

CARACTERIZAÇÃO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA DE GEOSSINTÉTICOS

FRANCISCO MANUEL MATOS VIOLANTE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Maria de Lurdes da Costa Lopes

Coorientador: Doutor José Ricardo da Cunha Carneiro

FEVEREIRO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, ao meu irmão, e em memória de Maria Carina Azevedo

“Não se está propriamente nas nuvens sempre... Todos temos fases menos boas. Se calhar atualmente não há nada que me faça acordar e ser feliz e pensar que sou uma privilegiada. Às vezes são essas sensações de saber que somos significantes para alguém que nos impulsionam a ser felizes e a buscar mais sensações dessas...”

Maria Carina Azevedo

AGRADECIMENTOS

Depois do fim deste ciclo não posso deixar de agradecer a todas as pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho se realizasse, em particular:

- À minha orientadora Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, pelos ensinamentos transmitidos,
- Ao meu coorientador Doutor José Ricardo Carneiro, pelo apoio e pela orientação ao longo de toda a realização deste trabalho,
- Ao Engenheiro Paulo Peixoto Pereira, Engenheiro Alberto Simão e à minha colega Filipa Escórcio,
- Aos meus amigos Bruno Barroso Gomes, Pedro Teles e Renato Moreira,
- A todos os meus familiares,
- E por último e mais importantes na minha vida, os meus pais e irmão, pelos sacrifícios, pela paciência, pela compreensão, apoio incondicional e encorajamento durante toda a minha vida.

RESUMO

Os geossintéticos são materiais poliméricos com uma vasta aplicação em obras de engenharia civil, podendo estar sujeitos a danificação mecânica. As tensões induzidas durante o processo de instalação podem causar alterações nas propriedades dos materiais, comprometendo o funcionamento para o qual estes são dimensionados. Nos últimos anos foram desenvolvidos estudos que permitem compreender melhor o comportamento dos geossintéticos e das estruturas onde são aplicados, levando a uma melhor percepção dos principais mecanismos que condicionam o funcionamento destes materiais.

A presente dissertação foi desenvolvida com o objetivo de caracterizar a danificação que ocorre nos geossintéticos quando sujeitos a cargas dinâmicas. Para tal, foram escolhidos cinco geossintéticos (dois geotêxteis tecidos, dois geotêxteis não-tecidos e uma geogrelha) de modo a perceber a influência da danificação mecânica em diferentes tipos de geossintéticos. Os materiais foram danificados laboratorialmente (num equipamento protótipo) de acordo com a norma EN ISO 10722: 2007. Neste ensaio, os geossintéticos foram colocados entre duas camadas de solo e foram sujeitos a 200 ciclos de carga dinâmica (entre 5 e 500 kPa) a 1 Hz. Os solos utilizados para a danificação mecânica foram: o agregado sintético definido na norma (*corundum*) e cinco solos naturais (areia siltosa, areia 0/4, *tout-venant*, brita 4/8 e brita 6/14). Os danos ocorridos nos geossintéticos durante os ensaios de danificação foram avaliados por inspeção visual, por ensaios de tração-extensão (NP EN ISO 10319: 2005) e por ensaios de punçoamento estático (NP EN ISO 12236: 2008). As propriedades obtidas para as amostras danificadas foram comparadas com as propriedades das amostras intactas, sendo possível avaliar o grau de danificação induzido pelos diferentes solos nos diferentes tipos de geossintéticos.

De modo geral, foi possível estabelecer uma relação entre os danos ocorridos nos diferentes tipos de geossintéticos e as características dos solos. Os resultados demonstraram que o *corundum* foi o solo mais destrutivo, seguido das britas, que provocaram comportamentos semelhantes em todos os tipos de geossintéticos. O *tout-venant*, em quase todos os casos, provocou danos inferiores aos das britas, mas superiores aos das areias, que foram os solos com menor capacidade destrutiva.

PALAVRAS-CHAVE: geossintéticos, solos, danificação mecânica; propriedades de tração, propriedades de punçoamento.

ABSTRACT

Geosynthetics are polymeric materials that can be used for several purposes in civil engineering constructions, being in some cases subjected to mechanical damage. The stresses induced during the installation procedures may cause changes in the properties of the materials that may compromise the functionality for which they were designed. In the past years, studies that allow a better understanding about the behavior of the geosynthetics and the structures where they are applied, were developed leading to a better understanding of the main mechanisms that affect the functioning of these materials.

This work was developed with the objective of characterize the damage that occurs in geosynthetics when subjected to dynamic loads. For that purpose, five geosynthetics were selected (two woven geotextiles, two nonwoven geotextiles and a geogrid) in order to understand the influence of mechanical damage in different types of geosynthetics. The materials were damaged in laboratory (in a prototype equipment) according to EN ISO 10722: 2007. In this test, the materials were placed between two layers of soil and were subjected to dynamic loading (between 5 and 500 kPa) during 200 cycles at 1 Hz. The soils used in the mechanical damage tests included the standard synthetic aggregate (*corundum*) and five natural soils (silty sand, sand 0/4, *tout-venant*, gravel 4/8 and gravel 6/14). The damage occurred in the geosynthetics were evaluated by visual inspection, wide-width tensile tests (NP EN ISO 10319: 2005) and static puncture tests (CBR-test) (NP EN ISO 12236: 2008). The properties obtained for the damaged samples were compared with the properties of intact samples in order to determine the degree of degradation induced by the different soils in the different types of geosynthetics.

In general, it was possible to establish a relationship between the damage occurred in the different types of geosynthetics and the characteristics of the soils. The results showed that *corundum* was the most destructive soil, followed by gravel 4/8 and gravel 6/14, that induced similar behaviors in the geosynthetics. The damage caused by *tout-venant* was, in almost all cases, lower than the damage provoked by the gravels, but higher than the damage caused by sands (the less destructive soils).

KEYWORDS: geosynthetics, soils, mechanical damage, tensile properties, puncture properties.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIV
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO DESENVOLVIDO.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO.....	2
2. GEOSSINTÉTICOS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. HISTÓRIA	4
2.3. MATERIAIS CONSTITUINTES	5
2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	5
2.3.2. POLÍMEROS BASE.....	6
2.3.3. ADITIVOS.....	7
2.4. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS E PROCESSOS DE FABRICO	7
2.4.1. GEOTÊXTEIS.....	9
2.4.2. GEOGRELHAS	12
2.5. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS.....	14
2.5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	14
2.5.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	15
2.5.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	15
2.6. FUNÇÕES E APLICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS.....	17
2.6.1. SEPARAÇÃO	18
2.6.2. DRENAGEM.....	18
2.6.3. FILTRAGEM.....	19
2.6.4. PROTEÇÃO	19
2.6.5. REFORÇO.....	19
2.6.6. CONTROLO DE EROÇÃO SUPERFICIAL	20
2.6.7. BARREIRA DE FLUÍDOS	20
2.6.8. APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS	20
2.7. ESTADO DE ARTE SOBRE ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	21
2.7.1. INTRODUÇÃO	21

2.7.2. ESTUDO REALIZADO POR PAULA ET AL, 2004	23
2.7.2.1 INTRODUÇÃO/OBJETIVOS	23
2.7.2.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	23
2.7.2.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES OBTIDAS	24
2.7.3. ESTUDO REALIZADO POR CARNEIRO ET AL, 2012.....	25
2.7.3.1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	25
2.7.3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	26
2.7.3.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES OBTIDAS	26
2.7.4. ESTUDO REALIZADO POR CARLOS ET AL, 2015.....	28
2.7.4.1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	28
2.7.4.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	28
2.7.4.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES OBTIDAS	29
3. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL.....	31
3.1. INTRODUÇÃO	31
3.2. GEOSSINTÉTICOS	31
3.3. ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	33
3.3.1. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO.....	33
3.3.2. SOLOS	36
3.4. AVALIAÇÃO DA DANIFICAÇÃO	37
3.4.1. INSPEÇÃO VISUAL	37
3.4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	38
3.4.2.1 – EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO.....	38
3.4.2.2 – TRATAMENTO DE DADOS.....	40
3.4.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	42
3.4.3.1 – EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO	43
3.4.3.2 – TRATAMENTO DE DADOS.....	44
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
4.1. GEOTÊXTIL TECIDO T80	48
4.1.1 – INSPEÇÃO VISUAL.....	48
4.1.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO	49
4.1.3 – ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	50
4.2. GEOTÊXTIL TECIDO T200	52
4.2.1 – INSPEÇÃO VISUAL.....	52
4.2.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO	53
4.2.3 – ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	55
4.3. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO NT200	57
4.3.1 – INSPEÇÃO VISUAL.....	57
4.3.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO	58
4.3.3 – ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	60

4.4. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO NT300	62
4.4.1 – INSPEÇÃO VISUAL.....	62
4.4.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO	63
4.4.3 – ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	65
4.5. GEOGRELHA	66
4.5.1 – INSPEÇÃO VISUAL.....	66
4.5.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO	67
5. CONCLUSÃO	71
5.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS DE ACORDO COM A SUA ESTRUTURA.....	8
FIG. 2.2 – EXEMPLO DE GEORREDE	8
FIG. 2.3 – EXEMPLOS DE GEOMEMBRANA: A) LISA; B) RUGOSA	9
FIG. 2.4 – EXEMPLOS DE GEOCOMPÓSITO: A) DE REFORÇO; B) DE DRENAGEM; C) DE BARREIRA DE FLUÍDOS	9
FIG. 2.5 – GEOTÊXTEIS: A) ESTRUTURA TÍPICA DE UM GEOTÊXTIL TECIDO; B) TECIDO COM TIRA E MONOFILAMENTO; C) TECIDO COM MULTIFILAMENTO E MONOFILAMENTO	10
FIG. 2.6 – GEOTÊXTEIS TECIDOS: A) MONOFILAMENTO EM MONOFILAMENTO; B) MULTIFILAMENTO EM MULTIFILAMENTO; C) TIRA EM TIRA.	10
FIG. 2.7 – EXEMPLOS DE GEOTÊXTEIL: A) NÃO-TECIDO MECANICAMENTE LIGADO (AGULHADO) B) NÃO TECIDO TÉRMICAMENTE LIGADO	11
FIG. 2.8 – GEOTÊXTIL TRICOTADO A) PROCESSO DE FABRICO; B) ESTRUTURA	11
FIG. 2.9 – EXEMPLOS DE GEOGRELHA: A) BIAXIAL; B) TECIDA; C) SOLDADA A LASER.....	12
FIG. 2.10 – ESTRUTURA TÍPICA DE UMA GEOGRELHA TECIDA.....	12
FIG. 2.11 – GEOGRELHA EXTRUDIDA: A) FOLHA PLÁSTICA PERFURADA; B) UNIAXIAL; C) BIAXIAL.....	13
FIG. 2.12 – ESTRUTURA TÍPICA DE UMA GEOGRELHA COM LIGAÇÃO TÉRMICA	13
FIG. 2.13 – ASPETO GERAL DAS CURVAS FORÇA-EXTENSÃO DE ALGUNS GEOTÊXTEIS.....	16
FIG. 2.14 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FUNÇÃO DE: A) SEPARAÇÃO; B) DRENAGEM; C) FILTRAGEM; D) PROTEÇÃO; E) REFORÇO; F) CONTROLO DE EROÇÃO; G) BARREIRA DE FLUÍDOS	18
FIG. 2.15 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE UM GEOSSINTÉTICO: A) RESERVATÓRIOS E BARRAGENS; B)DEPÓSITOS DE RESÍDUOS LÍQUIDOS; C) DEPÓSITOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS; D) CANAIS; E) OBRAS RODOVIÁRIAS; F) OBRAS FERROVIÁRIAS; G) FUNÇÕES E ESTRUTURAS DE SUPORTE; H) SISTEMAS DE CONTROLO DE EROÇÃO; I) TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS; J) SISTEMAS DE DRENAGEM.....	21
FIG. 2.16 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS GRANULARES DE CONFINAMENTO.....	24
FIG. 2.17 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RESIDUAL DOS GEOSSINTÉTICOS DANIFICADOS EM LABORATÓRIO	24
FIG. 2.18 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RESIDUAL DOS GEOSSINTÉTICOS DANIFICADOS EM LABORATÓRIO..	26
FIG. 2.19 - RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO RESIDUAL DOS GEOSSINTÉTICOS DANIFICADOS EM LABORATÓRIO.....	27
FIG. 2.20 - RESISTÊNCIA AO RASGAMENTO RESIDUAL DOS GEOSSINTÉTICOS DANIFICADOS EM LABORATÓRIO.....	27
FIG. 2.21 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS	28
FIG. 2.22 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RESIDUAL DOS GEOTÊXTEIS G250 E G400 DEPOIS DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA	29
FIG. 3.1 – DIAGRAMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31

FIG. 3.2 – GEOTÊXIL T80.....	32
FIG. 3.3 - GEOTÊXIL T200.....	32
FIG. 3.4 - GEOTÊXIL NT200.....	32
FIG. 3.5 - GEOTÊXIL NT300.....	32
FIG. 3.6 - GEOGRELHA GG.....	33
FIG. 3.7 – EQUIPAMENTO PARA O ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA: A) VISTA GERAL DO EQUIPAMENTO; B) CAIXA DE DANIFICAÇÃO; C) ESQUEMA REPRESENTATIVO DO EQUIPAMENTO.....	34
FIG. 3.8 - ESQUEMA DOS PROVETES USADOS NO ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA.....	34
FIG. 3.9 – ENCHIMENTO DA CAIXA INFERIOR COM SOLO: A) PRIMEIRA SUBCAMADA; B) COMPACTAÇÃO DA PRIMEIRA SUBCAMADA; C) SEGUNDA SUBCAMADA; D) COMPACTAÇÃO DA SEGUNDA SUBCAMADA.....	35
FIG. 3.10 - EQUIPAMENTO NO INÍCIO DO ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA.....	35
FIG. 3.11 – SOLOS USADOS NO ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA: A) AREIA SILTOSA; B) AREIA 0/4; C) <i>TOUT-VENANT</i> ; D) BRITA 4/8; E) BRITA 6/14; F) <i>CORUNDUM</i>	36
FIG. 3.12 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS.....	37
FIG. 3.13 – PROVETE DA GEOGRELHA DANIFICADA POR <i>CORUNDUM</i>	38
FIG. 3.14 – ESQUEMA DOS PROVETES DE TRAÇÃO E POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA (A VERMELHO) PARA MEDIÇÃO DA EXTENSÃO.....	39
FIG. 3.15 – PROVETE DE TRAÇÃO DA GEOGRELHA.....	39
FIG. 3.16 – COLAGEM DOS PROVETES DOS GEOTÊXTEIS TECIDOS.....	39
FIG. 3.17 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO: A) ESQUEMA DOS BLOCOS DE GARRAS HIDRÁULICAS ; B) PROVETE MONTADO E PRONTO PARA INICIAR O ENSAIO.....	40
FIG. 3.18 - ESQUEMA DOS PROVETES USADOS NO ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	43
FIG. 3.19 - MONTAGEM DO PROVETE ENTRE OS ANÉIS DE AÇO.....	43
FIG. 3.20 –PROVETE DE UM GEOTÊXIL TECIDO PREPARADO PARA SER ENSAIADO.....	43
FIG. 3.21 – INÍCIO DO ENSAIO COM O PILÃO ENCOSTADO NO PROVETE.....	44
FIG. 3.22 – PILÃO AVANÇADO DURANTE O ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	44
FIGURA 4.1 – ASPETO DO GEOTÊXIL T80 APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA: A) DANIFICAÇÃO COM AREIA SILTOSA; B) DANIFICAÇÃO COM AREIA 0/4; C) DANIFICAÇÃO COM <i>TOUT-VENANT</i> ; D) DANIFICAÇÃO COM BRITA 4/8; E) DANIFICAÇÃO COM BRITA 6/14; F) DANIFICAÇÃO COM <i>CORUNDUM</i>	48
FIGURA 4.2 – ASPETO DO GEOTÊXIL T200 APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA: A) DANIFICAÇÃO COM AREIA SILTOSA; B) DANIFICAÇÃO COM AREIA 0/4; C) DANIFICAÇÃO COM <i>TOUT-VENANT</i> ; D) DANIFICAÇÃO COM BRITA 4/8; E) DANIFICAÇÃO COM BRITA 6/14; F) DANIFICAÇÃO COM <i>CORUNDUM</i>	53
FIGURA 4.3 – ASPETO DO GEOTÊXIL NT200 APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA: A) DANIFICAÇÃO COM AREIA SILTOSA; B) DANIFICAÇÃO COM AREIA 0/4; C) DANIFICAÇÃO COM <i>TOUT-VENANT</i> ; D) DANIFICAÇÃO COM BRITA 4/8; E) DANIFICAÇÃO COM BRITA 6/14; F) DANIFICAÇÃO COM <i>CORUNDUM</i>	58

FIGURA 4.4 – ASPETO DO GEOTÊXTIL NT300 APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA: A) DANIFICAÇÃO COM AREIA SILTOSA; B) DANIFICAÇÃO COM AREIA 0/4; C) DANIFICAÇÃO COM *TOUT-VENANT*; D) DANIFICAÇÃO COM BRITA 4/8; E) DANIFICAÇÃO COM BRITA 6/14; F) DANIFICAÇÃO COM *CORUNDUM*. 63

FIGURA 4.5 – ASPETO DO GEOGRELHA APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA: A) DANIFICAÇÃO COM AREIA SILTOSA; B) DANIFICAÇÃO COM AREIA 0/4; C) DANIFICAÇÃO COM *TOUT-VENANT*; D) DANIFICAÇÃO COM BRITA 4/8; E) DANIFICAÇÃO COM BRITA 6/14; F) DANIFICAÇÃO COM *CORUNDUM*. .. 67

FIG. 5.1 – EXEMPLOS DE DANOS PROVOCADOS POR SOLOS COM $D_{MÁX}$ ELEVADO E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POUCO EXTENSA: A) DANO PROVOCADO PELA BRITA 4/8 NO GEOTÊXTIL NT200; B) DANO PROVOCADO PELA BRITA 6/14 NO GEOTÊXTIL T80; C) DANO PROVOCADO PELO *CORUNDUM* NA GEOGRELHA GG 75

FIG. 5.2 – EXEMPLOS DE DANOS PROVOCADOS PELAS AREIAS: A) GEOTÊXTIL T80 DANIFICADO COM AREIA SILTOSA; B) GEOTÊXTIL T200 DANIFICADO COM AREIA 0/4 75

FIG. 5.3 – EXEMPLO: DANO PROVOCADO PELO *TOUT-VENANT* NO GEOTÊXTIL T80..... 76

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 – COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS DE ACORDO COM MAIOR PESO MOLAR E CRISTALINIDADE DOS POLÍMEROS	5
TABELA 2.2 – MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS PARA FABRICAR DIFERENTES GEOSSINTÉTICOS.....	6
TABELA 2.3 – COMPARAÇÃO DE ALGUMAS DAS PROPRIEDADES DOS PRINCIPAIS POLÍMEROS UTILIZADOS NO FABRICO DOS GEOSSINTÉTICOS	6
TABELA 2.4 – DENSIDADE RELATIVA DOS POLÍMEROS NORMALMENTE UTILIZADOS NOS GEOSSINTÉTICOS	14
TABELA 2.5 – CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS ANTES DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA	23
TABELA 2.6 – MATERIAIS DE CONFINAMENTO	24
TABELA 2.7 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA REALIZADOS..	25
TABELA 2.8 – CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS ANTES DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA	26
TABELA 2.9 – CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS ANTES DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA	28
TABELA 3.1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS	33
TABELA 3.2 – CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E FORMA DAS PARTÍCULAS DOS SOLOS.....	37
TABELA 3.3 – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO DO GEOTÊXTIL T80.....	41
TABELA 3.4 – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXTIL T80 (AMOSTRA DE REFERÊNCIA).....	44
TABELA 4.1 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO-EXTENSÃO DO GEOTÊXTIL T80 ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	49
TABELA 4.2 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXTIL T80 ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA.....	51
TABELA 4.3 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO-EXTENSÃO DO GEOTÊXTIL T200, ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	54
TABELA 4.4 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXTIL T200, ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA.....	56
TABELA 4.5 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO-EXTENSÃO DO GEOTÊXTIL NT200, ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	59
TABELA 4.6 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXTIL NT200, ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	61
TABELA 4.7 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO-EXTENSÃO DO GEOTÊXTIL NT300, ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	63
TABELA 4.8 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXTIL NT300, ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	65
TABELA 4.9 – VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO-EXTENSÃO DA GEOGRELHA GG ANTES E APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	68
TABELA 5.2 – ANÁLISE VISUAL DOS GEOSSINTÉTICOS APÓS OS ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA..	72

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 – CURVAS FORÇA-EXTENSÃO OBTIDAS PARA OS 5 PROJETOS DO GEOTÊXIL T80 (AMOSTRA DE REFERÊNCIA)	42
GRÁFICO 3.2 – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA OS 5 PROJETOS DO GEOTÊXIL T80 (AMOSTRA DE REFERÊNCIA)	45
GRÁFICO 4.1 – CURVAS TRAÇÃO-EXTENSÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DO GEOTÊXIL T80 (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	50
GRÁFICO 4.2 – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE PUNÇAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXIL T80 (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	52
GRÁFICO 4.3 – CURVAS TRAÇÃO-EXTENSÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DO GEOTÊXIL T200 (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	55
GRÁFICO 4.4 – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE PUNÇAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXIL T200 (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	57
GRÁFICO 4.5 – CURVAS TRAÇÃO-EXTENSÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DO GEOTÊXIL NT200 (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	60
GRÁFICO 4.6 – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE PUNÇAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXIL NT200 (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	62
GRÁFICO 4.7 – CURVAS TRAÇÃO-EXTENSÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DO GEOTÊXIL NT300 (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	64
GRÁFICO 4.8 – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE PUNÇAMENTO ESTÁTICO DO GEOTÊXIL NT300 (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	66
GRÁFICO 4.9 – CURVAS TRAÇÃO-EXTENSÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DA GEOGRELHA GG (CURVAS INDIVIDUAIS COM OS RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DA MÉDIA DE TODOS OS PROJETOS ENSAIADOS)	69
GRÁFICO 5.1 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RESIDUAL DOS GEOSSINTÉTICOS APÓS O PROCESSO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	73
GRÁFICO 5.2 – RESISTÊNCIA AO PUNÇAMENTO RESIDUAL DOS GEOSSINTÉTICOS APÓS O PROCESSO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA	73

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os geossintéticos são produtos que ocupam um lugar cada vez mais relevante em obras de engenharia civil. São materiais com uma grande variedade de aplicações nas mais diversas estruturas, tais como: sistemas de drenagem de túneis, proteção de pavimentos asfálticos novos, taludes de grande inclinação, revestimento de leitos de canais ou lagos, envolvimento de massas de solo contaminado, entre outras.

De um modo geral, o uso destes produtos está ligado ao facto de: serem versáteis, a sua aplicação ser de baixo custo comparando com outras metodologias tradicionais, a sua instalação ser rápida e fácil, permitirem a utilização de materiais naturais com baixa ocorrência, evitarem o recurso a estruturas de dimensionamento complexo e permitirem que solos não desejáveis, para aterros e fundações, sejam utilizados.

Existem algumas condicionantes relativamente à sua implementação em obras, uma vez que muitos donos de obra, projetistas e construtores ainda não possuem informações, nem conhecimento, suficientes e ainda há uma limitação, que é a sua durabilidade. Desde a década de 70 do séc. XX, quando é dado o passo decisivo para o estabelecimento dos geossintéticos como materiais de construção, houve a preocupação de manter a confiança da indústria da construção, minimizando os riscos de rotura através da adoção de coeficientes de segurança e métodos de dimensionamento conservativos. No dimensionamento destes materiais são usados coeficientes de redução que representam os diversos agentes e/ou mecanismos de degradação, de modo a que fique assegurado o seu funcionamento durante um determinado tempo de serviço, mantendo valores mínimos de determinadas propriedades.

O desenvolvimento da indústria dos geossintéticos no decorrer do tempo levou a um aumento da oferta de diferentes tipos de materiais: geotêxteis (tecidos, não-tecidos e tricotados), geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompósitos, entre outros. Consequentemente, houve um crescimento da diversidade de funções, tais como: drenagem, filtração, proteção, reforço, separação, controlo de erosão superficial e barreira de fluídos. A investigação que tem vindo a ser feita nos últimos anos permite, agora, compreender melhor o comportamento destes materiais e das estruturas onde são aplicados, proporcionando construções de estruturas mais eficientes no futuro. No estudo desenvolvido neste trabalho foram utilizados geotêxteis tecidos (que podem ser utilizados como reforço ou filtros, entre outros), geotêxteis não-tecidos (que podem ser usados como filtros ou drenos, entre outros) e também uma geogrelha (que pode ter funções de reforço).

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO DESENVOLVIDO

O objetivo primordial da realização deste trabalho foi determinar a influência da danificação mecânica na resistência de alguns geossintéticos. Com esse objetivo em vista, foram realizados ensaios laboratoriais de danificação mecânica com vários solos. Os danos provocados foram depois avaliados por análise visual e através de ensaios mecânicos de tração-extensão e de punçoamento estático. As alterações das propriedades mecânicas foram avaliadas comparando os valores dos materiais danificados com os valores de referência (materiais não danificados).

1.3. ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita uma breve introdução aos geossintéticos, aplicações e funções, bem como a apresentação do objetivo do trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma apresentação mais aprofundada sobre os geossintéticos, passando pela sua constituição, classificação, funções e aplicações em obra, testes de caracterização das propriedades e mais relacionado com este trabalho, métodos de simulação de danificação mecânica e uma revisão bibliográfica sobre danificação mecânica.

No terceiro capítulo, descrição experimental, são apresentadas as principais características dos geossintéticos em estudo, dos solos utilizados para danificação mecânica, bem como o procedimento de danificação mecânica e os procedimentos de avaliação do dano provocado.

No quarto capítulo, resultados experimentais, são apresentados os resultados da avaliação do dano provocado e a discussão desses mesmos resultados.

Por fim, o quinto capítulo, conclusão, inclui as considerações finais sobre os resultados experimentais obtidos e são propostos alguns desenvolvimentos futuros.

2

GEOSSINTÉTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

Atualmente os geossintéticos são materiais frequentemente usados em obras de engenharia civil devido às suas vantagens económicas, e técnicas. Os geossintéticos tem vindo a emergir na comunidade dos engenheiros civis desde a década de 50, do século XX, após o aparecimento dos polímeros sintéticos na década de 40 (Paula, 2012).

De acordo com a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), um geossintético é um material polimérico, natural ou sintético, usado em contacto com materiais naturais, como solo ou rocha, ou qualquer outro material geotécnico utilizado em aplicações de engenharia civil. Hoje em dia os geossintéticos são produtos, quase exclusivamente, sintéticos uma vez que os materiais com fibras naturais estão cada vez mais em desuso devido à sua suscetibilidade à biodegradação e por não possuírem propriedades adequadas a um grande número de aplicações (Lopes & Lopes, 2010).

A classificação dos diferentes tipos e estruturas dos geossintéticos baseia-se principalmente nos diferentes processos de fabrico podendo ser divididos em dois grupos: produtos permeáveis e produtos impermeáveis. Fazem parte do grupo dos produtos permeáveis os geotêxteis e produtos relacionados como: georredes e geogrelhas. Do segundo grupo fazem parte as barreiras geossintéticas, que podem ser poliméricas, argilosas e betuminosas, por exemplo, as geomembranas.

Neste capítulo serão apresentadas as informações básicas dos geossintéticos, principalmente a sua história, materiais constituintes, tipos de geossintéticos e processos de fabrico, funções e aplicações, e uma revisão bibliográfica no estado de arte sobre ensaios de danificação mecânica.

2.2. HISTÓRIA

Os geossintéticos aparecem na história da construção com as primeiras tentativas de reforço de solos, que passaram pela estabilização de solos pantanosos com troncos de árvores e pequenos arbustos. Estas aplicações datam de 3000 AC e progrediram até ao aparecimento de vias onde o solo era estabilizado através de mistura com outros solos ou pavimentação com blocos de pedra (Koerner, 1999).

A evolução do reforço de solos continuou até hoje, levando ao aparecimento da produção de geossintéticos na década de 50 do século XX, após o aparecimento dos polímeros sintéticos na década de 40. Os geossintéticos começaram então a ser utilizados de forma sistemática na década de 50, resultantes de conversões da indústria têxtil na Holanda, surgindo na década de 60 os geotêxteis não-tecidos termicamente ligados. Mas foi a partir dos anos 70 que os geossintéticos foram estabelecidos como material de construção, com o aparecimento dos geotêxteis não-tecidos agulhados. O sucesso destes materiais deve-se ao facto de serem materiais com vantagens económicas e técnicas. Permitem uma construção rápida, fácil, não muito dependente de condições meteorológicas, permite utilização de solos de menor qualidade, e podem exercer uma grande quantidade de funções. Este sucesso conduziu a um forte desenvolvimento, levando a que na década de 80 uma vasta gama de produtos com estruturas distintas surgisse, entre os quais se incluem por exemplo, as geogrelhas, as georredes, as geomembranas e os geocompósitos. Segundo Koerner, 1999, nunca um novo material havia surgido de uma forma tão forte na engenharia de materiais.

Em Portugal, os geossintéticos surgem na década de 80, mas é na década de 90 que existe o impulso da sua utilização, associado à construção da rede nacional de aterros de resíduos urbanos, que leva à procura de um maior conhecimento acerca dos geossintéticos.

Em 1999, com o crescimento do interesse nestes materiais, surge a criação do Organismo de Normalização Sectorial Português dos ensaios de geossintéticos e, em 2002, a criação da Comissão Portuguesa de Geossintéticos (IGS Portugal) (Lopes & Lopes, 2010). O uso e a expansão destes materiais despoletou, desde muito cedo, a atenção na comunidade técnica internacional levando à realização de conferências e congressos internacionais, que também devem ter contribuído para a sua grande utilização, começando em 1977 em Paris; Las Vegas, 1982; Viena, 1986; Haia, 1990; Singapura, 1994; Atlanta, 1998; Nice, 2002; Yokohama, 2006, Gaurujá, 2010 e Berlim, 2014, tendo sido em Singapura em 1994 que foi internacionalmente aceite o termo “geossintético” para designar materiais fabricados, quer com produtos sintéticos, quer não sintéticos, substituindo a designação utilizada até então de “geotêxteis, geomembranas e produtos afins”. O conhecimento sobre os geossintéticos teve também o contributo de conferências e simpósios nacionais e regionais sobre o tema, sendo que em 1996 ter-se-á realizado a primeira conferência europeia de geossintéticos (EuroGeo), que se tem repetido a cada 4 anos (Maastricht, 1996; Bolonha, 2000; Munique, 2004, Edimburgo, 2008 e Valência, 2012). Da mesma forma, surgiu também a conferência asiática de geossintéticos (GeoAsia) em 1997 em Bangalor; Kuala Lumpur, 2000; Seul, 2004, Xangai, 2008 e Bangkok, 2012, e a americana (GeoAmericas) em Cancún 2008 e Lima 2012.

