

AVALIAÇÃO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA DE GEOSSINTÉTICOS CAUSADA POR RESÍDUOS RECICLADOS

ADRIANA DA SILVA

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

JULHO 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

Sabemos muito mais do que julgamos, podemos muito mais do que imaginamos

José Saramago

AGRADECIMENTOS

Depois de todo este percurso percorrido, onde fiz e passei por coisas nunca antes pensadas, que me fizeram crescer como pessoa e como mulher, não posso deixar de manifestar os meus sinceros agradecimentos às pessoas que mais contribuíram, direta ou indiretamente para que este ciclo se fechasse da melhor maneira.

À minha orientadora Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes;

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, por sempre se mostrar disponível a ajudar nos momentos de aflição e pelos conhecimentos transmitidos

Aos Engenheiros Francisco Violante e Filipa Escórcio, pela ajuda e apoio durante toda a realização deste trabalho;

Ao Diogo pelo carinho, pela compreensão, paciência, pelo incentivo, ajuda e apoio permanentes;

A todos os meus amigos pelo apoio e boa disposição durante todo o meu percurso académico;

E por último e mais importantes na minha vida, aos meus pais e irmãos, pelos sacrifícios, pela paciência, pela compreensão, apoio incondicional e encorajamento desde e para sempre.

A todos, o meu mais sincero obrigado, tornaram este percurso e os últimos seis anos os melhores da minha vida.

RESUMO

As preocupações associadas à preservação do meio ambiente, assim como necessidades técnicas e económicas, têm obrigado cada vez mais ao recurso a materiais ecológicos e de baixo custo. Assim, os geossintéticos e os resíduos de construção e demolição (RCD) apresentam-se como boas soluções às exigências dos dias que correm. Os geossintéticos pelo cariz versátil e económico, de fácil aplicação e desempenho que apresentam, e os resíduos de construção e demolição pela redução de exploração de recursos naturais e pelo reaproveitamento de materiais.

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação da danificação mecânica de geossintéticos provocada por resíduos. Para tal elaborou-se um estudo experimental onde se utilizaram dois geotêxteis tecidos (com diferentes massas por unidade de área), dois geotêxteis não-tecidos (também estes com massas por unidade de área distintas) e uma geogrelha tecida. Para simular a danificação a curto prazo dos geossintéticos causada por cargas dinâmicas, realizaram-se ensaios de danificação mecânica.

Os resíduos utilizados nos ensaios de danificação mecânica foram sujeitos a caracterização através da determinação das respetivas curvas granulométricas, parâmetros associados às partículas constituintes e por inspeção visual. Utilizaram-se como materiais de danificação três resíduos reciclados, dos quais um RCD constituído maioritariamente por partículas finas (RCD fino), um RCD constituído por cerâmicos e derivados (RCD cerâmico), um RCD constituído por betão e agregados de betão (RCD de betão), um resíduo não reciclado constituído por restos e produtos de inceneração (cinzas) e por fim o *corundum*, agregado sintético normalizado.

Os danos ocorridos nos ensaios de danificação mecânica foram avaliados por inspeção visual e, de modo a caracterizar a variação das propriedades mecânicas dos geossintéticos, por ensaios de tração e de punçoamento estático.

Em geral, foi possível estabelecer uma relação entre os danos ocorridos nos diferentes geossintéticos e as características dos resíduos. Os resultados mostraram que o RCD fino praticamente não influenciou as propriedades de tração e punçoamento dos geossintéticos em estudo, enquanto que o *corundum* foi o material de danificação mais destrutivo. As cinzas, o RCD cerâmico e o RCD de betão tiveram comportamentos semelhantes e intermédios, tendo provocado nos geossintéticos danos e variação de propriedades idênticos. Os resíduos de granulometria mais extensa e partículas de maiores dimensões (RCD cerâmico, RCD de betão e as cinzas) podem reduzir muito significativamente as propriedades (de tração e de punçoamento estático) dos geossintéticos, principalmente dos geotêxteis tecidos e dos geotêxteis não-tecidos com reduzida massa por unidade de área e espessura. Deste modo, e como seria de esperar, obtiveram-se os resultados mais satisfatórios para a geogrelha e para o geotêxtil não-tecido mais robusto, nos quais não se obtiveram variações muito significativas das suas propriedades mecânicas.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Danificação mecânica, Resíduos, Propriedades mecânicas, Reciclagem

ABSTRACT

Concerns associated with the preservation of the environment, as well as technical and economic requirements, have forced increasingly to the use of ecological and low cost materials. Therefore, geosynthetics together with construction and demolition waste (C&DW) are presented as good solutions to the demands of today's world. Geosynthetics for their versatile and economic nature, easy application and performance, and the C&DW by reducing the exploitation of natural resources and the reutilization of materials associated with it.

This study aimed to evaluate the mechanical damage of geosynthetics caused by landfill materials consisting of waste. For that purpose, it was carried out an experimental study using two woven geotextiles (with different masses per unit area), two non-woven geotextiles (also with different masses per unit area) and a woven geogrid. To simulate a short-term damage on geosynthetics caused by dynamic loads, mechanical damage tests were performed.

The waste materials used in the mechanical damage tests were characterized by determining the respective particle size distributions, the parameters related to the constituent particles and by visual inspection. The materials used in the mechanical damage tests included three recycled residues, a C&DW mostly made up of fine particles (fine C&DW), a C&DW consisting of ceramic and derivatives (ceramic C&DW), a C&DW consisting of concrete and concrete aggregates (concrete C&DW), one residue non-recycled formed by incineration products and waste (ashes) and finally *corundum*, the synthetic aggregate normalized.

The damage occurred in the mechanical damage tests was assessed by visual inspection and, in order to characterize the changes in the mechanical properties of the geosynthetics, by tensile tests and by static puncture tests.

In general, it was possible to establish a relationship between the damage occurred in different geosynthetics and the characteristics of the waste. The results showed that the fine C&DW had almost no influence in the tensile and puncture properties of the geosynthetics, while *corundum* was the most destructive material. The ashes, ceramic C&DW and concrete C&DW had similar and intermediate behaviors that induced similar damage and variation of properties in geosynthetics. The residues with higher granulometric distributions and with large particles (ceramic C&DW, concrete C&DW and ashes) can significantly reduce the properties (tensile and puncture) of geosynthetics, especially in the woven geotextiles and non-woven geotextiles with low mass per unit area and thickness. Thereby, the most satisfactory results were obtained for the geogrid and for the more robust non-woven geotextile, in which significant variations in their mechanical properties did not occur.

KEYWORDS: Geosynthetics, Mechanical Damage, Waste, Mechanical Properties, Recycling

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
GEOSSINTÉTICOS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. CLASSIFICAÇÃO	3
2.2.1. GEOTÊXTEIS	4
2.2.2. GEOMEMBRANAS	6
2.2.3. GEORELHAS	7
2.2.4. GEOREDES	7
2.2.5. GEOCOMPÓSITOS	8
2.3. PRINCIPAIS PROPRIEDADES	8
2.3.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	9
2.3.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS	9
2.3.3. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	10
2.3.4. PROPRIEDADES RELATIVAS À DURABILIDADE	10
2.4. FUNÇÕES	10
2.4.1. DRENAGEM	11
2.4.2. FILTRAGEM	11
2.4.3. PROTEÇÃO	12
2.4.4. REFORÇO	12
2.4.5. SEPARAÇÃO	12
2.4.6. CONTROLO DE EROÇÃO SUPERFICIAL	13
2.4.7. BARREIRA DE FLUÍDOS	13
2.5. PRINCIPAIS APLICAÇÕES	13
2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	14

DANIFICAÇÃO MECÂNICA DE GEOSSINTÉTICOS COM RESÍDUOS	15
3.1.INTRODUÇÃO	15
3.2.DANIFICAÇÃO MECÂNICA	15
3.2.1. FATORES QUE INFLUENCIA A DDI.....	15
3.2.1.1. FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE GEOSSINTÉTICO	16
3.2.1.2 FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE SOLO	17
3.2.1.3. FATORES RELACIONADOS COM AS CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO.....	17
3.2.2 DANOS PROVOCADOS DURANTE A INSTALAÇÃO	17
3.2.2.1. APARECIMENTO DE FENDAS E SEPARAÇÃO DO MATERIAL.....	18
3.2.2.2. PUNÇAMENTO	18
3.2.2.3. ROTURA EM TENSÃO	18
3.2.2.4. CORTE DE FIBRAS.....	19
3.2.2.5. RASGAMENTO	19
3.2.2.6. ABRASÃO	19
3.2.3. FORMAS DE MINIMIZAR OS EFEITOS DA DDI.....	20
3.2.3. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DDI	21
3.2.3.1. ENSAIOS DE CAMPO.....	21
3.2.3.2. SIMULAÇÃO LABORATORIAL.....	22
3.2.4. ESTUDOS DE ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA REALIZADOS NA FEUP	23
3.2.4.1. ESTUDO REALIZADO POR PAULA <i>ET AL.</i> , 2004	23
3.2.4.2. ESTUDO REALIZADO POR CARNEIRO <i>ET AL.</i> , 2012	25
3.2.4.3. ESTUDO REALIZADO POR CARLOS <i>ET AL.</i> , 2015.....	26
3.2.4.4 ESTUDO REALIZADO POR VIOLANTE, 2016	28
3.3. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO DEMOLIÇÃO	31
3.3.1. PRODUÇÃO DE RCD	31
3.3.2. CLASSIFICAÇÃO	32
3.3.3 GESTÃO E RECICLAGEM DOS RCD	35
3.3.4. ENQUADRAMENTO LEGAL DOS RCD	36
3.3.5. ESTUDOS RELACIONADOS COM A APLICAÇÃO DE RCD	38
3.3.5.1. ESTUDO REALIZADO POR SANTOS <i>ET AL.</i> , 2012.	38
3.3.5.2. ESTUDO REALIZADO POR VIEIRA E PEREIRA, 2015.....	39
3.3.5.3. ESTUDO REALIZADO POR SILVA <i>ET AL.</i> , 2015.....	41
PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
4.1.INTRODUÇÃO	45

4.2. GEOSINTÉTICOS	45
4.3. ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA.....	46
4.3.1. EQUIPAMENTO	46
4.3.2. MATERIAIS UTILIZADOS NA DANIFICAÇÃO MECÂNICA	48
4.4. AVALIAÇÃO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA.....	52
4.4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO	52
4.4.1.1. PROCEDIMENTO	53
4.4.2.2. TRATAMENTO DE DADOS	54
.....	56
4.4.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	57
4.4.3.1. PROCEDIMENTO	57
4.4.3.2. TRATAMENTO DE DADOS.....	58
4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
5.1. INTRODUÇÃO	61
5.2. GEOTÊXTIL TECIDO T80	61
5.2.1. ANÁLISE VISUAL.....	61
5.2.2. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	63
5.2.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	65
5.3. GEOTÊXTIL TECIDO T200	66
5.3.1. ANÁLISE VISUAL.....	66
5.3.2. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	68
5.3.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	70
5.4. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO NT100.....	71
5.4.1. ANÁLISE VISUAL.....	71
5.4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	73
5.4.2. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	75
5.5. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO NT400	76
5.5.1. ANÁLISE VISUAL.....	76
5.5.1. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	78
5.5.2. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	81
5.6. GEOGRELHA	82
5.6.1. ANÁLISE VISUAL.....	82
5.6.1. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	84
5.7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	84

