

6. EQUAÇÕES DE PREVISÃO DA RIGIDEZ À TRAÇÃO

Por meio dos resultados obtidos durante a pesquisa, apresentados no Capítulo 5, foi possível propor equações que relacionam a rigidez secante do geotêxtil em função da tensão confinante e da deformação do geotêxtil.

Com os pontos da rigidez à tração secante em função da deformação, obtidos por meio dos ensaios de tração confinada, foi feita a determinação das equações das curvas que melhor se ajustavam a estes pontos, utilizando-se como ferramenta a “linha de tendência”, opção fornecida pela planilha eletrônica Excel. As equações que mais se ajustaram as curvas dos ensaios foram do tipo potência apresentada na Equação 6.1.

$$J_{\text{sec}} = A \cdot \varepsilon^{-B} \quad (6.1)$$

Onde:

J_{sec} = Rigidez secante do geotêxtil (kN/m);

A = coeficiente variável de acordo com as condições do ensaio;

ε = deformação do geotêxtil (%);

B = expoente variável de acordo com as condições do ensaio;

Todas as equações das curvas que melhor se ajustam aos pontos dos valores de rigidez em função da deformação foram do tipo potência, variando-se apenas os coeficientes A e B da Equação 6.1, de acordo com as condições do ensaio: tensão confinante, material de interface, condição do geotêxtil, impregnação, etc. Determinados os valores dos coeficientes A e B dos ensaios com geotêxteis GA e GB virgens confinados em blocos de madeira para as tensões de 50, 100 e 150 kPa, foi possível determinar uma função linear que relaciona os coeficientes A e B com a tensão confinante aplicada nos geotêxteis.

$$A = f(\sigma) \quad (6.2)$$

$$B = g(\sigma) \tag{6.3}$$

Onde:

A = coeficiente da Equação 6.1, variável em função da tensão de confinamento;

B = expoente de ε da Equação 6.1, variável em função da tensão de confinamento;

σ = tensão confinante.

Substituindo-se as Equações 6.2 e 6.3 na Equação 6.1, determina-se uma equação que faz a previsão da rigidez secante em função da deformação do reforço (ε) e da tensão confinante (σ). Ressalta-se que não há, nas equações, uma variável em função da gramatura do geotêxtil, portanto deve-se atentar para o uso da equação correspondente para cada gramatura. Com os resultados dos ensaios desta pesquisa foi possível propor apenas equações para geotêxteis do tipo GA e GB, uma vez que o geotêxtil GC foi ensaiado apenas com uma tensão confinante (100 kPa) além do que ele não foi ensaiado com interface de madeira.

É importante ressaltar que os geotêxteis GA e GB são do tipo não tecido, compostos de filamentos de poliéster agulhados, distribuídos em multidireções em forma de manta com gramaturas 200 e 400 g/m², respectivamente. Não é recomendado o uso das equações sugeridas para a previsão de comportamento de geotêxteis de outros tipos (tecidos, compostos por outros polímeros ou submetidos a outros processos de ligação entre os filamentos), uma vez que as propriedades do reforço geossintético são parâmetros determinantes no seu comportamento carga-alongamento, e estão intrínsecas nos coeficientes das equações.

6.1. GEOTÊXTEIS VIRGENS CONFINADOS POR MADEIRA

Os coeficientes A e B usados para determinar as Equações 6.2 e 6.3 foram os provenientes das curvas rigidez-deformação dos ensaios com geotêxteis virgens confinados por blocos de madeira. Esta é uma decisão conservativa, uma vez que os coeficientes A e B das curvas resultantes de ensaios utilizando solos granulares no confinamento consideram, de forma implícita, os efeitos de impregnação e o embricamento, que, por sua vez, variam de acordo com as características do material confinante. A consideração das características do material confinante não é viável no momento, uma vez que o número de ensaios não permite a previsão de uma equação que considere estas variáveis relativas às propriedades do solo confinante.

Apesar de os ensaios de tração confinada realizados terem provocado deformações de aproximadamente 20% nas amostras geotêxteis, os coeficientes A e B foram determinados para a faixa de deformações de até 6%, devido a dois fatores: na maioria das obras de reforço não se verificam deformações maiores que 2 a 3% (Lanz, 1992 e Martins, 2000a) e no ensaio de tração confinada, para deformações maiores, a bolsa de borracha não cobre toda a área da amostra, deixando uma incerteza quanto ao efeito do confinamento e conseqüentemente quanto aos valores de rigidez à tração confinada determinados para estas deformações.

6.1.1. EQUAÇÃO PARA O GEOTÊXTIL GA (200G/M²)

A Figura 6.1 apresenta as curvas dos ensaios das amostras de geotêxteis GA confinadas em madeira sob três tensões de confinamento diferentes: 50, 100 e 150 kPa. As equações que melhor se ajustaram a estas curvas foram equações do tipo potência, como comprovam os valores de R² apresentados no gráfico da mesma figura. É importante destacar que estas equações são dimensionais

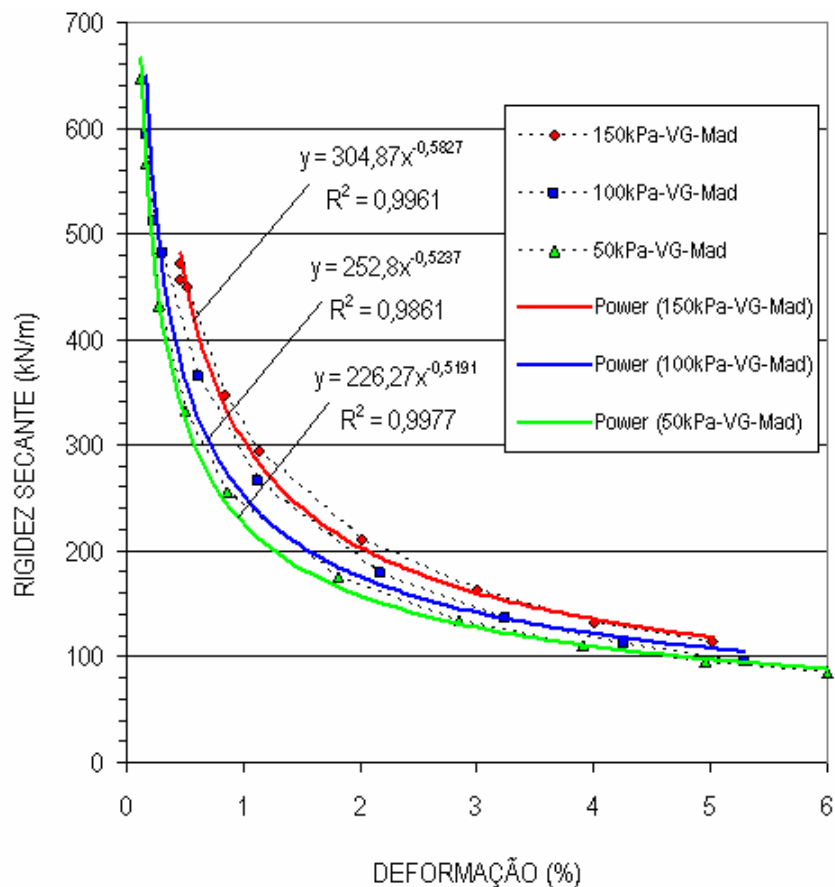


Figura 6.1 – Funções rigidez-deformação de geotêxteis GA confinados por blocos de madeira.

