



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

António Miguel Verdelho Paula

Danificação durante a instalação - avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto para a obtenção do Grau de
Mestre em Mecânica dos Solos e
Engenharia Geotécnica

Janeiro de 2003

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|------------|
| RESUMO | v |
| ABSTRACT | vii |
| AGRADECIMENTOS | ix |
| ÍNDICE DE TEXTO | xi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xv |
| ÍNDICE DE QUADROS | xxiii |
| SIMBOLOGIA | xxvii |
| | |
| CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| | |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO AOS GEOSSINTÉTICOS | 3 |
| | |
| CAPÍTULO 2 – DURABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS | 41 |
| | |
| CAPÍTULO 3 – INDUÇÃO DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO – ENSAIO LABORATORIAL | 85 |
| | |
| CAPÍTULO 4 – DANIFICAÇÃO MECÂNICA DURANTE A INSTALAÇÃO – ANÁLISE EXPERIMENTAL ATRAVÉS DE ENSAIOS LABORATORIAIS DE DANIFICAÇÃO | 103 |
| | |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 145 |
| | |
| BIBLIOGRAFIA | 147 |

RESUMO

Um dos aspectos de maior actualidade na área dos geossintéticos é o estudo da sua durabilidade, em particular, às acções mecânicas a que estão sujeitos durante os processos de instalação e construção. Sob estas acções os geossintéticos podem ser danificados e a alteração das suas propriedades pode comprometer o bom funcionamento das construções em que estão inseridos.

Não havendo até à data consenso quanto ao método de avaliação da influência da danificação durante a instalação dos geossintéticos, entendeu-se de interesse contribuir com este trabalho para o esclarecimento do papel que alguns parâmetros, nomeadamente o tipo de solo e a estrutura do geossintético, têm nesta acção de danificação.

O trabalho divide-se em quatro Capítulos que por sua vez se dividem em Sub-Capítulos e Secções. No Capítulo 1, descrevem-se os materiais constituintes, estrutura, funções e propriedades dos geossintéticos, faz-se ainda referência ao seu comportamento mecânico a curto e longo prazo. Tendo como base a bibliografia especializada expõe-se, no Capítulo 2, aspectos da durabilidade dos geossintéticos dando-se especial atenção à danificação que sofrem devido aos processos de instalação. Seguidamente, no Capítulo 3, são referidos os procedimentos de ensaio laboratorial de simulação da danificação durante a instalação constantes na Norma Europeia regulamentada para o efeito. A finalizar, no Capítulo 4, faz-se uma análise experimental da influência na danificação durante a instalação dos geossintéticos dos parâmetros mais relevantes e comparam-se os resultados do estudo com outros, publicados, obtidos em ensaios de laboratório e de campo. Como nota final são apresentadas as principais conclusões retiradas ao longo do trabalho e sugerem-se vias para futuras investigações.

ABSTRACT

In the domain of geosynthetics, durability is, nowadays, one main important area of research, particularly to what concerns the mechanical loads during installation and construction processes. Under that loads geosynthetics can be damaged and the consequent loss of resistance can compromise the safety behaviour of the structure.

As no consensus exist about the method to evaluate the influence of damage of geosynthetics during installation, it appears important to contribute, with this thesis, to the clarification of the role of some parameters, namely soil type and geosynthetics structure, on damage during installation of geosynthetics.

The present work have four Chapters that are divided in Sub-Chapters and Sections. In Chapter 1, the geosynthetics polymer constituents, structures, functions and properties are described, apart from this it's short and long term mechanical behaviour is also assessed. Taking into the account the state of art, the next Chapter is devoted to the durability of geosynthetics, with special attention focused into the mechanical damage during installation. Chapter 3 of this study, sets out the experimental procedures of simulating damage during installation, according to the regulated European Norm. In the last chapter, based on results of the experimental work, the influence of the more relevant parameters on damage during installation of geosynthetics are analysed and compared with published data. Finally, the main conclusions are stated and some recommendations for future work are suggested.

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho não posso deixar de expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que de algum modo colaboraram para a sua concretização, em especial:

- à Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, pela sua constante colaboração interesse e disponibilidade durante a elaboração desta dissertação, tendo acompanhado todos os trabalhos com ensinamentos oportunos e sugestões valiosas, numa atitude de compreensão intelectual e humana;

- à Engenheira Margarida Pinho Lopes que colaborou com grande interesse e disponibilidade, bem como com valiosas informações prestadas;

- aos meus colegas e amigos que, quer pela companhia quer pelo apoio e colaboração, contribuíram para a realização deste trabalho nomeadamente: Silvério Coutinho, Patrícia Lopes e Rui Silvano;

- ao Laboratório de materiais de construção do departamento de Engenharia Civil da FEUP nomeadamente ao Sr. Fernando Hora e à Eng.^a Cláudia Moutinho;

- à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, nomeadamente ao Departamento de Mecânica Aplicada. Em especial à Eng.^a Conceição Baixinho, Eng.^o Pedro Nogueiro;

- aos meus pais, irmão e avó pelo carinho, amizade, entusiasmo, paciência com que me acompanharam ao longo deste tempo bem como as suas palavras de apoio e incentivo;

- à Sónia Geraldes, pela importante e insubstituível companhia, para além do tempo em que se revelou incansável na preciosa colaboração; pelas palavras de incentivo e interesse.

ÍNDICE TEXTO

| | |
|---|-----------|
| CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO AOS GEOSSINTÉTICOS | |
| 1.1 – INTRODUÇÃO | 3 |
| 1.2 – GEOSSINTÉTICOS | 4 |
| 1.2.1 – Preâmbulo | 4 |
| 1.2.2 – Materiais Constituintes | 6 |
| 1.2.2.1 – <i>Considerações Iniciais</i> | 6 |
| 1.2.2.2 – <i>Polímeros Base e Aditivos</i> | 8 |
| 1.2.2.3 – <i>Comparação entre Propriedades dos Polímeros</i> | 10 |
| 1.2.3 – Estrutura dos Geossintéticos | 11 |
| 1.2.3.1 – <i>Introdução</i> | 11 |
| 1.2.3.2 – <i>Geotêxteis Tecidos e Não Tecidos</i> | 14 |
| 1.2.3.3 – <i>Geogrelhas</i> | 16 |
| 1.2.3.4 – <i>Geomembranas</i> | 17 |
| 1.3 – FUNÇÕES E PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS | 18 |
| 1.3.1 – Funções | 18 |
| 1.3.2 – Propriedades | 22 |
| 1.3.3 – Considerações Finais | 24 |
| 1.4 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS GEOSSINTÉTICOS | 25 |
| 1.4.1 – Considerações Iniciais | 25 |
| 1.4.2 – Componentes da Deformação de um Geossintético | 26 |
| 1.4.3 – Comportamento Mecânico a Curto Prazo | 27 |
| 1.4.3.1 – <i>Tipos de Ensaio</i> | 27 |
| 1.4.3.2 – <i>Influência do Polímero Constituinte e da Estrutura</i> | 28 |
| 1.4.3.3 – <i>Módulo de Rigidez</i> | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 1.4.4 – Comportamento Mecânico a Longo Prazo | 32 |
| 1.4.4.1 – <i>Tipos de Ensaios</i> | 32 |
| 1.4.4.2 – <i>Aspectos Gerais das Características de Fluência dos Geossintéticos</i> | 34 |
| 1.4.4.3 – <i>Influência do Polímero Constituinte e da Estrutura</i> | 36 |
| 1.4.5 – Considerações Finais | 38 |

CAPÍTULO 2 – DURABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS

| | |
|---|-----------|
| 2.1 – INTRODUÇÃO | 41 |
| 2.2 – DEGRADAÇÃO QUÍMICA E BIOLÓGICA | 43 |
| 2.2.1 – Degradação Fotoquímica | 43 |
| 2.2.2 – Degradação Térmica | 45 |
| 2.2.3 – Degradação Química | 48 |
| 2.2.3.1 – <i>Acção dos Iões Metálicos</i> | 48 |
| 2.2.3.2 – <i>Acção de Soluções Ácidas e Alcalinas</i> | 48 |
| 2.2.3.3 – <i>Acção da Água</i> | 49 |
| 2.2.4 – Degradação Biológica | 51 |
| 2.2.5 – Influência do Estado de Deformação | 51 |
| 2.2.6 – Nota Final | 52 |
| 2.3 – DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO | 52 |
| 2.3.1 – Introdução | 52 |
| 2.3.2 – Natureza da Danificação Mecânica | 53 |
| 2.3.2.1 – <i>Aspecto Visual da Danificação</i> | 54 |
| 2.3.2.2 – <i>Efeito da DDI nas Propriedades a Curto Prazo</i> | 57 |
| 2.3.2.3 – <i>Efeito da DDI nas Propriedades a Longo Prazo</i> | 59 |
| 2.3.3 – Avaliação da Danificação Durante a Instalação | 60 |
| 2.3.3.1 – <i>Avaliação da DDI em Geossintéticos como Separadores e/ou Filtros</i> | 61 |
| 2.3.3.2 – <i>Avaliação da DDI em Geossintéticos como Barreira de Fluidos</i> | 64 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.3.3 – Avaliação da DDI em Geossintéticos como Reforço..... | 67 |
| 2.3.4 – Nota Final..... | 77 |
| 2.4 – A GARANTIA DA DURABILIDADE..... | 77 |
| 2.4.1 – Introdução..... | 77 |
| 2.4.2 – Aplicações onde a Função de Reforço não é Exigida..... | 78 |
| 2.4.3 – Aplicações onde a Função de Reforço é Exigida..... | 78 |
| 2.4.4 – Nota Final..... | 83 |

CAPÍTULO 3 – INDUÇÃO DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO – ENSAIO LABORATORIAL

| | |
|---|----|
| 3.1 – ESCOLHA DO MÉTODO USADO..... | 85 |
| 3.2 – PROCESSO DE SIMULAÇÃO DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO. REFERÊNCIA NORMATIVA..... | 86 |
| 3.3 – EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO..... | 90 |
| 3.4 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO..... | 97 |

CAPÍTULO 4 – DANIFICAÇÃO MECÂNICA DURANTE A INSTALAÇÃO – ANÁLISE EXPERIMENTAL ATRAVÉS DE ENSAIOS LABORATORIAIS DE DANIFICAÇÃO

| | |
|--|-----|
| 4.1 – INTRODUÇÃO..... | 103 |
| 4.2 – MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO..... | 104 |
| 4.2.1 – Geossintéticos..... | 104 |
| 4.2.1.1 - Geogrelhas..... | 105 |
| 4.2.1.2 - Geotêxteis..... | 108 |
| 4.2.1.3 - Geomenbranas..... | 109 |
| 4.2.2 – Solos..... | 111 |
| 4.3 – PROGRAMA DE ENSAIOS..... | 113 |
| 4.4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS LABORATORIAIS DE DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS..... | 115 |

| | |
|---|------------|
| 4.4.1 – Influência do Tipo de Geossintético | 119 |
| 4.4.1.1 - <i>Geogrelhas</i> | 119 |
| 4.4.1.2 - <i>Geotêxteis</i> | 121 |
| 4.4.1.3 - <i>Geomenbranas</i> | 123 |
| 4.4.1.4 – <i>Nota Final</i> | 125 |
| 4.4.2 – Influência do Tipo de Solo na Danificação | 125 |
| 4.4.2.1 - <i>Geogrelhas</i> | 125 |
| 4.4.2.2 - <i>Geotêxteis</i> | 127 |
| 4.4.2.3 - <i>Geomenbranas</i> | 129 |
| 4.4.2.3 – <i>Nota Final</i> | 130 |
| 4.5 – ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS POR | |
| OUTROS AUTORES | 130 |
| 4.5.1 – Simulação Laboratorial | 130 |
| 4.5.2 – Simulação de Campo Versus Simulação Laboratorial | 132 |
| 4.5.2.1 – <i>Descrição Resumida da Metodologia de Danificação</i> | |
| <i>de Campo</i> | 132 |
| 4.5.2.2 – <i>Análise Comparativa dos Resultados</i> | 135 |
| 4.5.3 – Nota Final | 140 |
| 4.6 – CONCLUSÕES | 141 |
| | |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 145 |
| | |
| BIBLIOGRAFIA | 147 |

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO AOS GEOSINTÉTICOS

| | |
|--|----|
| Figura 1. 1 – Principais funções dos geossintéticos..... | 5 |
| Figura 1. 2 – Exemplos de geotêxteis: a) geotêxtil não tecido termossoldado; b) geotêxtil não tecido agulhado; c) geotêxtil tecido (monofilamento); d) geotêxtil tecido (fita)..... | 5 |
| Figura 1. 3 – a) geogrelhas extrudidas; b) geogrelha tecida; c) geomembrana lisa; d) geomembrana rugosa; d) geomembrana pitonada..... | 6 |
| Figura 1. 4 – a) Exemplo de monómero: monómero de etileno; b) molécula de polietileno constituída por vários monómeros de etileno (Lopes, 1992)..... | 7 |
| Figura 1. 5 – Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura..... | 12 |
| Figura 1. 6 – Componentes básicos dos geossintéticos (Lopes, 1998)..... | 13 |
| Figura 1. 7 – Estiramento dos componentes básicos dos geossintéticos (Lopes, 1998)..... | 14 |
| Figura 1. 8 – Estrutura dos geotêxteis: a) tecidos; b) não tecidos..... | 14 |
| Figura 1. 9 – Esquema de ligação mecânica por agulhagem de geotêxteis não tecidos (Lopes, 1992 e 1998)..... | 15 |
| Figura 1. 10 – Geometria típica de: a) folha de polímero perfurada; b) geogrelha uniaxial; c) geogrelha biaxial (adaptado de Bonaparte et al., 1984)..... | 16 |
| Figura 1. 11 – Sistema de cilindros de rotação contrária – calandragem..... | 17 |
| Figura 1. 12 – Processo de fabrico de geomembrnas multicamadas (Ingold, 1996)..... | 18 |

| | |
|--|----|
| Figura 1. 13 – Exemplo de sistema de drenagem vertical com geossintéticos..... | 19 |
| Figura 1. 14 – Drenos em vala – exemplo da função de filtragem..... | 20 |
| Figura 1. 15 – Exemplo de geossintéticos na função de separação..... | 20 |
| Figura 1. 16 – Exemplo da função de protecção (o geotêxtil protege a geomembrana)..... | 21 |
| Figura 1. 17 – Exemplos da função de reforço: a) acção mecânica de membrana; b) reforço de tracção..... | 21 |
| Figura 1. 18 – Exemplo da função de barreira de fluidos com geossintéticos..... | 22 |
| Figura 1. 19 – Ensaio de tracção: a) com razão de deformação constante (EN ISO 10319); b) ensaio com razão de carga constante..... | 27 |
| Figura 1. 20 – Curvas típicas da resposta à tracção dos geossintéticos..... | 28 |
| Figura 1. 21 – Curvas tracção-deformação de filamentos de polímeros constituintes de geossintéticos..... | 29 |
| Figura 1. 22 – Curvas tracção-deformação de geossintéticos: a) geotêxteis tecidos e não tecidos; b) geogrelhas extrudidas uniaxiais e biaxiais (Lopes, 1992)..... | 29 |
| Figura 1. 23 – Curvas tensão-deformação de geomembranas (Koerner, 1990)..... | 30 |
| Figura 1. 24 – Definição do módulo de rigidez..... | 31 |
| Figura 1. 25 – Ensaio de tracção a longo prazo: a) Ensaio de fluência; b) ensaio de relaxação..... | 32 |
| Figura 1. 26 – Curvas isócronas de tensão-deformação..... | 33 |
| Figura 1. 27 – Curvas de fluência de geossintéticos..... | 34 |
| Figura 1. 28 – Comportamento viscoso linear – curvas isócronas de tensão-deformação..... | 35 |
| Figura 1. 29 – Comportamento à fluência de filamentos em PP e em PET..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 1. 30 – Curvas de fluência de geotêxteis tecidos e não tecidos (adaptada de Matichard et al., 1990)..... | 37 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 1. 31 – Curva de fluência de uma geogelha (McGown et al., 1984)..... | 37 |
|--|----|

CAPÍTULO 2 – DURABILIDADE DE GEOSINTÉTICOS

| | |
|---|----|
| Figura 2. 1 – Influência dos agentes atmosféricos na resistência à tracção de geotêxteis não tecidos (Lopes et al., 2001)..... | 44 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Figura 2. 2 – Geotêxtil não tecido: a) intacto; b) após 30 semanas de exposição aos agentes ambientais (Lopes et al., 2001)..... | 45 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura 2. 3 – Efeito da temperatura na resistência à tracção dos polímeros constituintes (adaptado de Pilarczyk, 2000)..... | 45 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 2. 4 – Degradação termo-oxidativa – efeito de aditivos anti-oxidantes na resistência retida (Salman et al., 1998)..... | 46 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 2. 5 – Influência da quantidade de oxigénio presente na degradação dos geossintéticos (Salman et al., 1998)..... | 47 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 2. 6 – Degradação termo-oxidativa em geotêxteis não tecidos em polipropileno e em poliéster (Santos et al., 2002)..... | 47 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Figura 2. 7 – Efeito de soluções ácidas em geotêxteis não tecidos em PP e PET (Santos et al., 2002)..... | 49 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura 2. 8 – Efeito de soluções alcalinas em geotêxteis não tecidos em PP e PET (Santos et al., 2002)..... | 49 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Figura 2. 9 – Consequências da DDI versus função do geossintético..... | 54 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura 2. 10 – Aspecto de alguns geossintéticos após a sua remoção (Pinho-Lopes, 2001)..... | 55 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 2. 11 – Número de furos versus nível de danificação (Koerner e Koerner, 1990). | 56 |
| Figura 2. 12 – Número de perfurações versus resistência retida (Koerner e Koerner, 1990). | 58 |
| Figura 2. 13 – Resistência à tracção retida versus nível de danificação (Koerner e Koerner, 1990). | 58 |
| Figura 2. 14 – Resultados de ensaios ao punçoamento hidrostático de uma geomembra em PEAD (Holtz et al., 1997). | 65 |
| Figura 2. 15 – Curvas típicas obtidas no ensaio laboratorial de identificação (Werner et al., 1990). | 66 |
| Figura 2. 16 – Danificação durante a instalação versus diâmetro médio D50 do material de aterro (Elias, 1996). | 70 |
| Figura 2. 17 – Ensaio laboratorial para simulação de quedas de blocos e de material rochoso (FWE e BAW). | 73 |
| Figura 2. 18 – Ensaio laboratorial: queda da pirâmide (CEN/TC189). | 73 |
| Figura 2. 19 – Ensaio de carregamento dinâmico do sistema solo-geossintético (Bräu, 1990). | 74 |
| Figura 2. 20 – Influência da pressão cíclica (para 100 ciclos): a) resistência retida; b) deformação retida (M Khay et al., 1998). | 76 |
| Figura 2. 21 – Influência do número de ciclos para a pressão máxima de 900kPa: a) resistência retida; b) Deformação retida (M Khay et al., 1998). | 76 |
| Figura 2. 22 – Curva de rotura em fluência para geogrelha tecida em PET (Pinho-Lopes et al., 2001). | 81 |
| Figura 2. 23 – Curva de rotura em fluência para geotêxtil tecido em PP (Pinho-Lopes et al., 2001). | 81 |

CAPÍTULO 3 – INDUÇÃO DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO – ENSAIO LABORATORIAL

| | |
|---|----|
| Figura 3. 1 – Representação esquemática da caixa de danificação..... | 88 |
| Figura 3. 2 – Carregamento aplicado, de acordo com a ENV ISO 10722-1..... | 89 |
| Figura 3. 3 – Vista geral do equipamento de danificação de geossintéticos..... | 90 |
| Figura 3. 4 – Vista geral da estrutura de aplicação das cargas..... | 91 |
| Figura 3. 5 – Constituição da estrutura de aplicação de cargas: a) estrutura em perfil UNP INP; b) actuadores hidráulicos; c) unidade energética; d) quadro eléctrico..... | 92 |
| Figura 3. 6 – Válvula de isolamento..... | 93 |
| Figura 3. 7 – Válvula de comando da cadência..... | 93 |
| Figura 3. 8 – Contador numérico dos ciclos de carga-descarga..... | 94 |
| Figura 3. 9 – Pressostato digital..... | 94 |
| Figura 3. 10 – Sensores de proximidade..... | 95 |
| Figura 3. 11 – Placa de carregamento..... | 95 |
| Figura 3. 12 – Caixa de danificação: a) vista geral; b) parte inferior; c) parte superior..... | 96 |
| Figura 3. 13 – Caixa de danificação: a) placa de compactação; b) vista geral..... | 97 |
| Figura 3. 14 – Enchimento da caixa inferior: a) colocação da 1ª camada; b) compactação da 1ª camada; c) colocação da 2ª camada; d) e e) compactação da 2ª camada..... | 98 |
| Figura 3. 15 – Provete de geossintético; a) dimensões; b) posição do provete na caixa inferior..... | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3. 16 – Colocação da caixa Superior..... | 99 |
| Figura 3. 17 – Enchimento da caixa superior..... | 99 |
| Figura 3. 18 – Posição da caixa de danificação..... | 100 |
| Figura 3. 19 – Aplicação da carga cíclica..... | 100 |
| Figura 3. 20 – Sequência de extracção do prove de geossintético..... | 101 |
| Figura 3. 21 – Inspeção visual do geossintético danificado..... | 102 |

CAPÍTULO 4 – DANIFICAÇÃO MECÂNICA DURANTE A INSTALAÇÃO – ANÁLISE EXPERIMENTAL ATRAVÉS DE ENSAIOS LABORATORIAIS DE DANIFICAÇÃO

| | |
|---|-----|
| Figura 4. 1 – Materiais utilizados no estudo..... | 105 |
| Figura 4. 2 – Geogrelhas: a) estrudida uniaxial; b) estrudida biaxial; c) tecida biaxial..... | 106 |
| Figura 4. 3 – Curvas tracção-deformação das geogrelhas: a) GGeu; b) GGtb; c) GGeb. | 106 |
| Figura 4. 4 – Geometria da geogrelha uniaxial..... | 107 |
| Figura 4. 5 – Geometria da geogrelha biaxial..... | 107 |
| Figura 4. 6 – Geotêxteis: a) tecido (GTt); b) não tecido agulhado (GTnt)..... | 108 |
| Figura 4. 7 – Curvas tracção-deformação dos geotêxteis: a) GTt; b) GTnt..... | 109 |
| Figura 4. 8 – Geomembranas: a) lisa (GMI); b) rugosa (GMr)..... | 109 |
| Figura 4. 9 – Curvas tracção-deformação das geomembranas; a) GMI; b) GMr..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4. 10 – Agregado: a) calcário; b) granítico..... | 112 |
| Figura 4. 11 – Curvas granulométricas dos solos..... | 112 |
| Figura 4. 12 – Programa de ensaios..... | 114 |
| Figura 4. 13 – Equipamento de ensaio de tracção..... | 114 |
| Figura 4. 14 – Resistência retida (em %) nos geossintéticos danificados em laboratório..... | 117 |
| Figura 4. 15 – Coeficiente de variação (em%) da resistência à tracção dos geossintéticos..... | 118 |
| Figura 4. 16 – Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação..... | 120 |
| Figura 4. 17 – Curvas tracção-deformação: a) GGeu; b) GGtb; c) GGeb..... | 121 |
| Figura 4. 18 – Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação..... | 122 |
| Figura 4. 19 – Curva tracção-deformação: a) GTt; b) GTnt..... | 123 |
| Figura 4. 20 – Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação..... | 124 |
| Figura 4. 21 – Curva tracção-deformação: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa..... | 124 |
| Figura 4. 22 – Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação..... | 126 |
| Figura 4. 23 – Curvas tracção-deformação: a) GGeu; b) GGtb; c) GGeb..... | 127 |
| Figura 4. 24 – Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação..... | 128 |
| Figura 4. 25 – Curva tracção-deformação: a) GTt; b) GTnt..... | 128 |
| Figura 4. 26 – Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação..... | 129 |
| Figura 4. 27 – Curva tracção-deformação: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa..... | 129 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4. 28 – Geossintéticos: a) resistência retida; b) Coeficiente de variação..... | 132 |
| Figura 4. 29 – Curva granulométrica dos solos utilizados nos ensaios de danificação de campo e de laboratório..... | 133 |
| Figura 4. 30 – Sequência da execução dos aterros experimentais (Lopes e Pinho-Lopes,2001)..... | 134 |
| Figura 4. 31 – Resistência retida (em %) dos geossintéticos danificados no campo e em laboratório..... | 135 |
| Figura 4. 32 – Geotêxtil tecido: a) resistência retida; b) Coeficiente de variação..... | 136 |
| Figura 4. 33 – Geogrelha extrudida biaxial; a) Resistência retida; b) Coeficiente de variação..... | 138 |
| Figura 4. 34 – Geogrelha tecida biaxia: a) Resistência retida; b) Coeficiente de variação..... | 139 |

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO AOS GEOSSINTÉTICOS

| | |
|--|----|
| Quadro 1. I – Propriedades dos polímeros base. Comparação (adaptado de Ladeira, 1995)..... | 11 |
| Quadro 1. II – Relação entre as funções e as propriedades dos geossintéticos (Pinho-Lopes, 1998)..... | 24 |
| Quadro 1. III – Relação entre funções e materiais (adaptado de Giroud, 1986)..... | 25 |
| Quadro 1. IV – Percentagem de deformação devida à estrutura do geossintético (G. den Hoedt, 1986)..... | 38 |
| Quadro 1. V – Percentagem de deformação devida ao tipo de polímero constituinte (G. den Hoedt, 1986)..... | 38 |

CAPÍTULO 2 – DURABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS

| | |
|--|----|
| Quadro 2. I – Características dos geotêxteis não tecidos estudados (Lopes et al., 2001)..... | 44 |
| Quadro 2. II – Resistência à tracção residual dos geotêxteis..... | 44 |
| Quadro 2. III – Grau de danificação em função das condições do solo subjacente e dos equipamentos de compactação (Christopher e Holtz, 1984)* | 56 |
| Quadro 2. IV – Critérios de sobrevivência de geotêxteis (AASHTO M 288-96)..... | 62 |
| Quadro 2. V – Classe do geotêxtil função do tipo de aplicação (AASHTO M 288-96)..... | 62 |
| Quadro 2. VI – Caso de aplicação (AS) (adaptado de Braü, 1998)..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Quadro 2. VII – Casos de carga (AB) (adaptado de Braü, 1998)..... | 63 |
| Quadro 2. VIII – Classe de robustez dos geotêxteis (GRK) (adaptado de Braü, 1998)..... | 64 |
| Quadro 2. IX – Tipo de geotêxtil e requisitos mínimos exigidos (adaptado de Braü, 1998)..... | 64 |
| Quadro 2. X – Coeficiente de redução para atender à danificação durante a instalação (AASHTO, 1997)..... | 71 |
| Quadro 2. XI – Programa de ensaios (adaptado de M. Khay et al., 1998)..... | 76 |

CAPÍTULO 4 – DANIFICAÇÃO MECÂNICA DURANTE A INSTALAÇÃO – ANÁLISE EXPERIMENTAL ATRAVÉS DE ENSAIOS LABORATORIAIS DE DANIFICAÇÃO

| | |
|---|-----|
| Quadro 4. I – Resistência à tracção e deformação na rotura das geogrelhas..... | 105 |
| Quadro 4. II – Características geométricas da geogrelha uniaxial (Ggeu)..... | 107 |
| Quadro 4. III – Características geométricas da geogrelha extrudida biaxial..... | 108 |
| Quadro 4. IV – Características dos solos..... | 113 |
| Quadro 4. V – Resultados de ensaios de tracção das amostras de referência..... | 115 |
| Quadro 4. VI – Resultados de ensaios de tracção realizados sobre amostras danificadas (solo granítico)..... | 116 |
| Quadro 4. VII – Resultados de ensaios de tracção realizados sobre amostras danificadas, (solo calcário)..... | 116 |
| Quadro 4. VIII – Resistência retida (em %) nos geossintéticos danificados em laboratório..... | 117 |

| | |
|--|-----|
| Quadro 4. IX – Coeficiente de variação da resistência à tracção de amostras de referência e danificadas em laboratório..... | 118 |
| Quadro 4. X – Caracterização laboartorial dos Solos 1 e 2..... | 133 |

SIMBOLOGIA

- A_1 – coeficiente de redução para a rotura e rotura em fluência;
- A_2 – coeficiente de redução para a danificação durante a instalação;
- A_3 – coeficiente de redução para manuseamento em obra;
- A_4 – coeficiente de redução para agentes ambientais (químicos, UV, etc.);
- C_c – coeficiente de curvatura;
- C_u – coeficiente de uniformidade;
- D_{10} – diâmetro efectivo do solo (correspondente a 10% de passados);
- D_{30} – diâmetro efectivo do solo (correspondente a 30% de passados);
- D_{50} – diâmetro efectivo do solo (correspondente a 50% de passados);
- D_{60} – diâmetro efectivo do solo (correspondente a 60% de passados);
- $D_{m\acute{a}x}$ – diâmetro efectivo máximo do solo;
- $D_{m\acute{i}n}$ – diâmetro efectivo mínimo do solo;
- $F_{1,0}$ – resistência à tracção após 1 minuto, amostra intacta;
- $F_{1,da}$ – resistência à tracção após 1 minuto, amostra danificada;
- $F_{30,0}$ – resistência à tracção após 30 anos, amostra intacta;
- $F_{Bi,d}$ – valor de cálculo da resistência a longo prazo do geossintético;
- $F_{Bi,k}$ – valor característico da resistência a longo prazo;
- $F_{Bi,k,0}$ – valor característico da resistência a curto prazo;
- $F_{Bi,k,1}$ – carga permanente de serviço;
- F_{dan} – resistência a curto prazo do material danificado;
- FR_{DDI} – coeficiente de redução devido à danificação durante a instalação;
- F_{ref} – resistência de referência a curto prazo do material (não submetido às condições de instalação);
- J_i – módulo de rigidez tangente inicial;
- J_{sece} – módulo de rigidez secante;
- J_{te} – módulo de rigidez tangente compensado;
- t – tempo;

SIMBOLOGIA

T_{dan} – resistência à tracção do geossintético danificado;

T_{ref} – resistência à tracção do geossintético intacto;

γ_B – coeficiente de segurança parcial;

e – extensão;

$e(\%)$ – extensão em percentagem;

s – tensão.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os geossintéticos têm vindo a ser cada vez mais aplicados em obras de Engenharia Civil com funções variadas. A razão da crescente aplicação destes materiais justifica-se pelas vantagens que apresentam em relação a outros materiais e tecnologias tradicionais, como são os custos menores e a maior versatilidade das funções que são susceptíveis de desempenhar.

No entanto, constata-se um grande desfasamento entre o conhecimento técnico-científico do seu funcionamento e manutenção das suas propriedades no tempo e a sua aplicação prática, onde, a principal reserva à utilização destes materiais se coloca relativamente à sua durabilidade. Consequentemente, uma das questões mais pertinentes nas estruturas em que os geossintéticos estão presentes é a possibilidade de redução da resistência destes materiais.

De facto, os geossintéticos podem sofrer diminuição das características, tanto a curto como a longo prazo, quando sujeitos a diversas acções. Entre elas refere-se a fluência, a exposição a agentes físicos, químicos, biológicos, deficientes técnicas de colocação e à danificação durante a instalação.

Por este motivo, neste trabalho, pretende-se fazer uma abordagem da danificação durante a instalação e dos seus efeitos no comportamento mecânico dos geossintéticos.

Dado que se trata de um fenómeno resultante, fundamentalmente, das operações de obra, a danificação durante a instalação pode ser estudada recorrendo a ensaios de campo e ensaios laboratoriais de simulação dessa mesma danificação.

Neste trabalho, dá-se especial atenção à avaliação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos. Com este objectivo, realizou-se uma análise experimental onde se estudou em laboratório a danificação durante a instalação desses materiais. Os procedimentos de ensaio seguiram o expresso na Norma Europeia ENV ISO 10722-1, com excepção da natureza do material confinante, procurando assim contribuir para o esclarecimento da influência no fenómeno, não só da estrutura do geossintético, mas também das características dos solos envolventes. Finalmente, foi feita uma comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos em ensaios de danificação de campo e de laboratório de alguns geossintéticos, realizados no âmbito do protocolo ICERR/FEUP.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO AOS GEOSSINTÉTICOS

1.1 – INTRODUÇÃO

Os geossintéticos surgiram na década de 50, do século XX, após o aparecimento dos polímeros sintéticos na década de 40. Os primeiros geossintéticos a serem fabricados foram os geotêxteis tecidos, na década de 50, através de adaptações da indústria têxtil na Holanda. Mais tarde surgem os geotêxteis não tecidos termossoldados. Porém, é a partir da década de 70, quando aparecem os geotêxteis não tecidos agulhados, que se dá o grande incremento na aplicação dos geossintéticos devido, quer ao baixo custo do material e da sua aplicação em obra, quer ao conjunto de funções que estes materiais podem exercer em substituição de materiais naturais.

O sucesso da aplicação dos geotêxteis conduziu a um grande e rápido desenvolvimento da indústria de produção de geossintéticos, aparecendo a partir da década de 80 uma vasta gama de produtos com estruturas distintas, entre os quais se incluem, entre outros, as geogrelhas, as georredes, as geomembranas, os geocompósitos, etc..

É precisamente em 1983 que J.E. Fluet Jr. introduz o termo “geossintético” para designar indiferenciadamente todos os novos produtos com aplicação em obras de Engenharia Civil. Embora esta designação possa não ser completamente adequada, já que alguns dos produtos utilizados não têm origem sintética, e tenha mesmo sido substituída por um certo período pela designação “ geotêxteis, geomembranas e produtos afins”, em 1994, no 4º Congresso Internacional de Geotêxteis, Geomembranas e Produtos Afins, em Singapura, a Sociedade Internacional de Geotêxteis e Produtos Afins consagrou-a universalmente ao adotar a designação de Sociedade Internacional de Geossintéticos,

estando a partir daí internacionalmente aceite a utilização do termo “geossintético” para designar materiais fabricados, quer com produtos sintéticos, quer não sintéticos.

Um sinal do aumento de interesse que a utilização destes materiais em obras de Engenharia Civil tem despertado na comunidade técnica internacional é a realização de conferências e congressos internacionais desde 1977 (Paris, 1977; Las Vegas, 1982; Viena, 1986; Haia, 1990; Singapura, 1994; Maastricht, 1996, Atlanta, 1998; Bolonha, 2000; Nice, 2002), a inclusão de sessões especializadas sobre geotêxteis nas conferências internacionais da ISSMFE realizadas a partir de 1985, a realização de um número crescente de conferências e simpósios nacionais e regionais sobre o tema e a publicação regular de revistas técnicas especializadas (por exemplo, “Geotechnical Fabrics Report”, “international Journal of Geotextiles and Geomembranes” e “Geosynthetics International”).

Em Portugal os geossintéticos começaram a ser aplicados regularmente desde 1980, principalmente em obras hidráulicas e viárias. No entanto, é a partir de meados da década de 90, associado à construção da rede de aterros de resíduos urbanos nacional, que é dado o grande impulso, quer na aplicação, quer na procura de conhecimentos acerca dos geossintéticos.

O interesse crescente acerca destes materiais em Portugal levou à criação em 1999 do Organismo de Normalização Sectorial Português dos ensaios de geossintéticos e, em 2002, à criação da Associação Portuguesa de Geossintéticos.

1.2 – GEOSSINTÉTICOS

1.2.1 – Preâmbulo

Os geossintéticos são produtos obtidos a partir de polímeros sintéticos que se colocam à superfície ou no interior de obras, podendo exercer, basicamente, funções de drenagem, filtragem, separação, protecção, reforço e estanqueidade (Figura 1.1).

A classificação destes materiais assenta, essencialmente, nas diferenças estruturais que decorrem dos diversos processos de fabrico, no entanto, as suas propriedades são muito influenciadas pelo(s) tipo(s) de polímero(s) que constituem os geossintéticos. Assim, basicamente, os geossintéticos podem ser divididos em geotêxteis,

geomembranas e produtos relacionados, destacando-se dentro dos produtos relacionados as geogrelhas, as georredes, as geomalhas, os geotapetes, as geocélulas, os geocompósitos de drenagem, os geocompósitos bentoníticos, etc..

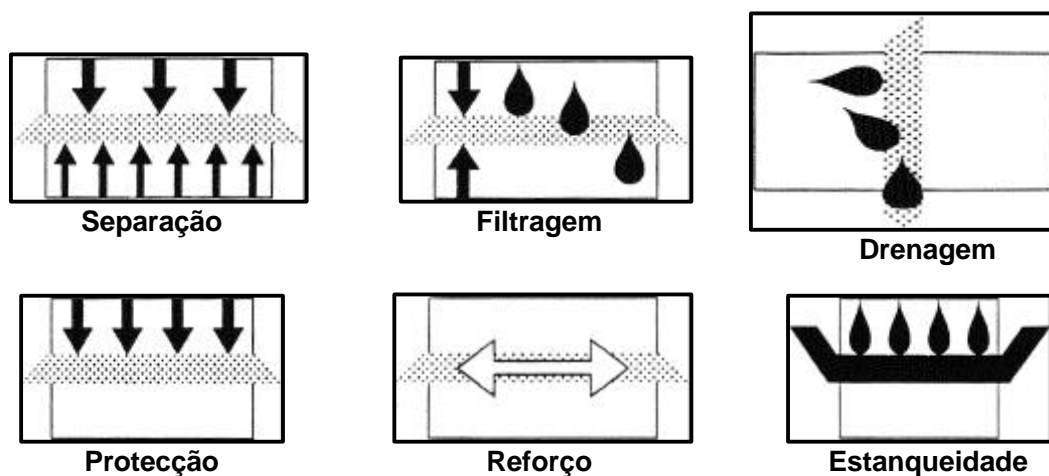


Figura 1. 1 – Principais funções dos geossintéticos.

Embora existam disponíveis no mercado uma vasta gama de geossintéticos, neste capítulo abordar-se-á, fundamentalmente, os considerados na parte experimental do trabalho, isto é, os geotêxteis, as geogrelhas e as geomembranas. Nas Figuras 1.2 e 1.3 apresentam-se alguns exemplos destes tipos de geossintéticos.

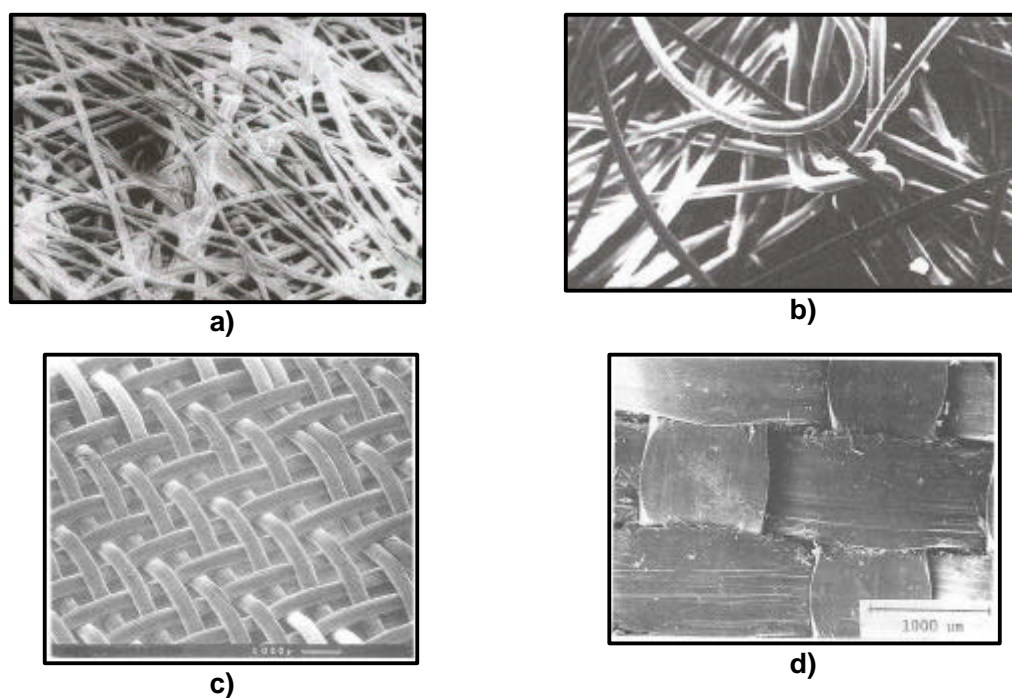


Figura 1. 2 – Exemplos de geotêxteis: **a)** geotêxtil não tecido termossoldado; **b)** geotêxtil não tecido agulhado; **c)** geotêxtil tecido (monofilamento); **d)** geotêxtil tecido (fita).

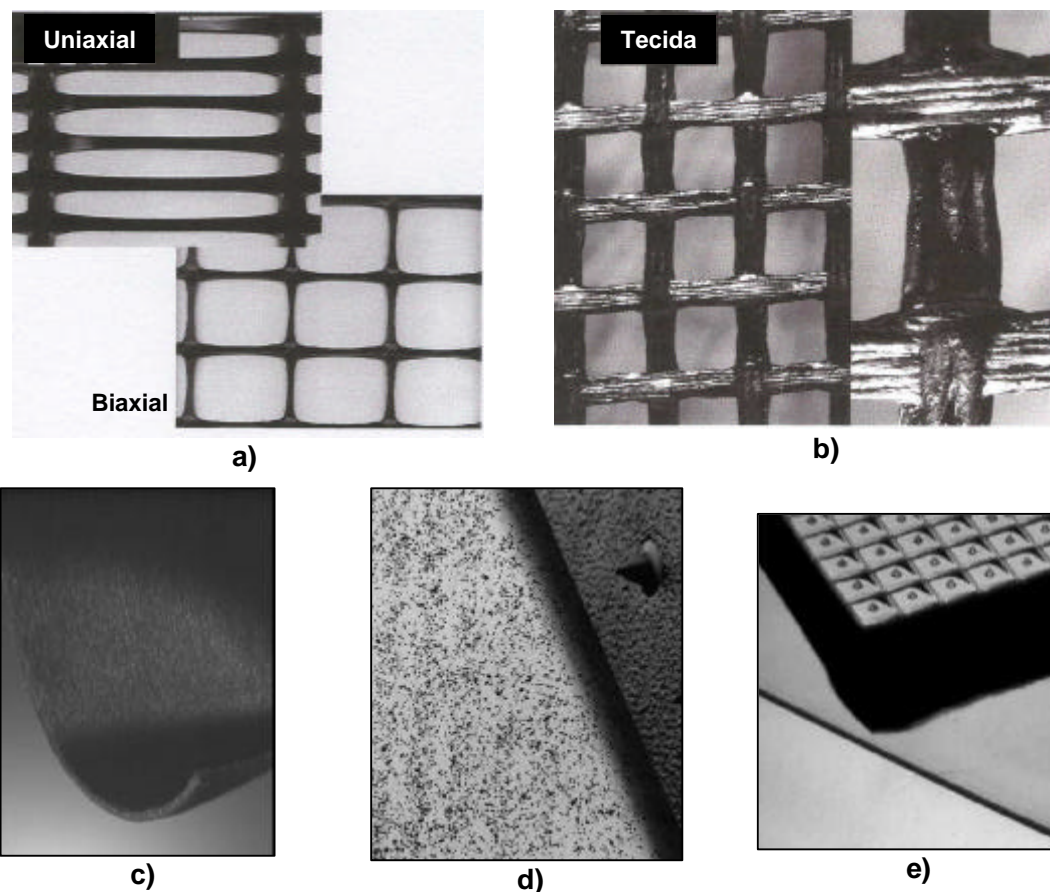


Figura 1. 3 – a) geogrelhas extrudidas; **b)** geogrelha tecida; **c)** geomembrana lisa; **d)** geomembrana rugosa; **d)** geomembrana pitonada.

1.2.2 – Materiais Constituintes

1.2.2.1 – Considerações Iniciais

A maioria dos geossintéticos é constituída por materiais vulgarmente designados por plásticos, mais concretamente por termoplásticos.

Os termoplásticos são, materiais orgânicos sintéticos, obtidos a partir do petróleo e que, ao contrário dos outros plásticos, têm a propriedade de amolecer e endurecer por acção do calor e do frio, respectivamente.

Os materiais plásticos usados em geossintéticos são compostos poliméricos, cujo monómero base é uma molécula constituída por átomos de carbono e hidrogénio (Figura 1.4 a). Por polimerização, processo que consiste numa série de mecanismos químicos que

conduzem à formação de longas cadeias moleculares (ou macromoléculas) de monómeros, formam-se os polímeros (Figura 1.4 b). A partir de um mesmo monómero, é possível obter plásticos com propriedades diferentes, se, no processo de polimerização, se juntarem diferentes tipos de aditivos químicos.

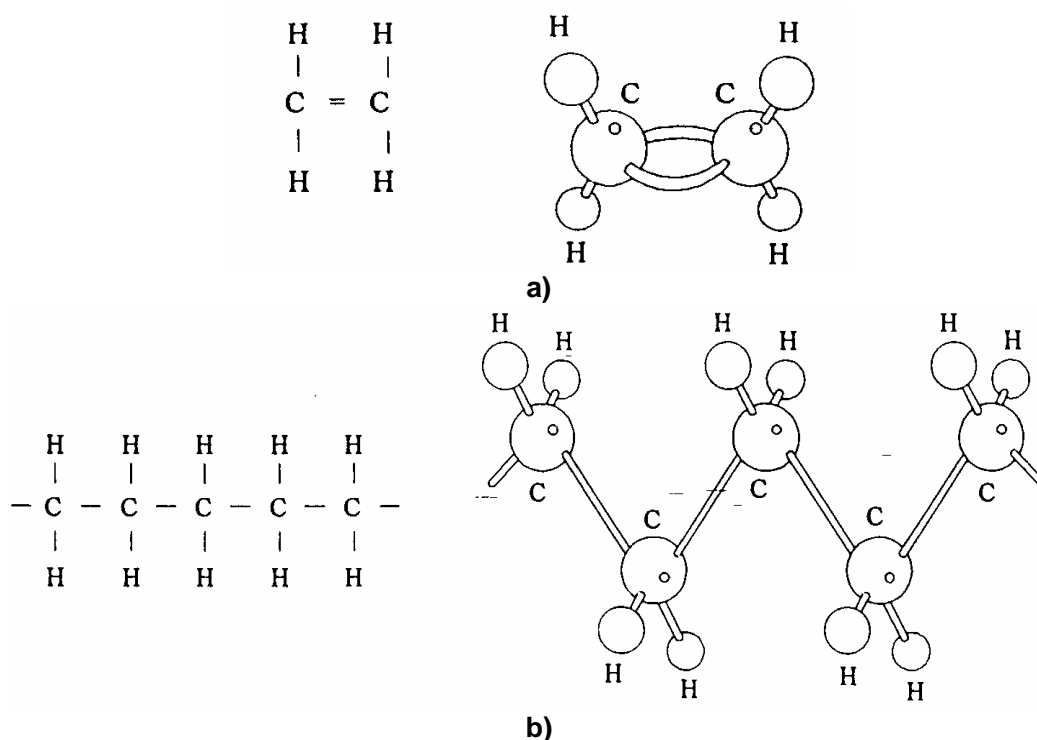


Figura 1. 4 – a) Exemplo de monómero: monómero de etileno; **b)** molécula de polietileno constituída por vários monómeros de etileno (Lopes, 1992).

No fabrico de geossintéticos podem ser usados diversos tipos de polímeros mas os mais comuns são: os poliésteres (PET), as poliamidas (PA), os polipropilenos (PP) e os polietilenos (PE). Estes dois últimos pertencem ao grupo das poliolefinas. Os de uso mais corrente são os poliésteres e as poliolefinas.

A gama de polímeros utilizados no fabrico de geomembranas é mais larga dadas as maiores exigências feitas a estes materiais, quer em termos de resistência ao ataque ambiental, quer em termos de custos. No fabrico de geomembranas, para além dos termoplásticos, podem ser usados termoendurecidos ou combinações de ambos.

As fibras constituintes dos geossintéticos não são unicamente fabricadas a partir do polímero base. Estão sempre presentes pequenas quantidades de outras substâncias, designadas por aditivos, que se juntam ao polímero para melhorar as suas propriedades finais e para facilitar as operações de transformação.

O peso molecular e a cristalinidade de um polímero, são propriedades determinantes no seu comportamento. O aumento do peso molecular conduz ao aumento da resistência à tracção, da elongação, da resistência ao impacto, da resistência à fendilhação e da resistência ao calor, conduzindo à diminuição da fluência e da trabalhabilidade do material. À medida que a cristalinidade de um polímero aumenta, aumenta a rigidez, a resistência ao calor, a resistência à tracção e a resistência química, diminuindo a permeabilidade, a deformação na rotura, a flexibilidade e a resistência ao impacto e à fendilhação.

1.2.2.2 – Polímeros Base e Aditivos

Como se referiu, as propriedades finais do geossintético estão directamente relacionadas com a composição química e com a estrutura do polímero que o constitui. Assim, é importante conhecer estas características dos vários polímeros base. De seguida referir-se-á apenas aqueles que são mais comuns.

i) O polietileno (PE) obtém-se de um gás, o etileno, que polimeriza quando sujeito a temperaturas e pressões elevadas. De todos os termoplásticos comercializados o polietileno é o que apresenta estrutura menos reactiva.

Dentro dos polietilenos existem também vários tipos:

- PEBD – polietileno de baixa densidade (peso volúmico 9,2 a 9,3kN/m³);
- PEAD – polietileno de alta densidade (peso volúmico 9,4 a 9,6kN/m³);
- PEBDL – polietileno de baixa densidade linear (peso volúmico 9,25 a 9,45kN/m³).

A obtenção de um ou outro tipo depende das condições em que se faz a polimerização. O PEAD evidencia um grau de cristalização muito superior ao PEBD, tendo o PEBDL um grau de cristalinidade intermédio destes.

As propriedades físicas de um polietileno são fortemente influenciadas pelo grau de cristalinidade, sendo o polietileno de alta densidade o que exhibe maior resistência química e mecânica.

As propriedades físicas de um polietileno podem ser melhoradas à custa da junção de aditivos que aumentem a estabilidade térmica, as propriedades anti-estáticas, a resistência à oxidação e as radiações ultravioletas (UV).

ii) O polipropileno (PP) obtém-se a partir da polimerização do propileno. Quando apenas moléculas de propileno estão presentes o polipropileno designa-se por homopolímero. Se a reacção de polimerização do propileno se der entre moléculas de propileno e moléculas de etileno obtém-se o polipropileno copolímero. O primeiro é mais cristalino que este, pelo que é preferencialmente usado no fabrico de geossintéticos.

Dado que os polipropilenos são muito susceptíveis à oxidação, é aconselhável a junção de aditivos que os protejam contra o envelhecimento. Correntemente são também adicionados ao polímero base aditivos com o objectivo de aumentar a estabilidade térmica, a resistência às radiações ultravioletas, as propriedades anti-estáticas e a resistência debaixo de água.

iii) As poliamidas mais vulgarmente utilizadas no fabrico de geossintéticos são o nylon (PA6) e o nylon 6.6 (PA6.6). As propriedades químicas do nylon 6 e do nylon 6.6 são semelhantes. Ambos são resistentes aos produtos químicos, sendo tanto um como outro mais estáveis termicamente e menos susceptíveis à oxidação do que as poliolefinas.

As fibras de nylon degradam-se por hidrólise quando inseridas em ambientes fortemente ácidos, no entanto, o nível de acidez da maior parte dos solos não é suficiente para provocar essa degradação (Cooke *et al.*, 1988).