5.7.1. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR VIOLANTE, 2016	86
5.7.2. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR SANTOS <i>ET AL.</i> , 2012.....	88
5.7.3. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR VIEIRA E PEREIRA, 2015.....	88
5.7.4. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR SILVA <i>ET AL.</i> , 2015.....	88
CONCLUSÃO	89
6.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1-Classificação dos geossintéticos (adaptado de Carneiro,2009)	4
Fig.2.2-Tipos de geossintéticos: a)Geotêxteis; b) Geomembrana; b) Geocompósitos.....	4
Fig.2.3- Exemplos de geotêxteis tecidos: a) com tira e monofilamento, b)monofilamento e multifilamento, c)com fitas de P (adaptado de Lopes,1998 e Pinho-Lopes e Lopes, 2010).....	5
.....	5
Fig.2.4- Ligações dos geotêxteis não tecidos: a) mecânica; b) térmica (Pinho-Lopes e Lopes 2010)...	6
Fig.2.5- a) Geogrelha extrudida uniaxial; b) Geogrelha tecida; c) Geogrelha soldada a laser	7
Fig.2.6- Georede	8
Fig.2.7- Geocompósito.....	8
Fig.2.8- Funções desempenhadas pelos geossintéticos de acordo com a NP EN ISO 10318: a) drenagem; b) filtração; c) proteção; d) reforço; e) separação; f) controlo de erosão superficial; g) barreira de fluidos.....	11
Fig.2.9- Principais aplicações dos geossintéticos de acordo com a EN ISO 10318: a) túneis e estruturas subterrâneas, b) canais, c) obras rodoviárias, d) depósitos de resíduos sólidos, e) sistemas de drenagem, f) reservatórios e barragens, g) depósito de resíduos líquidos, h) fundações e estruturas de suporte, i) obras ferroviárias, j) sistemas de controlo de erosão.	14
Fig.3.1- Mecanismo de danificação por punção (Moreira, 2009)	18
Fig.3.2- Mecanismo de degradação por rotura em tensão (Moreira, 2009)	19
Fig.3.3- Mecanismo de degradação por abrasão (Moreira, 2009)	20
Fig.3.3-sequência construtiva a adotar em aplicações de geossintéticos	20
Fig.3.4- Secção dos aterros experimentais de acordo com BS 8006 (Austin, 1998)	22
Fig.3.5- Níveis de compactação (adaptado de Austin, 1998 de acordo com BS 8006).....	22
Fig.3.6- Ensaio Laboratoriais: a) esquema do ensaio de queda de pirâmide; b) esquema do ensaio para simulação de queda de blocos e material rochoso (adaptado d Pinho-Lopes e Lopes, 2010)	23
Fig.3.7- Curvas granulométricas dos materiais granulares (Paula <i>et al.</i> , 2004)	24
Fig.3.8- Resistências à tração residuais, em percentagem, obtidas para os materiais danificados (adaptado de Paula <i>et al.</i> , 2004).....	25
Fig.3.9- Resistências residuais obtidas à tração, punção estático e rasgamento dos materiais danificados (adaptado de Carneiro <i>et al.</i> ,2012).....	26
Fig.3.10- Curvas granulométricas dos solos utilizados na danificação mecânica.....	27
(adaptado de Carlos <i>et al.</i> , 2015).....	27
Fig.3.11- Resistência à tração residual obtida nas diferentes danificações (adaptado de Carlos <i>et al.</i> , 2015).....	28
Fig.3.12- Curvas granulométricas dos solos naturais e corundum (adaptado de Carlos <i>et al.</i> , 2015) .	29
Fig.3.13- Resistência à tração residual dos materiais danificados (adaptado de Violante, 2016)	30
Fig.3.14- Resistência ao punção residual dos materiais danificados (adaptado de Violante, 2016)	30

Fig.3.15- Resíduos de construção e demolição de diferentes granulometrias e constituição (adaptado do site www.rcd.pt)	32
Fig.3.16- Curva granulométrica do RCR reciclado (Santos <i>et al.</i> , 2012).....	39
Fig.3.17- Curva granulométrica do RCD (Vieira e Pereira, 2015)	40
Fig.3.18- valores residuais dos parâmetros obtidos no ensaio de tração (Vieira e Pereira, 2015)	41
Fig.3.19- Caixa de madeira utilizada no estudo de Silva <i>et al</i> (2015)	42
Fig.3.20- Curvas granulométricas das cinco amostras de RCD reciclado utilizadas (Silva <i>et al.</i> , 2015)	42
Fig.4.1- Diagrama do procedimento experimental	45
Fig.4.2-Equipamento de danificação mecânica: a) Vista geral do equipamento de ensaio de danificação mecânica; b) Caixa metálica de danificação, c) Esquema representativo do equipamento, adaptado de Violante,2016.	47
Fig.4.3- Faseamento da preparação do ensaio de danificação mecânica: a) enchimento da primeira metade da caixa inferior, b) placa metálica posicionada para a primeira compactação do processo, c) segunda fase de enchimento da caixa inferior, d) posicionamento do provete e da caixa superior, e) enchimento da caixa superior.	48
Fig.4.4- Materiais utilizados na danificação mecânica: a) RCD fino, b) RCD cerâmico, c) RCD de betão, d) cinzas, e) <i>corundum</i>	49
Fig.4.5- Massas de amostra a ensaiar, adaptado da NP EN 933-1.....	50
Fig.4.6- Séries de peneiros e respetivas aberturas	50
Fig.4.7- Curvas granulométricas dos RCD, cinzas e corundum.	51
Fig.4.8- Ensaio de tração: a) geotêxtil NT110, com recurso a vídeo-extensómetro; b) geotêxtil T200, sem vídeo-extensómetro	53
Fig.4.9- Provetes do ensaio de tração: a) exemplo de colagem do geotêxtil T80, b) provete de NT400.	54
Fig.4.10- Curvas força-extensão dos cinco provetes de geotêxtil NT400 e respetiva curva média	56
Fig.4.11- Ensaio de punçoamento estático: a) provete de NT400; b) exemplo de colagem dos provetes de T200, c) ensaio de punçoamento a decorrer.	58
Fig.4.12- Curvas força-deslocamento dos 5 provetes intactos do geotêxtil NT400 no ensaio de punçoamento estático	59
Fig.5.1- Geotêxtil T80: a) intacto; b) danificado com RCD fino; c) danificado com RCD cerâmico;	62
d) danificado com RCD de betão; e) danificado com cinzas; f) danificado com <i>corundum</i>	62
Fig.5.2 - Curvas médias força-extensão obtidas para a o geotêxtil T80, antes e após a danificação mecânica	64
Fig.5.3-Curvas médias força-deslocamento obtidas para os ensaios de punçoamento do geotêxtil T80	66
Fig.5.4- Geotêxtil T200: a) intacto; b) danificado com RCD fino; c) danificado com RCD cerâmico; ...	67
d) danificado com RCD de betão; e) danificado com cinzas; f) danificado com <i>corundum</i>	67
Fig.5.5- Curvas médias tração-extensão obtidas para o ensaio de tração do geotêxtil T200	69

Fig.5.6- Curvas médias força-deslocamento obtidas para o ensaio de punçoamento do geotêxtil T200	71
Fig.5.7- Geotêxtil NT100: a) intacto; b) danificado com RCD fino; c) danificado com RCD cerâmico; d) danificado com RCD de betão; e) danificado com cinzas; f) danificado com <i>corundum</i>	72
Fig.5.8- Curvas médias obtidas nos ensaio de tração do geotêxtil NT100	74
Fig.5.9-Curvas médias força-deslocamento obtidas nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil NT100	76
Fig.5.10- Geotêxtil NT400: a) intactos; b) danificados com RCD fino; c) danificados com RCD cerâmico; d) danificados com RCD de betão; e) danificados com cinzas; f) danificados com <i>corundum</i>	78
Fig.5.11-Curvas médias tração-extensão obtidas no ensaio de tração para o geotêxtil NT400	80
Fig.5.12- Curvas médias força-deslocamento obtidas no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil NT400	82
Fig.5.13- Geogrelha: a) intacta b) danificada com RCD fino; c) danificada com RCD cerâmico; d) danificada com RCD de betão; e) danificada com cinzas; f) danificada com <i>corundum</i>	83
Fig.5.14- Resistência à tração dos geossintéticos após os ensaios de danificação mecânica	85
Fig.5.15- Resistência ao punçoamento residual após ensaios de danificação mecânica	85
Fig.5.16 – Resistência à tração residual dos geotêxteis T80 e T200 e da geogrelha.	87
Fig.5.17. Resistência ao punçoamento residual dos geotêxteis T80 e T200.	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1-Fatores que influenciam a danificação durante a instalação (adaptado de Austin,1998). .	16
Tabela 3.2- Danos provocados pela instalação	17
Tabela 3.3- características dos geossintéticos antes da danificação mecânica	24
(adaptado de Paula, et al., 2004)	24
Tabela 3.4- Materiais granulares (adaptado de Paula et al., 2004)	24
Tabela 3.5- Características dos geotêxteis intactos (adaptado de Carneiro et al., 2012)	26
Tabela 3.6- Características dos geotêxteis intactos (adaptado de Carlos et al., 2015)	27
Tabela 3.7- características dos geossintéticos estudados quando intactos (adaptado de Violante, 2016)	29
Tabela 3.8- Percentagem de resíduos produzidos na UE consoante o tipo de obra (Rocha, 2016) ...	31
Tabela 3.9- Capítulo 17 da LER (portaria 209/2004, 2004))	33
Tabela 3.10- Classificações dos RCD, adaptado de Pereira e Vieira (2013)	34
Tabela 3.11- legislação relativa a Resíduos de construção e demolição em Portugal	37
Tabela 3.12- Especificações do LNEC referentes à aplicação de resíduos de construção e demolição	38
Tabela 3.13- Características dos materiais intactos (adaptado de Santos et al., 2012)	39
Tabela 3.14- Resultados obtidos em cada tipo de compactação (adaptado de Santos et al., 2012)... ..	39
Tabela 3.15- Propriedades dos geossintéticos para as amostras intactas (adaptado de Vieira e Pereira, 2015)	40
Tabela 3.16- valores médios obtidos no ensaio de tração (adaptado de Vieira e Pereira, 2015)	40
Tabela 3.17- Características do material intacto (adaptado de Silva et al., 2015)	42
Tabela 3.18- resultados do ensaio de tração (adaptado de Silva et al., 2015)	43
Tabela 4.1- Principais características dos geossintéticos	46
Tabela 4.2- Inspeção visual dos solos de resíduos reciclados	49
Tabela 4.3- Características dos RCD e corundum, adaptado de Carlos <i>et al.</i> (2015)	52
Tabela 4.4 -Características granulométricas do RCD fino (Vieira <i>et al.</i> , 2016)	52
Tabela 4.5- Resultados obtidos no ensaio de tração do geotêxtil NT400 (amostra de referência)	55
Tabela 4.6- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil NT400	56
Tabela 4.7 Resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil NT400 (amostra de referência)	58
Tabela 5.1- Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil T80 (amostras intacta e danificadas)	63
Tabela 5.2- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil T80, antes e após a danificação mecânica	64
Tabela 5.3- Valores obtidos nos ensaios de punçoamento do geotêxtil T80 (amostras intactas e danificadas)	65

Tabela 5.4- Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil T200 (amostras intactas e danificadas)	68
Tabela 5.5- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil T200, antes e após a danificação mecânica	69
Tabela 5.6- Valores obtidos nos ensaios de punçoamento do geotêxtil T200 (amostras intactas e danificadas)	70
Tabela 5.7- Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil NT100 (amostras intactas e danificadas)	73
Tabela 5.8- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil NT100, antes e após a danificação mecânica	74
Tabela 5.9- Valores obtidos nos ensaios de punçoamento do geotêxtil NT100 (amostras intactas e danificadas)	75
Tabela 5.10- Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil NT400 (amostras intactas e danificadas)	78
Tabela 5.11- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil NT400, antes e após a danificação mecânica	80
Tabela 5.12- Valores obtidos nos ensaios de punçoamento do geotêxtil NT400 (amostras intactas e danificadas)	81
Tabela 5.13- Valores obtidos nos ensaios de tração da geogrelha (amostras intactas e danificadas)	84

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os geossintéticos e os resíduos provenientes do sector da construção são produtos que ocupam um papel cada vez mais relevante em obras de engenharia civil. Os geossintéticos são materiais com uma grande variedade de aplicações nas mais diversas estruturas, são de fácil aplicação, custo reduzido, evitam o recurso a materiais naturais e permitem a utilização na construção de solos com características consideradas indesejáveis.

