4
Dano Mecânico

4.1.
Introdução

No projeto de maciços reforçados com geossintéticos, a tensão admissível no reforço é determinada pela aplicação de um fator de redução global sobre a resistência característica do reforço.

A resistência característica é obtida a partir de ensaios de caracterização e considera as características básicas do reforço, desconsiderando a sua interação com o meio ambiente e o tipo de solicitação imposto pela obra.

O fator de redução global é em geral, desmembrado em fatores secundários (fatores de redução parciais) e leva em consideração a redução das propriedades do geossintético devido a processos de instalação, degradação química e biológica, presença de eventuais emendas e deformações por fluência.

No caso de maciços reforçados, o fator de redução por danos de instalação (danos mecânicos) prepondera sobre os demais. A ocorrência do dano mecânico é maior quando são empregados solos de granulometria grosseira e métodos de compactação mais agressivos. Quanto maior a intensidade do dano mecânico, maior o fator de redução.

O presente capítulo apresenta uma revisão sobre os fatores de redução que devem ser aplicados sobre a resistência admissível de projeto. Será dada ênfase ao fator de redução por dano mecânico, tendo em vista que um dos objetivos do programa experimental consiste no estudo da influência do dano mecânico no mecanismo de interação solo-geogrelha.

4.2.
Fatores de Redução

Um projeto envolvendo materiais geossintéticos deve considerar três tipos de propriedades: propriedade requerida, propriedade índice e propriedade funcional (Vidal et al, 1999).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

A propriedade requerida está associada ao valor da função especificada no projeto para efeito de dimensionamento. A partir da propriedade requerida, procede-se à escolha do geossintético que melhor se aplica ao projeto. Os produtos capazes de atender às propriedades requeridas podem ser posteriormente submetidos a ensaios, para possibilitar o dimensionamento final.

As propriedades índice são obtidas a partir de ensaios de caracterização e geralmente são fornecidas pelo fabricante. Estas propriedades são inerentes ao produto e não consideram as condições de utilização do geossintético. Os ensaios de caracterização têm como objetivo determinar as características básicas do produto e possuem procedimentos estabelecidos em norma, tratando-se, em geral, de ensaios rápidos e simples.

A propriedade funcional deve levar em consideração o tipo de solicitação imposta na obra e as condições de utilização do geossintético. Esta propriedade representa o comportamento do geossintético sob as condições de utilização impostas pela obra e permite considerar a interação com o meio adjacente.

A propriedade funcional (T_k) de um determinado geossintético pode ser determinada pela razão entre a propriedade índice (T_i) e o fator de redução total (f_T). O fator de redução total (f_T) é dado pelo produto dos fatores de redução parciais, definidos por função e tipo de aplicação.

No caso de maciços reforçados com geossintéticos, os principais fatores de redução a serem considerados são:

- Fator de redução devido a deformações por fluência (f_f);
- Fator de redução devido à degradação química e biológica pelo meio ambiente (f_a);
- Fator de redução devido a eventuais emendas (f_e);
- Fator de redução devido a danos mecânicos (f_d);

Neste caso, a propriedade funcional é dada pela expressão:

$$T_k = \frac{T_i}{f_f . f_a . f_e . f_d} \qquad (67)$$

Em suma, os fatores de redução indicam a razão entre a propriedade índice e a propriedade funcional sob condições específicas de projeto. O fator de redução total é composto pelo conjunto dos fatores de redução parciais obtidos para cada condição. A análise de sistemas de contenção em solo reforçado tem adotado os fatores de redução parciais (ou fatores de segurança parciais), ao

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

invés de um único fator de segurança total, como é usual em outras áreas da Geotecnia. O motivo da adoção de fatores de redução parciais deve-se às inúmeras variáveis que intervêm nas propriedades mecânicas dos reforços em condições de serviço.

