16. O incremento de rigidez devido ao aumento da tensão confinante de 25 para 50 kPa foi de 15%, assim como o incremento observado ao aumentar a tensão de 50 para 100 kPa. Ao aumentar a tensão confinante de 100 para 150 kPa o incremento de rigidez observado foi de cerca de 14%, para deformação de 2%.

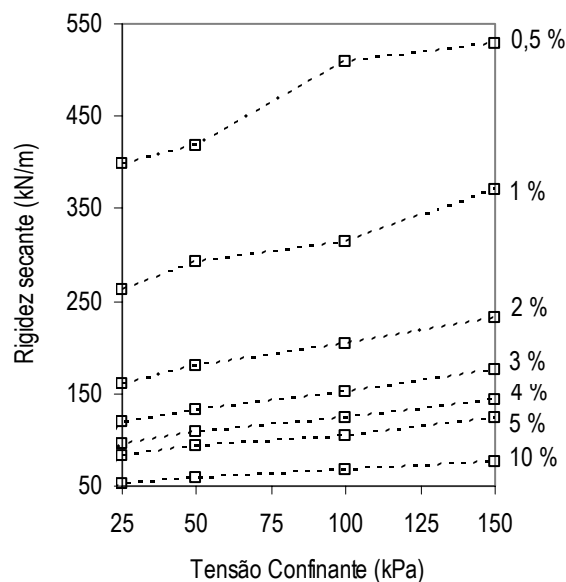


Figura 5.15 - Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GA confinado em areia Leighton Buzzard.

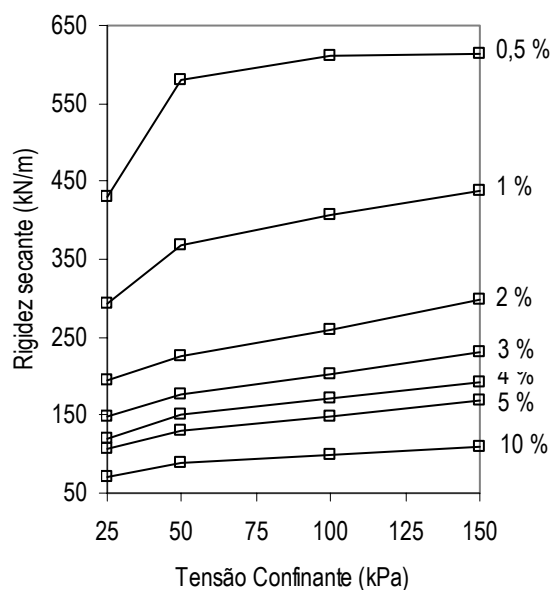


Figura 5.16 - Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GB confinado em areia Leighton Buzzard.

Verifica-se que, com exceção dos resultados obtidos para os geotêxteis confinados em ALB, os incrementos de rigidez foram maiores para o geotêxtil de menor gramatura, GA. Estes resultados sugerem que a ação do confinamento é mais relevante em geotêxteis menos densos, onde os filamentos naturalmente encontram-se mais espaçados, permitindo que a tensão confinante promova uma maior densificação da estrutura, como observado por Gomes (1993a). Portanto, o tamanho dos vazios destes geotêxteis é maior, possibilitando uma maior intrusão de grãos (provenientes do material confinante) na manta, o que poderia contribuir para o aumento na rigidez das amostras.

### 5.1.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERFACE DE CONFINAMENTO

As diferentes interfaces de confinamento provocam diferentes tipos de interação entre o solo e o geotêxtil. O confinamento em blocos de madeira elimina os efeitos de embricamento e impregnação, fazendo com que o incremento de rigidez do geotêxtil seja governado preponderantemente pela tensão confinante. O confinamento dos geotêxteis em materiais de granulometria mais fina, como siltes, pode contribuir para o incremento de rigidez, devido aos efeitos de impregnação (Tupa, 1994). No caso de solos de granulometria maior, como a brita, o efeito do embricamento pode prevalecer sobre a tensão confinante devido à não continuidade da área de contato entre o solo e o reforço (Azambuja, 1994).

Sabendo que a intrusão de grãos nos vazios da manta pode interferir no comportamento carga-alongamento do geotêxtil não tecido, espera-se que materiais confinantes de menor granulometria promovam um maior incremento nos valores de rigidez à tração do que materiais de maior granulometria, como verificado por Tupa (1994). A análise da influência da interface de confinamento foi feita por meio de comparações entre o comportamento carga-alongamento de geotêxteis de mesma gramatura, submetidos às mesmas tensões confinantes e confinados em materiais diferentes.

As curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA submetidos à tensão de confinamento de 50 kPa em diversas interfaces de confinamento estão apresentadas do gráfico da Figura 5.17. As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam as mesmas curvas para tensões confinantes de 100 e 150 kPa, respectivamente. Por meio dos resultados destes ensaios, verificou-se que o confinamento promovido por materiais granulares (ARC e ALB) provocou incrementos de rigidez ligeiramente maiores do que o confinamento promovido por blocos de madeira. Os valores de rigidez observados nas amostras confinadas por materiais granulares são até 9% maiores que os observados em amostras do mesmo geotêxtil confinado em blocos de madeira. No entanto essa diferença dos valores de rigidez observados para cada interface de confinamento pode ser devida apenas a uma dispersão natural dos resultados, uma vez que as curvas apresentam uma tendência muito semelhante.

Com base nos resultados de Tupa (1994), esperava-se que os geotêxteis GA confinados em areia de granulometria mais fina (areia fina a média proveniente do Rio Corumbá) apresentassem valores de rigidez maiores que aqueles confinados em areia grossa (areia Leighton Buzzard). No entanto, o que se verificou nos ensaios foi um comportamento muito parecido entre os geotêxteis confinados nos dois materiais granulares, contrariando as expectativas de que a ARC promoveria uma maior impregnação, contribuindo para aumentar ainda mais a rigidez à tração dos geotêxteis.

Talvez o método de preparação das amostras de solo confinante, chuva de areia, não tenha contribuído para promover uma impregnação significativa a ponto de possibilitar a verificação da influência da granulometria do material confinante na rigidez à tração dos geotêxteis. Aliás, o grau de impregnação médio dos geotêxteis GA promovido pela ARC foi de 1,12 e o promovido pela ALB, de 0,17. Apesar de o primeiro ser 6 vezes maior que o segundo, ainda assim são graus de impregnação muito pequenos e não permitem esta análise.

Vale ressaltar, ainda, que a ARC apresenta granulometria maior que o silte usado por Tupa (1994). Portanto, talvez os grãos da areia fina a média (ARC) realmente não sejam suficientemente finos para promover uma impregnação significativa nos geotêxteis.

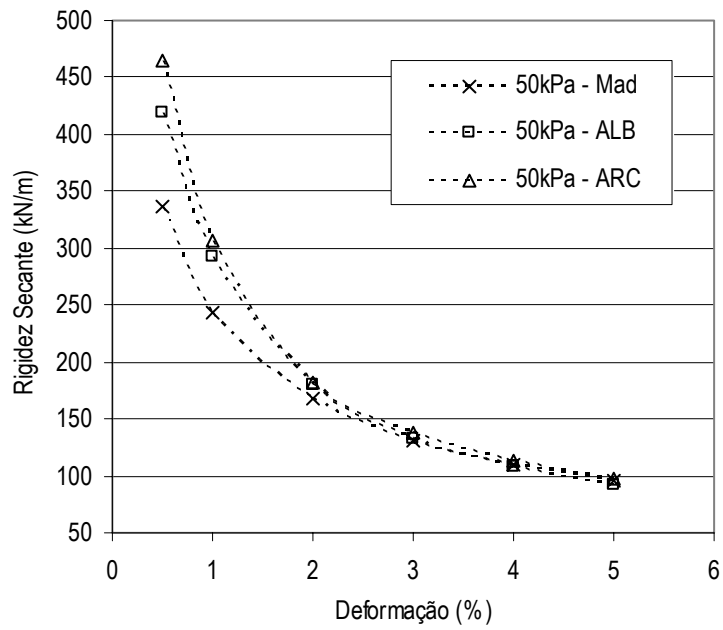


Figura 5.17 – Rigidez de Geotêxteis GA em diversas interfaces de confinamento – 50 kPa

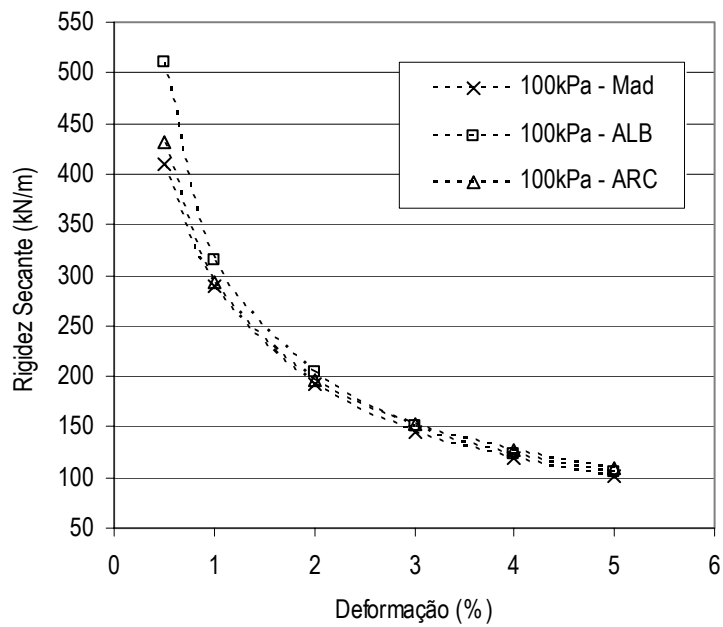


Figura 5.18 - Rigidez de Geotêxteis GA em diversas interfaces de confinamento – 100 kPa