Desde o início da aplicação de geossintéticos houve a preocupação de desenvolver estudos de modo a garantir que estes materiais funcionem, nas várias aplicações e funções que estes podem desempenhar, durante todo o tempo de vida útil da estrutura em que estão inseridos. Com as necessidades não só técnicas, mas também económicas e ambientais de reutilizar materiais de construção, vão surgindo aplicações para o uso de geossintéticos aliado ao uso de resíduos de construção e demolição.

Os resíduos de construção e demolição são gerados em grandes quantidades durante todo o processo construtivo, manutenção e, principalmente, na demolição de edifícios. A grande quantidade associada à sua produção resulta da inevitável geração de resíduos no decorrer deste processo.

Neste trabalho pretendeu-se avaliar a danificação mecânica (induzida nos processos de instalação e construção) provocada por resíduos em geossintéticos. Os processos de instalação e construção podem induzir danos graves nos diferentes tipos de geossintéticos, reproduzindo-se em variações muito acentuadas das suas propriedades mecânicas que podem comprometer o desempenho da estrutura onde estes estão inseridos.

Numa primeira fase procedeu-se à caracterização das propriedades dos geossintéticos e dos resíduos seleccionados para o estudo. Os geossintéticos utilizados foram dois geotêxteis tecidos, dois geotêxteis não-tecidos e uma geogrelha tecida. Utilizaram-se ainda, como materiais de danificação quatro resíduos seleccionados: um maioritariamente constituído por material fino (RCD fino), um constituído por cerâmicos na sua generalidade (RCD cerâmico, um por betão e agregados de betão (RCD de betão) e o último constituído por restos de inceneração (cinzas). Para além destes, foi também usado o agregado sintético normalizado (corundum) definido na norma EN ISO 10722:2007.

O programa experimental consistiu na simulação dos processos de instalação e construção e avaliação dos danos provocados pela mesma. Assim, realizou-se o ensaio de danificação mecânica, na maior parte das vezes adaptado da norma EN ISO 10722:2007 (uma vez que para além do solo especificado se utilizaram resíduos), ensaios de tração (NP EN ISO 10319:2005) e ensaios de punção estático (NP EN ISO 12236:2008), de todos os geossintéticos referidos (danificados e intactos). Por fim, e de modo

a avaliar as propriedades de tração e de punçoamento de cada geossintético, compararam-se os resultados obtidos para cada caso de danificação com os respetivos resultados das amostras intactas.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação foi avaliar a danificação mecânica de vários geossintéticos produzida por materiais de aterro constituídos por resíduos reciclados. Pelo facto dos resíduos ainda não serem socialmente aceites como materiais de construção utilizados frequentemente na construção civil, pretende-se contribuir para o aumento da confiança neste tipo de resíduos, de modo a que possam ser inseridos, neste caso como material de aterro, sem que comprometam o desempenho dos geossintéticos e da estrutura em que ambos estão inseridos.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.

A presente dissertação baseia-se na avaliação laboratorial das danificações provocadas nos geossintéticos por resíduos e encontra-se dividida em seis capítulos, sendo que o presente capítulo é referente a uma breve introdução ao tema.

No segundo capítulo é feita uma introdução aos geossintéticos. Descrevem-se os vários tipos de geossintéticos existentes e os respetivos processos de fabrico, assim como as principais propriedades, funções e aplicações que estes desempenham.

O terceiro capítulo tem como foco a danificação mecânica e os resíduos de construção e demolição. Inclui os tipos de danos causados pelo processo de instalação, fatores que influenciam a danificação mecânica, formas de minimizar esta danificação e métodos de simulação deste fenómeno. Classificam-se ainda os resíduos de construção e demolição por inspeção visual quanto aos seus constituintes, a reciclagem e legislação em vigor associada aos mesmos. Esse capítulo inclui ainda um apanhado de estudos desenvolvidos nestas áreas.

No quarto capítulo, caracterizam-se os geossintéticos, bem como os resíduos utilizados no ensaio de danificação mecânica. Descrevem-se, ainda, as metodologias dos ensaios de danificação mecânica, de tração e de punçoamento estático.

O capítulo cinco destinou-se à discussão dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Os resultados são também comparados com resultados obtidos por outros autores.

Por fim, o capítulo seis destina-se às principais conclusões do trabalho efetuado e possíveis desenvolvimentos futuros.

2

GEOSSINTÉTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

Os geossintéticos têm 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), apesar da primeira referência a telas datar 1926 (reforço de pavimentos de estradas nos Estados Unidos da América) (Moreira, 2009).

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 (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A rápida evolução e aumento da utilização destes materiais derivam de algumas vantagens identificadas por Giroud (1986). Aos empreiteiros agrada e interessa o facto de tornarem as construções mais rápidas, menos influenciadas pelas condições meteorológicas, numa diminuição do volume de terras movimentado e na possibilidade de utilização de solos com pior qualidade, enquanto que os projetistas apreciam a uniformidade dos materiais, a sua fácil colocação e a capacidade que estes têm de mitigar defeitos pontuais do solo. Já os donos de obra, perspetivam que a obtenção de menores custos de construção e manutenção são o fator mais importante na utilização de geossintéticos (Jewell, 1996).

Em Portugal os geossintéticos começaram a ser aplicados regularmente na década de 80, principalmente em obras hidráulicas e viárias. No entanto, é a partir de meados da década de 90, associado à construção da rede de aterros de resíduos municipais nacionais, que é dado o grande impulso, quer na aplicação, quer na procura de conhecimentos acerca dos geossintéticos. O interesse crescente acerca destes materiais em Portugal levou à criação em 1999 do Organismo de Normalização Setorial Português dos ensaios de geossintéticos e, em 2002, à criação da Comissão Portuguesa de Geossintéticos (IGS-Portugal) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

O presente capítulo pretende introduzir de forma geral o tema dos geossintéticos relativamente à sua classificação, principais propriedades e mecanismos de degradação e ainda funções e aplicação dos mesmos.

2.2. CLASSIFICAÇÃO

Os geossintéticos são genericamente obtidos a partir de polímeros sintéticos que se colocam à superfície ou no interior de obras, podendo desenvolver vários tipos de funções. Embora as propriedades destes materiais sejam influenciadas pelo tipo de polímero constituinte, a sua classificação baseia-se essencialmente nas diferenças estruturais, que se desenvolvem a partir dos diferentes tipos de fabrico.

Os geossintéticos devem ser divididos em três grupos, geomembranas, geotêxteis e produtos relacionados, como podemos ver de uma forma mais simplificada nas figuras 2.1 e 2.2. Uma vez que os geotêxteis e as geogrelhas são materiais utilizados na parte experimental desta dissertação, são abordados de forma mais detalhada.

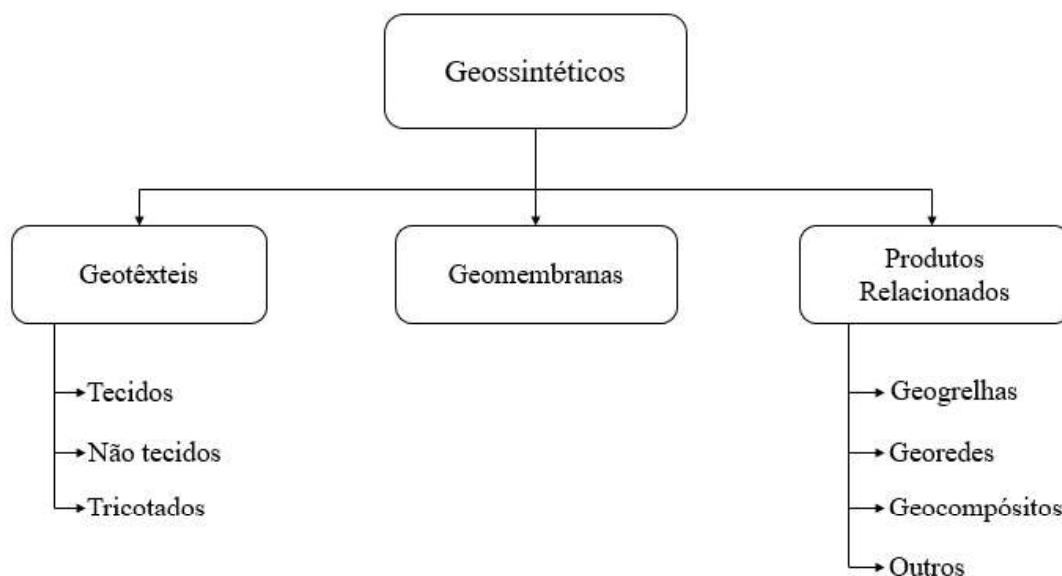


Fig.2.1-Classificação dos geossintéticos (adaptado de Carneiro,2009)

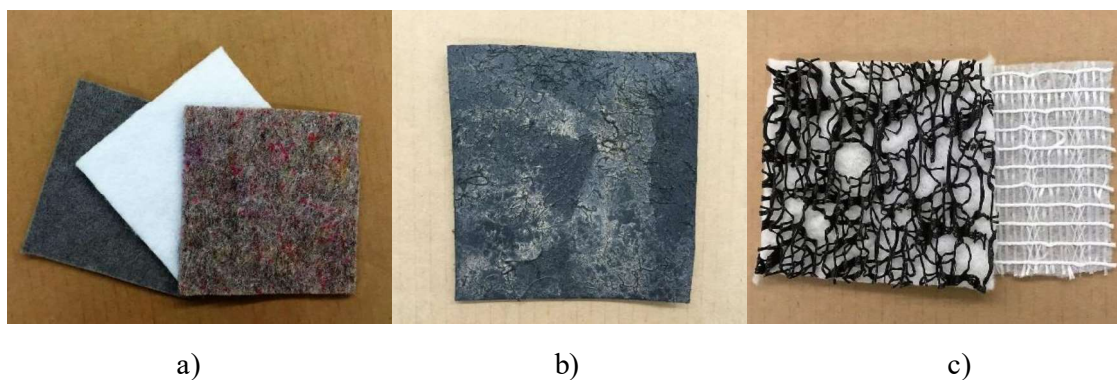


Fig.2.2-Tipos de geossintéticos: a)Geotêxteis; b) Geomembrana; b) Geocompósitos .

2.2.1. GEOTÊXTEIS

Normalmente em forma de manta flexível, os geotêxteis podem ser classificados, dependendo do tipo de fabrico, em tecidos, não-tecidos e tricotados.