Os fatores de redução dependem basicamente das características do geossintético e das características do ambiente onde o geossintético será instalado. Dentre as características dos geossintéticos, pode-se citar o tipo e a natureza do polímero e o processo de fabricação. Em relação às características do ambiente, destacam-se o tipo de aplicação do geossintético (ou seja, a função desempenhada), o tipo de obra e o processo de instalação. As Tabelas 7 e 8 sugerem valores de fatores de redução em função do tipo de aplicação e do tipo de polímero constituinte, respectivamente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

Tabela 7 - Fatores de Redução em Função do Tipo de Aplicação do Geossintético (Adaptado de Koerner, 1998)

Aplicação	**Solicitação** [1]	f_d	f_f [2]	f_a
Aterro sobre solos moles	T	1,1 – 2,0	2,0 – 3,5	1,0 – 2,0
Barreira de silte	T	1,1 – 1,5	1,5 – 2,5	1,0 – 1,7
Capacidade de carga	T	1,1 – 2,0	2,0 – 4,0	1,0 – 2,0
Estruturas de retenção: Reforço	T	1,1 – 2,0	2,0 – 4,0	1,0 – 2,0
Estruturas de retenção: Filtros	C	---	1,5 – 2,0	---
Forma flexível	T	1,1 – 1,5	1,5 – 3,0	1,0 – 1,7
Pavimentos	T	1,1 – 1,5	1,0 – 2,0	1,0 – 1,7
Reforço de base	T	1,1 – 2,0	1,5 – 2,5	1,0 – 1,8
Separação	T	1,1 – 2,5	1,5 – 2,5	1,0 – 1,8
Vias férreas	T	1,5 – 3,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,4
Filtros subterrâneos	C	---	1,0 – 1,5	---
Filtros: controle de erosão	C	---	1,0 – 1,5	---
Filtros: aterros sanitários	C	---	1,5 – 2,0	---
Drenagem por gravidade	C	---	2,0 – 3,0	---
Drenagem por pressão	C	---	2,0 – 3,0	---

[1] (T = tração ; C = compressão / cisalhamento)

[2] (os valores inferiores são recomendados para obras de curta duração ou obras nas quais as deformações por fluência não comprometam a funcionalidade)

Tabela 8 - Fatores de Redução em Função do Tipo de Polímero (Adaptado de Vidal et al, 1999)

	França		Alemanha	
	PET	PP, PE	PET	PP, PE
f_f	2,5	5,0	2,5	5,0
f_d	1,5		1,5	
f_a [1]	1,05		2,0	
f_e [2]	1,0		1,0	

Legenda: PET: poliéster PP: polipropileno PE: polietileno

[1] (sem impacto ambiental) ; [2] (sem emendas)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

4.2.1. Fator de Redução Devido à Fluência

A fluência pode ser definida como a aptidão de um material ao alongamento, quando submetido a um carregamento estático de longa duração. A magnitude das deformações por fluência depende da composição do polímero e da estrutura das fibras.

Os polímeros constituem-se em longas cadeias de moléculas orientadas, com alternância entre regiões cristalinas e amorfas. As porções dos polímeros que se alinham em pequenas regiões são denominadas “cristalinas”, enquanto as regiões não alinhadas são denominadas “amorfas”. As cadeias moleculares apresentam a tendência de deslizarem entre si, no interior das regiões cristalinas. O grau de fluência será condicionado pela porcentagem de cristalinidade do polímero (Abramento, 1995a). Quanto maior a cristalinidade do polímero, maior a susceptibilidade do material à fluência.

Os polímeros mais susceptíveis à fluência, sob condições não confinadas, em ordem crescente são o poliéster (PET), a poliamida (PA), o polipropileno (PP) e o polietileno de alta densidade (PEAD).

Os poliésteres e as poliamidas apresentam baixa cristalinidade e, consequentemente, um grau de fluência menor.

Os poliésteres são pouco deformáveis e, segundo Prevorsek et al (1977), a reduzida susceptibilidade à fluência do poliéster pode ser atribuída à sua estrutura molecular. Den Hoedt (1986) ressalta ainda o fato da temperatura de

transição vítrea dos poliésteres ser maior do que 70°C, sendo, portanto, superior às temperaturas ambientes usuais nas aplicações dos geossintéticos.

O polipropileno e o polietileno apresentam alta susceptibilidade à fluência, relacionada à baixa temperatura de transição vítrea destes polímeros. A temperatura de transição vítrea do polipropileno é da ordem de -10° C, enquanto a do polietileno é inferior à -100°C (Den Hoedt, 1986). Além disso, estes polímeros apresentam elevada cristalinidade, conduzindo a uma fluência maior.

Em geral, o fator de redução por fluência é definido pela razão entre a carga de ruptura convencional (obtida em ensaios de tração simples) e a carga que leva à ruptura do geossintético por fluência. O nível de fluência de um material está diretamente relacionado à porcentagem de carga máxima a que ele está submetido e à temperatura ambiente (Bush, 1990).