As equações de cada curva fornecem coeficientes A e B para cada tensão confinante, mostrados na Tabela 6.1. Posteriormente estes coeficientes são plotados em função da tensão confinante como mostram os gráficos das Figuras 6.2 e 6.3. Note-se que nestas figuras estão plotados também os coeficientes A e B dos geotêxteis confinados por outros materiais além da madeira (areia do Rio Corumbá e Areia Leighton Buzzard). As funções rigidez-deformação de geotêxteis confinados por estes materiais se encontram no Apêndice C.

Tabela 6.1 – Coeficientes A e B das equações para geotêxteis GA confinados em madeira.

Ensaio			Coeficientes $J_{sec} = A \cdot \varepsilon^{-B}$	
Geotêxtil	Material Confinante	Tensão confinante	A	B
GA	Madeira	50	305	0,58
GA	Madeira	100	253	0,52
GA	Madeira	150	226	0,52

Com os valores dos coeficientes A e B em função da tensão confinante, determina-se a função linear que melhor se ajusta aos pontos (Figuras 6.2 e 6.3). Verifica-se que os coeficientes A e B relativos a cada interface de confinamento seguem linhas de tendência diferentes. No entanto, a interface de madeira fornece os menores valores de coeficientes A e B, indicando que a previsão da rigidez à tração para esta interface de confinamento é mais conservativa. O gráfico da Figura 6.2 mostra que a relação entre o coeficiente A e a tensão confinante (das amostras confinadas em madeira) se ajustou bem a uma função linear, uma vez que o valor de R^2 é bem próximo de 1. A Figura 6.3 mostra que uma relação linear do coeficiente B com a tensão confinante também se ajustou bem aos pontos plotados. No entanto, ressalta-se que seriam necessários mais ensaios, com outras tensões confinantes fornecendo mais pontos para determinar de forma mais precisa a função que melhor relaciona estes coeficientes com a tensão confinante.

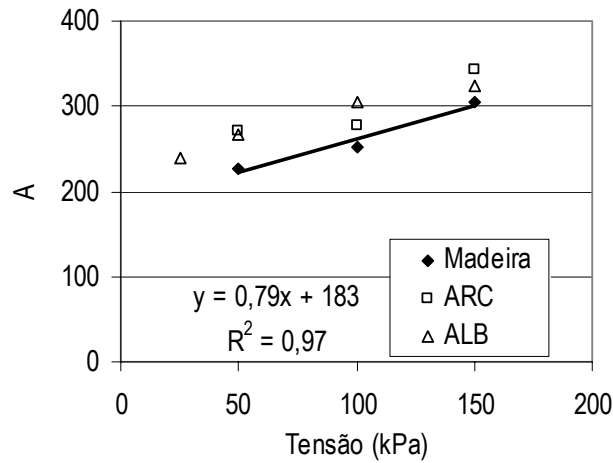


Figura 6.2 – Coeficiente A em função da tensão confinante para geotêxtil GA.

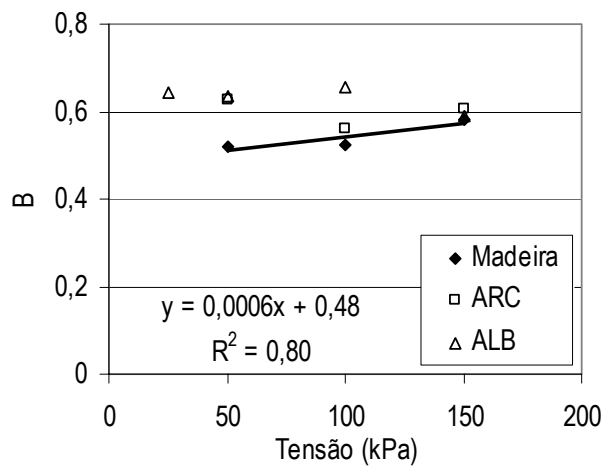


Figura 6.3 - Coeficiente B em função da tensão confinante para geotêxtil GA.

As funções lineares que melhor se ajustam aos pontos que relacionam os coeficientes A e B com a tensão confinante, apresentadas nos gráficos das Figuras 6.2 e 6.3, respectivamente, foram:

$$A_{(GA)} = 0,79 \cdot \sigma + 183 \quad (6.4)$$

$$B_{(GA)} = 0,0006 \cdot \sigma + 0,48 \quad (6.5)$$

Substituindo-se as Equações 6.4 e 6.5 na Equação 6.1, determina-se a equação que relaciona a rigidez secante do geotêxtil GA com a tensão confinante e deformação do reforço:

$$J_{\text{sec}(GA)} = (0,79 \cdot \sigma + 183) \cdot \varepsilon^{(0,0006 \cdot \sigma + 0,48)} \quad (6.6)$$

Onde:

$J_{\text{sec}(GA)}$ = Rigidez secante do geotêxtil GA (kN/m);

ε = deformação do geotêxtil (%);

σ = Tensão confinante (kPa).

Para o geotêxtil GA, a Figura 6.3 ou a Equação 6.5 mostram a pouca dependência do valor de B em relação à tensão normal (σ).

6.1.2. GEOTÊXTIL GB (400G/M²)

O gráfico da Figura 6.4 apresenta as curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GB confinados por madeira sob três tensões de confinamento diferentes: 50, 100 e 150 kPa. Assim como se verificou nos resultados dos ensaios de geotêxteis GA, as equações que melhor se ajustaram a estas curvas foram equações do tipo potência, como confirmam os valores de R^2 apresentados no gráfico.