As propriedades e o processo de produção das poliamidas são influenciados pela utilização de vários aditivos. Entre estes destacam-se:

- estabilizadores de viscosidade (por exemplo aminas) para controlo do grau de polimerização durante o processo de fabrico;

- inibidores de envelhecimento (catião manganês (II), compostos de cobre ou aminas aromáticas) para protecção contra a degradação resultante da exposição à luz ou por termo-oxidação.

iv) De entre os poliésteres lineares, o politereftalato de dimetilo (PET) é o mais usado no fabrico de geossintéticos. Obtém-se pela polimerização do teraftalato de dimetilo com o etileno glicol.

As fibras de poliéster são, na generalidade, muito resistentes quimicamente. Os poliésteres, tal como os nylons, são mais resistentes à oxidação térmica e fotoquímica do que as poliolefinas.

Os aditivos mais usados no fabrico dos poliésteres são:

- catalisadores (catião manganês (II), sais, óxido de antimónio) para aumento da velocidade de polimerização;
- compostos fosfatados para redução da degradação térmica no estado de fusão durante a produção do polímero;
- inibidores de envelhecimento (incluindo o negro de carbono) para aumento da resistência às radiações ultravioleta.

Em suma, apesar de, por exemplo, as poliolefinas, em particular o polipropileno, serem mais sensíveis à degradação termo-oxidativa e foto-oxidativa do que os poliésteres e as poliamidas (Cooke *et al.*, 1988) é comum usar no fabrico de todos os polímeros aditivos que melhoram o comportamento dos materiais face a estes agentes.

1.2.2.3 – Comparação entre Propriedades dos Polímeros

Apesar da maior ou menor alteração das propriedades de um polímero pela inclusão de aditivos durante o seu fabrico, são os poliésteres que apresentam maior resistência e melhor comportamento no tempo (menor fluência), tendo no entanto custos mais elevados e sendo mais sensíveis à acção de soluções alcalinas. Por outro lado, as poliolefinas apresentam boa resistência aos ácidos.

No Quadro 1. I faz-se uma análise comparativa das quatro famílias de polímeros referidas. Note-se que o tipo de polímero que constitui um geossintético não é o único factor que influencia o seu comportamento. É necessário considerar outros factores, tais como a estrutura, o processo de fabrico e o efeito de confinamento exercido pelo solo.

Quadro 1. I – Propriedades dos polímeros base. Comparação (adaptado de Ladeira, 1995).

| Propriedades | | | Famílias de polímeros | | | |
|------------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------|---------------|-------------|
| | | | Poliéster | Poliamida | Polipropileno | Poliétileno |
| Resistência | | | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Módulo de elasticidade | | | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Deformação na rotura | | | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Fluência | | | 1 | 2 | 3 | 3 |
| Densidade relativa | | | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Custo | | | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Resistência a | Radiações UV | Estabilizado | 3 | 2 | 3 | 3 |
| | | Não estabilizado | 3 | 2 | 2 | 1 |
| | Bases | | 1 | 3 | 3 | 3 |
| | Micro-organismos | | 2 | 2 | 2 | 3 |
| | Óleos | | 2 | 2 | 1 | 1 |
| | Detergentes | | 3 | 3 | 3 | 3 |

3 - Elevado; 2 - Médio; 1 - Baixo.

1.2.3 – Estrutura dos Geossintéticos

1.2.3.1 – Introdução

A estrutura dos geossintéticos é influenciada pelo processo de fabrico. Através da estrutura é possível estabelecer uma classificação destes materiais, deste modo, os geossintéticos dividem-se em geomembranas, geotêxteis convencionais e produtos relacionados. Na Figura 1.5 apresenta-se uma possível classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura.

O fabrico de geossintéticos, em geral, compreende três passos:

1. produção do polímero com os seus vários aditivos;
2. produção dos componentes;
3. conversão dos componentes no geossintético.

O polímero é produzido como já foi referido, e fornecido ao fabricante de geossintéticos sob a forma granular ou esférica.

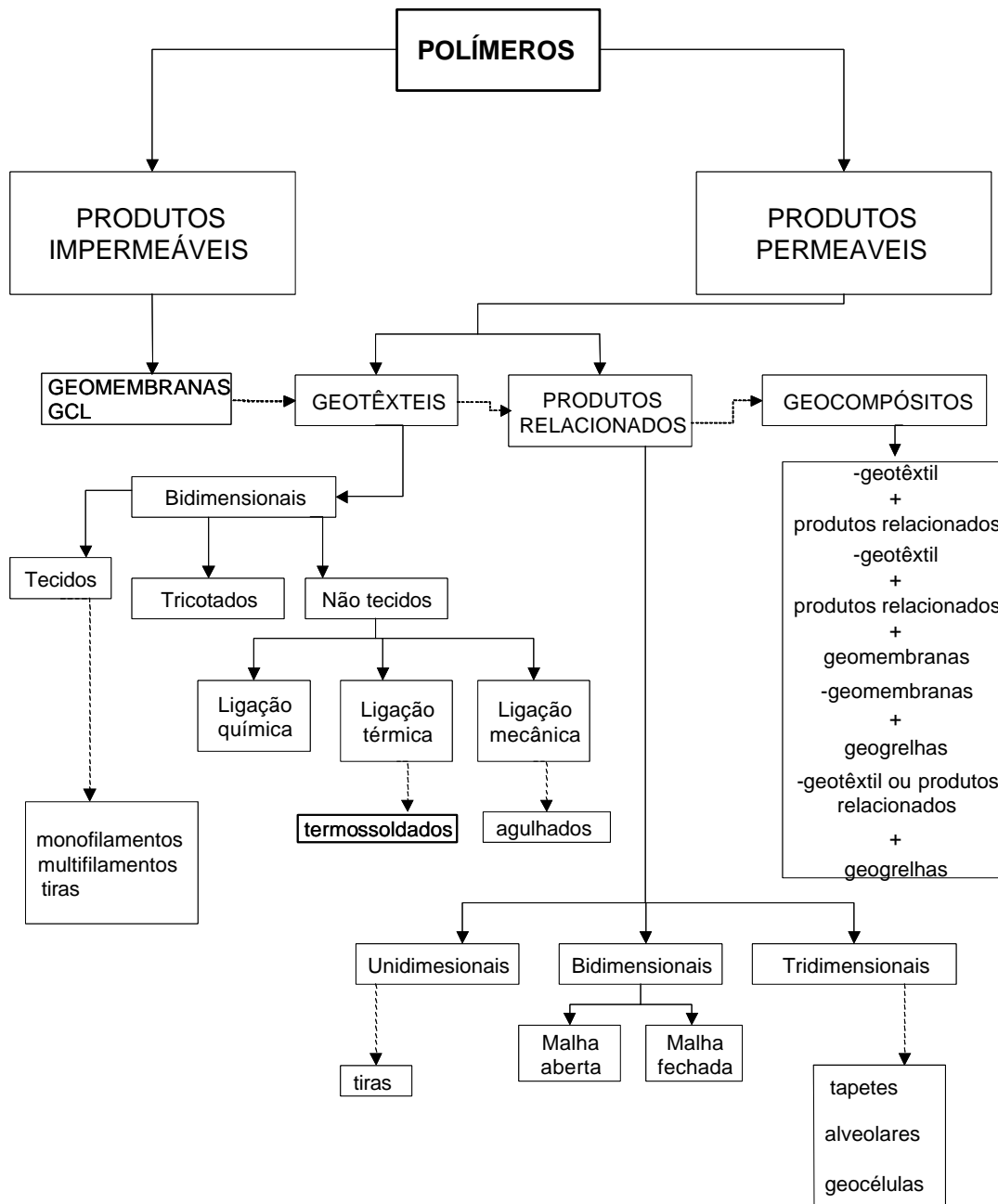


Figura 1.5 – Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura.

Os componentes dos geossintéticos, obtidos por extrusão ou fiação líquida do polímero, podem ter formas muito variadas, as mais comuns são:

- a) filamento contínuo circular, com diâmetro médio de uma fracção de milímetros e comprimento indefinido;
- b) tira plana contínua com vários milímetros de largura, uma fracção de milímetros de espessura e comprimento indefinido;

- c) folha ou película, podendo ter vários metros de largura e espessura variando entre uma fracção de milímetros (película) e vários milímetros (folha).

Na Figura 1.6 faz-se uma representação esquemática dos componentes básicos mais comuns dos geossintéticos.

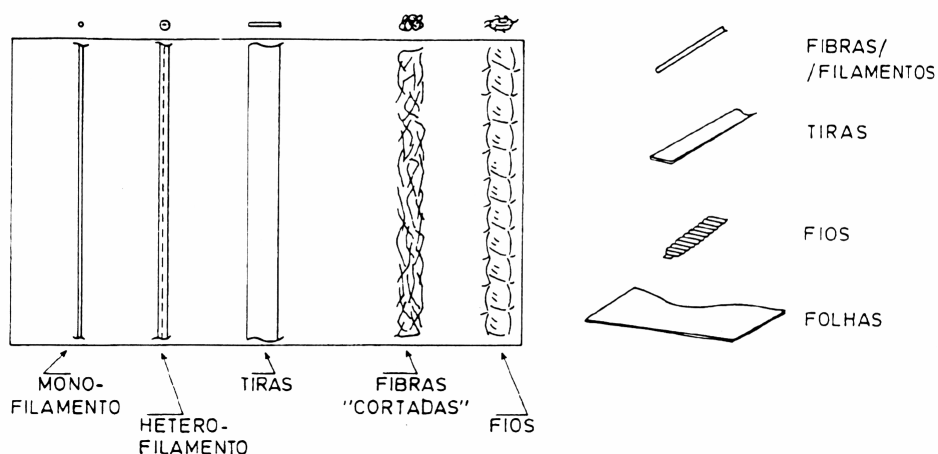


Figura 1.6 – Componentes básicos dos geossintéticos (Lopes, 1998)

Nos processos de extrusão ou fiação líquida, o polímero é introduzido num recipiente, juntamente com os aditivos, ficando sujeito a pressão e temperatura controladas. O objectivo deste procedimento é provocar a fusão dos constituintes sólidos, assim como a sua mistura e expulsão do oxigénio. Posteriormente, a massa líquida é forçada a atravessar um sistema de bombas rotativas, que controla a quantidade de polímero em passagem, expelindo-o através de uma placa perfurada. As fibras ou filamentos são arrefecidos ao ar ou em água.

A produção de tiras e películas é semelhante. Neste caso, o polímero é forçado a sair através de fendas. As tiras podem ser obtidas directamente ou por corte de películas.

Depois dos procedimentos descritos, as tiras e os filamentos são sujeitos a estiramento (Figura 1.7) e solidificação, sendo necessários dois ou mais tratamentos por aquecimento. Estes destinam-se a melhorar as propriedades do material (por exemplo, a resistência à tracção, o módulo de rigidez, a deformação na rotura, a fluência, etc.). A cadeia molecular é progressivamente orientada na direcção de estiramento, resultando uma estrutura final mais cristalina.

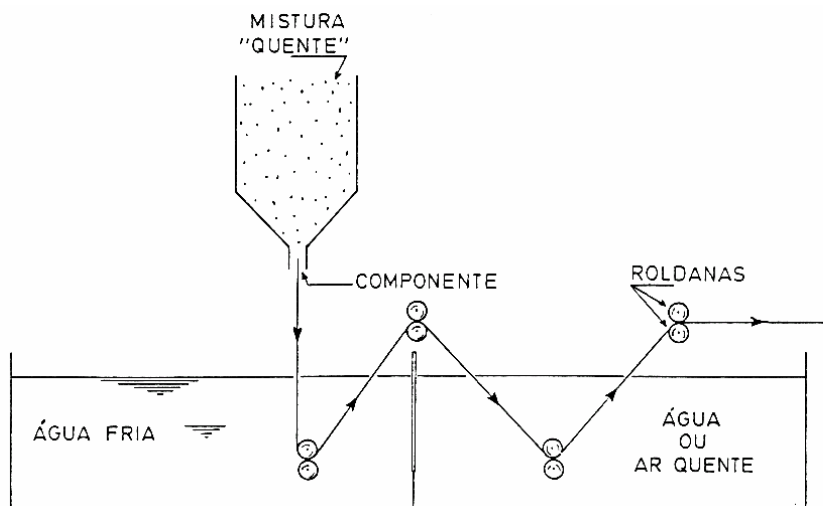
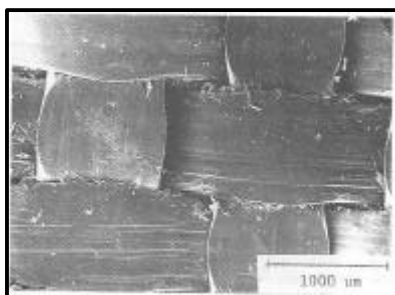


Figura 1.7 – Estiramento dos componentes básicos dos geossintéticos (Lopes, 1998).

A combinação dos componentes básicos dos geossintéticos conduz à estrutura final destes. De seguida referir-se-á as combinações de componentes que originam as estruturas dos três tipos de geossintéticos em estudo: geotêxteis, geogrelhas e geomembranas.

1.2.3.2 – Geotêxteis Tecidos e Não Tecidos

Os geotêxteis tecidos são compostos por dois conjuntos, habitualmente perpendiculares, de componentes entrelaçados, formando uma estrutura planar, com poucos milímetros de espessura e uma distribuição relativamente regular dos poros (Figura 1.8 a).



a)



b)

Figura 1.8 – Estrutura dos geotêxteis: a) tecidos; b) não tecidos.

Os geotêxteis não tecidos são fabricados dispondo os componentes aleatoriamente numa trama solta, ligeiramente mais espessa do que o produto final. Os componentes são posteriormente ligados, obtendo-se uma estrutura planar com uma distribuição aleatória de poros (Figura 1.8 b).

Os processos de ligação entre os componentes mais usuais são mecânicos, térmicos ou químicos.

A ligação mecânica é conseguida fazendo passar a trama solta sob milhares de agulhas (Figura 1.9) que penetram completamente na trama, arrastando consigo alguns dos filamentos e entrelaçando-os uns nos outros. Os geotêxteis ligados por este processo são conhecidos por geotêxteis não tecidos agulhados.

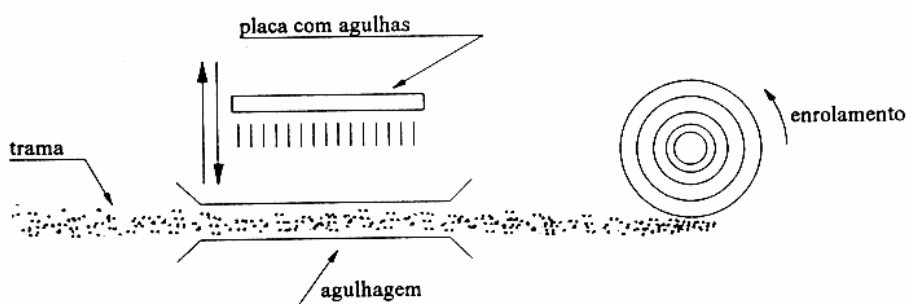


Figura 1. 9 – Esquema de ligação mecânica por agulhagem de geotêxteis não tecidos (Lopes, 1992 e 1998).

A ligação térmica é conseguida por aquecimento. A fusão parcial dos componentes, constituídos por mais do que um tipo de polímero com pontos de fusão diferentes, permite a sua ligação nos pontos de contacto, obtendo-se, assim, os chamados geotêxteis não tecidos termoligados. Estes geotêxteis são relativamente finos, variando a sua espessura entre 0,5 e 1mm (Lopes, 1998).

A ligação química é conseguida por adição de um ligante químico (resina sintética, por exemplo). Neste caso, os produtos obtidos designam-se por geotêxteis não tecidos ligados quimicamente.

Muitas vezes a ligação química segue-se ao processo de agulhagem (ligação mecânica), com vista ao melhoramento da ligação entre os componentes.

1.2.3.3 – Geogrelhas

As geogrelhas são geossintéticos muito abertos com uma configuração do tipo grelha, tal como o seu nome indica. Assim, nas geogrelhas a área das aberturas pode ser superior à área das barras que a constituem. Estas podem ser fabricadas por ligação dos pontos de intersecção de barras perpendiculares de polímero ou por perfuração, seguida ou não de estiramento, de uma folha de polímero (geogrelhas extrudidas de ligações integrais).

Neste último processo de fabrico das geogrelhas, a folha de polímero é, em primeiro lugar, perfurada regularmente (Figura 1.10 a). Em seguida, a folha perfurada é aquecida e estirada numa máquina direccional. Os orifícios alongam-se ao mesmo tempo que as moléculas do polímero se orientam na direcção da distensão. Embora o grau de orientação seja variável ao longo do comprimento da geogrelha, o efeito global é o de aumento da rigidez e da resistência à tracção.

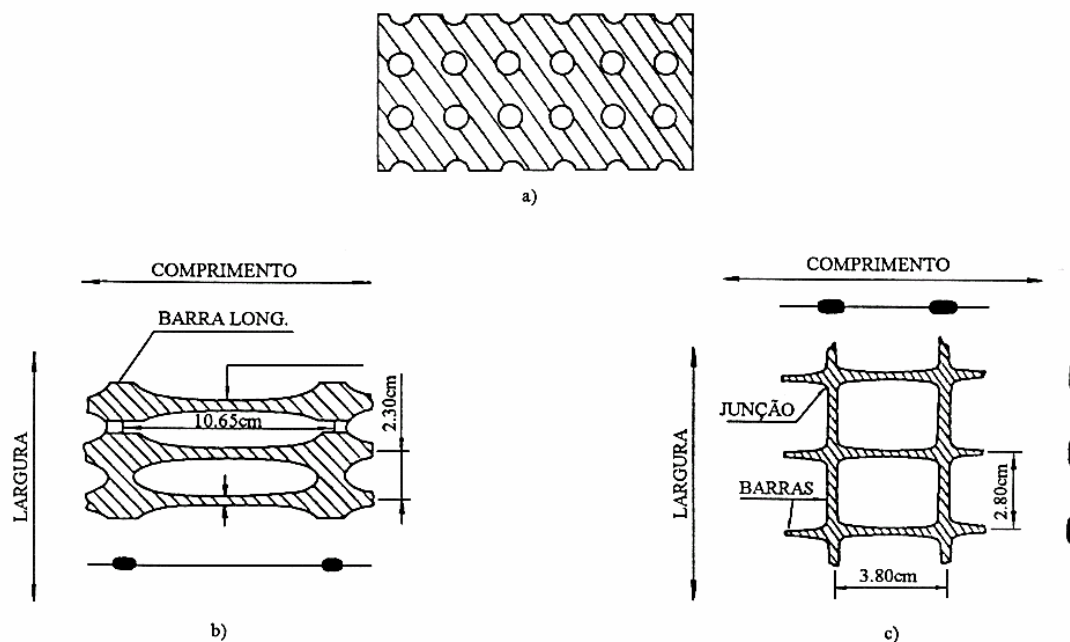


Figura 1. 10 – Geometria típica de: **a)** folha de polímero perfurada; **b)** geogrelha uniaxial; **c)** geogrelha biaxial (adaptado de Bonaparte *et al.*, 1984).

Caso o processo de fabrico termine nesta fase, obtém-se uma geogrelha orientada uniaxialmente (Figura 1.10 b). Porém, se a grelha for de novo aquecida e estirada agora na direcção transversal, obtém-se uma geogrelha orientada biaxialmente (Figura 1.10 c).

Dadas as características estruturais e as boas características mecânicas que possuem, as geogrelhas são empregues usualmente como reforço.

1.2.3.4 – Geomembranas

As geomembranas podem ser fabricadas, após a mistura do componente básico com os aditivos, pelos seguintes processos: extrusão, calandragem ou espalhamento superficial.

O processo de extrusão conduz ao fabrico das geomembranas mais simples, isto é, de uma só camada e não reforçadas.

Este tipo de geomembranas pode ser aplicado sem sujeição a qualquer outra operação adicional, no entanto, muitas vezes, o material é introduzido num sistema de cilindros de rotação contrária (Figura 1.11) com o objectivo de uniformizar a superfície e aumentar as propriedades mecânicas da geomembrana (Lopes, 1998).

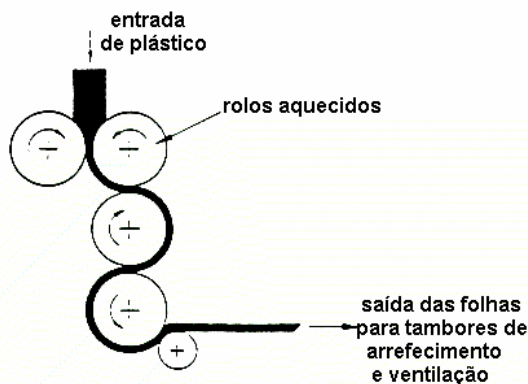


Figura 1. 11 – Sistema de cilindros de rotação contrária – calandragem.

O fabrico de geomembranas por calandragem é um pouco mais complicado do que o referido anteriormente. O fabrico de geomembranas de multicamadas pode ser levado a cabo laminando várias camadas em conjunto. As geomembranas deste tipo podem ser reforçadas ou não reforçadas. Nas geomembranas reforçadas inclui-se, entre as folhas de polímero, um geotêxtil, vulgarmente em poliéster ou em poliamida, devendo a ligação entre os diferentes materiais ser efectiva (Figura 1.12). A inclusão do geotêxtil aumenta as propriedades mecânicas do material composto, não reforçando contudo o solo sobre o qual a geomembrana está colocada.

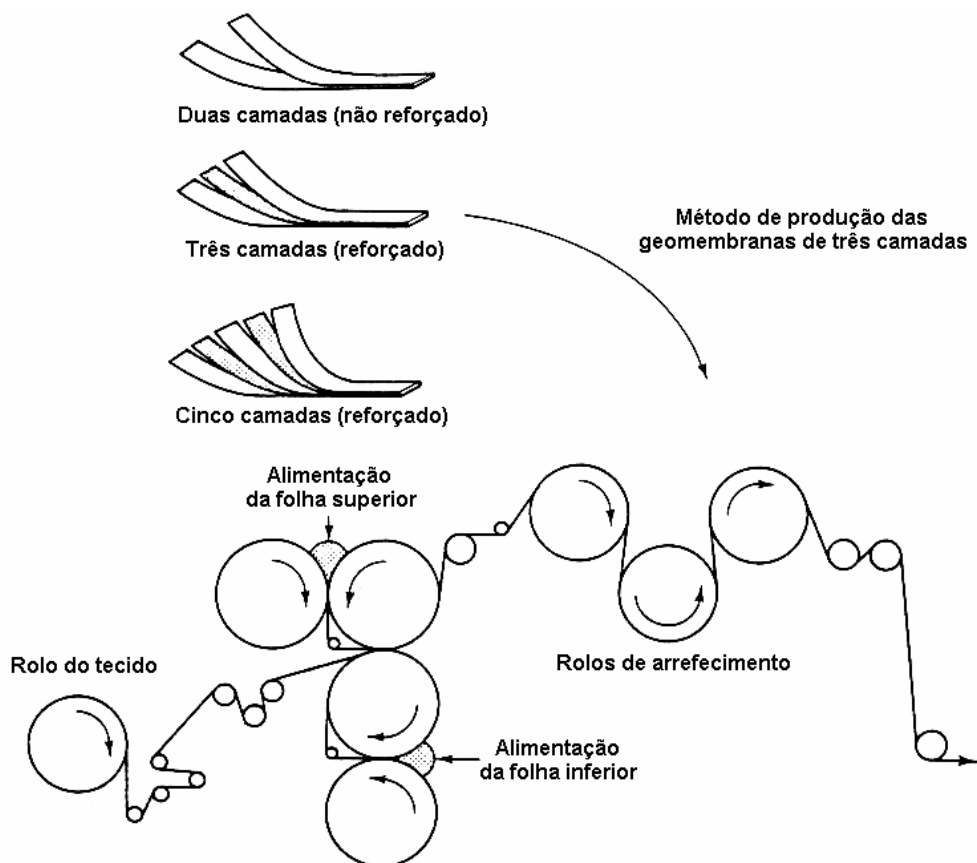


Figura 1. 12 – Processo de fabrico de geomembranas multicamadas (Ingold, 1996).

O terceiro processo de fabrico, designado por espalhamento superficial, é o mais recente. Usualmente recorre-se a um geotêxtil não tecido agulhado como base sobre o qual se verte e se espalha, até à espessura pretendida, o polímero em fusão. Geralmente, a adesão entre camadas é boa (Lopes, 1998).

1.3 – FUNÇÕES E PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS

1.3.1 – Funções

A utilização dos geossintéticos em Engenharia Civil é cada vez maior, quer como substitutos de materiais de construção tradicionais, quer como reforço dos materiais naturais.

Numa determinada aplicação, um geossintético desempenha, muitas das vezes, várias funções simultaneamente. Assim, para o seu dimensionamento adequado é necessário definir quais são essas funções e hierarquizá-las. Só assim se poderão definir as características que o material deve possuir para desempenhar adequadamente as funções para que foi escolhido.

Por função, entende-se uma acção específica que o produto deve desempenhar para que sejam atingidos os objectivos da sua aplicação, a qual resulta da combinação de certas das suas propriedades.

Embora os geossintéticos possam desempenhar muitas funções, as mais importantes, que incluem todas as outras como subcasos, são as funções de drenagem, filtragem, separação, protecção, reforço e barreira de fluidos. De notar que, enquanto que existe uma larga gama de materiais geossintéticos capazes de exercer adequadamente as cinco primeiras funções referidas, a barreira de fluidos pode ser exercida apenas por uma variedade muito limitada de geossintéticos, onde se inclui as geoembranas e os geocompósitos bentoníticos. Faz-se em seguida uma breve descrição de como são desempenhadas cada uma destas funções.

Na drenagem os geossintéticos colectam os fluidos e transportam-nos ao longo dos seus planos (Figura 1.13).



Figura 1. 13 – Exemplo de sistema de drenagem vertical com geossintéticos.

Na filtragem os geossintéticos permitam a passagem dos fluidos normalmente aos seus planos, evitando em simultâneo o arrastamento de partículas sólidas (Figura 1.14). Esta função pode ser desempenhada em duas situações distintas: para evitar o

arrastamento de partículas em suspensão em fluidos percolantes; no interior de maciços terrosos, permitindo a passagem da água mas impedindo a passagem das partículas sólidas.

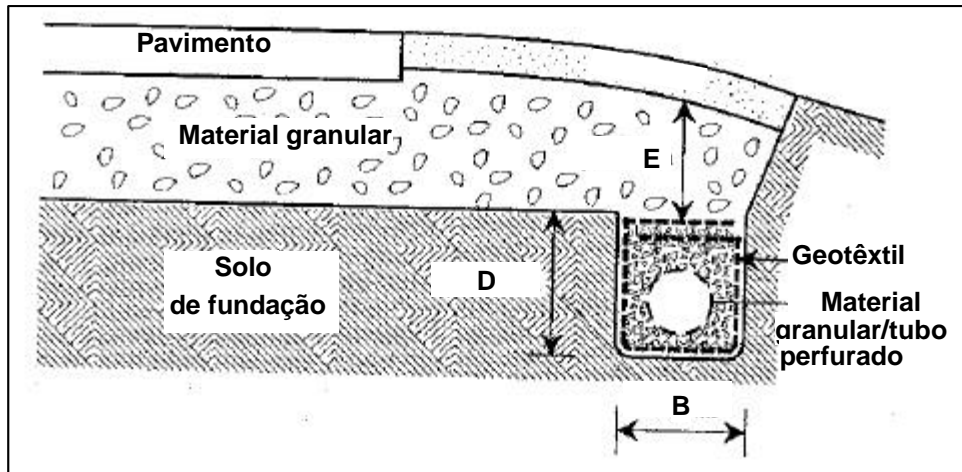


Figura 1. 14 – Drenos em vala – exemplo da função de filtragem.

Na separação os geossintéticos são colocados entre solos de granulometria diversa para impedir que se misturem ou interpenetrem (Figura 1.15).



Figura 1. 15 – Exemplo de geossintéticos na função de separação.

A função de protecção desempenhada pelos geossintéticos consiste na redistribuição e uniformização de tensões ou de deformação transmitidas ao material protegido (Figura 1.16). Podem ser consideradas duas situações: na protecção superficial

os geossintéticos são colocados sobre os maciços, protegendo-os da acção de agentes atmosféricos, tráfego, etc., na protecção interfacial os geossintéticos são colocados entre dois materiais (por exemplo, entre o tapete e a base de uma estrada ou entre uma geomembrana e um solo grosseiro), para evitar que um deles (por exemplo, o tapete ou a geomembrana) seja danificado pela acção de cargas concentradas ou de deformações impostas pelo outro.



Figura 1.16 – Exemplo da função de protecção (o geotêxtil protege a geomembrana).

Os geossintéticos exercem função de reforço em duas situações: quando exercem acção mecânica de membrana, ou seja, quando são colocados entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes e a sua tensão equilibra a diferença de pressões entre essas camadas (Figura 1.17 a), conduzindo ao reforço global; quando são colocados no interior de maciços para suportar tensões de tracção, obviando assim à incapacidade destes para resistirem a esforços deste tipo (Figura 1.17 b).



a)



b)

Figura 1. 17 – Exemplos da função de reforço: a) acção mecânica de membrana; b) reforço de tracção.

Na função de barreira de fluidos o geossintético não pode permitir o seu atravessamento por qualquer tipo de fluido, seja ele líquido ou gasoso (Figura 1.18).



Figura 1. 18 – Exemplo da função de barreira de fluidos com geossintéticos.

Muitas vezes pensa-se que os geossintéticos são materiais de aplicação universal. No entanto, isto não é verdade, já que a adequação de cada geossintético ao exercício de uma determinada função depende de um conjunto de propriedades que lhe são conferidas pela sua estrutura e pelo material que o constitui.

1.3.2 – Propriedades

Para poder desempenhar com eficácia uma dada função, um geossintético deve apresentar um determinado conjunto de propriedades. Estas deverão ser definidas tendo em conta, por um lado, a funcionalidade do geossintético ao longo da vida útil da obra e, por outro, as acções a que irá estar sujeito durante as operações de manuseamento, armazenagem e colocação em obra.

As propriedades dos geossintéticos podem ser divididas em: físicas, hidráulicas, mecânicas e de durabilidade. As principais propriedades físicas são a massa por unidade de área, a espessura e a densidade relativa dos polímeros que compõem os geossintéticos. As propriedades hidráulicas mais importantes são a dimensão aparente de aberturas, a permissividade (permeabilidade normal ao plano) e a transmissividade (permeabilidade ao longo dos seus planos). Dentro das propriedades mecânicas destacam-se as resistências à tracção, ao punçoamento, ao rasgamento e das interfaces.

A estabilidade em relação à temperatura, às radiações ultravioletas e aos ataques químicos e biológicos são propriedades relevantes durante a vida da obra para todas as funções mencionadas.

Para drenar convenientemente o geossintético deve ter adequada permeabilidade normal (permissividade) e ao longo dos seus planos (transmissividade), para permitir a fácil passagem da água. A espessura e compressibilidade devem ser apropriadas e esta última deve ser pequena para que sob carga não haja diminuição excessiva de permeabilidade. A dimensão das aberturas deve ser tal que impeça a passagem de partículas sólidas sem blocagem ou colmatação.

No caso do material exercer a função de filtragem, para além de permissividade, deve exibir a flexibilidade necessária ao bom ajustamento à superfície do maciço por ele protegido, impedindo a migração de partículas para os vazios que, doutro modo, seriam criados entre o solo e o geossintético.

Quando os geossintéticos actuam como reforço é fundamental que exibam resistência à tracção, deformabilidade e flexibilidade apropriadas, bem como comportamento à fluência e relaxação. A flexibilidade é indispensável para garantir o bom contacto entre o solo e os reforços. Por outro lado, é conveniente que os geossintéticos exibam um adequado comportamento à fluência para que sejam garantidas as características fundamentais do comportamento global da estrutura em que se inserem durante a sua vida útil. Para além disso, é muito importante que a resistência das interfaces solo-reforço seja apropriada, pois é através dessas interfaces que se desenvolvem as interações necessárias ao funcionamento conjunto da estrutura compósita.

Quando os geossintéticos exercem a função de separação é relevante que evidenciem dimensão de abertura e permissividade convenientes.

Quando o material actua como elemento de protecção, para além de propriedades comuns às exigidas para função de reforço, é importante assegurar uma espessura adequada e a continuidade do material.

Quando o material exerce a função de barreira de fluidos é da maior importância que durante as operações de transporte, manuseamento e colocação em obra a continuidade do material seja garantida, devendo apresentar resistências à tracção, ao rasgamento, à perfuração, às radiações ultra-violetas e à temperatura convenientes. Por outro lado, durante a vida da obra, o material deverá apresentar, para além de valores adequados para as propriedades atrás referidas, espessura, deformabilidade, flexibilidade

e ligações convenientes, bem como, adequada resistência aos ataques químicos e biológicos. De notar que a ligação entre faixas assume na função em causa uma grande importância, pois a sua execução terá de garantir a estanqueidade das mesmas.

1.3.3 – Considerações Finais

Numa tentativa de sintetizar o que se referiu sobre as funções dos geossintéticos e as propriedades mais relevantes para cada uma delas, no Quadro 1. II apresenta-se uma relação entre as propriedades dos geossintéticos e as suas principais funções.

Quadro 1. II – Relação entre as funções e as propriedades dos geossintéticos (Pinho-Lopes, 1998).

| Propriedades | Funções | | | | | |
|----------------------------|----------|-----------|-----------|---------|-----------|---------------------|
| | Drenagem | Filtragem | Separação | Reforço | Protecção | Barreira de fluidos |
| Espessura | *** | * | | | *** | ** |
| Compressibilidade | *** | ** | | | * | |
| Permissividade | ** | *** | ** | | | |
| Transmissividade | *** | * | | | | |
| Distribuição de poros | ** | *** | ** | | | |
| Resistência à tracção | | | * | *** | * | * |
| Módulo de rigidez | | | | *** | | ** |
| Deformabilidade | | | *** | * | * | *** |
| Resistência ao rasgamento | | | *** | ** | *** | *** |
| Resistência ao punçoamento | | | *** | ** | *** | *** |
| Atrito | | | | *** | * | |

* - Propriedade com importância pequena

** - Propriedade com importância média

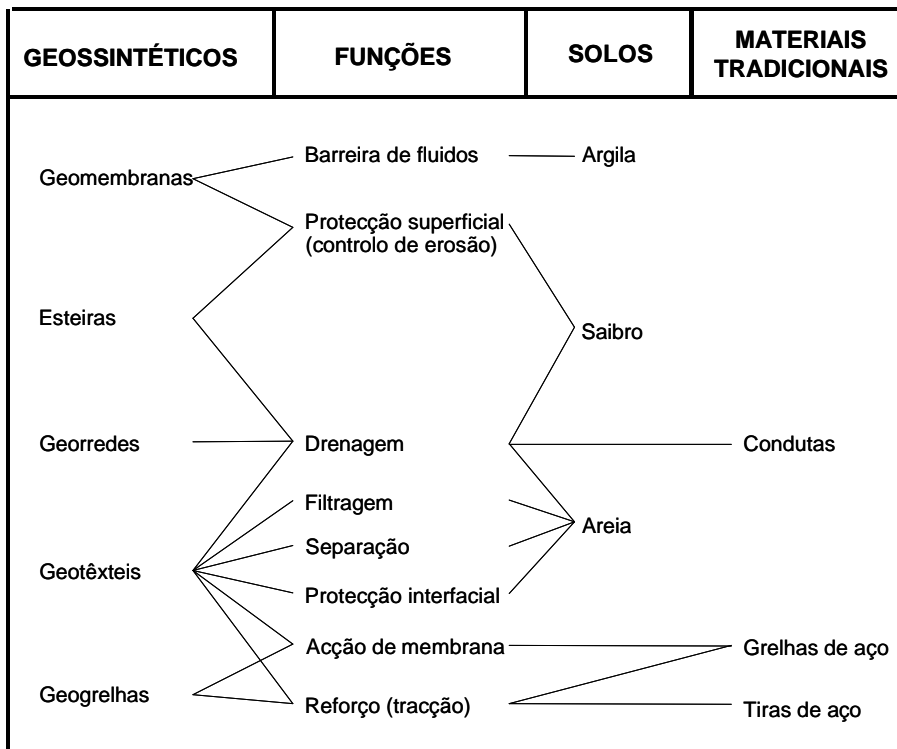
*** - Propriedade com muita importância

No Quadro 1. III, sem se procurar ser exaustivo, quer em relação à totalidade de tipos de geossintéticos existentes, quer em relação à totalidade de funções que estes materiais podem desempenhar numa obra, indica-se, para alguns tipos de geossintéticos de uso corrente, as funções que poderão estar exercer quando aplicados em Engenharia Civil.

Como o objectivo do presente trabalho incide sobre a problemática da danificação mecânica de geossintéticos, a qual tem sido até ao momento controlada através da

variação de certas propriedades mecânicas destes materiais, nas secções seguintes referir-se-ão alguns aspectos do comportamento mecânico dos geossintéticos.

Quadro 1. III – Relação entre funções e materiais (adaptado de Giroud, 1986).



1.4 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS GEOSSINTÉTICOS

1.4.1 – Considerações Iniciais

Durante o seu tempo de vida, um geossintético está sujeito a solicitações mecânicas, que podem ser de três tipos: esforços de tracção ou compressão (esforços distribuídos), punçoamento (esforços concentrados) e rasgamento (esforços concentrados e esforços distribuídos).

Por outro lado, estas solicitações podem ser provocadas por uma rápida transmissão de energia aos geossintéticos, isto é, de forma dinâmica, ou podem ser estáticas, ou seja, provocadas por cargas constantes ao longo do tempo. Em geral, as

primeiras estão associadas à colocação em obra dos geossintéticos, enquanto que as segundas ocorrem durante o seu funcionamento.

As respostas destes materiais às solicitações em causa são reflectidas pelas propriedades mecânicas dos geossintéticos.

A resistência à tracção é um dos parâmetros mais importantes dos geossintéticos, uma vez que, em praticamente todas as aplicações a eficácia do material no exercício das funções requeridas depende do valor daquela resistência.

1.4.2 – Componentes da Deformação de um Geossintético

O comportamento mecânico dos geossintéticos depende de vários factores tais como: o polímero constituinte, a estrutura, o processo de fabrico e o tipo de ligação, entre outros. No entanto, os dois primeiros factores referidos são os que mais influenciam o comportamento em causa.

Simplificadamente, pode-se considerar que a deformação total de um geossintético é composta por duas parcelas: uma relativa à deformação dos componentes e outra devida à deformação estrutural.

De facto, verifica-se que, enquanto que para os geotêxteis tecidos e para as geogrelhas, o material constituinte é determinante para as suas propriedades sendo a sua deformação controlada pela primeira parcela atrás referida (deformação dos componentes), no caso dos geotêxteis não tecidos, é a estrutura do material (deformação estrutural) que desempenha um papel preponderante.

O conhecimento das características mecânicas dos geossintéticos a curto e a longo prazo é da máxima importância para o dimensionamento de sistemas com geossintéticos. De seguida, salientam-se algumas das características mecânicas mais importantes (resistência à tracção) e os ensaios laboratoriais mais vulgarmente usados na sua definição.

1.4.3 – Comportamento Mecânico a Curto Prazo

1.4.3.1 – Tipos de Ensaios

O comportamento mecânico a curto prazo dos geossintéticos é identificado através de ensaios de tracção realizados com razão de deformação constante (Figura 1.19 a) ou com carga constante (Figura 19 b). O mais vulgar é o executado a razão de deformação constante (EN ISO 10319); neste ensaio, enquanto a tensão aumenta a amostra deforma-se a uma razão constante.

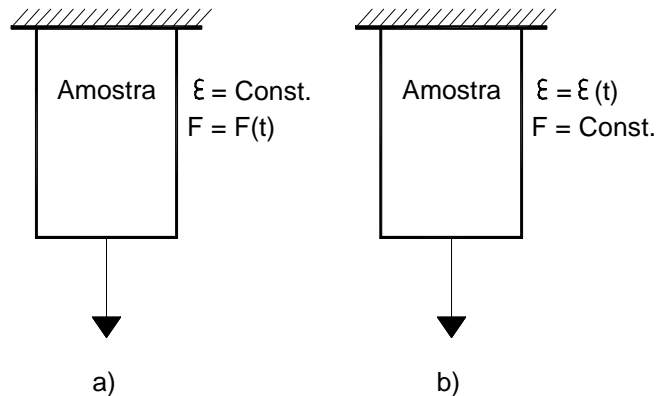


Figura 1. 19 – Ensaio de tracção: **a)** com razão de deformação constante (EN ISO 10319); **b)** ensaio com razão de carga constante.

Neste ensaio a resposta dos geossintéticos é caracterizada pela curva que relaciona a força por unidade de largura (expressa em kN/m) com a deformação (adimensional, expressa usualmente em percentagem) (Figura 1.20). Para obter tensões seria necessário dividir a força por unidade de largura pela espessura do geossintético mas, como a espessura destes materiais varia muito com a carga aplicada e durante o processo de extensão, tal não é vulgarmente utilizado.

A partir da curva referida é possível obter: a resistência à tracção a curto prazo (que é a força por unidade de largura na rotura); a deformação na rotura; o módulo de rigidez (definido como a razão entre a força por unidade de largura e a deformação correspondente).

A resistência à tracção e a deformação na rotura dependem de vários factores, tais como: as propriedades dos polímeros constituintes, a estrutura do geossintético, a

direcção da força aplicada, a razão de deformação, a temperatura, a tensão de confinamento, etc..

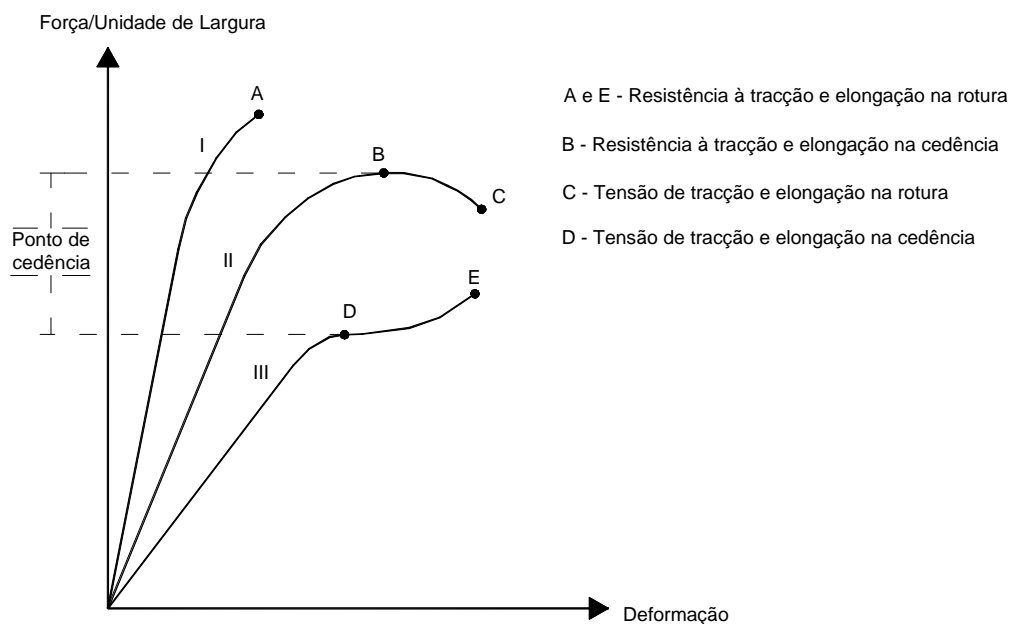
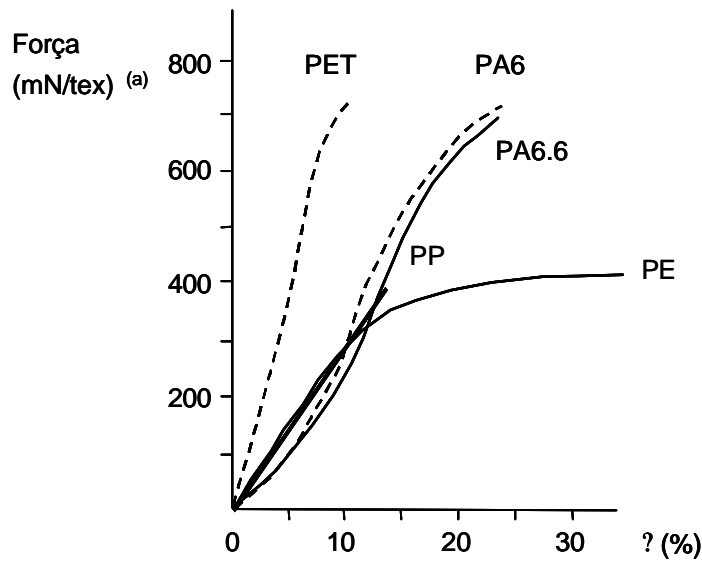


Figura 1. 20 – Curvas típicas da resposta à tracção dos geossintéticos.

1.4.3.2 – Influência do Polímero Constituinte e da Estrutura

A Figura 1.21 mostra os resultados de ensaios de tracção de filamentos de polímeros constituintes dos geossintéticos. Da figura constata-se que o poliéster (PET) é o polímero mais resistente e menos deformável a curto prazo, logo seguido das poliamidas (PA). O polipropileno (PP) e o polietileno (PE), pelo contrário, são os polímeros menos resistentes e mais deformáveis a curto prazo.

A Figura 1.22 apresenta resultados de ensaios de tracção realizados com amostras de um geotêxtil tecido em PP, de um geotêxtil não tecido em PET e de duas geogrelhas extrudidas, uma uniaxial em polietileno de alta densidade (PEAD), e outra biaxial em PP. A figura põe em evidência a influência da estrutura do geossintético no seu comportamento à tracção. Com efeito, embora o polipropileno seja um polímero menos resistente e mais deformável do que o poliéster a maior rigidez conferida pela estrutura tecida dos geotêxteis faz com que o geotêxtil tecido em PP apresente maior resistência e rigidez do que o geotêxtil não tecido em PET. Algo de semelhante se passa no caso das geogrelhas, onde a estrutura mais rígida das geogrelhas uniaxiais impõe um melhor comportamento à tracção, embora o polímero constituinte apresente um comportamento mecânico próximo do polímero constituinte da geogrelha biaxial.



(a) 1 tex = massa (gr.s) de 1 km de filamento

Figura 1. 21 – Curvas tracção-deformação de filamentos de polímeros constituintes de geossintéticos.

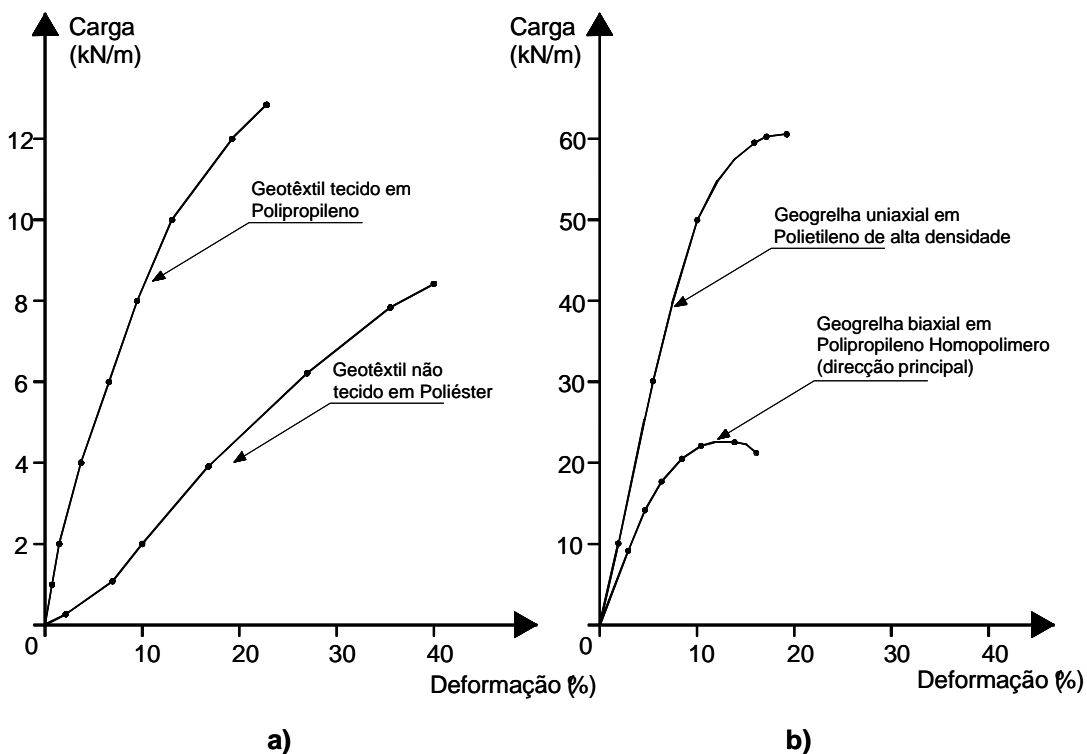


Figura 1. 22 – Curvas tracção-deformação de geossintéticos: **a)** geotêxteis tecidos e não tecidos; **b)** geogrelhas extrudidas uniaxiais e biaxiais (Lopes, 1992).

Assim, a maior e menor resistência são observadas, respectivamente, nas geogrelhas uniaxiais e nos geotêxteis não tecidos. As deformações no geotêxtil não tecido são superiores às dos outros materiais devido às deformações estruturais significativas que têm lugar naqueles materiais durante a carga.

Apenas a título indicativo refere-se que os valores da deformação na rotura nos geotêxteis tecidos varia entre 10 a 35%, enquanto que nos geotêxteis não tecidos agulhados em PET varia de 50 a 100%. Por sua vez, nos geotêxteis não tecidos termossoldados em PP e PE o parâmetro em causa está entre 20 a 70%.

O comportamento mecânico a curto prazo das geomembranas (Figura 1.23) é distinto do dos geotêxteis e produtos relacionados (Figura 1.22), não se adoptando por isso os mesmos procedimentos de ensaio. Sendo as geomembranas constituídas por folhas de polímero o comportamento destes geossintéticos está muito associado ao do polímero constituinte. Nestes materiais a deformação na rotura é, em regra, superior a 100%.

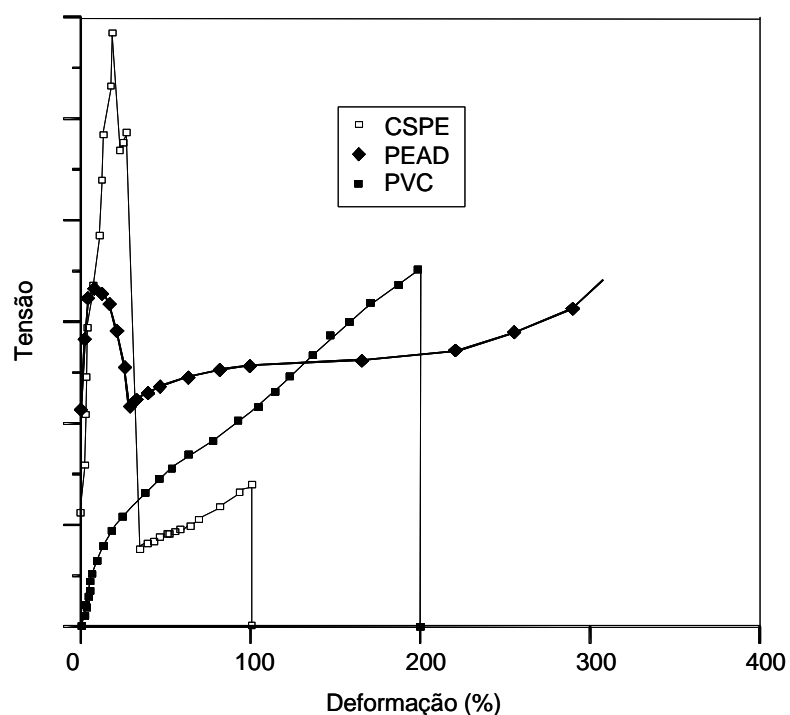


Figura 1. 23 – Curvas tensão-deformação de geomembranas (Koerner, 1990).