O efeito da temperatura no comportamento à fluência dos geossintéticos é pequeno para variações de temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea (T_v) do material. No entanto, para temperaturas acima da T_v, o efeito da temperatura ambiente é mais acentuado.

O ensaio de fluência para geotêxteis e produtos correlatos submetidos à tração possui norma internacional (ISO 13431, 1998). Os procedimentos de ensaio já foram apresentados no item 2.2.6.5. O Comitê Europeu de Normalização apresenta um procedimento para estudar o comportamento em fluência sob solicitações de compressão (ENV 1897, 1996).

Ling (1990), Wu e Hong (1994) e McGown et al (1982) estudaram a influência do confinamento sobre o comportamento em fluência dos geossintéticos. Para os geossintéticos constituídos de polipropileno e polietileno de alta densidade, os autores observaram uma redução significativa da fluência com o confinamento.

4.2.2.
Fator de Redução Devido à Degradação pelo Meio Ambiente

O meio ambiente pode produzir a degradação dos geossintéticos ao longo de sua vida útil. A degradação ambiental manifesta-se através dos mecanismos de degradação química e biológica. Estes mecanismos atuam continuamente ao longo do tempo de serviço do reforço.

A degradação química compreende a transformação estrutural dos polímeros, resultante da ação de substâncias quimicamente ativas presentes no

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

solo. É um processo mais intenso em polímeros de baixo peso molecular, baixa porcentagem de cristalinidade e baixa densidade (Jewell e Greenwood, 1988).

Os principais mecanismos de degradação química são a termo-oxidação, a foto-oxidação e a hidrólise.

A termo-oxidação é o mecanismo de oxidação ativado pelo calor. Em temperaturas normais de utilização em Geotecnia, os polímeros comumente empregados nos geossintéticos não apresentam, em geral, problemas de estabilidade. No entanto, sob temperatura elevada, algumas propriedades mecânicas podem sofrer alteração ao longo do tempo, especialmente a relação tensão-deformação (Abramento, 1995b).

O polipropileno é o polímero mais susceptível à termo-oxidação. As fibras de polipropileno sujeitas a temperaturas elevadas podem sofrer termo-oxidação, o que provoca um aumento da fragilidade das fibras (Schneider, 1988). O efeito da termo-oxidação é mínimo para filamentos de poliéster e poliamida.

A ASTM D794 propõe um procedimento de ensaio para a verificação da degradação de materiais poliméricos sob a ação da temperatura. A amostra é colocada em um forno, permitindo-se fluxo constante de ar. A temperatura é aumentada gradativamente até a ruptura da amostra. A degradação é avaliada pela alteração das propriedades do geossintético.

A foto-oxidação é um mecanismo oxidante ativado pela radiação ultravioleta. A ação da radiação UV atinge apenas a superfície das fibras (Wrigley, 1987), tornando-as quebradiças e com menor resistência. O polipropileno apresenta a maior sensibilidade à foto-oxidação, seguido pelo polietileno. A poliamida apresenta uma sensibilidade moderada e o poliéster é o menos sensível à luz solar. Jones (1985) comenta que a sensibilidade de um polímero à foto-oxidação é semelhante à sensibilidade à termo-oxidação.

Na maioria das aplicações, os geossintéticos estão enterrados, mas os riscos de degradação por raios ultravioleta não devem ser descartados. Falhas na estocagem do produto ou na programação da obra podem implicar em uma exposição excessiva.

A ASTM D4355 recomenda a utilização de lâmpadas especiais para a simulação do efeito do sol. As amostras de geossintéticos são submetidas à exposição da luz por períodos de 0, 150, 300 e 500 horas, alternando períodos de 102min de luz e 18min de luz com aspersão de água. A influência dos raios ultravioleta é avaliada pela redução da resistência da amostra.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

Pandolpho e Guimarães (1995) avaliaram a perda de resistência de amostras de geotêxteis expostas ao intemperismo. O geotêxtil com maior espessura apresentou maior resistência aos raios ultravioleta.

A hidrólise consiste na ruptura das cadeias moleculares pela ação das moléculas de água. O processo de hidrólise pode ocasionar uma perda de massa molecular do polímero para o meio em que se encontra e uma erosão superficial das fibras do geossintético. A conseqüência desse processo é a perda de resistência por enfraquecimento das fibras que compõem o produto (Salman et al, 1997). A hidrólise ocorre de forma muito lenta em meios neutros com temperatura próxima a 20ºC, não sendo necessária a adoção de fatores de redução para tempos de utilização inferiores a 25 anos.