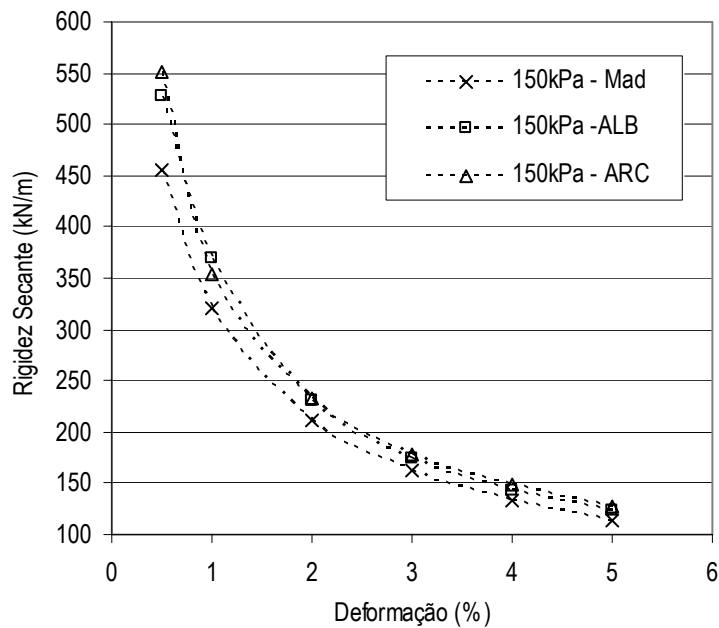


Figura 5.19 - Rigidez de Geotêxteis GA em diversas interfaces de confinamento – 150 kPa

Nos resultados obtidos dos ensaios com geotêxteis GB verificou-se que, para tensões confinantes menores, como 50 kPa (Figura 5.20), os valores de rigidez dos geotêxteis pouco se alteram com a interface de confinamento. Para tensões de 100 kPa (Figura 5.21) e de 150 kPa (Figura 5.22), verifica-se que o material confinante está exercendo uma influência ligeiramente maior nos valores de rigidez do geotêxtil do que para tensão confinante de 50 kPa. Mesmo assim, fica claro, nos três gráficos, que o material confinante está influenciando pouco a rigidez à tração dos geotêxteis GB.

Ao contrário dos geotêxteis GA, que por apresentarem maior abertura entre as fibras devido à sua menor gramatura são mais susceptíveis à impregnação, os geotêxteis GB se apresentam como uma estrutura mais fechada e mais espessa, dificultando a intrusão de grãos nos vazios da manta, o que resultou em um grau de impregnação máximo promovido durante a preparação da amostra de solo confinante (chuva de areia) de apenas 0,7. Sendo assim, o comportamento do geotêxtil GB confinado em blocos de madeira, ALB ou ARC tende a ser muito parecido, como constatado nos resultados. É importante lembrar que, no campo, podem ser registrados graus de impregnação um pouco maiores do que os promovidos durante o ensaio porque o processo de vibração e compactação da areia no campo pode ser mais propício para a intrusão de grãos na manta do que a chuva de areia (método adotado para a preparação das amostras de solo confinante no ensaio de tração confinada).

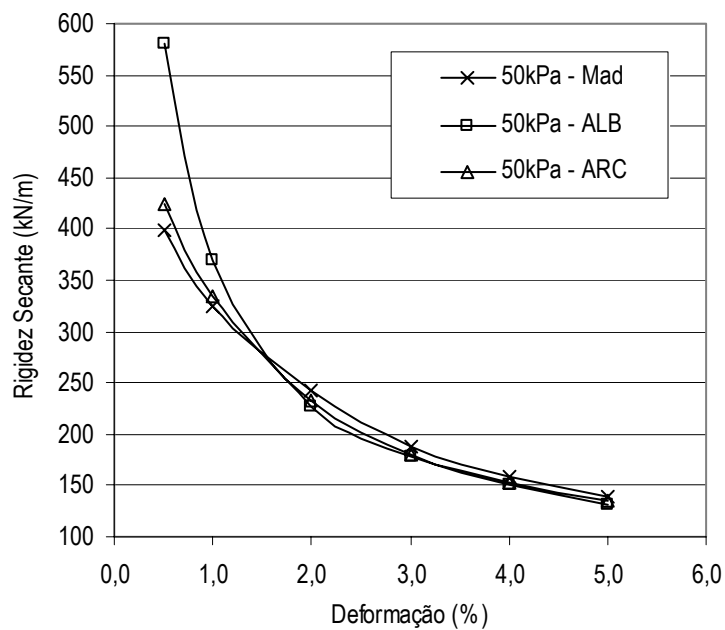


Figura 5.20 - Rigidez de Geotêxteis GB em diversas interfaces de confinamento – 50 kPa

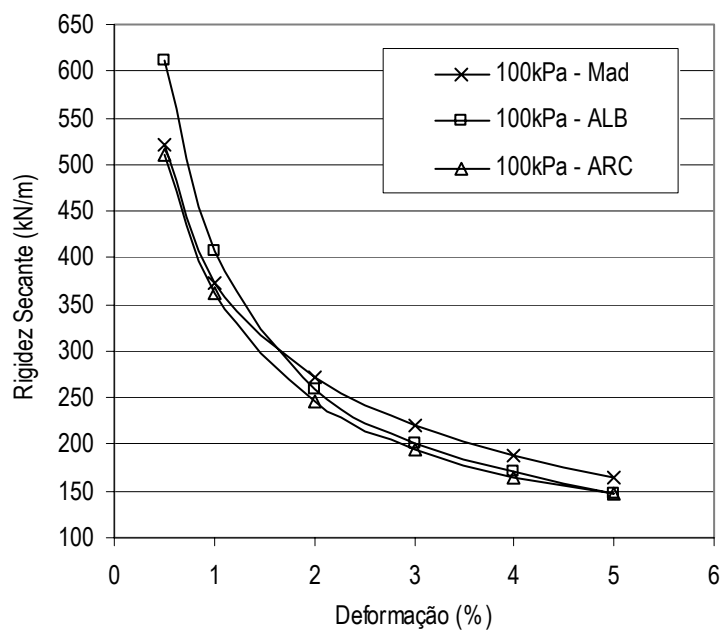


Figura 5.21 - Rigidez de Geotêxteis GB em diversas interfaces de confinamento – 100 kPa

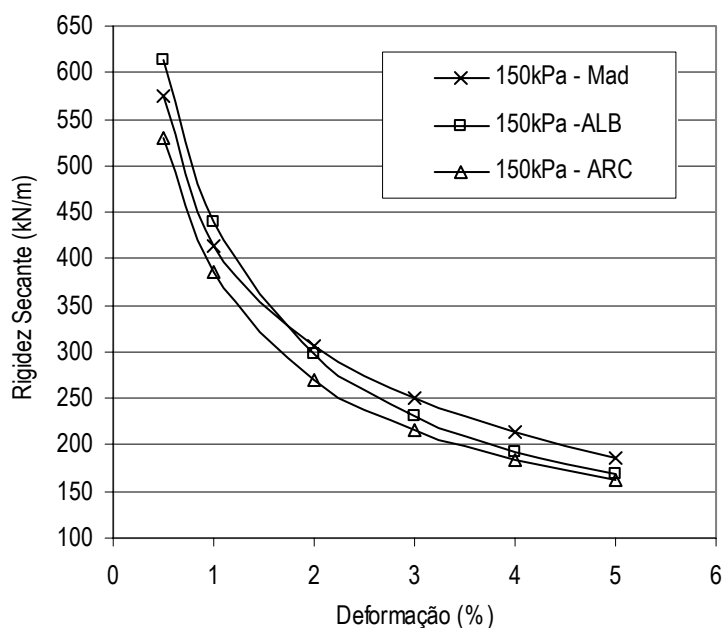


Figura 5.22 - Rigidez de Geotêxteis GB em diversas interfaces de confinamento – 150 kPa

De maneira geral, os ensaios de tração confinada com geotêxteis virgens comprovam que a rigidez do reforço depende das características do geotêxtil, da impregnação, do embricamento e da tensão confinante. Portanto, cada obra deve se comportar de forma diferente de acordo com as características dos materiais utilizados, dificultando uma padronização dos ensaios de tração confinada.

No entanto, a semelhança de comportamento entre os geotêxteis confinados em materiais granulares e em blocos de madeira é um indicativo de que a utilização destes materiais na interface de confinamento seja suficiente para a avaliação do comportamento mecânico de geotêxteis em ensaios de tração confinada. Ling et al. (1992) também verificaram que o comportamento de geotêxteis confinados por materiais de superfície lisa (neste caso foram utilizadas membranas de borracha) e por materiais arenosos graúdos é muito parecido, concluindo que a utilização das membranas é suficiente para a avaliação do comportamento carga-alongamento dos geotêxteis confinados.

Neste contexto, sugere-se que o ensaio de tração confinada seja normatizado adotando-se como interface de confinamento materiais rígidos (como blocos de madeira com rigidez padronizada) com superfícies lisas e protegidas com duas camadas de filme plástico lubrificados. Desta forma, considera-se apenas o efeito da tensão de confinamento eliminando-se os efeitos de embricamento e impregnação (que dependem das características do solo confinante), que contribuiriam para aumentar ainda mais a rigidez à tração dos geotêxteis ensaiados. Os ensaios usando solos como material confinante ficariam restritos aos

casos específicos em que houvesse o interesse em verificar o incremento real de rigidez à tração que o material de interface promoveria ao reforço geotêxtil, lembrando que, nestes casos, os valores de rigidez encontrados nos ensaios não poderiam ser usados como parâmetros em projetos de reforço outros tipos de solo.

Ressalta-se que a substituição de materiais de granulometrias maiores (como a brita) por materiais de superfície lisa nos ensaios de tração confinada não é recomendada uma vez que a superfície contínua do bloco de madeira (ou membrana de borracha) não condiz com a superfície de contatos pontuais entre o reforço e os grãos de solos grossos. Azambuja (1994) verificou que, devido a não continuidade da área de contato entre uma brita e o reforço, o efeito do embricamento se sobressai sobre o confinamento. Desta forma, a superfície plana de confinamento poderia superestimar os valores de rigidez resultando em projetos contra a segurança.