1.4.3.3 – Módulo de Rigidez

Dada a não linearidade das curvas força de tracção-deformação dos geossintéticos, o módulo de rigidez destes materiais pode ser avaliado das seguintes formas (Figura 1.24).

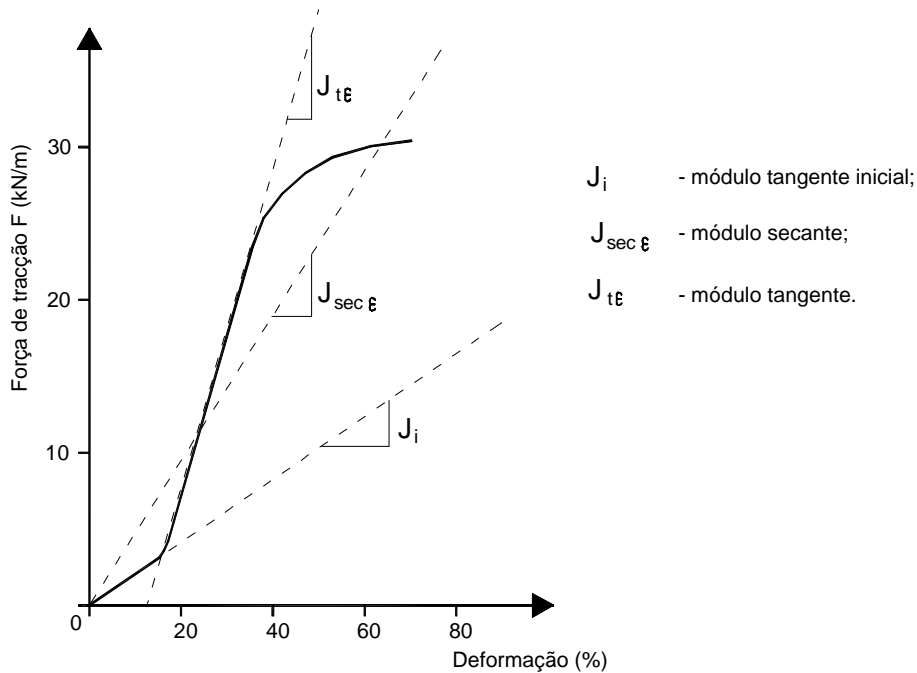


Figura 1. 24 – Definição do módulo de rigidez.

- módulo tangente inicial (J_i), aplicável quando a inclinação da curva referida é quase linear, podendo-se obter um valor quase preciso (é utilizado em geotêxteis tecidos e alguns não tecidos);

- módulo tangente compensado (J_{te}), aplicável quando o trecho inicial da curva tracção/deformação é muito abatido (comum para os geotêxteis não tecidos agulhados), determinando-se desprezando o trecho inicial da curva e deslocando o eixo dos yy para o ponto onde este intersecta o trecho ascendente da curva;

- módulo secante ($J_{sec\epsilon}$) correspondente a uma deformação de 10%. Esta é a forma mais utilizada para a definição do módulo de rigidez que não é mais do que a inclinação da recta que passa pela origem e pelo ponto da curva correspondente a 10% de deformação.

O módulo de rigidez tangente inicial dos geotêxteis não tecidos agulhados é baixo, já que uma deformação imposta provoca, a curto prazo, o deslizamento das ligações. No caso dos geotêxteis termicamente ligados, o módulo de rigidez tangente inicial é elevado pois as ligações rígidas são imediatamente solicitadas quando os materiais são traccionados.

1.4.4 – Comportamento Mecânico a Longo Prazo

1.4.4.1 – Tipos de Ensaios

A quantificação dos parâmetros de cálculo dos geossintéticos exige, para além do conhecimento do comportamento carga-deformação e da resistência dos materiais, o conhecimento da sua alteração com o tempo, temperatura, meio ambiente etc..

A previsão do comportamento a longo prazo dos geossintéticos é feita com base em ensaios de fluência ou relaxação (Figura 1.25). No primeiro mede-se a deformação do material ao longo do tempo sob acção de uma força constante e para uma determinada temperatura. No segundo, mede-se a variação da força ao longo do tempo correspondente a uma determinada deformação e para uma determinada temperatura. O ensaio de relaxação é menos utilizado do que o ensaio de fluência em virtude do fenómeno ser menos corrente nos geossintéticos e também devido à sua maior dificuldade de realização e interpretação.

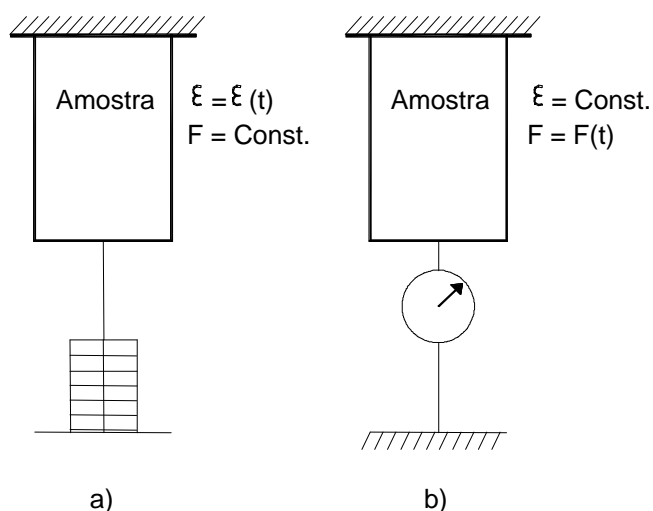


Figura 1. 25 – Ensaio de tração a longo prazo: **a)** Ensaio de fluência; **b)** ensaio de relaxação.

Como referido, nos ensaios de fluência o material é sujeito a uma carga constante durante um período mais ou menos longo. A variação da deformação com o tempo é registada nas curvas de fluência e a partir destas e de técnicas de extrapolação de resultados é possível determinar os parâmetros de cálculo necessários.

A carga total é aplicada em 5 segundos e mantida por períodos de 1000 a 10000 horas no caso da rotura não ocorrer entretanto.

O geossintético deve ser ensaiado para uma gama de cargas, previamente seleccionada, que conduza a uma fácil interpolação dos resultados. Para cada nível de carga deve ser utilizado um provete distinto, sendo comum realizar ensaios para cargas correspondentes a 10, 20, 30, 40 e 50% da carga de rotura definida no ensaio de tracção com razão de deformação constante.

Com base nos resultados dos ensaios para diferentes níveis de tensão é possível traçar as curvas isócronas que relacionam a carga com a deformação num dado instante (Figura 1.26).

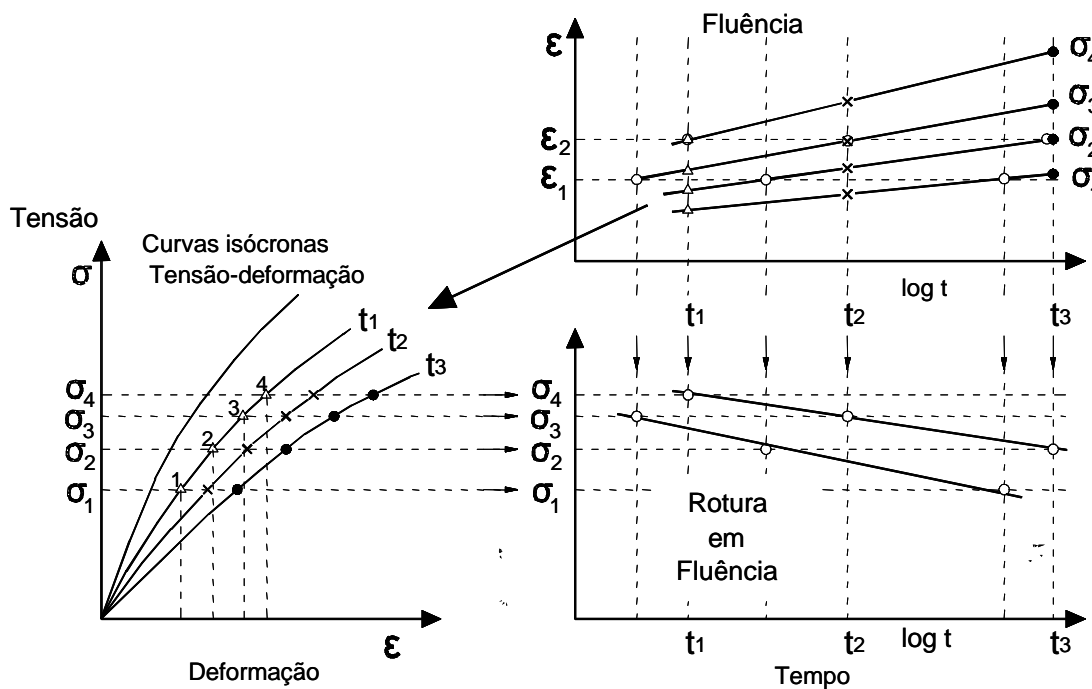


Figura 1. 26 – Curvas isócronas de tensão-deformação

Dos resultados deste ensaio é possível definir os parâmetros para a análise do comportamento a longo prazo dos geossintéticos. Contudo, dado que o período de vida de

muitas obras ultrapassa o tempo de ensaio é necessário efectuar extrapolações dos resultados destes para previsão do comportamento do material a longo prazo.

1.4.4.2 – Aspectos Gerais das Características de Fluência dos Geossintéticos

A fluência dos geossintéticos depende de factores como o polímero constituinte, a estrutura, o nível de tensão, a temperatura e o tempo. Uma das formas de a caracterizar consiste no traçado de curvas de fluência que relacionam as deformações do material com o tempo para níveis de tensão e temperatura constantes. O aumento da deformação sob tensão constante (fluência), acontece porque os geossintéticos são produzidos a partir de polímeros que exibem comportamento elasto-viscoplástico, dependentes do tempo, carga e temperatura, sob tensão constante. As curvas representadas na Figura 1.27 caracterizam genericamente o comportamento viscoso dos geossintéticos.

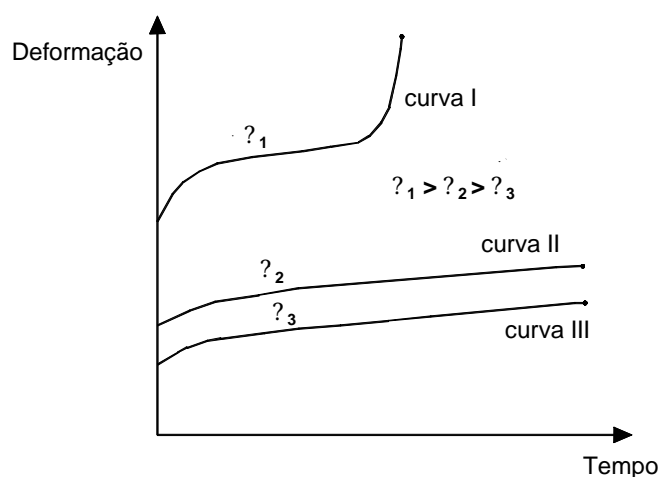


Figura 1. 27 – Curvas de fluência de geossintéticos.

As curvas da Figura 1.27 podem representar, não só o comportamento à fluência de diferentes geossintéticos sujeitos às mesmas condições de tensão e temperatura, como também o comportamento do mesmo material sob distintos níveis de tensão à mesma temperatura. Com efeito, segundo Jewell (1985), quando um geossintético está sujeito a tensões constantes num meio ambiente com características químicas e temperatura constantes, invariavelmente acontece o seguinte:

- o tempo necessário para que a rotura ocorra aumenta com a redução do nível de tensão imposto;

- a deformação total na rotura diminui com a redução do nível de tensão imposto;
- materiais com curvas de fluência do tipo I passam a ter curvas de fluência cada vez mais próximas do tipo II à medida que o nível de tensão imposto diminui.

Em regra quando os níveis de tensão são inferiores a um dado valor crítico o comportamento viscoso dos geossintéticos é linear, querendo com isto significar que as deformações são directamente proporcionais às tensões, sendo o factor de proporcionalidade um módulo que, para uma dada temperatura, depende apenas do período de tempo em que a tensão é aplicada (Figura 1.28). Se os níveis de tensão são superiores ao referido valor crítico o comportamento passa a ser não linear, dependendo o valor do módulo que relaciona tensões e deformações, não só da duração de aplicação das tensões, mas também da grandeza destas e das deformações.

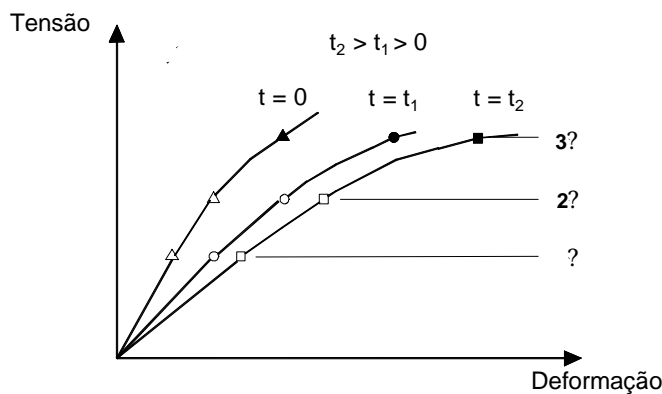


Figura 1. 28 – Comportamento viscoso linear – curvas isócronas de tensão-deformação.

É de realçar que o comportamento viscoso não linear dos geossintéticos pode ser favorecido pela presença de factores como níveis de tensão ou deformação elevados, temperaturas elevadas, certos solventes ou agentes plastificantes (Yeo, 1985).

A definição da fronteira que separa os dois tipos de comportamento é feita, em regra, a partir de resultados de ensaios de fluência. As curvas isócronas obtidas a partir das curvas de fluência fornecem indicações muito directas quanto à linearidade do comportamento, sendo frequentemente usadas com esse objectivo. As curvas isócronas relacionam a tensão imposta com a deformação medida no material num dado instante; o módulo isócrono coincide com o declive inicial da curva até à fronteira de linearidade (tensão $2S$ para as curvas representadas na Figura 1.28). Para além dessa fronteira, o módulo é definido, em cada ponto, pela secante que une a origem a esse ponto.

A modelação do comportamento viscoso não linear é um problema complexo, pois, para além do pãmetro tempo, há que considerar a grandeza das tensões e das deformações. Esta complexidade leva a que, no dimensionamento se opte por geossintéticos cujo comportamento para os níveis de tensão impostos *in situ* esteja no domínio linear.

1.4.4.3 – Influência do Polímero Constituinte e da Estrutura

A Figura 1.29 mostra o comportamento à fluência de filamentos em PP e PET. Verifica-se que a razão de deformação no tempo do polipropileno é muito superior à do poliéster, isto é, os filamentos em PP deformam-se sob carga constante significativamente mais do que os de PET.

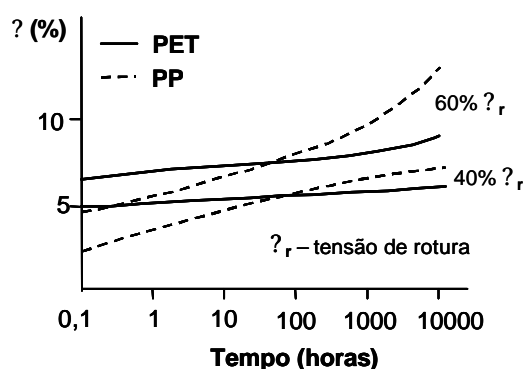


Figura 1. 29 – Comportamento à fluência de filamentos em PP e em PET.

Na Figura 1.30, adaptada de Matichard et al. (1990), estão representadas as curvas de fluência de geotêxteis tecidos e não tecidos em PP e PET. A figura põe em evidência a influência nas deformações a longo prazo da estrutura do geossintético e do polímero constituinte. Para o mesmo tipo de polímero, os geotêxteis tecidos exibem deformações a longo prazo menores do que as dos geotêxteis não tecidos. Quanto ao polímero constituinte constata-se que este factor tem papel determinante no comportamento a longo prazo dos geossintéticos. Com efeito, é clara a distinção entre o comportamento à fluência dos poliésteres e dos polipropilenos, sobrepondo-se, por vezes, esta acção à da estrutura do material.

Segundo Finnigan (1977), quando o polímero constituinte é um poliéster os comportamentos dos filamentos e do geotêxtil tecido são idênticos. No caso do polímero constituinte ser um polipropileno observa-se um aumento da fluência do geotêxtil tecido:

para 50% da resistência à tracção, a razão de deformação é nos filamentos cerca de 1,13 (Greenwood e Myles, 1986) e no geotêxtil cerca de 2,1 (van Leewen, 1977).

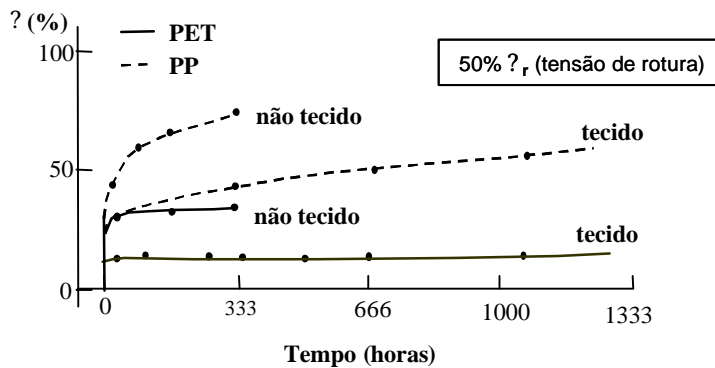


Figura 1. 30 – Curvas de fluência de geotêxteis tecidos e não tecidos (adaptada de Matchard *et al.*, 1990).

A Figura 1.31 apresenta a curva de fluência, para uma carga de 40% da resistência à tracção, de uma geogrelha extrudida uniaxial em PEAD (McGown *et al.*, 1984). Como se pode observar, a deformação no material ao fim de 1000 horas de carga é cerca de 9%, valor superior ao do geotêxtil tecido em PET (Figura 1.30) e significativamente inferior ao do geotêxtil tecido em PP. A deformação reduzida a longo prazo da geogrelha resulta da sua estrutura. Com efeito, apesar do polímero constituinte ser aquele com maior sensibilidade à fluência (PE) a sua deformação é, para valores próximos do nível de tensão, inferior à observada em geotêxteis tecidos em PP.

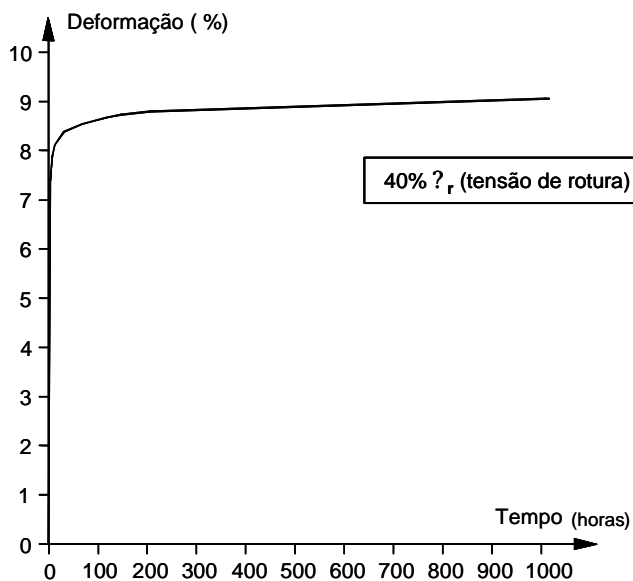


Figura 1. 31 – Curva de fluência de uma geogrelha (McGown *et al.*, 1984).

1.4.5 – Considerações Finais

Ao longo de 1.4 analisou-se o comportamento mecânico dos geossintéticos e a influência que factores internos e externos podem ter nesse comportamento. Concluiu-se que, de todos os factores, aqueles que determinam, fundamentalmente, o comportamento dos geossintéticos são os intrinsecamente relacionados com o material, ou seja, o polímero constituinte e a estrutura.

G. den Hoedt (1986) estabeleceu, em termos simplificados, a influência relativa da estrutura (Quadro 1.IV) e dos polímeros constituintes (Quadro 1.V) no comportamento mecânico a longo prazo dos geossintéticos. Resulta claro que, para os geotêxteis não tecidos agulhados a influência do polímero constituinte no comportamento à fluência do material pode ser desprezada, pois as percentagens de deformação que lhe correspondem são pouco importantes comparadas com as da estrutura. Por outro lado, para as geogrelhas ou geotêxteis tecidos sem frisado, em que a deformação devida à estrutura é pouco significativa, é extremamente importante a escolha adequada do polímero constituinte, dada a sua forte influência no comportamento do geossintético.

Quadro 1. IV – Percentagem de deformação devida à estrutura do geossintético (G. den Hoedt, 1986).

| TIPO DE ESTRUTURA | % DE DEFORMAÇÃO |
|---|-----------------|
| Georelha | 0 |
| Geotêxtil tecido com filamentos esticados | 0-2 |
| Geotêxtil tecido com frisado | 5-10 |
| Geotêxtil não tecido termossoldado | 25 (aprox.) |
| Geotêxtil não tecido agulhado | 50 (aprox.) |

Quadro 1. V – Percentagem de deformação devida ao tipo de polímero constituinte (G. den Hoedt, 1986).

| TIPO DE POLÍMERO | % DE DEFORMAÇÃO |
|--------------------|-----------------|
| Poliéster (PET) | <2 |
| Poliâmidas (PA) | 5 |
| Polipropileno (PP) | 5-20 |
| Polietileno (PE) | >polipropileno |

É importante referir que os geossintéticos são materiais sensíveis a reduções de resistência, quer a curto prazo, quer a longo prazo quando sujeitos a diversas acções, tais como a danificação durante a instalação por acção dos equipamentos de construção e deficientes técnicas de colocação, exposição a agentes físicos, químicos e biológicos. Daí que o dimensionamento adequado de estruturas em que estes materiais intervêm imponha a necessidade de consideração da possibilidade de redução de resistência dos geossintéticos por exposição aos agentes referidos. Este tema será abordado nos capítulos seguintes deste trabalho.

CAPÍTULO 2

DURABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS

2.1 – INTRODUÇÃO

Os geossintéticos são materiais recentes cada vez mais aplicados nos diversos domínios da Engenharia Civil. Porém, como é costume acontecer quando novos materiais e tecnologias se revelam adequados e vantajosos do ponto de vista da solução de problemas, assiste-se actualmente a um desfasamento entre a aplicação prática desses materiais e tecnologias e o conhecimento técnico-científico profundo do modo de os caracterizar, quer nos aspectos particulares do seu funcionamento, quer na manutenção das suas propriedades ao longo do tempo (Pinho Lopes, 2001).

A principal reserva que se coloca à utilização dos geossintéticos em obras de Engenharia Civil tem a ver com a questão da sua durabilidade. De facto, os geossintéticos podem sofrer variações de resistência, tanto a curto como a longo prazo, quando sujeitos a diversas acções.

É imprescindível que o geossintético “funcione” durante o tempo de serviço da obra. Por conseguinte, é necessário adoptar critérios de sobrevivência do material, de modo que este tenha capacidade para resistir aos processos de degradação que vão ocorrendo ao longo do tempo.

Os fenómenos de degradação que alteram as características dos geossintéticos, podem resultar de:

- acção interna (evolução de matéria prima);

- acção externa, que pode ser mecânica (fluência e relaxação), física, química ou bacteriológica.

- Deterioração durante as operações de transporte, manuseamento e colocação em obra.

No que se refere ao envelhecimento causado por acções internas note-se que os polímeros sintéticos, devido ao seu processo de fabrico, têm alterações estruturais que podem, com o decorrer do tempo, conduzir a alterações (por exemplo, cristalizações) sem que tal implique, *à priori*, a degradação do geossintético.

Em relação às acções externas, refira-se, no que diz respeito às acções mecânicas, que a fluência e a relaxação, tal como já foi referido, são muito importantes para o comportamento dos geossintéticos a longo prazo.

Uma das grandes preocupações em termos de comportamento a longo prazo diz respeito à possibilidade de colmatação dos geossintéticos, que pode comprometer as suas propriedades hidráulicas. Este fenómeno é provocado pelas partículas de solo que migram para o geossintético ocupando as suas aberturas e impedindo o fluxo de fluidos. A colmatação pode ocorrer por acção de fenómenos físicos, químicos e biológicos.

Dentro da degradação dos geossintéticos provocada por agentes físico-químicos podem-se destacar: a degradação fotoquímica e térmica, em regra provocada pelas condições atmosféricas; e a degradação química e bacteriológica, resultante, por norma, do contacto com o solo envolvente.

Os danos causados pelas operações de instalação (danificação durante a instalação de geossintético) resultam essencialmente das operações de colocação e compactação do material de aterro junto aos geossintéticos. A danificação durante a instalação dos geossintéticos pode provocar alteração nas propriedades dos materiais, quer a curto, quer a longo prazo, podendo comprometer o exercício adequado da função exigida ao material na obra.

2.2 – DEGRADAÇÃO QUÍMICA E BIOLÓGICA

Em seguida vai ser abordada a acção degradativa nos geossintéticos dos agentes de origem química e biológica. Começa-se por referir a degradação fotoquímica e térmica, em regra, provocada pelos agentes atmosféricos, depois aborda-se a degradação química e biológica.

2.2.1 – Degradação Fotoquímica

A gama de comprimentos de onda a que pertence a radiação ultravioleta do espectro solar que atinge a superfície terrestre, possui energia suficiente para quebrar a maior parte das ligações químicas presentes nas macromoléculas dos polímeros. A intensidade e a duração destas radiações são os factores preponderantes da degradação fotoquímica. No entanto, as acções adicionais do oxigénio, das temperaturas elevadas e da humidade facilitam essa degradação do polímero.

A radiação visível não provoca rotura das ligações químicas mas induz aumentos de temperatura podendo favorecer e acelerar as reacções químicas que ocorrem durante a degradação.

Estudos levados a cabo por Lopes *et al.* (2001) sobre a acção dos agentes atmosféricos em geotêxteis não tecidos relevaram que a acção desses agentes (principalmente das radiações UV) nestes materiais era muito dependente do tipo de polímero constituinte, da existência de aditivos anti-UV e do tipo de ligação dos filamentos. As características fundamentais para o estudo dos geotêxteis estão apresentadas no Quadro 2. I a variação da resistência residual (percentagem da resistência à tracção do material intacto) dos mesmos materiais durante 30 semanas de exposição aos agentes atmosféricos é apresentada no Quadro 2. II e na Figura 2. 1. A Figura 2. 2 mostra o aspecto de um geotêxtil não tecido (GT3 - Quadro 2. I) intacto e após 30 semanas de exposição aos agentes atmosféricos.

Os autores verificaram que, quando o polímero constituinte é polipropileno (PP), a existência de aditivos anti-UV é determinante na resistência dos geotêxteis aos agentes atmosféricos (GT3 versus GT2). No entanto, o geotêxtil sem aditivos anti-UV em PET

(GT4) evidencia resistência semelhante à do geotêxtil em PP (GT3) com aditivos anti-UV para períodos de exposição iguais ou superiores a 15 semanas, tornando clara a maior resistência aos agentes atmosféricos do poliésteres.

Quadro 2. I – Características dos geotêxteis não tecidos estudados (Lopes *et al.*, 2001).

| Geotêxtil | Polímero | Ligação | Filamento | mua * (g/m ²) | Aditivos anti-UV |
|-----------|----------|-------------|-----------|---------------------------|------------------|
| GT1 | PP | agulhado | longo | 150 | não |
| GT2 | PP | agulhado | longo | 400 | não |
| GT3 | PP | agulhado | longo | 584 | sim |
| GT4 | PET | agulhado | longo | 180 | não |
| GT5 | PP | termoligado | curto | 300 | não |

* mua – massa por unidade de área

Quadro 2. II – Resistência à tracção residual dos geotêxteis.

| Semana | Resistência residual (%) | | | | |
|--------|--------------------------|------|-------|------|------|
| | GT1 | GT2 | GT3 | GT4 | GT5 |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 5 | 91,2 | 94,6 | 105,1 | 89,5 | 67,5 |
| 15 | 76,5 | 75,0 | 77,6 | 77,4 | 35,8 |
| 30 | 54,4 | 60,1 | 70,1 | 70,0 | 22,9 |

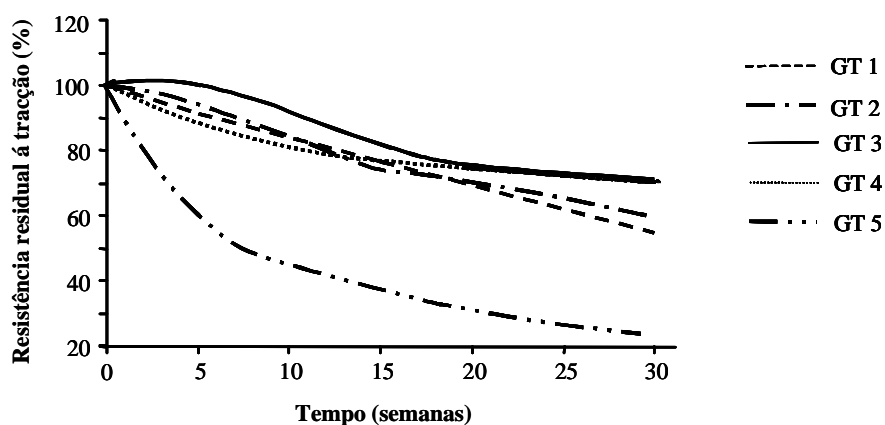


Figura 2. 1 – Influência dos agentes atmosféricos na resistência à tracção de geotêxteis não tecidos (Lopes *et al.*, 2001).

Os autores constataram, também, que a massa por unidade de área do geotêxtil tem influência desprezável na resistência em causa (GT1 comparado com GT2) e que geotêxteis com filamentos curtos termoligados são muito mais sensíveis aos agentes atmosféricos do que qualquer outro geotêxtil considerado no estudo (GT1 versus GT5).



Figura 2. 2 – Geotêxtil não tecido: **a)** intacto; **b)** após 30 semanas de exposição aos agentes ambientais (Lopes *et al.*, 2001).

Do exposto, conclui-se que se deve evitar que os geossintéticos fiquem sujeitos à luz solar, devendo ser envolvidos por revestimentos opacos, armazenados em estaleiro ao abrigo da luz e aplicados o mais rapidamente possível.

2.2.2 – Degradação Térmica

A Figura 2. 3 mostra a influência do aumento da temperatura no comportamento de filamentos em PE, PA, PET e PP. Como se pode observar os polímeros menos sensíveis à variação da temperatura são as poliamidas e os poliésteres, sendo o polietileno e o polipropileno os mais sensíveis à alteração do parâmetro.

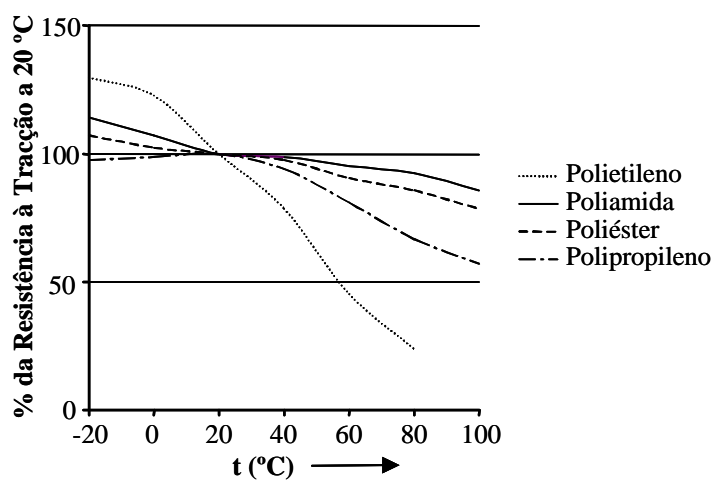


Figura 2. 3 – Efeito da temperatura na resistência à tracção dos polímeros constituintes (adaptado de Pilarczyk, 2000).

Como normalmente o oxigénio está presente, em geral, ocorre a acção conjugada da temperatura e do oxigénio, desenvolvendo-se a degradação termo-oxidativa.

A intensidade deste tipo de degradação depende, naturalmente, da concentração de oxigénio em contacto com o polímero, sendo por isso, menor quando este está submerso em água.

Salman *et al.*, (1998) estudaram, através de ensaios laboratoriais acelerados a sensibilidade à acção termo-oxidativa de dois geotêxteis não tecidos em polipropileno. Os dois geotêxteis (designados por P-3 e P-3a) são idênticos em composição polimérica, um sem aditivos anti-oxidantes (P-3) e outro com aditivos anti-oxidantes (P-3a). A Figura 2.4 mostra a variação da resistência retida com o tempo, para diferentes temperaturas, nos dois materiais. Constata-se que, para a mesma temperatura, o geotêxtil com aditivos apresenta melhor comportamento do que o sem aditivos e que a diferença de comportamentos é tanto mais pronunciada quanto mais baixa é a temperatura.

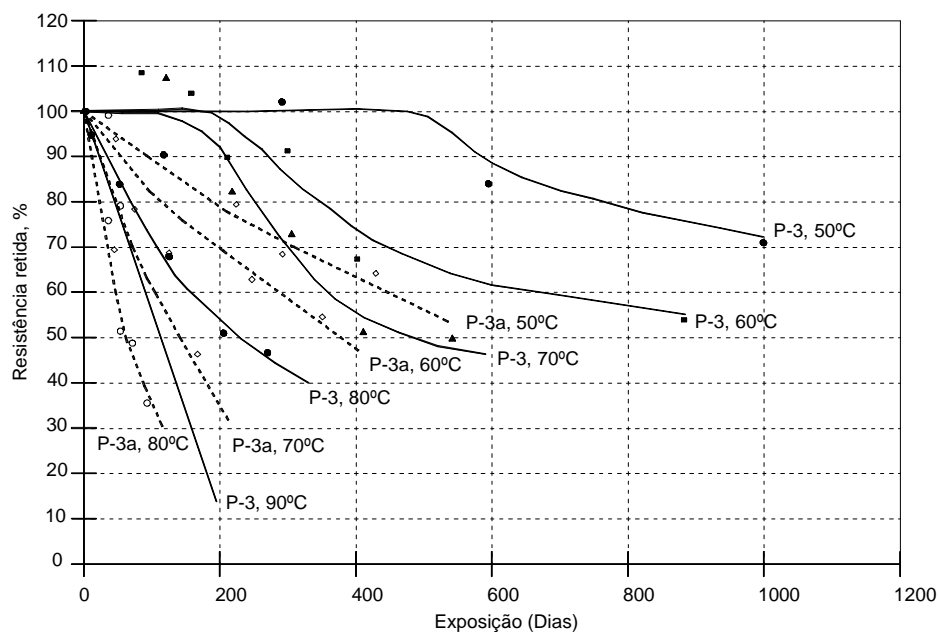


Figura 2. 4 – Degradação termo-oxidativa – efeito de aditivos anti-oxidantes na resistência retida (Salman *et al.*, 1998).

Os mesmos autores submeteram o geotêxtil sem aditivos (P-3) a temperaturas de 70°C, 80°C e 90°C em ambientes de 8% e 21% de oxigénio equilibrado com azoto tendo

verificado que o aumento da percentagem de oxigénio acelera a degradação do geossintético (Figura 2.5).

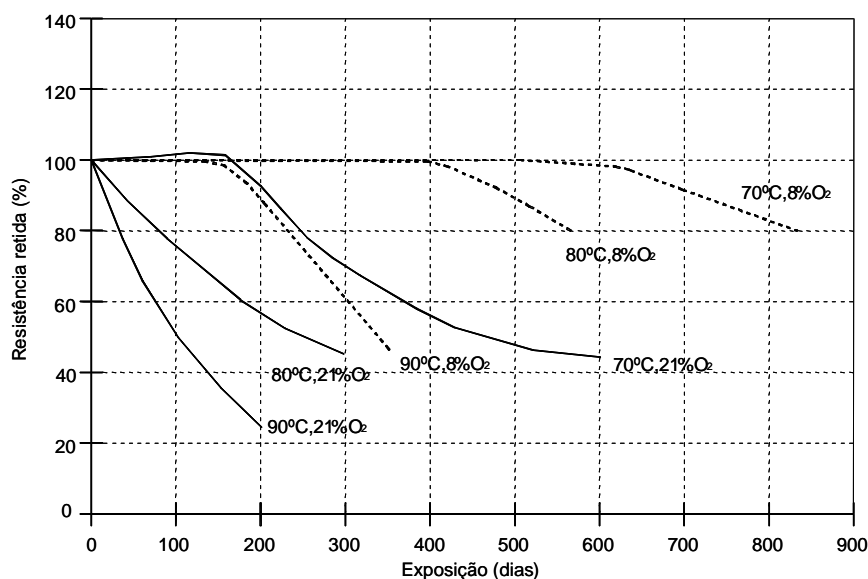


Figura 2. 5 – Influência da quantidade de oxigénio presente na degradação dos geossintéticos (Salman *et al.*, 1998).

Santos *et al.* (2002) estudaram, através de ensaios laboratoriais acelerados, a sensibilidade de geotêxteis não tecidos em poliéster e polipropileno à acção termo-oxidativa tendo verificado que a sensibilidade a esta acção é mais significativa nos geotêxteis em polipropileno (Figura 2.6)

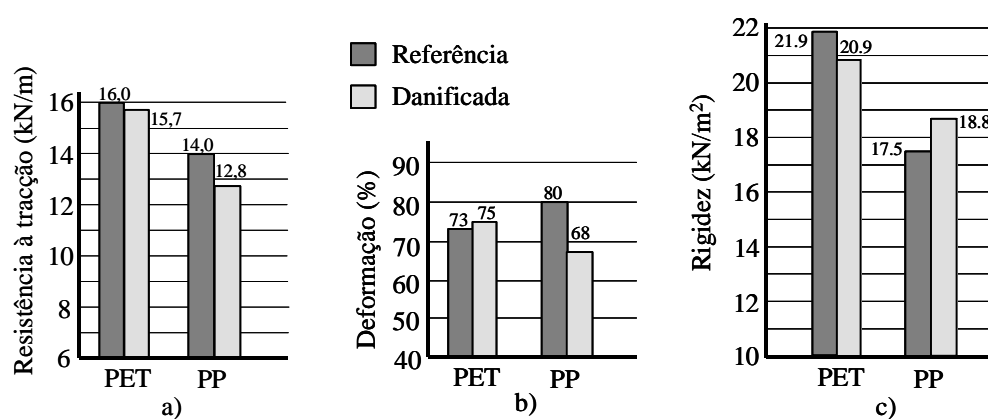


Figura 2. 6 – Degradação termo-oxidativa em geotêxteis não tecidos em polipropileno e em poliéster (Santos *et al.*, 2002).

Para minimizar a degradação provocada nos geossintéticos pelo aumento da temperatura e pelas radiações UV, deve-se evitar a exposição à luz solar dos materiais e utilizar estabilizantes térmicos, anti-UV e anti-oxidantes na sua produção.

2.2.3 – Degradação Química

A degradação química pode ser provocada pela acção do oxigénio, dos iões metálicos, dos ácidos, das bases, dos solventes e da água.

A perda das propriedades mecânicas de um polímero, resultante da acção dos factores referidos, depende da sua natureza química. Estes factores são responsáveis por profundas alterações nas cadeias moleculares constituintes dos polímeros, que incluem quebra de ligações químicas e consequente diminuição do comprimento das cadeias moleculares, alteração química das mesmas, incorporação de iões estranhos nas cadeias, formação de espécies quimicamente activas, rotura das cadeias, etc.. Naturalmente, essas alterações profundas acarretam modificações nas propriedades dos polímeros.

2.2.3.1 – Acção dos Iões Metálicos

Os iões metálicos podem atacar as cadeias moleculares constituintes dos polímeros, dando origem à formação de espécies quimicamente activas. Uma vez formadas estas espécies inicia-se o processo de degradação do polímero de base. Por outro lado, os metais, nomeadamente os metais de transição (Fe, Cu), podem catalisar a decomposição dos peróxidos com a consequente aceleração dos fenómenos de degradação.

2.2.3.2 – Acção de Soluções Ácidas e Alcalinas

Os ácidos, as bases são agentes químicos de degradação susceptíveis de estar presentes quando os geossintéticos se encontram incorporados nos maciços terrosos. Em condições muito agressivas, o polietileno e o polipropileno resistem melhor aos ácidos e bases que as poliamidas e os poliésteres (Rocha, 1988) .

Santos *et al.* (2002) estudaram, através de ensaios laboratoriais acelerados, a sensibilidade de geotêxteis não tecidos em polipropileno e em poliéster à acção de soluções com pH do lado ácido e do lado alcalino, tendo verificado uma reduzida

sensibilidade dos materiais a soluções ácidas (Figura 2.7) e uma importante sensibilidade do geotêxtil em poliéster a soluções alcalinas (Figura 2.8).

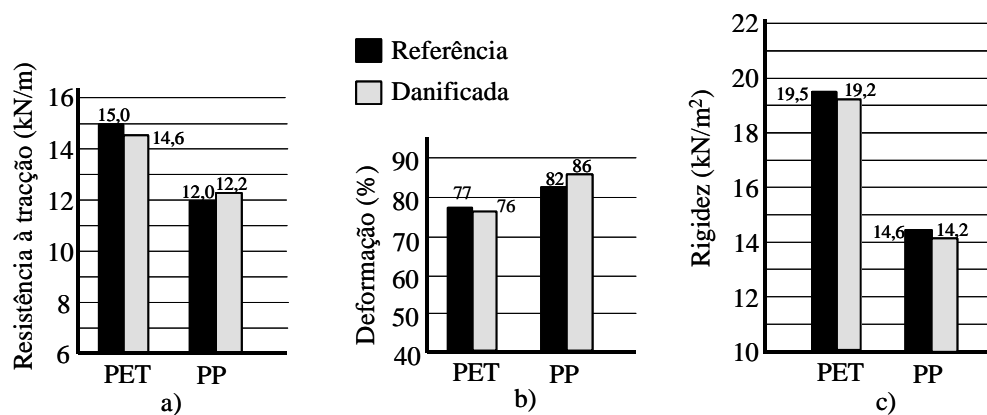


Figura 2. 7 – Efeito de soluções ácidas em geotêxteis não tecidos em PP e PET (Santos *et al.*, 2002).

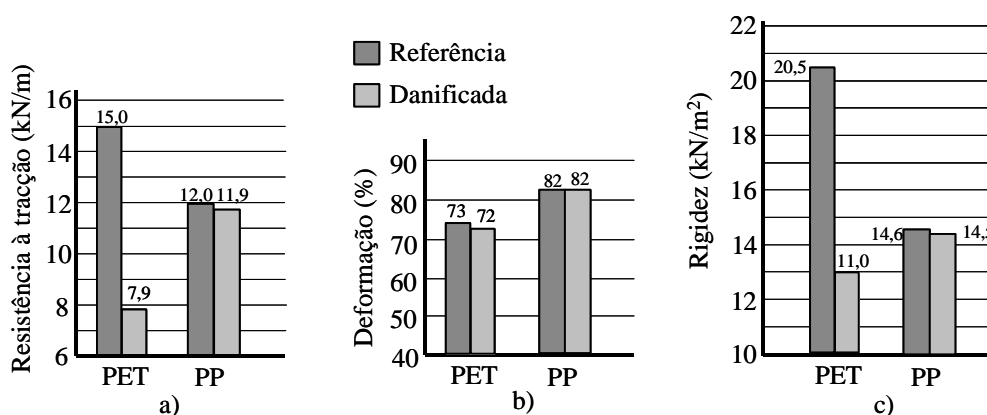


Figura 2. 8 – Efeito de soluções alcalinas em geotêxteis não tecidos em PP e PET (Santos *et al.*, 2002).

2.2.3.3 – Acção da Água

Em presença de água os polímeros podem ser hidrolisados. A reacção de hidrólise pode desenvolver-se em grupos laterais das cadeias moleculares ou nas próprias cadeias principais. Neste caso há rotura das cadeias, o que origina a diminuição das propriedades mecânicas dos polímeros. A hidrólise pode ser catalizada por iões metálicos eventualmente presentes.

Os polímeros susceptíveis de serem hidrolisados são as poliamidas e os poliésteres. As poliamidas são mais sensíveis em soluções aquosas ácidas, ao passo que, no caso dos poliésteres, o grau de degradação por hidrólise aumenta em soluções alcalinas (Koerner *et al.*, 1988).

Nas poliamidas a perda da resistência mecânica provocada pela hidrólise pode ser acentuada. Após longos períodos de imersão em água podem perder até 30% da sua resistência mecânica. Por isso, não é recomendável a sua utilização em obras de risco de inundação.

A susceptibilidade à hidrólise em soluções aquosas fortemente alcalinas (pH = 10 e pH = 12) dos poliésteres foi comprovada por Halse *et al.* (1987). Porém, o grau de degradação observado variava de poliéster para poliéster, o que leva a crer que características inerentes aos plásticos (peso molecular, distribuição do peso molecular, cristalinidade, aditivos, etc.) e ao processo de fabrico das fibras podem ser determinantes na resposta dos materiais.

A velocidade da reacção de hidrólise aumenta com a temperatura e humidade relativa do meio. No entanto, para condições normais de utilização (pH = 10) não é de esperar uma degradação importante da resistência mecânica dos poliésteres provocada pela hidrólise. Esta conclusão foi confirmada pelos resultados de observação de obras, com idades compreendidas entre os seis e os dezassete anos, nas quais foram usados poliésteres (Sotton e Leclerq, 1984 e Leflaive, 1988): em nenhum dos casos relatados se observaram reduções das propriedades mecânicas imputáveis à hidrólise superiores a 10%.

Mais recentemente Cowland *et al.* (1998) retiraram amostras de dois geotêxteis tecidos, um em PET e outro em PP, que tinham sido colocados há 14 anos para reforço da base de um aterro viário construído sobre argilas moles. Os geossintéticos tinham sido colocados sobre a argila e sobre eles foi construído o aterro com areia siltosa de origem granítica. Durante a extracção das amostras dos geotêxteis o pH da água circundante era 7 e a temperatura média no solo de fundação a 3m da superfície era de 26°C.

As amostras extraídas foram ensaiadas à tracção-deformação, para determinação da resistência retida pelos geotêxteis ao fim de 14 anos de serviço, foram observadas ao microscópico electrónico, para observar a estrutura do material, e determinou-se o peso molecular, para avaliar a extensão da hidrólise.

Os resultados obtidos revelaram que a perda de resistência no geotêxtil em polipropileno é pouco significativa, tendo-se observado ao microscópio electrónico apenas danificação superficial da estrutura. Por sua vez, a resistência à tracção do geotêxtil em poliéster diminui cerca de 15%, tendo também diminuído o peso molecular.

A redução do peso molecular do geotêxtil em PET é indicadora de que uma parte da perda de resistência à tracção do material (5%) se deve à hidrólise (Burgoyne e Merii, 1993; Schmidt, 1994), sendo a restante, provavelmente devida à danificação durante a instalação.

2.2.4 – Degradação Biológica

Os plásticos podem degradar-se biologicamente por acção de microorganismos presentes. Estas acções dividem-se em três tipos:

- acção directa sobre os polímeros constituintes dos plásticos;
- acção destrutiva sobre determinados aditivos presentes na composição de plásticos;
- desenvolvimento de produtos agressivos para os materiais plásticos.

Estudos realizados até ao momento apontam para uma boa resistência biológica dos polímeros mais comuns no fabrico de geossintéticos. Como justificação desta constatação experimental aponta-se o facto de os microorganismos consumirem somente as fracções poliméricas de muito baixo peso molecular, o que faz com que as propriedades dos plásticos não sejam praticamente afectadas (Lopes, 1992).

2.2.5 – Influência do Estado de Deformação

A susceptibilidade dos geossintéticos aos agentes químicos e biológicos depende do estado de deformação do material. O aumento da deformação facilita a acção degradativa daqueles agentes.

A acção isolada dos agentes ambientais pode não produzir qualquer alteração no material. No entanto, quando há adição de deformação suficiente ao material há um agravamento da situação que pode conduzir à rotura em pouco tempo.

Assim, num projecto de uma obra definitiva é necessário efectuar uma análise de todos os agentes ambientais e de envelhecimento que poderão actuar no meio em que o geossintético irá ser aplicado, em simultâneo com o estado de deformação previsível para o material (Lopes, 1992).

2.2.6 – Nota Final

Todos os polímeros são susceptíveis de sofrerem degradação. Os tipos e grau de degradação dependem da natureza do polímero e das características do meio envolvente.

A temperatura tem uma influência determinante na velocidade das reacções, desenvolvendo-se a maioria próximo da temperatura ambiente, é de esperar que os processos de degradação sejam muito lentos.

Hoje em dia existe uma atitude optimista perante a questão de durabilidade dos geossintéticos. Esta atitude resulta de estudos realizados em obras reais, em que se tem verificado que é pequena a redução das propriedades dos geossintéticos imputável aos agentes de degradação.

Embora a questão do comportamento a longo prazo dos geossintéticos tenha sido uma das áreas mais estudadas ultimamente, ainda existem lacunas importantes nos conhecimentos nesta área. Assim, a selecção destes materiais deve ser feita com espírito crítico, contemplando aspectos como a natureza química dos polímeros constituintes e as características dos meios onde irão ser aplicados. Esta atitude é particularmente recomendável em obras de engenharia nas quais a eventual degradação dos geossintéticos possa ter efeitos catastróficos.

2.3 – DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO

2.3.1 – Introdução

No que diz respeito aos agentes indutores de redução de resistência dos geossintéticos, a danificação que estes podem sofrer por efeito das operações de

construção e instalação em obra é dos mais pertinentes. Se por um lado estes materiais sofrem fluência (efeito a longo prazo), por outro o processo de instalação em obra também pode (o que normalmente é inevitável) induzir alterações nos materiais, que por sua vez poderão condicionar a resposta dos geossintéticos.

No dimensionamento de estruturas com geossintéticos, em geral, são usados factores de redução de resistência devida a mecanismos distintos e não relacionados. Segundo alguns autores, os factores de redução mais elevados dizem respeito à fluência e à danificação durante a instalação. Esta forma de dimensionar as estruturas com geossintéticos conduz à necessidade de verificar até que ponto os valores usados na prática são ou não adequados e definir coeficientes de segurança realistas no dimensionamento de estruturas com geossintéticos.

Nesta secção pretende-se fazer uma abordagem da danificação durante a instalação e dos seus efeitos no comportamento mecânico dos geossintéticos, tanto a curto como a longo prazo.

2.3.2 – Natureza da Danificação Mecânica

Para as muitas aplicações dos geossintéticos onde o tempo de vida útil de serviço varia entre dez e cem anos a danificação mecânica é a principal degradação a considerar (Greenwood, 1998).