O poliéster é o polímero mais susceptível à hidrólise, podendo ocorrer até mesmo em meios neutros. Em meios alcalinos, sobretudo na presença de cálcio e para situações de pH > 9, a utilização do poliéster deve ser estudada com atenção (Vidal et al, 1999). A poliamida também é susceptível à hidrólise, mas os ensaios mostram um efeito mais degradante no caso de meios ácidos.

Vidal et al (1991) apresentam uma metodologia para avaliar a perda de resistência por hidrólise em meio alcalino de um geotêxtil não tecido de poliéster, comparando amostras virgens e degradadas.

Outro agente de degradação ambiental é o oxigênio, que afeta sobretudo o polipropileno e o polietileno. A oxidação provoca a corrosão das fibras do geossintético causando sua ruptura, e consequentemente, a redução de suas propriedades.

O Guia de Durabilidade de Geotêxteis e Produtos Correlatos (ISO 13434, 1998) apresenta como fatores intervenientes no processo de degradação ambiental: o pH do meio, a presença de íons metálicos e de matéria orgânica, a pressão parcial de oxigênio, o teor de umidade e a temperatura do meio. Os geossintéticos apresentam baixa degradação, nas condições normais de serviço: tempo de utilização menor que 25 anos, pH entre 4 e 9, temperatura do solo inferior a 25ºC, e solo natural sem contaminantes. Para condições de serviço diferentes destas, os fatores de redução devem ser reavaliados.

A degradação biológica é resultante da atividade de microorganismos (bactérias e fungos), que podem eventualmente se agregar à superfície dos geossintéticos.

Os polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos possuem, em geral, peso molecular elevado, conferindo aos geossintéticos resistência ao ataque microbiológico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

A ASTM G-12 fornece procedimentos para a determinação da resistência de materiais poliméricos a fungos e a ASTM G-22 propõe métodos para a avaliação da resistência de polímeros a bactérias.

A Tabela 9 apresenta um resumo da resistência de diversos polímeros à degradação ambiental.

Tabela 9 - Resistência aos Processos de Degradação dos Polímeros (Adaptado de Abramento, 1995b)

		PP	PET	PEAD	PA
Degradação química	álcalis	2 a 3	1	3	2
	ácidos	3	2	3	1
Foto-oxidação	com tratamento	3	3	3	2
	sem tratamento	1	1	1	1
Hidrólise		1	0 a 1	2	1
Termo-oxidação		0	3	1	2
Degradação biológica		2	2	3	2

Legenda: 3 – resistência muito elevada 2 - elevada 1 - média 0 - baixa

4.2.3. Fator de Redução Devido a Emendas

As emendas em geossintéticos podem ser executadas através de 4 processos: solda ou colagem, travamento simples, superposição de camadas ou costura. A presença de emendas gera uma região menos resistente. Para os processos de solda, costura e travamento, os fatores de redução devido a emendas são obtidos através de ensaios de tração em emendas.

As normas NBR 13134 (1993) e ISO 10321 (1993) propõem ensaios de tração simples de emendas em geotêxteis e produtos correlatos. A norma NFP 84501 (1993) apresenta procedimentos para ensaios em emendas em geomembranas. No caso da emenda executada através da superposição de camadas, devem ser avaliadas as características de atrito das interfaces.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

4.2.4.
Fator de Redução Devido a Danos Mecânicos

Durante o processo de instalação, o geossintético pode sofrer danos provocados pela compactação, tráfego de veículos, lançamento de agregados pontiagudos, rasgos, etc. Estes danos podem reduzir significativamente as propriedades mecânicas do produto.

O fator de redução por danos de instalação é função do tipo do material em contato com o geossintético, do tipo de obra, e do processo de instalação. Um geossintético utilizado como elemento de reforço de base de pavimentos pode sofrer danos de instalação maiores do que um geossintético para reforço de aterro sobre solo mole. No primeiro caso, o geossintético estará em contato com um material granular anguloso, compactado com uma energia alta. No segundo, o geossintético estará em contato com um material fino, compactado com uma energia menor.

O fator de redução devido a danos de instalação é de determinação polêmica, devido ao grande número de variáveis envolvidas na questão do dano. Como conseqüência, a simulação em laboratório dos danos possíveis durante a instalação teve diferentes propostas de ensaio.