## 5.2. ENSAIOS COM AMOSTRAS IMPREGNADAS

A impregnação das amostras de geotêxtil não tecido é um fator que pode contribuir para aumentar a rigidez à tração deste material, visto que os grãos intrusos nos vazios da manta funcionam como obstáculos adicionais contra a movimentação dos filamentos quando solicitados à tração, dificultando a reorganização destes filamentos. Assim, é de se esperar que quanto maior a impregnação, maior a rigidez à tração do geotêxtil, favorecendo seu comportamento como reforço no sentido de reduzir as deformações necessárias na estrutura para a mobilização de esforços de tração no geotêxtil.

Na presente pesquisa, durante os ensaios de tração confinada de amostras virgens utilizando materiais granulares na interface de confinamento, o processo de preparação das amostras de solo, por meio de chuva de areia, promoveu certa impregnação das amostras geotêxteis, devido à intrusão dos grãos do próprio material usado no confinamento. No entanto, esta impregnação foi muito pequena comparada à que pode ocorrer no campo, uma vez que o processo de chuva de areia não simula as vibrações e o processo de compactação do aterro sobre o geotêxtil, como ocorre no campo. Portanto, com o intuito de provocar impregnações maiores, para verificar como o *grau de impregnação* influencia a rigidez à tração do geotêxtil, algumas amostras foram impregnadas manualmente (de acordo com o procedimento descrito no item 4.1.1.2) até atingirem dois graus de impregnação fixos:  $\lambda_1 = 4$  ou  $\lambda_2 = 8$ . Para evitar uma impregnação adicional devido à preparação do material confinante, foram utilizados blocos de madeira na interface de confinamento.

Além do grau de impregnação foi feito o estudo da influência da *forma dos grãos* impregnados na rigidez à tração do geotêxtil. Para possibilitar esse estudo, foram selecionadas microesferas de vidro (EV) e areia fina (AF), dois materiais granulares com formatos bem diferentes e curvas granulométricas semelhantes (descritos no item 3.2.3). Os resultados dos ensaios em ambos os geotêxteis indicaram que tanto o grau de impregnação quanto o formato dos grãos intrusos na manta influenciam a rigidez secante à tração dos geotêxteis ensaiados, como será discutido nos itens seguintes. A Tabela 5.2 sumaria o programa de ensaios de tração confinada feitos com geotêxteis impregnados e os respectivos valores de rigidez à tração determinados para deformações de 2%.

Tabela 5.3 - Ensaios de amostras impregnadas.

Tipo de Geotêxtil	Material Confinante	Material impregnado	Grau de Impregnação	Tensão Confinante (kPa)	J <sub>sec</sub> 2% deformação (kN/m)		Nº ensaios
					GA	GB	
GA GB	Madeira (Mad)	-	Virgem	0	35*	51*	-
		-	Virgem (VG)	50	167	243	6
				100	193	271	
				150	212	306	
		Microesferas de Vidro (EV)	$\lambda_1 = 4$	100	199	310	8
				150	218	369	
			$\lambda_2 = 8$	100	210	390	
				150	225	410	
		Areia Fina (AF)	$\lambda_1 = 4$	100	202	375	3
			$\lambda_2 = 8^{**}$	100	221	-	

\* Rigidez do geotêxtil submetido a ensaio de tração em faixa larga segundo NBR 12824/93 (Nascimento, 2006).

\*\*Ensaio feito somente com GA

### 5.2.1. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE IMPREGNAÇÃO

A análise da influência do grau de impregnação na rigidez à tração confinada dos geotêxteis foi feita por meio dos resultados de ensaios de amostras impregnadas com microesferas de vidro (EV). A Figura 5.23 apresenta as curvas carga-deformação dos geotêxteis GA impregnados submetidos a tensão confinante de 100 kPa e a Figura 5.24 apresenta o gráfico rigidez-deformação correspondente. Os resultados destes ensaios mostram que o grau de impregnação igual a 4 promoveu um incremento de aproximadamente 3,5% na rigidez à tração, com relação à amostra não impregnada (virgem) a 2% de deformação. Para a amostra impregnada com grau de impregnação igual a 8 este incremento foi de 9%.

As Figuras 5.25 e 5.26, apresentam, respectivamente, as curvas carga-deformação e rigidez-deformação dos geotêxteis GA impregnados com microesferas de vidro sob tensão confinante de 150 kPa. Verifica-se que o grau de impregnação igual a 4 promoveu um aumento de cerca de 2,5% na rigidez à tração do geotêxtil e o grau de impregnação igual a 8 promoveu um aumento de pouco mais de 6% na rigidez à tração destes materiais (valores de rigidez obtidos para deformações iguais a 2%).

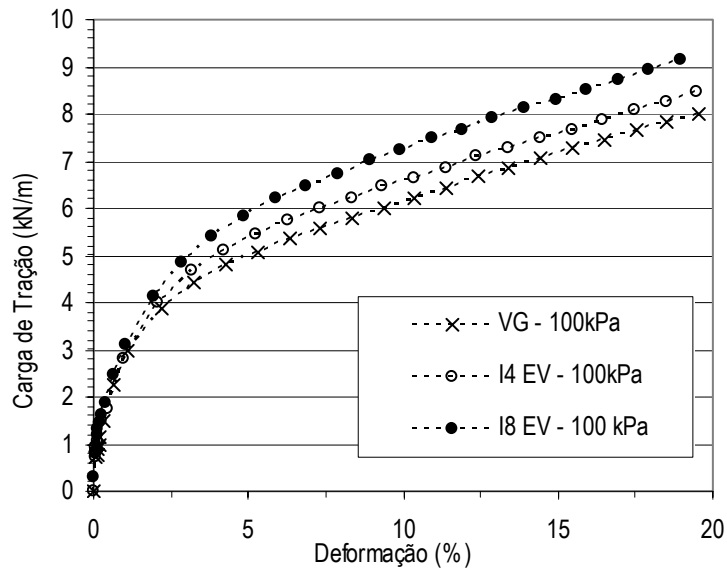


Figura 5.23 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA impregnados confinados a 100 kPa.

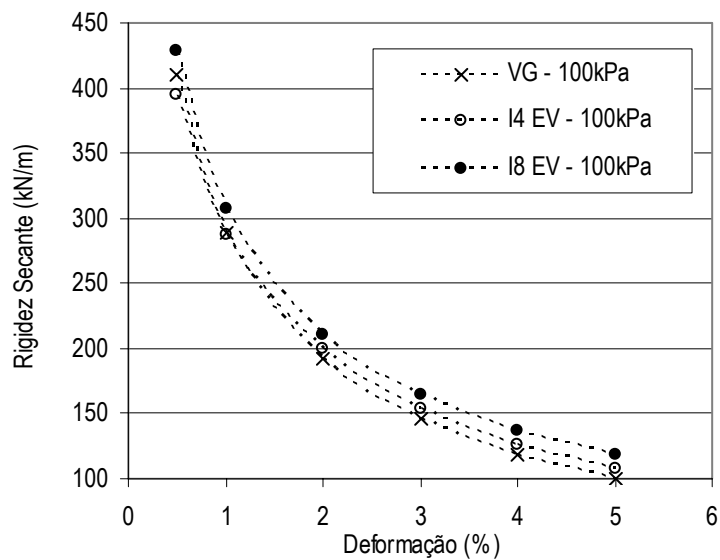


Figura 5.24 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA impregnados confinados a 100 kPa.

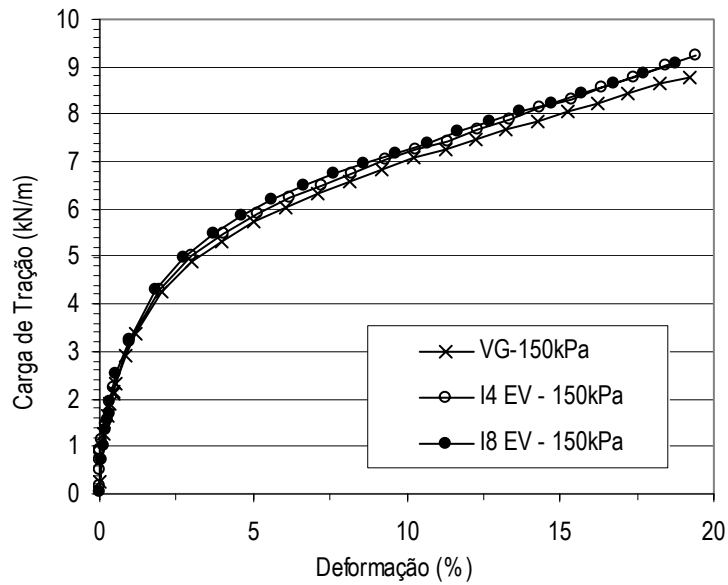


Figura 5.25 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA impregnados confinados a 150 kPa.

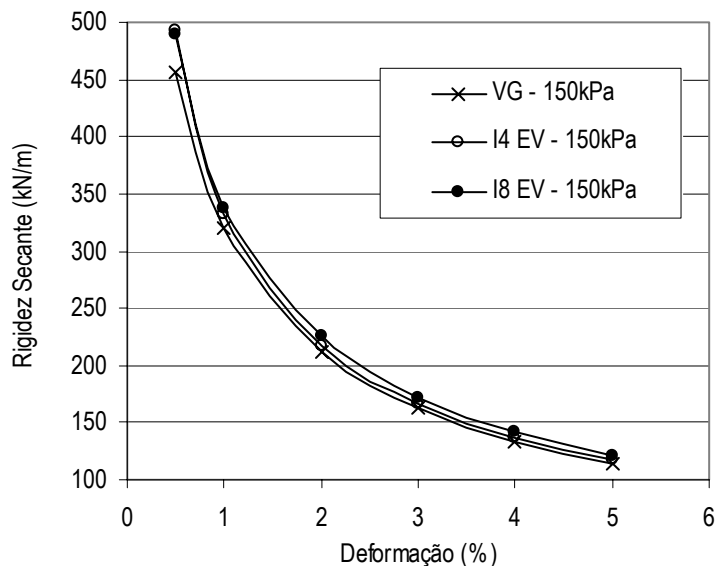


Figura 5.26 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA impregnados confinados a 150 kPa.