As operações de remoção, preparação da superfície, manuseamento e colocação do geossintético, espalhamento e compactação não são suaves e, na maioria dos casos, são realizados por trabalhadores muito pouco sensíveis à delicadeza destas operações (Greenwood, 1998). Assim, quando os geossintéticos são instalados em obra sofrem danificação mecânica, que geralmente é inevitável. Para ultrapassar esta questão é usual escolher um geossintético mais “forte”, em vez de adequar o processo construtivo (Bräu, 1998). Ingold (1994) refere a noção de “sobrevivência” do geossintético, classificando-a como um problema de curto prazo, que pode ser ultrapassado usando geossintéticos suficientemente robustos.

É de notar que este procedimento pode induzir custos significativos na aplicação de geossintéticos, pelo que diversos autores têm procurado avaliar as perdas nas propriedades dos geossintéticos associados aos processos de instalação em obra.

Para uma mais fácil interpretação das consequências da danificação durante a instalação (DDI) na função que o geossintético exerce, na Figura 2.9 estão representadas as consequências da DDI *versus* função do geossintético. Da figura observa-se que quando o geossintético tem como função reforço, a DDI provoca redução da resistência que por vezes pode ser muito significativa. Caso a função seja filtração e/ou separação, perfurações provocadas pelo processo de instalação podem reduzir a eficácia da função, assim como pequenos cortes iniciais originados pela DDI, são factores de grande preocupação quando a função principal é a de barreira de fluidos.

| Aplicação do Geossintético | Consequências da Danificação durante a instalação |
|----------------------------|---|
| Reforço | Redução de resistência (pode ser muito significativa) |
| Filtração e/ou separação | Perfurações \Rightarrow redução da eficácia da função |
| Barreira de fluidos | Pequenos cortes iniciais \Rightarrow grandes aberturas \Rightarrow deixam de cumprir a função |

Figura 2. 9 – Consequências da DDI *versus* função do geossintético.

2.3.2.1 – Aspecto Visual da Danificação

Muitos dos estudos de danificação têm sido realizados em locais onde os provetes podem ser extraídos facilmente e onde a colocação e compactação do solo seguem os princípios práticos gerais.

A primeira impressão é geralmente de poeira e sujidade e abrasão superficial da estrutura do material. Se a dimensão das partículas do solo for grande (? 5mm) há áreas do geossintético que ficam perturbadas, o mesmo é esperado se o subsolo é mole (Greenwood, 1998)

Bräu (1998) refere que nos geossintéticos as maiores tensões surgem durante a fase de instalação, que podem resultar em perdas de resistência, efeitos de abrasão,

diminuição local da espessura do material, corte de fibras, abertura e, no pior caso, na desintegração total dos geossintéticos ao longo de uma determinada área.

Na Figura 2.10 apresenta-se o aspecto visual de alguns geossintéticos sujeitos à danificação durante a execução de aterros em *tout-venant* e em solo residual granítico (Pinho-Lopes, 2001). Observa-se que os geossintéticos perdem o brilho inicial, apresentam-se debilitados e com perturbações mais ou menos extensas. Alguns apresentam cortes, pregas, rasgos e perfurações (Figura 2.10 b, c, d). Outros apresentam-se bastante danificados (desintegração numa determinada área) (Figura 2.10 e).

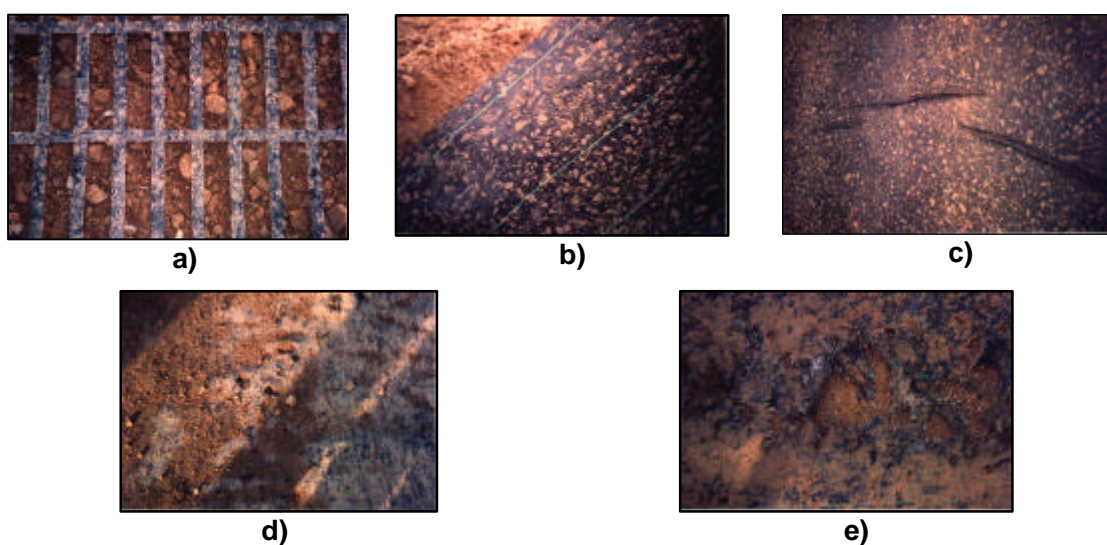


Figura 2. 10 – Aspecto de alguns geossintéticos após a sua remoção (Pinho-Lopes, 2001).

Bush (1988) sugeriu a classificação dos danos visíveis nos geossintéticos (por exemplo, furos, cortes e rasgos, etc.) e a indicação do número por metro quadrado de cada tipo. No entanto, à excepção dos furos (em que a classificação se tem revelado satisfatória), a classificação de outros tipos de danos é fortemente dependente do operador, isto é, extremamente variável de pessoa para pessoa.

Christopher e Holtz (1984) propuseram uma classificação da DDI dos geossintéticos em função das características do solo subjacente e dos equipamentos de compactação (Quadro 2. III). A classificação varia de *não recomendado a suave*; *não recomendado* é atribuído a condições de instalação muito severas, sendo desaconselhada a aplicação de geossintéticos, *suave* refere-se a condições de instalação óptimas, em que são mínimos os danos aos geossintéticos.

propriedades dos geossintéticos resultantes da danificação durante a instalação. Por isso, para uma análise quantitativa desta acção nas propriedades dos geossintéticos é necessário utilizar outros métodos de controlo.

2.3.2.2 – Efeito da DDI nas Propriedades a Curto Prazo

O efeito da danificação durante a instalação nas propriedades dos geossintéticos pode ter consequências várias, incluindo a impossibilidade de os materiais exercerem a função para a qual foram dimensionados. Por exemplo, Christopher e Elias (1998) referem que nos Estados Unidos foi já reconhecido que a abrasão e as tensões locais que surgem nos geossintéticos durante a instalação podem danificar significativamente estes materiais, comprometendo a sua capacidade de funcionamento.

No caso de aplicações em que o geossintético funciona como barreira de fluidos, por exemplo, o aparecimento de pequenos cortes poderá não ter efeitos logo após a colocação do material em obra. No entanto, após a entrada em serviço da estrutura, a existência de tensões no geossintético poderá induzir o aumento desses cortes e consequentemente dar origem a grandes aberturas. Estes efeitos irão, sem dúvida, fazer com que o material deixe de cumprir a função de barreira de fluidos.

A existência de perfurações no geossintético reduz a eficácia da sua função como filtro e/ou separador. Koerner e Koerner (1990) relacionaram o número de perfurações por metro quadrado do geossintético com a resistência à tracção retida (Figura 2.12), concluindo que o critério, de “inexistência de perfurações”, é essencial para aplicações dos materiais em filtragem, separação e barreira de fluidos. A desintegração total do geossintético ao longo de uma determinada área anulará por completo estas funções do material.

A redução de resistência induzida pela danificação durante a instalação dos geossintéticos, é muito relevante nas aplicações destes materiais como reforço. De facto, reduções de resistência passíveis de ocorrerem podem mesmo por em causa a estabilidade da obra.

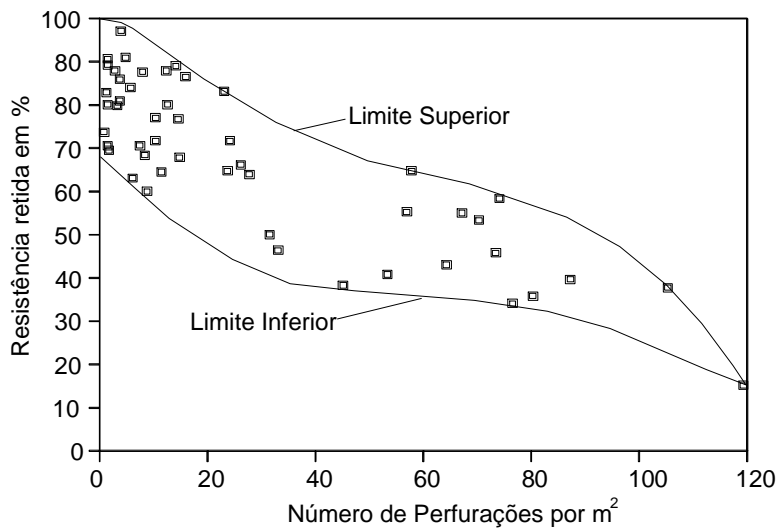


Figura 2. 12 – Número de perfurações *versus* resistência retida (Koerner e Koerner, 1990).

Koerner e Koerner (1990) estabeleceram uma relação entre a média da resistência à tracção retida em geotêxteis e o grau de danificação proposto por Christopher e Holtz (1984) (Figura 2.13). Verifica-se que um grau de danificação elevado corresponde a uma danificação mecânica elevada dos materiais. Por exemplo, para condições extremamente severas instalação (denominado por *Muito elevado* na Figura 2.13) a resistência retida é aproximadamente de 40%.

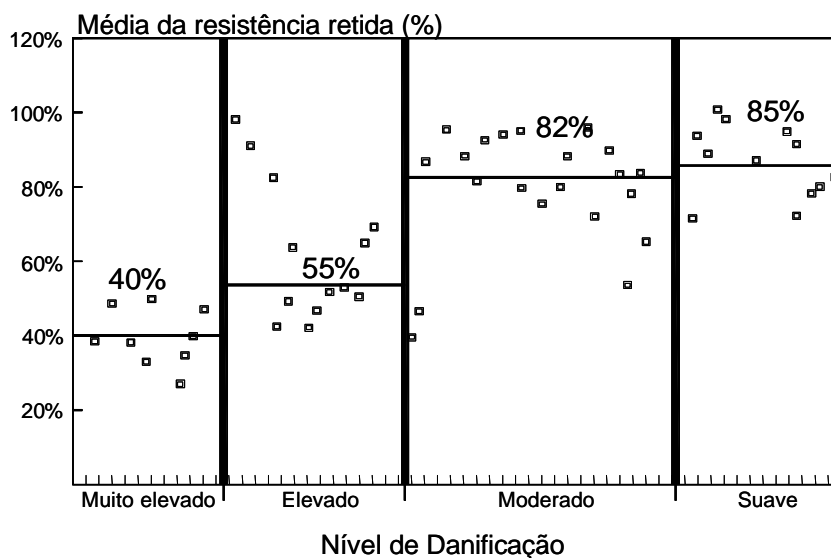


Figura 2. 13 – Resistência à tracção retida *versus* nível de danificação (Koerner e Koerner, 1990).

De acordo com Greenwood (1998), mesmo com um determinado nível de danificação, a maioria dos geossintéticos pode exercer as suas funções de forma razoável. Nas aplicações dos geossintéticos em reforço de solos a redução de resistência é mais preocupante e deve ser avaliada cuidadosamente.

2.3.2.3 – Efeito da DDI nas Propriedades a Longo Prazo

Uma das questões que tem sido levantada no que diz respeito ao efeito da danificação durante a instalação de geossintéticos no seu comportamento a longo prazo é se esse efeito mecânico será ou não semelhante ao que se verifica a curto prazo.

A resistência a longo prazo dos geossintéticos é avaliada aplicando cargas constantes ao longo do tempo aos geossintéticos (ver 1.4.4). Para cada nível de carga regista-se o tempo que demora a ocorrência da rotura e estabelece-se uma relação carga/tempo. A partir desta relação é possível definir a curva de tensão de rotura. Esta curva pode ser extrapolada em ordem ao tempo (até à rotura) e em ordem à carga, sendo assim possível definir o valor de cálculo da carga.

A abordagem tradicional para determinação das propriedades a longo prazo de um geossintético danificado consiste em aplicar ao valor da resistência a longo prazo do material intacto a razão entre as resistências a curto prazo do material danificado e do material intacto.

Quando vários agentes de degradação actuam simultaneamente sobre os geossintéticos é possível que haja alguma sinergia (positiva ou negativa): o efeito de dois ou mais agentes pode ser distinto (menor ou maior) do que a soma dos efeitos dos mesmos agentes actuando separadamente sobre os geossintéticos.

Alguns autores (Pinho-Lopes *et al.*, 2000; Allen e Bathurst, 1996) verificaram a existência de sinergia positiva entre as acções de danificação durante a instalação e de fluência dos geossintéticos.

De facto, poderá haver algum efeito sinérgico e uma menor redução das características mecânicas de um material danificado quando submetido a níveis de tensão reduzidos. Assim, o estudo do efeito combinado da danificação durante a instalação e da fluência dos geossintéticos poderá conduzir a novas possibilidades no dimensionamento destes materiais, com a conseqüente redução de custos de construção. Este efeito

combinado corresponde a afirmar que as curvas de fluência do material intacto e danificado se intersectam ao fim de um determinado tempo t (Pinho-Lopes *et al.*, 2000).

Allen e Bathurst (1996) propõem um método que combina a informação obtida em ensaios de fluência e em ensaios de tracção de curto prazo para prevêr a resistência a longo prazo dos geossintéticos danificados durante a instalação em obra. Está ainda em aberto se as hipóteses formuladas neste método merecem confiança suficiente para que possa ser usado na resolução do problema.

2.3.3 – Avaliação da Danificação Durante a Instalação

Como já foi mencionado, a danificação durante a instalação (DDI) de geossintéticos é um dos factores de redução de resistência mais significativos e decorre, essencialmente, das operações de manuseamento dos geossintéticos e da colocação e compactação do material de aterro adjacente.

Em termos simplificados, para avaliar as alterações nas propriedades dos geossintéticos associados aos processos de instalação em obra, pode recorrer-se à:

- exumação de amostras de geossintéticos que tenham sido submetidas a condições de instalação (Fox *et al.*, 1998; Bräu, 1996; Watts e Brady, 1990);
- modelação ou simulação em laboratório das condições de instalação (Pinho-Lopes *et al.*, 2000; Elvidge e Raymond, 1999; Bräu, 1996).

Nos dois procedimentos referidos os geossintéticos danificados são submetidos a ensaios de modo a avaliar a alteração induzida pela danificação na(s) propriedade(s) de referência. De notar, que a(s) propriedade(s) de referência depende(m) da aplicação do geossintético. Porém, outro modo de proceder consiste na especificação de valores mínimos das propriedades dos materiais, por forma a garantir a sobrevivência dos geossintéticos às condições de instalação.

De seguida será feito um resumo de cada um destes procedimentos, abordando em separado as aplicações dos geossintéticos como separador e/ou filtro, barreira de fluidos e reforço.

2.3.3.1 – Avaliação da DDI em Geossintéticos como Separadores e/ou Filtros

Quando os geossintéticos exercem as funções de separação e/ou filtragem, a redução de resistência à tracção devido à danificação é muito menos importante do que as perfurações e rasgos, dado que estes podem alterar a dimensão característica das aberturas do geossintético, uma das propriedades fundamentais para as aplicações em causa.

Neste caso, uma das formas de avaliar os danos físicos que provocam alterações nos valores das propriedades mais relevantes (permissividade e dimensão característica das aberturas) é a exumação de amostras sujeitas às condições de instalação. Caso não haja esta possibilidade poder-se-á recorrer a informação existente relativa a situações similares e definir um conjunto de critérios de sobrevivência em função das potencialidades de danificação do geossintético, impondo o controlo das condições limites.

Christopher e Holtz (1984), prosseguindo o trabalho iniciado por Haliburton *et al*, (1982), desenvolveram um sistema de classificação da danificação durante a instalação dos geossintéticos (ver Quadro 2. III). Neste sistema, para cada classe de risco de danificação são definidos valores mínimos para as propriedades dos geossintéticos (por exemplo: resistência ao punçoamento estático e dinâmico, resistência ao rasgamento, resistência à tracção das juntas, etc..) de modo a garantir a sua sobrevivência às condições de instalação. Estes valores mínimos podem ser modificados, caso haja possibilidade de proceder à retirada de amostras de geossintéticos submetidos às condições de danificação, ou caso surjam novos dados experimentais.

A AASHTO M288-96, sobre os critérios de sobrevivência para geotêxteis, estabelece cinco propriedades de referência (Quadro 2.IV) para avaliação da capacidade de sobrevivência à instalação dos geotêxteis.

Esta norma divide os geotêxteis em três classes (1, 2 e 3). A classe 1 obriga a valores limites das propriedades de referência mais elevados, diminuindo os valores dessas propriedades à medida que a ordem da classe aumenta. Em cada classe, os valores das propriedades dependem da deformação nas proximidades da rotura medida no ensaio de tracção-deformação. Com efeito, geotêxteis menos deformáveis ($\epsilon < 50\%$), como é o caso em geral dos tecidos, são mais sensíveis à danificação, logo os valores limites das propriedades são mais elevados do que para geotêxteis mais deformáveis ($\epsilon > 50\%$), como é tipicamente o caso dos não tecidos.

Quadro 2. IV – Critérios de sobrevivência de geotêxteis (AASHTO M 288-96).

| | Método de ensaio | unidades | Classe de geotêxteis | | | | | |
|-----------------------------|------------------|----------|----------------------|------|----------|------|----------|------|
| | | | Classe 1 | | Classe 2 | | Classe 3 | |
| | | | <50% | =50% | <50% | =50% | <50% | =50% |
| Resistência à tracção | ASTM D 4632 | N | 1400 | 900 | 1100 | 700 | 800 | 500 |
| Resistência das juntas | ASTM D 4632 | N | 1200 | 810 | 990 | 630 | 720 | 450 |
| Resistência ao rasgamento | ASTM D 4533 | N | 500 | 350 | 400 | 250 | 300 | 180 |
| Resistência ao punçoamento | ASTM D 4833 | N | 500 | 350 | 400 | 250 | 300 | 180 |
| Resistência ao rebentamento | ASTM D 3786 | kPa | 3500 | 1700 | 2700 | 1300 | 2100 | 950 |

A classe de geotêxtil exigida depende da aplicação. A AASHTO M 288-96 fornece orientações para quatro aplicações gerais: drenagem, separação, estabilização e controlo de erosão (Quadro 2.V).

Quadro 2. V – Classe do geotêxtil função do tipo de aplicação (AASHTO M 288-96).

| Aplicações | Classe de geotêxtil (por defeito) |
|--------------------|---|
| Drenagem | 2 |
| Separação | 2 |
| Estabilização | 1 |
| Controlo de erosão | 2 (geotêxteis tecidos); 1 (restantes materiais) |

Em qualquer das aplicações, o engenheiro deve ter espírito crítico ao especificar os valores limites das propriedades de referência, considerando, não só a experiência acumulada, mas também resultados de ensaios laboratoriais. A título de exemplo refira-se que caso as condições específicas do projecto conduzam a tensões de instalação menores do que o normal (por exemplo, compactação fraca, agregados finos etc.), é razoável especificar valores mais baixos para as propriedades de referência dos geossintéticos do que as indicadas no Quadro 2. IV.

É da máxima importância realçar que a norma em causa foi desenvolvida com base nos geotêxteis comercializados nos Estados Unidos e que, as normas de ensaio de controlo dos valores das propriedades de referência são também as vigentes neste País.

Por isso, a aplicação directa desta proposta na União Europeia não é possível, uma vez que as normas de ensaio vigentes na Europa podem não ser equivalentes às indicadas no Quadro 2.IV e, conseqüentemente os valores limites das propriedades.

No actual regulamento alemão a consideração do efeito da danificação durante a instalação em geossintéticos com funções de separação, filtragem e protecção não obriga à definição dos valores de propriedades mecânicas de referência, mas sim à definição da robustez dos materiais a partir de um sistema de classificação (Köln, 1994; Bonn, 1995; Wilmers *et al.*, 1995; Wilmers *et al.*, 1996) baseado nas características do solo e da solicitação durante a instalação.

Assim, começa-se por definir o caso de aplicação (AS) em função das características do solo (Quadro 2.VI). Em seguida, são definidos os casos de carga (AB) (Quadro 2.VII), isto é, as cargas aplicadas ao geotêxtil durante a sua instalação e durante a construção.

Quadro 2. VI – Caso de aplicação (AS) (adaptado de Braü, 1998).

| | Características do solo adjacente | |
|------------|---|--|
| | Partículas não angulosas | Partículas angulosas |
| AS1 | As acções do solo e dos processos de instalação não afectam o geotêxtil | |
| AS2 | Areia grossa sem seixo | ----- |
| AS3 | Areia grossa com menos de 40% de seixo | Areia grossa sem seixo |
| AS4 | Areia grossa com mais de 40% de seixo | Areia grossa com menos de 40% de seixo |
| AS5 | ----- | Areia grossa com mais de 40% de seixo |

Quadro 2. VII – Casos de carga (AB) (adaptado de Braü, 1998).

| | |
|------------|--|
| AB1 | Instalação manual e pressões de compactação desprezáveis |
| AB2 | Instalação mecânica e pressões de compactação desprezáveis |
| AB3 | Instalação mecânica e pressões de compactação significativas (5 a 15cm de solo sobrejacente) |
| AB4 | Instalação mecânica e pressões de compactação elevadas (mais de 15cm de solo sobrejacente) |

Com base nos casos de aplicação (AS) e de carga (AB) definidos determina-se a classe de robustez do geotêxtil exigido (GRK) Quadro 2. VIII. Cada classe de robustez dos geotêxteis está associada a valores limites de propriedades de referência (Quadro 2.IX).

Quadro 2. VIII – Classe de robustez dos geotêxteis (GRK) (adaptado de Braü, 1998).

| Casos de aplicação | Casos de arga | | | |
|--------------------|---------------|------|------|------|
| | AB1 | AB2 | AB3 | AB4 |
| AS1 | GRK2 | --- | --- | --- |
| AS2 | GRK2 | GRK2 | GRK3 | GRK4 |
| AS3 | GRK3 | GRK3 | GRK4 | GRK5 |
| AS4 | GRK4 | GRK4 | GRK5 | * |
| AS5 | GRK5 | GRK5 | * | * |

* para estas aplicações devem ser realizados ensaios *in situ* ou, em alternativa a altura de solo sobrejacente deve ser aumentada.

Quadro 2. IX – Tipo de geotêxtil e requisitos mínimos exigidos (adaptado de Braü, 1998).

| Geotêxtil | Propriedade | Robustez do geotêxtil | | | | |
|------------------------|---|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | GRK1 | GRK2 | GRK3 | GRK4 | GRK5 |
| não tecido | Resist. punçoamento estático (kN) | = 0,5 | = 1,0 | = 1,5 | = 2,5 | = 3,5 |
| | Massa / unidade de área (g/m ²) | = 80 | = 100 | = 150 | = 250 | = 300 |
| tecido em PP e PET (*) | Resistência à tracção (kN/m) | = 20 | = 30 | = 35 | = 45 | = 50 |
| | Massa / unidade de área (g/m ²) | = 100 | = 160 | = 180 | = 220 | = 250 |
| tecido em PET (**) | Resistência à tracção (kN/m) | = 60 | = 90 | = 150 | = 180 | = 250 |
| | Massa / unidade de área (g/m ²) | = 230 | = 280 | = 320 | = 400 | = 550 |

(*) em monofilamentos ou tiras

(**) em multifilamentos; resistência à tracção na direcção transversal > 50kN/m

2.3.3.2 – Avaliação da DDI em Geossintéticos como Barreira de Fluidos

Os geossintéticos, até hoje, mais utilizados como barreira de fluidos são as geomembranas que, em geral, são finas e facilmente danificadas durante o processo de instalação e após a construção. Para esta função, qualquer perfuração ou penetração iniciada na geomembrana durante a instalação (por mínimas que sejam) podem ter repercussões extremamente nefastas, quer a curto, quer a longo prazo.

A U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1990) exige que o projecto especifique as características fundamentais da geomembrana e as práticas construtivas

adequadas para proteger o material de perfurações, erosão e outros tipos de danificação resultantes dos processos de instalação e de construção e das acções de serviço.

Em regra, utilizam-se protecções mecânicas que limitam as acções actuantes nas geomembranas resultantes dos equipamentos de construção e dos depósitos subjacentes (i.e., solos, resíduos, etc.). A experiência tem mostrado que geotêxteis (em geral, não tecidos agulhados) com massa por unidade de área superior a 270 g/m^2 protegem bem as geomembranas da eventual danificação durante a instalação e em serviço.

A selecção dos geotêxteis como elemento protector das geomembranas deve considerar (Holtz *et al.*, 1997): o tipo de geotêxtil e de filamento constituinte; o polímero constituinte, a massa por unidade de área e a espessura durante a carga; o polímero constituinte e a espessura da geomembrana. Muitas vezes, a selecção do geotêxtil envolve a realização de ensaios laboratoriais que podem ser de quantificação ou de identificação.

Nos ensaios de quantificação modela-se as condições de campo. Um exemplo de um ensaio deste tipo está normalizado através da ASTM D 5514 (Large Scale Hydrostatic Pressure Testing of Geosynthetics). Neste ensaio aplica-se ao sistema geomembrana/geotêxtil de protecção (confinado ou não por solo natural) uma pressão hidrostática, registando-se a pressão de rotura da geomembrana. A Figura 2.14 ilustra a variação da resistência de uma geomembrana em PEAD com diferentes tipos de geotêxteis de protecção, com massa por unidade de área idêntica, avaliada de acordo com o procedimento de ensaio referido.

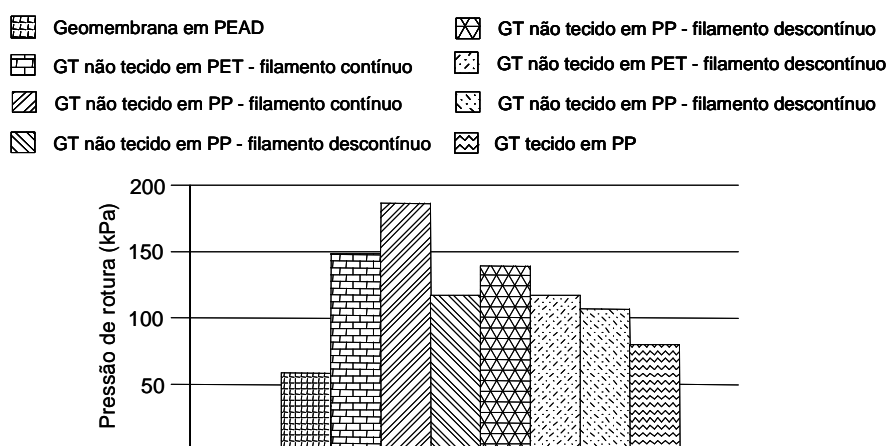


Figura 2. 14 – Resultados de ensaios ao punção hidrostático de uma geomembrana em PEAD (Holtz *et al.*, 1997).

Verifica-se que a resistência da geomembrana aumenta quando está protegida por um geotêxtil. A resistência máxima ocorre quando o geotêxtil de protecção é não tecido, em polipropileno, com filamento contínuo.

Um exemplo de um ensaio laboratorial de identificação está normalizado através da ASTM D 5494 (Determination of Pyramid Puncture Resistance of Unprotected and Protected Geomembranes). Neste ensaio é aplicada uma carga concentrada, através do vértice de uma pirâmide em aço, à geomembrana fixa entre dois anéis, registando-se a força máxima e a deformação na rotura. Os resultados do ensaio podem ser correlacionados com as condições de carga *in situ* (i. e., diâmetro do agregado, espessura da camada de compactação, equipamento de compactação, etc.) e comparados com observações de campo ou com os resultados de ensaios de laboratório de quantificação, tornando-se uma ferramenta útil para a definição de critérios de selecção e adequação dos geotêxteis e geomembranas.

A Figura 2.15 mostra resultados obtidos em ensaios de identificação do tipo referido com geomembranas em PEAD, com diferentes espessuras, protegidas com geotêxteis não tecidos agulhados, em PP, de filamento contínuo (Werner *et al.*, 1990). Verifica-se que a resistência da associação de geossintéticos aumenta com a espessura da geomembrana e com a massa por unidade de área do geotêxtil.

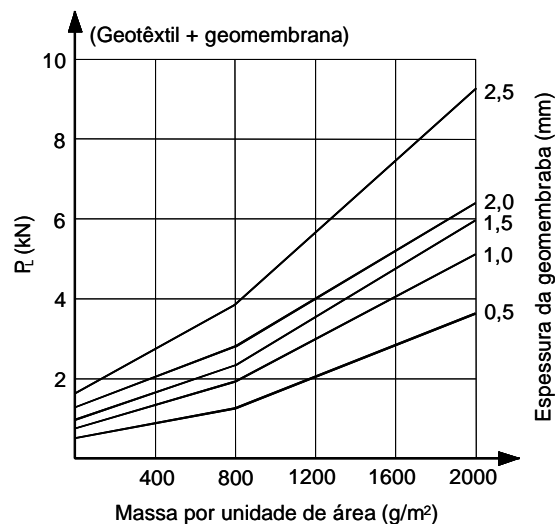


Figura 2.15 – Curvas típicas obtidas no ensaio laboratorial de identificação (Werner *et al.*, 1990).

2.3.3.3 – Avaliação da DDI em Geossintéticos como Reforço

A danificação durante a instalação dos geossintéticos pode conduzir a uma significativa perda de resistência à tracção destes materiais. Esta danificação é independente do tempo, uma vez que ocorre durante as operações de colocação e compactação do material de aterro e das operações de manuseamento e instalação dos geossintéticos.

Quando o geossintético é aplicado como reforço, para além da resistência à tracção ser uma propriedade fundamental para esta função, normalmente as condições de instalação (geossintético entre camadas de solo grosseiro) são mais severas do que nas restantes aplicações de geossintéticos (por exemplo, separação e/ou filtragem ou barreira de fluidos). Por isso, a danificação durante a instalação pode ser um factor significativo de redução da resistência à tracção dos geossintéticos em aplicações de reforço (Christopher *et al.*, 1998).

Os procedimentos de avaliação e determinação do factor de redução da resistência à tracção devido à danificação durante a instalação, são efectuados recorrendo:

- à realização de ensaios de campo de danificação durante a instalação de geossintético e posterior exumação de amostras;
- à estimativa da danificação baseadas em experiências anteriores;
- ao uso de valores por defeito;
- à modelação e simulação em laboratório das condições de instalação.

Ensaio de campo

Os ensaios de campo de danificação durante a instalação e posterior avaliação da redução da resistência dos geossintéticos, foi já tema de estudo de vários autores (Pinho Lopes *et al.*, 2001; Fox *et al.*, 1998; Bräu, 1996; Watts e Brady, 1990; Rainey e Barksdale, 1993; Sandry *et al.*, 1993; Bush e Swan, 1986; Elias, 1989).

Para a danificação em campo de amostras de geossintéticos ainda não há procedimentos normalizados. Em geral, procede-se à execução de aterros experimentais seguindo os procedimentos de construção adequados, os provetes assim danificados são removidos cuidadosamente para não induzir danificação adicional, posteriormente são ensaiados em laboratório para se avaliar a redução das suas características mecânicas de referência.

A fundação dos aterros experimentais deve ser competente, sem quaisquer tipos de lixos, raízes, materiais de grandes dimensões e/ou pontiagudos. Os buracos e depressões devem ser preenchidos de modo a que a superfície seja plana. Segue-se a colocação dos geossintéticos e do material de aterro, que é vertido e espalhado em camadas, geralmente, com 150 a 300mm de espessura. Cada camada deve ser nivelada e compactada de forma a atingir o número de passagens pretendido ou o grau de compactação definido. Finalmente, as operações de remoção do material de aterro devem ser realizadas com especial cuidado para não induzir danificações adicionais nos geossintéticos.

Os vários estudos realizados mostram que o grau de danificação nos geossintéticos depende: do tipo de geossintético; da granulometria e angulosidade do material de aterro; da espessura das camadas de aterro; dos pesos e tipos de equipamentos de espalhamento e de compactação do material de aterro.

A redução da resistência à tracção dos geossintéticos por danificação durante a instalação constatada em ensaios de campo varia de 0% a 90%. Embora não haja ainda dados suficientes que permitam correlações fiáveis entre a diminuição da resistência e as características dos geossintéticos e dos materiais de aterro, é, desde já possível afirmar que tendencialmente a danificação dos geossintéticos aumenta com o aumento das dimensão das partículas do material de aterro, com a diminuição da espessura da camada de aterro compactada e com o aumento do peso do equipamento de compactação.

Aparentemente, os parâmetros mais determinantes na danificação dos geossintéticos são o diâmetro médio das partículas de aterro (D_{50}) e a espessura do geossintético. Com efeito, segundo Christopher *et al.* (1998), os geotêxteis mais finos estão mais sujeitos à danificação durante a instalação e esta diminui substancialmente com o aumento da massa por unidade de área do geotêxtil. Assim, segundo os mesmos autores, 270 g/m^2 deve ser considerado o valor mínimo deste parâmetro para que os geotêxteis sobrevivam à danificação durante a instalação.

No caso de o geossintético ser uma geogrelha, os ensaios de campo têm mostrado que a danificação durante a instalação depende: do polímero constituinte e do processo de fabrico das geogrelhas; das espessuras da geogrelha e da camada de aterro; da distribuição e do tamanho das partículas de aterro; dos pesos e tipos de equipamentos de espalhamento e de compactação do material de aterro. Com efeito, Allen (1991), Bush e Swan (1988) e Elias (1990) verificaram, em ensaios de campo, que a danificação durante a instalação das geogrelhas aumenta com a redução da espessura e da massa por unidade de área destes materiais e que essa danificação aumenta logaritmicamente com o aumento do diâmetro médio (D_{50}) do material de aterro ($D_{50} > 25\text{mm}$, implica maior grau de danificação). Os mesmos autores constataram que espessuras de camada de aterro entre 150mm e 230 mm têm praticamente a mesma influência na variação da resistência das geogrelhas, e que o aumento de quatro para oito passagens de um compactador vibrante pesado teve apenas um efeito muito ligeiro no aumento da danificação das geogrelhas.

Coeficientes de redução

As metodologias de dimensionamento de geossintéticos recorrem a coeficientes parciais de segurança e a coeficientes de redução. O efeito da danificação durante a instalação no material é tido em conta através da aplicação de um coeficiente de redução ao valor da resistência à tracção do material intacto. Esse coeficiente de redução (FR_{DDI}) é definido pela relação entre as resistências à tracção do geossintético intacto (T_{ref}) (i. e., não danificado) e danificado (T_{dan}) (Equação 2.1) (nota: os provetes danificados e de referência devem, de preferência, pertencer ao mesmo lote e rolo).

$$FR_{DDI} = \frac{T_{ref}}{T_{dan}} \quad (2.1)$$

A selecção do coeficiente de redução apropriado impõe que as condições de instalação reais e de ensaio sejam idênticas. Porém, muitas vezes a antecipação das condições reais é difícil, podendo surgir algum grau de incerteza neste aspecto.

No caso de as condições de instalação estarem deficientemente definidas ou, mesmo, não existirem deve-se ser conservativo na selecção do coeficiente de redução devido à danificação durante a instalação. Em alternativa, pode-se optar pela realização de aterros experimentais no local da obra. Porém, nesta opção, caso a dispersão dos resultados seja grande devem ser realizados mais ensaios de campo (Christopher *et al.*, 1998).

Elias (1996), baseando-se em resultados publicados por Elias (1989), Bush e Swan (1986), Rainey e Barksdale (1993) acerca da danificação mecânica de geossintéticos com a função de reforço, propôs um método simplificado para estimar o coeficiente de redução (definido como o inverso da resistência retida) para atender a essa acção (Figura 2.16). De notar que o método proposto deve ser usado preferencialmente como verificação da informação fornecida pelo produtor do geossintético, e não para definição do coeficiente a usar no dimensionamento.

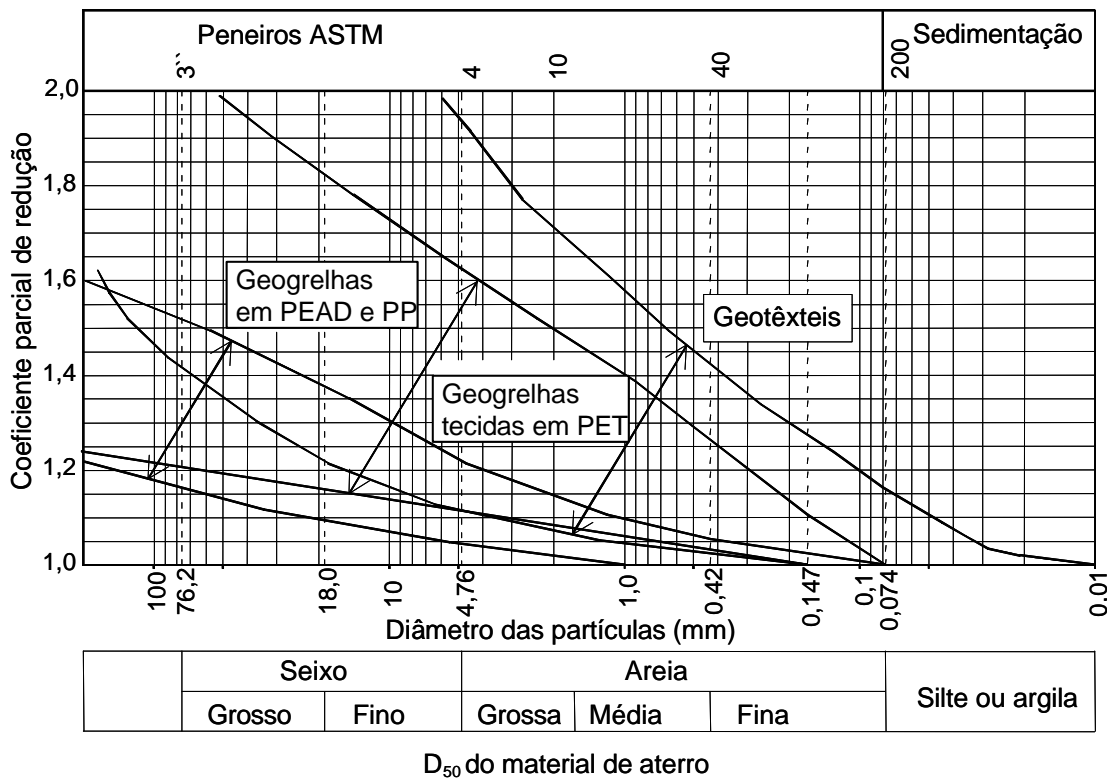


Figura 2. 16 – Danificação durante a instalação versus diâmetro médio D_{50} do material de aterro (Elias, 1996).

A figura mostra com clareza a dependência do coeficiente de redução do diâmetro médio do material de aterro e do tipo de geossintético.

Quando a perda de resistência devido à danificação durante a instalação dos geossintéticos não está definida através de ensaios a AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) sugere a adopção no projecto dos valores de coeficiente de redução indicados no Quadro 2. X. Dependendo do tipo de material, pode ser feita uma interpolação linear com base no valor do diâmetro médio (D_{50}).

O quadro mostra que os geotêxteis tecido e não tecidos exigem a adoção de coeficientes de redução maiores, assim como os materiais de aterro com diâmetro médio mais elevado.

Um estudo recente de Wayne e Barrows (1994) e Zornberg *et al.* (1995) revelou que os valores propostos no Quadro 2.X podem ser conservativos, especialmente para novos materiais. Com efeito, os autores usaram, no alargamento de uma estrada, um geotêxtil não tecido em PP, de produção recente, com 350g/m² de massa por unidade de área, e um material de aterro constituído por partículas com um diâmetro máximo de 100 mm e com 15% de passados no peneiro com dimensão de malha 0,075mm. De acordo com o Quadro 2. X, o coeficiente de redução para atender à danificação durante a instalação varia entre 1,4 e 2,5. Porém, com base em resultados de ensaios de campo em que foram seguidos os procedimentos de instalação e de construção previstos no projecto os autores registaram um coeficiente de redução de 1,1, logo uma economia de 20% a 45% em relação aos valores indicados no Quadro 2.X.

Quadro 2. X – Coeficiente de redução para atender à danificação durante a instalação (AASHTO, 1997).

| Nº | Geossintéticos | Coeficiente de redução | |
|----|--|--|---|
| | | Material de aterro tipo I Máx. dimensão 102mm D ₅₀ na ordem de 30mm | Material de aterro tipo II Máx. dimensão 20mm D ₅₀ na ordem de 0,7mm |
| 1 | Geogrelha uniaxial em PEAD | 1,20-1,45 | 1,10-1,20 |
| 2 | Geogrelha biaxial em PP | 1,20-1,45 | 1,10-1,20 |
| 3 | Geogrelha em PVC revestido com PET | 1,30-1,85 | 1,10-1,30 |
| 4 | Geogrelha em acrílico revestido com PET | 1,30-2,05 | 1,20-1,40 |
| 5 | Geotêxtil tecido (PP & PET) ⁽¹⁾ | 1,40-2,20 | 1,10-1,40 |
| 6 | Geotêxtil não tecido (PP & PET) ⁽¹⁾ | 1,40-2,50 | 1,10-1,40 |
| 7 | Geotêxtil tecido em PP (tiras) ⁽¹⁾ | 1,60-3,00 | 1,10-2,00 |

⁽¹⁾ massa por unidade de área ? 270 g/m²

Ensaio de laboratório

Embora os ensaios de campo sejam o melhor método de aferir a danificação causada ao geossintético durante a instalação têm a desvantagem de ser muito morosos e

caros. Por isso, o ideal é realizar ensaios de laboratório, aferidos por ensaios de campo, que simulem a danificação durante a instalação destes materiais (Greenwood, 1998).

Os ensaios de laboratório devem: simular as passagens dos equipamentos sobre o solo sobrejacente ao geossintético; permitir elevadas deformações relativas solo/geossintético; cargas pontuais elevadas com frequências baixas realistas; simular as ações de compactação do solo, isto é, frequências altas e deformações relativas pequenas nas áreas de carga (Bräu, 1998).

De entre os ensaios laboratoriais existentes destaca-se: o de queda de blocos e material rochoso desenvolvido, em conjunto, pela Federal Waterways Engineering (FWE) e pelo Instituto de Investigação (BAW), posteriormente modificado pela Technische Universität München (TUM); o de queda da pirâmide, desenvolvido pela Comissão Europeia de Normalização CEN/TC 189 “ Geotextiles and geotextile-related products”; o de carregamento dinâmico, desenvolvido por Bräu (1990); e o de danificação durante a instalação, desenvolvido pelo CEN/TC 189.

O equipamento desenvolvido pela FWE e pelo BAW está representado na Figura 2.17. Este ensaio simula a queda de blocos e de material rochoso sobre geotêxteis. Em termos simplificados o ensaio consiste em deixar cair de uma altura de 2 metros um pilão com 80kg de massa sobre o geossintético assente sobre areia fina. Se três provetes do material sobreviverem ao ensaio significa que o geotêxtil é adequado para a instalação em vista. Mais tarde o ensaio foi modificado pela TUM, passando a ser possível utilizar alturas de queda do pilão até 8m para possibilitar o ensaio de geotêxteis mais fortes utilizados em protecção costeira.

O ensaio de queda da pirâmide (*pyramid drop test*) (Figura 2.18) proposto pelo CEN/TC 189 pretende simular a queda de material grosseiro sobre os geossintéticos durante a construção.

Neste ensaio o geossintético está colocado sobre solo e sujeito à queda de uma pirâmide invertida na direcção do centro do provete. A profundidade de penetração da massa e a força transmitida ao geossintético e ao solo durante o impacto são registadas, sendo a última comparada com a transmitida ao solo no ensaio sem geossintético. A resistência residual do geossintético danificado é, posteriormente, definida através do ensaio de punçamento estático.

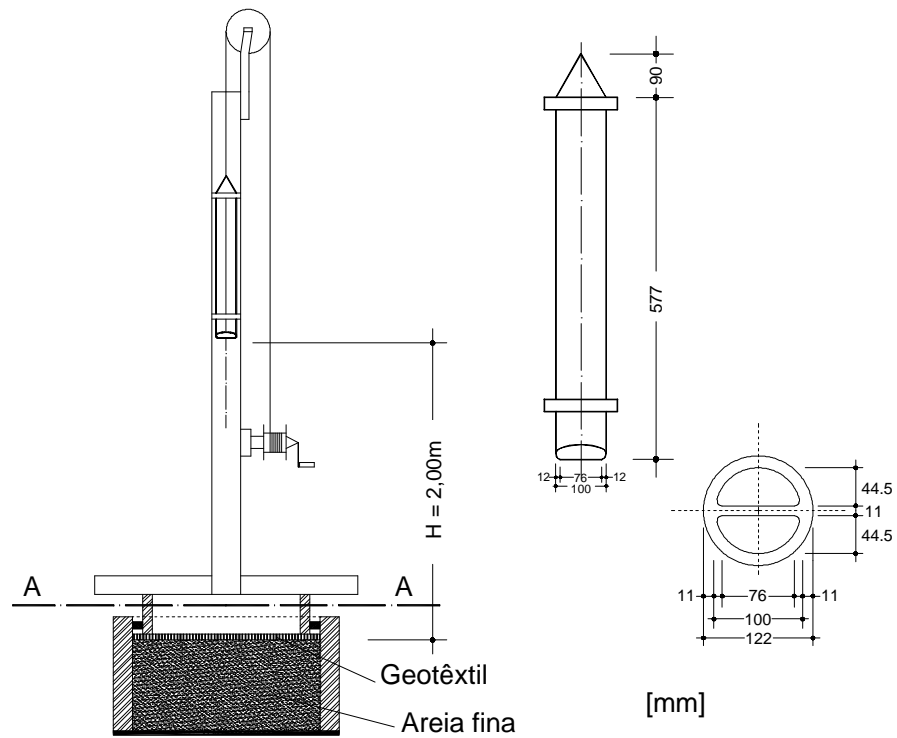


Figura 2. 17 – Ensaio laboratorial para simulação de quedas de blocos e de material rochoso (FWE e BAW).

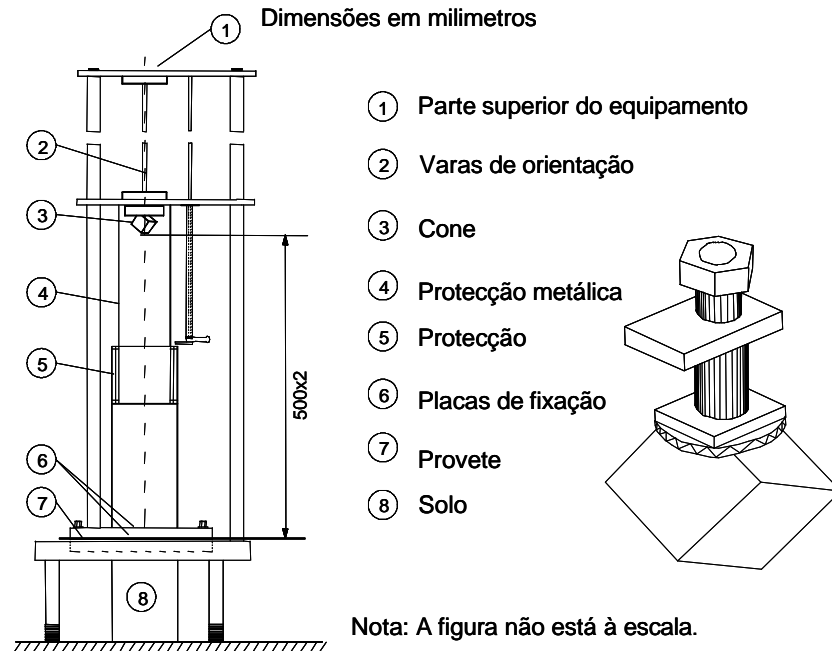


Figura 2. 18 – Ensaio laboratorial: queda da pirâmide (CEN/TC189).

Bräu, 1990 desenvolveu um equipamento de ensaio para simular a danificação induzida pelo tráfego de equipamentos de construção (ex. caminhões) no sistema solo-geossintético (Figura 2.19).

O equipamento é constituído por uma estrutura (com cerca de 2,5m x 3,2m) onde é fixo o provete de geossintético. Por cima e por baixo do geossintético são colocadas duas caixas com solo (com 70cm x 70cm x 30cm) com posição ajustável de acordo com a espessura do geossintético. O solo que preenche totalmente a caixa inferior é, normalmente, do tipo silte, sendo o da caixa superior material granítico ou cascalho com dimensão máxima de 32mm. Nesta caixa a altura de solo varia de 10 a 15cm.

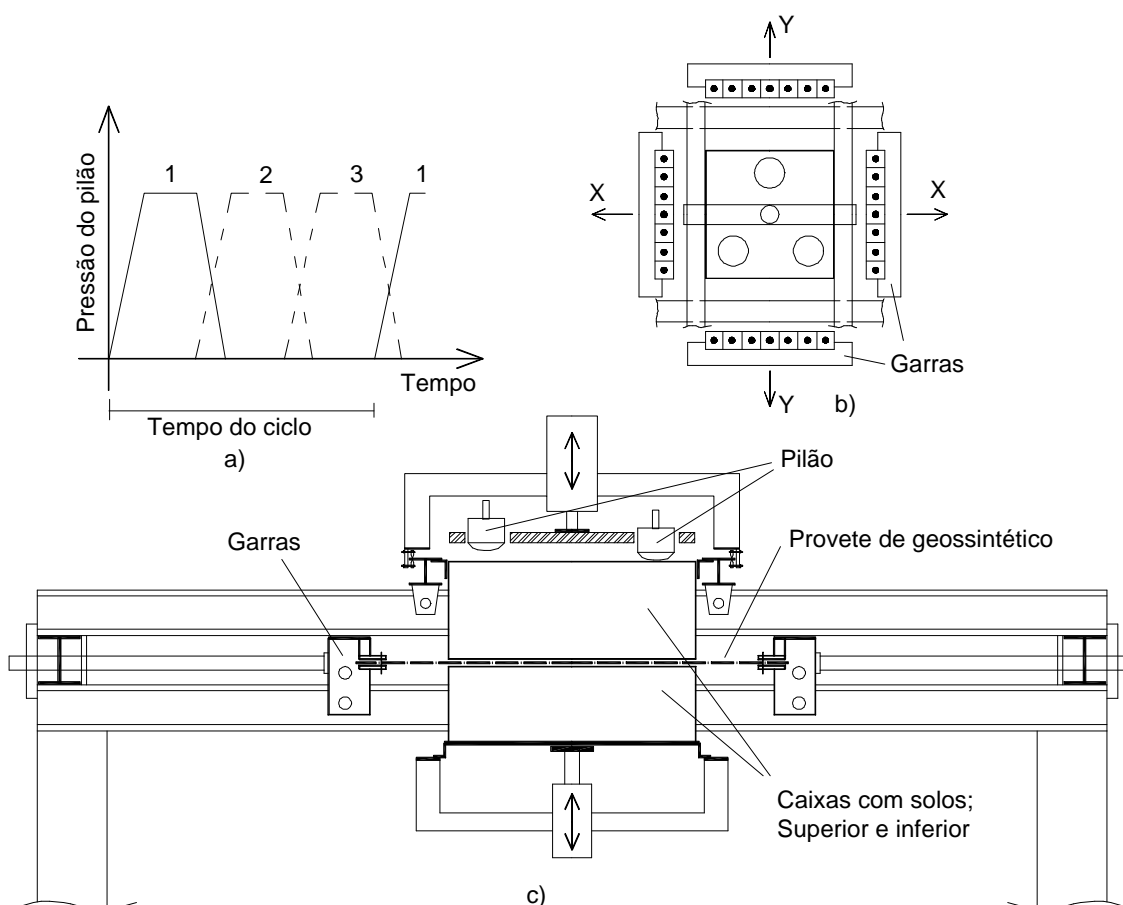


Figura 2. 19 – Ensaio de carregamento dinâmico do sistema solo-geossintético (Bräu, 1990).