Os geotêxteis tecidos são produzidos através de processos convencionais de tecelagem, através de teares mecânicos. Em termos de aspeto, apresentam fios perpendiculares e entrelaçados, de modo a formar uma malha. Os componentes mais utilizados são as fitas, fios, multifilamentos ou monofilamentos, de modo a formar uma estrutura plana e distribuição de poros regular. Existem vários tipos de malhas,

embora a mais comum seja a malha simples. Os mais comuns são os manufaturados a partir de fitas de polipropileno (PP), monofilamento em poliéster (PE), e de multifilamentos de polietileno (PET). A figura 2.3 mostra microscopicamente, exemplos de geotêxteis tecidos.

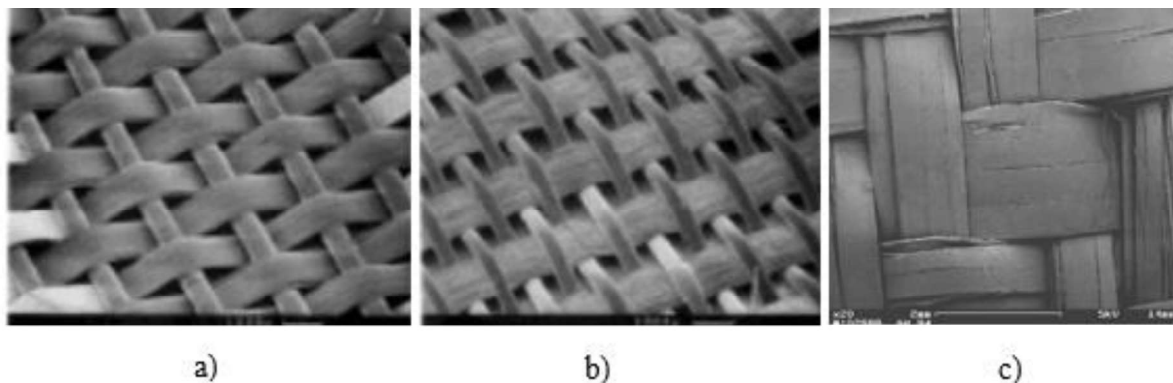


Fig.2.3- Exemplos de geotêxteis tecidos: a) com tira e monofilamento, b) monofilamento e multifilamento, c) com fitas de P (adaptado de Lopes, 1998 e Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Os geotêxteis não-tecidos são geralmente constituídos por monofilamentos contínuos e a sua manufatura consiste na deposição contínua das fibras ou filamentos num tapete, de modo a formar uma malha que é posteriormente ligada através de ligação mecânica, térmica ou química.

Na ligação mecânica, mais conhecida por agulhagem, a malha passa através de milhares de agulhas e farpas que se movimentam continuamente. As farpas penetram a malha e arrastam alguns dos seus componentes em simultâneo, entrelaçando-os. Os geotêxteis resultantes deste tipo de ligação designam-se de geotêxteis não-tecidos agulhados. A figura 2.4a) mostra um exemplo de um não tecido.

A ligação térmica é conseguida através do aquecimento da malha, por calandragem a temperaturas elevadas, aquecendo apenas determinados pontos a ligar, ou por fusão dos pontos de contacto entre dois tipos de polímeros. Os geotêxteis obtidos a partir deste processo de fabrico são designados de não-tecidos termicamente ligados ou termossoldados, e possuem geralmente espessuras entre 0,5 e 1 mm (Fig.2.4.b) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010)

A ligação química é executada com recurso a colas, resinas ou derivados das anteriores. Após a aplicação deste elemento o geotêxtil passa por um período de cura ou calandragem, das quais resultam as ligações entre os constituintes. Muitas vezes este tipo de ligação complementa uma ligação por agulhagem. Deste processo resultam os geotêxteis não-tecidos ligados quimicamente e as suas espessuras variam normalmente entre 0,5 e 3 mm (Pinho-Lopes e Lopes, 2010)



Fig.2.4- Ligações dos geotêxteis não tecidos: a) mecânica; b) térmica (Pinho-Lopes e Lopes 2010).

Os geotêxteis tricotados são manufacturados por entrelaçagem de fios de modo a constituírem uma estrutura plana. Estes materiais não são tão utilizados como os geotêxteis anteriores, pois são bastante deformáveis quando sujeitos a cargas, sendo que a solução para este problema passa pela introdução de fios de elevada resistência e deformações reduzidas na direcção longitudinal. Aos geotêxteis obtidos através deste processo de fabrico atribui-se a designação de tricotados simples (Pinho-Lopes, 2004).

2.2.2. GEOMEMBRANAS

As geomembranas são membranas contínuas com baixa permeabilidade. Atualmente apelidadas de barreiras geossintéticas poliméricas, podem ser fabricadas por extrusão, espalhamento superficial ou calandragem.

O processo de extrusão baseia-se na extrusão do polímero fundido e dos aditivos adequados, produzir uma folha não reforçada. A espessura deste tipo de geomembrana varia entre 0,13 e 5,10 mm e a largura das folhas pode variar entre 0,90 a 5,20 m. Podem obter-se ainda geomembranas reforçadas, se logo após a extrusão cobrirmos com um geotêxtil a membrana ainda quente (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A calandragem é a passagem do material por cilindros aquecidos com rotação contrária. Este processo pode preceder um processo de extrusão, se se quiserem fabricar geomembranas multicamadas. Caso se queira reforçar a geomembrana, basta colocar um geotêxtil entre as duas camadas de polímero.

O espalhamento superficial consiste em espalhar um polímero sobre um geotêxtil, revestindo-o. Este processo normalmente dá origem a geomembranas reforçadas. Para produzir geomembranas não reforçadas, efectua-se o espalhamento sobre uma folha de papel (por exemplo), em que no fim da operação, a folha é retirada.

É ainda possível distinguir dois tipos de geomembranas, lisas ou texturadas. As primeiras de superfície lisa e as segundas pelo facto de conterem saliências, que conduzem a um aumento do atrito na interface com outros materiais.

Por último, as geogrelhas soldadas a laser, surgiram mais recentemente e são fabricadas com recurso às barras, cujas uniões são realizadas por fusão a laser (Fig.2.4c).

2.2.3. GEOGRELHAS

As geogrelhas são malhas abertas constituídas por estruturas poliméricas planas formadas por elementos sólidos, com tamanho geralmente inferior ao das aberturas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010). Dependendo do tipo de fabrico que lhes está associado podem ser designadas de: extrudidas, tecidas ou soldadas a laser.

As geogrelhas extrudidas são constituídas por folhas de polímero e envolvem duas ou três fases de produção. A primeira consiste em introduzir a folha numa máquina de perfuração, da qual resultam as aberturas regulares da folha. Em seguida a mesma é aquecida e estirada na direção de fabrico, que leva ao alongamento das aberturas, culminando num aumento de resistência à tração e rigidez da grelha na direção em causa. Estas são designadas por geogrelhas extrudidas uniaxiais (Fig.2.5a).

A terceira fase de produção (nem sempre realizada), consiste na repetição do processo de aquecimento e estiramento, mas desta vez na direção transversal. As geogrelhas resultantes designam-se por extrudidas biaxiais (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

As geogrelhas tecidas resultam da manufatura com recurso a equipamentos da indústria têxtil, e consiste na união de centenas de fibras de modo a obter barras longitudinais e transversais, separadas por grandes aberturas. No cruzamento, estas barras são unidas por tricotagem ou entrelaçagem. Todo o conjunto é posteriormente revestido (com latex, betuminoso, ou outros) de modo a conferir ao material estabilidade dimensional e proteção às barras durante a instalação da geogrelhas na obra (Fig.2.5b).

Como alternativa ao processo de tricotagem ou entrelaçagem, pode recorrer-se a ligações térmicas e, neste caso a ligação é realizada por fusão dos pontos de cruzamento das barras. Estas são geralmente constituídas por fibras PET unidas e envolvidas em folha de PP (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Por último e mais recente, as geogrelhas soldadas a laser que são fabricadas com recurso a barras de PET ou PP, cujas uniões são realizadas por fusão a laser (Fig.2.5c) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

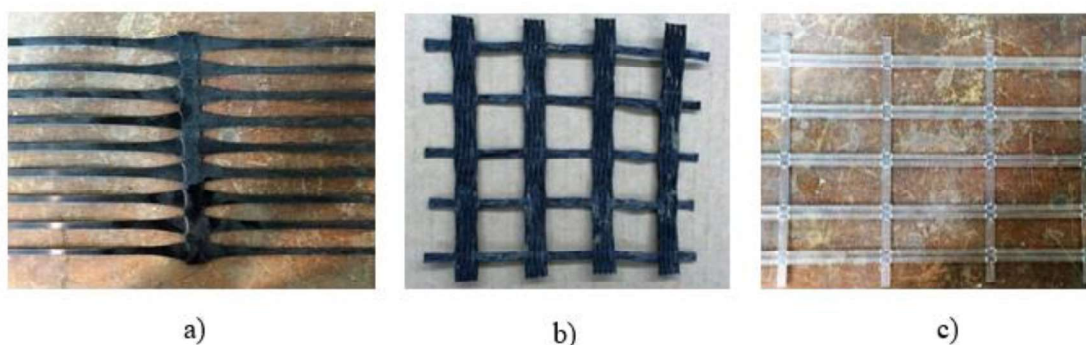


Fig.2.5- a) Geogrelha extrudida uniaxial; b) Geogrelha tecida; c) Geogrelha soldada a laser

2.2.4. GEOREDES

As georredes são materiais poliméricos planos, com malha regular, manufaturadas por extrusão do polímero fundido, através das aberturas existentes nos moldes rotativos, dando deste modo origem a malhas ou redes de barras apertadas. Estas passam posteriormente, por moldes cónicos aquecidos e arrefecidos, para atingir a sua configuração final. Normalmente, as barras que as constituem formam ângulos de 60° a 75° entre si (Fig.2.6) e as suas uniões (Shukla, 2002). Segundo Koerner (1998), as georredes podiam ser incluídas no grupo das geogrelhas, mas apenas devido à sua estrutura. A razão para que isso não aconteça tem a ver com a função que desempenham (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).



Fig.2.6- Georede

2.2.5. GEOCOMPÓSITOS

Os geocompósitos são associações de diferentes materiais com pelo menos um geossintético (Fig.2.7). A classificação dos geocompósitos varia consoante a função que estes vão desempenhar. De entre os geocompósitos mais comuns destacam-se os geocompósitos betoníticos, geocompósitos de drenagem e geocompósitos de reforço.

As vantagens destes materiais, é que podem combinar-se as melhores características de diferentes elementos, de modo a resolverem problemas específicos e cumprirem funções específicas. Para além das combinações de diferentes geossintéticos podem existir combinações de geossintético com outro tipo de materiais, como por exemplo fibras, aço, entre outros. Podem fazer-se ilimitadas combinações de elementos, o que muitas vezes tem vantagens a nível económico e de desempenho (Carvalho 2014).