Estes resultados comprovam que o material granular impregnado na manta dificulta a movimentação dos filamentos quando o geotêxtil é solicitado à tração: se os filamentos contínuos do geotêxtil não tecido encontram-se entrelaçados em múltiplas direções, quanto mais obstáculos a serem vencidos (grãos impregnados ou mesmo outros filamentos), maior será a dificuldade em se deslocar e, assim, maior será a rigidez do geotêxtil.

Os resultados mostram, também, que nos geotêxteis confinados a 100 kPa, a impregnação promoveu maiores incrementos de rigidez do que nos geotêxteis confinados a 150 kPa. Sabendo que a tensão confinante contribui para reduzir a espessura da manta, aproximando os filamentos que a compõem, este resultado pareceu ser incoerente. No entanto, a impregnação é um fator que pode *reduzir a compressibilidade* da manta geotêxtil (Palmeira et al., 2005), como mostra o gráfico da Figura 5.27. Por isso, nos geotêxteis submetidos a altas tensões confinantes, a impregnação não promove um incremento de rigidez tão significativo quanto nos geotêxteis sob tensões confinantes menores.

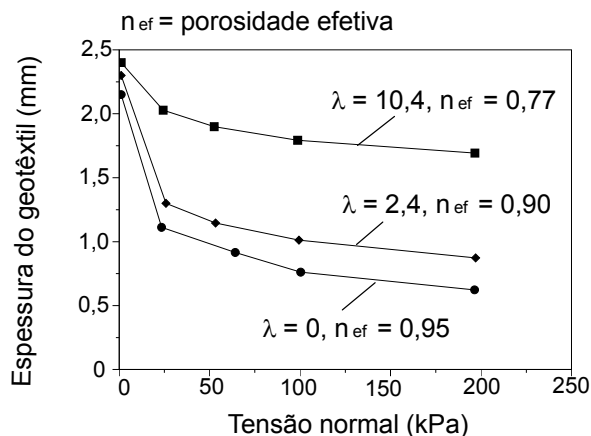


Figura 5.27 - Influência do confinamento e da impregnação na compressibilidade de geotêxteis não-tecidos (Palmeira et al., 2005).

Nos ensaios com geotêxteis GB impregnados, verificou-se a mesma tendência observada nos ensaios com amostras de geotêxteis GA; a rigidez à tração dos geotêxteis cresce com o grau de impregnação. No entanto, os incrementos de rigidez observados nos geotêxteis GB foram bem maiores. Na amostra com grau de impregnação igual a 4 confinada a 100 kPa, a rigidez à tração foi 15% maior que a do geotêxtil virgem para deformações de 2%. No caso da amostra com grau de impregnação igual a 8 esse aumento foi de 44%. A Figura 5.28 apresenta as curvas carga-deformação das amostras GB impregnadas sob tensão confinante de 100 kPa e a Figura 5.29 apresenta as curvas rigidez-deformação destas amostras.



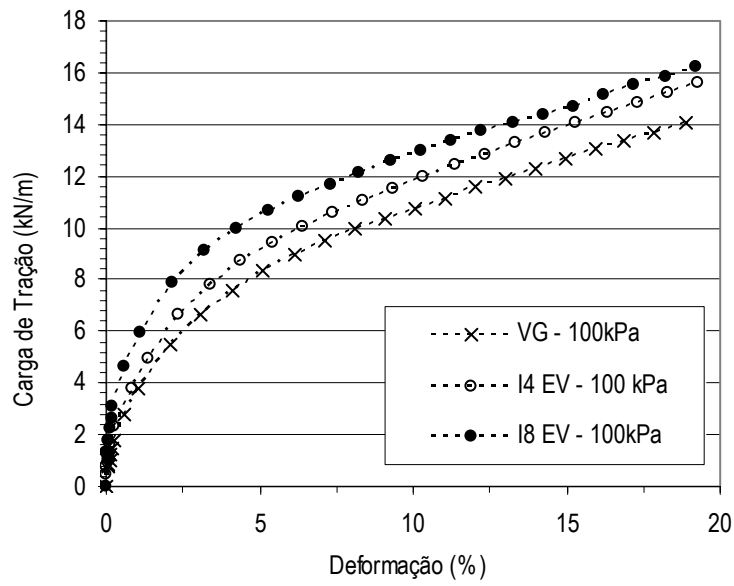


Figura 5.28 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GB impregnados confinados a 100 kPa.

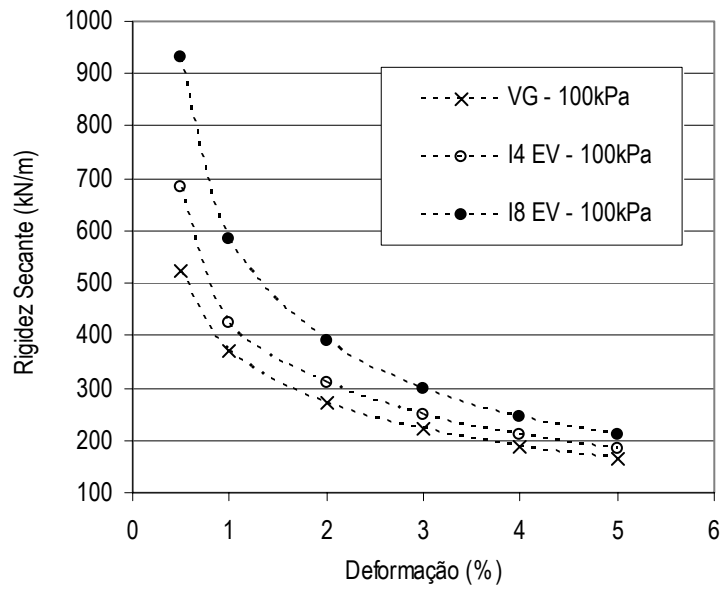


Figura 5.29 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GB impregnados confinados a 100 kPa.

As curvas carga-deformação dos geotêxteis GB impregnados, submetidos à tensão confinante de 150 kPa, estão apresentadas na Figura 5.30 e as curvas rigidez-deformação correspondentes, na Figura 5.31. Verifica-se, nestes resultados, que os graus de impregnação iguais a 4 e 8 promovem incrementos de rigidez de aproximadamente 20,5 e 34%, respectivamente (considerando valores de rigidez obtidos para deformações de 2%).

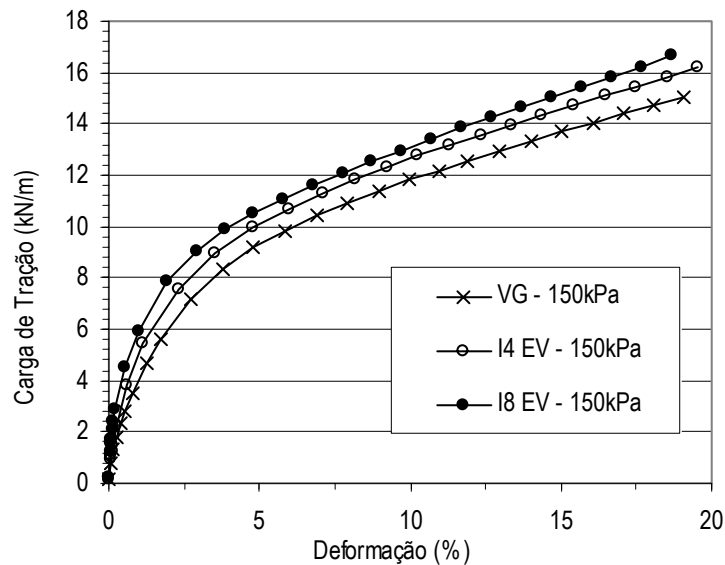


Figura 5.30 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GB impregnados confinados a 150 kPa.

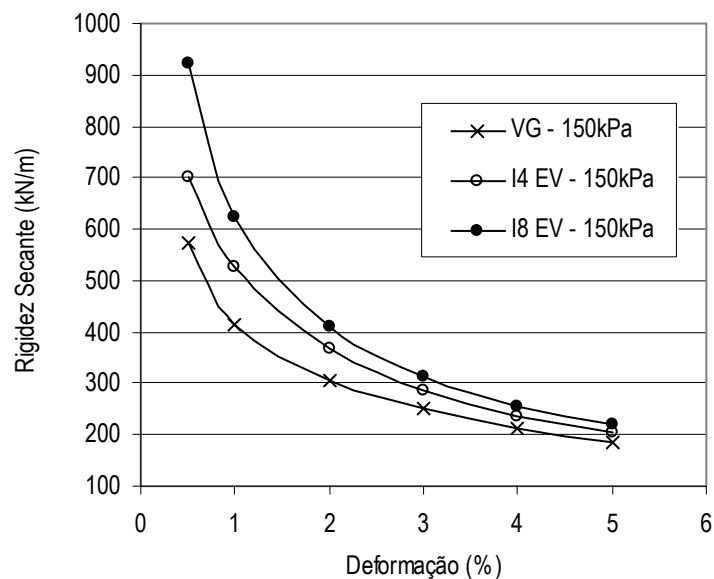


Figura 5.31 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GB impregnados confinados a 150 kPa.

Valores tão altos de incrementos de rigidez devido à impregnação podem ser entendidos: como o geotêxtil GB é mais denso que o GA, um mesmo grau de impregnação provoca um fechamento muito mais intenso nos vazios do geotêxtil GB, dificultando de forma mais severa a movimentação dos filamentos quando o geotêxtil é solicitado à tração e, assim, aumentando de forma significativa seus valores de rigidez.