Começa-se por aplicar uma pré-carga estática de 40kN/m^2 na placa rígida engrenada à caixa superior. De seguida, sobre esta placa são colocadas três placas circulares com 15cm de diâmetro através das quais são feitos carregamentos cíclicos com

variações no tempo (Figura 2.19a) de modo a simular com realismo a danificação induzida no sistema solo-geossintético pela acção progressiva dos pneus de equipamentos de construção.

Normalmente o carregamento cíclico é feito durante 30 segundos. O número de ciclos é na ordem dos 100 a 1000 para solos brandos, no entanto pode ser superior a 20000 para outros sistemas (mais firmes).

Após o ensaio, é feita a observação visual da danificação do geossintético e avaliadas as deformações plásticas do material; são também registados os rasgos e as perfurações iniciadas durante o ensaio. Finalmente, os geossintéticos são ensaiados à tracção-deformação e/ou outros ensaios de identificação para quantificação das alterações provocadas pelo ensaio.

O actual ensaio Europeu de danificação durante a instalação de geossintéticos procura simular, fundamentalmente, a solicitação de tráfego e de compactação do sistema solo-geossintético. Este ensaio foi desenvolvido pela Comissão Europeia de Normalização CEN/TC 189 “Geotextiles and geotextile-related products” em colaboração com a Comissão técnica ISO/TC 38 “Textiles”. Os procedimentos e condições de ensaio estão transcritos na ENV ISO 10722-1 (Geotextiles and geotextile-related products – Procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular materials).

Neste ensaio, o geossintético é colocado entre duas camadas de um agregado sintético, com dimensões entre 5 mm e 10 mm. Em seguida, é submetido a 200 cargas cíclicas com 1 Hz de frequência e à pressão de 5 a 900 kPa. Após a carga dinâmica o geossintético é examinado visualmente e submetido a um ensaio mecânico ou hidráulico, para quantificar as alterações nas propriedades mecânicas ou hidráulicas resultantes da danificação. A adopção deste ensaio em países membros do CEN, como é o caso de Portugal, é obrigatória. Por isso, foi este o ensaio adoptado na parte experimental deste trabalho.

Matoren Khay *et al.* (1998) realizaram um estudo paramétrico para avaliação da influência da pressão e do número de ciclos na danificação dos geossintéticos simulada de acordo com a ENV ISO 10722 – 1. No estudo utilizaram três geotêxteis, dois não tecidos e um tecido, aplicaram pressões de 200, 500 e 900 kPa e 50, 100 e 200 ciclos. No Quadro 2. XI apresenta-se o programa de ensaios e nas Figuras 2.20 e 2.21 os resultados obtidos.

O estudo permite concluir que: a danificação induzida em laboratório aos geotêxteis provoca uma diminuição da sua resistência à tracção variável entre 0% e 50%;

a pressão cíclica tem mais influência no grau de danificação induzida do que o número de ciclos; os geotêxteis não tecidos agulhados são os mais sensíveis à danificação.

Quadro 2. XI – Programa de ensaios (adaptado de M. Khay *et al.*, 1998).

| Geotêxtil | Massa por unidade de área (g/m ²) | Parâmetros de ensaio | | |
|--------------------|---|----------------------|------------|-------------------|
| | | 5/200 kPa | 5/500 kPa | 5/900 kPa |
| GTnt1 (não tecido) | 300 | 100 Ciclos | 100 Ciclos | 50-100-200 Ciclos |
| GTnt2 (não tecido) | 260 | 100 Ciclos | 100 Ciclos | 50-100-200 Ciclos |
| GTt1 (tecido) | 500 | 100 Ciclos | 100 Ciclos | 50-100-200 Ciclos |

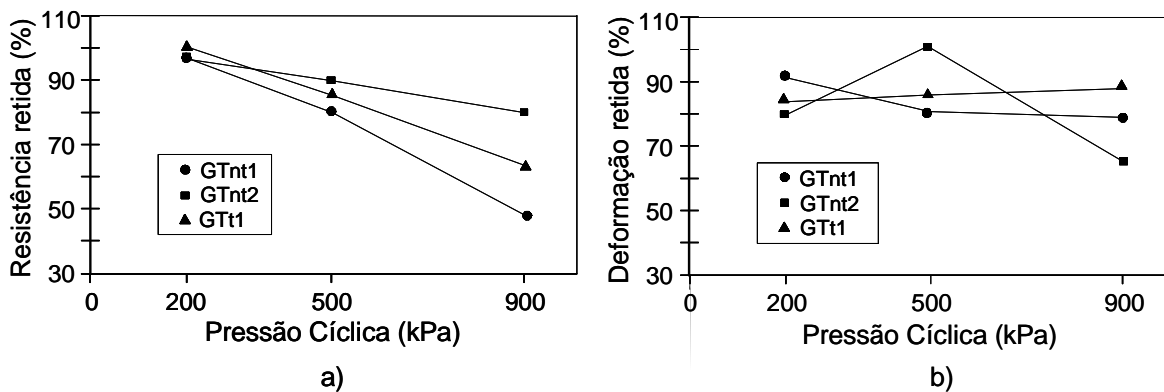


Figura 2. 20 – Influência da pressão cíclica (para 100 ciclos): **a)** resistência retida; **b)** deformação retida (M Khay *et al.*, 1998).

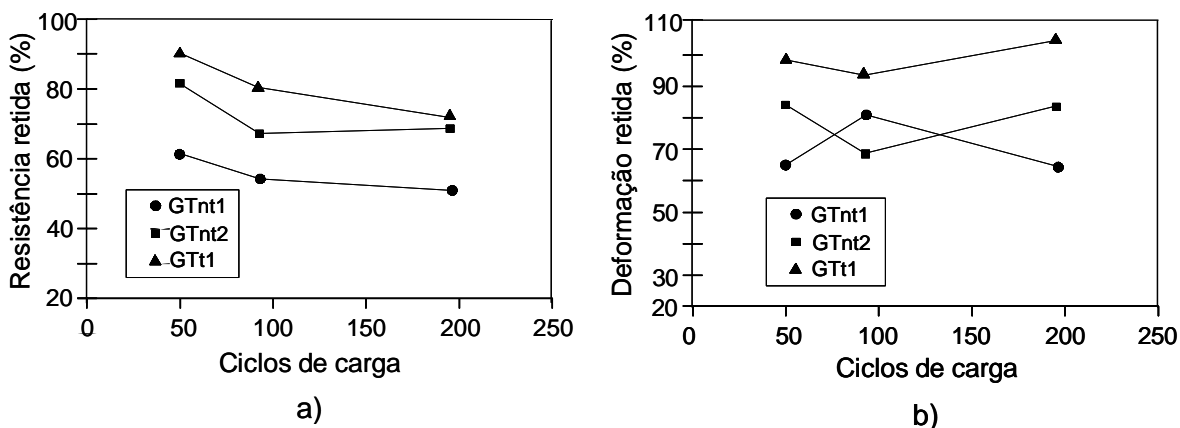


Figura 2. 21 – Influência do número de ciclos para a pressão máxima de 900kPa: **a)** resistência retida; **b)** Deformação retida (M Khay *et al.*, 1998).

2.3.4 – Nota Final

Existem vários métodos para selecção de geossintéticos suficientemente robustos para sobreviver às condições locais da construção. No entanto, há uma necessidade sistemática de aferição desses métodos com resultados obtidos em obra.

Para geossintéticos com função de reforço, é prática corrente aplicar um coeficiente parcial de segurança, definido com base em experiência de obra, às propriedades mecânicas do material, nomeadamente à resistência à tracção.

No entanto, não existe ainda aceite universalmente um método laboratorial para avaliar a influência da danificação durante a instalação nas propriedades dos geossintéticos, surgindo como da máxima importância o desenvolvimento de investigação nesse sentido.

2.4 – A GARANTIA DA DURABILIDADE

2.4.1 – Introdução

Os projectos de engenharia que incluem geossintéticos como materiais a utilizar têm de assegurar a estabilidade ao longo da sua vida útil. No entanto, dada a falta de experiência no cálculo das propriedades a longo-prazo dos geossintéticos é corrente fazer previsões desses valores com base em informação para períodos curtos ou obtidas em condições mais severas do que as esperadas, ou aceleradas. Na maioria das aplicações de geossintéticos é suficiente definir um nível de durabilidade mínimo, daí que, as Comissões de Normalização de ambos os lados do Atlântico tenham entendido como premente definir ensaios práticos que possam garantir esse mínimo de durabilidade.

É de realçar que caso os geossintéticos exerçam a função de reforço é necessário realizar cálculos adicionais, nomeadamente, de avaliação da alteração da resistência à tracção resultante, não só da danificação durante a instalação, mas também de outros

agentes de danificação, seguida da definição do(s) coeficiente(s) de segurança parcial(ais) a adoptar no dimensionamento.

2.4.2 – Aplicações onde a Função de Reforço não é Exigida

Para as aplicações dos geossintéticos onde não é exigida a função de reforço a estes materiais o CEN/TC189 – WG5 (durabilidade) desenvolveu o Guia de Durabilidade de Geossintéticos (documento CR ISO 13434 “Guide to Durability of Geotextiles and Geotextile-Related Products”). Neste guia estão indicados os ensaios e os procedimentos e condições a verificar para que um nível de durabilidade mínimo dos geossintéticos seja assegurado.

O guia pressupõe como condições de normais de serviço para a maioria das aplicações de geossintéticos (excepto reforço): tempo de vida útil < 25 anos; $4 < \text{pH} < 9$; temperaturas no solo < 25°C; solo natural (exclui aterros sanitários e solos contaminados).

Caso o geossintético tenha uma vida útil prevista inferior a 5 anos (embora a estrutura em que está inserido possa ter um tempo útil mais longo) os ensaios a realizar são o de danificação durante a instalação e o de avaliação da resistência aos agentes atmosféricos. Quando o tempo de vida útil do geossintético coincide com o da estrutura, isto é, 25 anos, para além dos ensaios referidos é necessário realizar outros, nomeadamente: o de resistência à hidrólise, no caso do polímero constituinte ser um poliéster, e o de resistência à oxidação, no caso do polímero constituinte ser polipropileno ou polietileno. Para os polímeros constituintes referidos não é necessário realizar ensaios de resistência biológica. Porém, este ensaio torna-se obrigatório no caso de produtos novos, por exemplo à base de vegetais, geocompósitos e outros materiais de qualidade menos conhecida.

2.4.3 – Aplicações onde a Função de Reforço é Exigida

A aplicação de geossintéticos no reforço de solos não é abordado com detalhe no Guia de Durabilidade.

A maioria dos métodos/códigos Europeus e não Europeus de dimensionamento de sistemas de solo reforçado com geossintéticos recorre à aplicação de coeficientes parciais de segurança (ou de coeficientes de redução) à resistência de projecto do geossintético. Normalmente, o tempo de vida útil destes sistemas é longa, entre os 50 a 120 anos, por

isso o valor do coeficiente de redução deve considerar a redução da resistência a longo prazo do material (ou seja, no fim da vida útil da obra).

Na maioria dos casos, o valor de cálculo da resistência do geossintético é determinado através da seguinte expressão:

$$F_{Bi,d} = \frac{F_{Bi,k}}{\gamma_B} \quad (2.2)$$

onde:

- $F_{Bi,d}$ é o valor de cálculo da resistência a longo prazo do geossintético;
- $F_{Bi,k}$ é o valor característico da resistência a longo prazo;
- γ_B é o coeficiente de segurança parcial.

Por sua vez, o valor característico é determinado usando a equação:

$$F_{Bi,k} = \frac{F_{Bi,k,0}}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4} \quad (2.3)$$

onde:

- $F_{Bi,k,0}$ é o valor característico da resistência a curto prazo;
- A_1 é o coeficiente de redução para a rotura e rotura em fluência;
- A_2 é o coeficiente de redução para a danificação durante a instalação;
- A_3 é o coeficiente de redução para manuseamento em obra;
- A_4 é o coeficiente de redução para agentes ambientais (químicos, UV, etc.).

Geralmente o coeficiente de redução para a fluência e rotura em fluência é dado por:

$$A_1 = \frac{F_{Bi,k,0}}{F_{Bi,k,1}} \quad (2.4)$$

onde $F_{Bi,k,1}$ é a carga permanente de serviço.

A determinação do coeficiente de redução para atender à danificação durante a instalação (FR_{DDI}) e é definido como:

$$A_2 \approx FR_{DDI} \approx \frac{T_{ref}}{T_{dan}} \quad (2.5)$$

onde:

- F_{ref} é a resistência de referência a curto prazo do material (não submetido às condições de instalação)

- F_{dan} é a resistência a curto prazo do material danificado.

Pinho-Lopes *et al.* (2000), Lopes e Pinho-Lopes (2001), Pinho-Lopes e Lopes (2001) e Pinho-Lopes *et al.* (2002) têm vindo a estudar o efeito da danificação durante a instalação no comportamento mecânico a longo prazo dos geossintéticos. Os geossintéticos considerados são uma geogrelha tecida em PET (55 kN/m) e um geotêxtil tecido em PP (65kN/m). Estes materiais foram primeiramente danificados em laboratório, de acordo com a ENV ISO 10722-1, e de seguida ensaiados à rotura em fluência.

As Figuras 2.22 e 2.23 representam as curvas de rotura em fluência até às 100 horas, respectivamente, da geogrelha e do geotêxtil. Das figuras ressalta que as curvas correspondentes às amostras intactas e às amostras danificadas tendem a aproximar-se, devendo encontrar-se, em teoria, ao fim de 10^6 horas.

Com base nos resultados obtidos com os geossintéticos intactos os autores determinaram o coeficiente de redução A_1 :

$$A_1 \approx \frac{F_{1,0}}{F_{30,0}} \quad (2.6)$$

em que:

- $F_{1,0}$ é a resistência à tracção após 1 minuto, amostra intacta;

- $F_{30,0}$ é a resistência à tracção após 30 anos, amostra intacta.

O valor da resistência à tracção após 1 minuto corresponde de forma aproximada ao valor máximo da resistência à tracção. Por razões técnicas associadas ao ensaio, este valor é ligeiramente inferior ao da resistência máxima à tracção determinada de acordo com a EN ISO 10319.

Por sua vez, com os resultados obtidos com as amostras danificadas foi possível determinar o coeficiente de redução para a danificação durante a instalação, $A_{2,EN}$ (de acordo com a ENV 10722-1):

$$A_{2,EN} = \frac{F_{1,0}}{F_{1,da}} \quad (2.7)$$

Sendo $F_{1,da}$ a resistência à tracção após 1 minuto, amostra danificada.

Utilizando o procedimento tradicional, o valor previsto para a resistência à tracção, após 30 anos, da amostra danificada, $F_{30,EN}$, pode ser definido recorrendo à equação:

$$F_{30,EN} = A_{2,EN} \cdot F_{30,0} \quad (2.8)$$

Finalmente, foi definido um factor de redução conjunto para a fluência, rotura em fluência e danificação durante a instalação ($A_{1,2 \text{ tradicional}}$), representado nas Figuras 2.22 e 2.23.

$$A_{1,2 \text{ tradicional}} = A_1 \cdot A_{2,EN} \quad (2.9)$$

Com base nos resultados do estudo os autores propuseram uma nova abordagem para avaliação da resistência à tracção a longo prazo das amostras danificadas, $F_{30,da}$, a qual deve ser feita directamente a partir dos resultados dos ensaios e inclui o coeficiente de redução para a danificação durante a instalação e para a fluência e rotura em fluência. Foi proposto então um novo coeficiente de redução conjunto para estes dois fenómenos, $A_{1,2 \text{ proposto}}$ (indicado nas Figuras 2.22 e 2.23). Esta proposta evidencia uma clara economia, quando comparada com a abordagem tradicional.

2.4.4 – Nota Final

O documento de durabilidade CR ISO 13434 (Guide to Durability of Geotextiles and Geotextile-Related Products), é um guia a utilizar pelos Engenheiros Civis em projecto de geossintéticos. No entanto, a definição dos coeficientes de segurança a usar no dimensionamento de sistemas de solo reforçado com geossintéticos exige uma abordagem mais detalhada, em particular no que se refere ao efeito da danificação durante instalação no comportamento mecânico a longo prazo destes reforços.

A definição das condições de serviço inclui os tipos de solo, as temperaturas, as cargas esperadas e a vida útil da obra. Para que a definição dos coeficientes parciais de segurança seja fiável é determinante que nos ensaios, em particular nos de fluência e rotura em fluência, a escala de cargas, as temperaturas e os tempos tenham correspondência com os valores de serviço.

CAPÍTULO 3

INDUÇÃO DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO ENSAIO LABORATORIAL

3.1 – ESCOLHA DO MÉTODO USADO

Tal como se referiu, a danificação durante a instalação (DDI) de geossintéticos é um dos factores de redução de resistência mais significativos e decorre, essencialmente, das operações de colocação e compactação do material de aterro junto aos geossintéticos e das operações de manuseamento destes.

Dado que se trata de um fenómeno resultante, fundamentalmente, das operações em obra, a danificação durante a instalação de geossintéticos pode ser estudada recorrendo a ensaios de campo e ensaios laboratoriais de simulação dessa mesma danificação.

No estudo laboratorial da danificação dos geossintéticos durante a instalação, o material é colocado entre duas camadas de solo granular compactado. A danificação é avaliada através da perda de resistência à tracção, ou outro parâmetro de referência, e por inspecção visual da estrutura do geossintético. Em seguida, o material danificado é ensaiado à tracção de modo a registar a sua resistência residual. No entanto, como já foi dito, outros ensaios podem ser utilizados como ensaios de referência para avaliar a danificação causada.

Neste trabalho decidiu-se dar especial atenção à avaliação da danificação de geossintéticos simulada em laboratório. Para o efeito o Laboratório de Geossintéticos da FEUP desenvolveu um projecto e mandou construir um equipamento para a simulação da danificação de geossintéticos, cuja descrição será feita na secção 3.3 deste capítulo.

No equipamento desenvolvido foram danificados diferentes tipos de geossintéticos envolvidos por diferentes tipos de solos, avaliando-se, posteriormente a resistência à tracção residual dos diferentes materiais danificados. O estudo efectuado constitui a parte experimental deste trabalho, através do qual se pretende conhecer o grau de danificação do material e a influência nesta de factores, tais como as características dos solos; e o tipo e a estrutura do geossintético.

3.2 – PROCESSO DE SIMULAÇÃO DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO. REFERÊNCIA NORMATIVA

Os procedimentos de simulação da danificação durante a instalação encontram-se descritos na EN ISO 10722-1 (Geotextiles and geotextile-related products – Procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular material), a qual foi preparada pela Comissão Europeia de Normalização CEN/TC 189 “Geotextiles and geotextile-related products”, em colaboração com Comissão Técnica ISO/TC 38 “Textiles”. De seguida referem-se alguns dos aspectos mais relevantes relativos a esse procedimento de ensaio.

Nesse documento são apresentadas as seguintes definições:

- ? Ensaio de referência – ensaio para determinar uma propriedade em particular do geossintético a ser danificado durante o ensaio;
- ? Índice de danificação – variação, em percentagem, da propriedade usada para avaliar a danificação provocada durante o ensaio.

Os princípios de procedimento descritos na norma (relativos ao ensaio de identificação e controlo de qualidade), consistem, em colocar um provete de geossintético entre duas camadas de um agregado sintético e submetido a uma carga dinâmica durante um determinado intervalo de tempo. O provete de geossintético é então retirado do equipamento de ensaio, posteriormente é examinado para que se detecte a danificação visível, e finalmente é submetido a um ensaio mecânico ou hidráulico, para se avaliarem

as alterações nas propriedades mecânicas ou hidráulicas, respectivamente. O resultado é expresso em termos da variação, em percentagem, da propriedade de referência, devendo ser também incluídas no relatório do ensaio a danificação visual observada.

Devem ser preparadas seis amostras de geossintético com 1,0m de comprimento por 0,5m de largura (cortados de acordo com o especificado na Norma Europeia EN 963), cada amostra é depois cortada em duas com 1,0m de comprimento e 0,25 de largura. Uma delas é depois utilizado no processo de danificação laboratorial, a outra é utilizada no ensaio de referência.

Os ensaios à tracção dos provetes devem ser realizados de acordo com a Norma EN ISO 10319. Quando outro ensaio de referência é usado, devem ser seguidos os procedimentos de ensaio definidos pelas normas em vigor.

Os provetes a ensaiar devem ser acondicionados e os ensaios devem ser conduzidos nas condições definidas na norma ISO 554 (para geotêxteis e produtos relacionados $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade relativa).

O equipamento utilizado na realização dos ensaios de danificação é constituído:

- ? Mecanismo de aplicação da carga – deve ser tal que se possa controlar o processo sinusoidal da pressão aplicada na placa de carregamento entre os $900\pm 10\text{kPa}$ e $5\pm 5\text{kPa}$, com uma frequência de 1Hz.

- ? Caixa de danificação – que contém o agregado sintético e o geossintético a danificar, deve ser uma caixa rígida de metal, fabricada em aço inoxidável, com dimensões internas mínimas de 300mm por 300mm. A caixa é constituída por duas partes com uma altura de 75mm cada, o que conduz a uma altura total da caixa de 150 mm. As duas partes que constituem a caixa são fixas por encaixe e por aplicação da carga. A caixa deve ser colocada sobre uma base rígida. A Figura 3. 1 representa esquematicamente o equipamento.

- ? Placa de carregamento – deve ter dimensões de 100mmx200mm. A placa deve ser construída em aço ou alumínio e deverá ser suficientemente rígida de modo a que na transmissão da força ao agregado não sofra flexão.

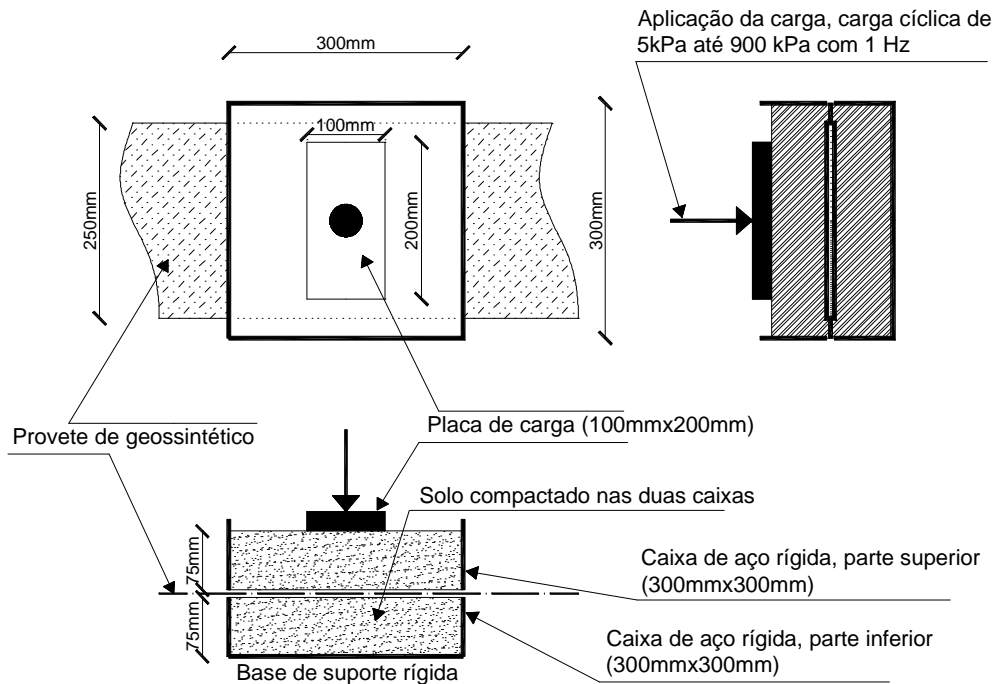


Figura 3. 1 – Representação esquemática da caixa de danificação.

? Material granular – o material granular utilizado para confinar a amostra de geossintético e para proceder à sua danificação deverá ser um agregado sintético. Trata-se de um óxido de alumínio que deverá cumprir os seguintes requisitos:

1. Granulometria – quando ensaiado de acordo com a prEN 933-1, 100% do material deverá passar no peneiro de 10mm e 0% deverá passar através do peneiro de 5mm de abertura;
2. Dureza – quando ensaiado de acordo com prEN 1097-2 o agregado deverá ter uma resistência à abrasão Los Angeles não inferior a 1,9.
3. Utilização – antes da utilização, o material deve ser passado através de um peneiro com abertura de malha de 5mm. Todo o material passado deve ser então eliminado. Além disso o material granular deve ser peneirado no mesmo peneiro após 10 utilizações e posto de parte após 20 utilizações.

O procedimento do ensaio descrito na norma consiste no seguinte: a parte inferior da caixa é cheia com um agregado sintético, colocando-se duas camadas de igual altura as quais perfazem uma altura total de 75mm. Cada uma dessas camadas é compactada com uma placa colocada sobre toda a área da caixa e onde é aplicada uma tensão de

200±2kPa durante 60 segundos. O topo da segunda camada de material granular deve estar ao nível do topo da parte inferior da caixa.

A parte superior da caixa é colocada sobre a parte inferior e fixa por encaixe.

O provete é colocado atravessando a meia altura da caixa, ou seja, no topo da parte inferior, ver Figura 3. 1, estando o centro do provete alinhado com o centro da caixa. As extremidades livres do provete, no exterior da caixa, são enroladas para que não sofram danificação durante o ensaio.

A parte superior da caixa é então cheia com o agregado solto, até 75mm de altura, o que corresponde ao topo da caixa.

A placa de carga é, então posicionada no centro da caixa e é-lhe aplicada uma carga de 5±5kPa. O carregamento é feito aplicando uma carga cíclica triangular entre 5±5kPa a 900±10kPa com frequência de 1Hz, durante 200 ciclos, ver Figura 3. 2. É de notar, tal como é frisado na norma europeia, que a tensão a aplicar é determinada usando a área da placa de carga e não a área total da caixa.

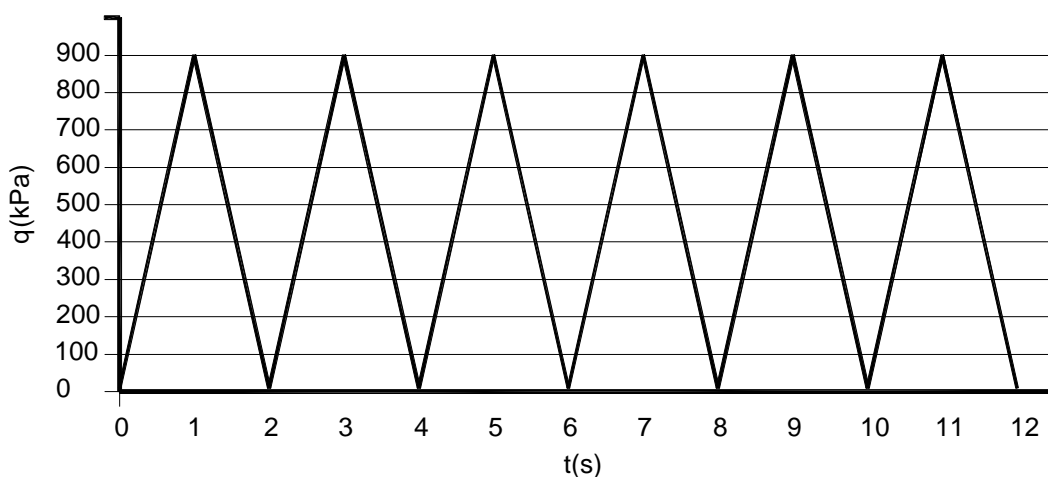


Figura 3. 2 – Carregamento aplicado, de acordo com a ENV ISO 10722-1.

No fim do ensaio o provete é retirado da caixa cuidadosamente, assegurando que não ocorra danificação adicional durante estas operações.

3.3 – EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

O equipamento para simulação da danificação durante a instalação de geossintéticos em laboratório desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ver Figura 3. 3, teve como base as orientações contidas na ENV ISO 10722-1.



Figura 3. 3 – Vista geral do equipamento de danificação de geossintéticos.

Como referido em 3.2 o equipamento desenvolvido consta nas seguintes unidades:

- ? Estrutura de aplicação das cargas (Mecanismo de aplicação das cargas)
- ? Caixa de danificação
- ? Placa de carregamento

A estrutura de aplicação das cargas (ver Figura 3. 4) permite a aplicação de um conjunto de ciclos de carga (programáveis), entre uma carga mínima (pré-definida) e uma carga máxima programável. O tempo de ciclo pode ser ajustável, pelo utilizador, sendo no entanto afectado pelas características de rigidez da amostra.

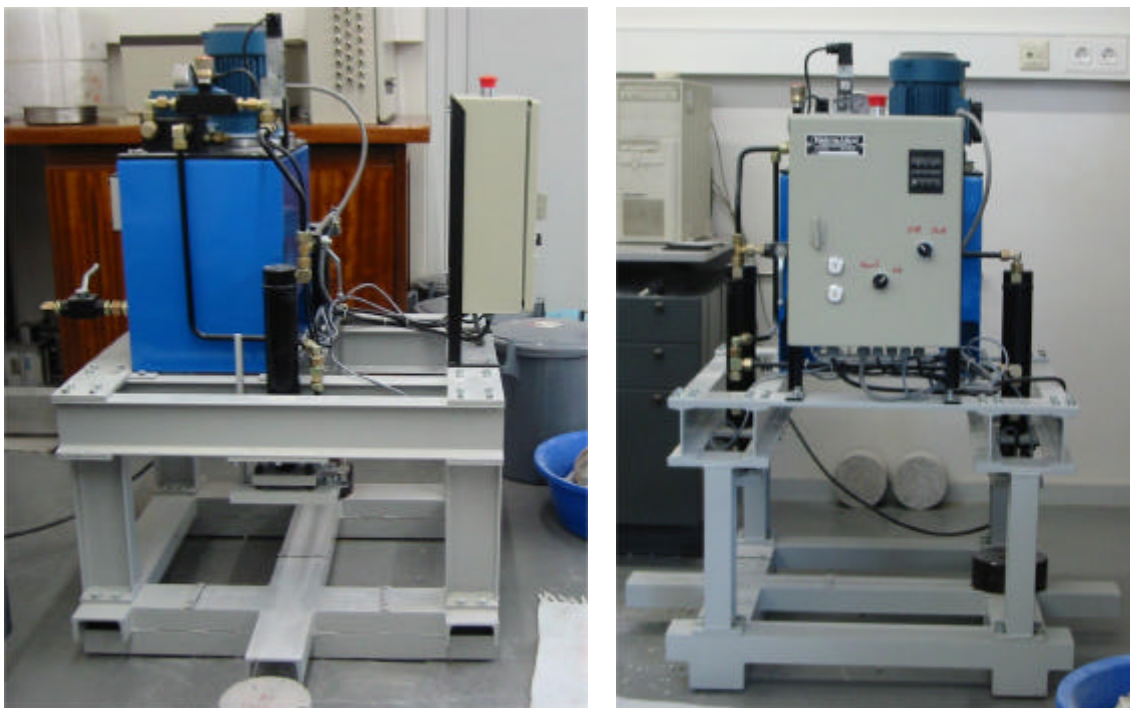
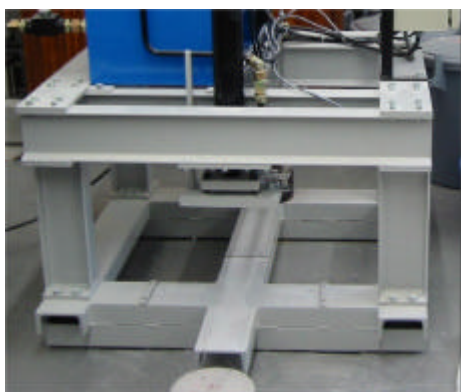


Figura 3. 4 – Vista geral da estrutura de aplicação das cargas.

Em traços gerais, a solução implementada é constituída por:

- ? Uma estrutura metálica para suporte do conjunto (Figura 3. 5a);
- ? Dois actuadores hidráulicos, para realização da acção de compressão cíclica.(Figura 3. 5b);
- ? Uma unidade energética óleo-hidráulica comandada por meios eléctricos (Figura 3. 5c);
- ? Um quadro eléctrico para comando de todo o sistema (Figura 3. 5d).



a)



b)



d)



c)

Figura 3. 5 – Constituição da estrutura de aplicação de cargas: **a)** estrutura em perfil UNP INP; **b)** actuadores hidráulicos; **c)** unidade energética; **d)** quadro eléctrico.

O equipamento possui uma válvula de isolamento, que permite colocar um, ou os dois, actuadores em funcionamento. Se a alavanca estiver na horizontal encontram-se os dois actuadores em funcionamento. Se a alavanca estiver vertical, somente o actuador do lado esquerdo está em funcionamento, ver Figura 3. 6.

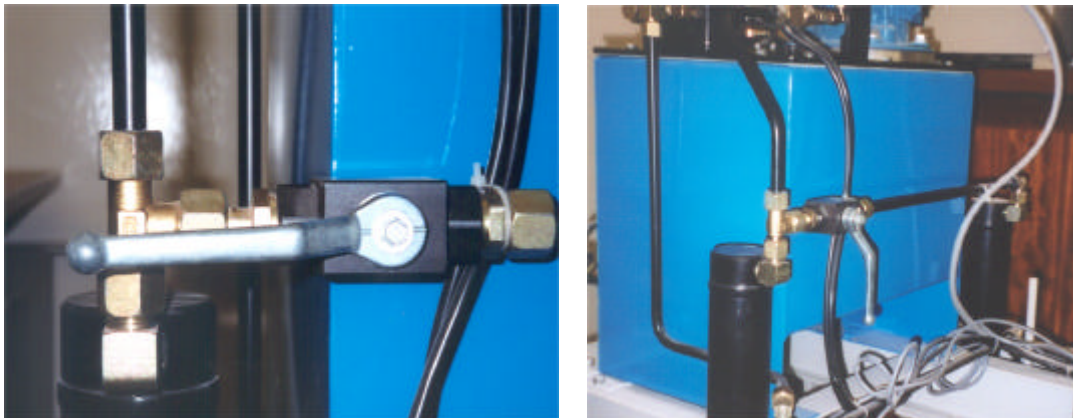


Figura 3. 6 – Válvula de isolamento.

Existe também uma válvula de comando da cadência, Figura 3. 7, para aumentar ou diminuir a cadência de funcionamento da máquina, de modo a controlar a velocidade de aplicação das cargas.

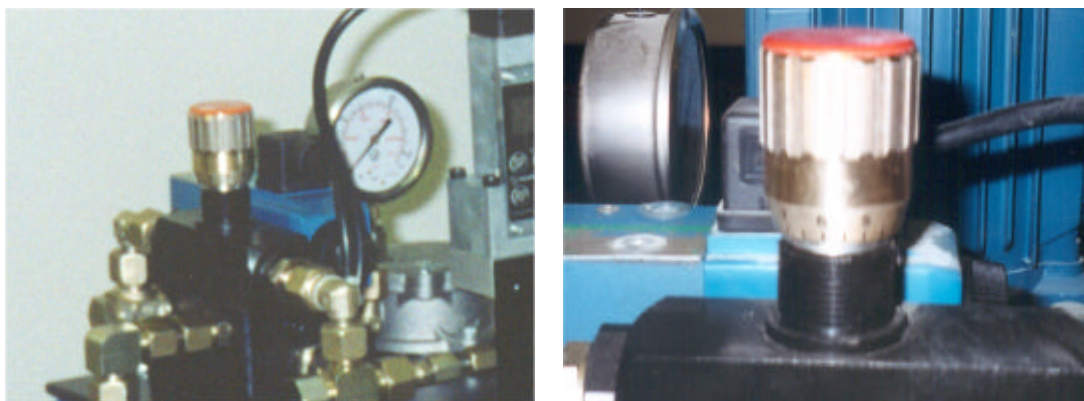


Figura 3. 7 – Válvula de comando da cadência.

O equipamento de ensaio tem dois modos de funcionamento, o manual e o automático. O número de ciclos a realizar é definido através do contador numérico existente no quadro eléctrico, ver Figura 3. 8.

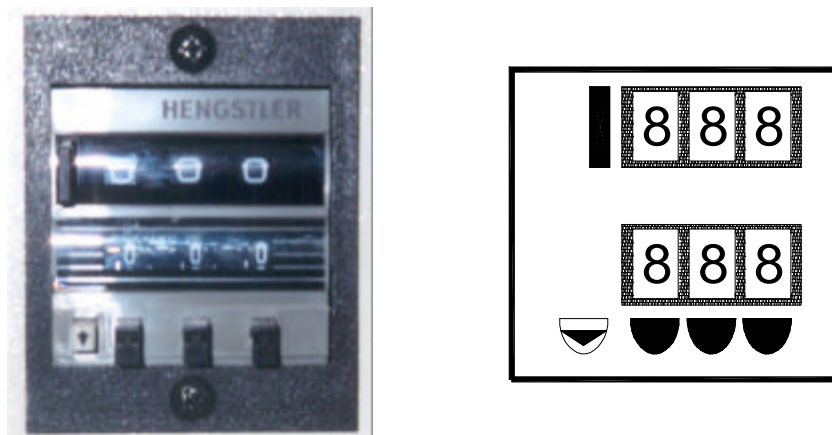


Figura 3. 8 – Contador numérico dos ciclos de carga-descarga.

O controlo e a definição da carga máxima do ensaio são efectuados a partir do dispositivo ilustrado na Figura 3. 9, um pressostato digital.

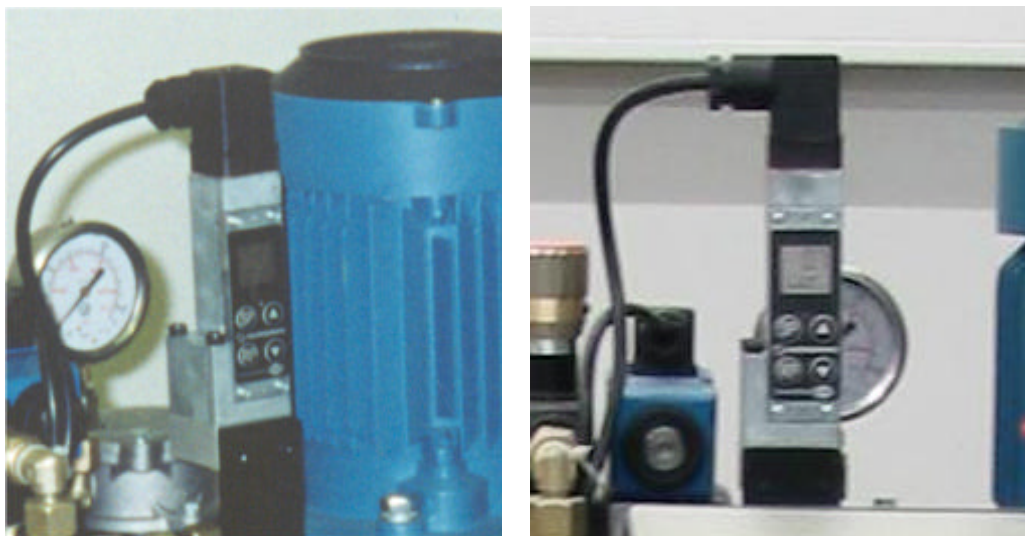


Figura 3. 9 – Pressostato digital.

A carga mínima dos actuadores é constante (pré definido pelo equipamento). Aquando da realização do ensaio a obtenção da carga mínima é detectada pelos sensores de proximidade instalados no prato de actuação associado a cada actuador (Figura 3. 10).

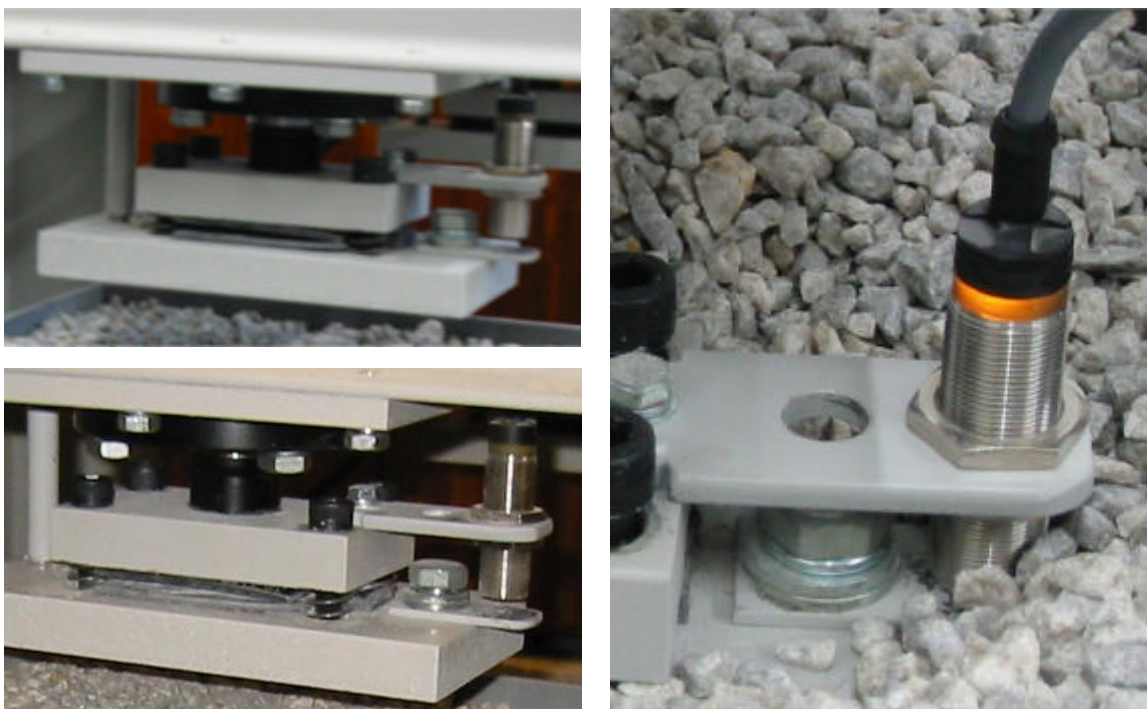


Figura 3. 10 – Sensores de proximidade.

A placa de carregamento fabricada em aço, ver Figura 3. 11, tem dimensões de 100mmx200mm, como referido na norma, e uma espessura de 15mm. A espessura adoptada foi definida de forma a não sofrer deformação por aplicação das cargas de ensaio. A placa de carregamento está situada na extremidade inferior dos actuadores hidráulicos, uma vez que os mesmos provocam o carregamento na caixa de danificação onde está inserido o geossintético.

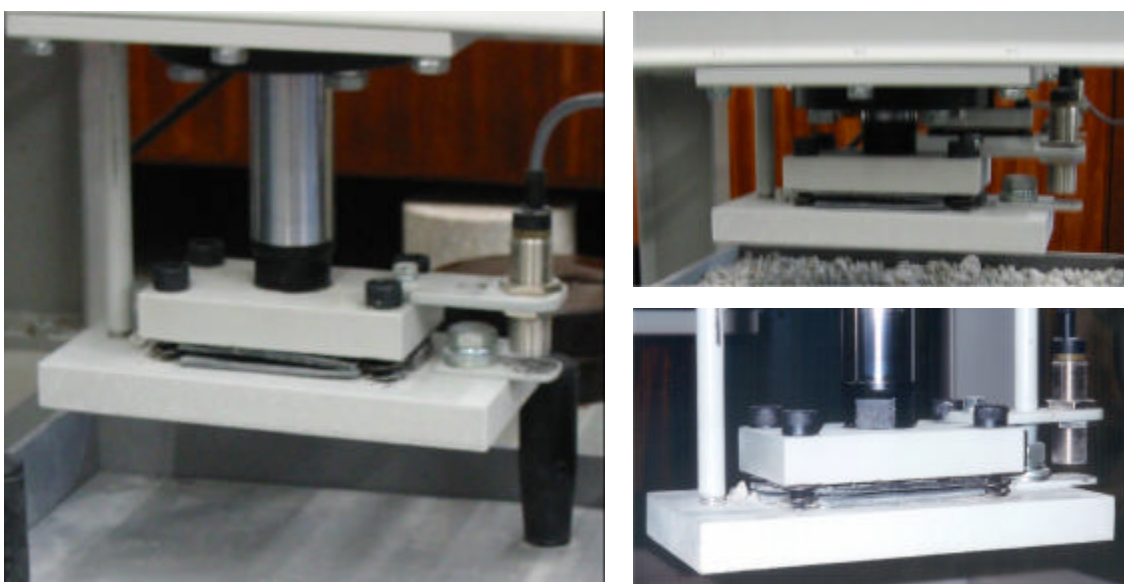


Figura 3. 11 – Placa de carregamento.

A caixa de danificação, que contém o agregado sintético e o geossintético a danificar, tal como referido no Capítulo 3.2, foi realizada com placas de aço com 5mm de espessura e é constituída por duas partes. As dimensões interiores de cada uma delas são: 300x300mm e altura de 75mm, o que conduz a uma altura total de 150mm. As duas partes que constituem a caixa são fixas por encaixe e por aplicação da carga, Figura 3. 12.

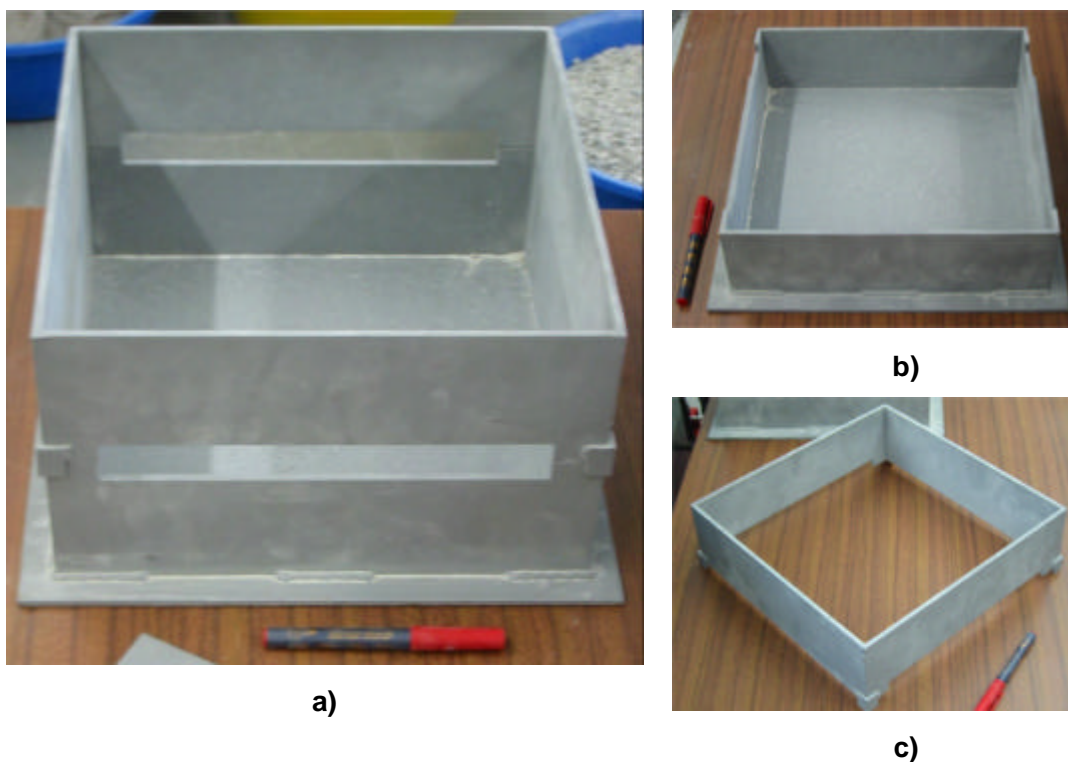


Figura 3. 12 – Caixa de danificação: **a)** vista geral; **b)** parte inferior; **c)** parte superior.

Na Figura 3. 13a, pode-se observar a placa que é colocada sobre toda a área da caixa onde é aplicada a carga para a compactação das duas camadas de solo, colocado na caixa inferior. A placa é constituída pelo mesmo material que a caixa de danificação, tendo uma espessura de 7,5 mm, o que a torna suficientemente rígida a ponto de não sofrer deformações por flexão.

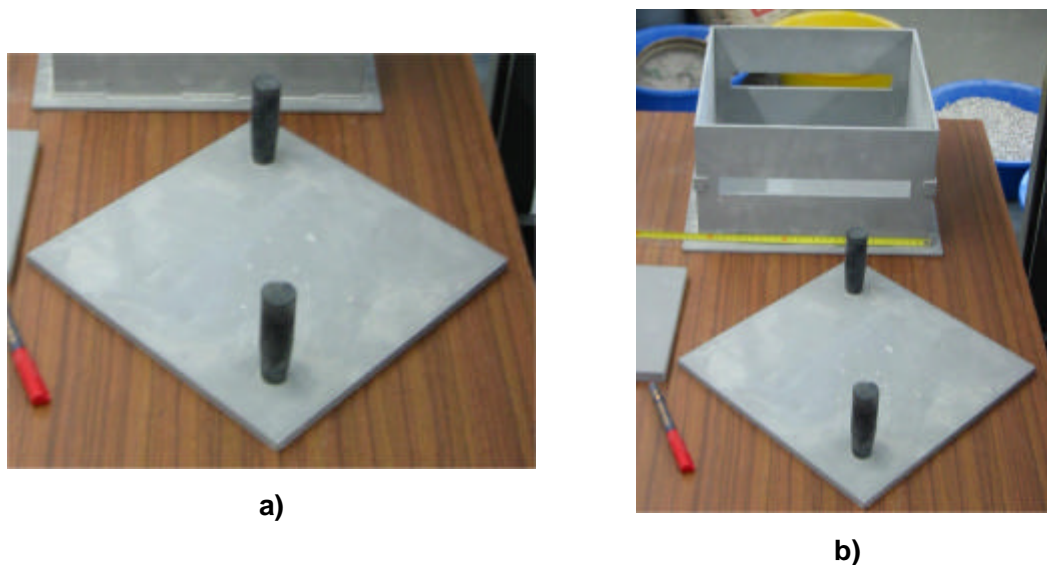


Figura 3. 13 – Caixa de danificação: a) placa de compactação; b) vista geral.

3.4 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO

No ensaio de identificação e controlo de qualidade o material granular a utilizar é sintético. Porém como o objectivo deste trabalho é a quantificação da influência de certos parâmetros, nomeadamente, do tipo de solo, na danificação durante a instalação dos geossintéticos, optou-se por realizar ensaios de quantificação da danificação utilizando dois solos naturais com propriedades distintas. Por isso, nesta secção, o procedimento de ensaio será descrito considerando um dos solos granulares naturais utilizados no trabalho.

Na Figura 3. 14 pode visualizar-se a sequência de enchimento da parte inferior da caixa com o solo granular, que como é referido na norma, é colocado em duas camadas, cada uma delas é compactada com a placa de compactação a uma tensão de $200\pm 2\text{kPa}$ durante 60 segundos.

Posteriormente, o provete de geossintético a danificar, com 0,25m de largura, é colocado na parte superior da caixa inferior, como se vê na Figura 3. 15, estando o centro do provete alinhado com o centro da caixa. A parte superior da caixa é colocada sobre a parte inferior e fixa por encaixe, ver Figura 3. 16.