Segundo Rankilor, 2000, a utilização dos geossintéticos espalhou-se por todo o mundo e, em termos de área, aumentou de forma quase exponencial. É esperado que a utilização dos geossintéticos continue a crescer durante o século XXI.

2.3. MATERIAIS CONSTITUINTES

2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As matérias-primas utilizadas no fabrico de geossintéticos dividem-se em dois grandes grupos: naturais e químicas (Lopes & Lopes, 2010). As matérias-primas naturais podem ter três origens: vegetal (juta, algodão, linho e cânhamo), animal (lã e seda) e mineral. As matérias-primas químicas dividem-se em orgânicas (polímeros naturais transformados e polímeros sintéticos) e inorgânicas (minerais e metais).

As fibras naturais, pelo facto de serem biodegradáveis, e não terem propriedades adequadas, são inapropriadas para inúmeras aplicações, acabando por ser rara a sua utilização.

Dentro das matérias-primas químicas, as que são mais utilizadas são as orgânicas sintéticas com origem a partir do petróleo, cuja designação vulgar é plásticos. Os plásticos podem dividir-se em termo-plásticos e plásticos termoendurecidos. A diferença entre estes é que os termoplásticos podem amolecer e endurecer por aquecimento e arrefecimento, respetivamente, e os plásticos termoendurecidos quando endurecem, partindo do estado fundido, não podem amolecer por ação do calor. Os termoplásticos são os materiais mais utilizados no fabrico de geossintéticos (Lopes & Lopes, 2010).

É necessário esclarecer que a expressão “plásticos” é usada como sinónimo de polímeros, sendo no entanto, um termo distinto. Os polímeros são grandes moléculas sintéticas feitas a partir da junção de milhares de pequenas unidades moleculares conhecidas como monómeros. O processo de adesão das moléculas é chamado de polimerização e o número destas unidades nos polímeros é conhecido como o grau de polimerização (Crawford, 1981).

Existem duas propriedades determinantes no comportamento dos polímeros que devem ser incluídas sempre que possível juntamente com a definição dos plásticos (Brown, 2002): o peso molecular, que é o produto entre o peso molecular de um monómero e o seu grau de polimerização (número de vezes que o monómero se repete na cadeia molecular) e a cristalinidade, que se pode apresentar em vários graus (cristalinos, semicristalinos e amorfos) (Carvalho, 2014).

A tabela 2.1 mostra as alterações induzidas no material devido à maior presença de peso molar e cristalinidade nos polímeros.

Tabela 2.1 – Comportamento dos materiais de acordo com maior peso molar e cristalinidade dos polímeros (adaptado de Paula, 2003)

Peso molar	Cristalinidade
Com o aumento destas propriedades	
>> Elongação	>> Rigidez
>> Resistência à tração	>> Resistência à tração
>> Resistência ao impacto	>> Resistência ao calor
>> Resistência à fendilhação	>> Resistência química
>> Resistência ao calor	
<< Fluência	<< Permeabilidade
<< Trabalhabilidade	<< Deformação na rotura
	<< Flexibilidade
	<< Resistência ao impacto
	<< Resistência à fendilhação

2.3.2. POLÍMEROS BASE

Em geral, os polímeros base de uso mais recorrente no fabrico de geossintéticos são poliésteres, em particular o polietileno tereftalato (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE) (polietileno de baixa densidade, PEBD, polietileno de média densidade, PEMD e polietileno de alta densidade, PEAD), polietilenos clorinados (CPE) polietilenos clorossulfonados (PECS), poliamidas (PA), policloreto de vinilo (PVC), etc. (Lopes & Lopes, 2010). Na tabela 2.2 estão indicadas algumas das matérias-primas utilizadas para fabricar diferentes geossintéticos.

Tabela 2.2 – Matérias-primas utilizadas para fabricar diferentes geossintéticos (adaptado de Shukla, 2002)

Geossintéticos	Matérias-primas
Geotêxteis	PP,PET,PA,PE
Geogrelhas	PE,PET,PP
Georredes	PE
Geomembranas	PE,PVC,CPE,PECS

É importante também referir que o tipo de polímero que constitui um geossintético não é o único fator que influencia o seu comportamento. Devemos também ter em conta a estrutura, a espessura, o processo de fabrico e o efeito de confinamento exercido pelo solo (Lopes & Lopes, 2010). Na tabela 2.3 é feita a comparação de algumas das propriedades dos principais polímeros utilizados no fabrico dos geossintéticos.

Tabela 2.3 – Comparação de algumas das propriedades dos principais polímeros utilizados no fabrico dos geossintéticos (adaptado de Carneiro, 2009)

Propriedades			Polímeros			
			PP	PE	PET	PA
Resistência			Baixo	Baixo	Elevado	Médio
Módulo de rigidez			Baixo	Baixo	Elevado	Médio
Extensão na rotura			Elevado	Elevado	Médio	Médio
Fluência			Elevado	Elevado	Baixo	Médio
Peso volúmico			Baixo	Baixo	Elevado	Médio
Custo			Baixo	Baixo	Elevado	Médio
Resistência a	Radiação UV	Estabilizado	Elevado	Elevado	Elevado	Médio
		Não estabilizado	Baixo	Médio	Elevado	Médio
	Soluções alcalinas		Elevado	Elevado	Baixo	Elevado
	Microbiológica		Médio	Elevado	Médio	Médio
	Combustíveis		Baixo	Baixo	Médio	Médio
	Detergentes		Elevado	Elevado	Elevado	Elevado

2.3.3. ADITIVOS

Os aditivos desempenham um papel fundamental na melhoria das propriedades, processamento e desempenho dos materiais poliméricos. De uma forma geral, a escolha da natureza dos aditivos deve ser feita tendo em conta o tipo de polímero-base pois é essencial que os aditivos sejam estáveis, eficientes no desempenho das suas funções, possuam uma boa resistência à extração e não prejudiquem as propriedades dos polímeros (Lopes & Lopes, 2010) (Carneiro 2009).

Normalmente os aditivos são classificados de acordo com a sua função. Assim, abaixo, procede-se a uma breve descrição de alguns aditivos (Carneiro, 2009):

- Os antioxidantes são usados para proteger os polímeros da degradação oxidativa, tanto durante o seu processamento, como durante o tempo de serviço. Estes aditivos são muito usados para aumentar a resistência das poliolefinas à oxidação;
- Os biocidas são aditivos usados com a finalidade de proteger os polímeros da ação de bactérias, fungos, algas ou bolores. Os dois tipos de biocidas mais utilizados são os fungicidas e os bactericidas;
- Os estabilizantes UV tem como princípio de funcionamento retardar ou suprimir as reações químicas provocadas pela exposição à radiação UV. Estes aditivos são muitas vezes usados para aumentar a resistência das poliolefinas à fotodegradação;
- Os estabilizantes térmicos são utilizados para reduzir ou evitar a degradação térmica de materiais poliméricos expostos a temperaturas elevadas, desde o processamento até ao tempo de vida útil dos produtos finais;
- A introdução de aditivos retardantes de chama dificulta a ignição, reduz a formação de fumo e diminui a velocidade de combustão dos materiais poliméricos.
- Os plastificantes são usados para que os materiais poliméricos se tornem mais maleáveis, flexíveis e macios, podendo também aumentar a resistência ao impacto. Um exemplo de aplicação deste tipo de aditivos é melhorar a flexibilidade do PVC;
- Por último, os pigmentos são adicionados para conferir cor aos materiais poliméricos. Podem, dependendo do pigmento, também fornecer estabilização contra a ação de alguns agentes, como por exemplo a radiação UV. O pigmento mais usado é o negro de carbono.

2.4. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS E PROCESSOS DE FABRICO

Os diferentes tipos de geossintéticos não dependem só dos materiais que os constituem, dependem principalmente das diferenças estruturais que resultam dos diferentes processos de fabrico. Por forma a diferenciar os tipos de geossintéticos, serão apresentados os três passos dos processos de fabrico:

- 1º - Produção do polímero com os seus vários aditivos;
- 2º - Produção dos componentes;
- 3º - Conversão dos componentes no geossintético.

Na Fig. 2.1 está representado uma classificação dos geossintéticos com base na sua estrutura.

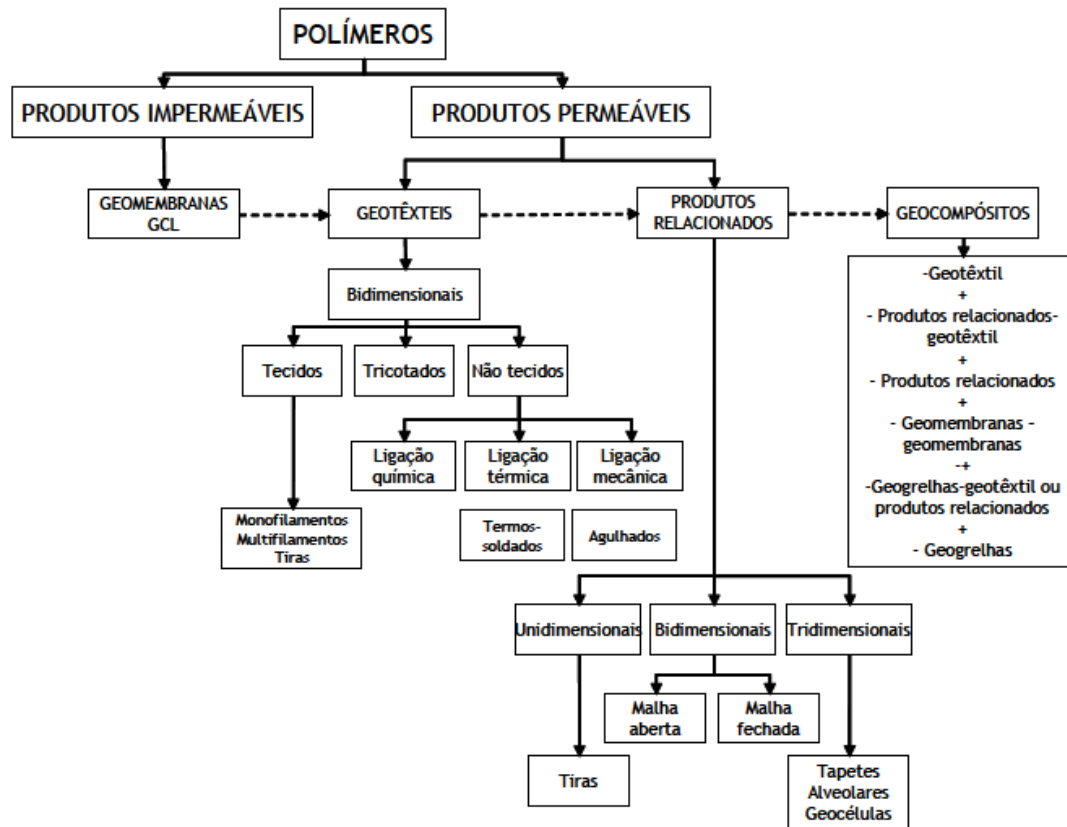


Fig. 2.1 – Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura (Pinho-Lopes, 2004)

Abaixo encontra-se uma breve descrição dos principais tipos de geossintéticos. Uma vez que neste trabalho foram utilizados geotêxteis e geogrelhas, será feita uma descrição mais aprofundada e detalhada destes geossintéticos nos subpontos 2.4.1 e 2.4.2, respetivamente.

As georredes são malhas constituídas por conjuntos paralelos integrados de barras (Fig. 2.2), obtidos por extrusão, que se entrecruzam em vários ângulos (normalmente entre 60° e 75°), sendo as ligações entre barras feitas termicamente. As georredes poderiam ser incluídas no grupo das geogrelhas, sendo que a única razão para se considerar uma classificação diferente tem a ver com a função que desempenham e não a sua estrutura (Lopes & Lopes, 2010).

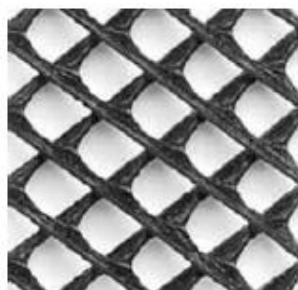


Fig. 2.2 – Exemplo de georrede (Lopes, 1998)

As geomembranas, atualmente também designadas por barreiras geossintéticas poliméricas, são membranas contínuas com baixa permeabilidade e podem ser usadas para controlar a migração de fluídos. Os materiais normalmente utilizados são de origem asfáltica, polimérica ou uma combinação dos dois (Carvalho, 2014).



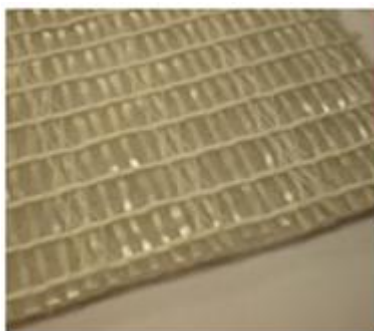
a)



b)

Fig. 2.3 – Exemplos de geomembrana: a) lisa; b) rugosa (Lopes, 1998)

Os geocompósitos, ou geossintéticos compostos, são produtos que resultam da associação de diferentes materiais, incluindo pelo menos um geossintético. A filosofia por trás destes materiais é a combinação das melhores características de diferentes elementos de maneira a resolver problemas específicos de uma maneira ótima (Carvalho, 2014).



a)



b)



c)

Fig. 2.4 – Exemplos de geocompósito: a) de reforço (Carvalho, 2014); b) de drenagem (Carneiro, 2009); c) de barreira de fluídos (Barbedo, 2013)

2.4.1. GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis são, na sua generalidade, produtos poliméricos permeáveis em forma de malha flexível e de acordo com os processos de fabrico, podem ser divididos em três tipos: tecidos, não-tecidos e tricotados. São obtidos por processos convencionais de tecelagem, recorrendo a teares mecânicos. Habitualmente são compostos por dois conjuntos perpendiculares de componentes paralelos entrelaçados (Fig. 2.5), formando uma estrutura plana com espessura reduzida e uma distribuição de poros regular.

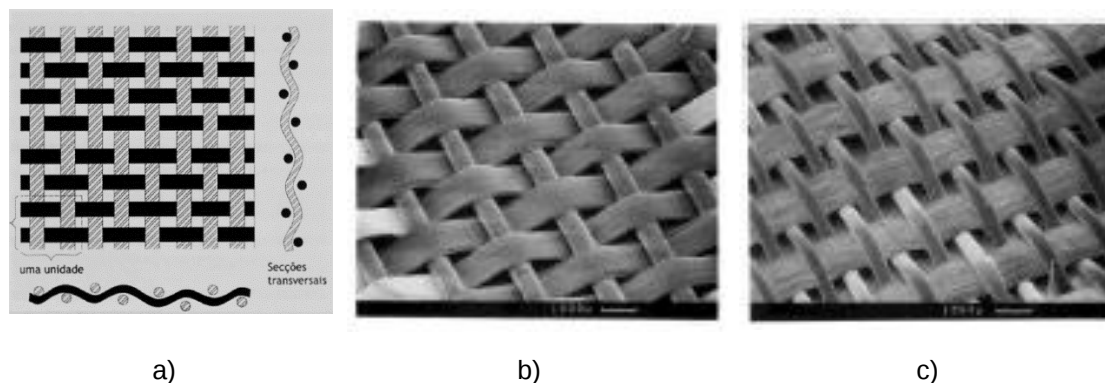


Fig. 2.5 – Geotêxteis: a) estrutura típica de um geotêxtil tecido (Pinho-Lopes, 2004); b) tecido com tira e monofilamento; c) tecido com multifilamento e monofilamento (Lopes, 1998)

Há vários tipos de malhas, embora a mais comum seja a malha simples. A espessura dos geotêxteis tecidos produzidos quer por multifilamentos, quer por fios fibrilados, varia entre 1 e 2 mm. Já nos geotêxteis tecidos fabricados a partir de tiras ou fios simples a espessura não passa de 0,5 mm.

Os geotêxteis tecidos mais comuns (Fig. 2.6) são fabricados a partir de fitas em PP, monofilamentos em PE, e de multifilamentos finos ou fios de multifilamentos de PET (Lopes & Lopes, 2010). De acordo com Shukla 2002, a estrutura do geotêxtil tecido tem grande influência nas propriedades do geotêxtil, nomeadamente, físicas, mecânicas e hidráulicas.

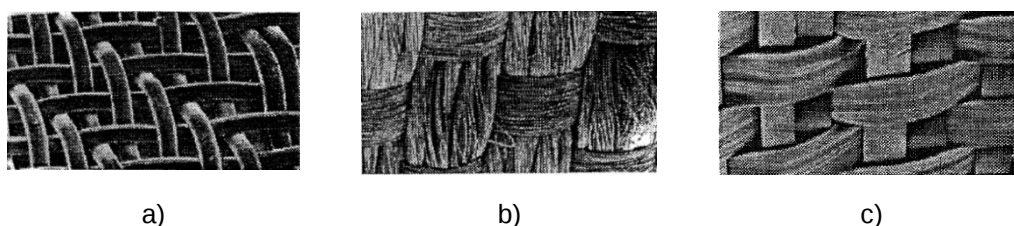


Fig. 2.6 – Geotêxteis tecidos: a) monofilamento em monofilamento; b) multifilamento em multifilamento; c) tira em tira. (Pinho-Lopes, 2004)

O processo de fabrico dos geotêxteis não-tecidos consiste na deposição contínua das fibras ou filamentos num tapete, de modo a formar-se uma malha solta que será ligada mecanicamente, termicamente ou quimicamente, e cuja espessura é ligeiramente superior à do produto final. Normalmente para estes materiais usam-se monofilamentos contínuos, podendo também eventualmente ser fabricados a partir de fibras cortadas (Pinho-Lopes, 2004).

A ligação mecânica (agulhagem) (Fig. 2.7a) é feita através da passagem da malha por milhares de agulhas com farpas com movimento contínuo. As farpas ao penetrarem a malha arrastam alguns componentes entrelaçando-os. Aos geotêxteis obtidos deste processo de fabrico atribui-se a designação de não-tecidos agulhados.

A ligação térmica (Fig. 2.7b) consiste no aquecimento da malha. No caso do material ser produzido a partir de um tipo de polímero, a ligação é feita por calandragem a temperaturas elevadas, sendo que para estes casos a temperatura é aplicada apenas nos pontos a ligar da malha, evitando assim que as fibras que o constituem fundam. No caso de geotêxteis compostos por filamentos de dois ou mais tipos de polímeros, há dois ou mais pontos de fusão distintos, o que

fará com que em determinados pontos de contacto entre os dois tipos de polímeros haja ligação por fusão. Aos geotêxteis obtidos deste processo de fabrico atribui-se a designação de não-tecidos termossoldados.

Segundo Pinho-Lopes, 2004, a eficácia deste processo de ligação entre fibras é limitada pela espessura crescente do material. Caso o material seja sujeito a temperatura suficiente para que haja fusão das fibras internas de uma malha muito espessa, as fibras que estão no seu exterior estarão sobreaquecidas e fundem. Por outro lado, se não houver temperatura suficiente para chegar ao centro da malha, a ligação obtida é inadequada, podendo conduzir à laminação do material durante a sua utilização.

Por último, a ligação química, processo que resulta da utilização de produtos como cola, resina ou derivados celulósicos, seguido de um período de cura ou processos de calandragem, permitindo assim a formação de ligações entre os elementos constituintes. Este processo é utilizado muitas vezes como complementação de uma ligação feita por agulhagem. Aos geotêxteis obtidos por este processo de fabrico atribui-se a designação de ligados quimicamente.

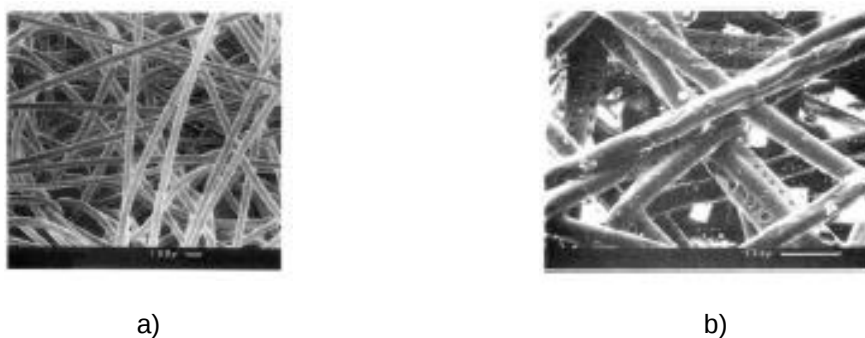


Fig. 2.7 – Exemplos de geotêxteis: a) não-tecido mecanicamente ligado (agulhado) b) não-tecido térmicamente ligado (Lopes, 1998)

Os geotêxteis tricotados são produzidos por entrelaçagem dos fios constituindo uma estrutura plana (Fig. 2.8). Estes geotêxteis são utilizados poucas vezes devido a sua grande deformabilidade quando sujeitos a cargas, sendo que a solução para este problema passa pela introdução de fios de elevada resistência e deformações reduzidas na direção longitudinal. Aos geotêxteis obtidos deste processo de fabrico atribui-se a designação de tricotados simples (Pinho-Lopes, 2004).

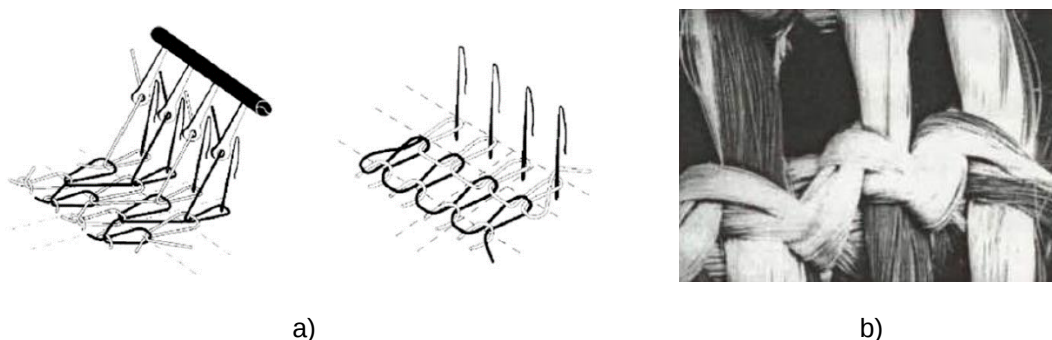


Fig. 2.8 – Geotêxtil tricotado a) processo de fabrico (Carneiro, 2009); b) estrutura (Pinho-Lopes, 2004)

2.4.2. GEOGRELHAS

As geogrelhas são malhas abertas constituídas por estruturas poliméricas planas formadas por elementos sólidos, denominados de barras, cujo tamanho, regra geral, é inferior ao das aberturas (Fig. 2.9). As aberturas transversais e longitudinais são um ponto importante a ter em conta, uma vez que estas devem permitir um intertravamento com as partículas do solo circundante. As barras estão cruzadas entre si e a resistência destes cruzamentos é um fator de grande importância, uma vez que é através destes elementos que se transmitem as cargas de uma barra para outra.

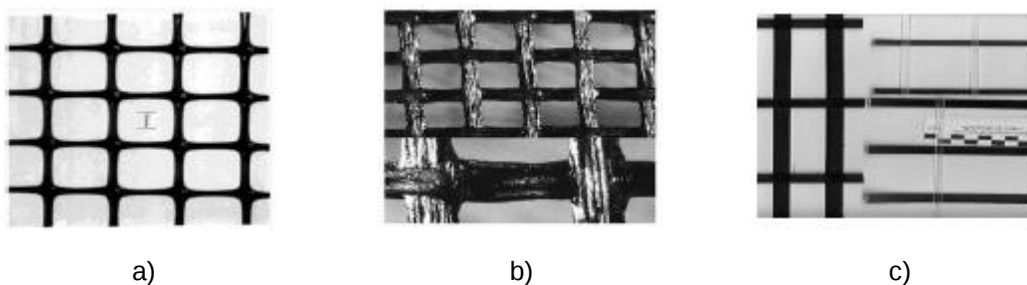


Fig. 2.9 – Exemplos de geogrelhas: a) biaxial; b) tecida; c) soldada a laser (Lopes, 1998)

Dependendo do processo de fabrico, as geogrelhas dividem-se em três tipos: extrudidas, tecidas e soldadas a laser. Dentro das geogrelhas extrudidas podemos obter dois tipos: uniaxiais e biaxiais.

As geogrelhas tecidas (Fig. 2.10) são fabricadas recorrendo a equipamentos da indústria têxtil. O processo de obtenção deste tipo de geogrelhas consiste na união de centenas de fibras por forma a obter barras longitudinais e transversais separadas por grandes aberturas. Nos pontos onde se cruzam as barras, estas são unidas por tricotagem ou entrelaçagem, sendo posteriormente o conjunto protegido por um revestimento que lhe confere estabilidade dimensional e protege as barras durante o processo de instalação em obra. Na sua grande generalidade este tipo de geogrelhas são produzidas em poliéster de tenacidade elevada e o revestimento pode ser de PVC, latex, betuminoso, entre outros (Pinho-Lopes, 2004).

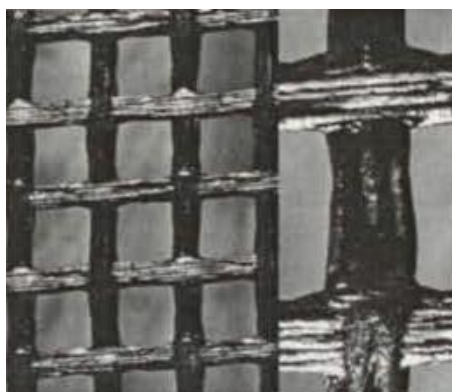


Fig. 2.10 – Estrutura típica de uma geogrelha tecida (Pinho-Lopes, 2004)

O processo de obtenção das geogrelhas extrudidas envolve duas ou três fases, a partir de folhas de polímero aditivado. Primeiramente é introduzida numa máquina que irá perfurar, de forma regular, uma folha de plástico de alguns milímetros de espessura (4 a 6 mm) (Fig. 2.11a). Após a perfuração, a folha de plástico é aquecida e estirada na direção de fabrico, permitindo que as aberturas feitas na folha se alonguem (Fig. 2.11b), acompanhada pela orientação das cadeias moleculares na direção de estiramento, permitindo assim introduzir o aumento da resistência à tração e da rigidez da grelha na direção em causa.

As grelhas produzidas por estas duas fases tem a designação de geogrelhas extrudidas uniaxiais. Quando é aplicada uma terceira fase no processo de fabrico obtém-se uma geogrelha extrudida biaxial (Fig. 2.11c), sendo que esta fase passa por repetir o processo de aquecimento e estiramento na direção transversal à de fabrico.

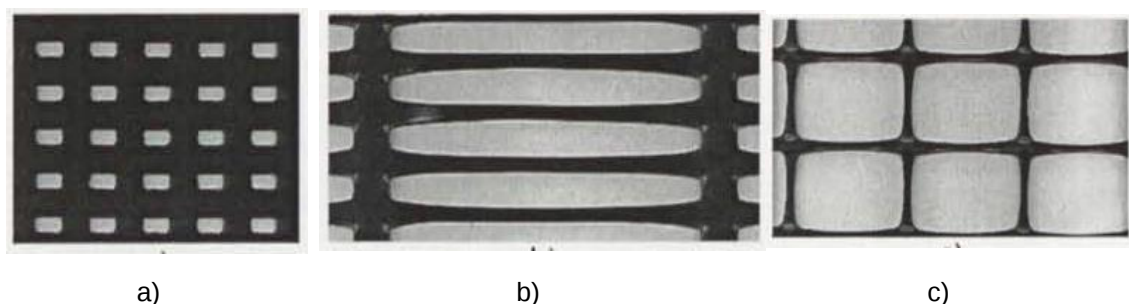


Fig. 2.11 – Geogrelha extrudida: a) folha plástica perfurada; b) uniaxial; c) biaxial (Pinho-Lopes, 2004)

Há também a possibilidade de unir as barras das geogrelhas através de ligações térmicas (Fig. 2.12) em alternativa aos processos de tricotagem ou entrelaçagem. Geralmente este tipo de geogrelha é constituída por fibras de PET unidas e envoltas numa folha de PP. Nestes casos a ligação entre barras é realizada por fusão dos pontos de cruzamento.

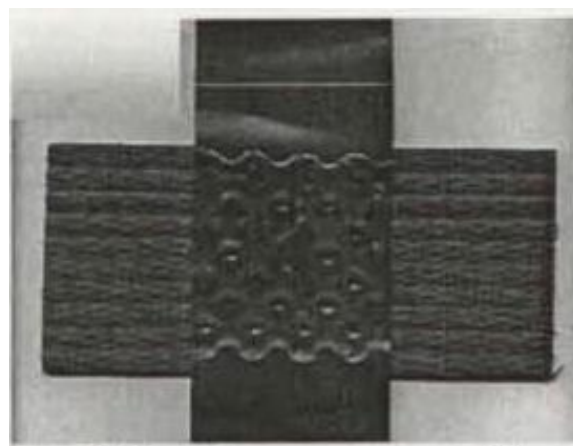


Fig. 2.12 – Estrutura típica de uma geogrelha com ligação térmica (Pinho-Lopes 2004)

2.5. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos devem apresentar determinadas propriedades de modo a desempenharem de uma forma eficaz as funções que lhes são requeridas. Estas propriedades devem garantir que o geossintético mantém as suas características e operatividade ao longo da vida útil da obra, contando que este estará sujeito a ações desde as operações de manuseamento, armazenagem até a colocação em obra.

As propriedades dos geossintéticos podem ser divididas em: físicas, hidráulicas, mecânicas e relativas à durabilidade (Lopes & Lopes, 2010).

2.5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas dos geossintéticos incluem normalmente a densidade relativa dos polímeros, a massa por unidade de área, a espessura e a distribuição e dimensão das aberturas.

- A densidade relativa dos geossintéticos é a razão entre a massa volúmica dos plásticos constituintes e a massa volúmica da água a 4°C (1,000 g.cm⁻³) (Carneiro, 2009). Na tabela 2.4 são apresentados os valores da densidade relativa dos polímeros normalmente utilizados nos geossintéticos. As normas ASTM D792-08 e ASTM D1505-03 descrevem procedimentos para a determinação volúmica de polímeros.