Esse resultado pode ser mais bem ilustrado ao relacionar os valores de rigidez à tração com o índice de vazios remanescentes da manta impregnada ( $d$ ) que pode ser calculado a partir da Equação 5.1, derivada da Equação 5.2, fornecida por Palmeira et al. (2005).

$$d = 100 - p \quad (5.1)$$

$$p = 100 \frac{\mu \cdot \lambda}{n \cdot \rho_s \cdot t_{GT}} \quad (5.2)$$

Onde:

$d$  = porcentagem remanescente de vazios (%);

$p$  = fração do volume de vazios do geotêxtil ocupada por grãos de solo (%);

$\mu$  = gramatura do geotêxtil;

$\lambda$  = grau de impregnação do geotêxtil;

$n$  = porosidade do geotêxtil;

$\rho_s$  = massa específica dos grãos de solo;

$t_{GT}$  = espessura do geotêxtil.

Palmeira et al. (2005) relacionaram o valor de  $p$ , determinado por meio da Equação 5.2, com os valores de  $\lambda$  para geotêxteis de gramaturas diferentes. Como se verifica no gráfico da Figura 5.32, o geotêxtil de menor gramatura (200 g/m<sup>2</sup>) apresenta as menores frações de volume de vazios ocupado por grãos de solo ( $p$ ), ou seja, para este geotêxtil, o volume de vazios remanescentes na manta ( $d$ ) é maior do que para aqueles de maior gramatura, o que indica uma maior liberdade de movimentação dos filamentos quando submetidos a solicitações de tração.

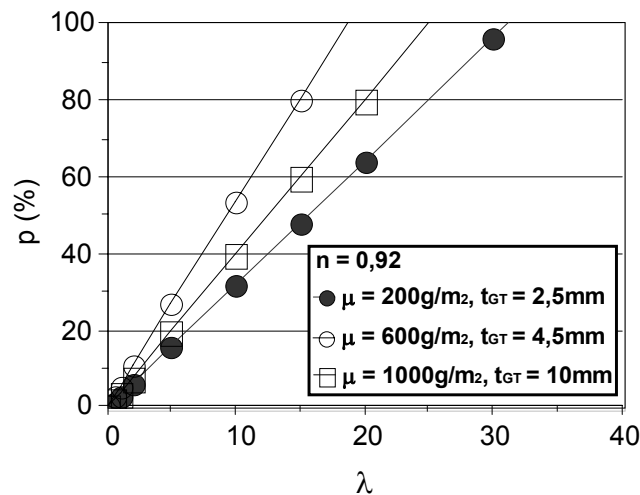


Figura 5.32 – Variação de  $p$  com  $\lambda$  (Palmeira et al., 2005).

Utilizando as Equações 5.1 e 5.2 para determinar os percentuais de volumes ocupados pelos grãos ( $p$ ) e volumes remanescentes ( $d$ ) dos geotêxteis GA e GB impregnados por microesferas de vidro, comprova-se que para um mesmo grau de impregnação a porcentagem de vazios remanescentes dos geotêxteis GB é menor que a dos geotêxteis GA (Tabela 5.4). Com este resultado fica mais fácil entender porque a impregnação provoca maiores incrementos de rigidez nos geotêxteis mais densos (neste caso, GB): a fração de vazios remanescentes é menor, assim os filamentos têm menos espaços disponíveis para se deslocar.

Tabela 5.4 – Porcentagem de vazios remanescentes de geotêxteis impregnados com EV.

Geotêxtil	$\mu$ (g/m <sup>2</sup> )	$\lambda$	$n$	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$t_{GT}$ (mm)	$d$ (%)	$p$ (%)
GA	200	4	0,94	2,44	1,72	79,7	20,3
GB	400	4	0,90	2,44	2,89	74,8	25,2
GA	200	8	0,94	2,44	1,72	59,4	40,6
GB	400	8	0,90	2,44	2,89	49,6	50,4

Sendo valores de  $n$  e  $t_{GT}$  adotados: Gardoni e Palmeira (2002).

Plotando-se os valores de rigidez secante a 2% de deformação dos geotêxteis GA e GB impregnados com microesferas de vidro em função da porcentagem de volume de vazios remanescentes (Figura 5.33), verifica-se que a relação entre estes dois parâmetros é inversamente proporcional e praticamente linear.

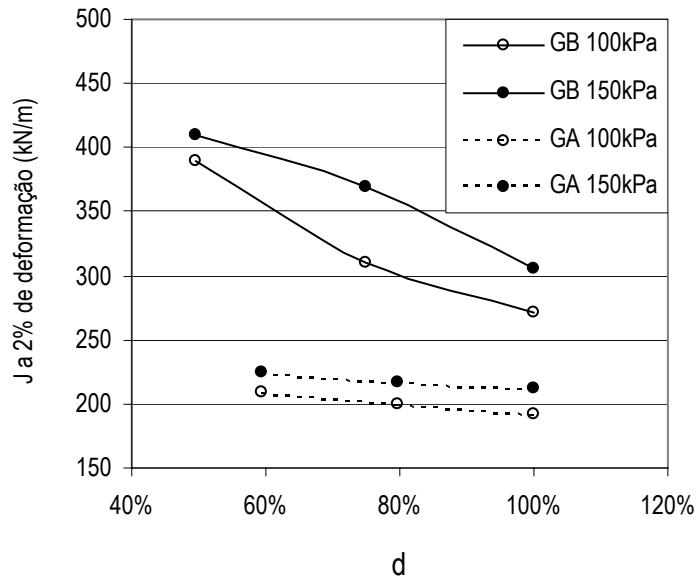


Figura 5.33 – Variação de J com d para geotêxteis impregnados com EV.

Os resultados dos ensaios com geotêxteis impregnados confirmam que, além da tensão confinante promovida pela altura de aterro sobre o reforço, a intrusão de grãos na manta geotêxtil também é um fator importante a ser considerado nas análises de comportamento carga-alongamento destes materiais, o que pode ser melhor evidenciado comparando-se os valores de rigidez dos geotêxteis impregnados e confinados com os valores de rigidez dos geotêxteis virgens em ensaios de tração simples. Estes resultados reforçam os benefícios em adotar valores de rigidez à tração obtidos por meio de ensaios de tração confinada, especialmente dos geotêxteis não tecidos, onde a impregnação mostra ter um efeito significativo na rigidez, contribuindo para a mobilização de esforços de tração sob menores deformações do maciço reforçado.

### 5.2.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO MATERIAL IMPREGNADO

A análise da influência do formato dos grãos do material impregnado no incremento de rigidez à tração promovido por certo grau de impregnação, foi feita comparando-se os valores de rigidez obtidos em amostras de geotêxteis impregnadas com dois materiais de granulometrias semelhantes e forma e textura bem diferentes: areia fina de grãos subangulares (AF) e microesferas de vidro (EV). Em geral observou-se que a areia fina impregnada promove um maior incremento de rigidez do que as microesferas de vidro.

Nas Figuras 5.34 e 5.35 estão apresentadas, respectivamente, as curvas carga-deformação e rigidez-deformação obtidas nos ensaios com o geotêxtil GA. Nestes ensaios, um

grau de impregnação igual a 4 com microesferas de vidro promoveu um incremento de rigidez de cerca de 3,5% com relação ao geotêxtil virgem. A mesma impregnação provocada por areia fina provocou um incremento de rigidez um pouco maior: quase 5%. Nos resultados com grau de impregnação igual a 8, verificou-se que usando microesferas de vidro o incremento de rigidez foi de 9% enquanto que usando areia fina este incremento foi de aproximadamente 14,5%.

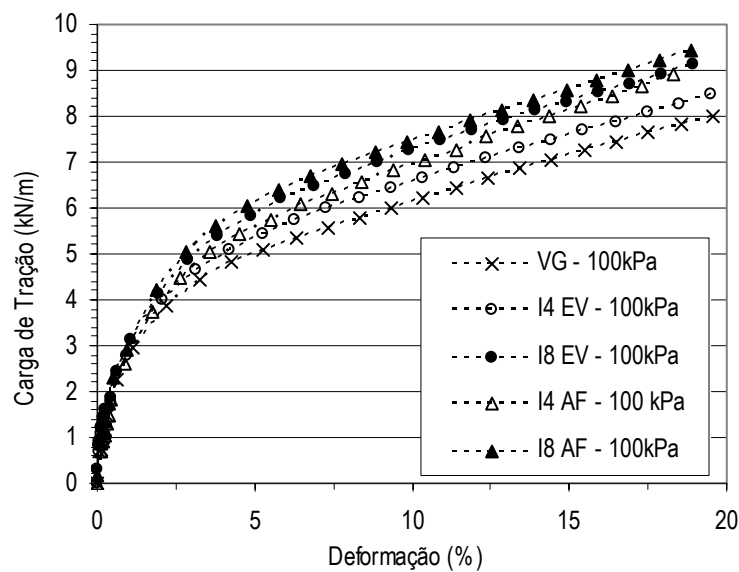


Figura 5.34 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA impregnados com EV e AF.

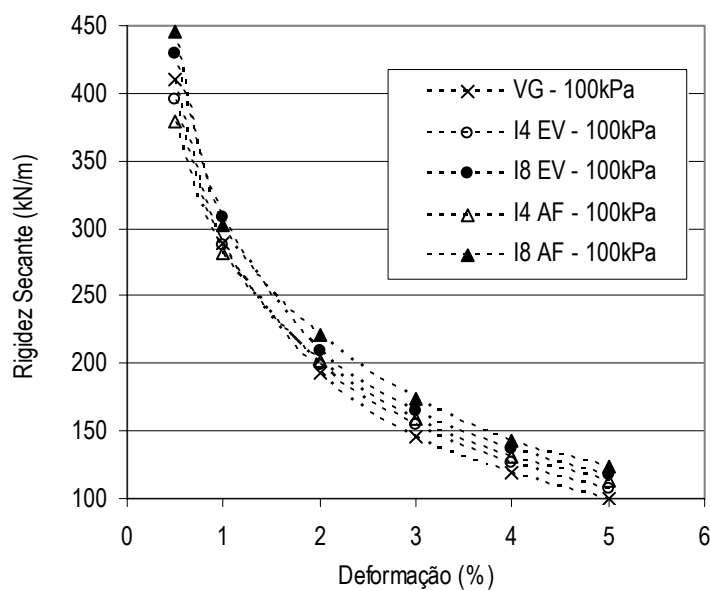


Figura 5.35 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA impregnados com EV e AF.