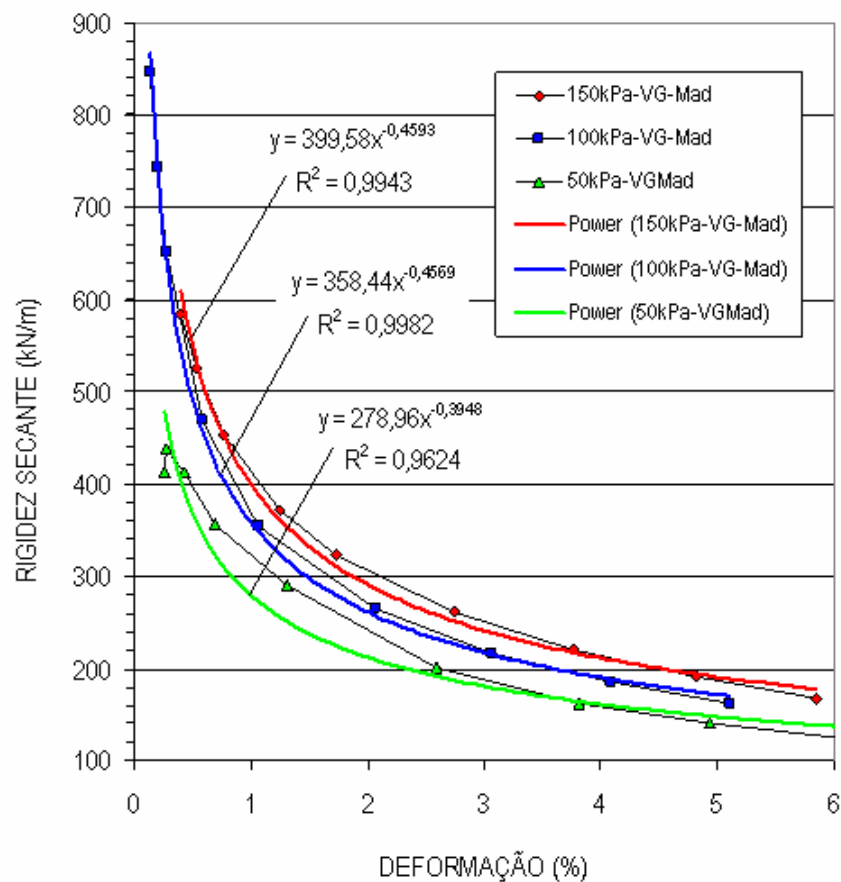


Figura 6.4 - Funções rigidez-deformação de geotêxteis GB confinados por blocos de madeira.

A Tabela 6.2 apresenta os coeficientes A e B obtidos para as equações que melhor se ajustaram aos pontos rigidez versus deformação nos ensaios com geotêxteis GB confinados por madeira. Os valores do coeficiente A estão plotados em função da tensão confinante no gráfico da Figura 6.5 e os valores do coeficiente B, na Figura 6.6. Nestas figuras estão plotados, também, os coeficientes A e B correspondentes aos geotêxteis GB confinados na areia do Rio Corumbá e na areia Leighton Buzzard. As funções rigidez-deformação de geotêxteis com estas outras interfaces de confinamento estão apresentadas no Apêndice C.

Tabela 6.2 - Coeficientes A e B das equações para geotêxteis GB confinados em madeira.

Ensaio			Coeficientes $J_{sec} = A \cdot \varepsilon^{-B}$	
Geotêxtil	Material Confinante	Tensão confinante	A	B
GB	Madeira	50	400	0,46
GB	Madeira	100	358	0,46
GB	Madeira	150	279	0,38

Os valores dos coeficientes A e B dos geotêxteis GB foram plotados em função da tensão confinante (Figuras 6.5 e 6.6) e verifica-se uma nítida diferença entre as tendências dos pontos relativos a cada material confinante. Verifica-se, também, que a função linear se ajustou bem aos pontos que relacionam os coeficientes A e B com a tensão confinante, no entanto, ressalta-se novamente a necessidade de ensaios com outras tensões confinantes, que possibilitariam um maior número de pontos dos coeficientes A e B em função da tensão confinante, permitindo encontrar uma função que os relacione com maior precisão.

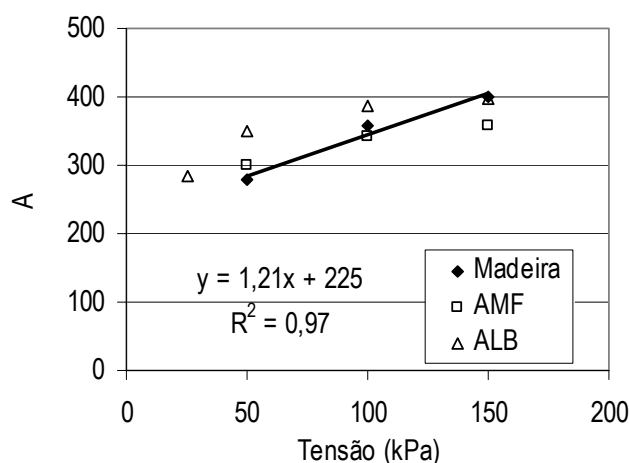


Figura 6.5 - Coeficiente A em função da tensão confinante para geotêxtil GB.

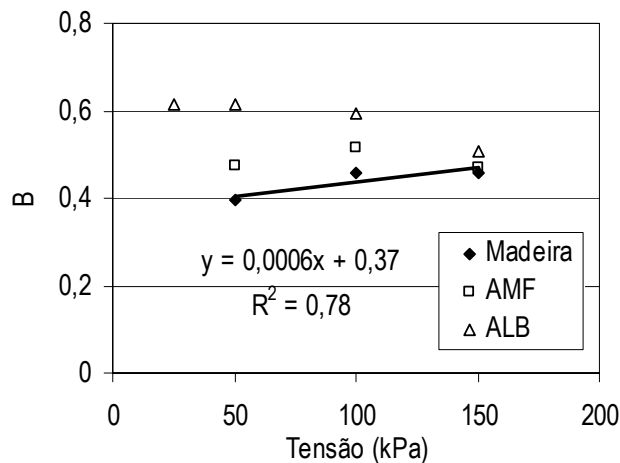


Figura 6.6 - Coeficiente B em função da tensão confinante para geotêxtil GB.

As funções lineares que melhor se ajustam aos pontos que relacionam os coeficientes A e B com a tensão confinante, apresentadas nos gráficos das Figuras 6.5 e 6.6, respectivamente são:

$$A_{(GB)} = 1,21 \cdot \sigma + 225 \quad (6.7)$$

$$B_{(GB)} = 0,0006 \cdot \sigma + 0,37 \quad (6.8)$$

Substituindo-se as Equações 6.7 e 6.8 na Equação 6.1, determina-se a equação que relaciona a rigidez secante do geotêxtil GB em função da tensão confinante e da deformação do reforço:

$$J_{\text{sec}(GB)} = (1,21 \cdot \sigma + 225) \cdot \varepsilon^{(0,0006 \cdot \sigma + 0,37)} \quad (6.9)$$

Onde:

$J_{\text{sec}(GB)}$ = Rigidez secante do geotêxtil GB (kN/m);

ε = deformação do geotêxtil (%);

σ = Tensão confinante (kPa).