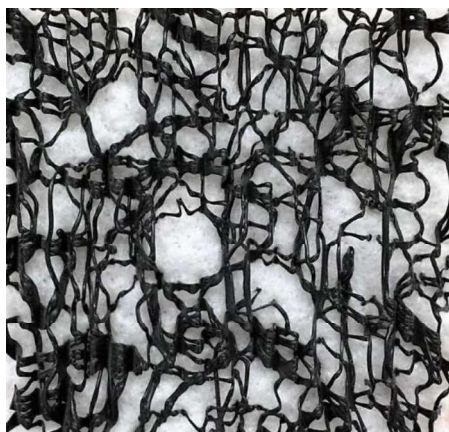


Fig.2.7- Geocompósito

2.3.PRINCIPAIS PROPRIEDADES

Os principais fatores que influenciam as propriedades dos geossintéticos são o processo de fabrico e o polímero constituinte. Para que um geossintético cumpra de modo eficaz a sua função ao longo do tempo de vida útil da obra, sobrevivendo a processos de armazenamento, manuseamento e aplicação na obra, é necessário que este possua algumas propriedades. As propriedades dos geossintéticos podem ser divididas em físicas, hidráulicas, mecânicas e as relativas à durabilidade dos mesmos.

2.3.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As principais propriedades físicas mais importantes dos geossintéticos são a massa por unidade de área, a espessura, a densidade relativa dos polímeros e a dimensão e distribuição das aberturas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A densidade relativa dos polímeros constituintes é definida como a razão entre o peso volúmico dos elementos e o peso volúmico da água a 4°C. Como é um indicador do tipo de polímero e permite saber se o geossintético flutua (importante para algumas aplicações), esta propriedade pode ser utilizada para identificação e controlo de qualidade.

A massa por unidade de área é expressa em g/m^2 e, consiste em avaliar a massa de provetes de geossintético de área conhecida, sendo realizada para todo o tipo de geossintéticos. Esta propriedade pode ser relacionada com as propriedades mecânicas dos geossintéticos e pode ser indicador da homogeneidade do mesmo (Ferreira, 2010).

A espessura é a distância entre as superfícies superior e inferior do geossintético a uma dada pressão, expressa em mm. As relações entre a espessura e a pressão permitem avaliar a compressibilidade do geossintético (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A distribuição e dimensão das aberturas variam com o tipo de geossintético, e influencia inevitavelmente as propriedades hidráulicas do material. Alguns materiais possuem aberturas de tamanho uniforme, sendo apenas necessário medi-lo para se caracterizar este parâmetro, como são exemplo as geogrelhas, contudo existem geossintéticos que possuem aberturas num intervalo de tamanhos, dos quais são exemplos os geotêxteis tecidos e não tecidos.

2.3.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são as características mais importantes dos geossintéticos, principalmente quando estes exercem função de reforço.

Durante o período de vida da obra, os geossintéticos estão sujeitos a solicitações mecânicas, como por exemplo esforços de tração ou compressão, punçoamento e rasgamento. Estas solicitações podem atuar no material de forma dinâmica ou estática. Em geral as primeiras estão associadas à colocação do geossintético na obra, e as segundas ao seu período de utilização.

O comportamento à tração depende de vários fatores, dos quais o tipo de polímero constituinte, a estrutura, processo de fabrico e do tipo de ligação. A resposta do geossintético quando sujeito a este tipo de esforços é caracterizada por uma curva que relaciona a força por unidade de largura com a extensão. A partir destas curvas é possível obter a resistência à tração (força máxima por unidade de largura), a extensão na força máxima e o módulo de rigidez (razão entre a força por unidade de largura e a correspondente extensão). É de notar que os geotêxteis tecidos apresentam valores mais baixos de extensão ou seja, rigidez mais elevada (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A resistência ao punçoamento está associada à função de separação e permite avaliar o comportamento dos geossintéticos quando solicitados pelas partículas dos solos a separar. A solicitação pode ser concentrada, estática ou dinâmica.

Quando aplicados em obra e mesmo durante a colocação, os geossintéticos estão sujeitos a ações concentradas, mais conhecidas e vulgarmente apelidadas de ações de punçoamento. Estas ações, podem provocar descontinuidades, perfurações (golpes), punçoamento (efeito de compressão) ou rebentamento do geossintético. Consoante o mecanismo que lhe está associado, a resistência ao punçoamento pode ser um comprimento, uma força ou uma pressão.

Define-se rasgamento a rotura progressiva resultante de duas ações simultâneas, perfuração (concentrada) e tração (distribuída). Durante a instalação, os geossintéticos estão sujeitos a tensões de rasgamento tornando assim importante avaliar a sua resistência a este fenómeno (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

2.3.3. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

As propriedades hidráulicas mais importantes dos geossintéticos são a permeabilidade à água no plano (transmissividade) e a permeabilidade à água normal ao plano (permissividade).

A transmissividade é o produto entre a condutividade hidráulica no plano e a espessura. Permite caracterizar a capacidade de um geossintético permitir o escoamento de fluídos no próprio plano, tornando-se deste modo um parâmetro importante quando o geossintético desempenha a função de drenagem. Depende da espessura e da distribuição e dimensão das aberturas do geossintético (Ferreira, 2010).

A permeabilidade normal ao plano depende da distribuição e dimensão das aberturas, e é uma propriedade importante para funções de filtragem. Avalia o fluxo de água que atravessa o geossintético, perpendicularmente ao seu plano (Ferreira, 2010).

2.3.4. PROPRIEDADES RELATIVAS À DURABILIDADE

A durabilidade de um geossintético pode ser interpretada como a capacidade que o material tem em manter as propriedades que lhe são exigidas, ao longo de toda a sua vida útil. Podemos fazer uma distinção das propriedades relativas à durabilidade em dois tipos (Koerner, 1998). O primeiro que incorpora as propriedades que contribuem para a resistência durante o tempo de vida útil, e o segundo referente à resistência à degradação dos geossintéticos.

As propriedades relativas à resistência do geossintético durante o tempo de vida da obra, mais importantes de avaliar são a fluência e rotura em fluência, abrasão, relaxação de tensões, fluência em compressão e a danificação durante a instalação. Relativamente à resistência à degradação dos geossintéticos ou aos agentes de degradação, as propriedades mais relevantes a avaliar são a degradação fotoquímica, degradação térmica, degradação química e degradação biológica (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

No presente capítulo, não vamos aprofundar estas propriedades uma vez que não são relevantes em termos de objetivos e tema desta dissertação, à exceção da danificação durante a instalação. Desta última é feita uma abordagem no capítulo seguinte.

2.4. FUNÇÕES

A utilização dos geossintéticos em obras de engenharia civil tem sido cada vez maior, quer como substitutos de outros materiais, quer como reforço de materiais naturais. A grande variedade de produtos existentes está associada ainda a uma grande versatilidade na sua aplicação, dado que estes se adaptam a diferentes situações.

Numa determinada aplicação, um geossintético pode desempenhar várias funções. Apenas com a identificação destas funções e com a sua hierarquização, podemos definir as características que o material a utilizar deve ter, de modo a desempenhar adequadamente as suas funções. Cada função especifica a ação que cada material deve desempenhar, para que sejam cumpridos os objetivos da sua aplicação.

A norma NP EN ISO 10318, destaca sete funções principais que os geossintéticos devem desempenhar, drenagem, filtragem, proteção, reforço, separação, controlo de erosão superficial e barreira de fluidos (Fig.2.8).

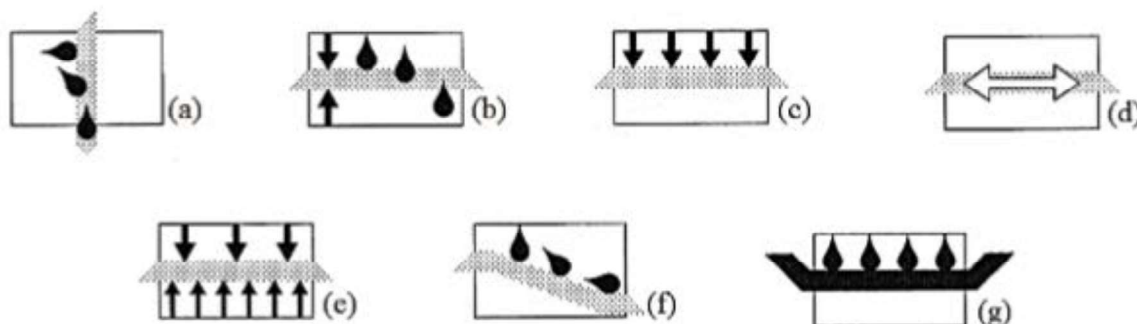


Fig.2.8- Funções desempenhadas pelos geossintéticos de acordo com a NP EN ISO 10318: a) drenagem; b) filtragem; c) proteção; d) reforço; e) separação; f) controlo de erosão superficial; g) barreira de fluidos.

2.4.1. DRENAGEM

A função de drenagem consiste na passagem de águas pluviais, freáticas e outros fluidos como lixiviados, ao longo do plano do geossintético. Deve ter-se em conta que o comportamento do dreno tem de ser adequado à função e ao tempo de vida útil da obra, devendo deste modo ter a espessura, compressibilidade e dimensão de aberturas adequadas. A dimensão das aberturas do dreno deve impedir a passagem das partículas sólidas sem que haja colmatção ou blocagem (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

As propriedades que mais influenciam o eficaz funcionamento de um geossintético drenante são a transmissividade, permeabilidade normal e distribuição e tamanho de aberturas do material (Ferreira, 2010).

São aplicados geossintéticos com função de drenagem em sistemas de drenagem de pavimentos, sistema de revestimento de túneis, núcleos de geocompósitos de drenagem de muros de suporte, para alívio de pressões de água em estruturas enterradas, recolha de lixiviados em aterros de resíduos, entre outras aplicações.

2.4.2. FILTRAGEM

A filtragem consiste na passagem de fluidos na direção perpendicular ao plano do geossintético, retendo a montante as partículas sólidas. A função de filtragem pode ser desempenhada por geossintéticos evitando o arrastamento de partículas em suspensão em fluidos percolantes, ou no interior de maciços terrosos, permitindo a passagem da água e impedindo a passagem das partículas sólidas. Esta função é uma das mais importantes dado que os geossintéticos, quando bem dimensionados e instalados, podem ser uma alternativa prática para muitos problemas que envolvam o fluxo de fluidos.

Os geossintéticos devem apresentar aberturas adequadas e flexibilidade necessária a garantir um bom ajuste à superfície do maciço. Em termos de fluxo, a longo prazo, a compatibilidade solo-geossintético é muito importante, para que não ocorra colmatção.

Aplicam-se frequentemente a envolver valas drenantes de areia, proteção contra a erosão, barragens de terra e enrocamento, entre muitas outras aplicações possíveis (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

2.4.3. PROTEÇÃO

A função de proteção consiste em evitar ou eliminar a danificação local de um determinado elemento ou material através da utilização de um geotêxtil ou produto relacionado e pode ser feita de duas maneiras distintas. O geossintético pode ser colocado entre dois materiais, com o objetivo de evitar ou reduzir a danificação local do material a ser protegido, absorvendo e distribuindo as tensões e deformações a que o mesmo está ou esteve sujeito. E pode ainda ser colocado sobre o material a proteger, com o intuito de evitar que os agentes atmosféricos ou do tráfego provoquem erosão no mesmo.

Quando os geossintéticos desempenham a função de proteção para além das propriedades mecânicas adequadas, é necessário garantir espessura adequada e continuidade do material.

Uma aplicação frequente de geossintéticos com esta função é colocação de geotêxteis sobre as geomembranas para proteção das mesmas, em aterros de resíduos (Ferreira, 2010).