Com o geotêxtil GB não foi possível atingir grau de impregnação igual a 8 com areia fina, por isso foi feito apenas o ensaio com grau de impregnação igual a 4 com este material. O incremento de rigidez promovido pela impregnação com areia fina foi de 38%, significativamente maior que o incremento promovido pela impregnação com microesferas de vidro, 15%, como mostram as Figuras 5.36 e 5.37.

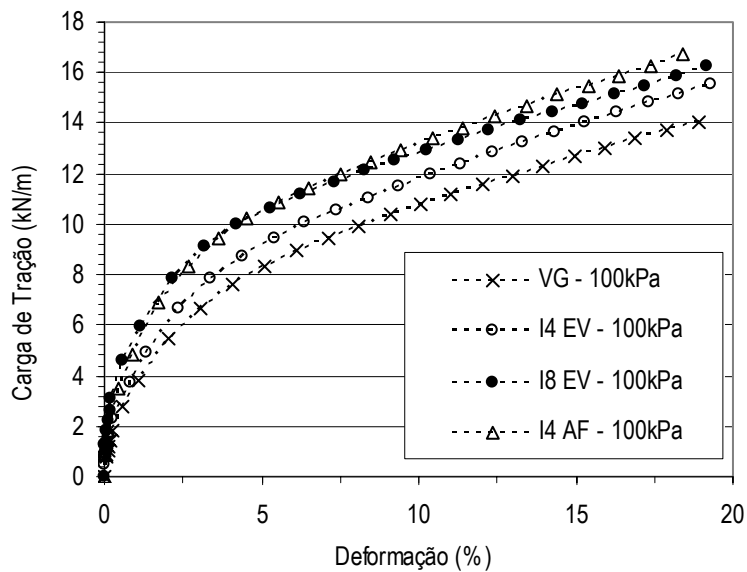


Figura 5.36 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GB impregnados com EV e AF.

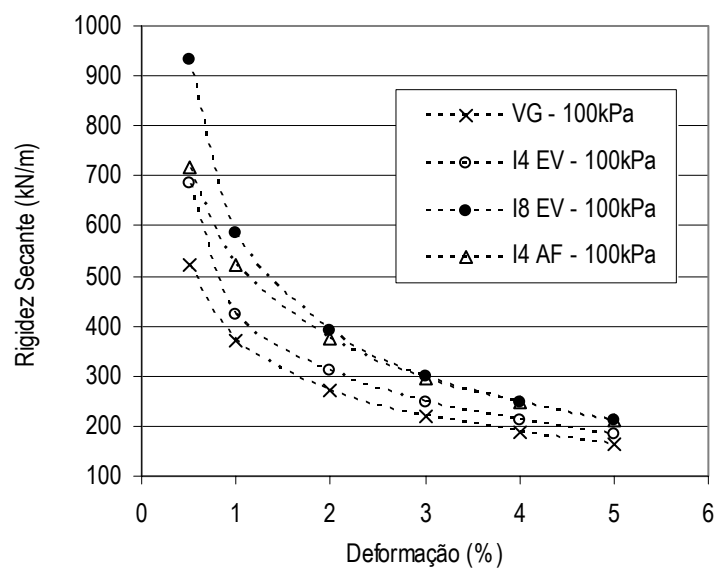


Figura 5.37 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GB impregnados com EV e AF.

Note-se que, nos gráficos das figuras apresentadas, os valores de rigidez dos geotêxteis impregnados com AF com  $\lambda = 4$  são bem próximos dos valores verificados nos geotêxteis impregnados com EV com  $\lambda = 8$ , comprovando que a forma e textura dos grãos são fatores que exercem uma influência significativa na reorientação dos filamentos quando o geotêxtil é submetido à solicitação de tração. Os grãos sub-angulares da AF certamente provocam tensões de atrito maiores no contato com os filamentos, dificultando que estes deslizem sobre aqueles, ao contrário das microesferas de vidro que são obstáculos mais fáceis de serem vencidos pelos filamentos uma vez que grãos são arredondados e lisos.

### **5.3. ENSAIOS COM AMOSTRAS COM DANOS MECÂNICOS INDUZIDOS**

Os danos mecânicos podem ser entendidos como transformações na estrutura do geossintético causando a ruptura localizada de filamentos ou deslocamento relativo entre eles. O manuseio, esforços de instalação e a compactação do aterro sobre o reforço geotêxtil podem causar danos mecânicos no mesmo, prejudicando o seu comportamento carga-alongamento. Durante a vida útil da obra, o geotêxtil também está sujeito a sofrer danos mecânicos devido a solicitações iniciais de serviço (Azambuja, 1994 e 1999). No entanto, os efeitos do confinamento da manta geotêxtil podem atuar nas propriedades remanescentes do geotêxtil danificado, tornando menores as conseqüências dos danos.

Com o intuito de verificar a influência dos danos mecânicos na rigidez à tração de geotêxteis submetidos a ensaios de tração confinada, foram feitos ensaios com as amostras geotêxteis submetidas a diversos danos mecânicos induzidos no laboratório conforme o procedimento descrito no item 4.1.1.3. Foram selecionados basicamente dois tipos de danos, rasgo horizontal (RH) e rasgo em “Y” (RY) com várias dimensões, com o intuito de estudar a influência da forma e da dimensão dos danos na rigidez à tração do geotêxtil confinado. Nos ensaios com amostras danificadas, o confinamento foi promovido pela areia de filtro da CAESB sob tensões de 100 kPa. Dois tipos de geotêxteis, GA e GC, foram utilizados nestes ensaios. Um ensaio adicional com tensão confinante de 50 kPa foi feito com o geotêxtil GA visando ressaltar a importância da tensão confinante no comportamento carga-alongamento deste tipo de reforço, mesmo danificado. A Tabela 5.4 sumaria o programa de ensaios de tração confinada feitos com geotêxteis danificados e os respectivos valores de rigidez à tração determinados para deformações de 2%.



Tabela 5.5 - Ensaios de amostras com danos mecânicos induzidos.

Tipo de Geotêxtil	Solo Confinante	Condição / Tipo de dano	Tensão Confinante (kPa)	J <sub>sec</sub> (2% de deformação) (kN/m)		Número de ensaios
				GA	GC	
GA GC	-	Virgem (VG)	0	35*	69*	-
	Areia CAESB	Virgem (VG)	100	209	486	11
		RH10		201	471	
		RH25		196	350	
		RH50**		170	-	
		RY12,5		166	393	
		RY25**		157	-	
		RH50**		50	118	

RH10; RH25; RH50 = Rasgo Horizontal de 10, 25 e 50 mm respectivamente

RY12,5; RY25 = Rasgo em “Y” de 12,5 e 25 mm respectivamente

\* Rigidez do geotêxtil submetido a ensaio de tração em faixa larga segundo NBR 12824/93 (Nascimento, 2006).

\*\* Ensaios feitos somente com geotêxteis GA

Nos ensaios com geotêxteis GA (Figuras 5.38 e 5.39) foi possível verificar que a forma e a dimensão do dano influenciam a rigidez dos geotêxteis danificados. Verifica-se, nestas figuras, três “grupos” de curvas com comportamentos parecidos. O “grupo” que apresenta maiores valores de rigidez é composto pelas curvas rigidez-deformação do geotêxtil na condição virgem e com rasgos horizontais pequenos: RH10 e RH25. As perdas de rigidez dos geotêxteis submetidos a estes danos foram de aproximadamente 3,5 e 6% respectivamente comparado à amostras virgens sob a mesma tensão confinante (considerando os valores de rigidez para deformações de 2%).

O segundo “grupo”, que apresenta valores de rigidez menores, é composto pelas curvas dos geotêxteis submetidos aos seguintes danos: RH50, RY12,5 e RY25, cujas reduções verificadas nos valores de rigidez (para deformações de 2%), com relação à amostra virgem confinada a 100 kPa, são de aproximadamente 18, 20 e 25%, respectivamente.

Os valores de rigidez verificados no geotêxtil GA submetido a um dano do tipo RH50 confinado a 50 kPa são bem menores que os demais: a rigidez à tração, a 2% de deformação, é cerca de 44% menor que a rigidez da amostra virgem confinada a 100 kPa.

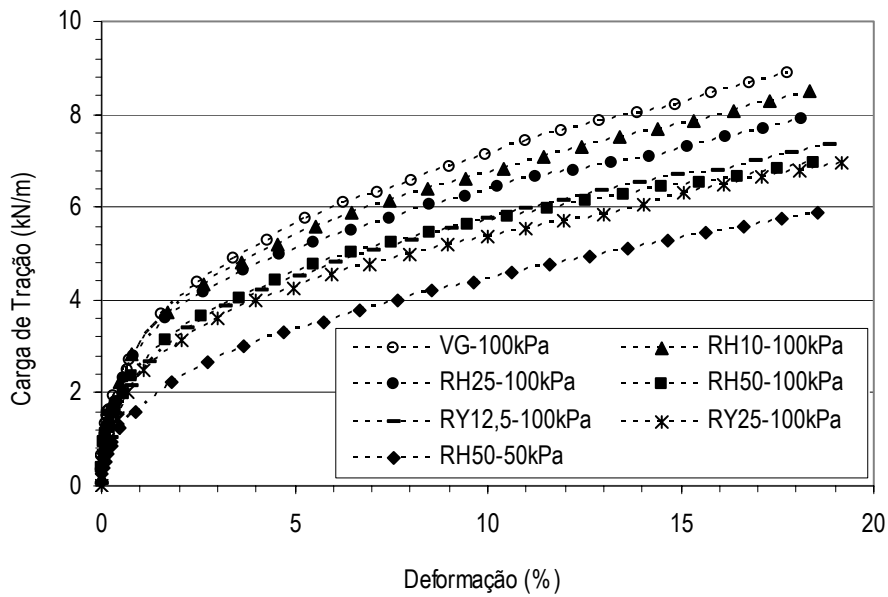


Figura 5.38 – Curvas carga-deformação de geotêxteis GA danificados.