O Comitê Europeu de Normalização propõe um procedimento para simular danos severos durante a instalação de um material granular (ISO 10722-1). O corpo de prova de geossintético é colocado entre camadas de óxido de alumínio sinterizado* (camada inferior de 75mm compactada a 200kPa e camada superior de 30mm compactada a 5 kPa). O dano é simulado pela aplicação de 200 ciclos de um carregamento compressivo variando de 5 a 900kPa, com freqüência de 1Hz. O material “danificado” é então submetido a ensaio para determinação da propriedade que se quer avaliar, obtendo-se o fator de redução devido ao dano.

Os danos decorrentes da instalação dos geossintéticos são usualmente avaliados comparando-se a resistência de uma amostra do material recém instalado à resistência do material intacto. O fator de redução devido ao dano mecânico é definido pela razão entre a resistência do material intacto e a resistência do material danificado.

---

* *“Sinterização é o processo em que 2 ou mais partículas sólidas se aglutinam pelo efeito do aquecimento a uma temperatura inferior à temperatura de fusão, mas suficientemente alta para possibilitar a difusão dos átomos das 2 redes cristalinas”*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

4.3.
Investigação do Dano Mecânico

O dano mecânico pode ser definido como a transformação da estrutura do geossintético causada por esforços durante o manuseio e instalação do material e durante a compactação do solo sobrejacente. Paulson (1990) destaca ainda uma outra fase do dano mecânico, decorrente das solicitações iniciais de serviço, após a compactação.

Christopher e Holtz (1984) procuram quantificar valores para o fator de redução devido ao dano mecânico, relacionando a perda de resistência com a capacidade de sobrevivência do geossintético. O termo “capacidade de sobrevivência” é utilizado usualmente para descrever tanto a resistência à destruição do geossintético, quanto à severidade do ambiente de instalação.

Azambuja (1994), no entanto, optou por restringir a expressão “capacidade de sobrevivência” para descrever somente a resistência à destruição do geossintético diante dos esforços decorrentes do processo construtivo e das solicitações iniciais da obra. Para expressar a severidade do ambiente de instalação, o autor sugeriu o conceito de “severidade do meio”.

Christopher e Holtz (1984) classificaram os geotêxteis em categorias de baixa, moderada e alta capacidade de sobrevivência, de acordo com as características estruturais e mecânicas do material. Rainey e Barsdale (1993) dividem as geogrelhas em 2 categorias: flexíveis (geogrelhas tecidas) e rígidas (geogrelhas de polietileno ou polipropileno). Wrigley (1987) e Troost e Ploeg (1990) propõem critérios de classificação da capacidade de sobrevivência de geogrelhas baseados na resistência à tração de curto prazo. Os critérios de classificação da capacidade de sobrevivência de geotêxteis e geogrelhas registrados na literatura estão resumidos na Tabela 10.

Os ambientes de instalação são classificados segundo a agressividade ou severidade do meio. Allen (1991) propõe critérios de classificação da severidade do ambiente em função das condições de instalação do geossintético em sistemas de contenção (Tabela 11). Esta classificação é função da espessura da camada de solo sobrejacente ao geossintético, da forma e da dimensão dos grãos de solo e do tipo de equipamento utilizado na compactação.

No presente trabalho, optou-se por distinguir dois tipos de dano: o dano natural, obtido a partir de simulações de processos de instalação e compactação e o dano artificial, produzido a partir da indução artificial do dano.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

Tabela 10 - Critério para Classificação da Capacidade de Sobrevivência de Geossintéticos (Adaptado de Azambuja, 1994)

Capacidade de Sobrevivência	Geotêxteis		Geogrelhas	
	Tecidos	Não tecidos	Flexíveis	Rígidas
Baixa	$M_A \leq 135$	$M_A \leq 135$	___	___
Moderada	$135 < M_A \leq 150$	$135 < M_A \leq 200$	$T \leq 55$	$T < 55$
Alta	$M_A > 150$	$M_A > 200$	$T > 55$	$T \geq 55$

Legenda: M_A = massa por unidade de área ou gramatura (g/m²)
T = resistência à tração (kN/m²)

Tabela 11 - Classificação da Severidade do Meio (Allen 1991, citado por Azambuja 1999)