2.4.4. REFORÇO

A função de reforço é a utilização do comportamento carga-extensão de um geossintético para melhorar as propriedades mecânicas do solo ou de outro material de construção, proporcionando uma resistência ao corte superior à disponível na ausência do reforço. Os geossintéticos são materiais que resistem a esforços de tração, logo podem ser utilizados para complementar materiais que não possuem essa capacidade (Ferreira, 2010).

Esta função pode ser exercida de duas formas. Quando os geossintéticos exercem ação mecânica de membrana, ou seja, quando são colocados entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes e a sua pressão equilibra a diferença de pressões entre as mesmas, conduzindo ao reforço global. A segunda maneira de fazer cumprir esta função, é através da colocação do material de reforço no interior de maciços para suportar tensões de tração, uma vez que estes não tem capacidade de resistir a esforços deste tipo.

Quando os geossintéticos exercem esta função, as suas propriedades mecânicas são muito importantes, bem como a sua evolução no tempo. A resistência das interfaces solo-reforço também é uma propriedade importante e deve ser adequada, uma vez que é através das interfaces solo-reforço que se desenvolvem as interações necessárias ao funcionamento da estrutura reforçada (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Alguns casos típicos desta aplicação são por exemplo geotêxteis colocados sobre fendas de modo a suportarem geomembranas não reforçadas, geossintéticos em taludes de aterro e na base de aterros sobre solos moles.

2.4.5. SEPARAÇÃO

A separação é a capacidade do geossintético não permitir que solos e/ou materiais de aterro adjacentes com granulometrias diferentes se misturem sob a ação das cargas aplicadas, permitindo a manutenção da integridade dos dois materiais.

Para exercer esta função corretamente, os geossintéticos necessitam de características mecânicas e hidráulicas adequadas, sendo então a resistência à tração, resistência ao punçoamento e rasgamento e permeabilidade aos fluidos as propriedades mais importantes.

Alguns exemplos de geossintéticos a desempenhar a função de separação são, por exemplo a colocação de geotêxtil entre duas camadas distintas de uma estrada não pavimentada, entre o balastro de uma via-férrea e o solo de fundação e na base de um pavimento férreo.

2.4.6. CONTROLO DE EROSÃO SUPERFICIAL

Esta função está destinada a evitar ou eliminar os movimentos do solo ou outras partículas na superfície de um terreno. Para cumprir esta função podem ser usadas geomantas, geocélulas ou geotêxteis.

Os geossintéticos são colocados sobre a superfície do terreno, protegendo-a da ação de agentes atmosféricos e/ou de tráfego ou da ação erosiva da água, nos casos da superficial. Este tipo de aplicação pode ser de carácter provisório ou permanente. Provisoriamente no caso de se utilizar, por exemplo, um geotêxtil biodegradável, pois estes visam proteger temporariamente uma estrutura de erosão superficial e promover o crescimento de vegetação, que após a sua degradação assumirá o papel de controlar a erosão (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

2.4.7. BARREIRA DE FLUÍDOS

Esta função é essencialmente a capacidade de um geossintético evitar a migração de fluídos. Quando os geossintéticos exercem esta função é muito importante que seja garantida a continuidade do material ao longo das operações de transporte, manuseamento e colocação. Para tal devem apresentar a resistência à tração, ao punçoamento, ao rasgamento, à temperatura e às radiações adequadas. Para além destas características, devem apresentar resistência satisfatória às ações a que estarão submetidas no seu período de funcionamento, nomeadamente a ataques químicos e biológicos, devendo ainda apresentar espessura, deformabilidade e flexibilidade apropriadas.

Como exemplos desta aplicação podem referir-se sistemas de impermeabilização de base ou cobertura de aterros de resíduos, impermeabilização de seções de túneis (de modo a impedir a entrada de água ou outros fluídos) e ainda a envolver massas de solo contaminado (de modo a evitar a propagação da contaminação) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

2.5. PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Do mesmo modo que os geossintéticos foram evoluindo ao longo dos anos, a sua utilização também tem vindo a aumentar. Por serem materiais de fácil e rápida instalação, económicos, e com muitas outras vantagens construtivas como a utilização em solos de fraca qualidade, ou pelo facto de evitarem o recurso a materiais naturais de baixa ocorrência e ainda evitarem o recurso a estruturas de dimensionamento complicado, são escolha para diversas aplicações em obra.

Para cada aplicação, um determinado geossintético pode exercer uma ou mais funções em simultâneo. Assim sendo, as características exigidas ao geossintético dependem da função que este irá desempenhar e da aplicação onde será incluído. Para tal, é necessário identificar as principais propriedades e valores dessas mesmas propriedades, aos quais o material tem de corresponder durante o tempo de vida útil da estrutura que este irá incorporar.

As principais aplicações dos geossintéticos, já brevemente mencionadas anteriormente, são sintetizadas na norma NP EN ISO 10318, e representadas na figura 2.9.

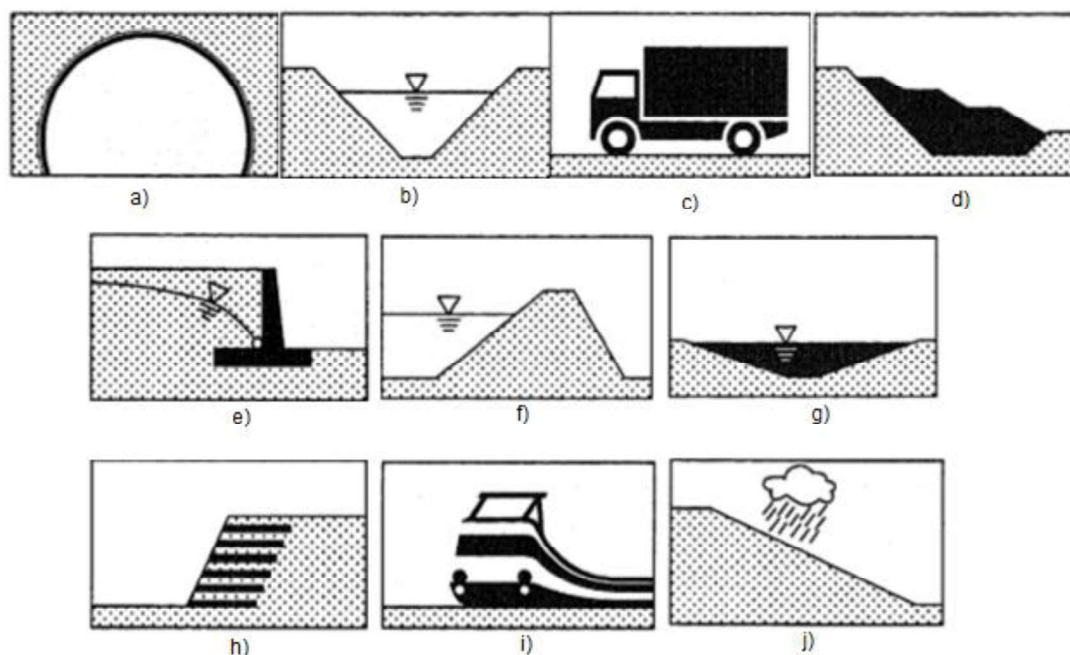


Fig.2.9- Principais aplicações dos geossintéticos de acordo com a EN ISO 10318: a) túneis e estruturas subterrâneas, b) canais, c) obras rodoviárias, d) depósitos de resíduos sólidos, e) sistemas de drenagem, f) reservatórios e barragens, g) depósito de resíduos líquidos, h) fundações e estruturas de suporte, i) obras ferroviárias, j) sistemas de controlo de erosão.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo teceram-se algumas considerações gerais acerca dos geossintéticos, desde o início da sua utilização, evolução do recurso a estes materiais, aplicações, funções que estes podem desempenhar e principais propriedades para o exercício dessas mesmas funções.

O capítulo seguinte é dedicado à danificação mecânica de geossintéticos por RCD, mais concretamente à danificação durante a instalação. Onde se elabora um estado de arte relativo à danificação mecânica e aos resíduos de construção e demolição com apresentação de estudos realizados nestas áreas.

3

DANIFICAÇÃO MECÂNICA DE GEOSSINTÉTICOS COM RESÍDUOS

3.1. INTRODUÇÃO

Os geossintéticos e os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são materiais de construção que, devido à sustentabilidade ambiental exigida pelo planeta e pelas vantagens económicas e técnicas que apresentam, têm vindo a ter, nas últimas décadas, um aumento muito significativo na sua utilização (Faria, 2014). Aliando os geossintéticos com os RCD, surge a necessidade de avaliar a danificação mecânica dos geossintéticos causada por estes resíduos quando utilizados como material de aterro.

Atualmente um dos aspetos importantes a avaliar no estudo dos geossintéticos é a sua danificação face às ações mecânicas a que estão sujeitos durante os processos de instalação e construção. A danificação durante a instalação dos geossintéticos tem origem principalmente nas ações mecânicas que ocorrem entre os geossintéticos e os materiais em contacto com os mesmos, das quais podem resultar defeitos locais e alteração de propriedades a curto e longo prazo. Por este fenómeno ter origem nessas condições mecânicas de contacto é que alguns autores utilizam a designação de danificação mecânica quando se referem à danificação durante a instalação (DDI) (Pinho-Lopes & Lopes, 2010).

A danificação mecânica que ocorre durante a instalação é dos fatores que mais contribui para a redução de resistência dos geossintéticos e ocorrem nas operações de manuseamento, colocação, espalhamento e compactação dos solos, em muitos casos por serem realizadas por trabalhadores não qualificados e pouco conscientes dos cuidados a ter na instalação destes materiais.

Neste capítulo são abordados os temas danificação durante a instalação de geossintéticos e Resíduos de Construção e Demolição. De modo a perceber o efeito em termos de danificação durante a instalação provocado por estes resíduos sobre os geossintéticos, é necessário perceber o que é a danificação durante a instalação e alargar os conhecimentos acerca de RCD. Nesse sentido são abordadas questões relacionadas com os tipos de danos causados pelo processo de instalação, fatores que a influenciam, formas de minimizar esta danificação e métodos de simulação deste fenómeno. Classificam-se ainda os RCD, apresentando os seus principais constituintes, a reciclagem destes resíduos e a legislação em vigor associada aos mesmos. Por fim, são apresentados alguns estudos associados à danificação mecânica e aos resíduos de construção e demolição associados aos geossintéticos

3.2. DANIFICAÇÃO MECÂNICA

3.2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A DDI

Depois de introduzido o conceito de DDI é fácil compreender que esta depende de vários fatores. Austin (1998) apresenta uma proposta de divisão destes mesmos fatores em três grandes grupos, representados

na tabela 3.1. Assim, consoante o tipo de geossintético, as características do solo que entra em contacto com o geossintético e as condições de instalação na obra, observam-se comportamentos distintos em termos de resistência dos materiais à danificação.

Christopher e Elias (1998) associam os efeitos mais extremos do processo de instalação a aterros de materiais mais grosseiros e de partículas angulosas colocadas em camadas finas compactadas por equipamento pesado, pois acreditam que as perdas de resistência associadas à DDI variam entre 10% e 77%. São vários os fatores que podem afetar este processo, contudo estes autores salientam que a angulosidade e dimensão média do material de aterro, a massa por unidade de área e a espessura dos geossintéticos são os fatores mais relevantes e que mais afetam a DDI.

Tabela 3.1-Fatores que influenciam a danificação durante a instalação (adaptado de Austin,1998).