Tabela 2.4 – Densidade relativa dos polímeros normalmente utilizados nos geossintéticos (adaptado de Ladeira, 1995)

Polímeros	Densidade relativa
Polipropileno	0,91
Poliéster	1,22 a 1,38
Poliamida	1,1
Polietileno	0,92 a 0,95

- A massa por unidade de área (ou gramagem), é expressa em gramas por metro quadrado. Trata-se de uma propriedade importante uma vez que pode fornecer algumas indicações sobre o custo dos geossintéticos, e também pode ser um indicador dos valores de algumas propriedades mecânicas, normalmente associadas diretamente com a gramagem, como por exemplo a resistência à tração e ao punçoamento estático (Carneiro, 2009).

A caracterização da massa por unidade de área é realizada de acordo com a norma NP EN ISO 9864: 2006.

- A espessura é a distância entre a superfície superior e inferior do geossintético, sendo que esta medida é influenciada pela pressão aplicada normalmente ao plano do geossintético. A unidade associada a esta propriedade é o milímetro. Este é um parâmetro com influência direta no comportamento hidráulico e mecânico dos geossintéticos.

A caracterização da espessura dos geossintéticos é normalmente determinada através das normas NP EN ISO 9863-1: 2006 ou ASTM D5199-01: 2006.

- A distribuição e a dimensão das aberturas são características fundamentais para o dimensionamento dos geossintéticos como filtros. Por esse motivo são incluídas por muitos autores nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos.

Em alguns geossintéticos (georredes e geogrelhas) as aberturas são uniformes, como tal apenas é necessário medir as dimensões de uma das aberturas. Pelo contrário, as aberturas dos geotêxteis não-tecidos não possuem um tamanho único, mas sim um intervalo de tamanhos, cuja distribuição (porometria) é irregular. Já os geotêxteis tecidos apresentam aberturas e distribuição regular. O diâmetro das aberturas é, normalmente expresso em mm (ou μm) (Lopes & Lopes, 2010).

A caracterização das aberturas dos geossintéticos é normalmente efetuada através das normas EN ISO 12956: 1999 (peneiração húmida) e ASTM D4751: 2004 (peneiração seca).

2.5.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

As principais propriedades hidráulicas são: a permeabilidade à água normal ao plano (permissividade) e transmissividade, e estas propriedades são influenciadas pelo processo de fabrico e pelo tipo de polímero usado na fabricação do material.

- A permissividade, permeabilidade à água normal ao plano do geossintético, é uma propriedade para as funções de filtragem, em que a água passa através do geossintético perpendicularmente ao seu plano. A permissividade é expressa como a razão entre o caudal que atravessa o geossintético e o produto entre a perda de carga total (constante) e a área da secção do geossintético por onde ocorre o fluxo e é normalmente expressa em s^{-1} (Lopes & Lopes, 2010). A determinação da permeabilidade à água normal ao plano é realizada de acordo com a NP EN ISO 11058: 2003.

- A transmissividade, condições de escoamento no plano do geossintético, é uma propriedade importante para a função de drenagem. A transmissividade expressa o caudal conduzido no plano do geossintético, sob uma dada carga hidráulica e a unidade associada a esta propriedade é $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. Esta propriedade depende da espessura (e, portanto, das pressões aplicadas ao geossintético) e da distribuição das aberturas (Pinho-Lopes, 2004) e é determinada de acordo com os procedimentos descritos na NP EN ISO 12958: 2005.

2.5.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As características mecânicas dos geossintéticos constituem um dos grupos de características mais importantes dos geossintéticos, em particular quando estes exercem a função de reforço.

Durante o tempo útil de vida da obra os geossintéticos ficam sujeitos a esforços de carácter mecânico que podem ser de três tipos: esforços de tração ou compressão (esforços distribuídos), punçoamento (esforços concentrados) e rasgamento (esforços concentrados e esforços distribuídos). Os esforços acima podem-se apresentar de uma forma dinâmica, ou seja, é transmitida energia ao geossintético de uma forma rápida, por exemplo durante a colocação em obra, ou podem-se apresentar de uma forma estática, sendo que as cargas são transmitidas ao longo do tempo, que é, geralmente, o tipo de esforço a que os geossintéticos estão sujeitos durante o seu funcionamento (Lopes & Lopes, 2010). As respostas dos geossintéticos a estas solicitações dependem das seguintes propriedades mecânicas: comportamento à tração, resistência ao punçoamento, resistência ao rasgamento, atrito nas interfaces e fluência e rotura em fluência.

- O comportamento à tração dos geossintéticos depende de vários fatores, tais como: o polímero constituinte, a estrutura, o processo de fabrico e o tipo de ligação, entre outros (Lopes, 1992).

As propriedades de tração dos geossintéticos são normalmente determinadas através de ensaios de tração-extensão, sendo que para este trabalho se recorreu à norma NP EN ISO 10319: 2005 (método com tiras largas), descrita no ponto 3.4.2.

O comportamento à tração é normalmente caracterizado pela curva que relaciona a força por unidade de largura em kN/m com a extensão expressa em %. A partir desta curva podemos identificar também o módulo de rigidez (definido como a razão entre a força por unidade de largura e a extensão correspondente) (Lopes & Lopes, 2010).

A resistência à tração é provavelmente a propriedade isolada mais importante dos geossintéticos (Carneiro 2009). Na Fig. 2.13 estão representados os valores típicos, determinados a partir dos ensaios de tração, de alguns geossintéticos.

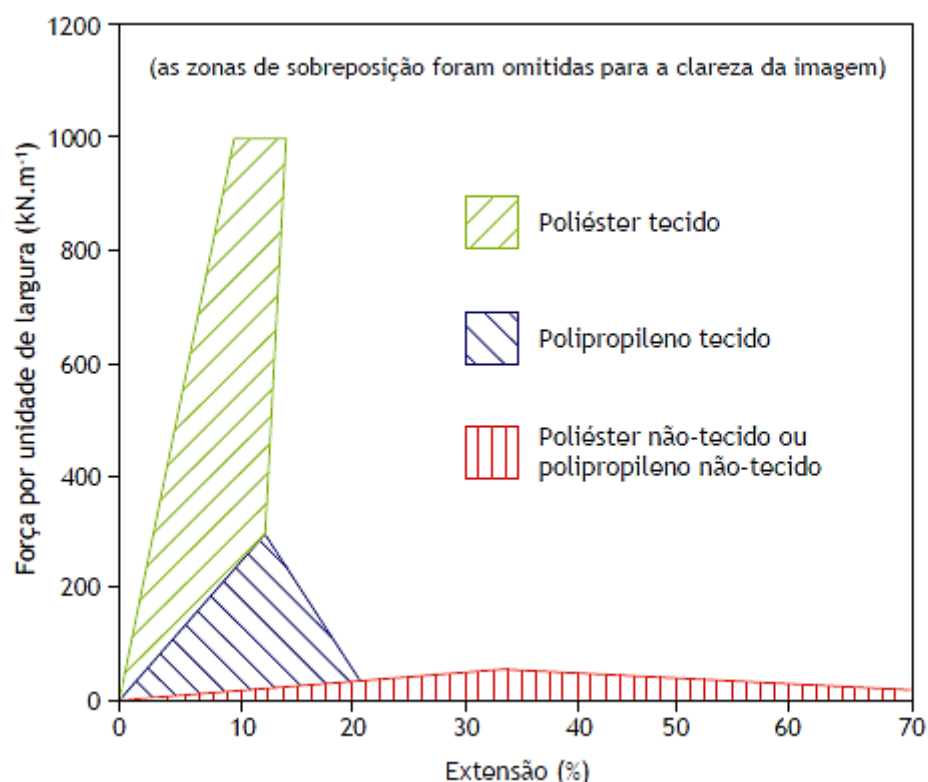


Fig. 2.13 – Aspeto geral das curvas força-extensão de alguns geotêxteis (Carneiro, 2009)

- A resistência ao punçoamento é uma propriedade geralmente associada à função de separação e pretende avaliar a resistência destes materiais a solicitações induzidas pelas partículas dos agregados a separar. A resistência ao punçoamento é definida com base numa solicitação mecânica concentrada, estática ou dinâmica. Mede a vulnerabilidade dos geossintéticos às compressões diferenciais ou a choques provocados pela queda de materiais. Esta propriedade pode dividir-se em três tipos de mecanismos de penetração: perfuração (golpe), punçoamento (efeito de compressão) e rebentamento, sendo que se exprime como um comprimento, uma força ou uma pressão, respetivamente (Lopes & Lopes, 2010).

Dentro dos ensaios existentes para a avaliação da resistência ao punçoamento, neste trabalho foi utilizado o procedimento referido na norma NP EN ISO 12236: 2008, (descrição do procedimento no ponto 3.4.3).

- A resistência ao rasgamento define-se como a rotura progressiva resultante de duas ações: uma localizada, do tipo “perfuração”, e outra distribuída, do tipo “tração”. A força de rasgamento (em N) mede a resistência dos geossintéticos à propagação de rasgos locais. Atualmente, a norma disponível para o ensaio de rasgamento é a ASTM D4533-04.

- O atrito nas interfaces, dentro das propriedades mecânicas, é uma das mais importantes quando os geossintéticos desempenham funções de reforço, uma vez que a transferência de tensões do reforço para o solo (ou de um outro material de construção) é feita através da interação entre eles.

A caracterização desta interação pode ser feita por diversos métodos: corte direto (NP EN ISO 12957-1: 2007), corte em plano inclinado (NP EN ISO 12957-2: 2007) e arranque (NP EN 13738: 2007).

- A fluência define-se como a deformação ao longo do tempo. Os geossintéticos quando aplicados em obra estão sujeitos a uma carga ou a uma tensão constante, assim, a fluência é um aspeto bastante importante no dimensionamento, em particular, para tempos de serviços longos. Esta propriedade depende do tipo de polímero.

A rotura em fluência, por sua vez, está associada a rotura dos geossintéticos após um grande período de tempo sob carga constante.

Para a avaliação da fluência e da rotura em fluência recorre-se, usualmente, aos métodos descritos nas normas EN ISO 13431: 1999 e a ASTM D5262-07.

2.6. FUNÇÕES E APLICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

A palavra geossintético está associada a um grande quantidade de materiais distintos. Estes materiais tem uma grande diversidade de aplicações derivado da facilidade da sua adaptação a diferentes situações. A aplicação dos geossintéticos é cada vez maior e uma das razões da sua utilização como substituto de materiais de construção tradicionais é a sua multifunção, podendo muitas vezes desempenhar várias funções simultaneamente.

Segundo a norma EN ISO 10318: 2005 os geossintéticos podem desempenhar sete funções principais (Fig. 2.14):

- Separação;
- Drenagem;
- Filtragem;
- Proteção;
- Reforço;
- Controlo de erosão superficial;
- Barreira de fluidos.

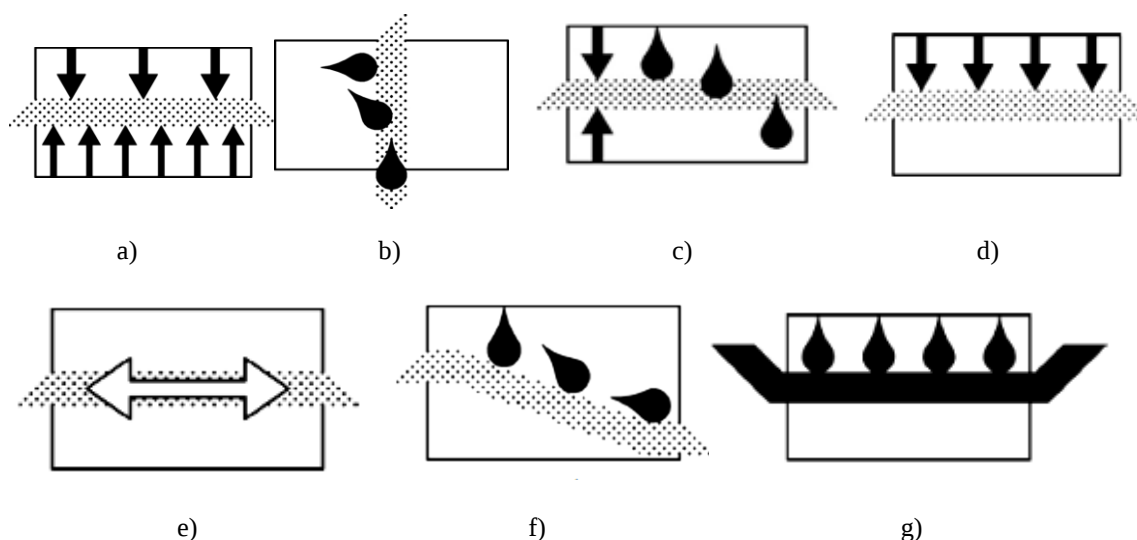


Fig. 2.14 – Representação esquemática da função de: a) separação; b) drenagem; c) filtragem; d) proteção; e) reforço; f) controle de erosão; g) barreira de fluidos

2.6.1. SEPARAÇÃO

Geossintéticos com função de separação tem por objetivo dividir dois materiais ou solos adjacentes, evitando que estes se misturem, utilizando um geotêxtil ou produto relacionado (EN ISO 10318: 2005). Esta função consiste na introdução de uma barreira sintética flexível entre dois materiais com granulometrias distintas para que o funcionamento e a integridade dos dois materiais se mantenham intactos ou sejam melhorados, não permitindo que se misturem ou interpenetrem, sob a ação das cargas aplicadas.

Os geossintéticos utilizados com função de separação necessitam de ter características mecânicas e hidráulicas apropriadas aos solos em causa, por forma a evitar a mistura dos solos adjacentes, o que pode comprometer a função que cada um desses solos tem. Por exemplo, quando se introduz um material grosseiro sobre um solo fino há tendência a ocorrer dois mecanismos no tempo: a entrada de partículas do solo fino nos vazios do solo grosseiro (comprometendo a capacidade drenante deste) e a penetração de partículas do solo grosseiro no solo fino (alterando a capacidade resistente deste). Estes dois mecanismos podem e devem ser evitados através do uso de um geossintético (Lopes & Lopes, 2010).

Um exemplo de aplicação de geossintéticos com função de separação é a separação de um balastro de uma via-férrea e o solo de fundação.

2.6.2. DRENAGEM

Geossintéticos de drenagem tem por objetivo recolher e transportar águas pluviais, freáticas e/ou outros fluidos ao longo do seu plano (EN ISO 10318: 2005). Os geossintéticos funcionam então como drenos quando são colocados, por forma a permitirem a passagem de fluidos (líquidos ou gás) ao longo do seu plano, sendo que a drenagem consiste no equilíbrio do sistema solo-geossintético que permite a circulação livre do fluido no seu plano por um período de tempo indefinido.

Um drenante terá que assegurar a evacuação da água ou gás no seu plano, evitando a entrada de partículas para o seu interior. Estes materiais devem ter uma espessura e compressibilidade

adequadas por forma a garantir o seu funcionamento ao longo da vida útil da obra (Lopes & Lopes, 2010).

Um exemplo de aplicação é a drenagem com sistemas de geocompósitos drenantes em barragens de terra.

2.6.3. FILTRAGEM

Geossintéticos com função de filtragem tem por objetivo reter o solo ou outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas, enquanto permitem a passagem de fluídos através ou para o interior deste (EN ISO 10318: 2005). Esta função é então o equilíbrio do sistema solo-geossintético que permite o fluxo livre do fluído, evitando o atravessamento ou arrastamento de partículas sólidas, perpendicularmente ao plano do geossintético durante um longo período de tempo. Para isso será necessário o material possuir características hidráulicas e de dimensão de aberturas adequadas, devendo também possuir a flexibilidade necessária para que exista um bom ajustamento à superfície do maciço por ele protegido, evitando a criação de vazios entre o solo e o geossintético para evitar a migração das partículas para esses vazios.

Esta função pode ser desempenhada em duas situações distintas: para evitar o arrastamento de partículas em suspensão em fluídos percolantes ou no interior de maciços terrosos, permitindo a passagem de água mas impedindo a passagem das partículas sólidas.

Um exemplo de aplicação de geossintéticos com função de filtragem é a usar um geotêxtil a envolver valas drenantes de areia (Lopes & Lopes, 2010).

2.6.4. PROTEÇÃO

Geossintéticos com função de proteção tem por objetivo evitar ou limitar a danificação local de um determinado elemento ou material, sendo que normalmente são utilizados geotêxteis ou produtos relacionados (EN ISO 10318 2005). Os geossintéticos são então colocado entre dois materiais por forma a absorver e distribuir as tensões e deformações transmitidas ao material a ser protegido. Esta é uma proteção interfacial, para evitar que um dos solos seja danificado pela ação das cargas concentradas ou deformações impostas pelo outro.

Quando os geossintéticos exercem esta função é importante que estes possuam, não só as propriedades mecânicas adequadas, mas também uma espessura adequada e continuidade do material. Um exemplo de aplicação de geossintéticos com função de proteção é a usar um geotêxtil entre o tapete e a base da estrada (Lopes & Lopes, 2010).

2.6.5. REFORÇO

Geossintéticos com função de reforço tem por objetivo a utilização do comportamento carga-extensão destes para melhorar as propriedades mecânicas de solo ou outros materiais de construção (EN ISO 10318 2005).

Os geossintéticos como são materiais com resistência a esforços de tração podem ser utilizados para complementar materiais que não possuam essa capacidade. A função de reforço pode ser usada em duas situações: os geossintéticos desempenham ação 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 duas camadas, conduzindo ao reforço global; e quando colocados no interior de maciços para suportar tensões de tração a que estes não resiste.

Quando os geossintéticos exercem esta função as propriedades mecânicas são fundamentais, bem como a sua evolução no tempo. Além disso é importante que a resistência das interfaces solo-reforços seja adequada, uma vez que é através delas que se desenvolvem as interações necessárias ao funcionamento do conjunto da estrutura compósita.

Um exemplo de aplicação de geossintéticos como função de reforço é introduzi-los em taludes e aterros (Lopes & Lopes, 2010).

2.6.6. CONTROLO DE EROÇÃO SUPERFICIAL

Geossintéticos com função de controlo de erosão superficial tem por objetivo a evitar ou limitar os movimentos do solo ou de outras partículas na superfície de, por exemplo, um talude (EN ISO 10318 2005).

Os geossintéticos tem a função de proteger os maciços, sendo colocados sobre estes, da ação de agentes atmosféricos, tráfego, etc. Esta é uma função que tem ganho algum destaque em obras de proteção costeira, proteção de taludes, entre outros. É uma solução que pode ser aplicada de forma provisória ou permanente, podendo ser aplicada por exemplo com geossintéticos biodegradáveis para proteger temporariamente uma estrutura da erosão superficial e promover o crescimento de vegetação que por sua vez irá assegurar a erosão superficial no lugar do geossintético.

Um exemplo de aplicação de geossintéticos como função de controlo de erosão é introduzi-los em taludes para os proteger dos agentes meteorológicos (Lopes & Lopes, 2010).

2.6.7. BARREIRA DE FLUÍDOS

Geossintéticos com função de barreira de fluídos tem por objetivo evitar a migração de fluídos (EN ISO 10318 2005).

Para os geossintéticos usados com esta função tem que garantir a sua continuidade durante: as operações de transporte, manuseamento e colocação em obra. Será também de grande importância que o material tenha as propriedades que lhe permitam resistir aos ataques químicos que os fluídos contêm. Será importante ter em atenção às ligações entre faixas, pois a sua realização terá que ser adequada para que a estanquidade esteja garantida.

Um exemplo de aplicação de geossintéticos como função de barreira de fluídos é a sua aplicação como sistema de impermeabilização de base ou cobertura de aterros de resíduos (Lopes & Lopes, 2010).

2.6.8. APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS

Neste ponto serão enunciadas as principais aplicações dos geossintéticos de acordo com a norma EN ISO 10318: 2005. Na Fig. 2.15 encontram-se representadas, de forma esquemática, algumas das aplicações que estes materiais podem ter em obras de engenharia civil.

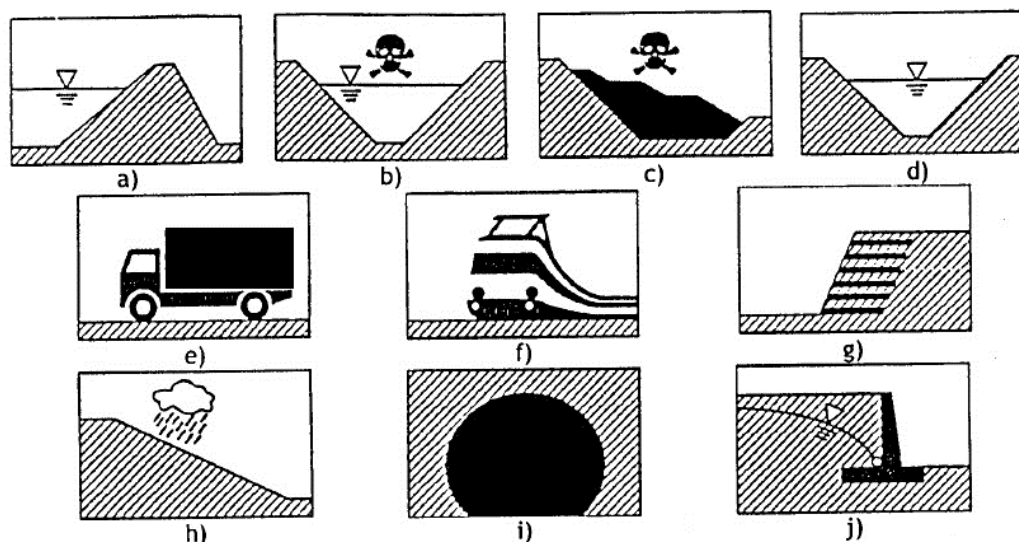


Fig. 2.15 – Representação esquemática das principais aplicações de um geossintético (EN ISO 10318 2005): a) reservatórios e barragens; b) depósitos de resíduos líquidos; c) depósitos de resíduos sólidos; d) canais; e) obras rodoviárias; f) obras ferroviárias; g) funções e estruturas de suporte; h) sistemas de controlo de erosão; i) túneis e estruturas subterrâneas; j) sistemas de drenagem (Lopes & Lopes, 2010)

Existe uma boa referência às aplicações dos geossintéticos em Giround et al., 1985.

2.7. ESTADO DE ARTE SOBRE ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA

2.7.1. INTRODUÇÃO

O tempo de vida útil de serviço dos geossintéticos varia entre dez e cem anos. Para muitas aplicações dos geossintéticos a danificação mecânica é o principal mecanismo de degradação a considerar (Greenwood, 1998). Assim sendo, vários estudos têm sido realizados analisando a danificação mecânica em laboratório (Paula *et al.*, 2004), (Hufenus *et al.*, 2005), (Chiou, 2006) (Moreira *et al.*, 2010), (Pinho-Lopes, 2013), (Carneiro *et al.*, 2014), (Carlos *et al.*, 2015).

O processo de instalação pode provocar danificação nos geossintéticos, causando mudanças nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. A danificação mecânica induzida durante o processo de instalação é o resultado de abrasão, punçoamento, ou deformação local das fibras dos geossintéticos que resultam tipicamente de defeitos locais (Koerner, 1999) (Lopes & Lopes, 2010).

Dos fatores locais que podem provocar as tensões acima referidas, podem-se destacar: a camada sobre a qual o geossintético é instalado, o material colocado sobre o geossintético, o equipamento de construção, os procedimentos utilizados e as condições climáticas. No entanto, as próprias características dos geossintéticos têm um papel importante no mecanismo de danificação (Paula, 2003).

De uma forma geral, a danificação ocorrida durante a instalação depende das características dos geossintéticos, da distribuição granulométrica, tamanho e forma das partículas do solo, da energia de compactação utilizada e da instalação adequada dos geossintéticos (Elvidge, 1999) (Hufenus, 2005).

Os mecanismos de danificação podem ser divididos em seis tipos (Lopes & Lopes, 2010):

- A abrasão tem origem em ações repetidas de contacto entre o geossintético e um material abrasivo ou sempre que existem ações cíclicas que implicam movimento relativo entre o geossintético e o solo em contacto com este.

Este mecanismo pode ocorrer durante o espalhamento e compactação do material de aterro sobre os geossintéticos, e a circulação dos equipamentos de construção. As principais consequências associadas à abrasão são a redução de espessura e a alteração das propriedades hidráulicas do material. Quando a abrasão é significativa pode haver a destruição total de uma determinada área do geossintético.

- O aparecimento de fendas e separação de material (“splitting”) advém do contacto direto de partículas angulosas e de faces cortantes que constituem o material de aterro com o geossintético, em conjunto com o efeito da circulação do equipamento de construção. Este tipo de mecanismo de danificação pode levar à fragilização local do material e, consequentemente, à redução das suas propriedades mecânicas.

- A danificação mecânica por punçoamento ocorre quando materiais de aterro com faces cortantes são vertidos diretamente sobre o geossintético ou quando se compactam camadas finas de material de aterro com equipamento de compactação pesado. Este tipo de mecanismo de danificação, no caso dos geotêxteis, pode criar cavidades de profundidade significativa ou mesmo aberturas, no geossintético, comprometendo o desempenho deste. Este fenómeno é mais suscetível de ocorrer com materiais flexíveis colocados sobre solos moles.

- A rotura em tensão pode surgir em serviço, quando o material é submetido a cargas e deformações excessivas ou durante a instalação em obra, devido à circulação de equipamento de construção pesado sobre camadas finas de material de aterro que cobrem o geossintético, colocado sobre material mole. Caso o geossintético não seja suficientemente flexível, a deformação induzida provoca excessos de tensão que podem conduzir à rotura. Após a rotura, o geossintético não desempenha as funções para o qual foi instalado e dimensionado, como, por exemplo, separação ou reforço.

- A danificação mecânica pode também dar origem ao aparecimento de fibras cortadas. Este mecanismo ocorre quando o material em contacto com o geossintético tem faces cortantes e este está sobre uma camada mais rígida.

- Por último, o rasgamento, que é um mecanismo de danificação mecânica que ocorre quando existem forças de rasgamento a atuar numa zona do geossintético em que existe alguma danificação prévia devido ao corte de fibras ou à rotura em tensão. Isto deve-se à concentração de tensões nas fibras em redor das zonas danificadas.

De um modo geral, numa amostra de geossintético verifica-se a coexistência dos vários, ou mesmo todos, mecanismos referidos. Os efeitos da danificação durante a instalação em obra de geossintéticos, também podem comprometer a capacidade destes materiais realizarem as funções para as quais foram dimensionados.

É importante, então, perceber e estudar a forma como os mecanismos de danificação dos geossintéticos variam consoante o tipo de geossintético, o material em contacto com o geossintético e as condições de instalação em obra. Neste contexto, realizou-se este trabalho onde se avalia a influência da danificação mecânica induzida por diferentes solos em diferentes tipos de geossintéticos. O procedimento laboratorial da danificação mecânica e o equipamento utilizado estão descritos no ponto 3.3 desta dissertação.

Para a elaboração do presente estado de arte, sobre danificação mecânica de geossintéticos, foi realizada uma pesquisa bibliográfica onde foram selecionados estudos realizados nos últimos anos que contemplassem a realização de danificação mecânica de geossintéticos, utilizando o

mesmo equipamento usado neste trabalho, dos quais se podem destacar: (Paula *et al.*, 2004), (Moreira *et al.*, 2010), (Carneiro *et al.*, 2012), (Carneiro *et al.*, 2013), (Carneiro *et al.*, 2014), (Carlos *et al.*, 2015).

Nos pontos seguintes serão apresentados, com mais pormenor, três trabalhos realizados onde são apresentadas os objetivos, os materiais utilizados e as principais conclusões a que os autores chegaram com a realização de ensaios de danificação mecânica. O critério de escolha destes trabalhos foi o facto destes se debruçarem sobre a avaliação da danificação induzida pelo *corundum*, comparativamente à danificação induzida por solos naturais.

2.7.2. ESTUDO REALIZADO POR PAULA ET AL, 2004

2.7.2.1 INTRODUÇÃO/OBJETIVOS

Ao longo dos últimos anos de aplicação desta norma de ensaio tem-se vindo a concluir que os resultados emanados da danificação realizada são considerados conservativos, em virtude das características do material granular confinante durante a instalação (*corundum*). Por isso, atualmente surge o interesse de desenvolver estudos com vista à definição de uma solução alternativa a esse material. Este trabalho realizado por Paula *et al.* (2004) teve como objetivo desenvolver um programa de ensaios em que se utilizaram dois materiais naturais de confinamento, com características granulométricas idênticas às do agregado sintético (*corundum*) actualmente exigido na norma EN ISO 10722: 2007. Com este objetivo em mente, utilizaram-se diferentes tipos de geossintéticos. Para caracterizar os geossintéticos após a danificação procedeu-se a realização de ensaios de tração (NP EN ISO 10319: 2005).

2.7.2.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Na tabela 2.5 são apresentadas as principais características dos geossintéticos testados.

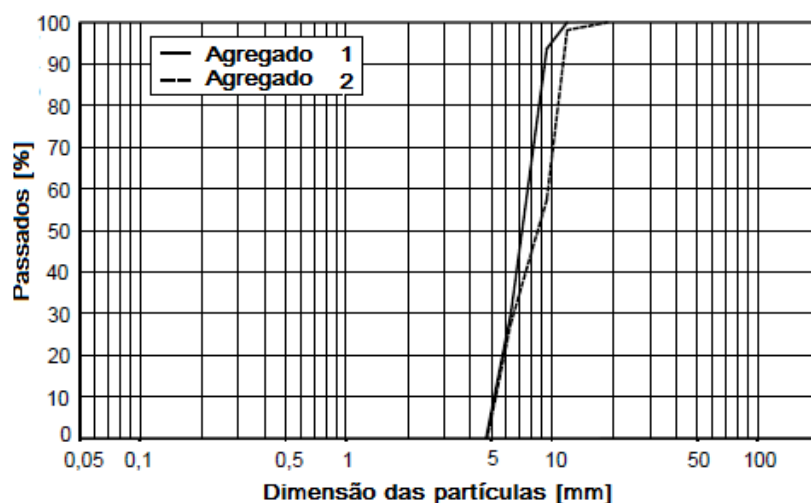
Tabela 2.5 - Características dos geossintéticos antes da danificação mecânica (adaptado de Paula *et al.*, 2004)

Material N°			Resistência à Tração [kN m ⁻¹]	Deformação na Ruptura [%]
1	GGe	Geogrelha extrudida uniaxial em HDP	57,36	13,83
2	GGe	Geogrelha extrudida biaxial em PP	45,91	14,83
3	GGt	Geogrelha tecida biaxial em PE	60,14	21,07
4	GTnt	Geotêxtil não tecido em PP (800 g m ⁻²)	50,11	111,94
5	GTt	Geotêxtil tecido em PP (320 g m ⁻²)	68,97	14,89

Os materiais de confinamento são: o agregado sintético (*corundum*) referido na EN ISO 10722: 2007, e dois materiais granulares naturais com a mesma gama de diâmetro do agregado sintético (Fig. 2.16). Diferem entre si na origem petrográfica e no valor da resistência ao desgaste Los Angeles (E LNEC 237 s.d.) (Tabela 2.6).