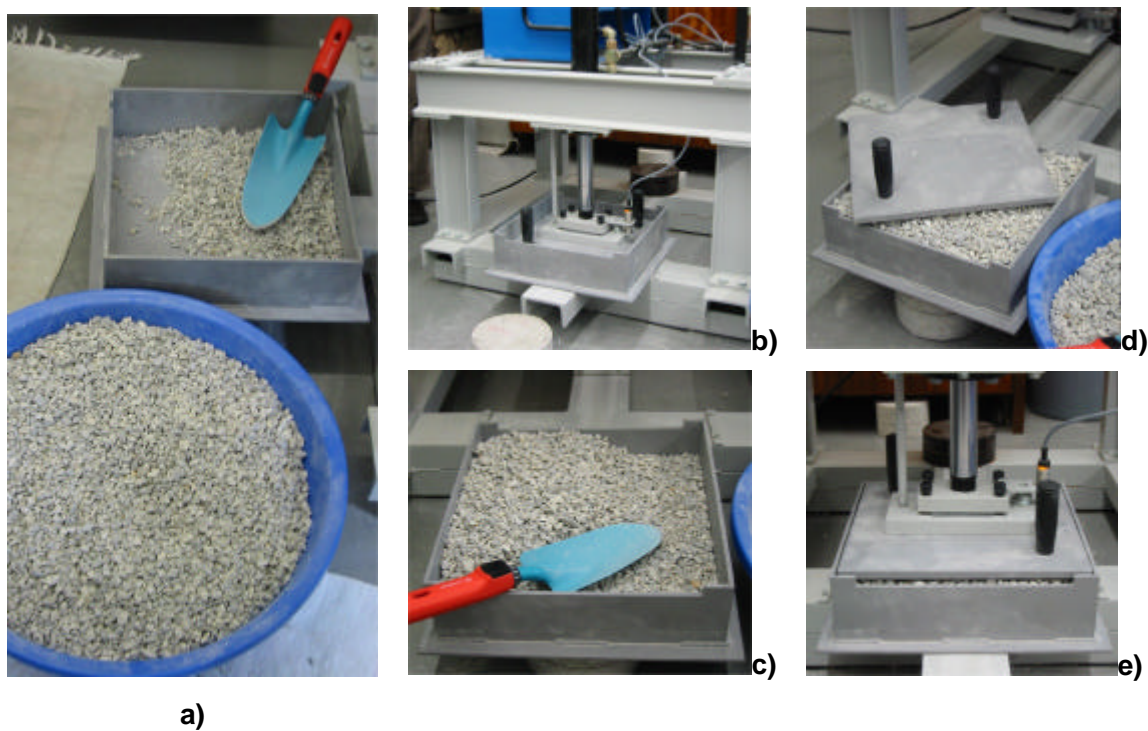


Figura 3. 14 – Enchimento da caixa inferior: **a)** colocação da 1ª camada; **b)** compactação da 1ª camada; **c)** colocação da 2ª camada; **d)** e **e)** compactação da 2ª camada.

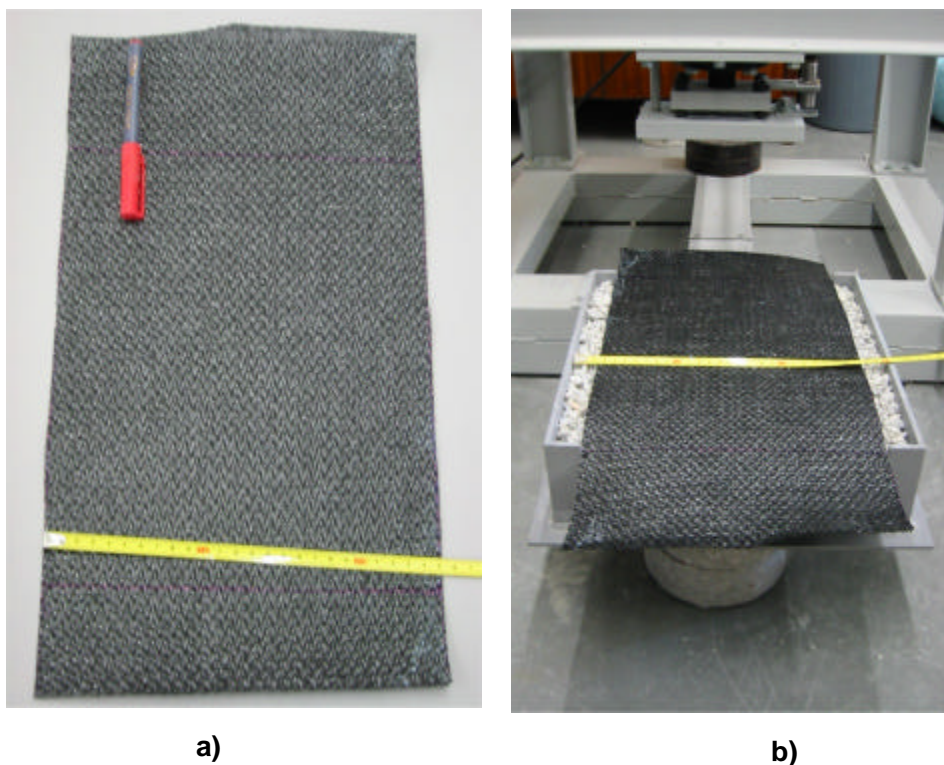


Figura 3. 15 – Provete de geossintético; **a)** dimensões; **b)** posição do provete na caixa inferior.

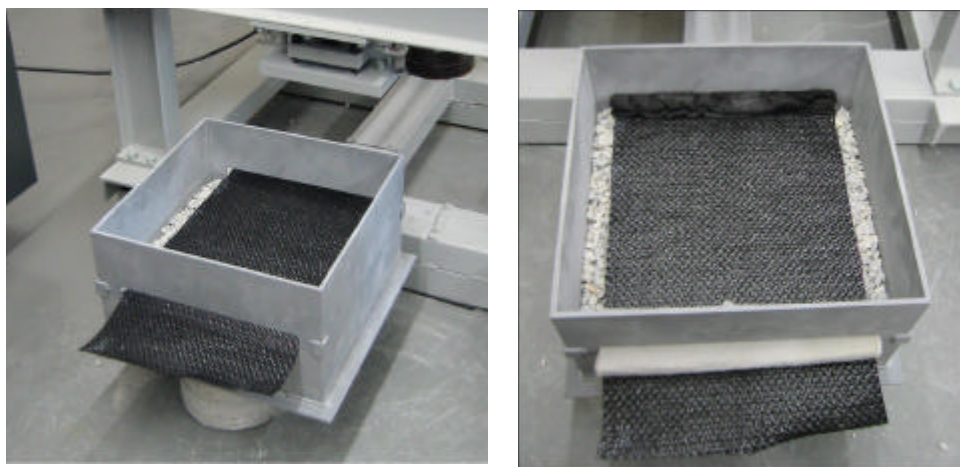


Figura 3. 16 – Colocação da caixa Superior.

Seguidamente, a parte superior da caixa de danificação é cheia com o material granular solto até que se atinja a altura de 75mm, ver Figura 3. 17.

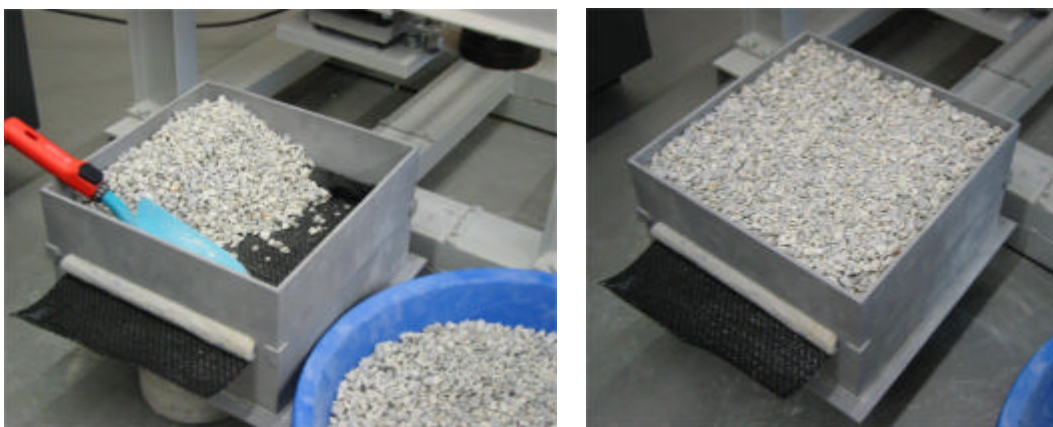


Figura 3. 17 – Enchimento da caixa superior.

O equipamento de ensaio com o agregado granular e o provete de geossintético a danificar é colocado na estrutura de aplicação das cargas, de modo que a placa de carga fique posicionada no centro da caixa, ver Figura 3. 18.

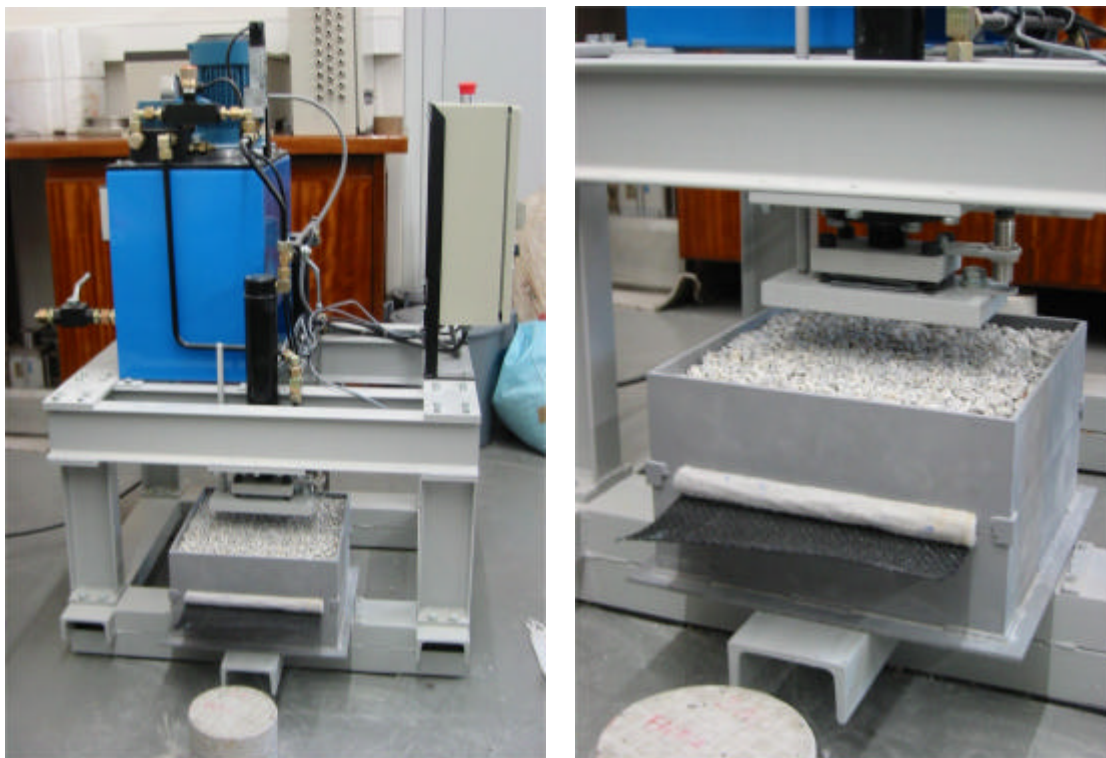


Figura 3. 18 – Posição da caixa de danificação.

Finalmente, é aplicada uma carga cíclica triangular entre $5\pm 5\text{kPa}$ a 900kPa com frequência de 1Hz , durante 200 ciclos, ver Figura 3. 19. Tal como é frisado na norma europeia, a tensão a aplicar é determinada usando a área da placa de carga e não a área total da caixa.



Figura 3. 19 – Aplicação da carga cíclica.

No fim do ensaio o provete é retirado da caixa cuidadosamente, assegurando que não ocorra danificação durante esta operação, ver Figura 3. 20.

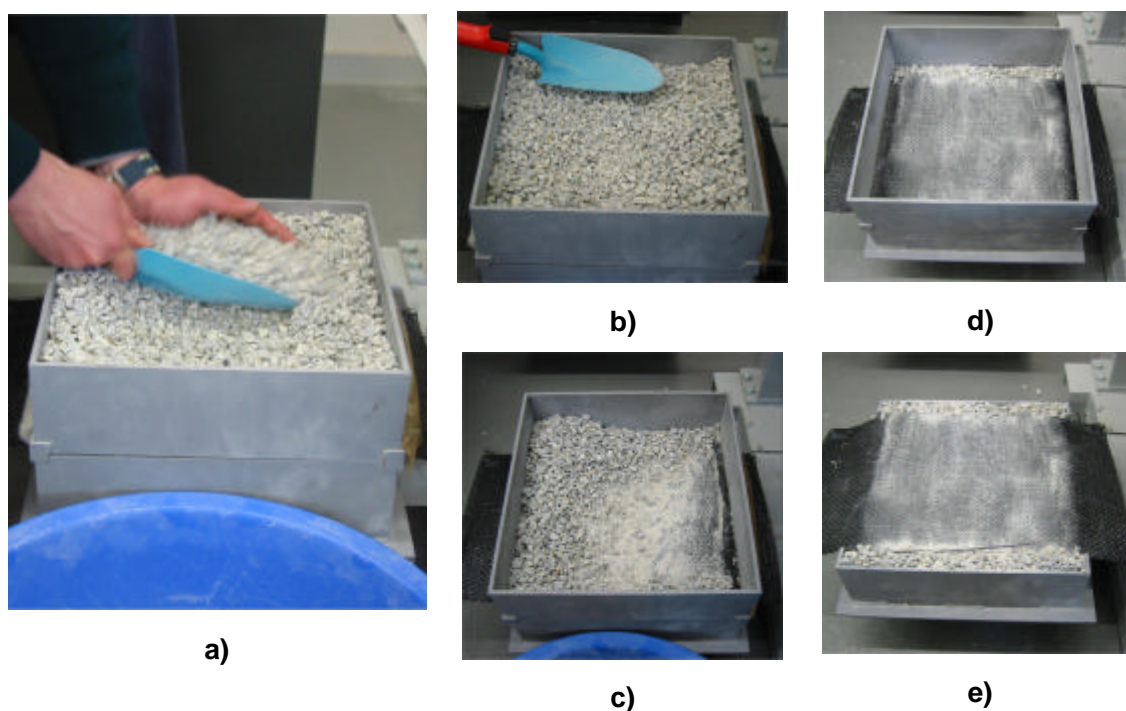


Figura 3. 20 – Sequência de extracção do provete de geossintético.

O provete de geossintético danificado é então examinado para detectar a danificação visual existente (Figura 3. 21) e submetido ao ensaio de referência, para avaliação das alterações das propriedades de referência. O resultado é expresso em termos de variação, em percentagem, desta propriedade.



Figura 3. 21 – Inspeção visual do geossintético danificado.

Neste trabalho, o ensaio de referência para a avaliação a danificação induzida em laboratório é o ensaio à tracção, realizados de acordo com a Norma Europeia EN ISO 10319 (Geotextiles – Wide-width tensile test), para os geotêxteis e geogrelhas, e de acordo com a Norma ASTM D 638, para as geomembranas.

CAPÍTULO 4

DANIFICAÇÃO MECÂNICA DURANTE A INSTALAÇÃO ANÁLISE EXPERIMENTAL ATRAVÉS DE ENSAIOS LABORATORIAIS DE DANIFICAÇÃO.

4.1 – INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foi apresentado detalhadamente o equipamento laboratorial desenvolvido para simulação da danificação durante a instalação de geossintéticos.

Tal como se referiu, a danificação durante a instalação de geossintéticos resulta essencialmente das operações de colocação e compactação do material de aterro adjacente aos geossintéticos e das operações de manuseamento destes, podendo resultar em defeitos locais e/ou em alterações das propriedades mecânicas dos geossintéticos.

Um método para avaliar a danificação causada aos geossintéticos durante a instalação foi primeiramente normalizado através da BS 8006 e outras normas Britânicas. Estas normas impõem a realização de ensaios de campo (aterros experimentais), em obras reais e com os equipamentos de compactação previstos para a sua execução. Este tipo de ensaios formula bem o que acontece na realidade, quanto à danificação provocada ao material, mas são muito morosos e dispendiosos. O ideal é a realização de ensaios laboratoriais que formulem bem o problema da danificação durante a instalação e facultem um custo menor (Greenwood, 1998).

Neste trabalho, tendo em conta o que anteriormente se referiu, estudar-se-á laboratorialmente a danificação durante a instalação de geossintéticos, utilizando o equipamento de ensaio desenvolvido. Deste modo, procurar-se-á contribuir para o

esclarecimento do fenómeno e da influência neste da estrutura dos geossintéticos e das características dos solos; procurar-se-á também fornecer informação adicional acerca do tipo de material granular a utilizar nos ensaios laboratoriais de danificação, uma vez que tal constitui um dos objectivos actuais da Comissão Europeia de Normalização de geossintéticos.

Assim, neste capítulo começa-se por descrever os materiais utilizados no estudo, seguindo-se a apresentação e análise dos resultados obtidos em laboratório. Nesta análise é avaliada a influência na danificação dos geossintéticos da estrutura destes e do tipo de material de granular utilizado. Posteriormente, será feita uma análise dos resultados obtidos com os resultados de alguns geossintéticos danificados em ensaios de laboratório com o agregado sintético referido na EN ISO 10772-1, e de campo desenvolvidos no âmbito do protocolo ICERR/FEUP. Finalmente, são formuladas as conclusões consideradas mais pertinentes face aos resultados obtidos no estudo e o prosseguimento de trabalhos futuros.

4.2 – MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO

Os procedimentos de simulação em laboratório da danificação durante a instalação encontram-se descritos na EN ISO 10722-1 (Geotextiles and geotextile-related products – Procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular materials).

Nas secções seguintes é feita uma descrição tão detalhada quanto possível dos diferentes materiais utilizados no estudo.

4.2.1 – Geossintéticos

Um dos objectivos deste trabalho é a avaliação da influência na danificação durante a instalação dos geossintéticos do tipo e estrutura destes materiais. A prossecução deste objectivo exigiu a selecção de geossintéticos com estruturas diferentes (Figura 4. 1), nomeadamente: geogrelhas extrudidas (uniaxial e biaxial), geogrelha tecida biaxial, geotêxteis (tecido e não tecido agulhado), geomembranas (lisa e rugosa).

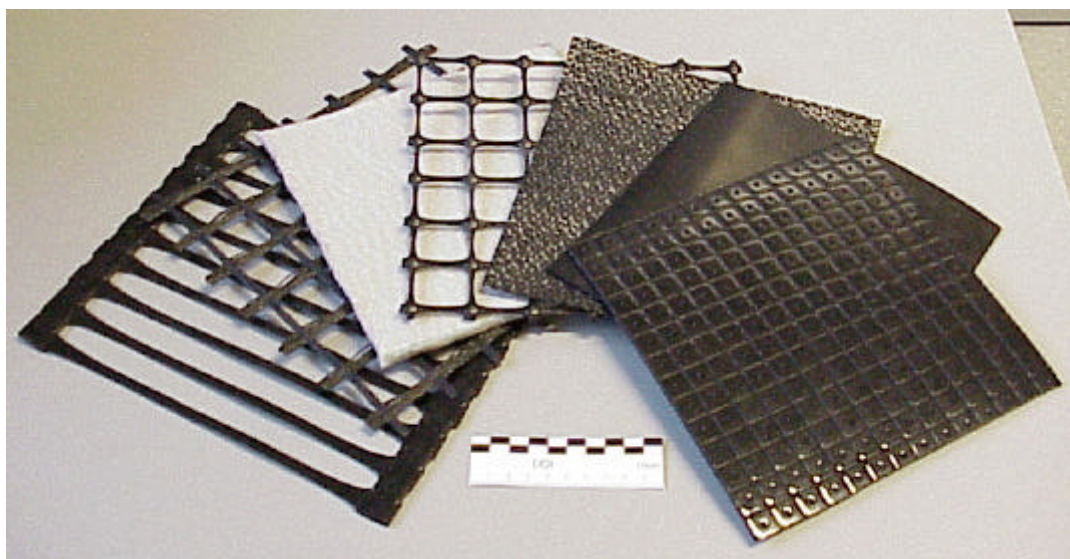


Figura 4. 1 – Materiais utilizados no estudo.

4.2.1.1 - Geogrelhas

No estudo utilizaram-se três tipos de geogrelhas (Figura 4. 2) uma extrudida uniaxial em HDPE (GGeu), outra extrudida biaxial em polipropileno (GGeb) e finalmente uma tecida biaxial em polietileno (GGtb).

As geogrelhas foram ensaiadas à tracção-deformação a curto prazo, de acordo com a EN ISO 10319, encontrando-se os valores médios obtidos para a resistência à tracção e para a deformação na rotura indicados no Quadro 4. I. A Figura 4. 3 mostra as curvas tracção-deformação das geogrelhas ensaiadas.

Quadro 4. I – Resistência à tracção e deformação na rotura das geogrelhas.

| Geogrelhas | Resistência à Tracção (kN/m) | Deformação na Rotura (%) |
|-------------------|---|-------------------------------------|
| GGeu | 57,36 | 13,83 |
| GGeb | 45,91 | 14,83 |
| GGtb | 60,14 | 21,07 |

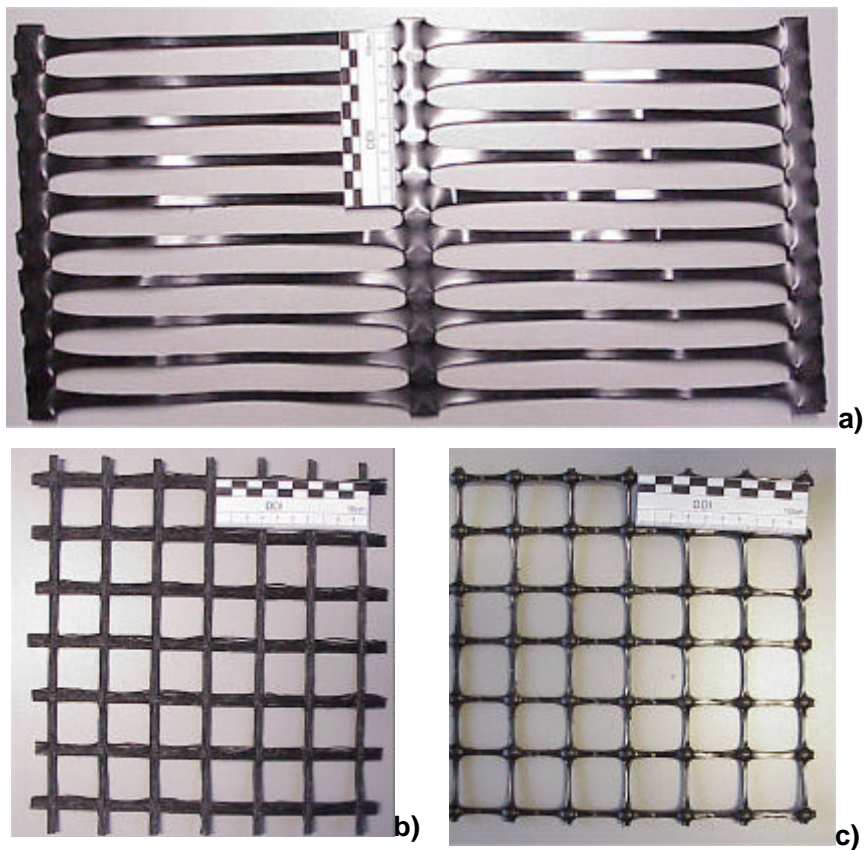


Figura 4. 2 – Geogrelhas: a) estrudida uniaxial; b) estrudida biaxial; c) tecida biaxial.

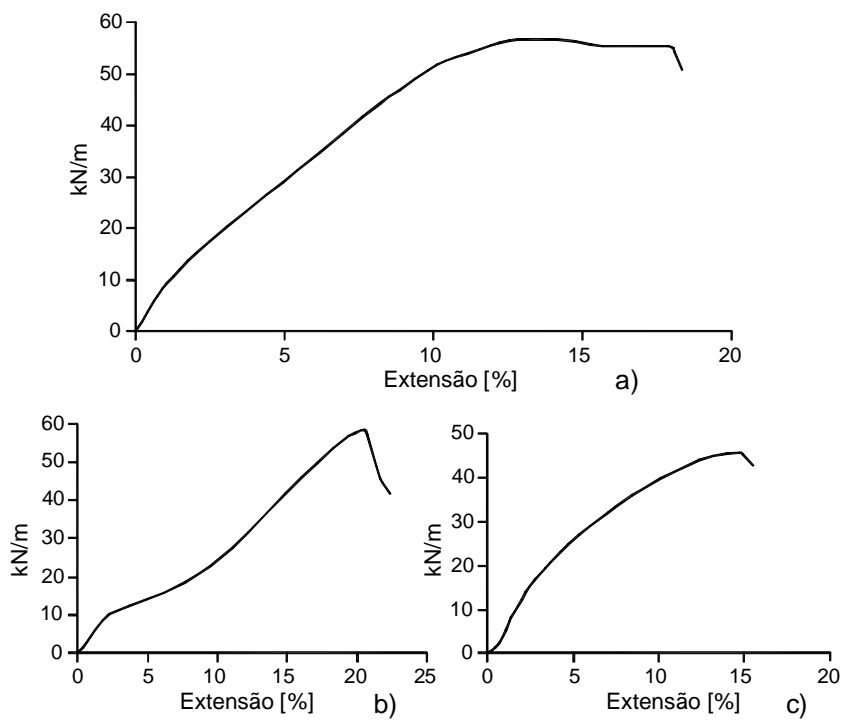


Figura 4. 3 – Curvas tracção-deformação das geogrelhas: a) GGeu; b) GGtb; c) GGeb.

As Figuras 4. 4 e 4. 5 e os Quadros 4.II e 4.III mostram, respectivamente, as características geométricas das geogrelhas extrudidas uniaxial e biaxial.

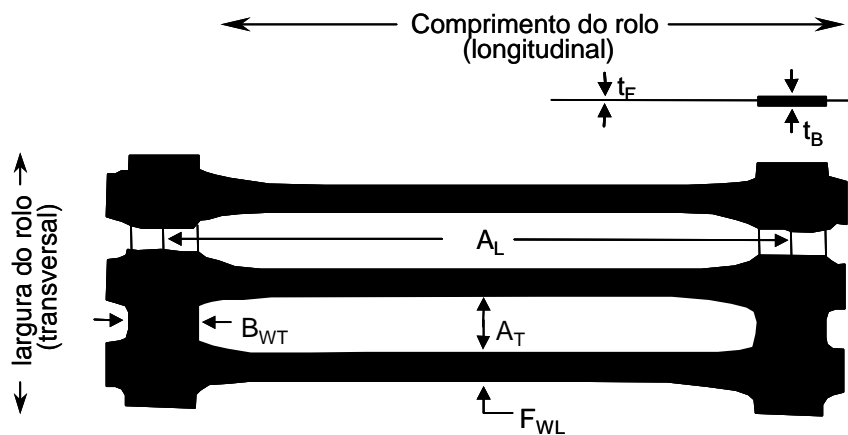


Figura 4. 4 – Geometria da geogrelha uniaxial.

Quadro 4. II – Características geométricas da geogrelha uniaxial (GGeu).

| | A_L | A_T | B_{WT} | F_{WL} | t_B | t_F |
|------|-------|-------|----------|----------|---------|-------|
| | (mm) | | | | | |
| GGeu | 235 | 16 | 16 | 6 | 2,5-2,7 | 0,9 |

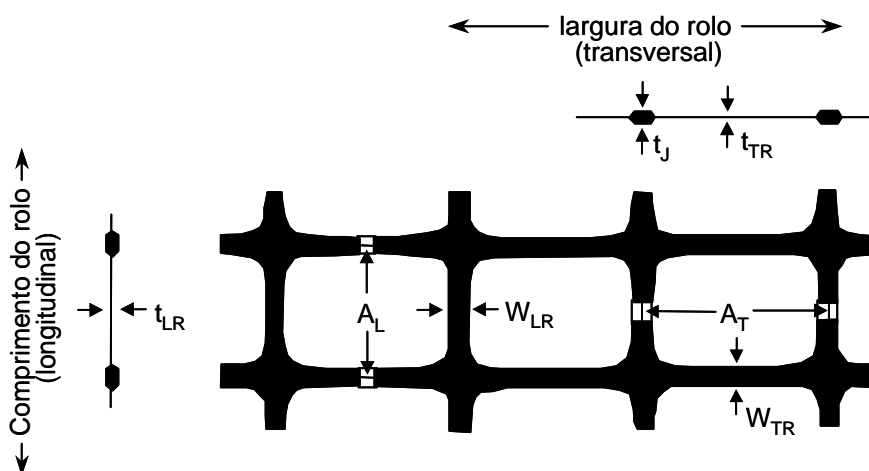


Figura 4. 5 – Geometria da geogrelha biaxial.

Quadro 4. III – Caraterísticas geométricas da geogrelha extrudida biaxial.

| | A_L | A_T | W_{LR} | W_{TR} | t_J | t_{LR} | t_{TR} |
|------|-------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|
| | (mm) | | | | | | |
| GGeb | 33 | 33 | 2,2 | 2,5 | 5,8 | 2,2 | 1,4 |

4.2.1.2 - Geotêxteis

Para o estudo seleccionaram-se dois tipos de geotêxteis (ver Figura 4. 6). Um geotêxtil não tecido em polipropileno (GTnt), com massa por unidade de área de 800g/m² e com valores médios de resistência à tracção e de deformação na rotura a curto prazo, respectivamente de 50,11kN/m e 111,94% e um geotêxtil tecido em polipropileno (GTt), com massa por unidade de área de 320g/m² e valores médios de resistência à tracção e de deformação na rotura a curto prazo, respectivamente de 68,97kN/m e 14,89%.

A Figura 4. 7 mostra as curvas tracção-deformação, obtidas de acordo com os procedimentos prescritos na EN ISO 10319, dos dois geotêxteis considerados.

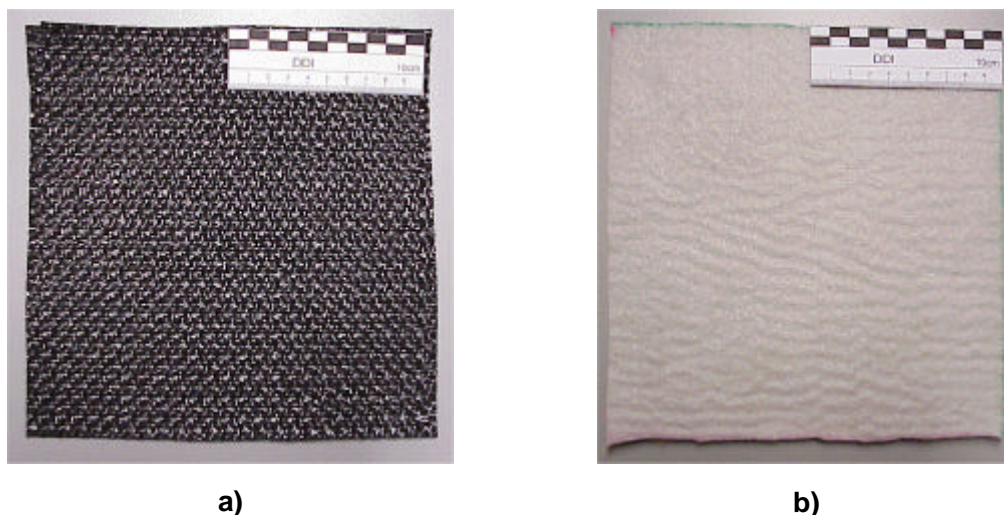


Figura 4. 6 – Geotêxteis: **a)** tecido (GTt); **b)** não tecido agulhado (GTnt).

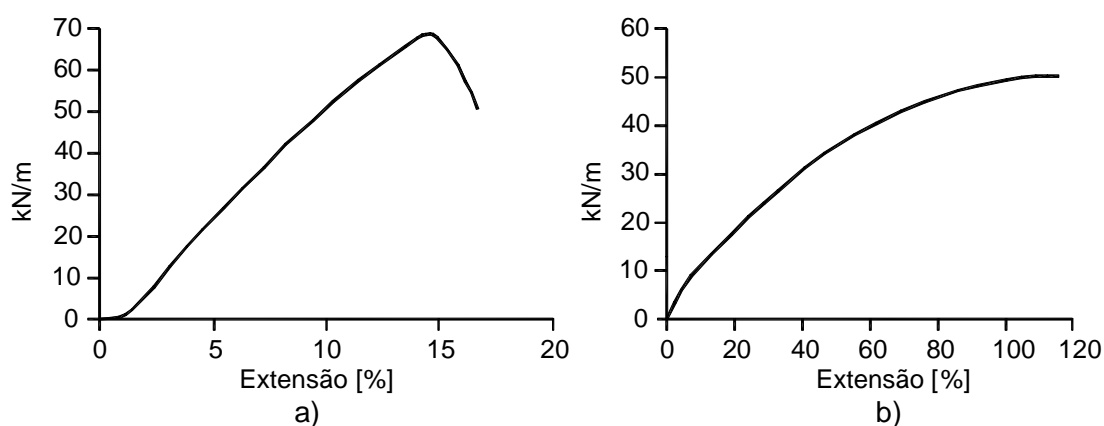


Figura 4. 7 – Curvas tracção-deformação dos geotêxteis: **a)** GTt; **b)** GTmt.

4.2.1.3 - Geomenbranas

As geomembranas utilizadas ao longo do trabalho (ver Figura 4.8) são em polietileno de alta densidade, uma lisa (GMI) com 1,5mm de espessura e outra rugosa (pitonada) (GMr) com 2mm de espessura.

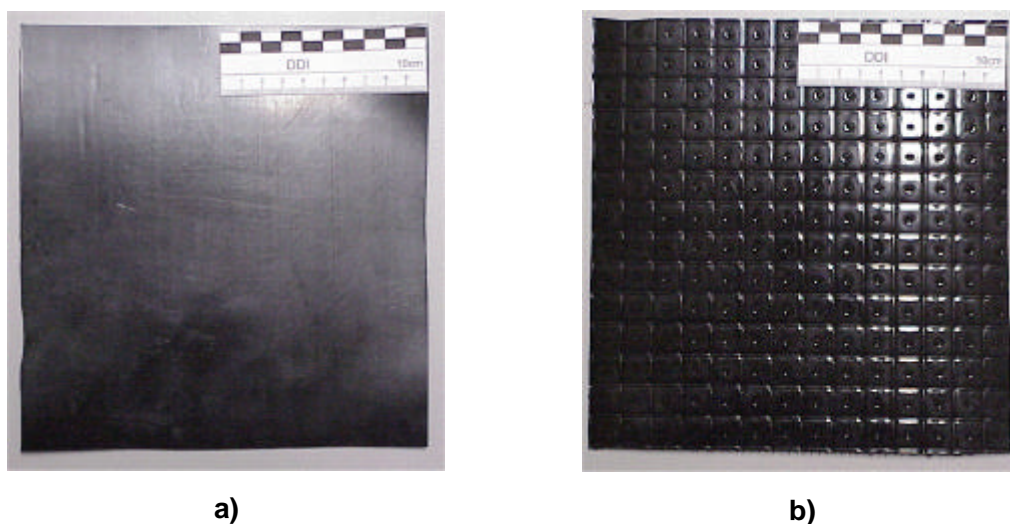


Figura 4. 8 – Geomembranas: **a)** lisa (GMI); **b)** rugosa (GMr).

As geomembranas foram ensaiadas à tracção-deformação, de acordo com a norma ASTM D638, obtendo-se para a resistência à tracção e para a deformação na rotura valores médios de 20,18N/mm² e 447,42%, para geomembrana lisa, e de 16,43N/mm² e 331,50%, para a geomembrana rugosa.

Apresentam-se na Figura 4. 9, as curvas de tracção-deformação das duas geomembranas. Como se pode constatar da figura, o comportamento tensão-deformação das geomembranas é um pouco distinto do observado para os geotêxteis e as geogrelhas (ver Figuras 4. 3 e 4. 7). Com efeito, ao contrário do que acontece para estes últimos geossintéticos, nas geomembranas observa-se um pico indicativo da cedência do material para deformações relativamente reduzidas, após a cedência a tensão diminui com um aumento ligeiro da deformação, seguindo-se a deformação do material sob tensão constante, fase plástica do material. Finalmente, dá-se endurecimento do material, aumentando a tensão e a deformação até à rotura.

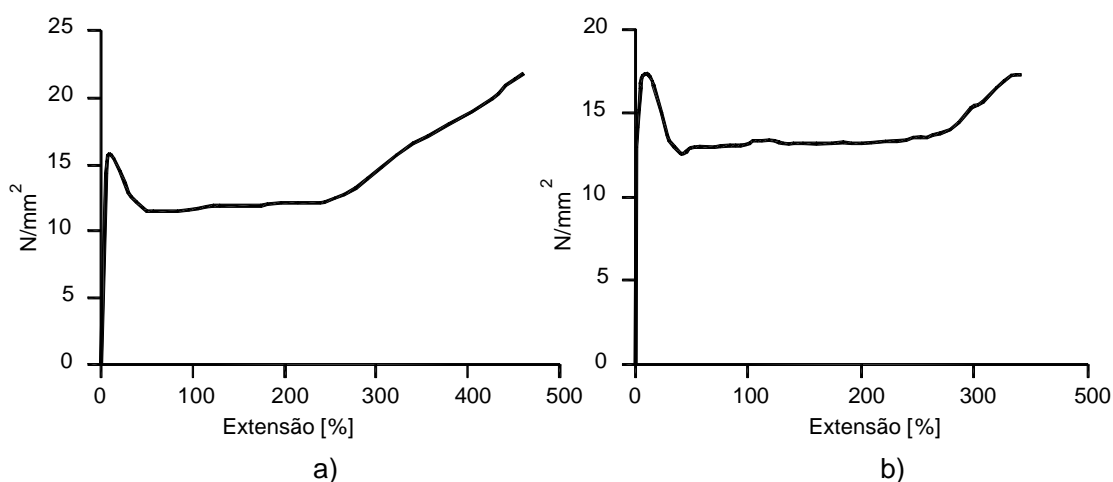


Figura 4. 9 – Curvas tracção-deformação das geomembranas; **a)** GMI; **b)** GMr.

Assim, nas geomembranas há que distinguir dois parâmetros de resistência fundamentais, a tensão de cedência do material que surge para deformações relativamente baixas e a tensão de rotura que ocorre para grandes deformações (superiores a 300%).

Aquando da aplicação destes materiais em obras de engenharia, importa considerar a tensão para pequenas deformações – tensão de cedência – uma vez que as grandes deformações de rotura das geomembranas e as deformações admissíveis nas estruturas são incompatíveis.

Pela razão apresentada, no caso das geomembranas definiu-se, para além da tensão e deformação na rotura a tensão e deformação na cedência, sendo os valores médios destes últimos parâmetros, respectivamente, 5,88N/mm² e 7,74%, para a geomembrana lisa, e 17,43 N/mm² e 10,35%, para a geomembrana rugosa.

Acresce referir que os valores dos parâmetros mecânicos indicados ao longo de 4.2.1 foram definidos na direcção de fabrico dos geossintéticos, uma vez que a influência da danificação durante a construção no comportamento dos materiais será estudada apenas nessa direcção.

4.2.2 – Solos

O material de aterro ao ser colocado em contacto com o geossintético e posteriormente espalhado, nivelado e compactado desempenha um papel fundamental na danificação dos geossintéticos.

Na simulação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos o material granular indicado na EN ISO 10722-1, enquanto ensaio de conformidade, é um agregado sintético de óxido de alumínio normalizado. Porém, não sendo o objectivo do presente trabalho verificar a conformidade dos geossintéticos, mas sim quantificar a influência de certos parâmetros, nomeadamente do tipo de solo em contacto com os geossintéticos, optou-se por utilizar dois solos reais.

Os solos utilizados são ambos granulares, no entanto com curvas granulométricas, dureza e petrografia distintos. A Figura 4.10 mostra o aspecto dos dois solos utilizados neste trabalho.

Importa notar, que sendo um dos objectivos do presente trabalho contribuir para a selecção do material granular mais adequado a utilizar nos ensaios laboratoriais de danificação durante a instalação de geossintéticos entendeu-se conveniente (por ser este um dos primeiros trabalhos que considera esse objectivo) seleccionar materiais naturais de granulometria uniforme, com a mesma gama de diâmetros do material granular sintético proposto na EN ISO 10722-1

Assim, por um lado tem-se um material granular granítico, com partículas de dimensões que variam entre 12,5mm e os 4,75mm, ver Figuras 4.10b e 4.11, com uma resistência à abrasão de Los Angeles 28,0%.

Por outro lado, tem-se um material granular calcário, com partículas de dimensões que variam entre 19mm e os 4,75mm, ver Figuras 4.10a e 4.11. A resistência à abrasão de Los Angeles para este material é de 19,3%.

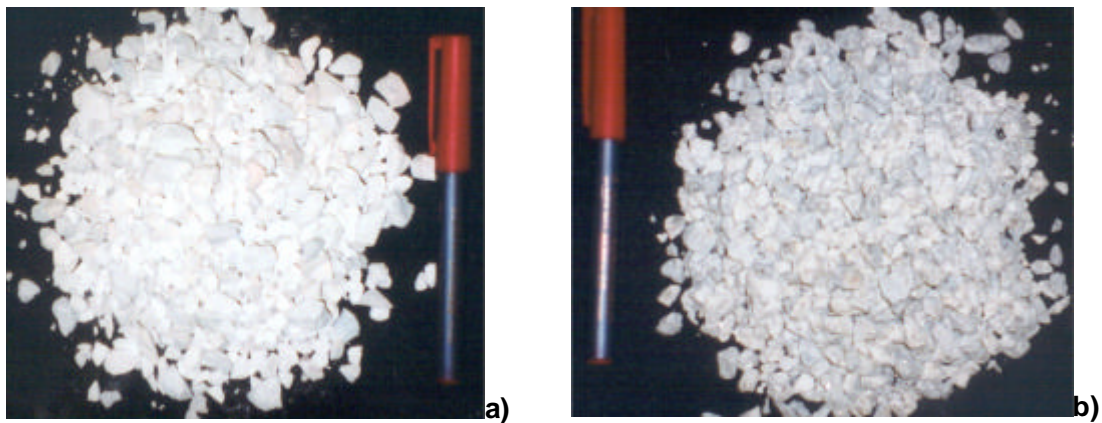


Figura 4. 10 – Agregado: a) calcário; b) granítico.

O Quadro 4.IV indica algumas características dos solos utilizados, nomeadamente, o diâmetro máximo, $D_{máx}$, mínimo, $D_{mín}$, os diâmetros D_{10} , D_{30} , D_{50} e D_{60} , o coeficiente de uniformidade, C_U e o coeficiente de curvatura, C_C .

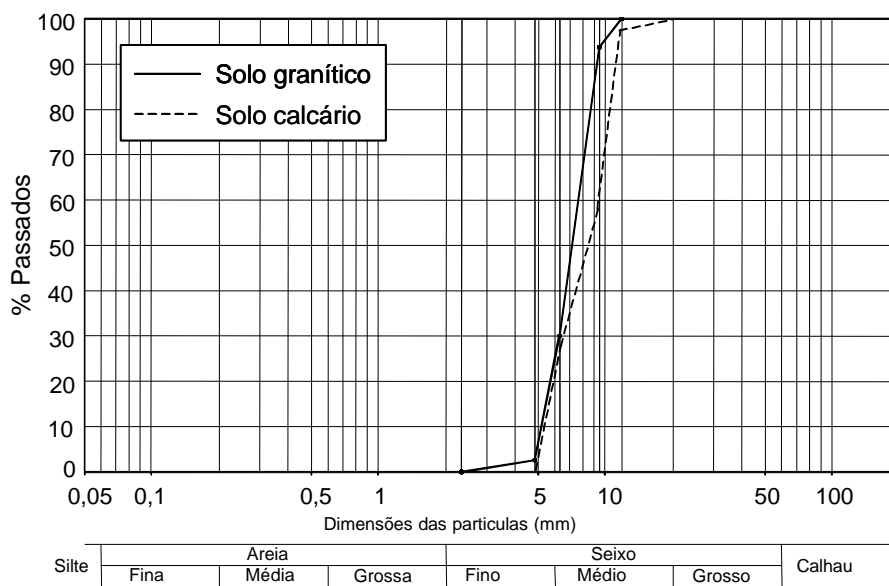


Figura 4. 11 – Curvas granulométricas dos solos.

Os coeficientes têm a seguinte definição:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.1)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (4.2)$$

Quadro 4. IV – Características dos solos.

| Solos | D _{min} | D ₁₀ | D ₃₀ | D ₅₀ | D ₆₀ | D _{máx} | C _u | C _c |
|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|
| | (mm) | | | | | | | |
| Granítico | 4,75 | 5,20 | 6,30 | 7,10 | 7,75 | 12,5 | 1,49 | 0,98 |
| Calcário | 4,75 | 5,30 | 6,60 | 8,70 | 9,60 | 19 | 1,81 | 0,86 |

Tanto o solo granítico como o calcário têm um coeficiente de uniformidade próximo da unidade e coeficiente de curvatura inferior à unidade, o que indica tratar-se de materiais mal graduados. A diferença fundamental entre os dois solos é a sua dureza.

Para diminuir o efeito do desgaste e do esmagamento do material, procedeu-se à sua peneiração e eliminação dos passados no peneiro com abertura de malha 4,75mm, após 5 utilizações. O material foi posto de parte após 30 utilizações.

4.3 – PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa de ensaios realizado consistiu em danificar em laboratório os geossintéticos referidos em 4.2.1 com os dois materiais granulares seleccionados.

De realçar, que este trabalho se concentrará na caracterização da danificação dos geossintéticos a curto prazo, não só porque esta é, por si só, um bom indicador da danificação destes materiais, mas também porque ensaios de longo prazo dos geossintéticos, quer intactos quer danificados são muito morosos, por isso incompatíveis com o tempo disponível para o desenvolvimento deste trabalho.

Assim, no programa de trabalhos, ver Figura 4.12, realizaram-se ensaios de caracterização mecânica sobre amostras de referência (intactas) e sobre amostras dos geossintéticos danificadas. O ensaio de caracterização da danificação dos geossintéticos é o ensaio de tracção, realizado de acordo com a EN ISO 10319, como tal a parâmetro mecânico determinado é a resistência à tracção dos geossintéticos.

Dos 7 tipos de geossintéticos utilizados no trabalho foram danificados inicialmente 5 provetes de cada tipo com o solo calcário e com o solo granítico (7x5)x2. Posteriormente, os provetes danificados e 5 provetes intactos de cada um dos geossintéticos (5x7) foram ensaiados à tracção-deformação. Ao todo, realizaram-se 70 ensaios de danificação e 105 ensaios de tracção-deformação.

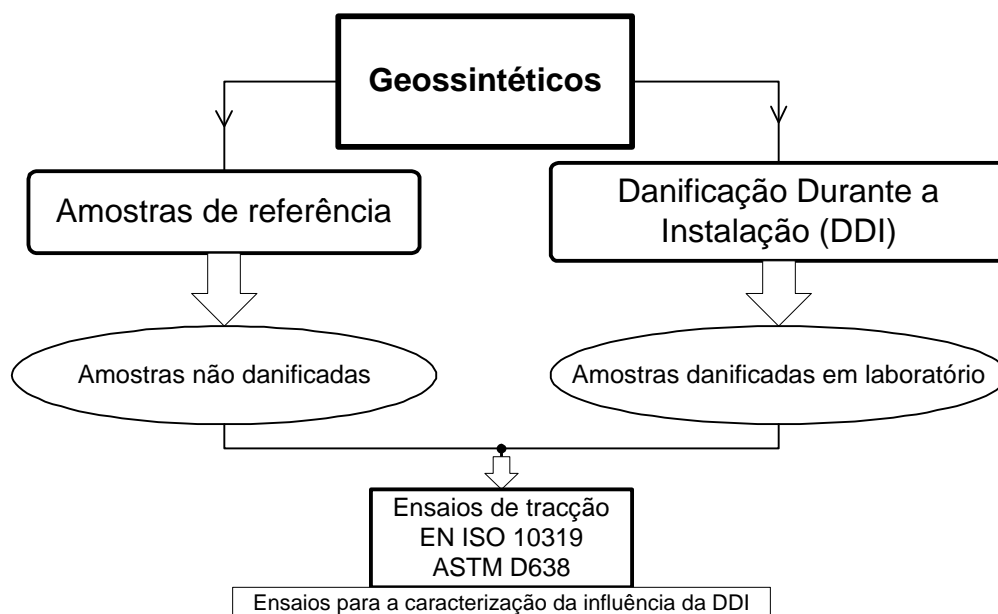


Figura 4. 12 – Programa de ensaios.

Os ensaios foram conduzidos num ambiente com uma temperatura de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa de $65\%\pm 2\%$

Na Figura 4.13, apresenta-se o equipamento utilizado para a realização dos ensaios de tracção-deformação dos diferentes geossintéticos.



Figura 4. 13 – Equipamento de ensaio de tracção.

As curvas tracção-deformação dos geossintéticos estudados já foram apresentadas em 4.2.1. Essas curvas referem-se ao comportamento dos materiais não danificados.

4.4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS LABORATORIAIS DE DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS

Nesta secção são apresentados os resultados dos ensaios de tracção dos geossintéticos intactos (de referência) e danificados em laboratório. Os resultados são apresentados em termos de valores médios da força de tracção e da deformação na rotura, indicando-se os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação. É também apresentado o comportamento tracção-deformação médio de cada geossintético, quer intacto, quer danificado.

Nos Quadros 4.V, 4.VI e 4.VII apresentam-se os resultados dos ensaios de tracção obtidos para os diferentes geossintéticos não danificados (de referência) (Quadro 4.V) e danificados com os solos granítico (Quadro 4.VI) e calcário (Quadro 4.VII).