Assim como observado para o geotêxtil GA, o valor de B também é pouco sensível à tensão normal (para a faixa de valores utilizados) para o geotêxtil GB.

6.2. ACURÁCIA DAS EQUAÇÕES DE PREVISÃO DE RIGIDEZ

6.2.1. GEOTÊXTEIS VIRGENS

Para verificar a validade da equação, seria necessário comparar valores de rigidez medidos em campo com os previstos pela equação proposta, mas uma análise preliminar pode ser feita comparando-se os valores de rigidez obtidos por meio dos ensaios de tração confinada com geotêxteis virgens sob diversas interfaces de confinamento, com os calculados por meio das Equações 6.6 e 6.9. A Figura 6.7 apresenta a relação entre os valores de rigidez medidos nos ensaios e previstos pelas equações propostas para geotêxteis GA e GB virgens.

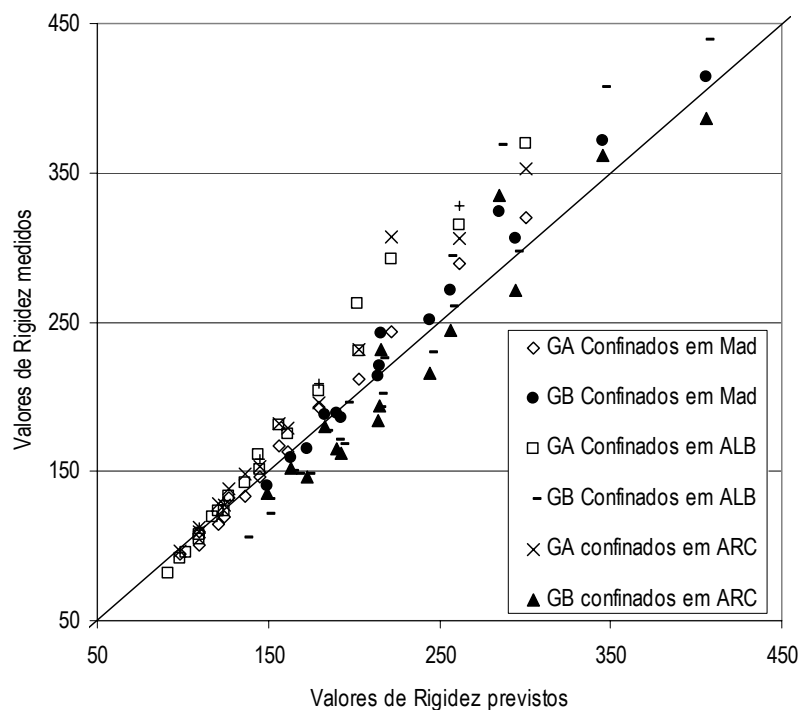


Figura 6.7 – Relação entre valores de rigidez previstos e medidos em ensaios com geotêxteis GA e GB virgens.

Note-se que os valores de rigidez calculados pelas Equações 6.6 e 6.9 foram bem próximos dos valores de rigidez verificados nos ensaios, sendo os valores medidos um pouco maiores que os valores previstos, mostrando que as equações propostas são conservativas

(como havia sido mencionado). O gráfico mostra também que para valores de rigidez maiores, a dispersão dos resultados é maior e observa-se, também, certa diferença entre os valores medidos para cada interface de confinamento. Para valores de rigidez menores (quando as deformações são maiores) a dispersão diminui, indicando que quanto maior é a deformação, menor é a relevância da interface de confinamento no comportamento carga-alongamento do reforço.

Vale ressaltar que, mesmo onde há uma maior dispersão dos pontos, as equações propostas se mostram conservativas (a maior parte dos valores de rigidez previstos é menor que os valores medidos). Verifica-se, também, que os valores de rigidez previstos para geotêxteis GB confinados em materiais granulares (areia Leighton Buzzard e areia do Rio Corumbá) foram um pouco maiores que os medidos. Nestes casos, portanto, a Equação 6.9 não foi conservativa.

6.2.2. GEOTÊXTEIS IMPREGNADOS

Comparando-se os valores de rigidez previstos pelas Equações 6.6 e 6.9 com os valores de rigidez medidos para geotêxteis impregnados, verifica-se (Figura 6.8) que os valores medidos são maiores que os valores determinados pelas equações.

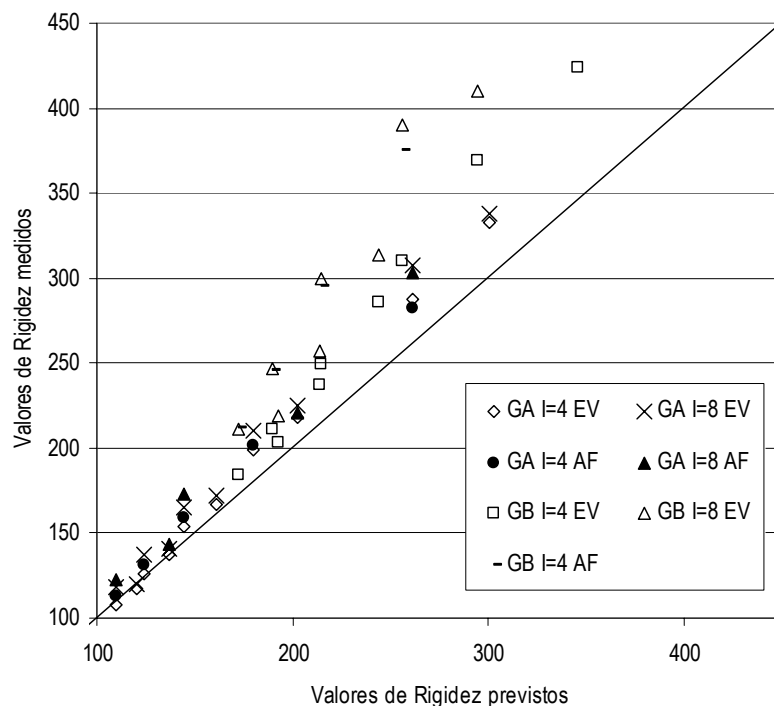


Figura 6.8 - Relação entre valores de rigidez previstos e medidos em ensaios com geotêxteis GA e GB impregnados com microesferas de vidro e areia fina.

A relação entre os valores de rigidez medidos e previstos é coerente, visto que as Equações 6.6 e 6.9 não consideram os efeitos da impregnação no cálculo, prevendo valores de rigidez à tração menores. Fica comprovado, portanto, que a impregnação pode ser um fator importante na determinação da rigidez de geotêxteis não tecidos. Os grãos intrusos nos vazios da manta contribuem para dificultar a movimentação dos filamentos quando a manta é solicitada à tração e quanto maior a dificuldade que os filamentos encontram em se reorientar, maior será a rigidez à tração, pois o mecanismo de deformação da manta depende do estiramento dos filamentos.