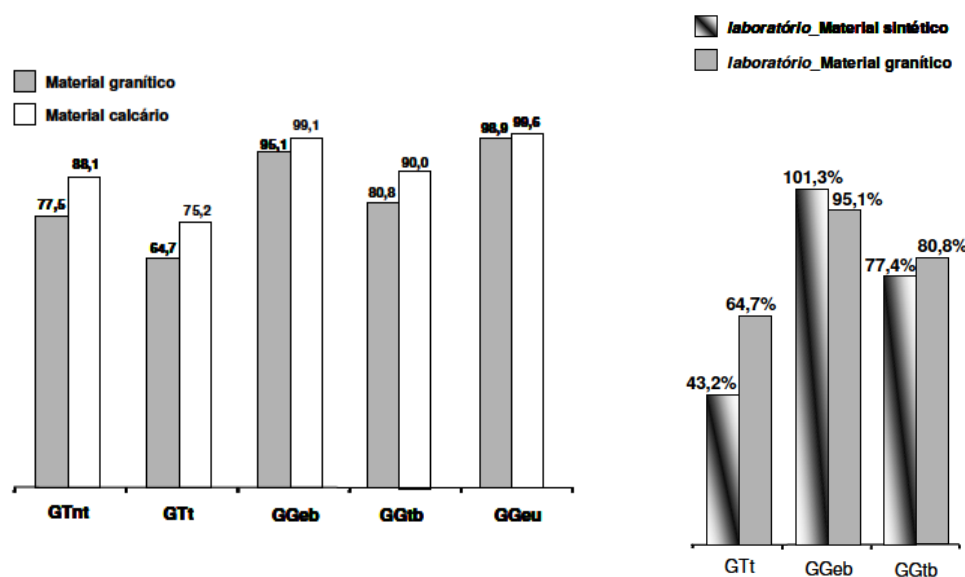
Tabela 2.6 – Materiais granulares naturais de confinamento (adaptado de Paula *et al.*, 2004)

Agregado	Origem petrográfica	Gama de dimensões	LA [%]
1	Granítico	4,75 – 12,50	28,0
2	Calcário	4,75 – 19,00	19,3

Fig. 2.16 – Curvas granulométricas dos materiais granulares de confinamento (adaptado de Paula *et al.*, 2004)

2.7.2.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES OBTIDAS

Na Fig. 2.17 está representado um gráfico de barras relativo às resistências residuais à tração dos geossintéticos danificados em laboratório.

Fig. 2.17 – Resistência à tração residual dos geossintéticos danificados em laboratório (adaptado de Paula *et al.*, 2004)

A caracterização da danificação causada ao material, foi avaliada através do comportamento tração-extensão a curto prazo dos geossintéticos. Com base nos resultados obtidos o foi possível formular as seguintes conclusões:

- quando o material confinante é natural, a petrografia deste assume um papel relevante na danificação induzida aos geossintéticos;
- dos geossintéticos considerados, os geotêxteis foram os que revelaram maior suscetibilidade à danificação durante a instalação, em particular os geotêxteis tecidos;
- o comportamento tração-extensão dos geossintéticos é mais alterado pela danificação mecânica durante a instalação, quanto maior for o grau de danificação induzida;
- a danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório é maior quando o material confinante é o material granular sintético previsto atualmente na EN ISO 10772: 2007;
- a consideração do valor de resistência ao desgaste Los Angeles carece de significado quando o material granular confinante é natural;
- o estudo comparativo efetuado 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, dado 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.

2.7.3. ESTUDO REALIZADO POR CARNEIRO ET AL., 2012

2.7.3.1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Este trabalho realizado por Carneiro *et al.* (2012) teve por objetivo a avaliação do efeito da danificação mecânica durante o processo de instalação (DDI), no comportamento a curto prazo, em dois geotêxteis não-tecidos com massas por unidade de área diferentes. Foram então realizados ensaios laboratoriais de danificação mecânica (de acordo com a NP ISO 10722: 2007) com cargas cíclicas diferentes (tabela 2.7) e dois agregados diferentes, o agregado previsto na norma (*corundum*) e um solo natural (granito). De modo a caracterizar os danos provocados nos geotêxteis foram realizados ensaios de tração (NP EN ISO 10319: 2008), ensaios de rasgamento (ASTM D4533-04: 2009) e ensaios de punção estático (NP EN ISO 12236: 2008).

Tabela 2.7 – Características principais dos ensaios de danificação mecânica realizados (adaptado de Carneiro *et al.*, 2012)

DDI	Carga cíclica [kPa]	Agregado
I	5 a 500	<i>Corundum</i>
II	5 a 900	<i>Corundum</i>
III	5 a 900	Granito

2.7.3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Na tabela 2.8 são apresentadas as principais características dos geotêxteis testados.

Tabela 2.8 – Características dos geossintéticos antes da danificação mecânica (adaptado de Carneiro et al., 2012)

Geotêxtil	G280	G500
Massa por unidade de área ^a (g m ⁻²)	280	500
Espessura ^b (mm)	3,2	3,8
Resistência à tração ^c (kN m ⁻¹)	13,2 (1,0)	25,9 (1,4)
Extensão na força máxima ^c (%)	94,8 (9,6)	101,9 (9,0)

^a Determinado de acordo com EN ISO 9864: 2006

^b Determinado de acordo com EN ISO 9863-1: 2006

^c Determinado de acordo com EN ISO 10319: 2008

Entre parêntesis encontram-se os valores de desvio padrão.

2.7.3.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES OBTIDAS

Na Fig. 2.18, Fig. 2.19 e Fig. 2.20 estão representados os gráficos de barras relativo às resistências residuais à tração, ao punçoamento e ao rasgamento dos geossintéticos danificados em laboratório, respetivamente.

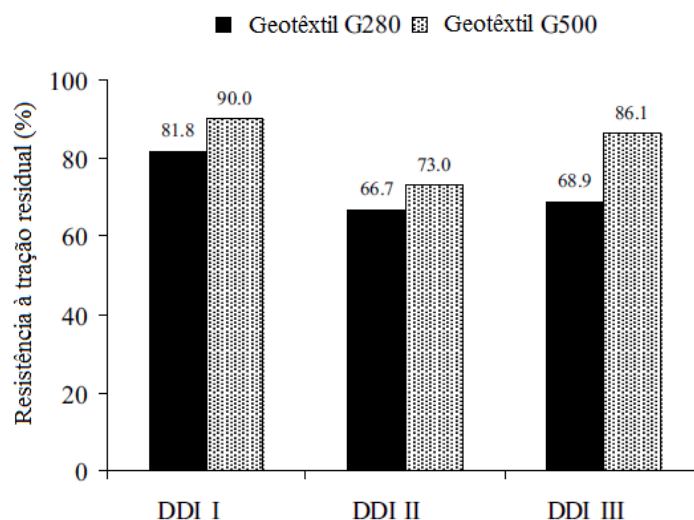


Fig. 2.18 - Resistência à tração residual dos geossintéticos danificados em laboratório (adaptado de Carneiro et al., 2012)

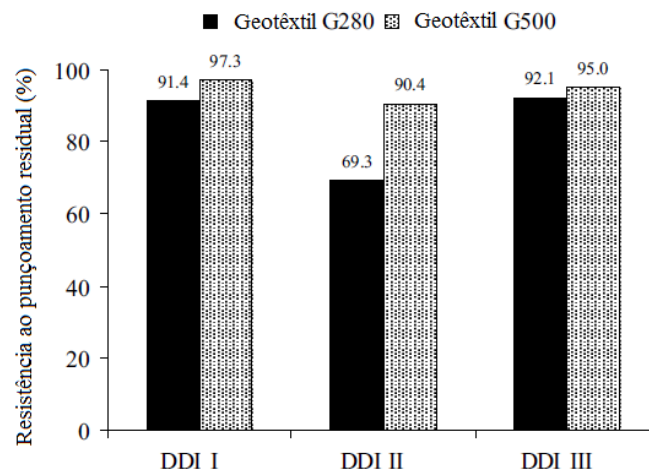


Fig. 2.19 - Resistência ao punçoamento residual dos geossintéticos danificados em laboratório (adaptado de Carneiro *et al.*, 2012)

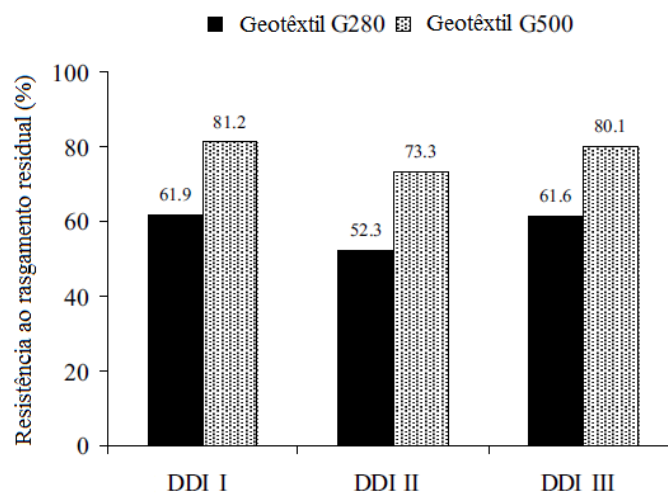


Fig. 2.20 - Resistência ao rasgamento residual dos geossintéticos danificados em laboratório (adaptado de Carneiro *et al.*, 2012)

Com base nos resultados obtidos o foi possível formular as seguintes conclusões:

- Os ensaios de danificação mecânica realizados provocaram perdas consideráveis na resistência mecânica dos geotêxteis, tendo o geotêxtil, com menor massa por unidade de área, G280 sofrido uma danificação superior;
- A danificação induzida pelo *corundum* foi superior à danificação induzido pelo granito;
- Os danos induzidos no ensaio de danificação mecânica com o mesmo agregado (*corundum*) dependeram também do aumento da carga cíclica de 5 a 500 kPa para 5 a 900 kPa;
- As reduções de resistência que ocorram nos geotêxteis durante o processo de instalação, podem ser tidas em conta através da introdução de fatores de segurança durante o dimensionamento, de modo a que os geotêxteis mantenham as propriedades com valores mínimos após a instalação, e desempenhem um funcionamento correto.

2.7.4. ESTUDO REALIZADO POR CARLOS ET AL, 2015

2.7.4.1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Este trabalho realizado por Carlos *et al.* (2015) teve por objetivo a avaliação do efeito da danificação mecânica no comportamento a curto prazo de dois geotêxteis não-tecidos (com massas por unidade de área distintas). Para isso, foi realizado um procedimento normativo de danificação mecânica (EN ISO 10722: 2007) usando o solo referido na norma (*corundum*) e outros oito solos utilizados recorrentemente em aplicações de engenharia civil. Para caracterizar os geossintéticos após a danificação procedeu-se a realização de ensaios de tração (NP EN ISO 10319: 2005).

2.7.4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Na tabela 2.9 são apresentadas as principais características dos geotêxteis testados.

Tabela 2.9 – Características dos geossintéticos antes da danificação mecânica (adaptado de Carlos et al., 2015)

Geotêxtil	G250	G400
Massa por unidade de área ^a (g m ⁻²)	262 (±14)	412 (±20)
Espessura ^b (mm)	2,37 (±0,10)	3,32 (±0,15)
Resistência à tração ^c (kN m ⁻¹)	16,00 (±1,20)	25,56 (±0,97)
Extensão na força máxima ^c (%)	70,4 (±2,5)	70,9 (4,6)

^a Determinado de acordo com EN ISO 9864: 2006

^b Determinado de acordo com EN ISO 9863-1: 2006

^c Determinado de acordo com EN ISO 10319: 2005

Entre parêntesis encontram-se intervalos de confiança de 95%

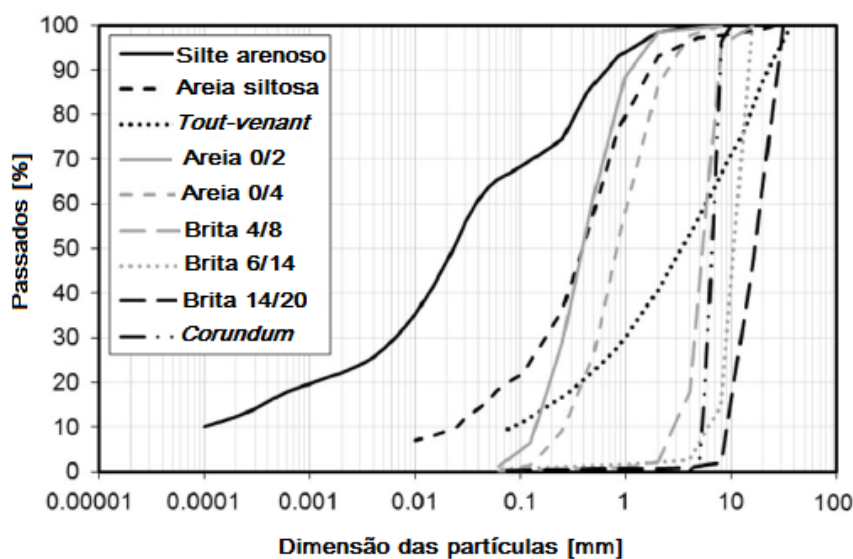


Fig. 2.21 – Curvas de distribuição granulométrica dos solos (adaptado de Carlos et al., 2015)

2.7.4.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES OBTIDAS

Na Fig. 2.22 está representado um gráfico de barras relativo às resistências residuais à tração dos geossintéticos danificados em laboratório.

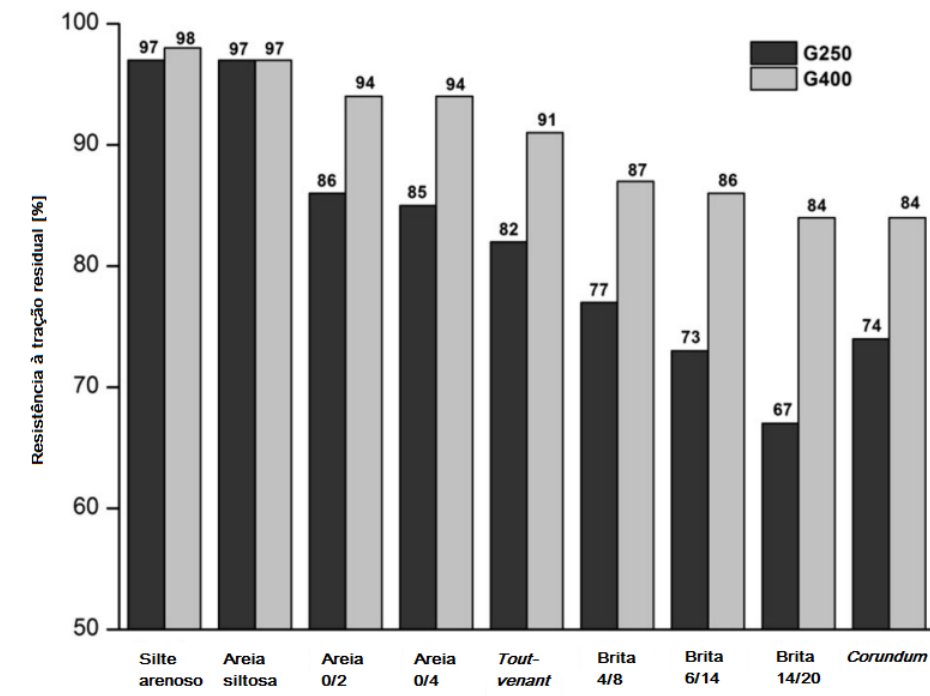


Fig. 2.22 – Resistência à tração residual dos geotêxteis G250 e G400 depois da danificação mecânica (adaptado de Carlos et al., 2015)

Com base nos resultados obtidos o foi possível formular as seguintes conclusões:

- As danificações induzidas incluíram: degradação das fibras, cortes, abrasão e deformações;
- As deformações observadas nos geotêxteis ocorreram, principalmente, devido a solos com baixa capacidade de coesão;
- Os ensaios de danificação mecânica causaram reduções da resistência à tração, exceto nos ensaios realizados com os solos mais finos (areia siltosa e silte arenoso);
- As reduções de resistência dependeram do tamanho das partículas, da uniformidade dos solos e da massa por unidade de área e espessura dos geotêxteis;
- Os solos com partículas maiores tiveram tendência a provocar perdas maiores de resistência à tração, enquanto que os solos com maiores quantidades de finos tiveram tendência a provocar perdas menores de resistência à tração;
- O *corundum* foi o agregado que causou maior redução de resistência à tração, indicando que o uso deste agregado na EN ISO 10722: 2007 é uma aproximação conservativa para os geotêxteis não-tecidos aplicados em solos finos.
- O geotêxtil G400 revelou sofrer reduções de resistência à tração menores, por possuir uma massa por unidade de área superior à do geotêxtil G250.

3

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão caracterizados e identificados os geossintéticos usados neste trabalho. Além disso, serão também descritos: o ensaio de danificação, os ensaios de avaliação da danificação, os equipamentos utilizados e exemplos de tratamento de danos a ser feitos no capítulo seguinte. Na Fig. 3.1 está sintetizado o procedimento experimental utilizado neste trabalho.

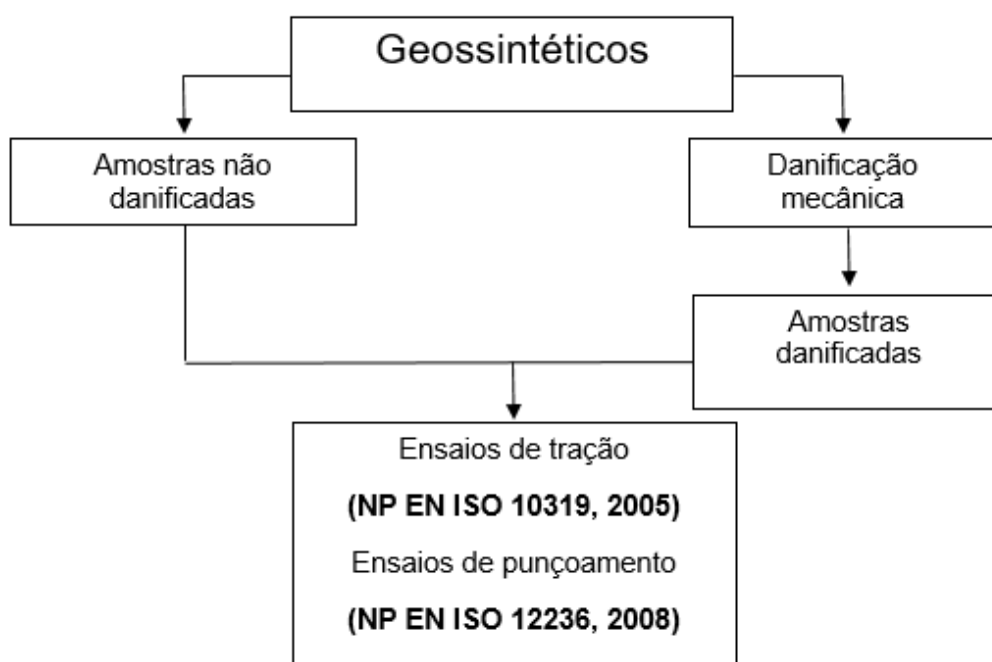


Fig. 3.1 – Diagrama do procedimento experimental

3.2. GEOSSINTÉTICOS

Os cinco materiais usados incluem três tipos de geossintéticos: geotêxteis tecidos, geotêxteis não-tecidos e geogrelhas. A todos os materiais foram atribuídas designações tendo em conta o tipo de material, T - geotêxteis tecidos, NT - geotêxteis não-tecidos e GG - geogrelha, seguidos da massa por unidade de área (MUA), exceto para a geogrelha.

Assim foram usadas as seguintes designações:

T80 – geotêxtil tecido de polietileno de alta densidade de MUA 80 g m⁻² (Fig. 3.2);

T200 – geotêxtil tecido de polietileno de alta densidade de MUA 200 g m⁻² (Fig. 3.3);

NT200 – geotêxtil não-tecido de polipropileno de MUA 200 g m⁻² (Fig. 3.4);

NT300 – geotêxtil não-tecido de polipropileno de MUA 300 g m⁻² (Fig. 3.5);

GG – geogrelha de poliéster com revestimento de PVC (Fig. 3.6).



Fig. 3.2 – Geotêxtil T80



Fig. 3.3 - Geotêxtil T200



Fig. 3.4 - Geotêxtil NT200

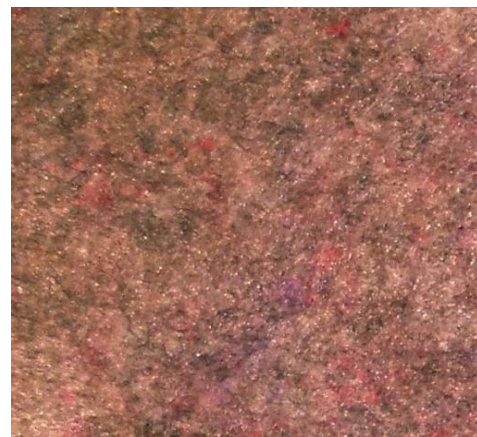


Fig. 3.5 - Geotêxtil NT300

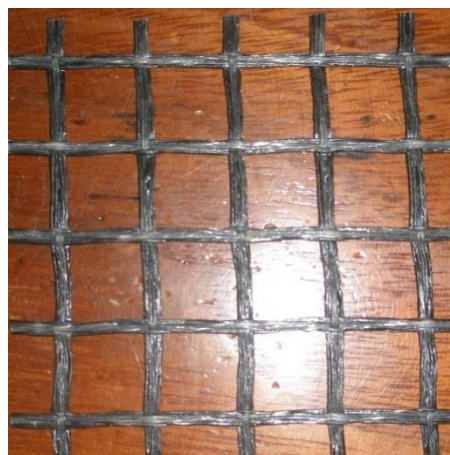


Fig. 3.6 - Geogrelha GG

Na tabela 3.1 estão apresentadas as principais características dos geossintéticos utilizados (amostras intactas).

Tabela 3.1 – Principais características dos geossintéticos (amostras intactas)

Geossintético	Tipo	MUA [g m ⁻²] ¹	Espessura [mm] ²	T [kN/m] ³	Fp [N] ⁴
T80	Tecido	79 (1,7%)	0,58 (2,3%)	11,1 (2,5%)	1529 (4,5%)
T200	Tecido	207 (1,1%)	0,85 (1,0%)	27,7 (6,1%)	4188 (0,9%)
NT200	Não-tecido	191 (7,3%)	1,57 (10,3%)	11,9 (5,7%)	2341 (11,2%)
NT300	Não-tecido	297 (11,9%)	2,38 (8,0%)	13,0 (15,2%)	2176 (5,3%)
GG	Tecida	291 (4,7%)	1,84 (2,8%)	45,7 (3,3%)	---

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

1 – Determinado de acordo com a norma (NP EN ISO 9864: 2006).

2 – Valores obtidos a partir de ensaios de espessura de acordo com a norma (NP EN ISO 9863-1: 2006).

3 – Valores obtidos a partir de ensaios de tração-extensão (NP EN ISO 10319: 2005).

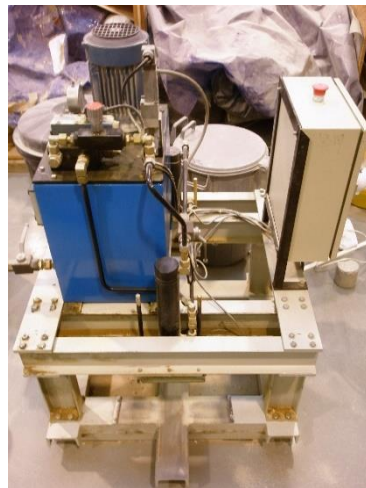
4 – Valores obtidos a partir de ensaios de punção estático (NP EN ISO 12236: 2008).

3.3. ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA

3.3.1. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO

Este procedimento tem por objetivo a simulação de danificação mecânica em geossintéticos, causada por materiais granulares, quando sujeitos a cargas repetitivas. A danificação pode ser avaliada visualmente e através da perda de características mecânicas, como a resistência a tração ou a resistência ao punçoamento.

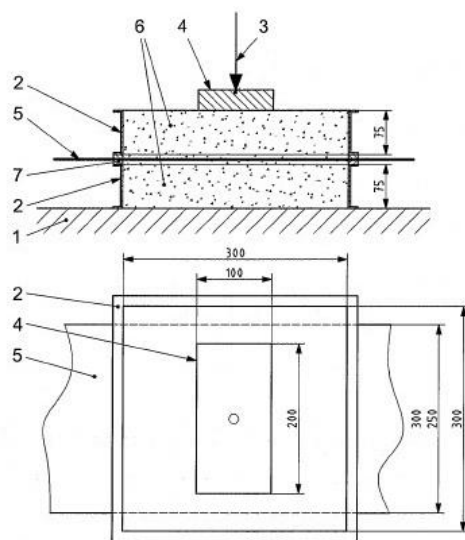
O procedimento de danificação mecânica foi efetuado num equipamento laboratorial protótipo (Fig. 3.7a, c) seguindo o procedimento da norma EN ISO 10722: 2007. O equipamento é formado por uma caixa metálica (Fig. 3.7b) com 300 mm por 300 mm (dimensões internas), dividida em duas partes, uma superior e outra inferior, com 75 mm de altura cada. Possui também um mecanismo de compressão que pode ser controlado para produzir ciclos de pressão entre $(5 \pm 0,5)$ kPa e (500 ± 10) kPa numa placa de carga ligada ao pistão hidráulico, a uma frequência de 1 Hz.



a)



b)



c)

Fig. 3.7 – Equipamento para o ensaio de danificação mecânica: a) vista geral do equipamento; b) caixa de danificação; c) esquema representativo do equipamento

Os provetes a ser testados foram cortados com 250 mm de largura e 500 mm de comprimento (Fig. 3.8).

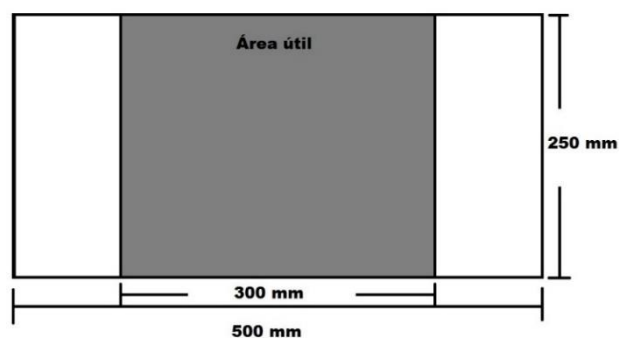


Fig. 3.8 - Esquema dos provetes usados no ensaio de danificação mecânica

A camada de solo (Fig. 3.9a, b) colocada por baixo de cada provete é constituída por duas subcamadas, cada uma com 37,5 mm de altura, compactadas (Fig. 3.9c, d) por uma placa de carga com as dimensões internas da caixa inferior, com uma pressão de (200 ± 2) kPa durante 60 s. Acima de cada provete é colocada uma camada única de solo (Fig. 3.9b) não compactado com 75 mm de altura.



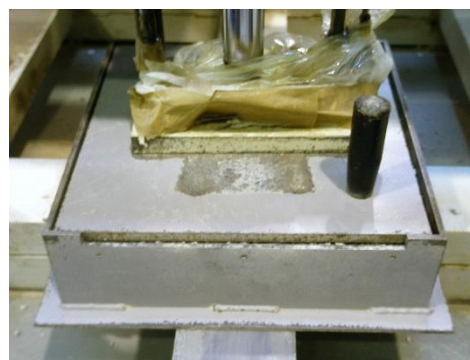
a)



b)



c)



d)

Fig. 3.9 – Enchimento da caixa inferior com solo: a) Primeira subcamada; b) Compactação da primeira subcamada; c) Segunda subcamada; d) Compactação da segunda subcamada

Cada provete foi então submetido a danificação por 200 ciclos de compressão entre $(5 \pm 0,5)$ kPa e (500 ± 10) kPa a uma frequência de 1 Hz (Fig. 3.10).



Fig. 3.10 - Equipamento no início do ensaio de danificação mecânica

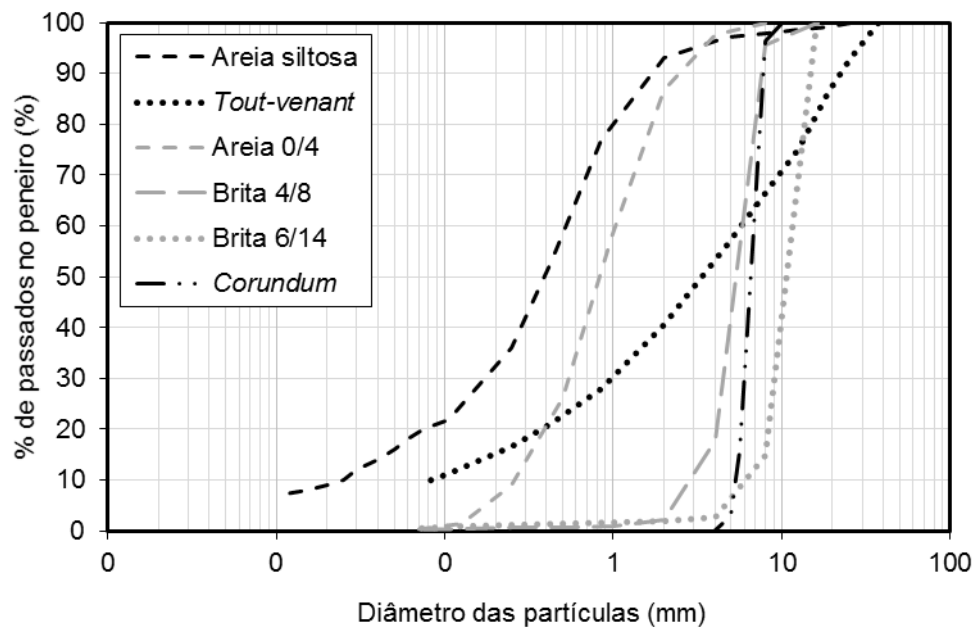
3.3.2. SOLOS

O ensaio de danificação mecânica foi efetuado com o agregado sintético de óxido de alumínio (*corundum*) (Fig. 3.11f) especificado na EN ISO 10722: 2007 e com outros cinco solos naturais. Estes solos foram escolhidos para que houvesse uma maior caracterização e representação dos materiais que estão em contacto com os geossintéticos em obras de engenharia civil, havendo assim a possibilidade de comparar os valores obtidos. Foram usadas areias: areia siltosa (Fig. 3.11a) e areia com granulometria 0/4 (Fig. 3.11b); *tout-venant* (Fig. 3.11c); e duas britas: brita com granulometria 4/8 (Fig. 3.11d) e 6/14 (Fig. 3.11e). É de interesse também referir que as areias e o *tout-venant* podem ser utilizadas na construção de paredes, taludes, aterros e pavimentos reforçados (rodovias, ferrovias, aeroportos), argamassas e estruturas reforçadas com geossintéticos. Por sua vez, as britas podem ser usadas como drenos, filtros, base e sub-base de pavimentos de estradas, lastro de vias férreas, pisos, agregado para o fabrico de betão, argamassas, estruturas reforçadas com geossintéticos, muros de suporte, muros de gavião e cobertura de aterros.