Tipo de Equipamento	Aterro	Espessura da Camada		
		< 15cm	15-30cm	> 30cm
leve e rebocado	areia fina a grossa com grãos sub-arredondados	baixa	baixa	baixa
	areia e cascalho bem graduados com grãos de sub-arredondados a sub-angulares, $\phi_{max} < 75mm$	moderada	baixa	baixa
	cascalho mal graduado com grãos angulosos, $\phi_{max} < 75mm$	muito alta	alta	moderada
pesado e autopropelido	areia fina a grossa com grãos sub-arredondados	moderada	baixa	baixa
	areia e cascalho bem graduados com grãos de sub-arredondados a sub-angulares, $\phi_{max} < 75mm$	alta	moderada	baixa
	cascalho mal graduado com grãos angulosos, $\phi_{max} < 75mm$	NR	muito alta	alta

Legenda: NR = não recomendável

4.3.1. Programas Experimentais

Azambuja (1994) resume os resultados de vários programas experimentais executados para avaliar a influência do dano mecânico no comportamento de geossintéticos. Na maioria dos casos, a perda de resistência foi avaliada através da razão entre as resistências à tração simples de amostras intactas e de amostras exumadas. As amostras danificadas naturalmente foram exumadas de obras reais (Bonaparte et al, 1988 e Koerner e Koerner, 1990), de obras

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

experimentais (Wrigley, 1987; Bush, 1988; Elias, 1990; Leclerq et al, 1990; Troost e Ploeg, 1990; Koerner e Koerner, 1990; Allen, 1991; Rainey e Barksdale, 1993; Sandri et al, 1993 e Azambuja, 1994) ou de modelos construídos em laboratório com simulação dos procedimentos de compactação (Billing et al, 1990; Watts e Brady, 1990, Paulson, 1990 e Azambuja, 1994).

Bush (1988) executou ensaios com geogrelhas rígidas de PEAD em ambientes de severidade baixa e moderada. As amostras de geogrelha foram exumadas de pistas experimentais. O autor registrou perdas de resistência de 4 a 8% em ambientes de severidade baixa e de 12 a 17% em ambientes de severidade moderada.

Ensaios reportados por Wrigley (1987) com geogrelhas rígidas de poliéster em pistas experimentais indicaram uma perda de resistência de 5 a 10% em ambientes de severidade baixa, de 10 a 24% em ambientes de severidade moderada e de 30 a 40% em ambientes de severidade alta.

Troost e Ploeg (1990) realizaram ensaios com geogrelhas de poliéster revestidas com PVC, também exumadas de pistas experimentais. Em ambientes de severidade baixa, a perda máxima de resistência foi de 8%. Para ambientes de severidade alta, a perda de resistência variou de 2 a 13%.

No caso de geotêxteis exumados de obras experimentais, Allen (1991) reporta perdas de resistência de até 40% para geotêxteis tecidos de polipropileno e poliéster, em ambientes de severidade moderada. Troost e Ploeg (1990) observaram perdas de resistência de 7 a 15% e 12 a 25% com geotêxteis tecidos de poliéster, sob condições de severidade baixa e moderada, respectivamente. Os autores alertam que, quando a perda de resistência é inferior a 10%, a rigidez inicial da amostra exumada pode ser ligeiramente superior à rigidez da amostra intacta. Este fato pode ser atribuído a um pré-estiramento induzido pela compactação.

Ensaios com amostras exumadas de obras reais demonstraram que as geogrelhas rígidas de PEAD não apresentam perda de resistência em ambientes de severidade baixa. No entanto, geotêxteis tecidos de polipropileno e não tecidos de poliéster apresentaram uma perda de resistência de 15%, sob as mesmas condições de instalação (Koerner e Koerner, 1990).

Viezee et al (1990) concluíram que o dano mecânico não altera significativamente a deformação média das fibras, uma vez que se constitui em uma lesão localizada. Embora a resistência seja comprometida pelo estrangulamento da seção transversal, a fibra danificada não tem a rigidez alterada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

Azambuja (1994) executou ensaios em amostras exumadas de um geotêxtil não tecido. Uma camada de solo reforçado foi construída utilizando-se um solo granular e equipamentos pesados de terraplanagem. Após a exumação, o geotêxtil foi submetido a ensaios de tração não confinada de faixa larga. O autor relacionou a perda de resistência com a freqüência e a tipologia do dano. As principais conclusões sobre a resistência de geossintéticos após a instalação e as condições iniciais de serviço foram:

1. Os geotêxteis tecidos são mais susceptíveis ao dano do que os geotêxteis não tecidos;
2. As fibras de poliéster são mais susceptíveis ao dano do que as fibras de polietileno e polipropileno;
3. Os geossintéticos com uma cobertura de PVC apresentaram uma menor perda de resistência;

Em geral, os fatores de redução são definidos a partir de ensaios de tração simples, ou seja, sob condições não confinadas. No entanto, em solicitações no campo, os geossintéticos encontram-se quase sempre imersos em uma massa de solo. Desta forma, os ensaios confinados reproduzem mais adequadamente as condições de operação de geossintéticos em maciços de solo reforçado. A variação das propriedades mecânicas medidas em ensaios confinados proporciona, portanto, uma avaliação mais correta dos fatores de redução devido ao dano mecânico.

Nos sistemas de contenção, o geossintético fica posicionado entre 2 camadas de solo com características semelhantes. No caso de materiais angulosos e de granulometria uniforme, o dano mecânico resulta de elevadas tensões nos contatos, decorrentes dos esforços de compactação (Figura 37). As lesões originadas desta forma tendem a apresentar pequenas dimensões.

Lopes (2000b) realizou uma série de ensaios de arrancamento em amostras de geogrelha previamente danificadas, sob diferentes níveis de confinamento. O dano artificial foi induzido através da ruptura de elementos da malha e 9 configurações distintas de dano foram ensaiadas. Quando a amostra apresenta danos leves, ocorre a ruptura por arrancamento da geogrelha da massa de solo. No caso de amostras fortemente danificadas, a geogrelha rompe por tração em algum ponto localizado da malha. O autor observou também, que a razão entre a resistência ao arrancamento da amostra intacta e a resistência ao arrancamento da amostra danificada aumenta com o aumento da tensão confinante.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

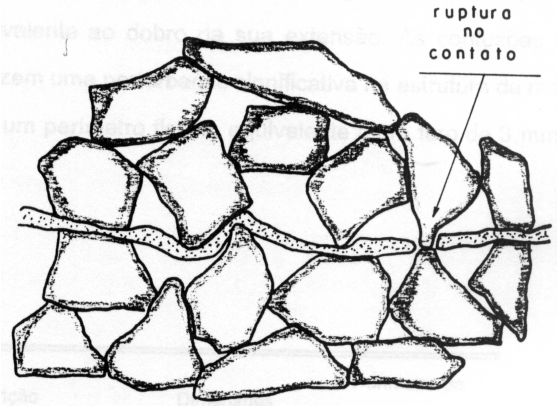

Figura 37 - Mecanismo Gerador de Dano em Geossintéticos Utilizados como Elementos de Reforço de Solos (Azambuja, 1994)

Resultados de ensaios de tração confinada em geotêxteis não tecidos, embutidos em areia e brita, foram reportados por Azambuja (1999). Quatro níveis de confinamento e três níveis de energia de compactação foram estabelecidos. A energia de compactação foi reproduzida com o auxílio de placas vibratórias, com controle da freqüência, amplitude e peso. Como principais conclusões, o autor destaca:

1. Sob um nível baixo de energia de compactação, a resistência confinada é menor do que a resistência não confinada, sendo que esta diferença diminui com o aumento do confinamento;
2. Sob um nível médio de energia de compactação, a resistência confinada é ligeiramente superior à resistência não confinada, sendo que esta diferença aumenta com a tensão confinante;
3. Sob um nível elevado de energia de compactação, a resistência confinada é significativamente superior à resistência não confinada.

A grande diferença verificada entre a resistência confinada e não confinada para energias altas de compactação realça a influência do confinamento no desempenho das amostras danificadas.

4.3.2. Critérios de Inspeção Visual

Os danos mecânicos podem ser constatados visualmente através de abrasões, contusões, cortes, furos ou rupturas dos fios e/ou membros do material geossintético. A inspeção visual de amostras exumadas pode ser um critério útil para a avaliação do dano mecânico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

Koerner e Koerner (1990) realizaram um estudo sobre danos de instalação em 48 obras nos Estados Unidos, analisando 75 produtos distintos. Os autores relacionaram a perda de resistência com o número de lesões observado. Os ambientes de instalação foram classificados segundo a freqüência das lesões.

Billing et al (1990) propõem critérios visuais baseados no tipo de lesão provocado pelo dano mecânico. Na Tabela 12, estão apresentadas as classificações propostas por Billing et al (1990) para geotêxteis e geogrelhas, respectivamente. Os autores não apresentam correlações entre a freqüência de danos e a perda de resistência.