Verifica-se que a dispersão dos pontos é maior para valores de rigidez maiores, assim como se observou na Figura 6.7. Isto confirma o que já foi discutido no item 5.2.1: para deformações maiores (quando os valores de rigidez são menores), o incremento de rigidez à tração do geotêxtil devido aos efeitos da impregnação é não é significativo.

6.2.3. GEOTÊXTEIS COM DANOS MECÂNICOS

Os valores de rigidez secante de geotêxteis GA com danos mecânicos, determinados por meio dos ensaios de tração confinada, foram comparados com os valores previstos pela Equação 6.6. Verifica-se (Figura 6.9.) que os valores medidos são menores que os valores previstos, o que é coerente, visto que a Equação 6.6 determina os valores de rigidez à tração considerando que os geotêxteis são virgens e não apresentam danos mecânicos. Como a equação foi desenvolvida de acordo com os coeficientes determinados a partir de ensaios com amostras virgens, ela é mais acurada na previsão da rigidez do geotêxtil virgem.

Mesmo assim, é interessante comparar os valores de rigidez medidos em ensaios de geotêxteis danificados com os valores determinados pela equação, para ter uma idéia da importância em adotar fatores de redução devido a danos mecânicos, especialmente em obras cujas condições de instalação do geotêxtil são propícias para provocar estes danos.

É importante lembrar, entretanto, que os danos foram provocados em amostras de 0,2 m de largura por 0,1 m de comprimento, uma área útil de 0,02 m². Extrapolando a condição da amostra danificada para maiores dimensões, o comportamento da amostra ensaiada seria equivalente ao comportamento de um geotêxtil com 50 danos por m², uma condição bastante improvável (salvo para condições realmente muito severas de instalação do geotêxtil). Assim, seria necessário verificar a influência destes tipos de danos em amostras maiores de geotêxteis e verificar qual seria a queda de rigidez causada por eles, considerando uma condição mais provável de ocorrer em campo.

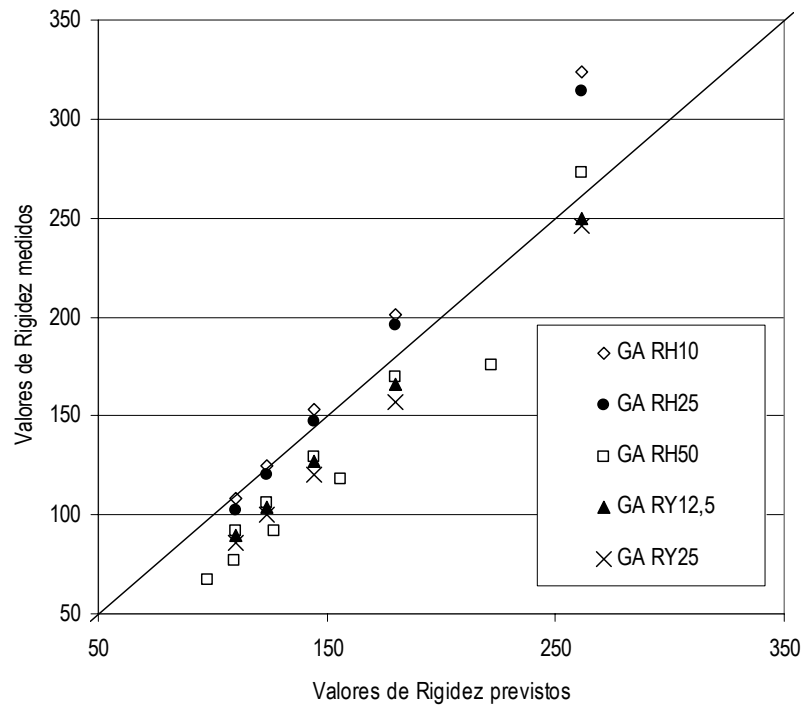


Figura 6.9 - Relação entre valores de rigidez previstos e medidos em ensaios com geotêxteis GA com danos mecânicos.

No gráfico da Figura 6.9 não estão apresentadas as relações entre os valores de rigidez previstos e medidos para geotêxteis GC danificados porque os ensaios feitos com este tipo de geotêxtil não permitiram a determinação de uma equação de previsão da rigidez, como mencionado no início deste capítulo.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

7.1. CONCLUSÕES

Esta pesquisa visou estudar os principais fatores que interferem no comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos agulhados de poliéster submetidos a solicitações de tração sob confinamento, utilizando como ferramenta o equipamento de ensaio de tração confinada desenvolvido na Universidade de Brasília.

O comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos confinados no solo é função de diversos fatores, entre eles: a gramatura do geotêxtil, a tensão confinante, o solo confinante, a impregnação do geotêxtil e a condição do geotêxtil com relação a danos mecânicos. As conclusões com relação à influência de cada um destes fatores na rigidez à tração de geotêxteis estudados estão apresentadas a seguir.

Além disso, a pesquisa visou propor uma equação simplificada para previsão do valor da rigidez à tração de geotêxteis não tecidos, em função da deformação e da tensão confinante aplicada.

Influência da gramatura

A gramatura exerce grande influência no comportamento carga-alongamento dos geotêxteis não tecidos uma vez que a deformação destes materiais depende do deslocamento de filamentos que tendem a se estirar durante a solicitação de tração. Portanto, quanto maior o número destes filamentos, maior a dificuldade de deformação do reforço geotêxtil. Na presente pesquisa verificou-se que os geotêxteis GB apresentaram rigidezes até 45% maiores que os GA.

Embora os valores de rigidez, em termos absolutos, cresçam com a *gramatura*, os incrementos de rigidez à tração devido ao confinamento foram maiores nos geotêxteis de menor gramatura (GA) devido a dois fatores preponderantes: a estrutura mais “frouxa” de geotêxteis GA permite uma maior aproximação dos filamentos (que se encontram naturalmente mais afastados) quando submetidos à certa tensão confinante e as maiores aberturas deste geotêxtil podem permitir uma maior intrusão de grãos do material confinante

entre os filamentos que compõem a manta, contribuindo para dificultar o deslocamento destes filamentos.

Influência da tensão confinante

O confinamento do geotêxtil pelo solo promove a aproximação dos filamentos que compõem a manta geotêxtil aumentando o atrito entre eles e dificultando sua movimentação. Os acréscimos de rigidez devido à tensão confinante, com relação aos valores de rigidez não confinadas para geotêxteis GA foram de 360 (para tensão confinante de 25 kPa) a 560% (para tensão confinante de 150 kPa), e nos geotêxteis GB os acréscimos variaram de 280 a 500%, aproximadamente, dependendo da tensão confinante.