Quadro 4. V – Resultados de ensaios de tracção das amostras de referência.

| ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319) | | Amostras de referência | | | | | |
|-----------------------------------|---|----------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| | | Força máxima | | | Deformação para a força máxima (%) | | |
| Material | | Média (kN/m) | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) | Média | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) |
| GTnt | Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m ²) | 50,11 | 2,66 | 5,3 | 111,94 | 1,85 | 1,7 |
| GTt | Geotêxtil Tecido em PP (320g/m ²) | 68,97 | 1,44 | 2,1 | 14,89 | 0,27 | 1,8 |
| GGeb | Geogrelha Extrudida Biaxial em PP | 45,91 | 0,68 | 1,5 | 14,83 | 0,94 | 6,3 |
| GGtb | Geogrelha Tecida Biaxial em PET | 60,14 | 0,76 | 1,3 | 21,07 | 1,29 | 6,1 |
| GGeu | Geogrelha Extrudida Uniaxial em HDPE | 57,36 | 0,76 | 1,3 | 13,83 | 1,58 | 11,4 |
| ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638) | | Força máxima | | | Deformação para a força máxima (%) | | |
| Material | | Média (N/mm ²) | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) | Média | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) |
| GMI | Geomembrana Lisa | 15,88 | 0,24 | 1,5 | 7,74 | 0,01 | 0,1 |
| GMr | Geomembrana Rugosa | 17,43 | 0,39 | 2,2 | 10,35 | 0,77 | 7,4 |

Quadro 4. VI – Resultados de ensaios de tracção realizados sobre amostras danificadas (solo granítico).

| ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319) | | Amostras danificadas - Solo granítico | | | | | |
|-----------------------------------|---|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| | | Força máxima | | | Deformação para a força máxima (%) | | |
| Material | | Média (kN/m) | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) | Média | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) |
| GTnt | Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m ²) | 38,85 | 3,65 | 9,4 | 109,33 | 6,99 | 6,4 |
| GTt | Geotêxtil Tecido em PP (320g/m ²) | 44,63 | 1,86 | 4,2 | 10,99 | 0,67 | 6,1 |
| GGeb | Geogrelha Extrudida Biaxial em PP | 43,67 | 1,26 | 2,9 | 15,57 | 1,58 | 10,1 |
| GGtb | Geogrelha Tecida Biaxial em PET | 53,35 | 3,94 | 7,4 | 21,07 | 1,74 | 8,3 |
| GGeu | Geogrelha Extrudida Uniaxial em HDPE | 56,74 | 0,88 | 1,5 | 11,77 | 0,27 | 2,3 |
| ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638) | | Força máxima | | | Deformação para a força máxima (%) | | |
| Material | | Média (N/mm ²) | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) | Média | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) |
| GMI | Geomembrana Lisa | 14,77 | 0,17 | 1,2 | 7,75 | 0,01 | 0,1 |
| GMr | Geomembrana Rugosa | 15,87 | 0,41 | 2,6 | 10,24 | 0,46 | 4,5 |

Quadro 4. VII – Resultados de ensaios de tracção realizados sobre amostras danificadas, (solo calcário).

| ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319) | | Amostras danificadas - Solo calcário | | | | | |
|-----------------------------------|---|--------------------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| | | Força máxima | | | Deformação para a força máxima (%) | | |
| Material | | Média (kN/m) | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) | Média | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) |
| GTnt | Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m ²) | 44,16 | 1,34 | 3,0 | 111,32 | 6,78 | 6,0 |
| GTt | Geotêxtil Tecido em PP (320g/m ²) | 51,88 | 1,98 | 3,8 | 13,29 | 0,37 | 2,8 |
| GGeb | Geogrelha Extrudida Biaxial em PP | 45,51 | 0,92 | 2,0 | 16,54 | 0,97 | 5,9 |
| GGtb | Geogrelha Tecida Biaxial em PET | 59,43 | 1,6 | 2,7 | 22,49 | 1,61 | 7,2 |
| GGeu | Geogrelha Extrudida Uniaxial em HDPE | 57,13 | 1,21 | 2,1 | 13,12 | 1,85 | 14,1 |
| ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638) | | Força máxima | | | Deformação para a força máxima (%) | | |
| Material | | Média (N/mm ²) | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) | Média | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) |
| GMI | Geomembrana Lisa | 14,95 | 0,29 | 1,9 | 8,07 | 0,71 | 8,8 |
| GMr | Geomembrana Rugosa | 16,13 | 0,47 | 2,9 | 10,46 | 0,68 | 6,5 |

Para uma melhor visualização das diferenças no comportamento a curto prazo dos geossintéticos, os resultados indicados nos Quadros 4.V a 4.VII, são também

apresentados em termos de resistência retida pelos geossintéticos danificados, isto é, em termos de percentagem da resistência à tracção do material intacto (Quadro 4.VIII).

Quadro 4. VIII – Resistência retida (em %) nos geossintéticos danificados em laboratório.

| ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319) | | | Resistência nominal em kN/m | Resistência retida (em %) das amostras danificadas em laboratório | |
|-----------------------------------|---|--------|-----------------------------|---|---------------|
| Material | | DM/DTM | | Solo granítico | Solo calcário |
| GTnt | Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m ²) | 50 | 77,53 | 88,13 | |
| GTt | Geotêxtil Tecido em PP (320g/m ²) | 65/65 | 64,71 | 75,22 | |
| GGeb | Geogrelha Extrudida Biaxial em PP | 40/40 | 95,12 | 99,13 | |
| GGtb | Geogrelha Tecida Biaxial em PET | 55/55 | 88,71 | 98,82 | |
| GGeu | Geogrelha Extrudida Uniaxial em HDPE | 55 | 98,92 | 99,60 | |
| ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638) | | | N/mm ² | Solo granítico | Solo calcário |
| Material | | | | | |
| GMI | Geomembrana Lisa | 21 | 93,01 | 94,14 | |
| GMr | Geomembrana Rugosa | 28 | 91,05 | 92,54 | |

A Figura 4.14 representa graficamente a informação constante no Quadro 4.VIII. Assim, verifica-se que a resistência retida nos geossintéticos danificados varia dentro de uma gama larga (64,7% a 99,6%).

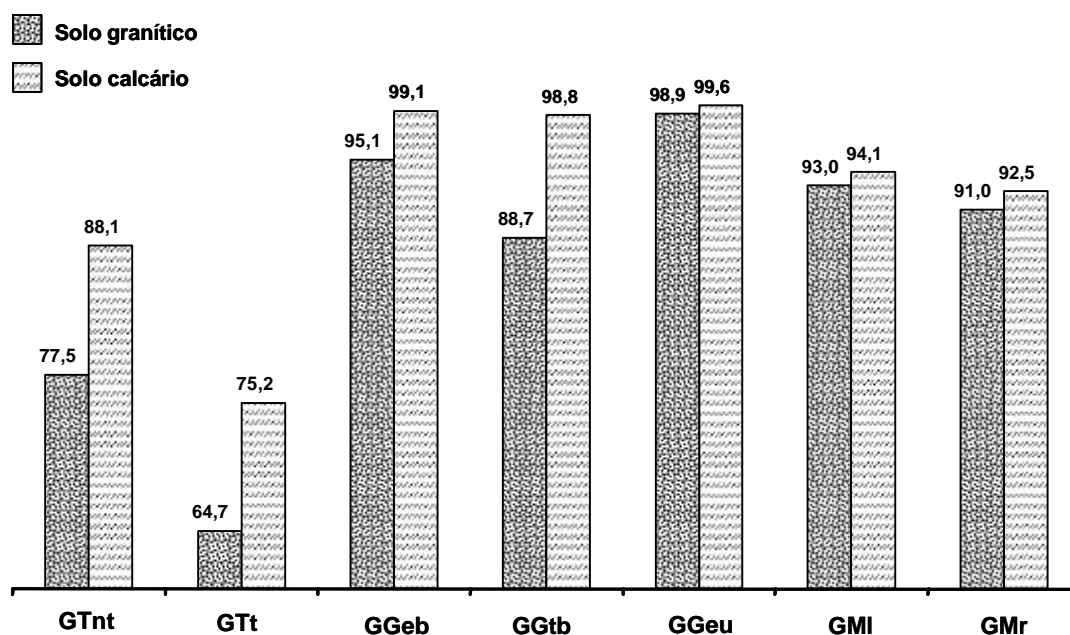


Figura 4. 14 – Resistência retida (em %) nos geossintéticos danificados em laboratório.

De uma forma geral verifica-se que os geossintéticos danificados com solo granítico apresentam valores de resistência retida menores do que quando são danificados com solo calcário.

No Quadro 4.IX e na Figura 4.15 é apresentado o coeficiente de variação da resistência à tracção das amostras de geossintéticos de referência e danificadas laboratorialmente.

Quadro 4. IX – Coeficiente de variação da resistência à tracção de amostras de referência e danificadas em laboratório.

| ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319) | | Resistência nominal em kN/m | Coeficiente de variação da resistência à tracção (em %) | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------|---|----------------|---------------|
| | | | Referência | Solo granítico | Solo calcário |
| Material | | DM/DTM | | | |
| GTnt | Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m ²) | 50 | 5,3 | 9,4 | 3,0 |
| GTt | Geotêxtil Tecido em PP (320g/m ²) | 65/65 | 2,1 | 4,2 | 3,8 |
| GGeb | Geogrelha Extrudida Biaxial em PP | 40/40 | 1,5 | 2,9 | 2,0 |
| GGtb | Geogrelha Tecida Biaxial em PET | 55/55 | 1,3 | 7,4 | 2,7 |
| GGeu | Geogrelha Extrudida Uniaxial em HDPE | 55 | 1,3 | 1,5 | 2,1 |
| ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638) | | | | Solo granítico | Solo calcário |
| Material | | N/mm ² | | | |
| GMI | Geomembrana Lisa | 21 | 1,5 | 1,2 | 1,9 |
| GMr | Geomembrana Rugosa | 28 | 2,2 | 2,6 | 2,9 |

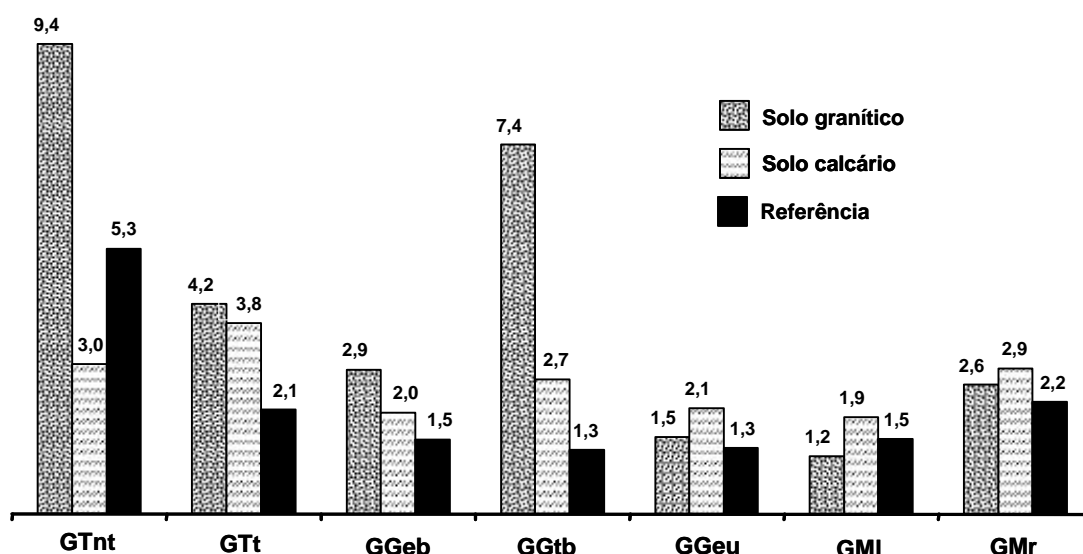


Figura 4. 15 – Coeficiente de variação (em%) da resistência à tracção dos geossintéticos.

Constata-se, em geral, uma grande dispersão nos valores do coeficiente de variação da resistência à tracção, o que atendendo a que todos os geossintéticos foram danificados nas mesmas condições, com cada um dos solos confinantes, significa que os diferentes geossintéticos respondem com mecanismos de danificação distintos (Pinho-Lopes, 2001).

O coeficiente de variação dos materiais de referência é, genericamente baixo e inferior ao das amostras danificadas laboratorialmente (Figura 4.15). Verifica-se, de um modo geral, que quando os geossintéticos são danificados com o solo granítico (aquele que conduz a uma maior redução de resistência) se registam os coeficientes de variação mais elevados.

Nas secções seguintes procurar-se-á realçar a influência de alguns factores, tais como, o tipo e estrutura do geossintético e o tipo de solo confinante na danificação durante a instalação dos geossintéticos.

4.4.1 – Influência do Tipo de Geossintético

No estudo da influência do tipo e da estrutura do geossintético na danificação durante a instalação induzida em laboratório, optou-se por considerar apenas os resultados dos ensaios de danificação efectuados com o solo granítico, uma vez que, como se verá em 4.4.2, é com este tipo de solo que ocorrem os danos mais graves.

4.4.1.1 - Geogrelhas

Na Figura 4.16 estão representados os valores da resistência retida e do coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das três geogrelhas consideradas no estudo (GGeu, GGeb e GGtb).

Verifica-se que resistência retida nas geogrelhas danificadas é elevada (Figura 4.16a). É a geogrelha tecida (GGtb) que apresenta menor resistência (88,7%), isto é, maior sensibilidade à danificação durante a instalação. Porém, apesar disso verifica-se que o coeficiente de segurança parcial, para atender à danificação durante a instalação, a aplicar à tensão máxima do material intacto é apenas de 1,13. Para as geogrelhas extrudidas biaxial (GGeb) e uniaxial (GGeu) o coeficiente de segurança parcial é ainda mais baixo; 1,05 e 1,01, respectivamente. Em resumo, pode-se concluir que a danificação

durante a instalação das geogrelhas estudadas é pouco determinante na sua resistência à tracção a curto prazo.

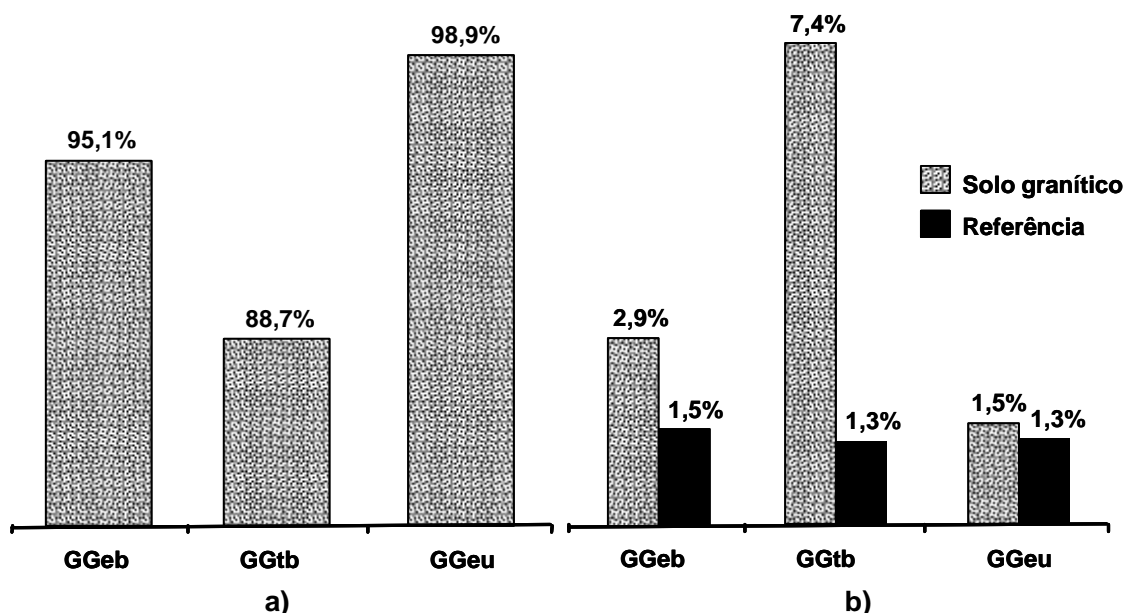


Figura 4. 16 – Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

É nas geogrelhas danificadas que se registam os valores mais elevados do coeficiente de variação para resistência à tracção (Figura 4.16b), logo maior variação nos resultados obtidos para este parâmetro. O coeficiente de variação varia na razão inversa da resistência retida, sendo praticamente coincidente com o do material de referência para a GGeu, geogrelha que evidencia uma resistência retida de 98,9%.

A Figura 4.17 compara as curvas de tracção-deformação das geogrelhas danificadas com as das geogrelhas de referência. Pode-se observar que a danificação provoca pouca variação na rigidez das geogrelhas.

A deformação na rotura da geogrelha uniaxial danificada diminui significativamente, anulando-se o comportamento elásto-plástico da geogrelha intacta e passando a ter um comportamento mais próximo do das outras duas geogrelhas. Como já foi referido anteriormente, a alteração mais significativa na resistência à tracção dá-se na geogrelha tecida danificada (-11,3% do que a do material intacto), provavelmente devido à maior susceptibilidade à danificação das juntas deste material. Com efeito, enquanto nesta geogrelha as juntas são tecidas, nas outras duas geogrelhas as juntas são integrais, isto é mais rígidas e resistentes.

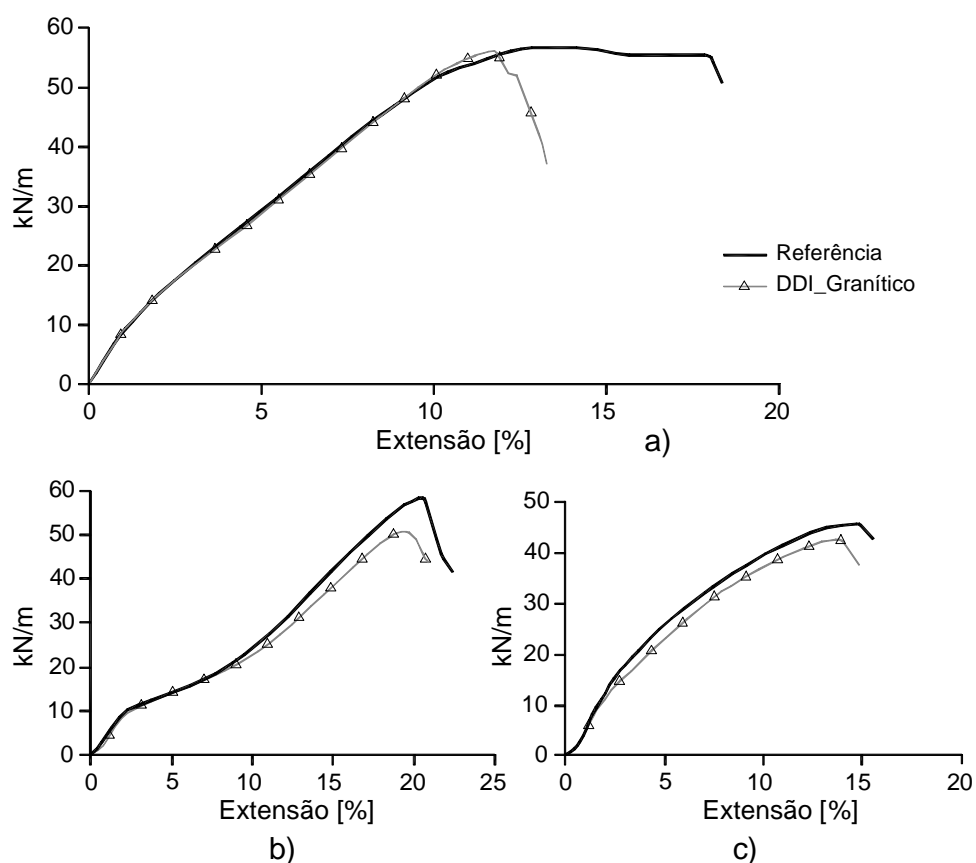


Figura 4. 17 – Curvas tracção-deformação: a) GGeu; b) GGtb; c) GGeb.

4.4.1.2 - Geotêxteis

Apresenta-se na Figura 4.18a a resistência retida nos dois geotêxteis estudados; geotêxtil não tecido (GTnt) e geotêxtil tecido (GTt) em PP. Verifica-se que os geotêxteis apresentam valores de resistência retida mais baixos do que as geogrelhas, o que denuncia uma maior sensibilidade das estruturas tecida e não tecida dos geotêxteis à danificação durante a instalação. O coeficiente de segurança parcial a aplicar à resistência do material intacto para atender à danificação durante a instalação é da ordem de 1,3 para o geotêxtil não tecido e de 1,5 para o geotêxtil tecido.

Tal como no caso das geogrelhas, o coeficiente de variação dos geotêxteis danificados é mais elevado do que o dos materiais intactos (Figura 4.18b), realçando uma vez mais uma maior gama de variação nos resultados obtidos quando os materiais estão danificados.

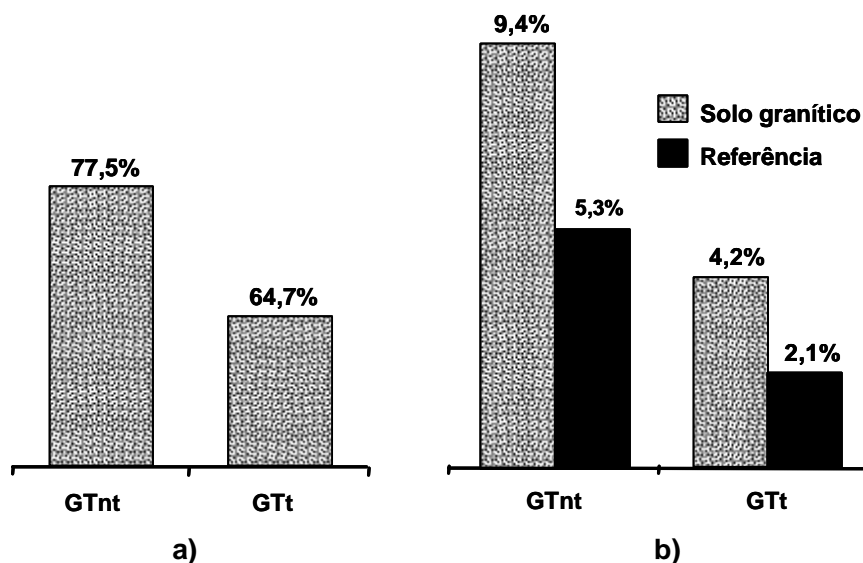


Figura 4. 18 – Geotêxteis: **a)** resistência retida; **b)** coeficiente de variação.

Porém, verifica-se que os coeficientes de variação mais elevados foram registados para o geotêxtil não tecido, quer intacto, quer danificado, embora a resistência retida neste material, quando danificado, seja maior do que no geotêxtil tecido em idênticas condições. Assim, é também evidenciado neste parâmetro a influência do processo de fabrico dos geotêxteis. Com efeito, possibilitando o processo de fabrico dos geotêxteis não tecidos uma estrutura mais heterogênea do que a dos geotêxteis tecidos não é de estranhar que o coeficiente de variação da resistência à tracção dos primeiros seja mais elevado.

A menor resistência retida no geotêxtil tecido deve-se, por um lado, à estrutura do material (distribuição regular de poros resultante do cruzamento das componentes na direcção de fabrico e perpendicular a esta) e, por outro, à menor massa por unidade de área e espessura deste geotêxtil. Com efeito, a menor massa por unidade de área e espessura facilita a danificação, ou mesmo rotura, de componentes das direcções de fabrico e perpendicular a esta. Estando danificadas as componentes deixam de poder suportar a mesma solicitação, dando-se a transferência desta para as componentes mais próximas que progressivamente se vão danificando ou, mesmo, rompendo. Assim, pode-se dizer que, para resistências nominais idênticas, os geotêxteis tecidos são mais sensíveis à danificação durante a instalação do que os não tecidos.

As curvas tracção-deformação dos dois geotêxteis intactos e danificados são comparadas na Figura 4.19. Verifica-se que o geotêxtil tecido (Figura 4.19a) apresenta uma pequena redução da rigidez quando danificado, associada à redução da resistência e

deformação na rotura. As médias da resistência e da deformação na rotura do material danificado são, respectivamente, cerca de 35,3% e 26,2% menores do que quando intacto.

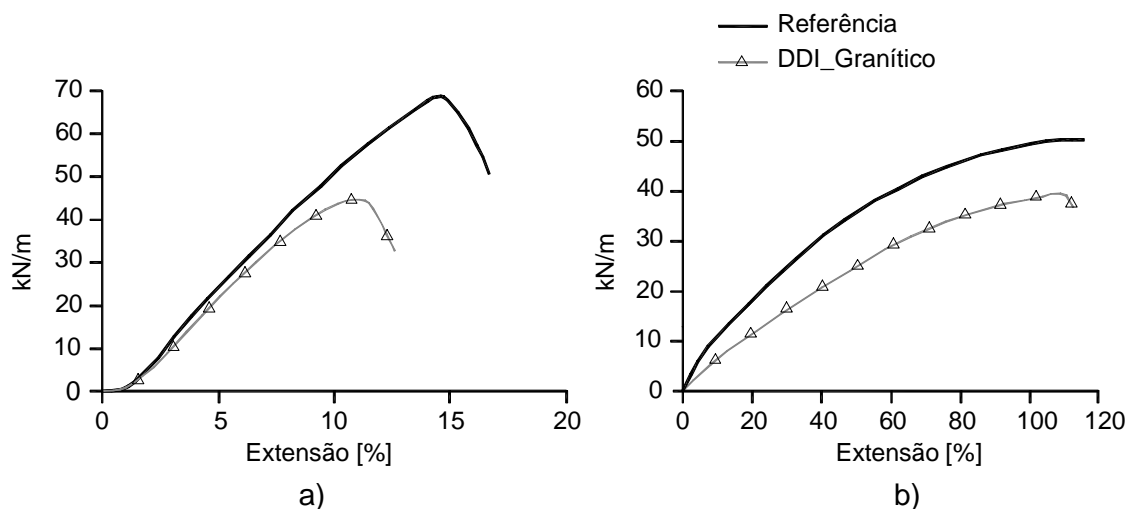


Figura 4. 19 – Curva tracção-deformação: **a)** GTt; **b)** GTnt.

O geotêxtil não tecido danificado (Figura 4.19b) torna-se mais deformável, mantendo-se praticamente inalterada a deformação na rotura (diminui cerca de 2,3%) e diminuindo a resistência.

Perante o exposto, torna-se claro que estruturas distintas de geotêxteis reagem à danificação durante a instalação de forma diferente.

4.4.1.3 - Geomenbranas

A Figura 4.20, representa a resistência retida e o coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das duas geomembranas danificadas com agregado granítico.

Como foi mencionado atrás, no caso das geomembranas a resistência à tracção e a resistência retida no material danificado referem-se à tensão de cedência.

A resistência retida nos dois materiais danificados é elevada (superior a 90% em ambos – ver Figura 4.20a), assim como a alteração do coeficiente de variação da resistência à tracção com a danificação (Figura 4.20b). O bom comportamento observado deve-se à estrutura contínua das geomembranas. De facto, ao contrário do que acontece com os geotêxteis e as geogrelhas (em especial, a geogrelha tecida), em que a estrutura dos geossintéticos é formada pela ligação de componentes individuais, que se danificam,

propiciando a danificação progressiva dos materiais, as geomembranas são folhas contínuas de polímeros, sem poros visíveis.

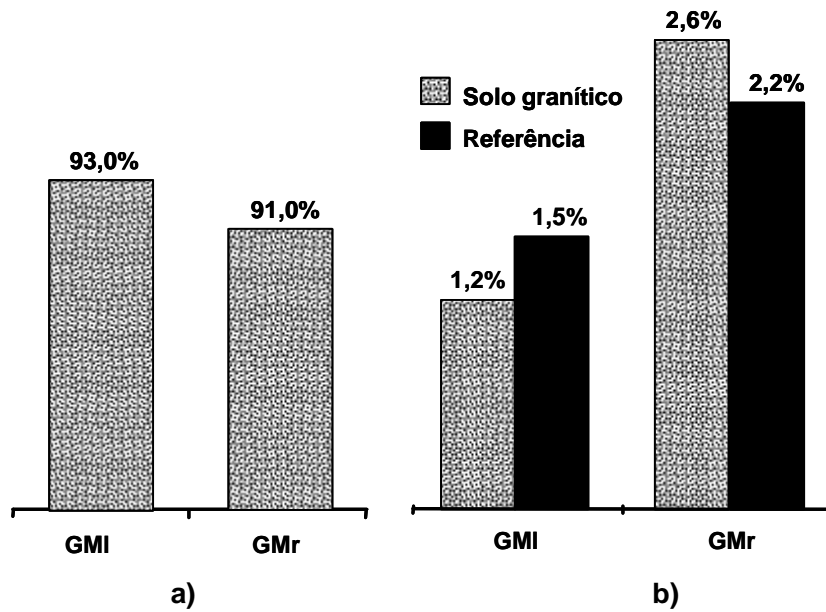


Figura 4. 20 – Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

Na Figura 4.21 compara-se o comportamento tensão-deformação das geomembranas antes e após a danificação. A inclinação na fase elástica da curva tracção-deformação dos materiais danificados é praticamente coincidente com a dos intactos, a tensão de cedência diminui, após esta as curvas são qualitativamente idênticas às dos materiais intactos.

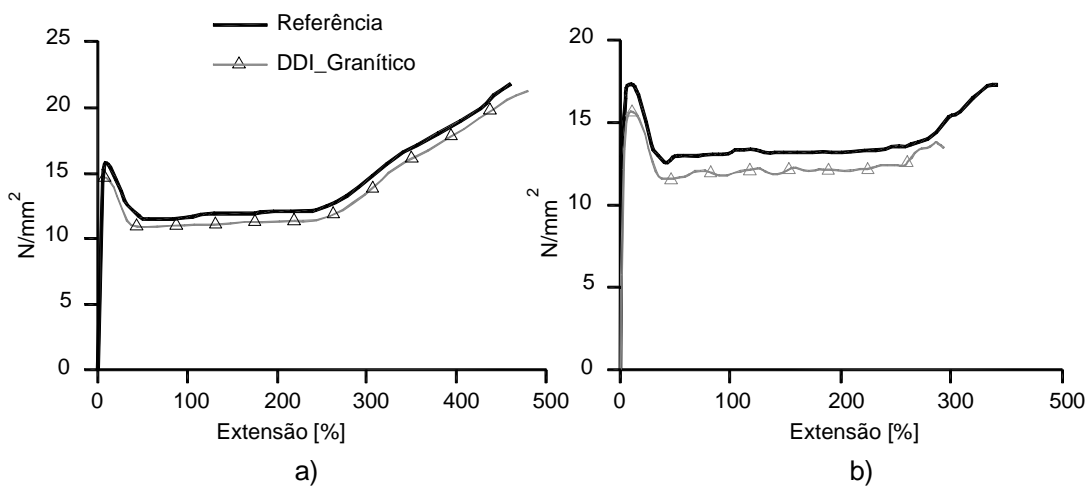


Figura 4. 21 – Curva tracção-deformação: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa.

4.4.1.4 – Nota Final

Com base nas análises efectuadas ao longo de 4.4.1 constata-se que a estrutura do geossintético é responsável pelo grau de sensibilidade do material à danificação durante a instalação. Dos geossintéticos considerados aqueles que evidenciaram maior susceptibilidade foram os geotêxteis, que apresentaram reduções da resistência à tracção em consequência da danificação da ordem dos 30% a 40%. As geomembranas e as geogrelhas danificadas evidenciaram reduções menores (da ordem dos 10%) do mesmo parâmetro.

O comportamento tracção-deformação dos três geossintéticos é distinto entre si. Para cada tipo de geossintético observam-se diferenças nas curvas tensão-deformação dos materiais intactos e danificados (ver Figuras, 4.17, 4.19 e 4.21).

4.4.2 – Influência do Tipo de Solo na Danificação

O tipo de material de aterro pode ter influência significativa na danificação durante a instalação dos geossintéticos (Lopes e Pinho-Lopes, 2001). Com o objectivo de comprovar a influência do tipo de solo na danificação dos geossintéticos em estudo utilizaram-se dois solos naturais distintos em dureza, petrografia e granulometria.

4.4.2.1 - Geogrelhas

A Figura 4.22 apresenta a resistência retida e o coeficiente de variação da resistência à tracção para as três geogrelhas (GGeu, GGeb, GGtb) danificadas com os solos calcário e granítico.

O solo calcário induz reduzida danificação nas geogrelhas, tal como comprova a elevada resistência retida (superior a 98,8) nestes geossintéticos (Figura 4.22a). Quando é utilizado o solo granítico a danificação é mais acentuada, em especial na geogrelha tecida, que apresenta uma resistência retida cerca de 10% menor do que quando o solo é calcário.

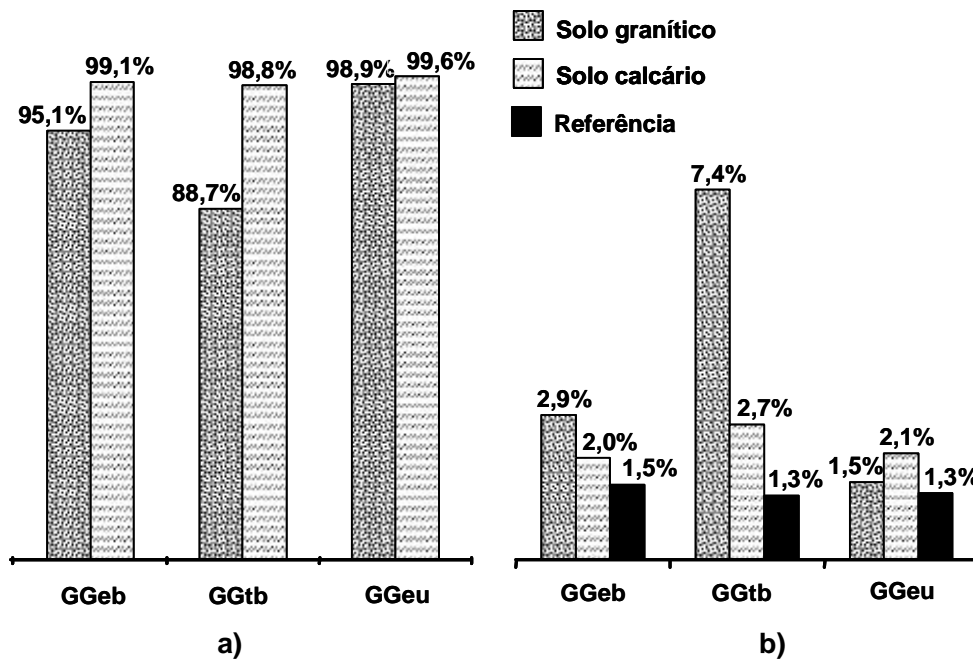


Figura 4. 22 – Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

O coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das geogrelhas danificadas é baixo, no entanto superior ao obtido para os materiais intactos (Figura 4.22 b), exceptua-se o caso da geogrelha tecida danificada com o solo granítico que apresenta um valor do coeficiente de variação cerca de 5,7 e 2,7 vezes superior ao calculado para o material intacto e danificado com o solo calcário, respectivamente.

A Figura 4.23 mostra as curvas tracção-deformação das geogrelhas intactas e danificadas com os solos calcário e granítico. Constata-se que, em geral, o comportamento tracção-deformação dos materiais danificados com o solo calcário se encontra entre os observados para as geogrelhas intactas e danificadas com o solo granítico. Ambos os solos induzem redução da deformação na rotura da geogrelha extrudida uniaxial. A menor danificação provocada pelo solo calcário resulta, fundamentalmente, da dureza deste ser significativamente menor do que a do solo granítico.

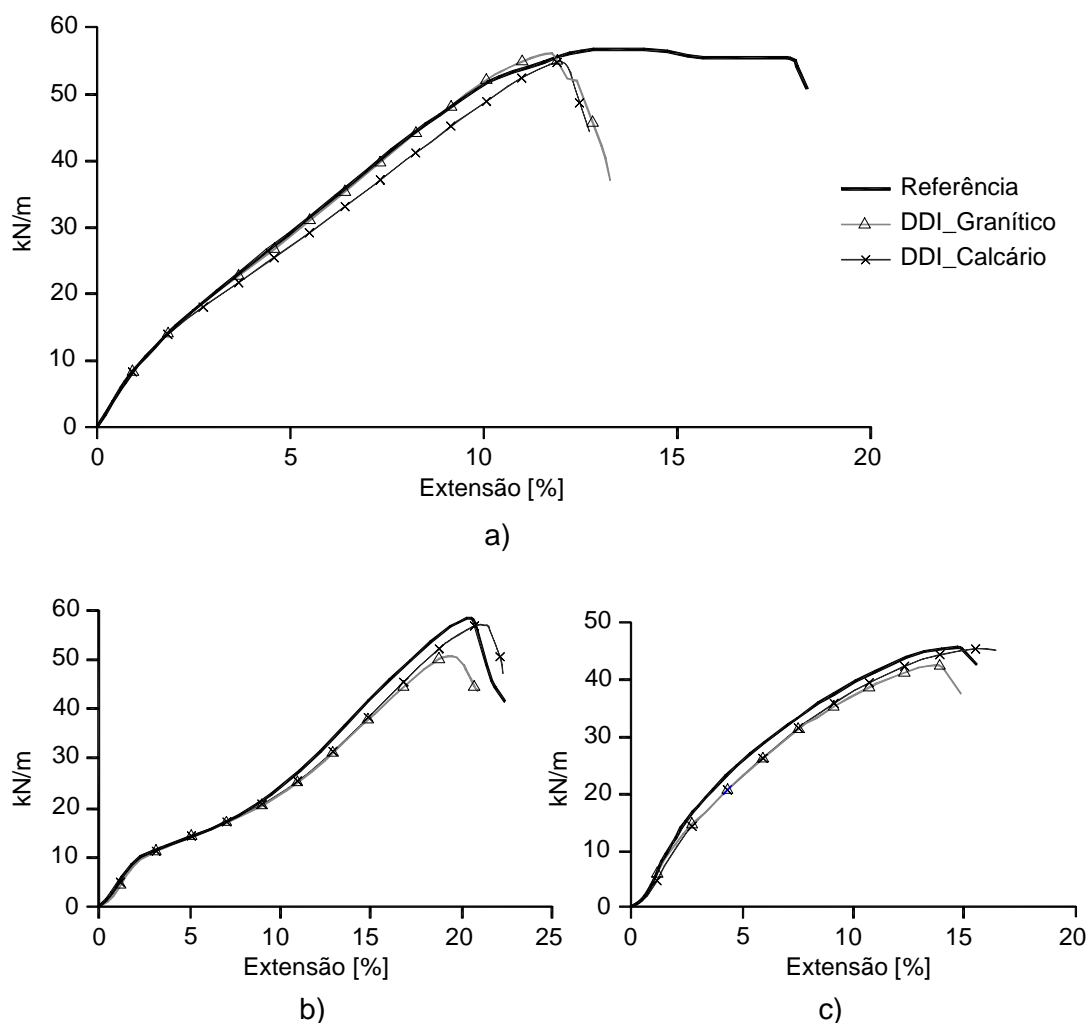


Figura 4. 23 – Curvas tracção-deformação: **a)** GGeu; **b)** GGtb; **c)** GGeb.

4.4.2.2 - Geotêxteis

Tal como para as geogrelhas a danificação induzida pelo solo calcário nos geotêxteis é menor do que a provocada pelo solo granítico (ver Figura 4.24a). As resistências retidas nos geotêxteis tecido e não tecido são, respectivamente, 75,2% e 88,1%, isto é cerca de 12% e 14% superior, respectivamente para o tecido e o não tecido do que quando o solo envolvente é granítico.

A resistência à tracção dos geotêxteis danificados com o solo granítico apresentam maiores coeficientes de variação (em %) (Figura 4.24b) do que quando danificados com o solo calcário ou intactos.

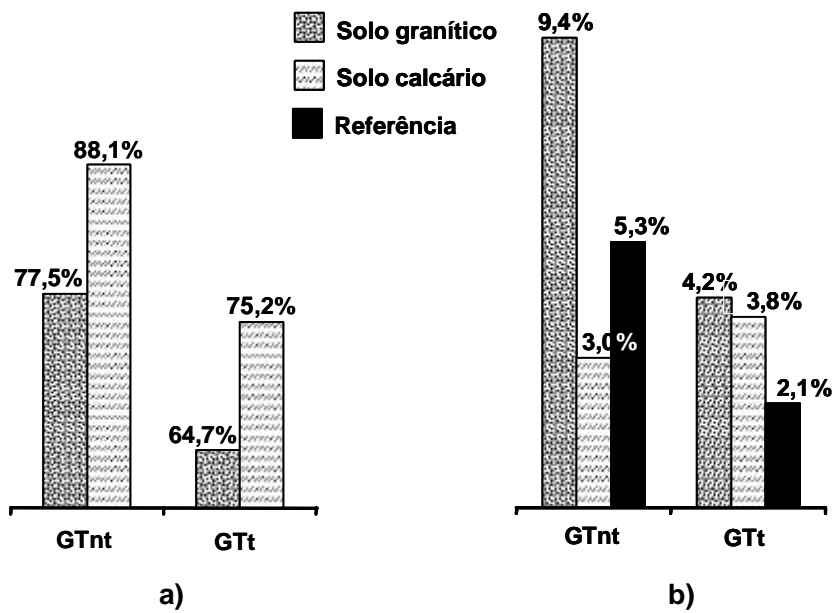


Figura 4. 24 – Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

Do mesmo modo que para as geogrelhas, observa-se que o comportamento tracção-deformação dos geotêxteis danificados com o solo calcário se encontra entre os correspondentes aos materiais intactos e danificados com o solo granítico (Figura 4.25).

Seja qual for o solo indutor da danificação observa-se a manutenção da deformação na rotura do geotêxtil não tecido. No caso do geotêxtil tecido danificado com o solo calcário verifica-se a redução da deformação na rotura, embora de menos significado do que quando o solo é granítico.

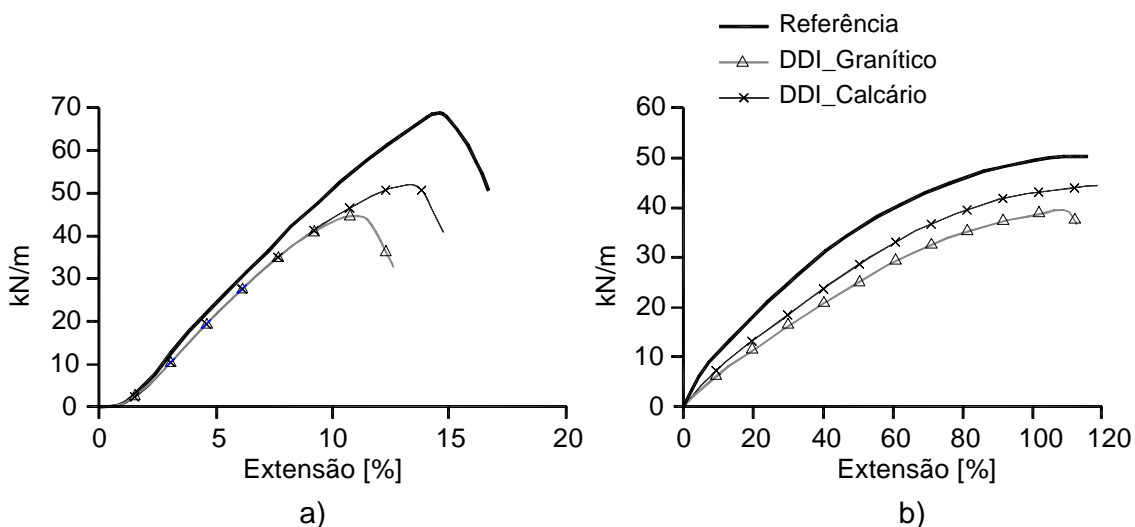


Figura 4. 25 – Curva tracção-deformação: a) GTt; b) GTnt.

4.4.2.3 - Geomenbranas

Nas geomenbranas as diferenças causadas pela danificação dos solos granítico e calcário são mínimas (1,1% e 1,5%, respectivamente para a lisa e para a rugosa) (Figura 4.26). O coeficiente de variação apresenta valores baixos.

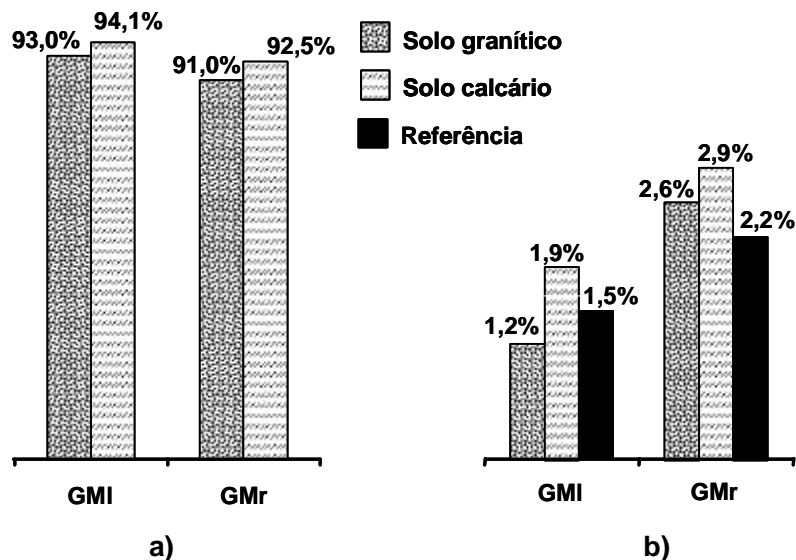


Figura 4. 26 – Geomenbranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

O comportamento tração-deformação das geomenbranas denota a pouca influência do tipo de solo na danificação durante a construção destes materiais (Figura 4.27), sendo as curvas correspondentes ao comportamento do material danificado praticamente coincidentes.

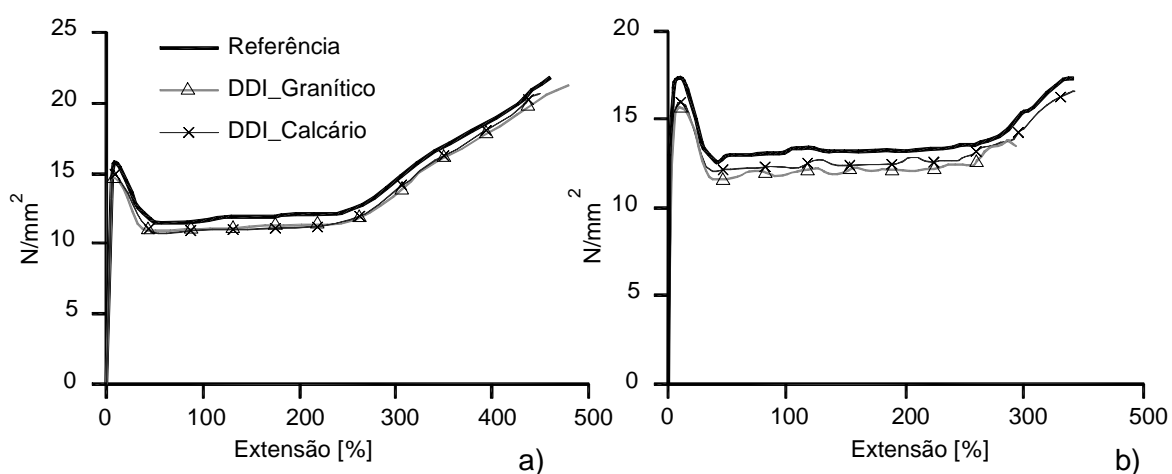


Figura 4. 27 – Curva tração-deformação: a) geomenbrana lisa; b) geomenbrana rugosa.

Importa realçar que a principal função das geomembranas é actuar como barreira a fluidos, função que não exige como propriedade fundamental a resistência à tracção, mas sim as relacionadas com a integridade do material, como as resistências ao rasgamento e ao punçoamento. Assim, para este geossintético, em particular, o estudo exaustivo da susceptibilidade à danificação durante a instalação deverá envolver a avaliação das resistências retidas ao punçoamento e ao rasgamento. Porém, tais estudos saem fora dos objectivos do presente trabalho razão pela qual não foram desenvolvidos.

4.4.2.3 – Nota Final

O estudo da influência do tipo de solo, nomeadamente da dureza deste, na danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório realça a menor agressividade do solo com menor dureza (solo calcário). Para ambos os solos mantém-se a influência da estrutura dos geossintético analisada em 4.4.1.

O comportamento tracção-deformação dos geotêxteis e das geogrelhas danificadas com o solo calcário está entre o observado nos materiais intactos e danificados com o solo granítico. O comportamento das geomembranas danificadas não apresenta alterações dignas de nota, seja qual for o solo confinante.

4.5 – ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS POR OUTROS AUTORES

4.5.1 – Simulação Laboratorial

Dado que o trabalho experimental desenvolvido seguiu os procedimentos descritos na EN ISO 10772-1 (Geotextiles and geotextile-related products – Procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular material) à excepção do referente ao tipo de material granular confinante dos geossintéticos, entendeu-se de interesse comparar os resultados obtidos no presente estudo com o geotêxtil tecido (GTt), a geogrelha tecida biaxial (GGtb) e a geogrelha extrudida biaxial (GGeb) e os publicados

por Pinho-Lopes et al. (2000), Lopes e Pinho-Lopes (2001), Pinho-Lopes e Lopes (2001) e Pinho-Lopes et al. (2002), utilizando os mesmos geossintéticos e agregado sintético (Corundum), tal como prescrito actualmente na Norma Europeia, enquanto norma de ensaio de conformidade.

Para a análise comparativa optou-se por considerar os resultados obtidos quando o solo confinante é granítico, não só por apresentar uma curva granulométrica idêntica à do material granular sintético, com 100% e 0% de passados, respectivamente nos peneiros de 10mm e de 5mm de abertura, mas fundamentalmente por ser este que provoca maior grau de danificação durante a instalação aos geossintéticos.

A Figura 4.28a compara as resistências retidas nos três geossintéticos considerados confinados pelo agregado sintético e pelo solo natural granítico. Da análise da figura pode-se referir que:

- os materiais danificados com o agregado sintético geralmente apresentam menor resistência retida, por conseguinte, este material é mais agressivo do que o solo granítico;

- a maior perda de resistência regista-se no geotêxtil tecido, onde o coeficiente parcial de segurança a aplicar à resistência à tracção do material intacto passa de 1,55, quando o solo confinante é granítico, para 2,31, quando o material granular envolvente é sintético.

- o coeficiente parcial de segurança de 1,13 a aplicar à geogrelha tecida biaxial, quando danificada com o solo granítico, sobe para 1,67 quando danificada com o agregado sintético;

- a geogrelha extrudida biaxial confinada pelo material granular sintético apresenta uma resistência retida superior a 100%, ou seja, o valor da resistência à tracção após danificação é superior à do material intacto, facto que pode ser explicado, em parte, pela reorientação de fibras dos geossintéticos durante o processo de danificação (Lopes e Pinho-Lopes, 2001).

- os geossintéticos com estruturas mais deformáveis (geotêxtil e geogrelha tecidos) traduzem a maior agressividade do material granular sintético através da apresentação de menores resistências retidas, porém é para estes geossintéticos e material confinante que se observam os valores mais elevados do coeficiente de variação da resistência à tracção (Figura 4.28b), denunciando a maior gama de valores da resistência obtidos nos ensaios de controlo da danificação;

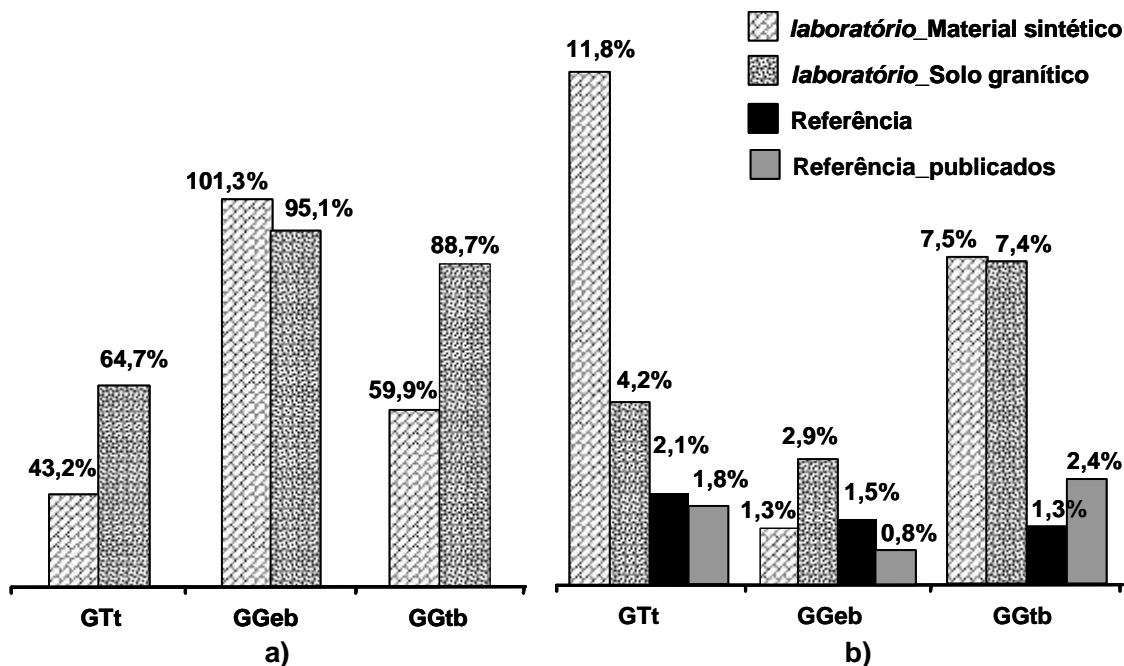


Figura 4. 28 – Geossintéticos: a) resistência retida; b) Coeficiente de variação.