Fig. 3.11 – Solos usados no ensaio de danificação mecânica: a) areia siltosa; b) areia 0/4; c) *tout-venant*; d) brita 4/8; e) brita 6/14; f) *corundum*

Os solos podem ser caracterizados de acordo com a sua textura e granulometria. Dentro da textura, os solos são classificados de acordo com o tamanho das partículas (solos finos ou granulares) e pela sua forma (angulares, arredondadas, lamelares ou fibrilares). As distribuições granulométricas dos solos foram determinadas de acordo com a norma ISO/TS 17892-4: 2004 e estão representadas na Fig. 3.12. Os principais parâmetros de caracterização dos solos (D_{max} – tamanho máximo da partícula, C_u – coeficiente de uniformidade, C_c – Coeficiente de curvatura, textura e forma das partículas) podem ser encontrados na Tabela 3.2.

Fig. 3.12 – Curvas de distribuição granulométrica dos solos (adaptado de Carlos *et al*, 2015)Tabela 3.2 – Caracterização da distribuição granulométrica e forma das partículas dos solos
(adaptado de Carlos *et al*, 2015)

Solos	Tamanho das partículas	Forma das partículas	D_{50} (mm)	D_{max} (mm)	C_u	C_c
Areia Siltosa	Fino	Arredondadas	0,394	25,4	22,0	2,6
Areia 0/4	Fino	Arredondadas	0,869	8,0	6,0	0,7
<i>Tout-venant</i>	Granulometria	Angulares	3,669	37,5	72,2	2,1
Brita 4/8	Granular	Angulares	5,656	16,0	2,1	1,2
Brita 6/14	Granular	Angulares	11,305	16,0	1,9	1,1
<i>Corundum</i>	Granular	Angulares	6,661	10,0	1,3	1,0

3.4. AVALIAÇÃO DA DANIFICAÇÃO

De acordo com a norma EN ISO 10722: 2007, os provetes danificados devem ser avaliados visualmente (ponto 3.4.1) e sujeitos a testes de referência como o ensaio de tração em tiras largas (NP EN ISO 10319: 2005), cujo procedimento será indicado no ponto 3.4.2. Há no entanto ensaios facultativos, tendo-se realizado o ensaio de punção estático (ensaio CBR) (NP EN ISO 12236 2008), cujo procedimento será indicado no ponto 3.4.3.

3.4.1. INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual é feita após a danificação dos provetes e tem por objetivo avaliar a olho nu os danos provocados pela danificação, tais como: a existência de efeito abrasivo, cortes ou punçamentos pontuais. Esta avaliação pode ser acompanhada por um registo fotográfico (Fig. 3.13) com o objetivo de documentar os danos observados.

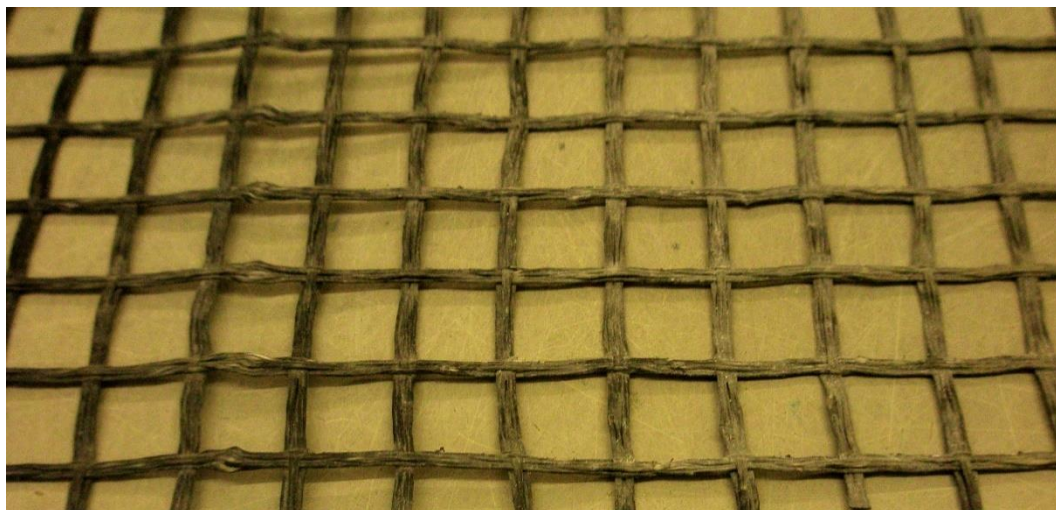


Fig. 3.13 – Provete da geogrelha danificada por *corundum*

3.4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Este ensaio tem por objetivo a determinação das propriedades de tração de geotêxteis e produtos relacionados. Este método é aplicável à maioria dos geotêxteis, geocompósitos e feltros. Este ensaio é também aplicável a geogrelhas, havendo a possibilidade de ser necessário fazer adaptações nas dimensões dos provetes.

Definições importantes:

- Força máxima, F – força de tração máxima, expressa em kN, obtida durante o ensaio;
- Extensão, ϵ – aumento do valor real do comprimento de referência de um provete durante o ensaio, expresso em percentagem;
- Extensão para força máxima, ϵ_{FM} – extensão, expressa em percentagem, exibida pelo provete quando submetido à força máxima;
- Resistência à tração, T – Força máxima por unidade de largura, em kN m^{-1} , registada durante o ensaio em que o provete é tracionado até a rotura.

3.4.2.1 – EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO

Os ensaios de tração decorreram a uma velocidade de 20 mm/min na máquina de tração *Lloyd Instruments*, modelo LR 50 K, equipada com uma célula de carga de 10 kN. Para os geotêxteis, foram ensaiados provetes com dimensão de 300 mm de comprimento por 200 mm de largura, tendo uma área útil de (100×200) mm (Fig. 3.14). Para os geotêxteis não-tecidos foram ainda desenhadas duas linhas auxiliares ao longo de toda a largura do provete junto às extremidades das garras, perpendiculares à dimensão do comprimento e separadas por 100 mm de modo a monitorizar qualquer deslizamento do provete. Para a geogrelha, as dimensões dos provetes foram em função do número de barras a ser tracionadas, tendo-se cortado provetes com (5×15) barras (Fig. 3.15), tendo a geogrelha um número mínimo de 49 barras por metro. Cada um dos provetes foi fixado ao longo de toda a sua largura nas garras do equipamento (distância de 100 mm entre garras). Todos os geossintéticos foram ensaiados na direção de fabrico.

A extensão foi medida com recurso a um vídeo-extensómetro nos geotêxteis não-tecidos (NT200 e NT300) e na geogrelha, tendo sido colocados dois pontos de referência centrados, distanciados de 60 mm entre si, no sentido da força de tração (Fig. 3.14). Para os geotêxteis tecidos (T80 e T200), a extensão foi medida com base no deslocamento relativo entre as garras, uma vez que a

estrutura dos materiais não permitia a instalação dos pontos de referência. Para os geotêxteis tecidos foi ainda necessário fazer uma colagem de um outro material na zona das garras, uma vez que a sua pequena espessura não permitia uma fixação eficaz dos materiais nas garras, ocorrendo deslizamentos durante o ensaio de tração (Fig. 3.16).

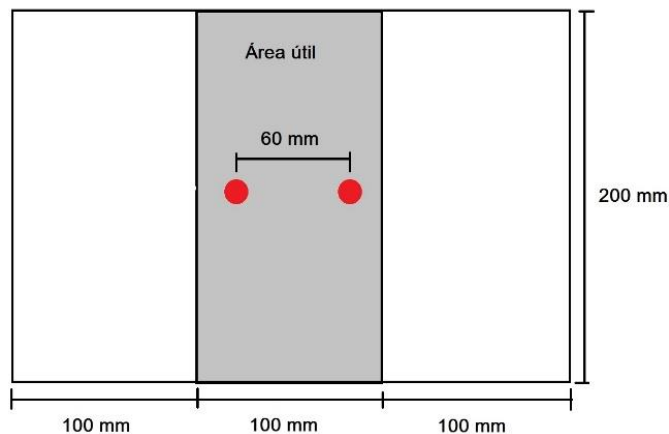


Fig. 3.14 – Esquema dos provetes de tração e posicionamento dos pontos de referência (a vermelho) para medição da extensão



Fig. 3.15 – Provette de tração da geogrelha

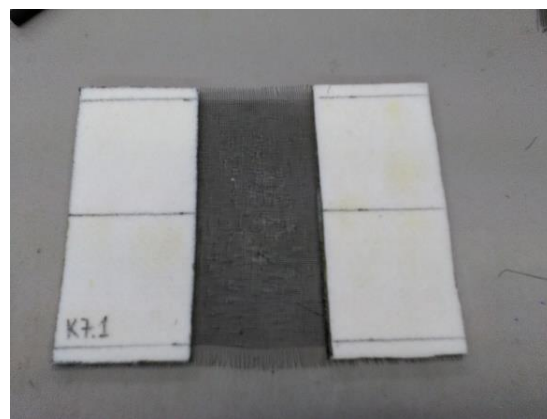


Fig. 3.16 – Colagem dos provetes dos geotêxteis tecidos

Os materiais foram ensaiados com garras de compressão hidráulica, dado serem adequadas para evitar deslizamentos e permitirem a montagem dos provetes de uma forma relativamente rápida (Fig. 3.17).

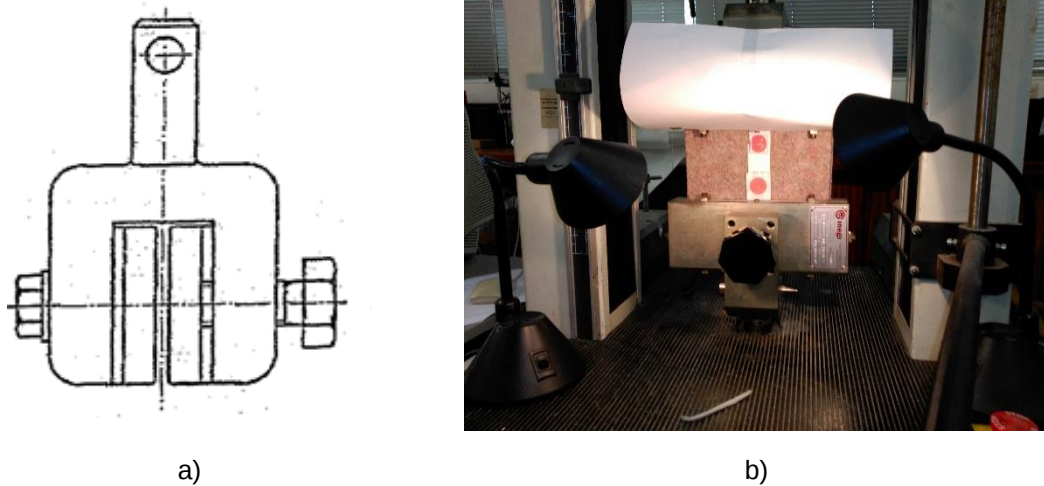


Fig. 3.17 – Ensaio de tração-extensão: a) esquema dos blocos de garras hidráulicas (adaptado da NP EN ISO 10319: 2005); b) provete montado e pronto para iniciar o ensaio

3.4.2.2 – TRATAMENTO DE DADOS

Para cada um dos geossintéticos foram testados cinco provetes, e para cada um desses provetes as propriedades monitorizadas foram a força (em N) e a extensão dada pelo vídeo-extensómetro ou pelo deslocamento relativo das garras (em mm). De forma a ter os valores da força por unidade de largura (T , em kN/m) e a extensão (ϵ , em %) foi necessário recorrer às seguintes expressões:

$$T = \frac{F \times c}{1000} \text{ [kN/m]} \quad (1.1)$$

Onde,

F é a força registada em N;

c é obtido pela equação 1.1.1 para os geotêxteis tecidos e não-tecidos, e pela equação 1.1.2 para a geogrelha:

$$c = \frac{1}{B} \quad (1.1.1)$$

Sendo B a largura nominal do provete em metros.

$$c = \frac{Nm}{Ns} \quad (1.1.2)$$

Sendo Nm o número mínimo de elementos a serem tracionados existentes em 1 metro de largura do produto a ser ensaiado e Ns o número de elementos a serem tracionados existentes no provete.

$$\varepsilon = \frac{(l - l_i)}{l_i} \times 100 \text{ [\%]} \quad (1.2)$$

Onde,

l é a distância, entre garras ou entre os pontos de referência, para uma determinada força;

l_i a distância, entre garras ou entre pontos de referência, inicial.

Com os valores máximos de cada um dos provetes calcularam-se os valores médios da força por unidade de largura máxima (resistência à tração) e da extensão na força máxima. Na tabela 3.3, e como exemplo do tratamento de dados, encontram-se os resultados obtidos no ensaio de tração-extensão da amostra de referência do geotêxtil T80.

Tabela 3.3 – Resultados obtidos no ensaio de tração-extensão do geotêxtil T80 (amostra de referência).

Proвете	Força [N]	T [kN/m]	l_i [mm]	l [mm]	ε_{FM} [%]
1	2281	11,4	100	135,8	35,8
2	2269	11,3	100	132,1	32,1
3	2166	10,8	100	129,4	29,4
4	2181	10,9	100	133,7	33,7
5	2181	10,9	100	133,5	33,5
Valor Médio	2215	11,1			32,9
Desvio Padrão	55	0,3			2,4
Coeficiente de Variação [%]	2,5	2,5			7,2

O gráfico 3.1 ilustra as curvas força-extensão obtidas para os 5 provetes do geotêxtil T80 (amostra de referência).

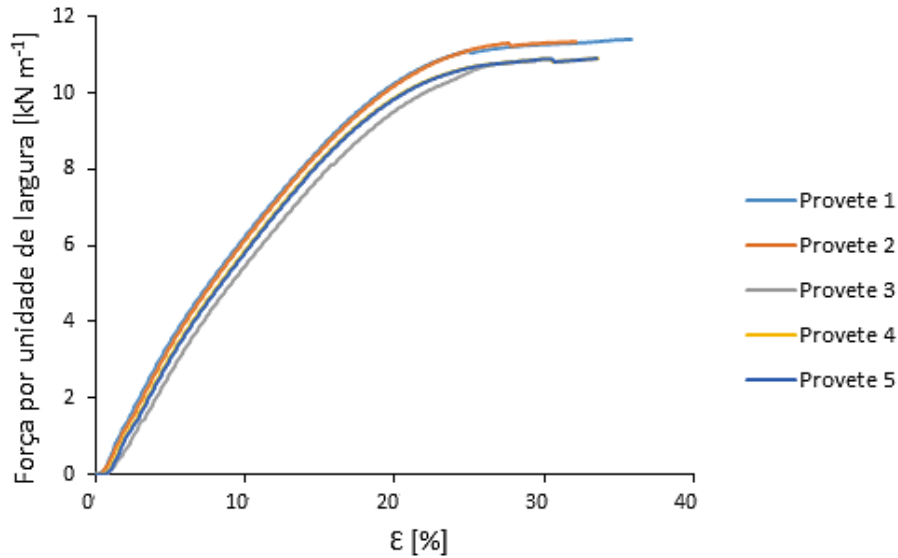


Gráfico 3.1 – Curvas força-extensão obtidas para os 5 provetes do geotêxtil T80 (amostra de referência)

Com o intuito de haver uma melhor percepção da perda da resistência à tração associada a cada geossintético, foi determinada a resistência à tração residual (RTR), que representa a quantidade de resistência que o material possui depois de danificado, em relação à sua resistência antes da danificação. Recorreu-se então à fórmula (1.3):

$$RTR = \frac{Td}{Ti} \times 100 \quad (1.3)$$

Onde,

Td é o valor médio da resistência à tração dos provetes danificados e Ti o valor médio da resistência à tração dos provetes não danificados (intactos).

3.4.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

Este ensaio foi realizado com o objetivo de determinar a resistência ao punçoamento estático, medindo a força exigida para pressionar um pilão de extremidade plana através dos materiais. O ensaio é aplicável à maior parte dos geossintéticos, exceto materiais com aberturas maiores que 10 mm. Por este motivo, este ensaio só foi realizado para os geotêxteis tecidos e não-tecidos, não tendo sido executado para a geogrelha. Todo o procedimento respeitou a norma NP EN ISO 12236: 2008.

Definições importantes:

- Força aplicada, F – Força à qual é empurrado o pilão através do provete a uma velocidade constante;
- Força de punçoamento, Fp – Força máxima registada para cada ensaio;
- Deslocamento, h – Distância, em mm, percorrida pelo pilão após ter iniciado o contacto com o provete;
- Deslocamento, hp – Deslocamento correspondente à força máxima registada Fp .

3.4.3.1 – EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO

Os ensaios de punçoamento estático decorreram na máquina de ensaio *Lloyd Instruments*, modelo LR 50 K, equipada com uma célula de carga de 10 kN. Iniciou-se com o corte de cinco provetes cuja área útil de ensaio tinha um diâmetro de 150 mm (Fig. 3.18). Em seguida, procedeu-se à fixação dos mesmos, um de cada vez, entre dois anéis de aço com diâmetro interno igual a $(150 \pm 0,5)$ mm (Fig. 3.19). Para os geotêxteis tecidos T80 e T200 houve a necessidade de fazer uma colagem de um material mais volumoso na zona de fixação dos anéis de aço para evitar a ocorrência de escorregamentos do provete durante o ensaio (Fig. 3.20). Após a montagem do conjunto, o pilão de diâmetro $(50 \pm 0,5)$ mm foi avançado na direção perpendicular ao centro do provete até que houvesse contacto entre o pilão e o material a ser testado (Fig. 3.21). De seguida, o pilão foi avançado a uma velocidade constante de 50 mm/min, sendo registados os valores da força de punçoamento e deslocamento, até à rotura (Fig. 3.22).

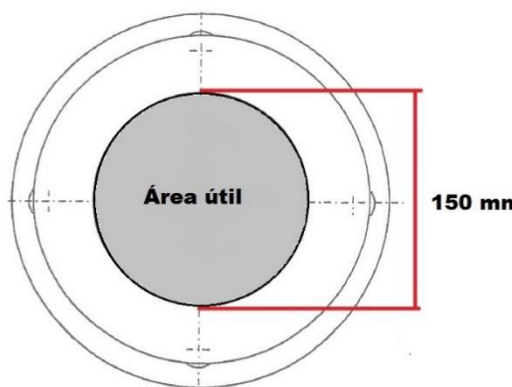


Fig. 3.18 - Esquema dos provetes usados no ensaio de punçoamento estático

Fig. 3.19 - Montagem do provete entre os anéis de aço



Fig. 3.20 –Provede de um geotêxtil tecido preparado para ser ensaiado



Fig. 3.21 – Início do ensaio com o pilão encostado no provete



Fig. 3.22 – Pilão avançado durante o ensaio de punção estático

3.4.3.2 – TRATAMENTO DE DADOS

Tal como no ensaio de tração-extensão, no ensaio de punção estático para cada material foram testados cinco provetes, sendo que para cada provete as propriedades determinadas foram a força e a distância percorrida pelo pilão após ter iniciado o contacto com o material. Na tabela 3.4, e como exemplo do tratamento de dados, encontram-se os resultados obtidos no ensaio de punção estático da amostra de referência do geotêxtil T80.

Tabela 3.4 – Resultados obtidos no ensaio de punção estático do geotêxtil T80 (amostra de referência).

Proвете	Fp (N)	hp [mm]
1	1589	35,9
2	1579	39,7
3	1553	36,4
4	1504	33,6
5	1422	35,8
Valor médio	1529	36,3
Desvio padrão	68	2,2
Coeficiente de variação [%]	4,5	6,0

O gráfico 3.2 ilustra as curvas força-deslocamento obtidas para os 5 provetes do geotêxtil T80 (amostra de referência).

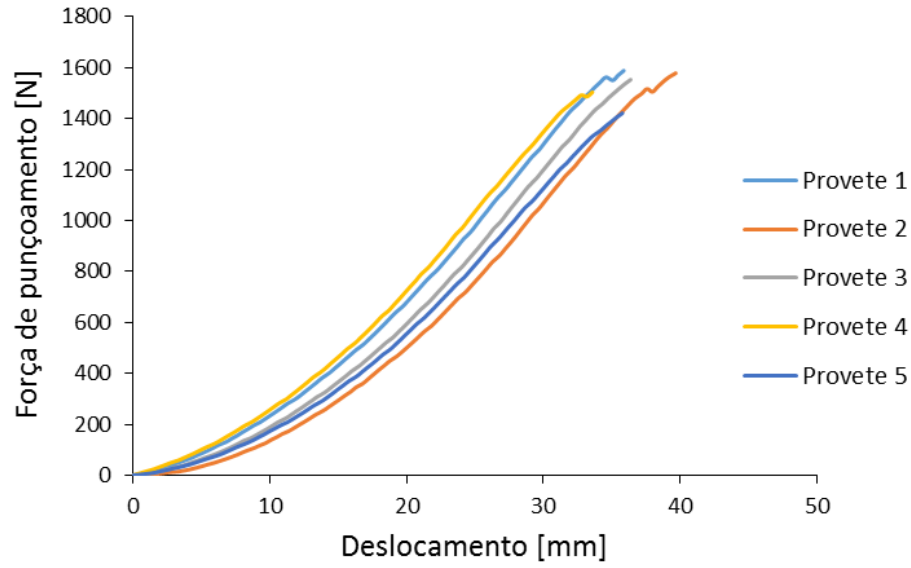


Gráfico 3.2 – Curvas força-deslocamento obtidas para os 5 provetes do geotêxtil T80 (amostra de referência)

De forma a haver uma melhor percepção da perda de resistência ao punção associada a cada geossintético, foi determinada a resistência ao punção residual (RPR), em percentagem, que representa a quantidade de resistência mantida após os ensaios de degradação. Recorreu-se então à seguinte expressão (1.5)

$$RPR = \frac{F_{pd}}{F_{pi}} \times 100 \quad (1.5)$$

Sendo F_{pd} o valor médio da resistência ao punção dos provetes danificados e F_{pi} o valor médio da resistência ao punção dos provetes não danificados.

4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No capítulo anterior foram identificados os geossintéticos e foi descrito todo o procedimento da sua danificação, bem como os procedimentos de avaliação dos danos ocorridos.

Neste capítulo serão apresentados os resultados da avaliação da danificação dos geossintéticos com inspeção visual, os ensaios de tração-extensão e de punçoamento estático. Serão então apresentados, para as amostras de referência e para as amostras danificadas, os valores médios dos ensaios e as resistências residuais, apresentando os valores do coeficiente de variação.

Por forma a ser mais fácil a compreensão e a comparação dos resultados, os materiais serão apresentados por tipo de geossintético e por massa por unidade de área crescente dentro de cada tipo de geossintético:

1. Geotêxtil tecido T80;
2. Geotêxtil tecido T200;
3. Geotêxtil não-tecido NT200;
4. Geotêxtil não-tecido NT300;
5. Geogrelha GG.

Como já foi explicado no capítulo anterior, após a danificação mecânica, os geossintéticos foram sujeitos a avaliação visual, ensaios de tração-extensão e de punçoamento estático e os resultados obtidos serão apresentados e discutidos por material, de acordo com a ordem acima descrita. É importante referir que os gráficos apresentados contém as curvas: de tração-extensão e de força-deslocamento, do provete individual cujos resultados se aproximam mais da média de todos os provetes ensaiados.

4.1. GEOTÊXIL TECIDO T80

4.1.1 – INSPEÇÃO VISUAL

Os ensaios de danificação mecânica afetaram de forma diferente o geotêxtil T80, de acordo com o solo usado. Foi possível, durante a avaliação visual, verificar que de uma forma geral os solos finos (areia siltosa (Fig. 4.1a) e areia 0/4 (Fig. 4.1b)) aparentemente não provocaram qualquer tipo de dano. Já os solos cuja a dimensão das partículas era maior ($D_{\text{máx}} > 10 \text{ mm}$) (brita 4/8 (Fig. 4.1d), brita 6/14 (Fig. 4.1e) e *corundum* (Fig. 4.1f)) provocaram danos significativos, desde cortes no material, abrasão e punçoamentos pontuais. Quanto ao *tout-venant* (Fig. 4.1c), embora possua partículas de grande dimensão, possui um valor de D_{50} inferior ao dos solos granulares, fazendo com que os efeitos não tenham sido tão graves quanto os restantes solos de $D_{\text{máx}}$ elevado. No entanto originou alguma abrasão no material e punçoamentos pontuais pelas partículas de maior dimensão.

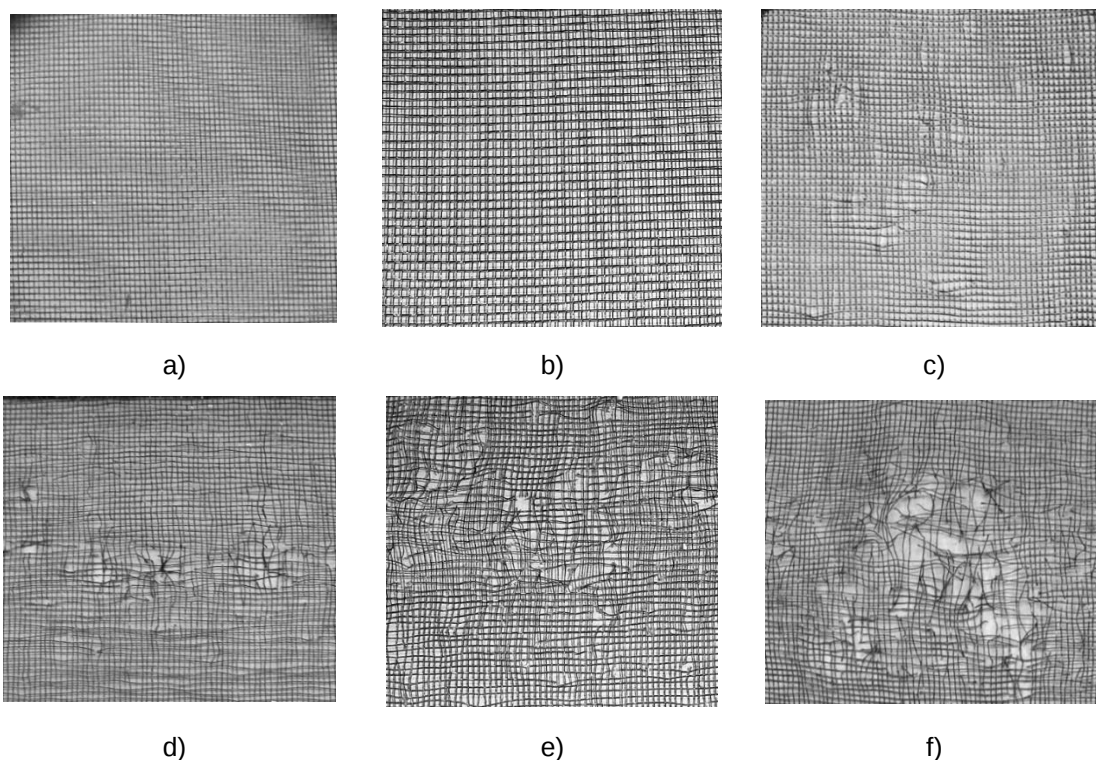


Figura 4.1 – Aspeto do geotêxtil T80 após os ensaios de danificação mecânica: a) Danificação com areia siltosa; b) Danificação com areia 0/4; c) Danificação com *tout-venant*; d) Danificação com brita 4/8; e) Danificação com brita 6/14; f) Danificação com *corundum*.

4.1.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO

Neste subponto são apresentados os resultados dos ensaios de tração-extensão. Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores médios da resistência à tração e da extensão na força máxima para o geotêxtil T80, antes e depois da danificação pelos diferentes solos. São também representados no gráfico 4.1 as curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados.

Tabela 4.1 – Valores obtidos nos ensaios de tração-extensão do geotêxtil T80 antes e após os ensaios de danificação mecânica

Solo	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Provetes Intactos	11,08 (2,6%)	32,9 (7,2%)	-
Areia Siltosa	10,04 (3,9%)	29,7 (3,1%)	90,6
Areia 0/4	11,42 (1,6%)	28,8 (10,4%)	103,1
<i>Tout-venant</i>	8,55 (8,1%)	18,5 (6,4%)	77,2
Brita 4/8	4,69 (16,9%)	12,2 (15,8%)	42,3
Brita 6/14	3,20 (16,4%)	12,3 (9,2%)	28,9
<i>Corundum</i>	1,92 (22,6%)	10,8 (31,0%)	17,3

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

A areia siltosa e a areia 0/4 não causaram grandes alterações na resistência à tração do geotêxtil T80 (resistências à tração residuais de 90,6% e 103,1%, respetivamente). Podemos observar que a RTR do geotêxtil T80 após a danificação com a areia 0/4 tem um valor superior a 100%, indicando que a resistência dos provetes danificados aumenta, o que não corresponde à realidade uma vez que existem sempre variações nos resultados obtidos causados, por exemplo, pela heterogeneidade do material. Quanto à extensão na força máxima existe uma diminuição de 32,9% para 29,7% e 28,8%.