O aumento da tensão confinante de 50 para 100 kPa produziu incrementos de 6 a 15% no valores de rigidez de geotêxteis GA e GB confinados em materiais diferentes. Aumentando-se a tensão confinante de 100 para 150 kPa os incrementos produzidos foram de 10 a 18%. A relação entre a rigidez à tração e a *tensão confinante* dos geotêxteis se ajustaram bem a uma função linear, assim como observado por outros autores, entre eles Yuan et al. (1998) e Martins (2000a). Verificou-se, também, que os maiores incrementos de rigidez devido à tensão são observados para os menores níveis de deformação do reforço. Para deformações maiores que 5% o aumento da tensão confinante já não provoca incrementos significativos nos valores de rigidez à tração dos geotêxteis, o que não é um problema, visto que em obras reais de solo reforçado (estruturas de contenção e taludes íngremes) não têm sido observadas deformações maiores que 3% (Lanz, 1992 e Martins, 2000a).

Influência da interface de confinamento

Quanto à *interface de confinamento*, não foi verificada uma diferença significativa dos valores de rigidez de geotêxteis confinados por materiais diferentes, contrariando as expectativas anteriores à pesquisa. Baseado nos resultados de Tupa (1994) esperava-se que amostras confinadas em areia fina a média apresentassem valores de rigidez maiores do que amostras confinadas em areia grossa, devido à maior *impregnação* promovida durante a preparação da amostra de solo confinante. No entanto, nenhum dos materiais confinantes provocou impregnações significativas, talvez devido ao método de preparação da amostra de solo confinante no ensaio, chuva de areia.

Estes resultados permitem concluir que, no confinamento promovido por areias, os efeitos da tensão confinante prevalecem sobre os efeitos da impregnação e do embricamento no incremento de rigidez à tração de geotêxteis. Isto pôde ser constatado por meio da

utilização de uma interface de confinamento lisa e plana no confinamento dos geotêxteis: o comportamento verificado em geotêxteis confinados em blocos de madeira foi similar ao comportamento daqueles confinados em areia grossa e areia fina a média. Portanto sugere-se a normalização do ensaio de tração confinada adotando-se materiais rígidos com superfícies lisas lubrificadas como material confinante, uma vez que este já seria suficiente para a estimativa do comportamento carga-alongamento dos geotêxteis confinados em *materiais arenosos*. Ling et al. (1992) também sugerem que o confinamento promovido por um material de superfície lisa (em sua pesquisa foram utilizadas membranas de borracha) é suficiente para avaliar o comportamento dos geotêxteis em ensaios de tração confinada.

Influência da impregnação

Verificou-se que a *impregnação* é um fator que potencializa o efeito do confinamento, aumentando os incrementos de rigidez nos geotêxteis: um grau de impregnação igual a 8 promoveu um aumento de mais de 40% na rigidez do geotêxtil GB confinado a 100 kPa, comparado à rigidez do geotêxtil sem impregnação sob a mesma tensão confinante.

No entanto, a relevância do *grau de impregnação* no comportamento carga-alongamento se mostrou dependente da *gramatura* do geotêxtil. Nos geotêxteis GB a impregnação promoveu maiores incrementos de rigidez do que nos geotêxteis GA (o maior incremento registrado neste geotêxtil foi de 14,5%), despertando o interesse em relacionar a rigidez à tração com a porcentagem de *volume de vazios remanescentes (d)*. Para um mesmo grau de impregnação, os geotêxteis de maior gramatura apresentam menores porcentagens de vazios remanescentes, visto que a distância entre os filamentos destes geotêxteis, em geral, é menor (Gardoni e Palmeira, 2002). A relação entre a rigidez à tração e o volume de vazios remanescentes se mostrou praticamente linear para os dois geotêxteis (GA e GB).

A influência do *grau de impregnação* na rigidez dos geotêxteis depende, também, da *tensão confinante* aplicada. Com o aumento da tensão confinante, o incremento de rigidez devido à impregnação diminuiu, resultado que pareceu incoerente uma vez que o confinamento contribui para densificar a estrutura da manta geotêxtil. No entanto, Palmeira et al. (2005) verificaram que a impregnação pode *reduzir a compressibilidade* do geotêxtil, e por esse motivo o efeito da impregnação pode diminuir com a tensão confinante.

A utilização de dois materiais diferentes de granulometrias semelhantes na impregnação permitiu a verificação do efeito da *forma e textura dos grãos* impregnados no incremento de rigidez à tração dos geotêxteis. Os grãos sub-angulares da areia fina, promoveram maiores incrementos de rigidez do que os grãos esféricos e lisos das microesferas de vidro,

comprovando que a *forma e textura dos grãos* são fatores que influenciam a reorientação dos filamentos quando o geotêxtil é submetido à solicitação de tração.

Os resultados de ensaios com geotêxteis impregnados confirmam que, além da tensão confinante, a impregnação do geotêxtil promovida pela intrusão de grãos do material confinante entre os filamentos da manta, contribui ainda mais para o aumento da rigidez à tração de geotêxteis, especialmente dos não-tecidos, o que pôde ser melhor evidenciado comparando-se os valores de rigidez de geotêxteis impregnados submetidos à ensaios de tração confinada com os valores de rigidez de geotêxteis virgens (sem impregnação) submetidos à ensaios de tração em faixa larga.

Influência dos danos mecânicos

A rigidez dos geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos depende das condições da manta com relação a danos mecânicos. A continuidade dos filamentos é um fator relevante no mecanismo de deformação da manta geotêxtil, visto que a distribuição de filamentos em diversas direções provoca o entrelaçamento destes que, sob confinamento, encontram maiores dificuldades em se deslocar, melhorando o comportamento mecânico do geotêxtil, principalmente no que diz respeito à sua rigidez à tração.

Ao perder a continuidade devido a um dano, parte do “entrelaçamento” pode ser desfeito com mais facilidade, prejudicando o comportamento carga-alongamento do geotêxtil. No entanto, quando confinado, os prejuízos causados pelos danos mecânicos são menos severos.

Os resultados dos ensaios feitos em geotêxteis danificados mostram que tanto a *dimensão* dos danos quanto a *forma* dos mesmos alteram o comportamento carga-alongamento dos geotêxteis não tecidos submetidos à tração confinada, o que já havia sido observado por Matheus (2002). As formas de dano responsáveis pelas maiores perdas de rigidez à tração são justamente aquelas que provocam o rompimento de um maior número de filamentos.