4.5.2 – Simulação de Campo Versus Simulação Laboratorial

Considerando os mesmos geossintéticos e seguindo procedimentos laboratoriais de controlo da danificação durante a instalação idênticos aos utilizados no presente trabalho, Lopes e Pinho-Lopes (2001) procederam à simulação da danificação durante a instalação dos geossintéticos in situ, através da construção de aterros experimentais com dois solos reais, utilizando técnicas correntes de compactação e de controlo da mesma. São os resultados do estudo publicado pelas autoras que serão comparados de seguida com os do presente estudo.

4.5.2.1 – Descrição Resumida da Metodologia de Danificação de Campo

Era objectivo fundamental do estudo desenvolvido por Lopes e Pinho-Lopes (2001) avaliar a influência do tipo de solo e da energia utilizada na compactação dos mesmos na danificação real dos geossintéticos durante a instalação. Para tal, realizaram aterros experimentais sobre panos de geossintéticos, utilizando dois tipos de solo distintos (Solos 1 e 2 da Figura 4.29), um deles tipo tout-venant (Solo 1) e o outro um solo residual do granito (Solo 2). As características principais dos solos estão indicadas no Quadro 4.X. As energias de compactação aplicadas a cada um dos solos foram de 90% e 98%.

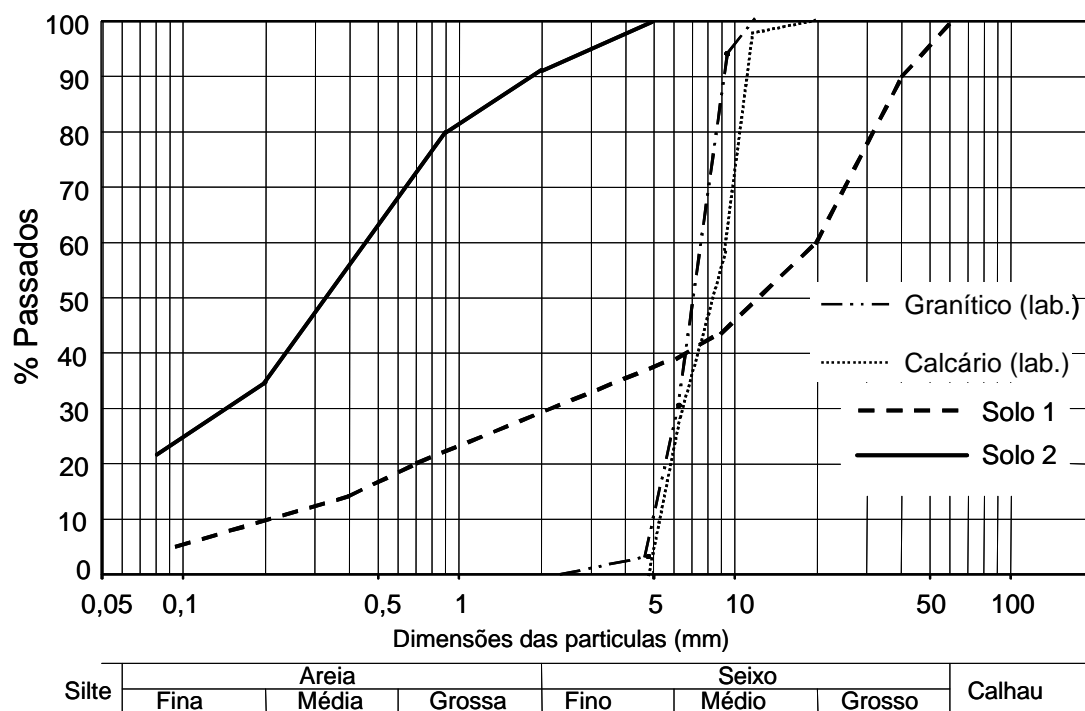


Figura 4. 29 – Curva granulométrica dos solos utilizados nos ensaios de danificação de campo e de laboratório.

Quadro 4. X – Caracterização laboratorial dos Solos 1 e 2.

| Materiais | Granulometria (%<0,074mm) | Limites | | | W _n (%) | EA (%) | Proctor | |
|-----------|------------------------------|---------|----|----|-----------------------|-----------|--------------------------------------|-------------------------|
| | | LL | LP | NP | | | γ_{dmax} g/cm ³ | W _{opt} (%) |
| Solo 1 | 5,18 | NP | NP | NP | - | 57,40 | 2,11 | 7,80 |
| Solo 2 | 21,53 | NP | NP | NP | 8,70 | 25,50 | 1,92 | 11,30 |

Por facilidade, quer de circulação dos equipamentos, quer do processo de compactação dos solos optou-se por separar os aterros correspondentes a energias de compactação distintas. Assim, foram executados, para cada tipo de solo, dois aterros diferentes, um para cada grau de compactação do solo.

Os procedimentos de execução dos aterros provisórios seguiram uma boa prática de instalação e, portanto, inevitáveis em qualquer obra em que materiais deste tipo sejam utilizados.

Assim, os aterros foram realizados sobre a plataforma da estrada, em que foi colocada uma camada de material idêntico ao que seria utilizado na construção do aterro. O material de aterro foi vertido e espalhado sobre a fundação numa camada com cerca de

150mm. Em seguida o material foi nivelado e compactado utilizando o equipamento de compactação considerado adequado (Figura 4.30 a).

Cada pano de geossintético foi estendido sobre a camada de aterro deixando livre, entre os diferentes tipos de geossintéticos, uma zona com cerca de 1,0m de comprimento (Figura 4.30 b). Em seguida o material de aterro foi espalhado em duas camadas de 300mm, niveladas e compactadas de forma a atingir o grau de compactação definido (Figura 4.30 c, d, e).

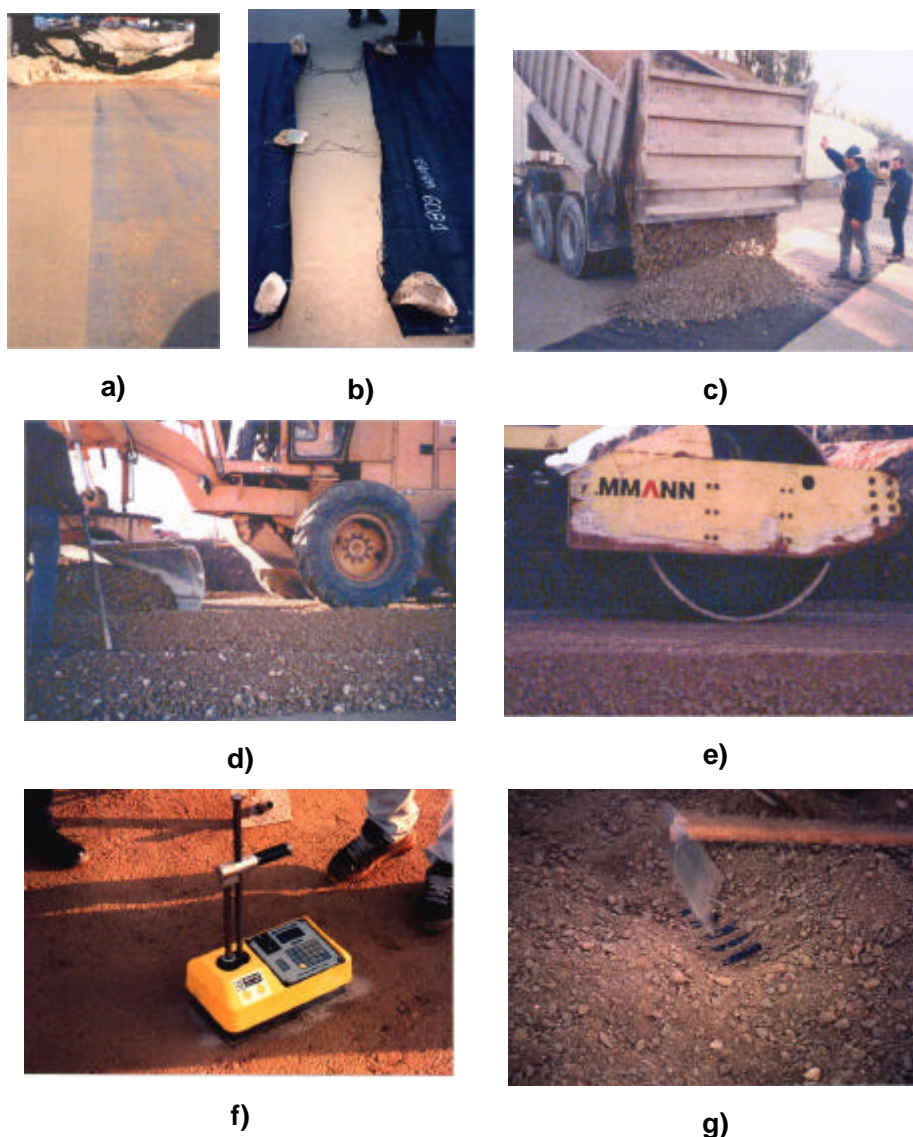


Figura 4. 30 – Sequência da execução dos aterros experimentais (Lopes e Pinho-Lopes, 2001).

O controlo do grau de compactação desejado (90% ou 98% do Proctor de cada um dos materiais de aterro) foi realizado recorrendo a um gamadensímetro (Figura 4.30 f).

Tal como se referiu anteriormente os aterros experimentais construídos tinham um carácter provisório, devendo ser removidos após a sua construção. As operações de remoção do material foram realizadas com especial cuidado para que não fosse induzida aos geossintéticos danificação adicional durante esse processo. Assim, nas proximidades dos geossintéticos o material de aterro foi removido manualmente (Figura 4.30 g).

4.5.2.2 – Análise Comparativa dos Resultados

A análise comparativa da danificação de campo e laboratorial induzida aos geossintéticos vai ser feita, como até aqui, em termos de resistência à tracção retida. Para facilitar a comparação, do ponto de vista granulométrico, dos solos utilizados, na Figura 4.29 apresentam-se, para além dos solos aplicados nos estudos de danificação campo os considerados nos estudos de danificação laboratorial.

A Figura 4.31 apresenta a resistência à tracção retida nos três geossintéticos em consideração após a danificação de campo e laboratorial, esta última incluindo a resultante da utilização de material granular sintético.

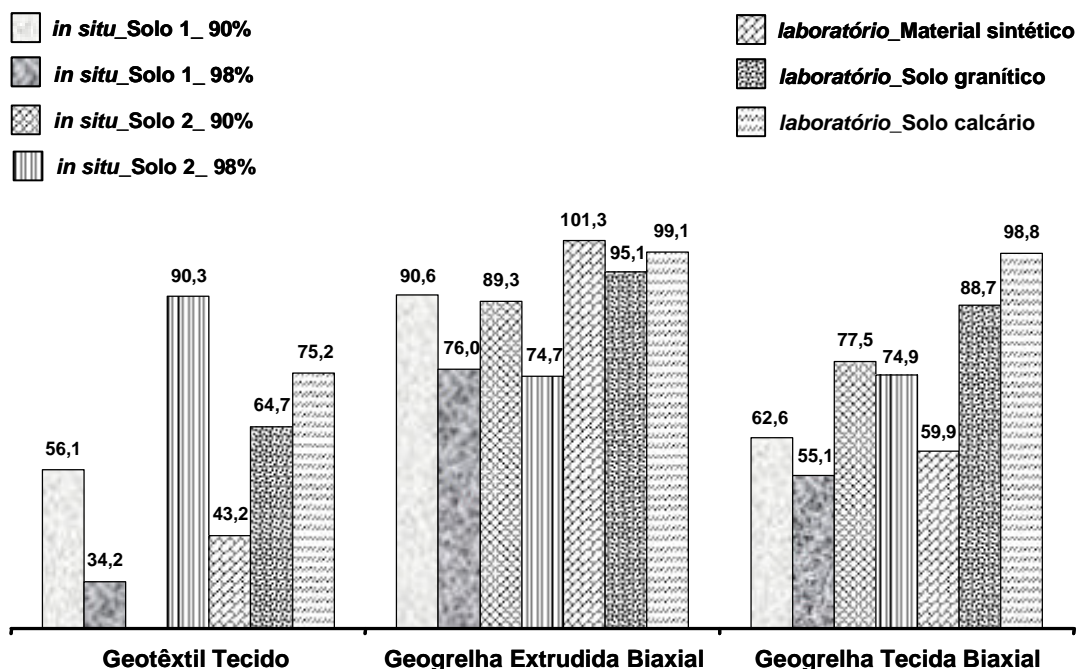


Figura 4. 31 – Resistência retida (em %) dos geossintéticos danificados no campo e em laboratório.

Observa-se uma grande variedade de valores para a resistência retida nos geossintéticos danificados em campo e no laboratório. De facto, registam-se valores para o parâmetro em causa variáveis entre 34% e 101%.

Com o objectivo de facilitar, quer a apresentação, quer a análise dos resultados obtidos, optou-se por apresentar em separado o comportamento à danificação de cada de geossintético considerado.

Geotêxtil tecido (GTt)

A Figura 4.32 apresenta a resistência à tracção retida no geotêxtil tecido danificado no campo e em laboratório (em %) e o coeficiente de variação (em %) dessa resistência. De referir que por motivos incontornáveis (roubo do material armazenado no estaleiro) não foi possível danificar o geotêxtil no campo com o Solo 2 para o grau de compactação de 90%.

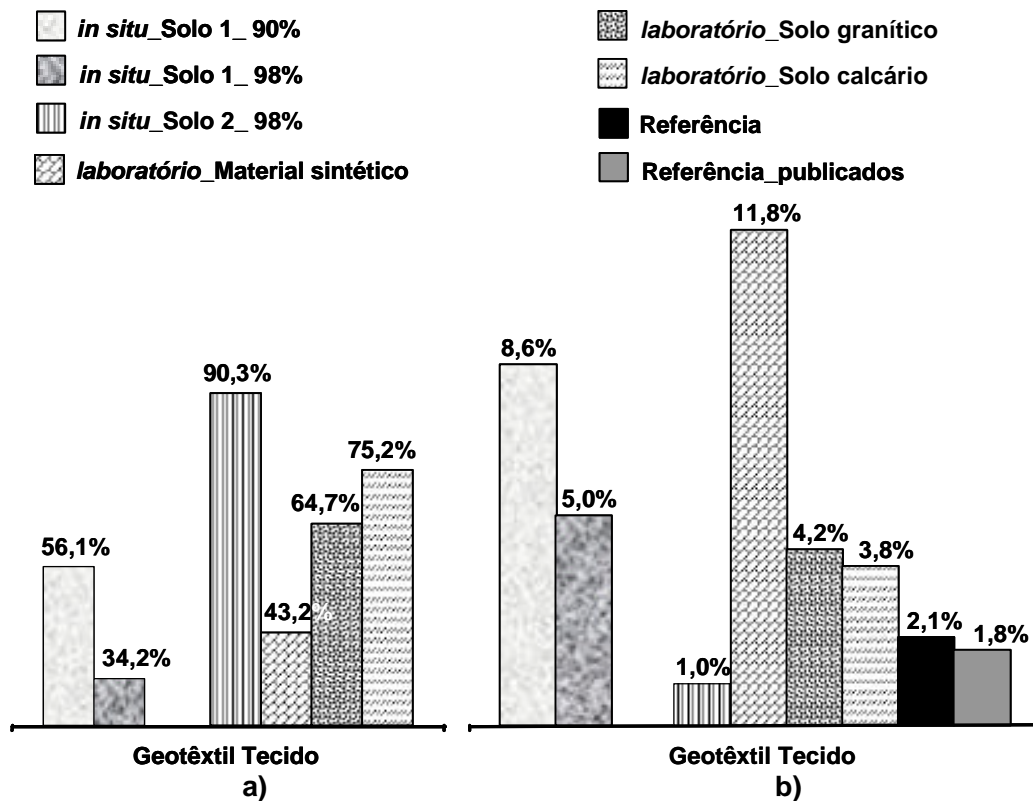


Figura 4. 32 – Geotêxtil tecido: a) resistência retida; b) Coeficiente de variação.

Verifica-se que a danificação in situ provocada pelo solo residual do granito (Solo 2) no geotêxtil tecido é significativamente menor do que a provocada pelos outros materiais granulares utilizados, mesmo para o grau de compactação mais elevado (98%). A principal razão para o comportamento observado tem a ver com a dimensão dos grãos do solo. Com efeito, a dimensão máxima dos grãos do Solo 2 é de cerca de 5mm, enquanto que o Solo 1 contém cerca de 60% de partículas maiores do que este valor e os materiais granulares usados em laboratório são constituídos praticamente na totalidade por grãos com dimensão superior a 5mm. Por isso, não é de estranhar a menor agressividade ao geossintético do solo residual. Assim, para solos com as características do Solo 2 constata-se que os resultados dos ensaios laboratoriais fornecem valores muito conservativos, especialmente quando é utilizado o agregado sintético previsto na EN ISO 10722-1. Os valores laboratoriais mais próximos dos registados in situ foram obtidos com o solo calcário (cerca de 20% do lado da segurança).

Quando o material de aterro apresenta uma percentagem de partículas grossas significativa, tal como o Solo1, a fiabilidade dos ensaios laboratoriais na previsão da danificação causada no geotêxtil tecido pelo tout-venant tem a ver com o grau de compactação. Com efeito, para 90% a danificação induzida in situ ao geotêxtil situa-se entre os valores obtidos em laboratório com o material granular sintético (cerca de 30% do lado da segurança) e com o solo granítico (cerca de 15% do lado da insegurança). Por outro lado, quando o grau de compactação é de 98% os resultados laboratoriais fornecem valores optimistas quanto à danificação induzida pelo tout-venant, sendo o valor mais próximo o obtido com o material granular sintético, contudo cerca de 25% superior, isto é do lado da insegurança.

O coeficiente de variação da resistência à tracção (Figura 4.32 b) do geotêxtil danificado in situ com o tout-venant é maior do que quando é danificado em laboratório com o solo residual do granito. Porém, o valor máximo deste coeficiente é obtido para o geotêxtil danificado em laboratório com o material granular sintético.

Em resumo, constata-se que a danificação induzida no geotêxtil tecido quando o material de aterro apresenta características semelhantes às do Solo 2 pode ter correspondência com os resultados laboratoriais desde que se utilize o solo calcário. Porém, o mesmo não se verifica quando o material de aterro apresenta características idênticas às do Solo 1 e o grau de compactação exigido é elevado.

Geogrelha extrudida biaxial (GGeb)

A danificação in situ da geogrelha extrudida é mais gravosa do que a registada em laboratório, seja qual for, neste último caso, o material confinante utilizado (Figura 4.33 a). A diferença entre os resultados de campo e os laboratoriais aumenta com o grau de compactação do material de aterro. Os valores laboratoriais mais próximos dos de campo são obtidos quando o material confinante é o solo granítico, mesmo assim, cerca de 5% e 25% mais optimistas, respectivamente para graus de compactação de 90% e de 98%.

De referir que a estrutura da geogrelha extrudida faz com que a influência do grau de compactação do material de aterro na danificação do geossintético diminua. De facto, para esta geogrelha a redução da resistência retida quando o grau de compactação do tout-venant passa de 90% a 98% é de cerca de 19%, enquanto que no geotêxtil tecido essa redução é de 64%.

Os coeficientes de variação da resistência à tracção da geogrelha danificada no campo são mais elevados do que os obtidos quando o geossintético é danificado em laboratório (Figura 4.33 b), reflectindo a maior gama de variação de resistência à tracção dos provetes danificados no campo.

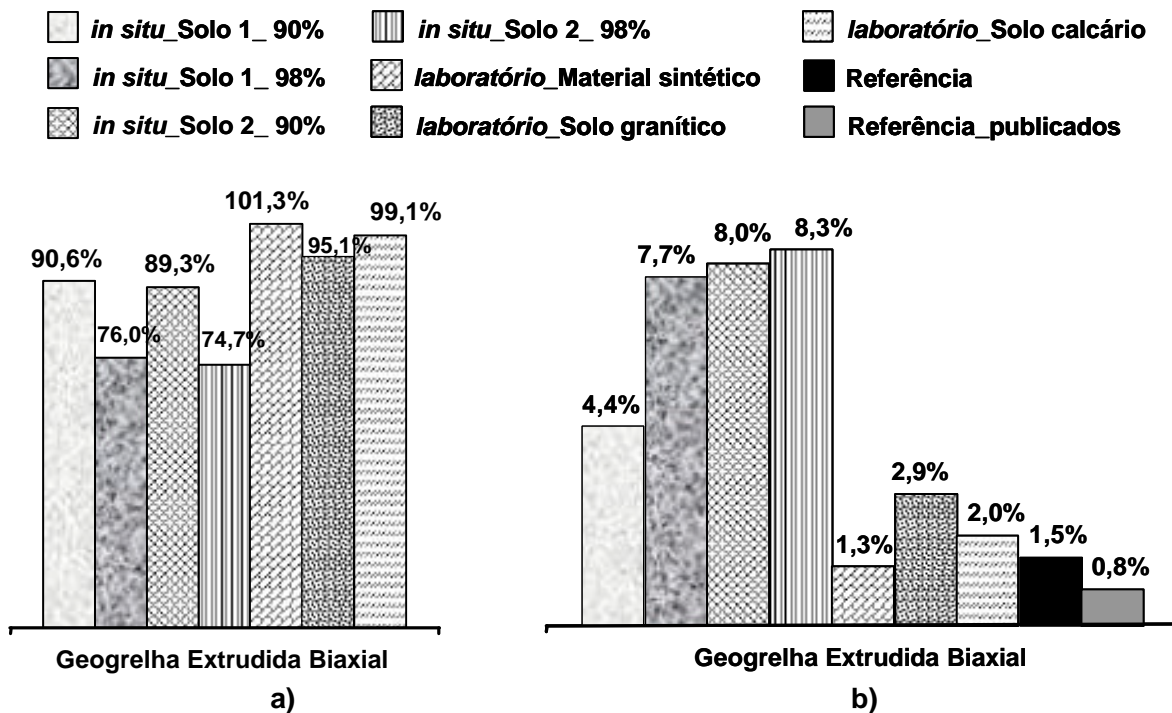


Figura 4. 33 – Geogrelha extrudida biaxial; **a)** Resistência retida; **b)** Coeficiente de variação.

Geogrelha tecida biaxial (GGtb)

Os resultados da danificação no campo da geogrelha tecida mostram que a utilização dos solos granítico e calcário na simulação laboratorial da danificação conduzem a resultados muito otimistas acerca do comportamento do geossintético (Figura 4.34 a). Porém, a utilização do material granular sintético conduz a resultados bastante concordantes com a danificação da geogrelha in situ quando o material de aterro é do tipo tout-venant (- 4,5% e + 9%, respectivamente para graus de compactação de 90% e 98%) e um pouco conservativos quando o material de aterro é o Solo 2 (cerca de - 29% e -25%, respectivamente para graus de compactação de 90% e 98%).

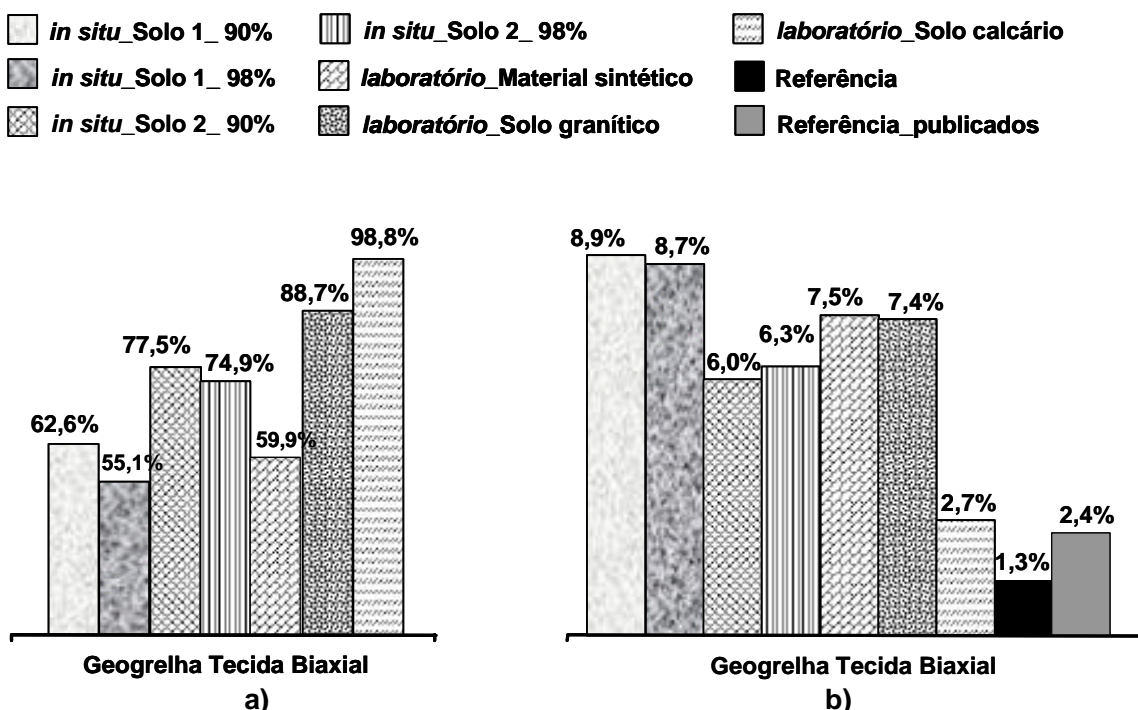


Figura 4. 34 – Geogrelha tecida biaxial: a) Resistência retida; b) Coeficiente de variação.

Enquanto que para a geogrelha extrudida o aumento da energia de compactação, independentemente do material de aterro, provocou uma redução de cerca de 19% da resistência retida, para a geogrelha tecida a influência do aumento da energia de compactação é menor (13,5% de redução de resistência para o Solo 1) e depende do tipo de material de aterro (3,5% de redução de resistência para o Solo 2).

Os valores do coeficiente de variação da resistência à tração podem ser considerados da mesma ordem de grandeza para a geogrelha tecida danificada no campo e em laboratório com o material granular sintético e com o solo granítico (Figura 4.34 b). A

danificação laboratorial com o solo calcário conduz a um valor do coeficiente de variação da resistência menor.

4.5.3 – Nota Final

Ao longo 4.5 comparou-se os resultados da danificação laboratorial de três geossintéticos considerados no presente trabalho com os publicados por outros autores que utilizaram os mesmos materiais poliméricos. Em primeiro lugar, comparou-se resultados laboratoriais obtidos seguindo os mesmos procedimentos normativos, à exceção do material confinante que era o material granular sintético indicado presentemente na EN ISO 10772-1, enquanto norma de ensaio de conformidade. De seguida, comparou-se os resultados laboratoriais com os resultantes da danificação no campo com dois tipos de solo e dois graus de compactação.

Apesar da grande variedade de valores da resistência retida nos geossintéticos danificados nas diferentes situações, é convergente que dos três geossintéticos considerados aquele que apresenta maior sensibilidade à danificação, independentemente das condições em que é danificado, é o geotêxtil tecido.

A danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório é maior quando o material confinante é o material granular sintético.

A simulação laboratorial da danificação durante a instalação do geotêxtil tecido conduz a valores conservativos quando o material de aterro é o solo residual do granito e o grau de compactação é elevado (98%). Quando o material de aterro é tout-venant os resultados laboratoriais dão valores optimistas, excepção feita para o grau de compactação de 90%. Neste caso, a utilização de material confinante sintético nos ensaios de laboratório fornece valores do lado da segurança para a danificação durante a instalação do geotêxtil.

A simulação laboratorial da danificação durante a instalação da geogrelha extrudida fornece valores optimistas, tanto mais optimistas quanto maior é o grau de compactação do material de aterro. Os valores mais próximos são obtidos quando o material confinante usado em laboratório é o solo granítico e o grau de compactação dos materiais de aterro é de 90%.

Ao contrário do que acontece para o geotêxtil, a danificação in situ da geogrelha extrudida é pouco sensível ao tipo de material de aterro.

A simulação laboratorial da danificação durante a instalação da geogrelha tecida com solos naturais confinantes conduz a valores otimistas. Quando nestes ensaios é usado material granular sintético verifica-se uma concordância razoável com a danificação obtida através de ensaios de campo com o Solo 1 (tout-venant). Quando o material de aterro é o Solo 2 os resultados laboratoriais fornecem valores do lado da segurança.

A influência do grau de compactação do material de aterro na danificação durante a instalação dos geossintéticos depende da estrutura destes, sendo muito significativa para o geotêxtil tecido e pouco importante quando sobre a geogrelha tecida é colocado e compactado o solo residual do granito (Solo 2).

O estudo comparativo efectuado realça a importância do desenvolvimento de investigação no sentido de definir o material granular confinante a utilizar nos ensaios de laboratório que melhor simule a danificação durante a instalação dos geossintéticos em obras reais, uma vez que é impraticável, por razões económicas e de tempo, executar aterros experimentais para definição do coeficiente de segurança parcial a aplicar ao geossintético no dimensionamento da estrutura onde ele se insere.

4.6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se laboratorialmente a danificação de geossintéticos durante a instalação, de modo a quantificar a influência, quer do tipo de solo, quer da estrutura do geossintético.

Posteriormente, realizou-se uma análise comparativa da danificação durante a instalação de três dos geossintéticos estudados com resultados dos mesmos materiais danificados em campo e em laboratório, neste último caso confinados por material granular sintético.

A caracterização da danificação causada ao material, foi avaliada através do comportamento mecânico a curto prazo dos geossintéticos.

Com base nos resultados obtidos é possível formular as seguintes conclusões:

- a estrutura do geossintético é um parâmetro fundamental na resposta às acções mecânicas a que está sujeito durante a instalação em obra;

- assim, dos geossintéticos considerados aqueles que revelaram maior susceptibilidade à danificação durante a instalação foram os geotêxteis, em particular os tecidos;

- a dureza do solo confinante influencia o grau de danificação induzida aos geossintéticos, aumentando a danificação com a dureza do solo;

- a danificação durante a instalação altera o comportamento tensão-deformação do geossintético, tanto mais quanto maior for a danificação induzida pelo solo;

- dos geossintéticos considerados no estudo aqueles que revelaram menor perda de resistência à tracção foram as geomembranas; porém, é de realçar que sendo a função destes geossintéticos a barreira a fluidos, propriedades relacionadas com a integridade do material, como as resistências ao punçoamento e ao rasgamento, assumem mais relevo do que a resistência à tracção;

- a danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório é maior quando o material confinante é o material granular sintético.

- ao contrário do que acontece com os outros geossintéticos, a danificação in situ da geogrelha extrudida é pouco sensível ao tipo de material de aterro;

- a influência do grau de compactação do material de aterro na danificação durante a instalação dos geossintéticos depende da estrutura destes, sendo muito significativa para o geotêxtil tecido e pouco importante quando sobre a geogrelha tecida é colocado e compactado o solo residual do granito;

- para os geossintéticos considerados não se verifica convergência em relação ao material granular confinante a utilizar nos ensaios laboratoriais de danificação durante a instalação de geossintéticos;

- no caso do geotêxtil tecido os resultados laboratoriais, seja qual for o material granular confinante, são conservativos quando o material de aterro é o solo residual do granito; pelo contrário, quando o material de aterro é o tout-venant os resultados

laboratoriais são optimistas, à excepção de quando o grau de compactação é de 90% e é usado material confinante sintético nos ensaios de laboratório;

- para as geogrelhas os resultados laboratoriais são optimistas, com os três tipos de materiais confinantes no caso da extrudida, e, com os solos naturais no caso da tecida;

- quando o material confinante é sintético os resultados laboratoriais de danificação da geogrelha tecida são razoavelmente concordantes com os obtidos em aterros experimentais com tout-venant; quando o material de aterro é o solo residual do granito os resultados laboratoriais fornecem valores do lado da segurança;

- o estudo comparativo efectuado realça a importância do desenvolvimento de investigação no sentido de definir o material granular confinante a utilizar nos ensaios de laboratório que melhor simule a danificação durante a instalação dos geossintéticos em obras reais, uma vez que é impraticável, por razões económicas e de tempo, executar aterros experimentais para definição do coeficiente de segurança parcial a aplicar ao geossintético no dimensionamento da estrutura onde ele se insere.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o trabalho que agora finda, em que se estudou danificação durante a instalação de geossintéticos, pretende-se contribuir para o esclarecimento e divulgação deste fenómeno. Sendo este dependente de vários factores e apesar dos estudos já realizados em campo e laboratório há pouco consenso em relação a um método universal de avaliação da danificação dos geossintéticos, uma vez que é difícil estabelecer condições e resultados padrão.

Dos artigos publicados internacionalmente infere-se que a avaliação da danificação em campo e simulada em laboratório é feita em conformidade com os procedimentos que levam à sua execução, justificando-se assim a disparidade de resultados existente entre autores.

Tomando em consideração a Norma Europeia publicada, que regulamenta os procedimentos a ter em conta na simulação da danificação durante a instalação, o Laboratório de Geossintéticos da FEUP desenvolveu um equipamento para o efeito.

Procurou-se realizar um programa de ensaios tão extenso quanto possível, atendendo aos limites de tempo e de equipamentos associados a uma dissertação de Mestrado. Os ensaios realizados, segundo os procedimentos descritos na norma, à excepção do referente ao tipo de material granular confinante dos geossintéticos, visam a avaliação da influência na danificação da estrutura dos geossintéticos e do tipo de material

granular e a comparação dos resultados obtidos com resultados de campo e de laboratório, neste último caso, utilizando o agregado sintético (*Corundum*), de modo a testar a capacidade de simulação da danificação do equipamento.

Acerca do prosseguimento dos estudos importa realçar que: devido à necessidade e importância de contribuir para o desenvolvimento de um ensaio laboratorial que simule convenientemente as condições reais de danificação é de todo o interesse a realização de mais ensaios laboratoriais e de mais comparações entre os resultados de laboratório e de campo; assim como um estudo mais aprofundado acerca dos procedimentos de ensaio, nomeadamente os ciclos de carga descarga, altura do solo confinante e pressão aplicada. Relativamente ao material granular utilizado deve fazer-se um desenvolvimento na investigação, de forma a encontrar aquele que em laboratório melhor simule as condições reais de danificação. Finalmente, deverão ser desenvolvidos esforços para que num futuro próximo possa existir um método laboratorial universal para determinar a influência da danificação durante a instalação nas propriedades dos geossintéticos.

A respeito do efeito da danificação durante a instalação no comportamento mecânico dos geossintéticos a longo prazo, há muito que investigar. Novos estudos devem ser realizados para uma melhor compreensão do fenómeno, e assim, verificar se o seu efeito é ou não idêntico ao verificado a curto prazo.

É ainda de realçar o interesse em avaliar a influência da danificação noutras propriedades dos geossintéticos, nomeadamente na resistência das interfaces solo-geossintético e nas hidráulicas.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO M288-96, (1996). "Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing", Standard Specifications for Geotextiles, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC.
- AASHTO, (1997). "Standard specifications for highway bridges", 16th edition, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC, USA.
- ALLEN, T. M. (1991). "Determination of long-term tensile strength of geosynthetics: A state-of-the-art review", Proceedings of Geosynthetics'91, Atlanta, GA, USA, pp. 351-379.
- ALLEN, T. M.; BATHURST R. J. (1996). "Combined allowable strength reduction factor for geosynthetic creep and installation damage", Geosynthetics International, Vol. 3, No 3, pp. 407-439.
- ALLEN, T. M.; BATHURST, R. J. (1994). "Characterization of geosynthetics load-strain behaviour after installation damage", Geosynthetics International, Vol. 1, No 2, pp. 181-199.
- ASTM D638, "Tensile properties of plastics", Standards, American Society for Testing and Materials.
- ASTM, (1997). "Annual books of ASTM standards, American Society for testing and materials", Philadelphia, Pennsylvania. Volume 4.08 (I), Soil and Rock and Volume 4.08(II), Soil and Rock; Geosynthetics.
- AUSTIN, R. A. (1998). "Installation effects on geosynthetics" Seminar Volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Surrey, UK, pp. 3.2.1-3.2.7.
- BILLING, J. W.; GREENWOOD, J. H. & SMALL G. D. (1990). "Chemical and mechanical durability of geotextiles", 4th Int. Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, Netherlands.

- BNSR, (1991). "Safety coefficient for geotextiles and relatives products", French Standard Commission on Geotextiles and Relatives Products, Project GTX 71.
- BONAPARTE, R.; KAMREL, M. I.; DIXON, J. H. (1984). "Use of geotextiles in soil reinforcement", Proc. of the Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.
- BONN. (1995). "Bundesminister für Verkehr, Technische Lieferbedingungen für Geotextilien und Geogitter im Erdbau (TL Geotex-E-Stb).
- BRADY, K. C.; WATTS, G. R. A.; NAGARKATTI, A. S.; GREENWOOD, J. H. (1994). "Instalation damage trials on geotextils", Research Report 382, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK, ISSN 0266-5247; pp. 33.
- BRÄU G. (1998a). "Actual regulations due to damage during installation". Seminar Volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Surrey, UK, pp. 4.1-4.4.
- BRÄU, G. (1996). "Damage of geosynthetics during installation – experience from real sites and research works", Geosynthetics: Applications, Design and construction, First European Geosynthetics Conference, Eurogeo 1, pp. 145-150, Maastricht, The Netherlands.
- BRÄU, G. (1998b). "Experience with damage during installations in Germany – Field and laboratory testing". Seminar in Installation Damage in Geosynthetics, November 1998, ERA Technology, U.K., pp. 2.1.1 a 2.1.15.
- BS 8006 (1995). "Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills", British Standards Institution, London, UK, pp. 162.
- BUSH, D. I. (1988). "Evaluation of the effects of construction activities on the physical properties of polymeric soil reinforcing elements", Theory and practice of earth reinforcement, ed Yamanouchi T. *et al.*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 63-68.
- BUSH, D. I.; SWAN, D. B. G. (1986). "Procedures for assessing the site damage of tensar SR-55, SR-80 and SR-110", Unpublished Report, Netlon Corporation.
- CEN (1998). "Geotextiles and geotextile-related products: Guide to Durability". CEN Report, Brussels, in press.

- CHRISTOPHER, B. R.; ELIAS, V. (1998). "Evaluation of installation damage in geosynthetics: a US perspective", Seminar Volume on installation damage on geosynthetics, Leatherhead, Surrey, UK, pp. 1.2.1-1.2.12.
- CHRISTOPHER, B. R.; HOLTZ, R. D. (1984). "Geotextil Engineering Manual", FHWA DTFH 61-80-C-0094, Washington DC, USA.
- COOKE, T. F. e REBENFELD, I. (1988). " Effect of chemical composition and physical structure of geotextiles on their durability", Int. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol. 7, nº 1 e 2, pp.7-22.
- COWLAND, J.W.; YEO, K. C.; GREENWOOD J.H. (1998). "Durability of polyester and polypropylene geotextiles buried in a tropical environment for 14 years" Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Vol. 2, pp. 669-674.
- DIEDERICH, R. (1998). "Improvements in the damage resistance of nonwoven materials", Seminar Volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Surrey, UK.
- ELIAS, V. (1989). "Durability/corrosion of soil reinforced structures", FHWA RD 89-186, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- ELIAS, V. (1990). "Durability/Corrosion of soil Reinforced Structures", Report to Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, No. FHWA/RD-89/186, Washington, D.C., USA, 163 p.
- ELIAS, V. (1997). "Corrosion/degradation of soil reinforcements for mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes", FHWA-SA-96-072, National Technical Information Office, Springfield VA, USA, pp. 105.
- ELIAS, V.; CHRISTOPHER, B. R. (1996). "Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D. C.
- ELIAS, V.; SALMAN, A.; GOULIAS, D. (1998). "The effect of PH, resin properties, and manufacturing process on laboratory degradation of polyester geosynthetics", Geosynthetics International Vol. 5 No. 5, pp. 459-489.
- EN ISO 10319, Geotextiles – Wide-width tensile test.

EN ISO 13431, Geotextiles and geotextile-related products – Determination of tensile creep and creep rupture behaviour.

ENV 12224 (1996). "Geotextiles and geotextile-related products. Determination of the resistance to weathering". CEN, Brussels.

ENV 12225 (1996). "Geotextiles and geotextile-related products. Method for determining the microbiological resistance by a soil burial test. CEN, Brussels.

ENV 12447 (1997). "Geotextiles and geotextile-related products. Method for determining the resistance to hydrolysis". CEN, Brussels.

ENV ISO 10722-1, (1998), Geotextiles and geotextile-related products – Procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular materials. CEN, Brussels, Belgium.

FINNIGAN, J. A. (1977). "The creep behaviour of high tenacity yarns and fabrics used in civil engineering applications". Proc. Int. Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, Paris, Vol. 2, pp. 305-309.

FLOSS, R.; LAIER, H.; BRÄU, G. (1990). "Dynamic loading of geotextile/soil-systems", 4. Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and related Products, The Hague.

FOX, P. J.; TRIPLETT, E. J.; KIM, R. H.; OLSTA, J. T. (1998). "Field study of installation damage for geosynthetic clay liners", Geosynthetics International, Vol. 5, No. 5, pp. 491-520.

G. den HOEDT, (1986). "Creep and relaxation of geotextile fabrics". Int. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol. 4, n° 2, pp. 83-92.

GIROUD, J. P. (1986). "From geotextiles to geosynthetics: a revolution in geotechnical engineering". Proc. 3th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related products, Vienna, Vol. 1, pp. 1-18.

GREENWOOD, J. H. (1997). "Designing to residual strength of geosynthetics instead of stress-rupture", Geosynthetics International, Vol 4, No 1, pp 1-10.

GREENWOOD, J. H. (1998a) "The assurance of durability" Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 2, pp. 657-662.

- GREENWOOD, J. H. (1998b). "The nature of mechanical damage". Seminar Volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Surrey, UK.
- GREENWOOD, J. H. and YEO, K. C. (1996). "Assessment of geogrids for soil reinforcement in Hong Kong", Earth Reinforcement, eds. Ochiai, H., Yasufuku, N. and Omine k., Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 363-367.
- GREENWOOD, J. M. e MYLES B. (1986). "Creep and stress relaxation of geotextiles". Proc. 3rd Int. Conf. on Geotextiles, Vienna, Vol. 3, pp. 821-826.
- GUAN, Z. & HSUAN, Y. G. (1998) "Antioxidant depletion during thermal oxidation of high density polyethylene geomembranes", Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Vol. 1, pp. 371-374.
- HOLTZ, R. D.; CHRISTOPHER, B. R.; BERG R. R. (1997). "Geosynthetic Engineering", BiTech Publishers Ltd., Richmond, British Columbia, Canada.
- HSUAN, Y. G. (1998). "Temperature effect on the stress crack resistance of high density polyethylene geomembranes", Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Vol. 1, pp. 371-374.
- HULLINGS, D.; KOERNER, R. (1991). "Puncture Resistance of Geomembranes using a truncated cone test", Proceedings of geosynthetics 91, Vol. 1, IFAI and NAGS, Atlanta, Georgia, USA.
- INGOLD, T. S. (1996). "Geotextiles and Geomembranes Manual", ISBN 1 85617 198 1, Elsevier Publ., 610p..
- JEWELL, R. A. (1985). "Material properties for the design of geotextile reinforced slopes", Int. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol. 2, No 2, pp. 83-109.
- KHAY, M. (1998). "Geotextile damage at installation: French experience and laboratory test results with the experimental European standard". Seminar Volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Surrey, UK.
- KHAY, M.; KHAY, A. & LOZACH, D. (1998). "Endommagement mécanique à la mise en oeuvre – étude paramétrique de l'essai d'endommagement selon la norme européenne ENV ISO 10 722 – 1: 1997", CER-LCPC Report.

- KOERNER, G. R.; KOERNER R. M. (1990). "The installation survivability of geotextiles and geogrids", 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, ed. Den Hoedt G. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 597-602.
- KOERNER, G.; KOERNER, R.; ELIAS, V. (1993). "Geosynthetics installation damage under two different backfill conditions", Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures, ASTM STP 1190, Philadelphia.
- KOERNER, R. M. (1990). " Designing with geosynthetics". Prentice-Hall, Englewood cliffs, New Jersey, 2nd ed., 652 páginas.
- KOERNER, R.; KOERNER, G. (1988). "A quantification and assessment of installation damage to geotextiles", Institutes Report, not published, Philadelphia, USA.
- KÖLN., (1994). "Forschungsgesellschaft für StraBen – und Verkehrswesen," Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau.
- LADEIRA, M. A. S. A. (1995). "Estudo dos fenómenos de interacção solo-geossintético através de ensaios de arranque", Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil na F.E.U.P., Porto.
- LAIER, H.; BRÄU, G. (1986). "The use of geotextiles in road constructions under intensive dynamic loading", 3. Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and related Products, Vienna, pp. 99-104.
- LOPES, M. L. C. (1992). "Muros reforçados com geossintéticos". Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil na F.E.U.P., Porto.
- LOPES, M. L. C. (1998). "Aplicação de geossintéticos em engenharia". Projecto de Estruturas de Betão, F.E.U.P., Porto.
- M. LURDES COSTA LOPES e MARGARIDA PINHO LOPES (2001). "Danificação Durante a Construção de Geossintéticos – Estudo dos coeficientes de Segurança a Adoptar", Relatório da acção de investigação desenvolvida no âmbito do protocolo ICERR/FEUP, 78p., Porto.

- M. PINHO-LOPES; C. RECKER; M. L. LOPES; J. MÜLLER-ROCHHOLZ (2002). "Experimental analysis of the combined effect of installation damage and creep of geosynthetics – new results", Proceedings of the 7th Int. Conf. on Geosynthetics, Vol. 4, pp. 1539-1544, Nice, France.
- MAISONNEUVE, C.; PIERSON, P.; DUQUENNOI, C. & MORIN, A., (1998), "Assessing the long term behaviour of geomembranes en multi – factor environments", Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Vol. 1, pp. 355-358.
- MARGARIDA P. LOPES e M. LURDES LOPES (2001). "Efeito no comportamento mecânico dos geossintéticos da danificação sofrida durante a instalação – resultados iniciais", Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia – Geotecnia nº 93, pp. 81- 99, Lisboa.
- MATICHARD, Y. ; LECLERQ, B. ; e SEGOUIN, M. (1990). " Creep of geotextiles: soil reinforcement applications". Proc. 4th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, Vol. 2, pp. 661-665.
- McGOWN, A.; PAINE, N. e DUBOIS, D. (1984). "Use of geogrids properties in limit equilibrium analysis". Proc. Conf. on Polymer Grid Reinforcement, Thomas Telford, ed., London, pp. 31-36.
- PERRIER, H. & LOZACH, D. (1986). "Essai de poinçonnement sur géotextile: influence des sollicitations de compactage", CER-LCPC Report.
- PINHO LOPES M. (1998). "Estudo da influência da granulometria do solo e da estrutura do reforço nos mecanismos de interação solo geossintético". Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil na F.E.U.P., Porto.
- PINHO-LOPES M.; RECKER C.; MÜLLER-ROCHHOLZ J.; LOPES M. L. (2000). "Installation damage and creep of geosynthetics and their combined effect – experimental analysis", Proceedings of the EUROGEO 2000, 2nd European Geosynthetics Conference, Vol. 2, pp. 895-897, Bologna, Italy.
- POPELAR, C. H.; KUHLMAN, C. J. & PEGGS, I. D. (1998). "A fracture mechanics assessment for the long-term durability of HDPE geomembranes", Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Vol. 1, pp. 365-370.

- RAINEY, T.; BARKSDALE, R. (1993). "Construction Induced reduction in tensile strengths of polymer grids", Proceedings of geosynthetics 93, IFAI and NAGS, Vancouver, Canada.
- RICHARDSON, G. N. (1998). "Geosynthetic survivability", Geotechnical Fabrics Report, Industrial Fabrics Association International, Roseville, Minnesota.
- SALMAN, A.; ELIAS, V. & DIMILLIO, A. (1998). "The effect of oxygen pressure, temperature and manufacturing processes on laboratory degradation of polypropylene geosynthetics" Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Vol. 2, pp. 683-690.
- SALMAN, A.; ELIAS, V. AND PIERCE, E. (1997). "Durability of Geosynthetics based on accelerated laboratory testing", Conference Proceedings, Geosynthetics 97, California, Vol. 1 pp. 217-235.
- SANDRI, D.; MARTIN, J. S.; VANN, C. W.; FERRER, M.; ZEPPENFIELD, I. (1993). "Installation damage testing of four polyester geogrids in three soil type", proceedings of geosynthetics 93, Vol. 1, IFAI and NAGS, Vancouver, BC, Canada.
- SCHMIDT, H. M.; RISSEEUW, P.; VOSKAMP, W. (1994). "The hydrolytic stability of PET yarns under medium alkaline conditions", Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, Vol. 3, pp. 1153-1158.
- SOTTON, M.; LECLERCQ, B. (1982). "Some answer's components on durability problem on geotextiles", 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA.
- VAN LEEWEN, J. H. (1977). "New methods of determining the stress-strain behaviour of woven and non woven fabrics in the laboratory and in practice". Proc. Int. Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, Paris, Vol. 2, pp. 299-304, Vol. 3, p. 102.
- WANT, A.; EIKSUND, G.; KNUTSON, Á. (1998). "Deformation and damage of non-woven geotextiles in road construction", Appendix 1, Sixth International Conference on Geosynthetics, pp. 933-938.
- WATTS, G. R. A.; BRADY, K. C. (1990). "Site damage trials on geotextiles", 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, ed. Den Hoedt G. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 603-607.

- WATTS, G. R. A.; BRANDY, K. C. "Geosynthetics: Installation damage and the measurement of tensile strength", 5th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and related Products, Singapore.
- WAYN,E M. H.; BARROWS, R. J. (1994). "Construction damage assessment of nonwoven geotextile", Transportation Research Record 1439, Transportation Research Board, Washington D. C.
- WILMERS, W. (1996). "Installation of geosynthetics in road constructions – possibilities, problems and solutions", Geosynthetics: Applications, Design and construction, First European Geosynthetics Conference EUROGEO 1, Maastricht.
- WILMERS, W.; SAATHOFF, F. (1995). "The new German geotextile robustness classification", Geosynthetics World, Vol. 5 No. 3.
- YEO, K. C. (1985). "The behaviour of polymeric grids used for soil reinforcement". Ph.D. Theses, University of Strathclyde, Glasgow.
- ZORNBERG, J. G.; BARROWS, R. J.; CHRISTOPHER, B. R. and WAYNE, M. H. (1995). "Construction and instrumentation of a highway slope reinforced with high – strength geotextiles", Proceedings of geosynthetics 95, Vol. 1, IFAI and NAGS, Nashville, Tennessee, USA.