O *tout-venant*, tal como na avaliação visual, teve efeitos intermédios entre as areias e as britas, provocando uma perda de resistência de tração de 22,8 % e uma diminuição significativa da extensão na força máxima (de 32,9% para 18,5%). A brita 4/8 e a brita 6/14 provocaram perdas de resistência à tração de 57,7% e 71,1% e uma diminuição das extensões na força máxima de 32,9% para 12,2% e 12,3%, respetivamente. O *corundum* foi o que provocou maiores danos no geotêxtil T80, levando a perdas de resistência à tração de 92,7% e uma redução da extensão na força máxima de 32,9% para 10,8%. Podemos observar e ter uma melhor perceção dos valores apresentados acima, assim como o comportamento dos provetes danificados em relação aos provetes de referência, no gráfico abaixo.

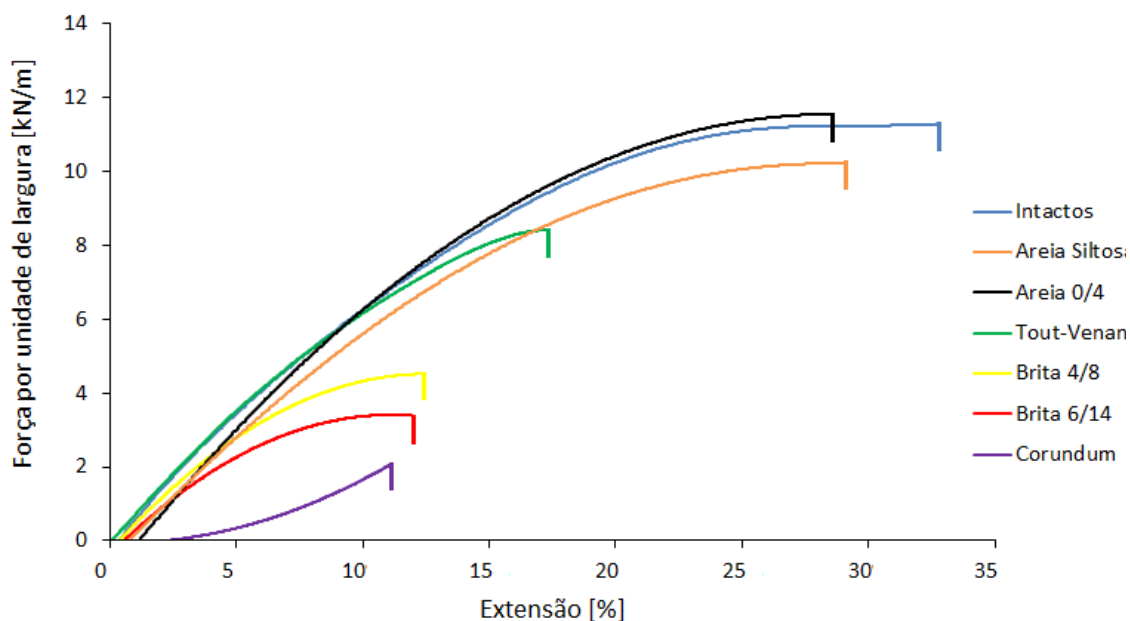


Gráfico 4.1 – Curvas tração-extensão obtidas nos ensaios de tração do geotêxtil T80 (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

Depois de avaliar o geotêxtil T80 pelo ensaio de tração-extensão, pode-se confirmar e quantificar a avaliação visual, onde já era possível prever o comportamento do material. O *corundum* e as britas provocaram grandes cortes e destruição no material, o que se refletiu no valor da resistência à tração e da extensão na força máxima. Já os danos provocados pelas areias não eram visíveis a olho nu e os valores de resistência à tração e extensão na força máxima estão muito próximos dos valores de referência. O *tout-venant* na avaliação visual sugeria ter sido mais danoso do que as areias, mas não tanto quanto as britas, e podemos observar uma diminuição dos valores de resistência à tração e extensão na força máxima intermédia também.

4.1.3 – ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

A análise aos resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático no geotêxtil T80 será feita neste subponto através da tabela 4.2 com os valores médios obtidos antes e depois da danificação mecânica e também pelo gráfico 4.2 com as curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados.

Tabela 4.2 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil T80 antes e após os ensaios de danificação mecânica

Solo	Fp [N]	hp [mm]	RPR %
Provetes intactos	1529 (4,5%)	36,3 (6,0%)	-
Areia siltosa	1512 (4,0%)	38,8 (3,1%)	98,9
Areia 0/4	1506 (2,1%)	38,6 (2,7%)	98,5
<i>Tout-venant</i>	968 (10,6%)	30,2 (4,6%)	63,3
Brita 4/8	241 (11,5%)	20,0 (15,6%)	15,8
Brita 6/14	177 (27,8%)	18,3 (13,7%)	11,6
<i>Corundum</i>	25 (91,6%)	12,2 (32,6%)	1,6

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Observando a tabela 4.2 podemos verificar que para a areia siltosa e areia 0/4 as perdas de resistência ao punçoamento são praticamente inexistentes e não existem alterações no deslocamento na força máxima. Quanto à resistência ao punçoamento, as perdas são inferiores a 2% e o deslocamento na força máxima é superior ao da amostra de referência, não tendo isso qualquer significado uma vez que, como já referido acima, existem alguns fatores de variação que não é possível controlar, tais como o fabrico não homogêneo do material.

O *tout-venant* provocou no material, mais uma vez, um comportamento intermédio entre as areias e as britas, causando perdas de resistência ao punçoamento de 36,7% e uma diminuição significativa do deslocamento na força máxima (6,3 mm).

A brita 4/8 e a brita 6/14 provocaram danos mais significativos em comparação com os resultados do ensaio de tração-extensão, levando à perda de resistência ao punçoamento de 84,2% e 88,4% e diminuições do deslocamento na força máxima de 16,3 e 18,0 mm, respetivamente.

Tal como nos ensaios de tração-extensão, o *corundum* foi o agregado mais danoso, sendo que a perda de resistência ao punçoamento se aproximou bastante de 100 % (o valor do coeficiente de variação tem pouco significado uma vez que estamos a falar de valores muito pequenos e qualquer variação apresentará uma dispersão muito grande). O *corundum* causou também a maior diminuição de deslocamento na força máxima (24,1 mm). Estas mudanças nas propriedades do geotêxtil T80 conseguem-se perceber através da representação gráfica abaixo.

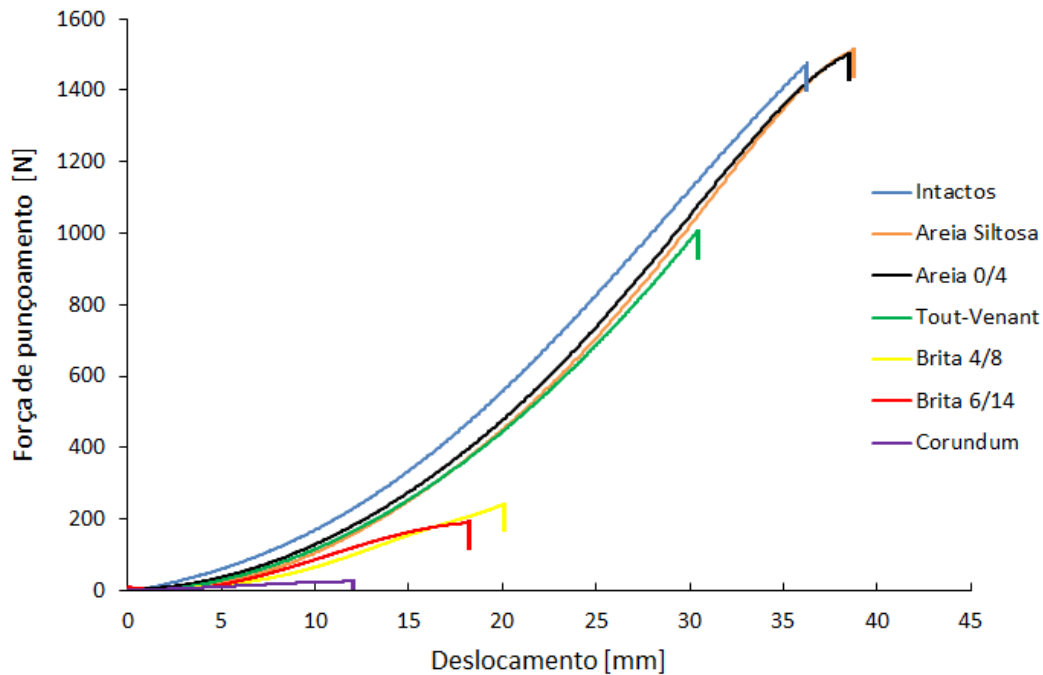


Gráfico 4.2 – Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de punção estático do geotêxtil T80 (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

Podemos observar algumas semelhanças de comportamento do material no ensaio de tração-extensão e no ensaio de punção, uma vez que as areias se apresentam praticamente inofensivas, as britas e o *corundum* são os solos mais destrutivos e o *tout-venant*, provoca um comportamento intermédio entre as areias e britas.

Assim dá para concluir que os solos com maior $D_{máx}$ (britas e *corundum*) induzem uma perda de resistência ao punção significativamente superior aos outros solos. O *tout-venant* embora possua um $D_{máx}$ elevado, possui um valor de D_{50} intermédio entre as areias e as britas. Assim não provoca danos tão extensos. Quanto às areias, como são solos cujas dimensões das partículas são muito pequenas e uniformes, após a compactação resulta uma superfície lisa, o que faz com que haja uma distribuição maior da força aplicada em comparação com os outros casos, resultando em danos menores.

Confirmou-se que através da avaliação visual seria possível prever alguns dos resultados, tal como as reduções de resistência mecânica (tração e punção) mínimas provocadas pelas areias e a destruição total do material com o *corundum*.

4.2. GEOTÊXTEL TECIDO T200

4.2.1 – INSPEÇÃO VISUAL

A primeira impressão desde a preparação dos provetes do geotêxtil T200 foi que este apresentava uma maior robustez que o geotêxtil T80, devido a ser um material mais espesso e com uma MUA superior. Seria à partida um material mais resistente à danificação mecânica.

A avaliação visual após a danificação com cada solo permitiu, ainda assim, verificar que as areias continuavam a ser as menos prejudiciais ao material, enquanto que as britas e o *corundum* eram os solos que mais o danificavam. Verificou-se então que os danos provocados pela areia siltosa (Fig. 4.2a) e pela areia 0/4 (Fig. 4.2b) não eram detetáveis, havendo apenas sujidade nos provetes.

O *tout-venant* (Fig. 4.2c), embora tenha provocado punçoamentos de maior dimensão, não danificou tanto como as britas, uma vez que número de punçoamentos era muito menor. Provocou também alguma abrasão nos provetes.

Quanto à brita 4/8 (Fig. 4.2d) e brita 6/14 (Fig. 4.2e), provocaram um número elevado de punçoamentos nos provetes e também bastante abrasão. O *corundum* (Fig. 4.2f) foi mais uma vez o que provocou maior dano. O material ficou claramente degradado, havendo uma grande distribuição de punçoamentos, de ligeiros cortes no material e também teve um efeito bastante abrasivo no geotêxtil T200. Tal como esperado, os danos ocorridos no geotêxtil T200 foram menores que os do geotêxtil T80.

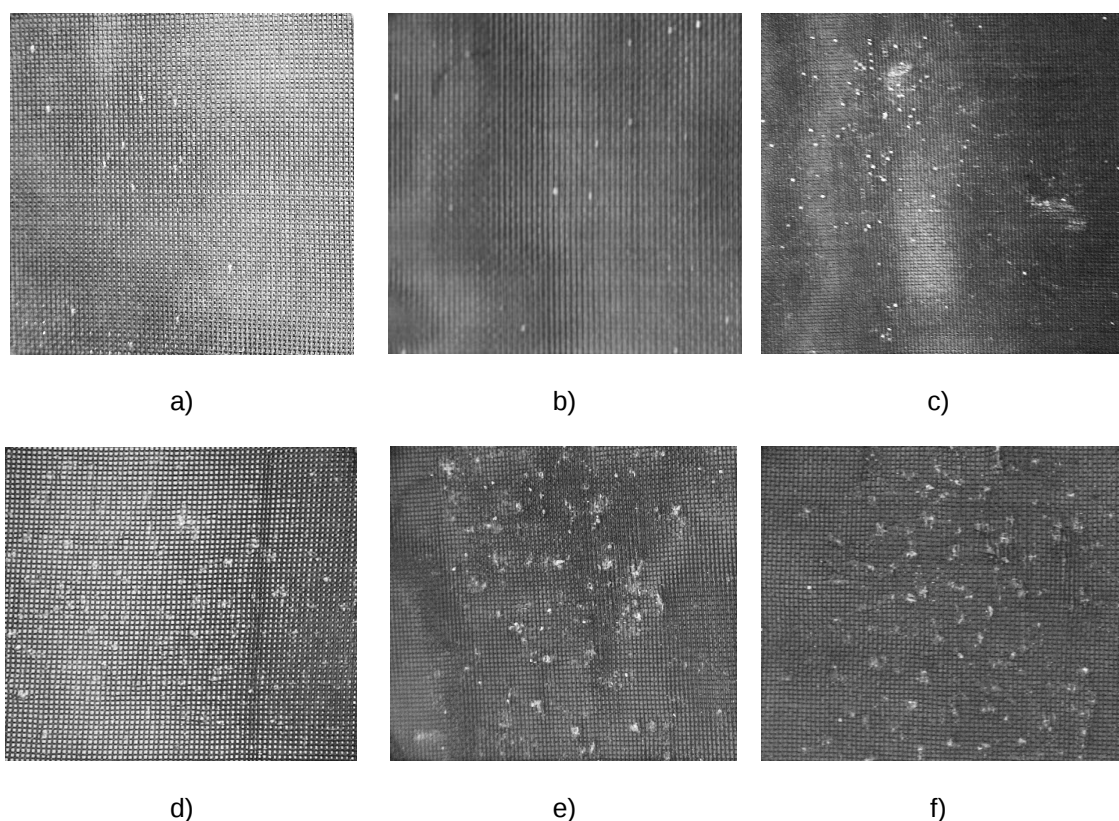


Figura 4.2 – Aspeto do geotêxtil T200 após os ensaios de danificação mecânica: a) Danificação com areia siltosa; b) Danificação com areia 0/4; c) Danificação com *tout-venant*; d) Danificação com brita 4/8; e) Danificação com brita 6/14; f) Danificação com *corundum*.

4.2.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO

Neste subponto são apresentados os resultados dos ensaios de tração-extensão do geotêxtil T200, onde na Tabela 4.3 estão apresentados os valores médios da resistência à tração e extensão na força máxima dos provetes intactos e dos provetes danificados pelos diferentes solos. São também representadas graficamente as curvas individuais do ensaio de tração, com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados.

Tabela 4.3 – Valores obtidos nos ensaios de tração-extensão do geotêxtil T200, antes e após os ensaios de danificação mecânica

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Provetes Intactos	27,68 (2,0%)	53,8 (6,1%)	-
Areia Siltosa	27,85 (2,2%)	46,9 (7,3%)	100,6
Areia 0/4	27,46 (1,1%)	51,7 (9,1%)	99,2
<i>Tout-venant</i>	24,69 (1,8%)	39,7 (5,9%)	89,2
Brita 4/8	21,66 (4,2%)	34,0 (8,0%)	78,3
Brita 6/14	16,95 (4,9%)	24,4 (4,4%)	61,2
<i>Corundum</i>	12,78 (9,0%)	22,9 (5,6%)	46,2

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Confirmou-se que a areia siltosa e a areia 0/4 não provocaram grandes danos, dado não terem ocorrido perdas de resistência à tração (RTR superiores a 99%) e as extensões na força máxima terem sido muito próximas do valor de referência. É importante referir que para a areia siltosa o valor da RTR superior a 100% não significa que o material tenha ganho resistência, apenas que existem sempre variações nos resultados obtidos causados, por exemplo, pela heterogeneidade do material. Quanto aos danos provocados pelo *tout-venant*, podemos verificar que no geotêxtil T200 foram menos significantes que no geotêxtil T80. Os provetes apresentaram uma perda de resistência à tração de 10,8% e uma diminuição da extensão na força máxima de 53,8% para 39,7%.

A brita 4/8 e a brita 6/14 provocaram perdas de resistência à tração de 21,7% e 38,8% e uma diminuição das extensões na força máxima de 53,8% para 34% e 24,4%, respetivamente. O geotêxtil T200 quando danificado pelas britas apresentou RTRs aproximadamente duas vezes superiores às RTRs do geotêxtil T80.

O *corundum* foi mais uma vez o solo que provou ser mais danoso no geotêxtil T200, levando a perdas de resistência à tração de 53,8% e uma redução da extensão na força máxima de 53,8% para 22,9%.

De um modo geral, podemos verificar que existe uma relação entre os danos visuais e as perdas da resistência à tração. Podemos também afirmar que o geotêxtil T200 após o processo de danificação possui uma resistência à tração bastante superior à do geotêxtil T80.

No gráfico 4.3 pode-se observar o comportamento dos provetes do geotêxtil T80 testados através do ensaio de tração-extensão.

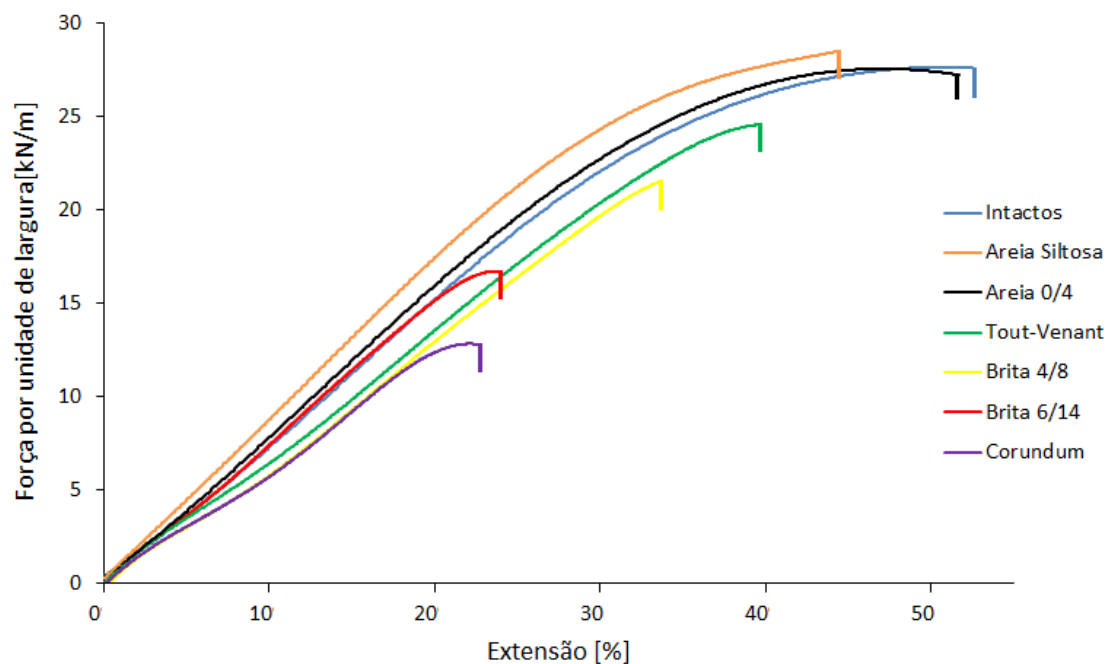


Gráfico 4.3 – Curvas tração-extensão obtidas nos ensaios de tração do geotêxtil T200 (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

Após a realização do ensaio de tração-extensão, foi possível comparar a perda de resistência à tração do geotêxtil T200 com a avaliação visual. As areias aparentemente não tinham induzido degradação nos provetes, e observando o gráfico podemos verificar que a perda de resistência à tração foi mínima, tendo, os provetes danificados um comportamento semelhante aos provetes de referência. O *corundum* e a brita 6/14 provocaram as maiores alterações nas propriedades de tração do geotêxtil T200, no entanto é evidenciada uma maior degradação no material danificado pelo *corundum*. O *tout-venant* provocou menor degradação comparativamente às britas e maior degradação em relação às areias.

4.2.3 – ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

Neste subponto, através da tabela 4.4, são exibidos os valores médios obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil T200 e no gráfico 4.4 são apresentadas as curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil T200.

Tabela 4.4 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil T200, antes e após os ensaios de danificação mecânica

Solo	Fp [N]	hp [mm]	RPR [%]
Provetes intactos	4188 (0,9%)	45,3 (4,2%)	-
Areia siltosa	3920 (2,0%)	41,5 (5,1%)	93,6
Areia 0/4	4017 (2,8%)	43,6 (3,4%)	95,9
<i>Tout-venant</i>	3265 (9,3%)	40,4 (7,3%)	78,0
Brita 4/8	2891 (5,5%)	35,5 (3,0%)	69,0
Brita 6/14	2277 (11,2%)	35,0 (5,2%)	54,4
<i>Corundum</i>	1464 (12,6%)	30,5 (7,0%)	35,0

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Analisando a tabela 4.4 pode-se concluir que mais uma vez as areias não provocaram danos significativos, uma vez que as perdas de resistências ao punçoamento foram de 6,4% para a areia siltosa e 4,1% para a areia 0/4. Quanto aos deslocamentos na força máxima, houve uma diminuição de 3,8 e 1,7 mm, respectivamente.

O *tout-venant* provocou no material perdas de resistência ao punçoamento de 22,0 % e uma diminuição do deslocamento na força máxima de 4,9 mm. À semelhança do ensaio de tração-extensão, a danificação provocada pelo *tout-venant* foi aproximada à da brita 4/8, sendo que a diferença de RPR foi cerca de 10% superior.

A brita 4/8 e a brita 6/14 não provocaram danificações muito superiores quando comparadas com os resultados do ensaio de tração-extensão, levando à perda de resistência ao punçoamento de 31% e 45,6% e diminuições de deslocamento na força máxima de valores de 9,8 e 10,3 mm, respectivamente.

Tal como nos ensaios de tração-extensão, o *corundum* foi o agregado que provocou maior dano, causando uma perda de resistência ao punçoamento de 65,0%. Provocou também a maior diminuição de deslocamento na força máxima (14,8 mm).

Abaixo podemos comparar a perda da resistência ao punçoamento do geotêxtil T200 após a danificação com os diferentes solos com os valores de referência.

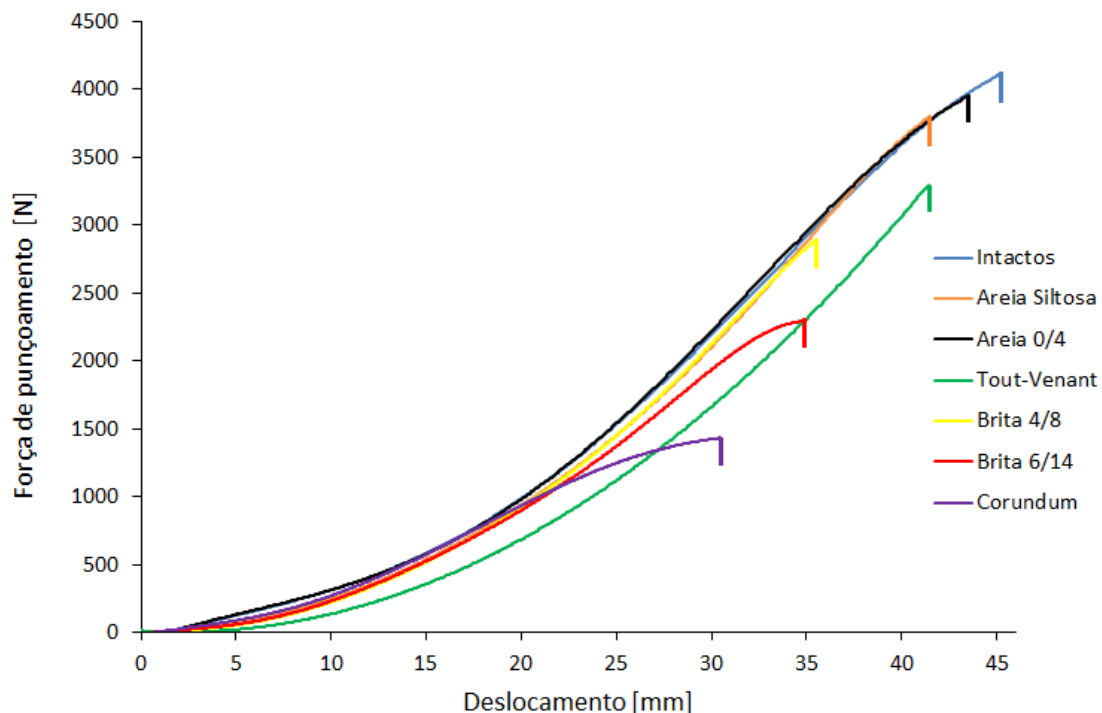


Gráfico 4.4 – Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de punção estática do geotêxtil T200 (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

À semelhança do geotêxtil T80, após a danificação mecânica podemos verificar que o comportamento do geotêxtil T200 foi semelhante no ensaio de tração-extensão e no ensaio de punção estática, havendo no entanto uma maior resistência à degradação do geotêxtil T200.

As areias não provocaram danos no material, as britas e o *corundum* foram os solos mais destrutivos e o *tout-venant* provocou um comportamento intermédio entre as areias e britas. Para o geotêxtil T200 existe uma maior proximidade das curvas dos provetes danificados pelos diferentes solos, provando que a danificação mecânica não tem tanta influência como no geotêxtil T80.

4.3. GEOTÊXTEL NÃO-TECIDO NT200

4.3.1 – INSPEÇÃO VISUAL

Avaliando o geotêxtil NT200 foi possível perceber, à partida, que os solos o iriam afetar de uma forma completamente diferente dos geotêxteis tecidos, uma vez que possuem estruturas completamente distintas. Seria então de esperar uma maior abrasão do material e menores punçamentos. Após a avaliação visual foi possível verificar que a areia siltosa (Fig. 4.3a) e a areia 0/4 (Fig. 4.3b) aparentemente não haviam provocado danos no material, apenas o sujaram.

Já para o *tout-venant*, embora não seja perceptível na Fig. 4.3c, os provetes apresentaram alguma abrasão e punçamentos pontuais. Os danos induzidos por este solo não foram muito extensos porque o material é espesso e tem uma estrutura esponjosa, o que possivelmente possibilitou a absorção dos impactos provocados pelas partículas maiores do solo.

A brita 4/8 (Fig. 4.3d) e a brita 6/14 (Fig. 4.3e) foram os solos que aparentemente provocaram maiores danos a seguir ao *corundum*, tendo o geotêxtil apresentado punçoamentos pontuais, abrasões e ligeiros cortes.

O *corundum* (Fig. 4.3f) provocou um dano semelhante em forma, mas superior em quantidade, ao dano provocado pelas britas, uma vez que teve um efeito abrasivo mais agressivo e significativo em comparação com estas.

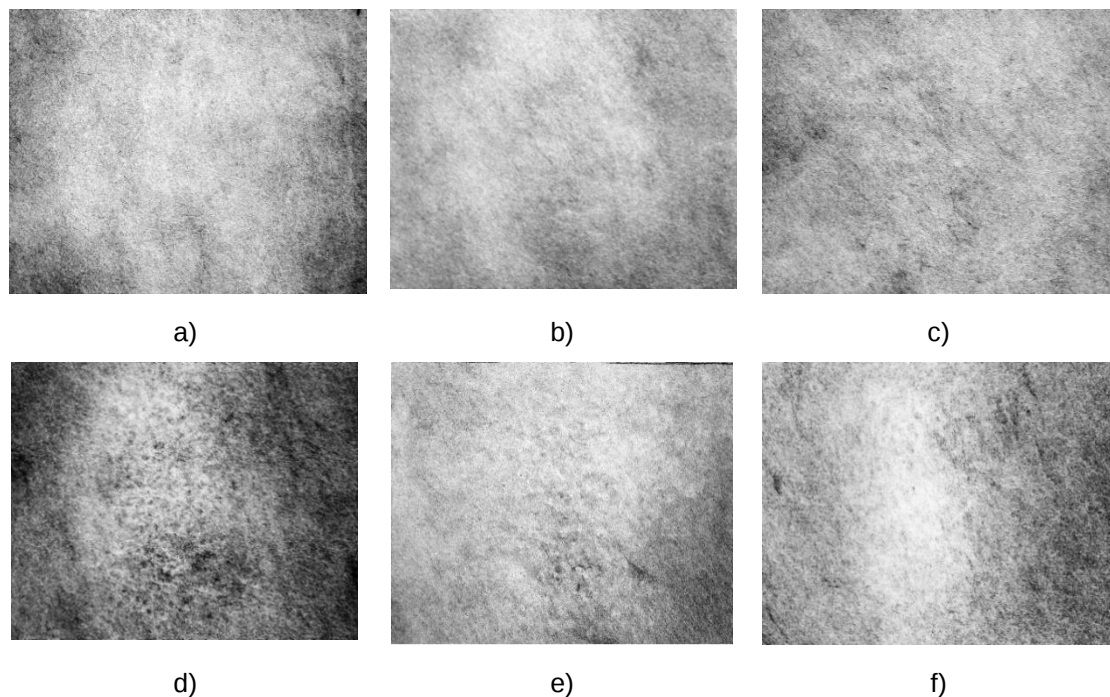


Figura 4.3 – Aspeto do geotêxtil NT200 após os ensaios de danificação mecânica: a) Danificação com areia siltosa; b) Danificação com areia 0/4; c) Danificação com *tout-venant*; d) Danificação com brita 4/8; e) Danificação com brita 6/14; f) Danificação com *corundum*.

4.3.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO

Aqui será apresentada e discutida a tabela 4.5, onde estão representados os valores médios da resistência à tração e extensão na força máxima dos provetes de referência e dos provetes danificados pelos diferentes solos para o geotêxtil NT200, assim como o gráfico 4.5 onde estão representadas as curvas tração-extensão obtidas nos ensaios de tração.