Alguns danos provocaram perdas significativas de rigidez à tração, de até 25%, comparando-se valores obtidos em ensaios de tração confinada de geotêxteis danificados com geotêxteis virgens submetidos à mesma tensão confinante, mas chama-se a atenção para a área útil da amostra de geotêxtil do ensaio de tração confinada: extrapolando a condição da amostra danificada para maiores dimensões, seu comportamento seria equivalente ao de uma manta com 50 danos por m², o que parece ser uma condição improvável em obras com boa qualidade de execução.

Mesmo assim, a perda de rigidez verificada em geotêxteis danificados submetidos à solicitações de tração sob confinamento é bem menor do que a perda em geotêxteis tracionados em isolamento, que chegam a ser maiores que 40%, segundo Matheus (2002), comprovando que o confinamento atua nas propriedades remanescentes do geotêxtil, reduzindo os prejuízos causados pelos danos mecânicos. É interessante destacar, ainda, que mesmo danificados, os geotêxteis confinados apresentaram valores de rigidez à tração maiores que os geotêxteis virgens sem confinamento.

Em geral, os resultados dos ensaios de tração confinada comprovaram o potencial do confinamento na melhoria dos parâmetros de projeto, ampliando as possibilidades de utilização de geotêxteis não tecidos em estruturas de solo reforçado.

Equações de previsão da rigidez à tração confinada

Por meio dos resultados dos ensaios de tração confinada com amostras de geotêxteis virgens confinados em madeira sob tensões diferentes foi possível propor duas equações (para os geotêxteis GA e GB) de previsão da rigidez à tração do geotêxtil em função da tensão de confinamento e da deformação. As equações propostas se mostraram bastante eficientes na comparação entre os valores de rigidez previstos com os valores medidos nos ensaios de geotêxteis *virgens* para as condições de ensaio deste trabalho. A equação de previsão de rigidez do geotêxtil GA, no entanto, se mostrou um pouco mais conservadora do que a do geotêxtil GB.

Como estas equações não consideram efeitos de *impregnação* e *danos mecânicos*, a discrepância entre os valores previstos e medidos nos ensaios com amostras impregnadas e danificadas foi maior. No caso de geotêxteis impregnados, a equação se mostra conservativa, o que não ocorre no caso de amostras danificadas. Este comportamento já era esperado, visto que o desenvolvimento da equação foi feito com base nos resultados de ensaios com geotêxteis virgens confinados.

7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Em função dos resultados obtidos nesta dissertação, sugerem-se os seguintes tópicos para pesquisas futuras.

- Utilização de valores de rigidez obtidos por meio de ensaios de tração confinada na previsão de deslocamentos em estruturas reais de solos reforçados por meio de simulações numéricas e/ou métodos de previsão de deformações (como o método de Jewell e Milligan, 1989). Comparar os valores de deformações previstos com os medidos na obra.
- Melhorar as equações de previsão da rigidez à tração, incluído parâmetros que considerem os efeitos de impregnação e dos danos mecânicos e verificar sua validade por meio de comparação entre os valores de rigidez à tração previstos e medidos em obras instrumentadas.
- Aumentar o número de ensaios de tração confinada, aumentando a faixa de variação dos parâmetros que influenciam a rigidez à tração dos geotêxteis não tecidos de forma a permitir uma análise estatística dos parâmetros mais relevantes na alteração dos valores de rigidez à tração sob confinamento.
- Verificação do efeito do material confinante no comportamento carga-alongamento da manta, utilizando outros métodos de preparação da amostra de solo, buscando simular melhor a impregnação que ocorre no campo durante a compactação do aterro.
- Repetir a previsão de deslocamentos dos muros de solo reforçado apresentados em Lanz (1992) por meio do método de Jewell e Milligan (1989), utilizando-se os valores de rigidez à tração obtidos em ensaios de tração confinada. Comparar os novos deslocamentos obtidos com os apresentados por Lanz (1992).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6502 (1995). Rochas e Solos. ABNT, São Paulo.
- ABNT NBR 6831 EB1241 (2001). Sinalização Horizontal Viária – Microesferas de Vidro – Requisitos, ABNT, São Paulo.
- ABNT NBR 12593 (1992). Amostragem e Preparação de Corpos-de-Porva de Geotêxteis, ABNT, São Paulo, 2p.
- ABNT NBR 12824 (1993). Determinação da Resistência à Tração Não Confinada em Ensaio de Tração em Faixa Larga. ABNT, São Paulo, 5p.
- Abramento, M. (1995). Durabilidade e comportamento de longo prazo de geossintéticos – Parte I: Propriedades mecânicas e hidráulicas. 2º Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia - Geossintéticos'1995, São Paulo, 61-70.
- Aguiar P.R. e Vertematti, J.C. (2004). Introdução. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Coordenador J.C. Vertematti, Editora Edgard Blücher, São Paulo, SP, pp 1-12.
- Azambuja, E. (1994). Investigação do Dano Mecânico em Geotêxteis Não Tecidos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 142 p.
- Azambuja, E. (1999). A influência do dano mecânico na tensão admissível dos geossintéticos em estruturas de solo reforçado. 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos – 3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos'1999, Rio de Janeiro, 1:157-165.
- Azambuja, E. e Strauss, M. (1999). Casos históricos de sistemas de contenção em solo reforçado com geossintéticos no Rio Grande do Sul – Brasil. 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos – 3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos'1999, Rio de Janeiro, 1:387-394.
- Boyle, S.R., Gallagher, M. e Holtz, R.D. (1996). Influence of strain rate, specimen length and confinement on measured geotextile properties. *Geosynthetics International*, 3 (2): 205-225.
- Bueno, B.S. e Vilar, O.M. (2004). Propriedades, Ensaio e Normas. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Coordenador J.C. Vertematti, Editora Edgard Blücher, São Paulo, SP, pp 25-62.
- Carvalho, P.A.S., Pedrosa, J.A.B.A., E Wolle, C.M. (1986). Aterro reforçado com geotêxteis - uma opção alternativa para a engenharia geotécnica. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre, 4: 169-178.