FATORES QUE INFLUENCIAM A DDI	
Fatores relacionados com o geossintético	
•	Tipo de geossintético
•	Processo de fabrico e forma do produto
•	Tipo de polímero
•	Polímero de reforço/revestimento
Fatores relacionados com o tipo de solo	
•	Dimensão máxima das partículas
•	Granulometria
•	Dureza
•	Angularidade
Fatores relacionados com as condições de instalação	
•	Tamanho e tipo de equipamento
•	Cuidados na instalação e/ou operação
•	Variação da espessura da camada de solo não compactada e densidade do aterro
•	Resistência e consistência do conjunto

3.2.1.1. FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE GEOSSINTÉTICO

Num estudo elaborado por Allen e Bathrust (1994) com vários geossintéticos concluiu-se que os materiais com menor massa por unidade de área sofreram uma redução de resistência mais significativa quando submetidos à DDI, tendo sido os geotêxteis não-tecidos os que obtiveram melhores resultados nesse campo, ou seja, menor perda de resistência. Em termos de polímero do geossintético os mesmos autores mostram que em geral, os geossintéticos em poliéster (PET) sofrem maiores reduções de resistência que os de polipropileno (PP) e de polietileno de alta densidade (PEAD) para materiais com a mesma massa por unidade de área e nas mesmas condições de instalação. Tal deve-se à menor capacidade de extensão e menor diâmetro das fibras de PET relativamente às de PP e PEAD.

Christopher e Elias (1998), após a realização de ensaios de investigação em geossintéticos de reforço, citado por Pinho-Lopes e Lopes (2010), concluíram que os geotêxteis tecidos são os mais sensíveis à DDI e que o efeito desta danificação diminui com o aumento da massa por unidade de área (MUA). Os autores, concluíram ainda que as geogrelhas extrudidas de PEAD com menor espessura e MUA, estão associadas a maiores danificações e consequentemente maiores reduções de resistência.

3.2.1.2 FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE SOLO

O grau de DDI depende de alguns fatores relacionados com o tipo de solo de aterro, a distribuição granulométrica, dimensão máxima, superfície e dureza das partículas.

No que se refere às características dos solos de aterro que entram em contacto com os geossintéticos, os que apresentam maiores dimensões normalmente induzem maiores graus de danificação. Estudos realizados por Christopher e Elias (1998) referem que materiais com dimensão média do agregado (D_{50}) superior a 25 mm induzem níveis de danificação maiores e consequentemente maiores reduções na resistência dos geossintéticos.

A superfície, a dureza e o grau de fragmentação das partículas constituintes do solo podem ter muita influência em termos de danificação dos geossintéticos. Materiais de aterro com faces angulosas provocam danos mais significativos que os de faces arredondadas, provocando por vezes, cortes ou aberturas nos geossintéticos. Materiais com maior dureza induzem mais danificação aos geossintéticos, mas por outro lado, quanto maior a capacidade de fragmentação das partículas menor é a redução de resistência induzida, pois as partículas fragmentam-se, diminuem de dimensão e rearranjam-se em termos de espaço de contacto (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

3.2.1.3. FATORES RELACIONADOS COM AS CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO

O grau de danificação durante a instalação depende também de fatores relacionados com as condições de instalação como a espessura da camada de aterro, o peso do equipamento e a altura de queda do material de aterro (um parâmetro a ter em consideração durante a instalação). A utilização de equipamentos pesados de compactação em camadas de aterro de espessura relativamente reduzida conduzem ao grau de danificação mais gravoso e consequentemente à maior perda de resistência. Relativamente à altura de queda do material, quando este está a ser colocado, a maiores valores dessa mesma altura estão associados maiores danos devido ao impacto. Estes danos são tanto mais graves quanto maior a altura de queda e maior a dimensão das partículas constituintes (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

3.2.2 DANOS PROVOCADOS DURANTE A INSTALAÇÃO

Como foi referido anteriormente, durante a instalação dos geossintéticos em obra é necessário ter uma série de cuidados para reduzir potenciais danos que possam ocorrer durante essa mesma instalação. Para que seja possível tecer conclusões e recomendações sobre a danificação, como por exemplo recomendar boas práticas na construção ou até mesmo regulamentar exigências mínimas nas características dos materiais, é necessário conhecer primeiro os danos que podem ser causados nos geossintéticos durante a sua colocação em obra. Na tabela 3.2 estão representados os mecanismos de degradação, ou seja os danos causados pela instalação.

Tabela 3.2- Mecanismos provocados pela instalação

Mecanismos de danificação mecânica
• Aparecimento de fendas e separação do material • Ações de punçoamento • Rotura em tensão • Corte de fibras • Rasgamento • Abrasão

3.2.2.1. APARECIMENTO DE FENDAS E SEPARAÇÃO DO MATERIAL

O aparecimento de fendas e separação do material é um fenómeno que pode levar à fragilização local do material e consequentemente à redução das suas propriedades mecânicas. Segundo Watn e Chew (2002), este mecanismo é por norma gerado pelo contacto direto de partículas angulosas e de faces cortantes do material de aterro com os geossintéticos e agravadas pela circulação de equipamentos de construção sobre as mesmas.

3.2.2.2. PUNÇOAMENTO

O punçoamento é um mecanismo que geralmente ocorre quando se vertem materiais de aterro com faces cortantes diretamente sobre os geossintéticos ou quando se compactam camadas finas de material de aterro com equipamento muito pesado. Este mecanismo ocorre frequentemente em geotêxteis, por serem materiais contínuos. Exemplos de aplicação onde se costuma verificar este tipo de mecanismo é a colocação de geotêxteis como separadores ou filtros em revestimentos costeiros (Watn e Chew, 2002).

No caso dos geotêxteis, a penetração de partículas de grandes dimensões e angulosas podem criar cavidades de profundidade significativa ou mesmo criar aberturas e, caso os materiais cumpram funções de separação e proteção, o seu desempenho pode ficar comprometido (Pinho-Lopes e Lopes, 2010). A figura 3.1 ilustra o mecanismo de danificação por punçoamento.

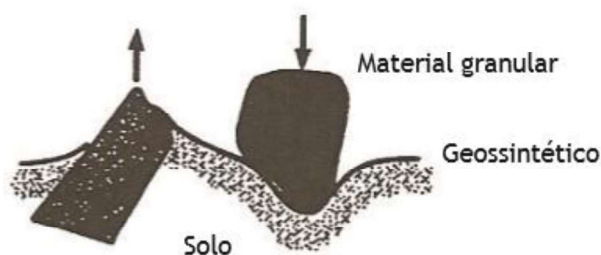


Fig.3.1- Mecanismo de danificação por punçoamento (Moreira, 2009)

3.2.2.3. ROTURA EM TENSÃO

A rotura em tensão pode ocorrer nos geossintéticos quer na fase de instalação, quer na fase de serviço da obra. Na fase de serviço da obra, pode ocorrer quando o geossintético é submetido a cargas ou deformações excessivas, como por exemplo, quando está em contacto com material de aterro anguloso ou de grandes dimensões, ou até mesmo quando colocado em contacto com uma camada de fundação não preparada, que pode conter depressões e saliências.

Durante a instalação em obra e devido à circulação de equipamento de construção pesado sobre camadas finas de materiais de aterro, o geossintético deforma-se acompanhando a deformação da camada de fundação e, caso este não seja suficientemente flexível para suportar as deformações induzidas, estas mesmas deformações provocam excessos de tensão que podem conduzir à rotura do material.

Podem ainda haver situações ao longo do plano do geossintético, onde ocorra concentração de tensões e deformações (Fig.3.2). Nestes casos, se os seus valores de resistência forem ultrapassados, pode ocorrer rotura dos geossintéticos, e estes deixam de ser capazes de desempenhar as funções de separação, filtração, reforço, drenagem, proteção e impermeabilização.

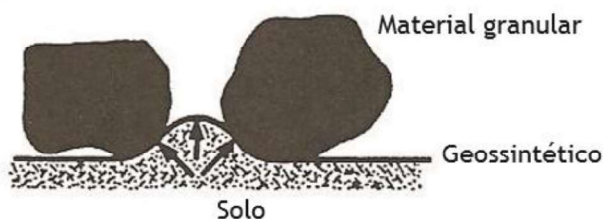


Fig.3.2- Mecanismo de degradação por ruptura em tensão (Moreira, 2009)

3.2.2.4. CORTE DE FIBRAS

O corte de fibras é outro mecanismo de danificação mecânica que pode ocorrer em geossintéticos durante a sua instalação. Este exemplo de mecanismo ocorre tal como no caso do aparecimento de fendas e separação do material, quando os materiais em contacto com os geossintéticos possuem superfícies cortantes e este está sobre uma camada mais rígida.

3.2.2.5. RASGAMENTO

A danificação do geossintético através de rasgamento ocorre quando existem ações de rasgamento em zonas do material onde já tenha ocorrido outro mecanismo de danificação inicial como corte de fibras ou ruptura em tensão. É nestes casos que se verifica a propagação dos rasgões, pelo aumento de tensão dos elementos constituintes em redor das zonas danificadas. Este mecanismo de danificação ocorre frequentemente em geotêxteis não-tecidos submetidos à concentração de tensões por ação de partículas cortantes que constituem o material de aterro (Watn e Chew, 2002).

3.2.2.6. ABRASÃO

A abrasão é provocada sempre que há ações cíclicas que impliquem movimento relativo do geossintético com o material de aterro abrasivo (Fig.3.3). Este mecanismo pode verificar-se em qualquer tipo de geossintético, podendo ainda desenvolver-se durante os processos de espalhamento e compactação do material de aterro sobre o geossintético e a circulação de equipamentos de construção.

Os efeitos mais evidentes deste mecanismo de degradação são a redução da espessura e diminuição da resistência dos geossintéticos, podendo mesmo haver destruição total das zonas afetadas. É possível ainda verificar que a angulosidade das partículas tem maior influência na formação e desenvolvimento deste tipo de mecanismo do que a dimensão das mesmas.

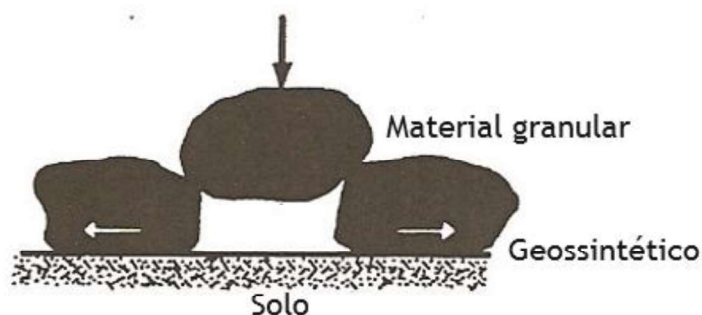


Fig.3.3- Mecanismo de degradação por abrasão (Moreira, 2009)

3.2.3. FORMAS DE MINIMIZAR OS EFEITOS DA DDI

De modo a atenuar os efeitos da DDI e com o objetivo de obter um desempenho ótimo por parte dos geossintéticos, é fundamental seguir alguns procedimentos relativamente simples durante a fase construtiva, uma vez que nesta mesma fase se verificam danificações muito significativas destes materiais.

Ingold e Miller (1988) afirmam que não podem circular veículos sobre os geossintéticos, sem que sobre os mesmos seja colocada uma camada adequada de material de aterro. A única exceção possível para este caso, corresponde à utilização de geossintéticos de elevada resistência e corretamente dimensionados para esse efeito. Assim sendo, os mesmos autores sugerem a sequência construtiva ilustrada na figura 3.3.