Tabela 4.5 – Valores obtidos nos ensaios de tração-extensão do geotêxtil NT200, antes e após os ensaios de danificação mecânica

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Provetes intactos	11,93 (8,0%)	78,8 (5,7%)	-
Areia siltosa	11,26 (8,5%)	55,8 (18,3%)	94,4
Areia 0/4	9,87 (8,8%)	61,2 (10,9%)	82,7
<i>Tout-venant</i>	10,40 (13,2%)	60,8 (6,1%)	87,2
Brita 4/8	7,96 (8,7%)	51,4 (9,8%)	66,7
Brita 6/14	7,76 (6,2%)	54,4 (11,2%)	65,0
Corundum	6,65 (8,4%)	50,4 (6,6%)	55,7

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Podemos verificar que para a areia siltosa a perda de resistência à tração foi de 5,6%, uma redução pequena, o que seria de esperar uma vez que não havia qualquer tipo de dano aparente nos provetes. O material, no entanto, teve uma perda de extensão na força máxima que passou de 78,8% para 55,8%. A areia 0/4, ao contrário dos geotêxteis mencionados anteriormente, provocou perdas de resistência à tração consideráveis (17,3%), chegando a superar a perda de resistência à tração provocada pelo *tout-venant*. Quanto as perdas de extensão na força máxima provocadas pela areia 0/4, foram menores que as da areia siltosa passando de 78,8% para 61,2%.

O *tout-venant* provocou perdas de resistência à tração menores do que a areia 0/4, levando o geotêxtil NT200 a apresentar um valor de RTR de 87,2%. A perda de extensão na força máxima provocada pelo *tout-venant* foi muito semelhante à provocada pela areia 0/4, passando de 78,8% para 60,8%.

Também para o geotêxtil NT200, a brita 4/8 e a brita 6/14, depois do *corundum*, provaram ser os solos mais agressivos. Tal como na inspeção visual, a danificação provocada pelas duas britas foi semelhante, resultando em perdas de resistência à tração praticamente iguais. A brita 4/8 provocou uma perda de resistência à tração de 33,3% e a extensão na força máxima passou de 78,8% para 51,4 %, e a brita 6/14 provocou uma perda de resistência à tração de 35,0% e a extensão na força máxima passou de 78,8% para 54,5%.

Por fim, o *corundum* foi, mais uma vez o solo que provocou maior redução da resistência à tração (RTR de 55,7%) e maior diminuição da extensão na força máxima, ao passar de 78,8% para 50,4%. Já tinha sido referido na inspeção visual que este agregado tinha um efeito abrasivo bastante elevado e tinha provocado cortes no material e confirmou-se que as perdas provocadas foram significativamente maiores que a dos outros solos.

Podemos observar no gráfico abaixo o comportamento geotêxtil NT200 danificado pelos diferentes solos comparativamente à curva de referência.

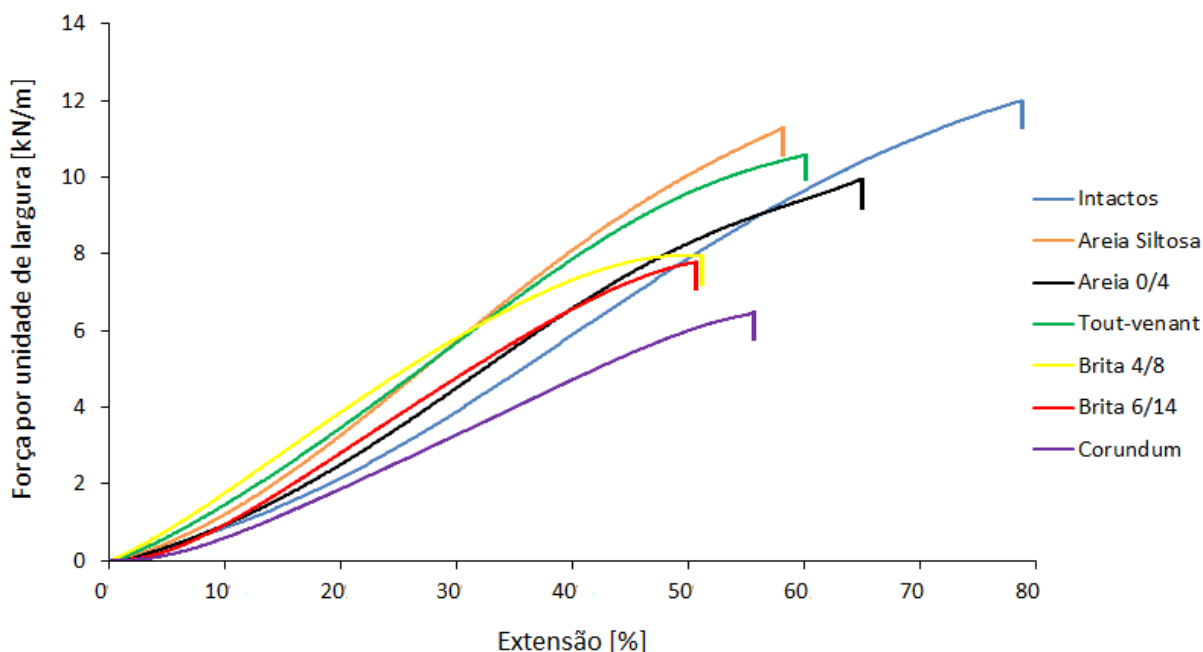


Gráfico 4.5 – Curvas tração-extensão obtidas nos ensaios de tração do geotêxtil NT200 (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

Assim verificamos que a areia siltosa não provocou dano no material tal como nos geotêxteis T80 e T200. Já a areia 0/4 teve um comportamento diferente para este material uma vez que provocou uma perda de resistência à tração consideravelmente superior em comparação com os geotêxteis T80 e T200.

Quanto ao *tout-venant*, apresentou-se pela primeira vez como um solo pouco danoso, relativamente aos materiais anteriormente analisados, tendo-se aproximando do dano provocado pela areia 0/4.

As britas provocaram um comportamento semelhante, onde se apresentam como os solos mais destrutivos a seguir ao *corundum*, que foi mais uma vez o agregado mais agressivo tendo provocado as maiores perdas de resistência à tração.

Pode-se afirmar que no geotêxtil NT200, ao contrário do que se verificou nos geotêxteis T80 e T200, não existe correspondência entre a análise visual e os resultados do ensaio de tração-extensão.

4.3.3 – ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

Abaixo está ilustrado o quadro 4.6 com os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios de punçoamento estático para o geotêxtil NT200.

Tabela 4.6 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil NT200, antes e após os ensaios de danificação mecânica

	Fp (N)	hp (mm)	RPR %
Provetes intactos	2341 (11,2%)	67,2 (7,2%)	-
Areia siltosa	2080 (4,5%)	52,4 (2,1%)	88,9
Areia 0/4	1926 (12,8%)	50,7 (6,1%)	82,3
<i>Tout-venant</i>	1891 (12,2%)	52,5 (5,4%)	80,8
Brita 4/8	1713 (10,6%)	47,5 (7,7%)	73,2
Brita 6/14	1516 (22,9%)	49,0 (7,2%)	64,8
<i>Corundum</i>	1257 (8,5%)	46,8 (5,7%)	53,7

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Fazendo a análise da tabela 4.6 verifica-se que a areia siltosa causou um decréscimo de 11,1% na resistência ao punçoamento. A areia 0/4 e o *tout-venant* provocaram perdas de resistência ao punçoamento muito próximas, 17,7% e 19,2%, respetivamente, situação que já se havia verificado para a resistência à tração. A diminuição do deslocamento na força máxima provocada pelos solos acima referidos foi semelhante (entre os 14,7 e os 16,5 mm no caso da danificação com o *tout-venant* e a areia 0/4, respetivamente).

A brita 4/8 causou perdas de resistência ao punçoamento superiores aos três solos acima mencionados, no entanto não causou tanta deterioração como a brita 6/14 (26,8% e 35,2%, respetivamente). O *corundum* apresentou-se, mais uma vez, como o agregado mais destrutivo provocando uma perda de resistência ao punçoamento de 46,3%. Entre as britas e o *corundum*, a diminuição de deslocamento na força máxima foi: máxima com o *corundum* com 20,4 mm e mínima com a brita 6/14 com 18,2 mm.

De modo a fazer uma comparação visual destes resultados, são apresentadas no gráfico 4.6 as curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados.

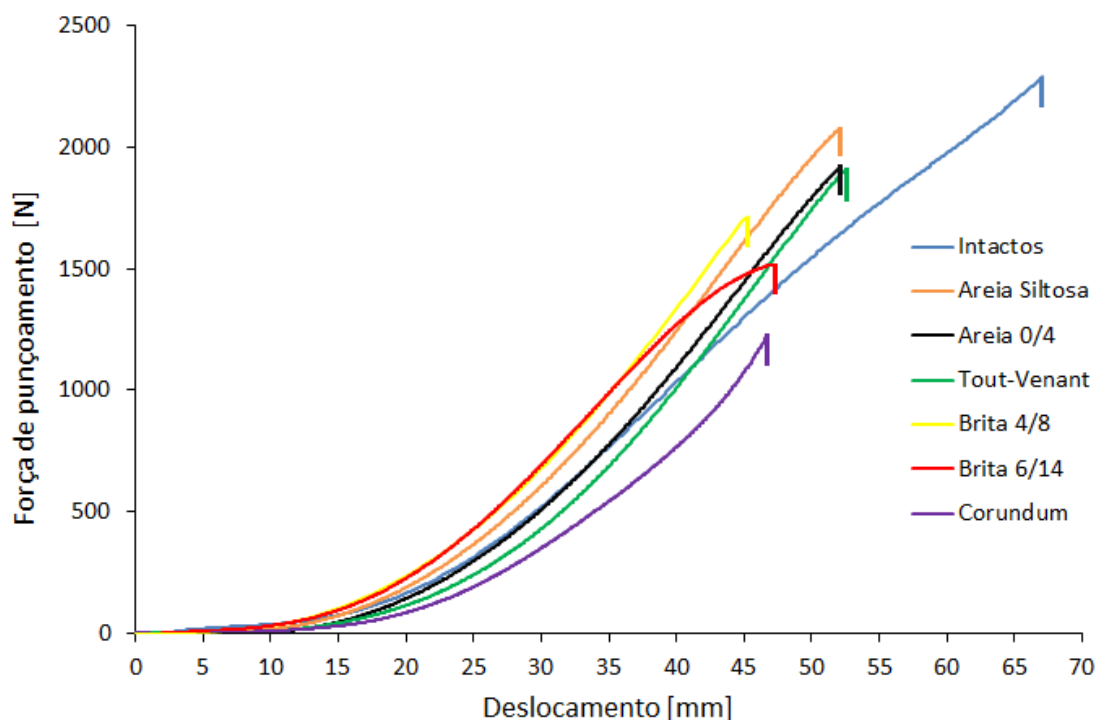


Gráfico 4.6 – Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de punçãoamento estático do geotêxtil NT200 (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

O geotêxtil NT200, quando comparado com os geotêxteis T80 e T200, apresentou um comportamento ligeiramente distinto. Verificou-se que existe uma diminuição da RTR e RPR nos provetes danificados pelas areias e um valor da RTR e RPR ligeiramente superior nos provetes danificados com o *tout-venant*. Com isto existe uma aproximação dos valores de resistências residuais dos provetes danificados pelo *tout-venant* e pelas areias.

As britas provocaram reduções, de resistência ao punçãoamento e do deslocamento, idênticas e juntamente com o *corundum* foram os agregados mais danosos.

4.4. GEOTÊXTEL NÃO-TECIDO NT300

4.4.1 – INSPEÇÃO VISUAL

O geotêxtil não-tecido NT300, sendo mais espesso que os geotêxteis tecidos, apresentava uma estrutura mais esponjosa, tal como o geotêxtil NT200. De notar também que este material aparentava ser bastante heterogêneo, o que eventualmente origina algumas flutuações nos resultados.

Os provetes danificados pela areia siltosa (Fig. 4.4a) e pela areia 0/4 (Fig. 4.4b) não apresentaram danos visíveis além da sujidade. Já o *tout-venant* (Fig. 4.4c) provocou alguma abrasão no material, e foram também identificados alguns punçãoamentos.

As britas (Fig. 4.4d e Fig. 4.4e) provocaram danos semelhantes, desde abrasões, punçãoamentos e ligeiros cortes no material e o *corundum* (Fig. 4.4f) teve um efeito de abrasão consideravelmente grande e causou alguns cortes no material, não dando origem, no entanto, a grandes punçãoamentos.

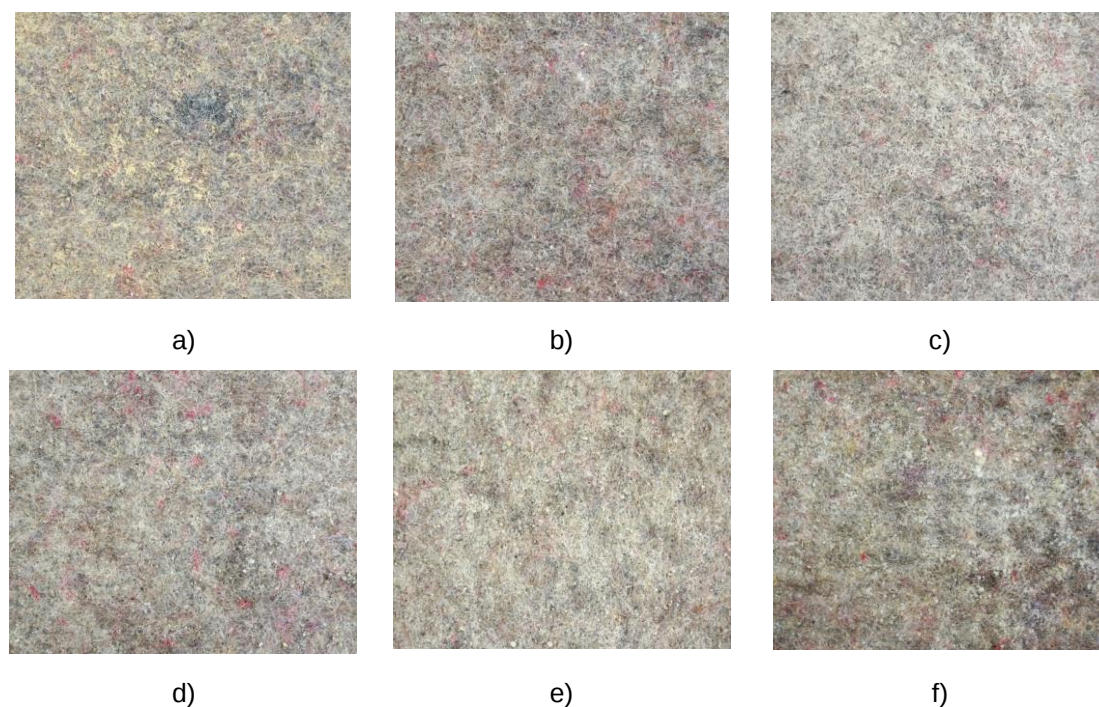


Figura 4.4 – Aspeto do geotêxtil NT300 após os ensaios de danificação mecânica: a) Danificação com areia siltosa; b) Danificação com areia 0/4; c) Danificação com *tout-venant*; d) Danificação com brita 4/8; e) Danificação com brita 6/14; f) Danificação com *corundum*.

4.4.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO

Por forma a avaliar quantitativamente os danos provocados no geotêxtil NT300, encontram-se na tabela 4.7 os valores médios dos resultados obtidos no ensaio de tração-extensão. Neste subponto encontra-se também representado o gráfico 4.7 com as curvas tração-extensão dos provetes individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados.

Tabela 4.7 – Valores obtidos nos ensaios de tração-extensão do geotêxtil NT300, antes e após os ensaios de danificação mecânica

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Provetes Intactos	13,02 (17,5%)	68,5 (15,2%)	-
Areia Siltosa	12,71 (8,2%)	71,3 (22,0%)	97,6
Areia 0/4	10,03 (7,8%)	59,2 (12,9%)	77,0
<i>Tout-venant</i>	10,57 (13,8%)	55,1 (12,9%)	81,2
Brita 4/8	8,08 (14,9%)	49,7 (10,2%)	62,1
Brita 6/14	7,76 (6,8%)	47,8 (5,3%)	59,6
<i>Corundum</i>	7,40 (16,3%)	55,3 (10,2%)	56,8

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

A análise da tabela acima mostra a inexistência de correspondência entre a análise visual e os valores das perdas de resistência à tração.

A areia siltosa, tal como esperado, provocou danos mínimos causando uma perda de resistência à tração de 2,4%. A extensão na força máxima aumentou relativamente ao valor de referência ($71,3\% > 68,5\%$), não tendo, no entanto, grande significado uma vez que estamos a falar de um geotêxtil bastante heterogêneo.

A areia 0/4 aparentava não ter danificado o material, no entanto causou uma perda de resistência à tração superior ao *tout-venant*. A perda de resistência à tração provocada pela areia 0/4 foi de 23,0%, sendo que a extensão na força máxima diminuiu de 68,5% para 59,2%. Assim pode-se depreender que a areia 0/4, para os geotêxteis não-tecidos testados, provocou um efeito de degradação que não se tinha verificado nos geotêxteis tecidos.

O *tout-venant* provocou uma perda de resistência à tração de 18,8%, valor que seria espectral ser maior tendo em conta o dano que aparentava ter sido provocado. Quanto à extensão na força máxima, diminuiu de 68,5% para 55,1%.

A brita 4/8 e a brita 6/14 provocaram perdas de resistência à tração com valores muito aproximados, 37,9% e 40,4%, respetivamente, aproximando-se das perdas de resistência à tração provocadas pelo *corundum* (43,2%). Quanto à extensão na força máxima, a brita 6/14 induziu a maior diminuição (de 68,5% para 47,8%), o *corundum* causou uma redução de 68,5% para 55,3%, e a brita 4/8 provocou uma perda de 68,5% para 49,7%.

O gráfico 4.7 compara comportamento do geotêxtil NT300 antes e após a danificação mecânica com os diferentes solos.

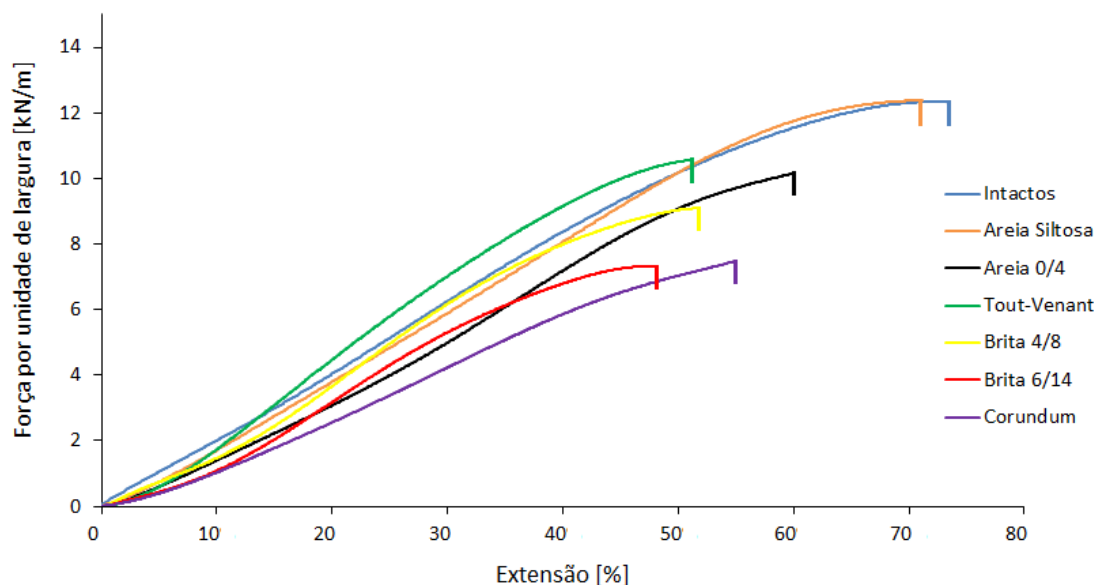


Gráfico 4.7 – Curvas tração-extensão obtidas nos ensaios de tração do geotêxtil NT300 (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

Analisando as curvas tração-extensão obtidas para os provetes danificados pela areia siltosa e para os provetes de referência, foram muito idênticas, mostrando que a degradação induzida pela areia siltosa foi mínima.

A areia 0/4 induziu no geotêxtil NT300, à semelhança do geotêxtil NT200, uma redução de resistência à tração superior à dos geotêxteis tecidos. O *tout-venant*, por sua vez, apresentou ser um solo menos danoso para o geotêxtil NT300 do que nos geotêxteis tecidos, havendo um decréscimo nas perdas de resistência a tração. Para os geotêxteis não-tecidos estudados, a areia 0/4 e o *tout-venant* induziram perdas de resistência à tração semelhantes.

As britas provocaram perdas de resistência à tração próximas das provocadas pelo *corundum*, algo que não se tinha verificado no geotêxtil NT200, para o qual o *corundum* tinha provocado um dano relativamente maior que as britas.

4.4.3 – ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

A tabela 4.8 apresenta os valores médios dos resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil NT300, seguido do gráfico 4.8 onde são apresentadas as curvas força-deslocamento.

Tabela 4.8 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil NT300, antes e após os ensaios de danificação mecânica

	Fp [N]	hp [mm]	RPR [%]
Provetes Intactos	2176 (5,3%)	65,2 (4,1%)	-
Areia Siltosa	2148 (14,2%)	55,6 (5,4%)	98,7
Areia 0/4	1861 (17,1%)	57,7 (6,3%)	85,5
<i>Tout-venant</i>	1894 (8,3%)	55,0 (4,4%)	87,0
Brita 4/8	1693 (8,7%)	51,1 (4,7%)	77,8
Brita 6/14	1519 (13,6%)	49,1 (5,3%)	69,8
<i>Corundum</i>	1136 (19,2%)	50,0 (9,3%)	52,2

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Fazendo a análise da tabela 4.8, verifica-se que a perda de resistência ao punçoamento induzida pela areia siltosa foi mínima (RPR de 98,7%), havendo apenas um decréscimo de 9,6 mm no deslocamento na força máxima.

A areia 0/4 e o *tout-venant* deram origem a danos semelhantes, provocando perdas de resistência ao punçoamento de 14,5% e 13,0%, respetivamente, e perdas de deslocamento na força máxima de 7,5 mm e 10,2 mm. Esta semelhança de comportamento causado pela areia 0/4 e o pelo *tout-venant* já tinha ocorrido para a resistência à tração, tal como nos ensaios efetuados com o geotêxtil NT200.

As britas, ao contrário do que ocorreu para a resistência à tração, causaram perdas de resistência ao punçoamento distintas. A RPR do geotêxtil NT300 danificado pela brita 4/8 foi de 77,8% e pela brita 6/14 foi de 69,8%. As britas causaram menor diminuição da resistência ao punçoamento do que o *corundum* (RPR de 52,2%). A diminuição do deslocamento na força máxima foi de 14,1 mm para a danificação com a brita 4/8, 16,1 mm com a brita 6/14 e de 15,2 mm com o *corundum*.

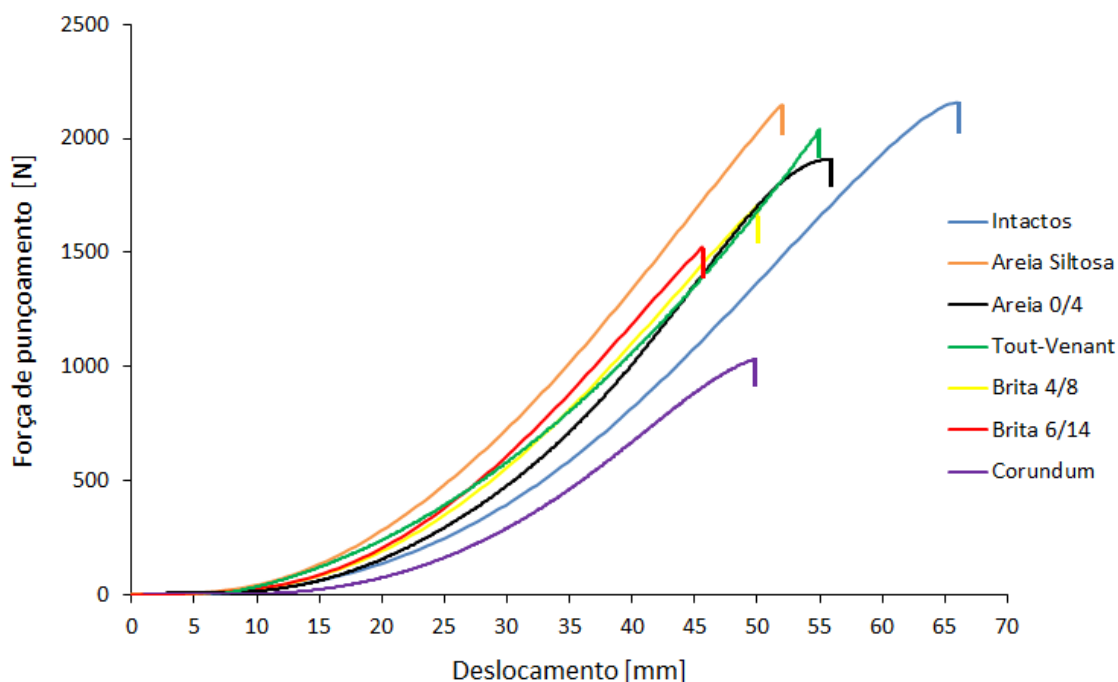


Gráfico 4.8 – Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de punção estático do geotêxtil NT300 (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

O geotêxtil NT300, quando comparado com o geotêxtil NT200, apresentou um comportamento ligeiramente distinto, uma vez que a diminuição da resistência ao punçãoamento induzida pelas areias e pelo *tout-venant* foi menor.

As britas provocaram comportamentos distintos uma vez que a brita 6/14 provocou uma deterioração superior, aproximando-se mais dos danos provocados pelo *corundum*.

Podemos verificar que este material é mais resistente ao punçãoamento que o geotêxtil NT200, eventualmente por possuir uma MUA superior.

4.5. GEOGRELHA

4.5.1 – INSPEÇÃO VISUAL

A geogrelha foi o único material testado que não pertencia ao grupo dos geotêxteis. Para a avaliação do dano provocado neste material não foi considerado o ensaio de punçãoamento estático, uma vez que este não se aplica a este tipo de geossintético.

Através do primeiro contacto com este geotêxtil perspectivou-se um material bastante mais robusto que os geotêxteis analisados antes. É também importante salientar que este tipo de geossintético tende a ser homogêneo que os anteriores, o que faria prever resultados com poucas flutuações.

A areia siltosa (Fig. 4.5a) e a areia 0/4 (Fig. 4.5b) não provocaram danos visíveis na geogrelha, sendo que a única alteração causada foi a alteração de cor do material devido à acumulação de sujidade. A brita 4/8 (Fig. 4.5d) e a brita 6/14 (Fig. 4.5e) aparentemente induziram danos iguais ao material, que apresentava ligeiros cortes e alguma abrasão. O *tout-venant* (Fig. 4.5c) causou estragos semelhantes aos provocados pelas britas, mas com menor efeito abrasivo.

O *corundum* (Fig. 4.5f) visualmente não causou grandes danos, apenas ligeiros cortes no material e alguma abrasão, à semelhança das britas.

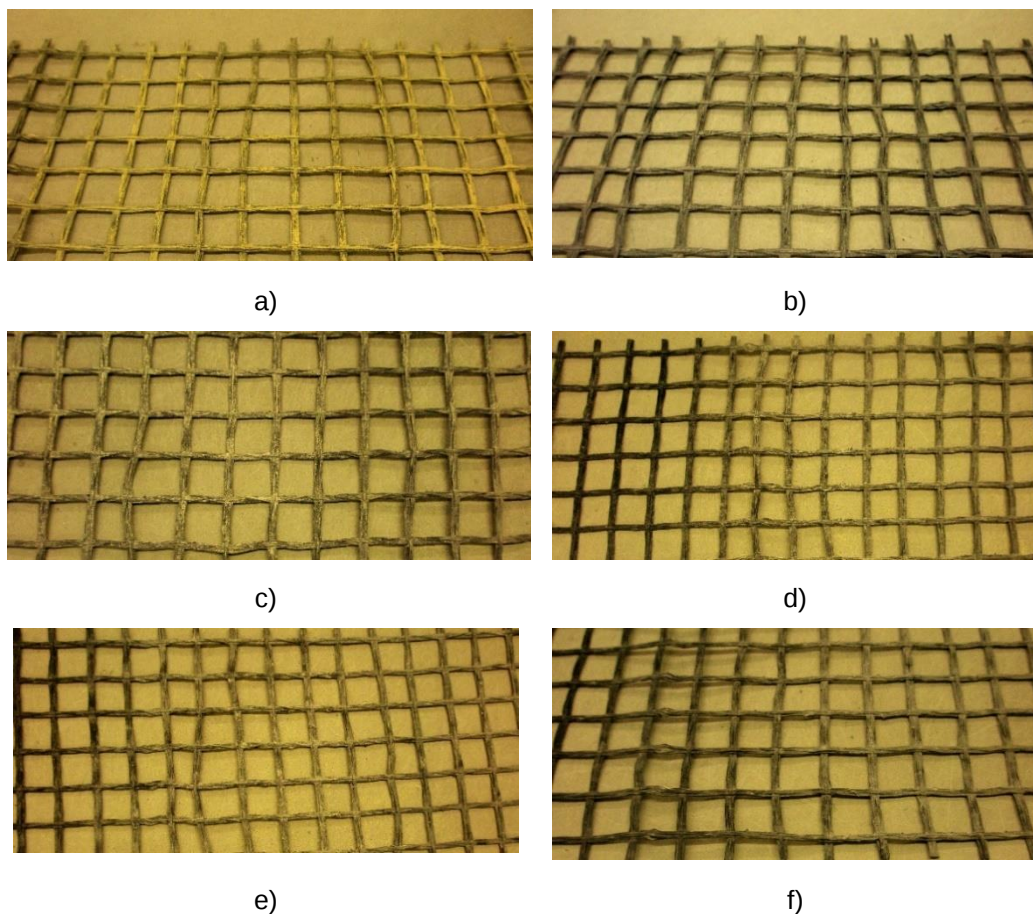


Figura 4.5 – Aspeto do geogrelha após os ensaios de danificação mecânica: a) Danificação com areia siltosa; b) Danificação com areia 0/4; c) Danificação com *tout-venant*; d) Danificação com brita 4/8; e) Danificação com brita 6/14; f) Danificação com *corundum*.

4.5.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO

Neste último subponto de análise são apresentados os resultados dos ensaios de tração-extensão da geogrelha. Para isso na Tabela 4.9 são apresentados os valores médios dos resultados obtidos e no Gráfico 4.9 estão representados esses mesmos valores através das curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados.