Azambuja (1999) apresenta um programa experimental desenvolvido para avaliar a manifestação dos danos mecânicos em geotêxteis não tecidos de poliéster, quando associados a solos granulares grosseiros. Uma camada experimental foi construída, impondo-se sobre o geotêxtil uma energia de compactação de 4100 J/m². Após a compactação, o geotêxtil foi exumado e dividido em 52 células de 0,5m² para a quantificação das lesões. Baseado em inspeção visual, o autor propõe um critério de classificação para o dano mecânico (Tabela 13). Este critério é mais simples e prático do que o critério proposto por Billing et al (1990).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

Tabela 12 - Classificação das Lesões em Geossintéticos (Billing et al, 1990)

	Lesão	**Descrição**
Geotêxteis Tecidos	Corte	Mais de um fio inteiramente rompido
	Ruptura	Um fio rompido isoladamente
	Contusão	Abrasão associada com distorção da estrutura e dos fios
	Desgaste	Abrasão e distorção da estrutura, menos intensa que a contusão
	Fibrilação	Ruptura das fibras superficiais em região definida
Geogrelhas	Talho	Corte longitudinal no elemento (transversal ou longitudinal)
	Corte	Ruptura completa do elemento
	Incisão	Corte transversal parcial do elemento
	Contusão	Amasso ou distorção dos elementos
	Desgaste	Área de severa abrasão

Tabela 13 - Classificação das Lesões no Geotêxtil Não Tecido Conforme a Forma e as Dimensões (Azambuja, 1994)

Lesão	**Descrição**
Contusão	Forte distorção da estrutura da manta, sem orifícios
Furo	Orifício com forma aproximadamente circular
Corte	Orifício com forma alongada

A quantificação do dano foi correlacionada com o perímetro específico das lesões (U_d), que pode ser definido como a razão entre o somatório dos perímetros de todas as lesões visualmente identificáveis e a área da amostra exumada de geotêxtil. Desta forma, Azambuja (1999) propõe critérios para identificar a classe do dano, em função do valor de U_d e da resistência remanescente, como indica a Tabela 14 . O critério de avaliação do dano mecânico baseado no perímetro específico das lesões possui uma boa correlação com a resistência remanescente das amostras exumadas de geotêxteis não tecidos.

Tabela 14 - Resistência Remanescente das Amostras de Geotêxteis Danificadas (Adaptado de Azambuja, 1999)

Classe do Dano	**U_d (m/m²)**	**T_f (%)**
Leve	0 - 2	80 - 100
Moderada	2 - 5	63 - 80
Intensa	5 - 13	54 - 75
Inadmissível	> 13	< 50

T_f = porcentagem de resistência à tração remanescente

4.4. Considerações Finais

No projeto de maciços reforçados, a tensão admissível no reforço é determinada após a aplicação de um fator de redução global sobre a resistência do reforço. O fator de redução global é composto por fatores de redução parciais, os quais devem considerar as eventuais reduções da resistência do geossintético causadas por processos de instalação, degradação química e biológica, presença de emendas e fluência.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA

Neste capítulo foi apresentada uma revisão sobre os fatores de redução a serem considerados no projeto de maciços reforçados, com ênfase no fator de redução por dano mecânico. No caso de maciços reforçados, o fator de dano mecânico prepondera sobre os demais fatores de redução, justificando o interesse em estudar a influência deste tipo de dano no mecanismo de interação solo-geogrelha.

O dano mecânico é definido como a transformação da estrutura do geossintético resultante de esforços ocorridos durante a fase de instalação. A busca de fatores de redução por dano mecânico tem encontrado obstáculos face ao grande número de variáveis envolvidas na questão do dano.

Em geral, a perda de resistência é avaliada através de ensaios de tração não confinada, executados em amostras exumadas de obras, pistas experimentais ou dispositivos construídos em laboratório. No entanto, a variação das propriedades mecânicas deve ser medida através de ensaios confinados, os quais proporcionam uma avaliação mais adequada dos fatores de redução.

Critérios de inspeção visual têm sido utilizados para avaliar o dano mecânico e algumas propostas foram apresentadas para relacionar a perda de resistência com o número e a freqüência das lesões.

Os conceitos de capacidade de sobrevivência dos geossintéticos e de severidade do meio de instalação foram revisados, juntamente com os principais critérios de classificação propostos na literatura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9824850/CA