- Costa, C.M.L. e Bueno, B.S. (2000). Fluência de geotêxteis não tecidos. *Solos e Rochas*, 23 (3): 235-246.
- Ehrlich, M., Vianna, A.J.D. e Fusaro, F. (1994). Comportamento de um muro de solo reforçado. X Encontro Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu, 3: 819-824.
- Ehrlich, M. (1995). Deformações em muros de solos reforçados. 2º Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia - Geossintéticos'1995, São Paulo, 31-40.
- Ehrlich, M., Vidal, D. e Carvalho, P.A. (1997). Performance of two reinforced soil slopes. International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, 415-420.
- El-Fermaoui, A. e Nowatzki, E. (1982). Effect of confining pressure on performance of Geotextiles in soils. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, EUA, 3: 788-804.
- Fabian, K.J. e Fourie, A.B. (1988). Clay geotextile interaction in in-soil tensile tests. International Symposium on Earth Reinforcement Practice. Fukuoka, Kyushu, Japão, 81-86.
- Gardoni, M. G. e Palmeira, E. M. (2002). Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement. *Géotechnique*, 52 (6): 405-418.
- Gomes, R.C. (1993a). Interação Solo-reforço Mecanismos de Ruptura em Solos Reforçados com Geotêxteis. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 294 p.
- Gomes, R.C. (1993b). Parâmetros de projeto em estruturas de solos reforçados com geotêxteis. *Solos e Rochas* 16 (4): 267-278.
- Jewell, R.A. e Milligan, G.W.E. (1989). Deformation calculations for reinforced soil walls. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 2: 1257-1262
- Jewell, R.A. (1996). Soil Reinforcement with Geotextiles. Special Publication 123. CIRIA, Londres, 332 p.
- Koerner, R.M. (1994). Designing with Geosynthetics. Third Edition. Prentice Hall Inc., New Jersey, 783 p.
- Kokkalis, A. e Papacharisis, N. (1989). A simple laboratory method to estimate the in soil behaviour of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 8: 147-157
- Lanz, D. (1992). Estudo de Deformabilidade e Tensões em Estruturas de Arrimo em Solo Reforçado com Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 170 p.

- Leshchinsky, D e Field, D.A. (1987). In-soil load elongation, tensile strength and interface friction of nonwoven geotextiles. Geosynthetic' 87 Conference, New Orleans, EUA, 238-249.
- Leshchinsky, D. (1998). ReSlope: Supplemental Notes, University of Delaware, Newark, EUA.
- Ling, H.I., Wu, J.T.H. e Tatsuoka, F. (1992). Short-term strength deformation characteristics of geotextiles under typical operational conditions. Geotextiles and Geomembranes, 11 (2): 185-219.
- Malvern Instruments (1997). Sample Suspension Unit Manual, England.
- Manso, E.A. (1999). Análise Granulométrica dos Solos de Brasília pelo Granulômetro a Laser. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 124 p.
- Martins, C.C. (2000a). Análise e Reavaliação de Estruturas em Solos Reforçados com Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 270 p.
- Martins, C.C. (2000b). Um Novo Equipamento para Ensaio de Tração Confinada. Relatório de Pesquisa, Universidade Federal de Ouro Preto, 33 p.
- Matheus, E. (2002). Efeitos do Envelhecimento Acelerado e do Dano Mecânico Induzido no Desempenho e Durabilidade de Alguns Geossintéticos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 284 p.
- McGown, A., Andrews, K.Z. e Kabir, M.H. (1982). Load-extension testing of Geotextiles confined in-soil. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, EUA, 3: 793-798.
- Nascimento, M. T. (2006). Degradação de Geossintéticos por Fluidos Agressivos, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília (em andamento).
- Palmeira, E.M. (1987). The Study of Soil Reinforcement Interaction by Means of Large Scale Laboratory Tests. Tese de Doutorado, Universidade de Oxford, 185 p.
- Palmeira, E.M. (1990). Equipamento Para Ensaio de Tração Confinada de Geotêxteis em Solos. Relatório de Pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília.
- Palmeira, E.M. (1993). Curso de Estabilização e Reforço de Solos: Introdução a utilização de geossintéticos. Publicação N° GAP002B/93, Universidade de Brasília, 157 p.
- Palmeira, E.M., Tupa, N. e Gomes, R.C. (1996). In-soil tensile behaviour of geotextiles confined by fine soils. International Symposium on Earth Reinforcement. Fukuoka, Kyushu, Japão, 1: 129-132.
- Palmeira, E. M. (1998). Equipamento Para Ensaio de Tração Confinada de Geotêxteis em Solos – Versão 2. Relatório de Pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília.

- Palmeira, E.M. (1999a). Aspectos relacionados à interação solos-geossintéticos. 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos – 3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos’1999, Rio de Janeiro, 1:83-90.
- Palmeira, E.M. (1999b). Execução e interpretação de ensaios de laboratório em geossintéticos. 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos – 3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos’1999, Rio de Janeiro, 2:87-108.
- Palmeira E.M. e Vidal, D.M. (2001). Geossintéticos na Engenharia Civil – Curso Básico. IGS Brasil, 302 p.
- Palmeira, E.M., Gardoni, M.G. e Luz, D.W.B. (2005). Alguns aspectos ligados ao comportamento de sistemas filtro-drenantes sintéticos em obras de estabilização de encostas. IV Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE 2005, Salvador, 1: 287-300.
- Pinto, C.P. e Oliveira, L.C.D. (1995) Execução de muros de solo reforçado com geotêxtil nas encostas de Petrópolis. 2º Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia - Geossintéticos’1995, São Paulo, 71-80.
- Prado, I.D.M, Souza, N.M e Gurjão, C.M.C. (2003). Uso do granulômetro a laser para análise granulométrica da fração passante na peneira # 40 de solos tropicais. 1º Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Brasília, 195-200.
- Siel, B.D., Tzong, W.H., e Chou, N.N.S. (1987). In-soil stress-strain behavior of geotextile. Geosynthetic’ 87 Conference, New Orleans, EUA, 260-265.
- Tatsuoka, F e Leshchinski, D. (eds) (1994). Recent Case Histories of Permanent Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls. A.A. Balkema, Rotterdam, 349 p.
- Tupa, N.F. (1994). Estudo da Aderência e Interação Solo-Geossintético. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 188 p.
- Tupa, N e Palmeira, E.M. (1995). Comportamento de geotêxteis não tecidos confinados em solos finos. 2º Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia - Geossintéticos’1995, São Paulo, 139-147.
- Vidal, D. de M., Fabrin, T.W. e Montez, F.T. (1999). O conceito de fatores de redução aplicados às propriedades dos geossintéticos. 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos – 3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos’1999, Rio de Janeiro, 1:189-197.
- Wolle, C.M. e Carvalho, P.A.S. (1992). Uma experiência de aterro reforçado com geotêxteis. Seminário de Aplicação de Geossintéticos em Geotecnia – Geossintéticos 92. Brasília, 331-357.
- Wu, J.T.H. (1991). Measuring inherent load-extension properties of geotextiles for design of reinforced structures. Geotechnical Testing Journal, 14(2): 157-165.

- Wu, J.T.H. (ed) (1992). Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls. A.A. Balkema, Rotterdam, 375 p.
- Yuan, Z., Swan, R.H., Bachus R.C. e Elias, V. (1998). Soil confinement effect on stress-strain properties on geosynthetics. Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, EUA, 2:523-528.