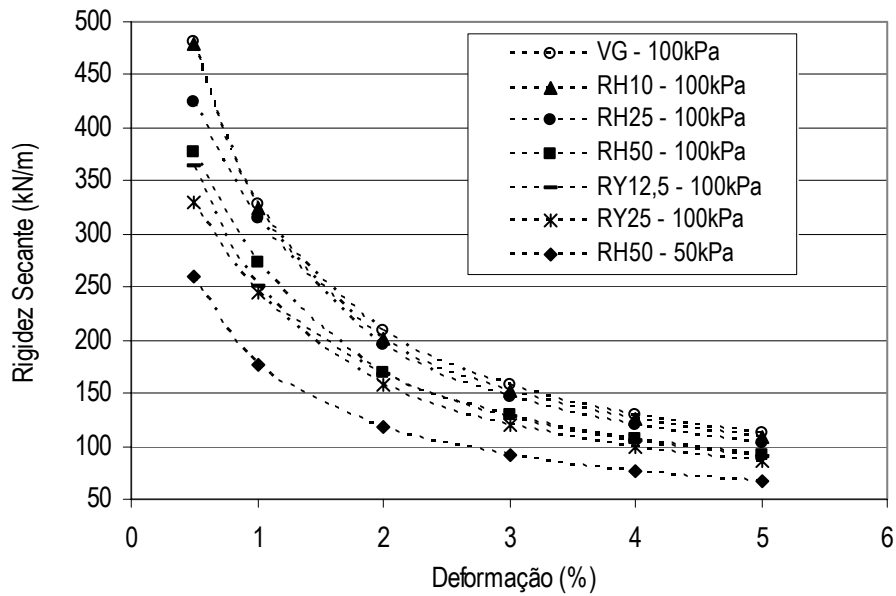


Figura 5.39 – Curvas rigidez-deformação de Geotêxteis GA danificados.

Como já constatado no item 5.1.2, a *tensão confinante* influencia de forma significativa a rigidez à tração de geotêxteis. Em amostras danificadas a tensão atua nas propriedades remanescentes do geotêxtil, reduzindo as perdas de rigidez devidas aos danos. É o que pode ser verificado comparando-se a rigidez dos geotêxteis submetidos ao dano do tipo RH50 sob tensões confinantes diferentes: a queda da tensão de 100 para 50 kPa provocou uma perda de 31% da rigidez do geotêxtil a uma deformação de 2%. No entanto, mesmo o geotêxtil confinado a 50 kPa apresenta uma rigidez bem maior, comparado ao geotêxtil virgem (sem nenhum tipo de dano) e sem confinamento: como pode-se verificar na Tabela 5.5, a amostra de geotêxtil danificada com RH50 submetida a uma tensão confinante de 50 kPa apresenta rigidez 237% maior que a do geotêxtil virgem sem nenhum tipo de confinamento (ensaio de tração em faixa larga). O resultado indica a relevância da tensão de confinamento nos parâmetros de resistência, mesmo em amostras danificadas.

Os resultados permitem verificar, ainda, que a *dimensão dos danos* está influenciando diretamente os valores de rigidez observados: à medida que aumenta o dano, seja ele um rasgo horizontal ou um rasgo em “Y”, a rigidez à tração do geotêxtil diminui, o que já era esperado, uma vez que a dimensão do dano é diretamente proporcional ao número de filamentos rompidos e, conseqüentemente, à facilidade de propagação do dano quando o geotêxtil é solicitado à tração.

A *forma do dano* é outro fator que influencia o comportamento do reforço geotêxtil. Para efeitos de comparação da dimensão entre danos de formas diferentes, considera-se que dois danos têm dimensões equivalentes quando estes podem ser circunscritos em circunferências de mesmo raio. Assim, considera-se que RH50 e RY25 são danos de dimensões equivalentes e formas diferentes, uma vez que podem ser circunscritos em uma circunferência de 25 mm de raio. O mesmo pode-se dizer dos danos RH25 e RY12,5, que podem ser circunscritos em uma circunferência de 12,5 mm de raio. Neste contexto, verifica-se que os danos do tipo RY provocam maiores perdas de rigidez à tração do que os danos do tipo RH, comprovando a influência da forma do dano na rigidez do geotêxtil. A Figura 5.40 apresenta a propagação do dano tipo RH50 e a Figura 5.41 apresenta a propagação do dano tipo RY25. Por meio destas figuras é possível constatar que a propagação do rasgo do tipo RY é mais danosa do que a do rasgo tipo RH.



Início do ensaio (deformação = 0%)



Final do ensaio (deformação  $\cong$  20%)

Figura 5.40 – Propagação do dano RH50 no ensaio de tração confinada.



Início do ensaio (deformação = 0%)



Final do ensaio (deformação  $\cong$  20%)

Figura 5.41 - Propagação do dano RY25 no ensaio de tração confinada.

Nos ensaios com geotêxteis GC (Figuras 5.42 e 5.43), de gramatura igual a  $600 \text{ g/m}^2$ , a queda da rigidez provocada pelos danos foi bem parecida com as verificadas para os geotêxteis GA. O dano tipo RH10 provocou uma redução de 3% na rigidez e o dano RY12,5, de 19%. O dano do tipo RH25, no entanto, provocou uma redução bem maior na rigidez: 28%, devendo este fato ser mais bem estudado em pesquisas futuras com um maior número de ensaios usando este geotêxtil. Novamente, apesar de os danos terem provocado reduções significativas nas rigidezes dos geotêxteis confinados com relação à condição virgem e confinada, a condição sem confinamento foi a menos favorável, ou seja, os valores de rigidez dos geotêxteis virgens submetidos a ensaios de tração em faixa larga foram menores que as rigidezes de geotêxteis danificados sob confinamento.

Ressalta-se que os danos foram provocados em amostras de 0,2 m de largura por 0,1 m de comprimento (uma área útil de apenas 0,02 m<sup>2</sup>). Desta forma, o comportamento da amostra ensaiada seria equivalente ao comportamento de um geotêxtil com 50 danos por m<sup>2</sup>, o que corresponde a uma condição aparentemente muito severa de instalação.

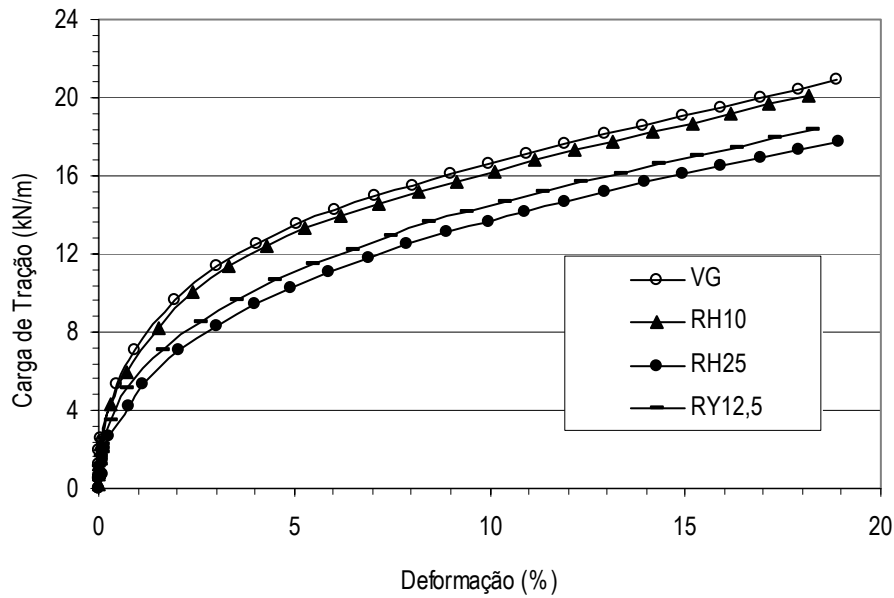


Figura 5.42 – Curvas carga-deformação de Geotêxteis GC danificados.

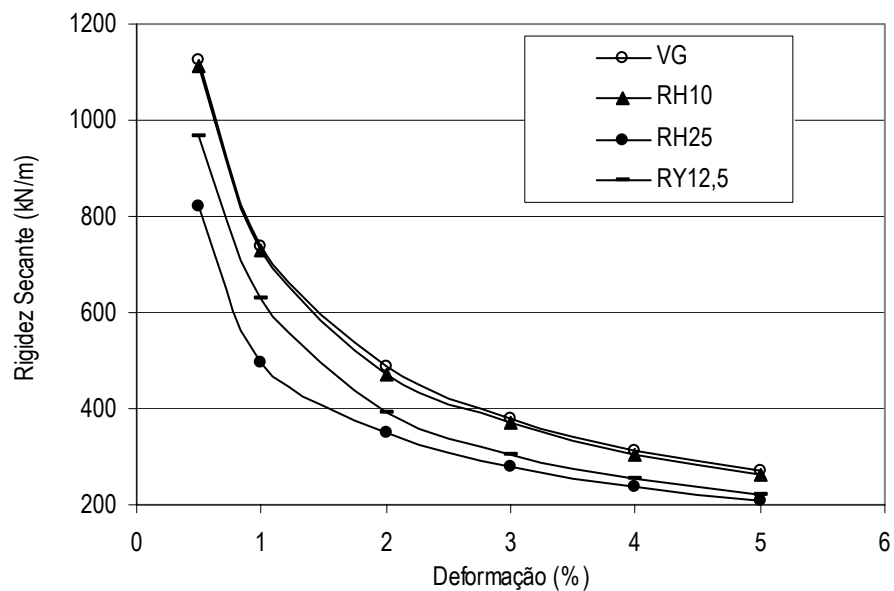


Figura 5.43 – Curvas rigidez-deformação de Geotêxteis GC danificados.