Tabela 4.9 – Valores obtidos nos ensaios de tração-extensão da geogrelha GG antes e após os ensaios de danificação mecânica

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Provetes intactos	45,73 (3,3%)	10,5 (3,6%)	-
Areia siltosa	46,27 (3,3%)	10,1 (5,5%)	101,2
Areia 0/4	44,83 (6,4%)	9,8 (14,5%)	98,1
<i>Tout-venant</i>	41,92 (5,1%)	9,7 (4,6%)	91,7
Brita 4/8	40,83 (5,1%)	10,1 (2,9%)	89,3
Brita 6/14	40,21 (2,7%)	10,4 (7,6%)	87,9
<i>Corundum</i>	38,08 (7,2%)	10,5 (11,9%)	83,3

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

A análise da tabela 4.9 mostra que as previsões feitas aquando do primeiro contacto com a geogrelha se verificavam, apresentando valores de RTR bastante superiores aos restantes geossintéticos testados.

As amostras danificadas pela areia siltosa possuíam um valor de RTR superior a 100%, valor que não significa um aumento da resistência à tração do material. Embora este material fosse relativamente homogêneo, não implicava que não houvessem pequenas flutuações nos valores. A extensão na força máxima não sofreu alterações muito relevantes após a danificação com os diferentes solos.

Após a danificação com areia 0/4, a geogrelha possuía uma RTR de 98,1%. Por sua vez, o *tout-venant* induziu uma ligeira diminuição da resistência à tração da geogrelha (RTR de 91,7%).

As britas provocaram danos bastante semelhantes com perdas de resistência à tração de 10,7 % para a brita 4/8 e de 12,1 % para a brita 6/14. A perda de resistência à tração induzida pelas britas foi menor do que nos outros geossintéticos.

O *corundum* foi novamente o agregado a provocar maiores danos, provocando uma perda de resistência à tração do material de 16,7% (um valor muito reduzido quando comparado com os materiais anteriores).

Observando o gráfico 4.9, temos uma melhor percepção do comportamento dos provetes danificados em relação aos provetes de referência.

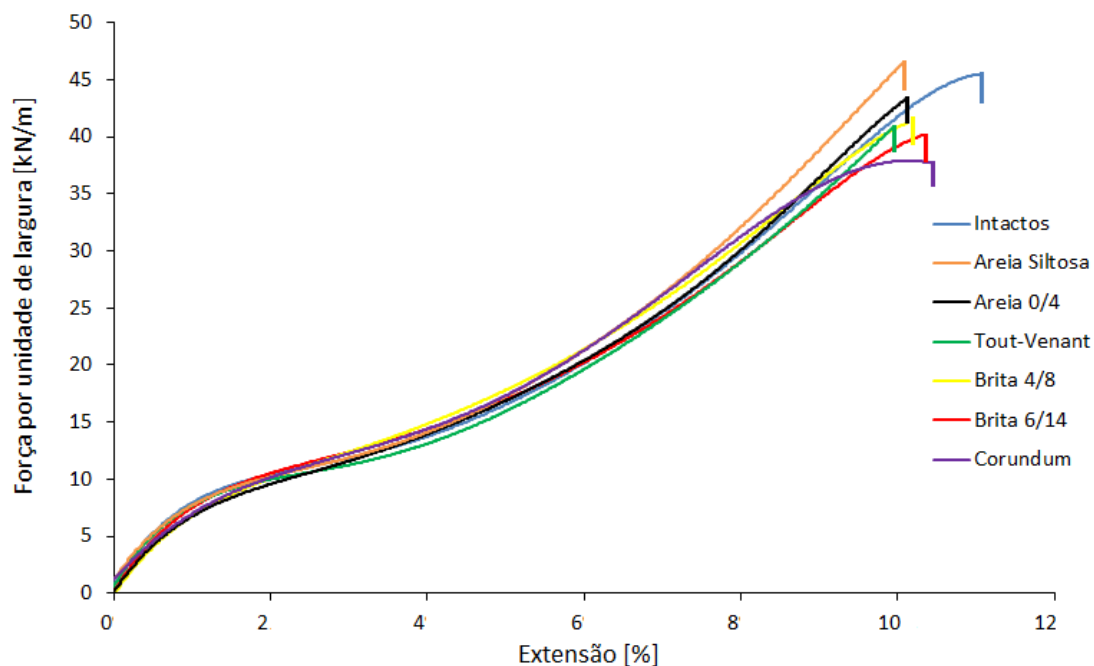


Gráfico 4.9 – Curvas tração-extensão obtidas nos ensaios de tração da geogrelha GG (curvas individuais com os resultados mais próximos da média de todos os provetes ensaiados)

A análise do gráfico 4.9 mostra que a geogrelha tem uma resistência à danificação mecânica muito elevada, dadas as semelhanças das curvas força-extensão das amostras danificadas e da amostra de referência. Até 8% da extensão não existem grandes diferenças no comportamento à tração das amostras danificadas e da amostra de referência. No momento de rotura, as curvas força-extensão encontram-se todas muito próximas, havendo apenas uma diferença máxima de 16,7%, relativa à resistência à tração, entre a amostra de referência e a amostra mais danificada (danificação com *corundum*).

5

CONCLUSÃO

Neste trabalho, cinco geossintéticos foram sujeitos a ensaios de danificação mecânica, sendo posteriormente avaliada a variação das propriedades dos materiais através de ensaios de tração (NP EN ISO 10319: 2005) e ensaios de punçoamento estático (NP EN ISO 12236: 2008). Neste último capítulo serão apresentadas as principais conclusões do trabalho experimental. Para tal, serão apresentados dois gráficos comparativos de resistências residuais (RTR e RPR) relacionando os diferentes materiais danificados pelos vários solos com os valores de referência.

Os danos causados pelos ensaios de danificação mecânica incluíram corte, diminuição da espessura dos filamentos, abrasão e punçoamentos pontuais. Estes danos são influenciados pelas diferentes características dos solos, podendo destacar-se a dimensão e forma das partículas e a distribuição granulométrica. Todos os geossintéticos ficaram sujos após os ensaios de danificação mecânica devido à deposição de partículas de pó provenientes dos solos, efeito que foi mais evidente nos solos finos. Os cortes e punçoamentos pontuais apenas ocorreram nos provetes danificados com solos cuja dimensão das partículas era elevada ($D_{máx}$ muito grande) e que eram angulares. Os solos finos (areias) induziram poucos danos. Na tabela 5.2 estão resumidos os resultados da análise visual após da danificação mecânica.

Tabela 5.2 – Análise visual dos geossintéticos após os ensaios de danificação mecânica

		Sujidade	Cortes	Espessura dos materiais	Abrasão	Punçoamentos pontuais
Danificação mecânica	T80	Areia Siltosa	X	-	-	-
		Areia 0/4	X	-	-	-
		<i>Tout-venant</i>	-	X	-	X
		Brita 4/8	-	X	-	X
		Brita 6/14	-	X	-	X
		<i>Corundum</i>	-	X	-	X
	T200	Areia Siltosa	X	-	-	-
		Areia 0/4	X	-	-	-
		<i>Tout-venant</i>	-	X	-	X
		Brita 4/8	-	X	-	X
		Brita 6/14	-	X	-	X
		<i>Corundum</i>	-	X	-	X
	NT200	Areia Siltosa	X	-	-	X
		Areia 0/4	X	-	-	X
		<i>Tout-venant</i>	X	-	X	X
		Brita 4/8	X	X	X	X
		Brita 6/14	X	X	X	X
		<i>Corundum</i>	X	X	X	X
	NT300	Areia Siltosa	X	-	-	X
		Areia 0/4	X	-	-	X
		<i>Tout-venant</i>	X	-	X	X
		Brita 4/8	X	X	X	X
		Brita 6/14	X	X	X	X
		<i>Corundum</i>	X	X	X	X
	GG	Areia Siltosa	X	-	-	-
		Areia 0/4	X	-	-	-
		<i>Tout-venant</i>	X	-	-	X
		Brita 4/8	X	-	-	X
		Brita 6/14	X	-	-	X
		<i>Corundum</i>	X	-	-	X

Para uma melhor comparação das alterações ocorridas nas propriedades mecânicas dos geossintéticos durante os vários ensaios de danificação mecânica, os gráficos 5.1 e 5.2 resumem, respectivamente, os valores da resistência à tração residual e da resistência ao punçoamento residual dos materiais. Esta análise permite que se perceba de uma forma mais intuitiva a capacidade destrutiva de cada um dos solos e a maior ou menor resistência dos geossintéticos estudados.

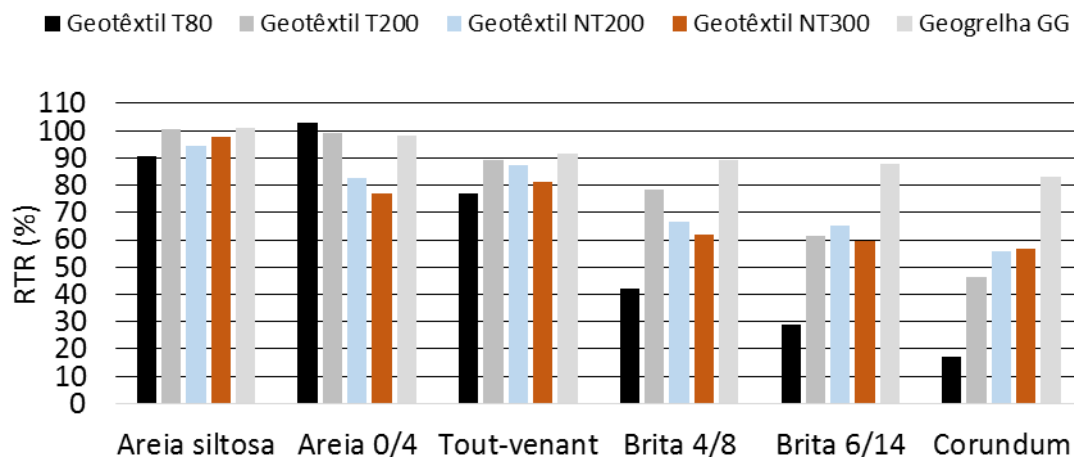


Gráfico 5.1 – Resistência à tração residual dos geossintéticos após o processo de danificação mecânica

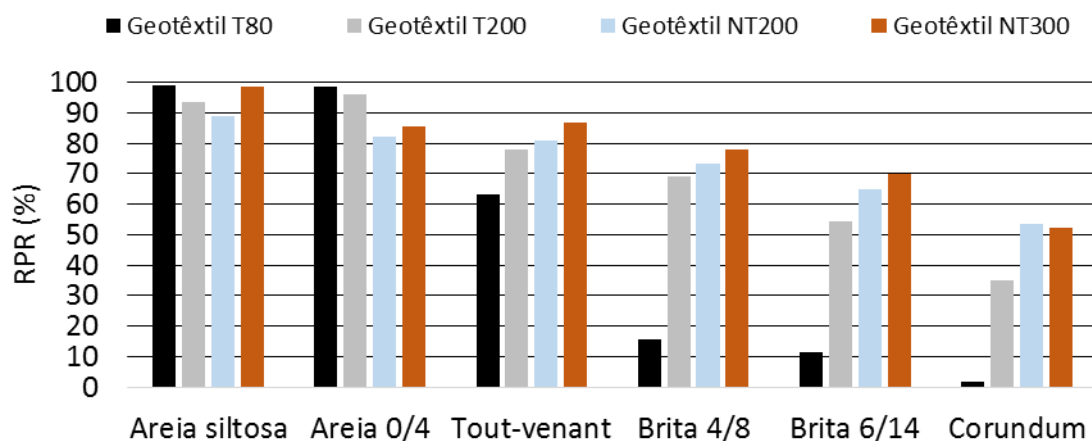


Gráfico 5.2 – Resistência ao punçoamento residual dos geossintéticos após o processo de danificação mecânica

Analisando os gráficos 5.1 e 5.2 podemos verificar que:

- Os danos induzidos pela areia siltosa nos geossintéticos é mínima, uma vez que todos os materiais apresentavam valores de RTR e RPR bastante elevados. A inabilidade de danificar os geossintéticos deve-se ao facto deste solo ser muito fino e uniforme, sendo que, quando este é compactado (segundo e quarto passo do procedimento de danificação) o resultado é uma superfície bastante lisa, o que faz com que haja uma grande superfície de contacto entre o solo e o geossintético, distribuindo assim a força que é aplicada e diminuindo consequentemente o dano provocado.
- A areia 0/4 causa reduções da resistência à tração e da resistência ao punçoamento consideráveis apenas nos geotêxteis não-tecidos. Este solo possui partículas de pequena dimensão mas com uma textura “áspera”, provocando um efeito de lixa (abrasão). Nos restantes geossintéticos este solo não teve um efeito danoso porque as partículas deste

passam através dos poros destes materiais, não criando qualquer tipo de fricção com os materiais, e como resultado a degradação foi mínima.

- O *tout-venant*, embora se trate de um solo com $D_{máx}$ elevado, possui também uma granulometria extensa, sendo que depois de compactado obtém-se uma grande superfície de contacto com os geossintéticos, à semelhança da areia siltosa. No entanto, não deixa de ser um solo com partículas de grande dimensão e angulares que provocam danos como furos e abrasão nos geossintéticos. Relativamente a este solo, não é possível concluir que tenha provocado uma maior perda de resistência à tração nos geotêxteis tecidos em comparação com os não-tecidos. Contudo, foi um solo que provocou danos consideráveis em três dos geossintéticos em estudo. Foi mais prejudicial para o geotêxtil T80, pois tratava-se de um material de espessura e MUA baixos e algo frágil, tendo as partículas de maior dimensão do *tout-venant* provocado cortes e punçoamentos pontuais. Provocou também alguma degradação nos geotêxteis não-tecidos, mas não foi tão extensiva como no geotêxtil T80.
- A brita 4/8, um solo cujas partículas são grandes e com uma textura angular, provocou danos em todos os geotêxteis, não tendo no entanto causado uma deterioração elevada na geogrelha, que foi o material mais resistente a ser estudado. Os danos provocados por este solo passaram, em grande parte dos casos, por cortes, efeito abrasivo e punçoamentos pontuais nos materiais. No entanto, para os geotêxteis não-tecidos teve um efeito abrasivo que foi um fator determinante na perda de resistência destes materiais. Já nos geotêxteis tecidos os danos mais evidentes foram os cortes de filamentos do material e consequentes furos no material, diminuindo a quantidade de filamentos resistentes, sendo o resultado bastante evidente na perda de resistência.
- A brita 6/14 teve um comportamento semelhante ao da brita 4/8, sendo que diferença entre estas foi o facto da brita 6/14 possuir partículas de maior dimensão, provocando punçoamentos pontuais de maior dimensão e consequentemente uma maior degradação dos geossintéticos.
- Para os geotêxteis não-tecidos danificados pelas britas, as perdas de resistência à tração foram superiores às perdas de resistência ao punçoamento. Já para os geotêxteis tecidos danificados pelas britas, as perdas de resistência à tração foram inferiores às perdas de resistência ao punçoamento. Quanto à geogrelha, ambas as britas provocaram perdas de resistência à tração muito próximas.
- O *corundum*, agregado que é usado no procedimento normativo, foi o que causou maiores perdas de resistência à tração e ao punçoamento em todos os materiais por possuir partículas cuja textura era muito “áspera” (angular), sendo que o efeito abrasivo provocado por este solo foi muito mais acentuado, provando ser mais agressivo comparativamente aos solos naturais.

Embora os ensaios de tração-extensão e de punçoamento estático seja distintos e exijam dos materiais esforços diferentes, foi possível observar conformidade nos resultados e relações entre os fatores causadores de dano nos diferentes geossintéticos. Assim, podemos concluir que de uma forma geral:

- Os solos granulares, cuja dimensão das partículas é grande e possuem uma distribuição granulométrica pouco extensa, provocam danos maiores, uma vez que a superfície de contacto resultante é muito irregular, provocando punçoamentos pontuais e cortes nos materiais, como se pode observar na Fig. 5.1.

- A textura dos solos é um fator importante, tendo um grande peso no efeito abrasivo e cortes no material (quanto mais angulares as partículas, maior é a abrasão e cortes provocados).

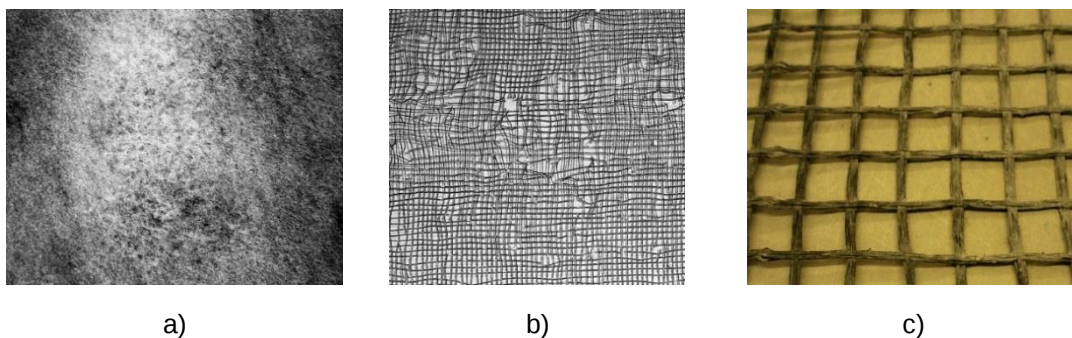


Fig. 5.1 – Exemplos de danos provocados por solos com $D_{\text{máx}}$ elevado e distribuição granulométrica pouco extensa: a) Dano provocado pela brita 4/8 no geotêxtil NT200; b) Dano provocado pela brita 6/14 no geotêxtil T80; c) Dano provocado pelo *corundum* na geogrelha GG

- Os solos cuja dimensão das partículas é reduzida (areias) (Fig. 5.2) não tiveram efeitos destruidores nos geossintéticos estudados, uma vez que a superfície de contacto com o geossintético era muito grande e lisa, e também porque são solos pouco densos, amortecendo em parte o impacto induzido pelo ensaio de danificação.

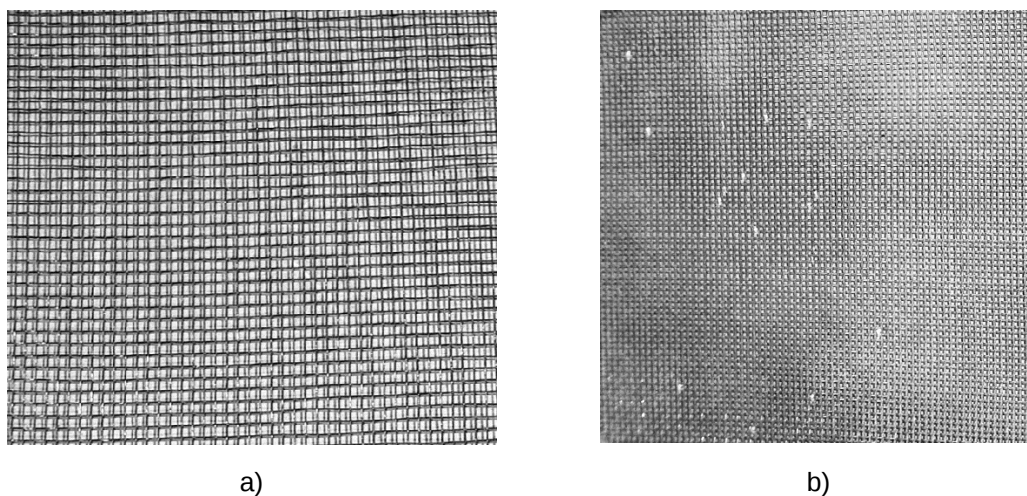


Fig. 5.2 – Exemplos de danos provocados pelas areias: a) Geotêxtil T80 danificado com areia siltosa; b) Geotêxtil T200 danificado com areia 0/4

- Tal como se pode observar na Fig. 5.3, os solos cuja distribuição granulométria era extensa (*tout-venant*), mesmo possuindo um $D_{\text{máx}}$ muito elevado, não são tão danosos quanto seria de esperar, uma vez que após a compactação apresentam uma grande superfície de contacto com os geossintéticos, fazendo com que as partículas de maior dimensão (as que provocam maiores danos) não fiquem salientes.

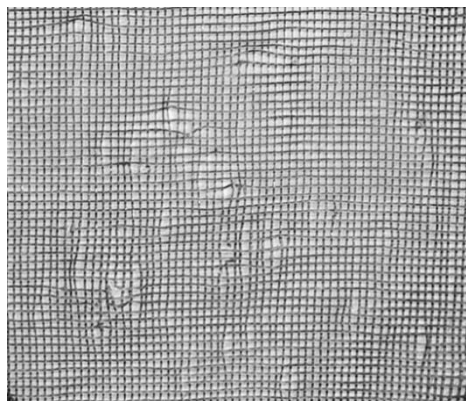


Fig. 5.3 – Exemplo: Dano provocado pelo *tout-venant* no geotêxtil T80

As conclusões obtidas neste trabalho, de um modo geral, estão de acordo com as conclusões obtidas no estudo realizado por Carlos, *et al.* 2015. Pode-se salientar o facto do corundum ser o agregado mais danoso; os solos granulares com partículas maiores tem tendência a induzir perdas de resistência à tração maiores; os solos finos de um modo geral provocaram danos mínimos. Verifica-se também que o material granular sintético (*corundum*) estabelece uma abordagem conservativa, tal como Paula *et al.* 2004, e Carneiro *et al.* 2009 já tinham observado. Assim será de salientar a importância utilizar solos naturais nos ensaios laboratoriais, que melhor simulem a danificação durante a instalação dos geossintéticos em obras reais.

5.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O trabalho realizado foi conclusivo e permitiu perceber alguns dos principais fatores causadores de dano nos geossintéticos. No entanto, não deixou de ser um procedimento laboratorial, e possivelmente os resultados que se obteriam se o dano tivesse sido provocado *in situ* seriam diferentes. Embora mais dispendioso, seria de interesse realizar este mesmo trabalho *in situ* para se poder fazer uma comparação com os resultados obtidos em laboratório.

Seria também interessante desenvolver um estudo com solos diferentes, por exemplo, utilizar areias e britas com granulometrias e texturas diferentes, procurando obter mais informação sobre a influência do tamanho e forma das partículas na degradação dos geossintéticos. Também, poder-se-ia recorrer a resíduos de construção e demolição (RCDs) e escórias, uma vez que são agregados cada vez mais utilizados nas obras de engenharia civil.

Seria de grande interesse realizar o mesmo trabalho com outros geossintéticos por forma a ampliar o leque de amostras danificadas, permitindo assim retirar mais conclusões sobre a influência das propriedades dos geossintéticos no processo de danificação mecânica.

A norma EN ISO 10722: 2007 refere o uso de ensaios de tração para avaliar o efeito do processo de danificação mecânica. Para além destes, neste trabalho realizaram-se ensaios de punçoamento estático, mas seria relevante, para os geotêxteis não-tecidos, monitorizar também eventuais alterações nas propriedades hidráulicas.

Por último, poder-se-iam expor os geossintéticos sucessivamente a vários agentes de degradação, uma vez que os geossintéticos quando aplicados em obra não ficam sujeitos apenas a degradação mecânica. Então seria interessante, por exemplo, degradar química e/ou biologicamente os geossintéticos depois da danificação mecânica, de modo a avaliar a existência de sinergismos entre os agentes de degradação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D1505-03. *Standard test method for density of plastics by density-gradient technique*. American Society for Testing Materials, USA, 2003.

ASTM D2487-11. *Standard practice for the classification of the soils for engeneering purposes (Unidied Soil Classification System)*. American Society for Testing Materials, USA, 2011.

ASTM D4533-04. *Standard test method for trapezoid tearing strength of geotextiles*. American Society for Testing Materials, USA, 2004.

ASTM D4751-04. *Standard test method for determining apparent opening size of a geotextile*. American Society for Testing Materials, USA, 2004.

ASTM D5199-01. *Standard test method for measuring nominal thickness of geosynthetics*. American Society for Testing Materials, USA, 2006.

ASTM D5262-07 - *Standard test method for evaluating the unconfined tension creep and creep rupture behavior of geosynthetics*.

ASTM D792-08. *Standard test method for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement*. American Society for Testing Materials, USA, 2008.

Barbedo, D. "*Consideração da Natureza do Fluido Percolante no Dimensionamento de Fundações de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*". Dissertação de Mestrado, IST, 2013.

Benson, C.H, Kucukkirca I.E e Scalia J. "Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a soil wast landfill." *Geotextiles and Geomenbranes*, 2010: 536-546.

Brown, R. e Greenwood J.H. *Pratical Guide to the Assessmente of hte Useful Life of Plastics*. 2002.

Carlos, D.M., Carneiro J.R., Pinho-Lopes M., e Lopes M-L. "Effect of the Soil Size Distribution on the Mechanical Damage Nonwoven Geotextiles Under Repeated Loading." *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2015: 1-7.

Carneiro J.R., Almeida P.J. e Lopes, M.L. "Some synergisms in the degradation of polypropylene geotextiles." *Construction and Building Materials*, 2014: 586-591.

Carneiro J.R., Morais L. M., Moreira S.P. e Lopes M.L. "Evaluation of the damages occurred during the installation of non-woven geotextiles." *Materials Science Forum*, 2013: 439-444.

Carneiro, J.R., Morais L. M. e Lopes M.L. "Efeito do processo de instalação no comportamento mecânico de geotêxteis não-tecidos." *13º Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa, 2012.

Carneiro, J.R. *Durabilidade de Materiais Geossintéticos em Estruturas de Carácter Ambiental - A Importância da Incorporação de Aditivos Químicos*. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, FEUP, 2009.

Carvalho, F. *Resistência de um geocompósito de reforço à danificação durante a instalação e à abrasão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2014.

Crawford, R.J. *Plastics engineering*. 1981.

E LNEC 237. *Resistência ao desgaste pela máquina de Los Angeles*. LNEC.

- Elvidge, C.B. e Raymond G.P. "Laboratory survivability of nonwoven geotextiles on open-graded crushed aggregate." *Geosynthet International*, 1999: 93-117.
- EN ISO 10318. *Geossintéticos termos e definições*. CEN, 2005.
- EN ISO 10722. *Geosynthetics – Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material*. CEN, 2007.
- EN ISO 12956. *Geotextiles and geotextile-related products - Determination of characteristic onpening size*. CEN, 1999.
- EN ISO 13934-1:1999 – Textiles – Tensile properties of fabrics – Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method.
- Ferreira, F.B., Vieira C.S., Lopes M.L. "Direct shear behaviour of residual soil-geosynthetic interfaces - Influence soil moisture content, soil density and geosynthetic type." *Geosynthetics International*, 2015: 257-272.
- Giround, J.P., Arman A., e Bell J.R. *Geotextiles in geotechnical engineering practice and research. Report of the ISSMFE Technical Committee on Geotextiles*. 1985.
- Gourc, J.P. *Quelques aspects du comportement des géotextiles em mécanique des sols*. 1982.
- Greenwood, J. H. "The nature of mechanical damage". *Seminar Volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Surrey, UK*. 1998.
- Chiou, S.-L. e Huang C.-C. "Investigation of installation damage of some geogrids using laboratory tests." *Geosynthetics International*, 2006: 23-35.
- Hufenus, R., Ruegger R., Flum D. e Sterba I.J. "Strength reduction factors due to insstallation damage of reinforcing geosynthetics." *Geotextiles and Geomembranes*, 2005: 401-424.
- ISO/TS 17892-4. *Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing soil. Part 4: Determination of particle size distribution. International Organization for Standardization*. CEN, 2004.
- Junqueira, F.F., Silva A.R.L., Palmeria E.M. "Performance of drainage systems incorporatating geosynthetics and their effect on leachate properties." *Geotextiles and Geomembranes*, 2006: 311-324.
- Khodaii, A., Fallah S. e Nejad F. M. "Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays." *Geotextiles and Geomembranes*, 2009: 1-8.
- Koerner, R.M. *Designing with geosynthetics*. Prentice-Hall, Upper River, NJ, USA. 1999.
- Ladeira, M. A. "Estudo dos fenómenos da interação solo-geossintético através de ensaios de arranque." Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 1995.
- Pinho-Lopes M. e Lopes M.L. *A Durabilidade dos Geossintéticos*. Porto: FEUP edições, 2010.
- Lopes, M. L. *Muros Reforçados com Geossintéticos*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, 1992.
- Lopes, M.L. "Aplicação de geossintéticos em engenharia civil", *Texto de apoio à disciplina com o mesmo título*, FEUP. 1998.

Moreira, S.P., Carneiro J.R. e Lopes, M.L. “Efeito da danificação durante a instalação na permeabilidade normal ao plano de geotêxteis não-tecidos.” *12º Congresso Nacional de Geotecnia*. Guimarães, 2010.

NP EN 13738. *Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência ao arranque no solo*. IPQ, 2007.

NP EN ISO 10319. *Geotêxteis – Ensaio de tração em tiras largas*. IPQ, 2005.

NP EN ISO 11058. *Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento*. IPQ, 2003.

NP EN ISO 12236. *Geossintéticos – Ensaio de punçamento estático (ensaio CBR)*. IPQ, 2008.

NP EN ISO 12957-1. *Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de corte direto*. IPQ, 2007.

NP EN ISO 12957-2. *Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 2: Ensaio em plano inclinado*. IPQ, 2007.

NP EN ISO 12958. *Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da capacidade de escoamento no seu plano*. IPQ, 2005.

NP EN ISO 9863-1. “Geossintéticos - Determinação da espessura e pressões especificadas.” IPQ, 2006.

NP EN ISO 9864. *Geossintéticos – Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados*. IPQ, 2006.

Paula A.M., Pinho-Lopes M., Lopes M.L. “Avaliação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos. Influência do material de confinamento.” *Revista Geotecnia*, 2004: 71-83.

Paula, A.M. *Danificação durante a instalação - Avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2003.

Paula, A.M. *Estudo dos coeficientes de segurança por danificação durante a instalação e por fluência em estruturas reforçadas com geossintéticos*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, FEUP, 2012.

Pinho-Lopes, M. *Estudo dos coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, FEUP, 2004.

Pinho-Lopes, M., Lopes M.L. “Tensile properties of geosynthetics after installation damage.” *Environmental Geotechnics*, 2013: 18p.

Rankilor, P.R. *Handbook of technical textiles*. 2000.

Shukla, S. *Geosynthetics and their applications*. 2002.

Ingold T. S. *The Geotextiles and Geomembranes Manual*. 1994.

Vahedifard, F., Shahrokhbabadi S. e Leshchinsky D. “Geosynthetic-reinforced soil structures with concave facing profile.” *Geotextiles and Geomembranes*, 2016: 358-365.

Xiao, C., Han J. e Zhang Z. "Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading." *Geotextiles and Geomenbranes*, 2016: 81-94.