Em pesquisa anterior, Matheus (2002) estudou a influência de danos mecânicos em geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos de poliéster agulhados, com gramatura de 300 g/m<sup>2</sup>. Apesar de a gramatura dos geotêxteis estudados na presente pesquisa não ser a mesma dos geotêxteis estudados naquela, a comparação entre os resultados obtidos nas duas pesquisas permitem algumas interpretações a respeito dos efeitos do confinamento em geotêxteis danificados.

Nas Figuras 5.44 a 5.47 estão apresentadas as curvas carga-alongamento e rigidez-alongamento de geotêxteis com gramaturas em torno de 200 e 300 g/m<sup>2</sup> com e sem danos mecânicos e submetidos a tensões confinantes de 50 e 100 kPa com areia de filtro da CAESB. As tensões confinantes aplicadas, tipos de danos e gramaturas reais de cada amostra estão especificadas nas legendas: na Figura 5.44, por exemplo, “100kPa-g212-VG” corresponde a uma amostra geotêxtil *virgem* com gramatura igual a 212 g/m<sup>2</sup> confinada a 100kPa.

A primeira constatação feita por meio da comparação entre os resultados é relativa à influência da tensão confinante na rigidez dos geotêxteis. Amostras virgens de menor gramatura (em torno de 200 g/m<sup>2</sup>) submetidas a uma tensão confinante maior (100 kPa), apresentam rigidezes à tração 13% maiores que amostras de maior gramatura (em torno de 300 g/m<sup>2</sup>) sob uma tensão de confinamento menor (50 kPa). O mesmo se verificou nas amostras danificadas: geotêxteis com gramatura em torno de 300 g/m<sup>2</sup> apresentaram valores de rigidez cerca de 20% menores que os de geotêxteis de gramatura menor (em torno de 200 g/m<sup>2</sup>), devido à *menor tensão de confinamento* a que foram submetidos. Estes resultados confirmam a relevância da tensão confinante especialmente no comportamento de geotêxteis mais leves que, submetidos a ensaios de tração isolada, dificilmente apresentariam valores de rigidez maiores que os de maior gramatura.

Por meio da interpretação dos resultados de ensaios com geotêxteis danificados, fica claro que os danos mecânicos prejudicam o comportamento carga-alongamento dos geotêxteis não tecidos sob confinamento, mas é importante salientar que o efeito destes mesmos danos seriam muito mais severos se não houvesse o confinamento. Os resultados de ensaios de tração em faixa larga de Matheus (2002) apontam reduções de 40 a 50% da rigidez dos geotêxteis (a 2% de deformação) devido aos mesmos danos estudados na presente pesquisa, enquanto que em ensaios de tração confinada as reduções são menores. Portanto, como discutido no início deste item, o confinamento atua nas propriedades remanescentes do geotêxtil danificado, tornando menores as conseqüências dos danos.

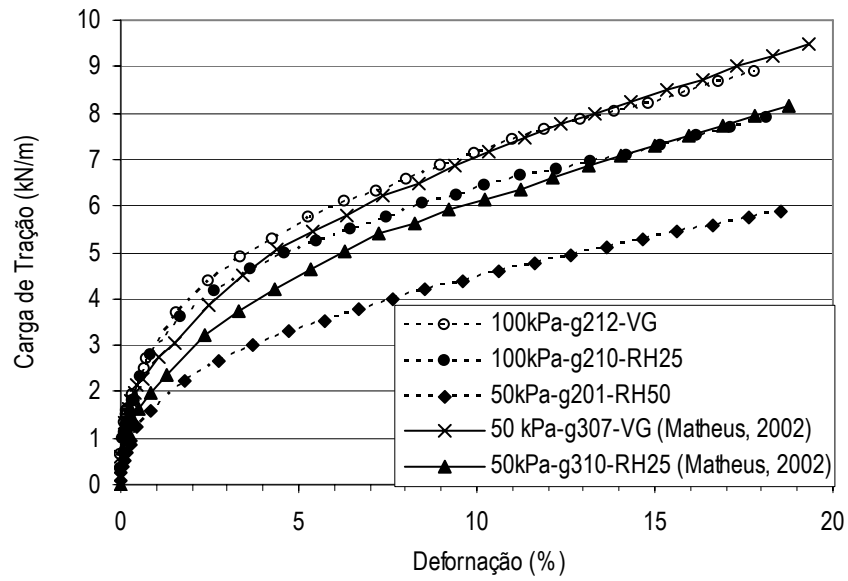


Figura 5.44 – Curvas carga-deformação de geotêxteis com danos do tipo RH.

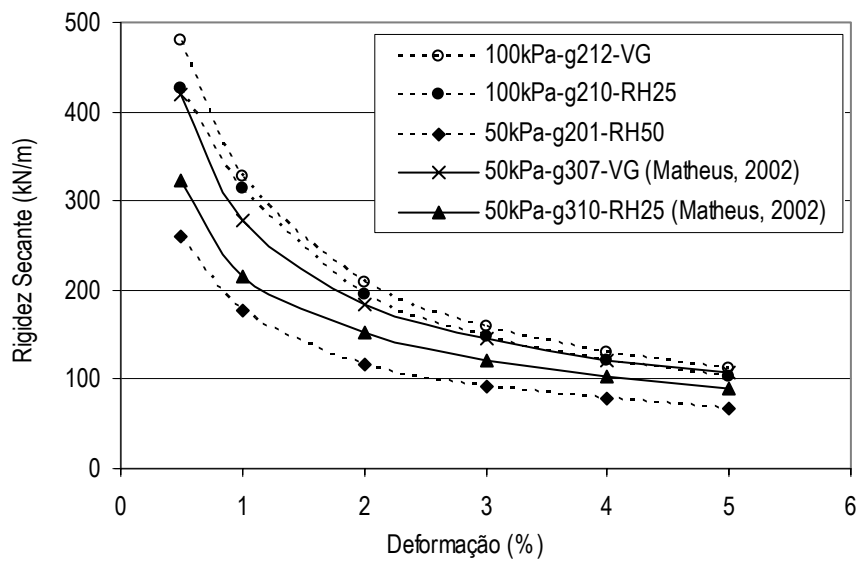


Figura 5.45 - Curvas rigidez-deformação de geotêxteis com danos do tipo RH.

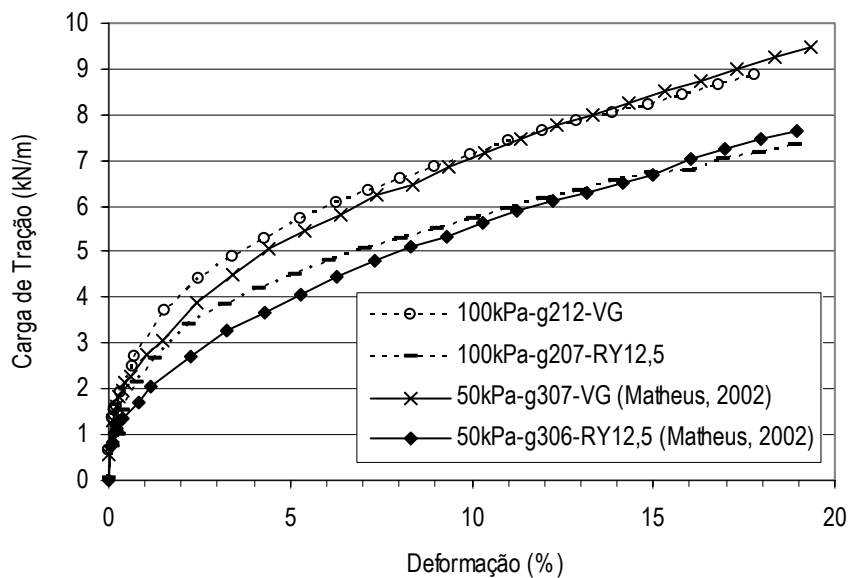


Figura 5.46 – Curvas carga-deformação de geotêxteis com danos do tipo RY.

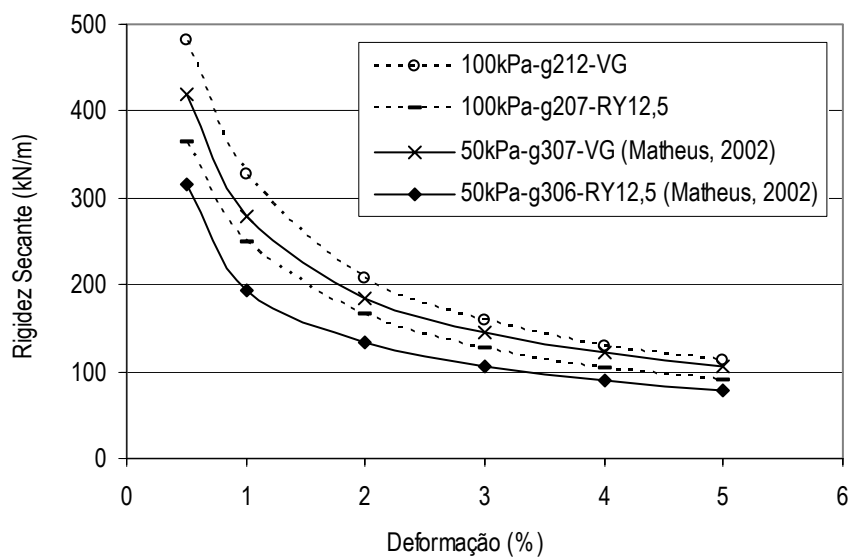


Figura 5.47 - Curvas rigidez-deformação de geotêxteis com danos do tipo RY.