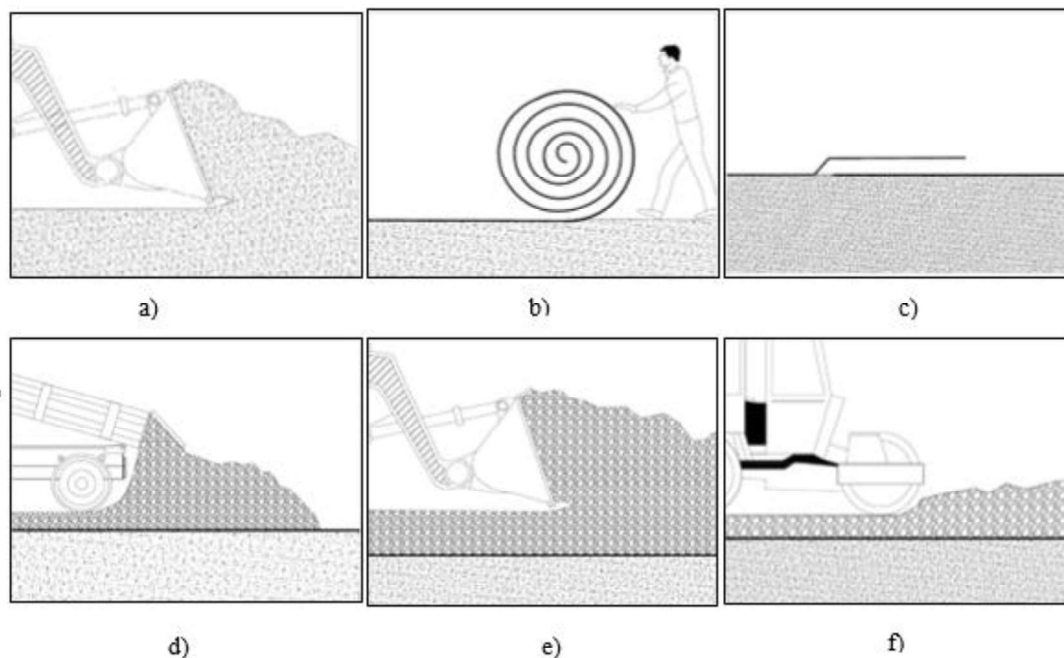


Fig.3.3-sequência construtiva a adotar em aplicações de geossintéticos

Em primeiro lugar, a superfície onde se vão colocar os geossintéticos deve ser lisa e plana, isenta de lixos, raízes ou materiais pontiagudos. Para esse efeito, a superfície de instalação tem de ser previamente

preparada (fig.3.3a) e tratada. Após o tratamento da superfície de implementação, segue-se a colocação do geossintético, em que este deve ser desenrolado como mostra a figura 3.3 b), sem que o operador pise o material. As ligações entre troços, representadas na figura 3.3 c), devem ser feitas de forma cuidada e de acordo com o caderno de encargos da obra, qualquer que seja o processo a realizar (sobreposição, costura, etc). De seguida o material confinante deve ser colocado sobre o geossintético (Fig.3.3d) e espalhado delicadamente (Fig.3.3e). Estas operações são muito agressivas para o geossintético quando não executadas cuidadosamente, podendo induzir danos muito graves e consequentemente perda de resistência. Assim sendo, até a que a camada de material confinante atinja 150 mm de espessura, não é permitida a passagem de veículos sobre a mesma. O material de aterro deve ser espalhado de acordo com o referido anteriormente. Por último, é necessário realizar a compactação do material confinante (fig.3.3f) adequadamente e atendendo às características desejadas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010). Estas recomendações sugeridas por Ingold e Miller (1988) são válidas em muitas aplicações, no entanto em alguns casos é necessário fazer algumas adaptações.

Uma colocação cuidada conduz a uma redução dos efeitos da DDI, contudo alguns autores acreditam e defendem que alguns dos erros cometidos nesta fase de construção devem-se à exposição dos geossintéticos à radiação ultravioleta, falta de sobreposição entre faixas e ainda devido a tensões induzidas durante a instalação (Sukla, 2002).

Os geossintéticos devem ser protegidos durante a construção visto que estes materiais são sensíveis a diversos agentes de degradação, como a radiação ultravioleta e agentes químicos. Shukla (2002) sugere ainda que os geossintéticos devem ser colocados na posição correta e desejada antes da introdução do material confinante, que deve ser colocado com uma pequena altura de queda e corretamente compactado. Em relação ao posicionamento do geossintético, o autor refere que a ancoragem do geossintético ao solo (pelas pontas e sem exercer demasiada força, ou aplicar uma pré-tensão ao geossintético) facilitaria a sua instalação e ainda poderá ser uma mais-valia no desempenho do material ao longo da sua vida-útil (Shukla, 2002).

É importante referir que se após a colocação do material for identificado algum tipo de mecanismo de danificação, o mais seguro, em termos de desempenho futuro da obra, é retirar a secção danificada e substituí-la. Só dessa forma se garantem as propriedades necessárias ao desempenho da obra.

3.2.3. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DDI

Pelas razões referidas anteriormente, é fundamental considerar os efeitos da DDI nas propriedades dos geossintéticos de modo a que estes sobrevivam às operações de instalação mantendo valores adequados para as propriedades que lhes são exigidas na função ou funções que vão exercer.

É frequente recorrer a simulações dos efeitos produzidos durante a instalação para avaliar as propriedades funcionais dos geossintéticos. Por se tratar de um fenómeno resultante, essencialmente, das operações realizadas na obra, a DDI pode ser estudada recorrendo a ensaios de campo e a ensaios laboratoriais de simulação.

3.2.3.1. ENSAIOS DE CAMPO

A avaliação *in-situ* da DDI baseia-se na utilização de aterros temporários e consiste na exumação de geossintéticos instalados em obras reais. Estes aterros devem ser feitos tendo em conta as boas práticas construtivas e analogamente, a exumação das amostras deve ser cuidada de modo a não induzir danificação nas mesmas. Apesar destes processos não serem normalizados, esta é a metodologia ideal para avaliar os efeitos construtivos nestes materiais uma vez que permite conhecer a danificação real dos geossintéticos em determinadas condições.

Este tipo de abordagem é dispendioso e só permite a quantificação dos efeitos da DDI em fase de obra, logo não é muito utilizado para dimensionamento de geossintéticos. No entanto, este método é comum em investigação ou na construção de bases de dados.

Austin (1998) apresenta uma metodologia para a realização de ensaios de campo de DDI, que se encontra detalhada na BS 8006:2011. Esta metodologia consiste na construção de um aterro experimental (Fig.3.4) em que o geossintético em análise é submetido a três níveis de compactação. A especificação destes três níveis de compactação (fig.3.5) tem por base o documento SHW (*Specication for Highway Works*) (Austin 1998).

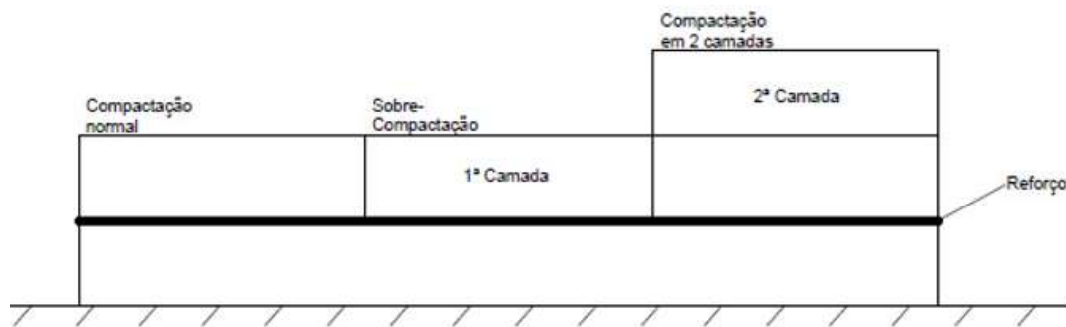


Fig.3.4- Secção dos aterros experimentais de acordo com BS 8006 (Austin, 1998)

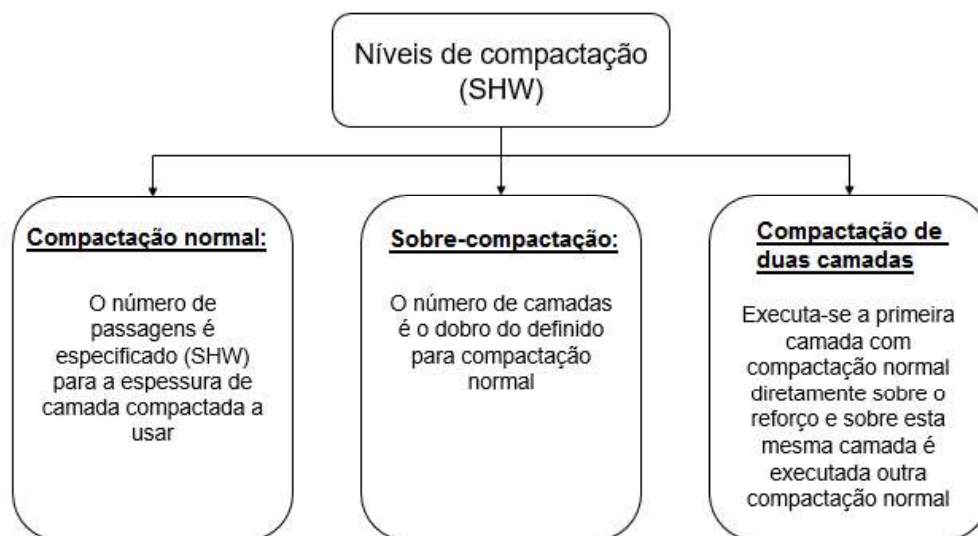


Fig.3.5- Níveis de compactação (adaptado de Austin, 1998 de acordo com BS 8006)

3.2.3.2. SIMULAÇÃO LABORATORIAL

A utilização de ensaios de campo ou exumação de amostras para avaliar as condições de danificação dos geossintéticos são metodologias que se aproximam muito das condições reais de instalação. Contudo são processos muito morosos e dispendiosos, de modo que se torna favorável a simulação laboratorial das condições de instalação.

Bräu (1998) afirma que não é possível ter um ensaio único (laboratorial ou de campo) que culmine exatamente nas condições reais de instalação, sendo deste modo mais favorável calibrar os ensaios de laboratório com os ensaios de *in situ*. Assim sendo, os ensaios laboratoriais devem simular a passagem de equipamentos de construção sobre o solo abaixo do geossintético, permitir deslocamentos relativos entre o geossintético e o solo e permitir a existência de cargas pontuais elevadas.

Para simular as condições existentes em obra, foram desenvolvidas várias metodologias de ensaio. Foi desenvolvido por exemplo o ensaio de queda de pirâmide (Fig.3.6a), proposto pela comissão europeia de normalização (CEN TC 189), onde é simulada a queda de material de aterro no geossintético, tal como o ensaio normalizado na EN ISO 13433:2006. Outro ensaio deste tipo, foi desenvolvido pela *Federal Waterways Engineering and Research Institute*, que simula de queda de blocos e material rochoso sobre o geossintético. Consiste em deixar cair uma massa de 80kg de 2m de altura (Fig.3.6b) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010). Atualmente recorre-se ao ensaio de danificação mecânica normalizado na EN ISO 10722:2007. Este foi o ensaio de danificação utilizado no presente trabalho e é descrito no capítulo seguinte.

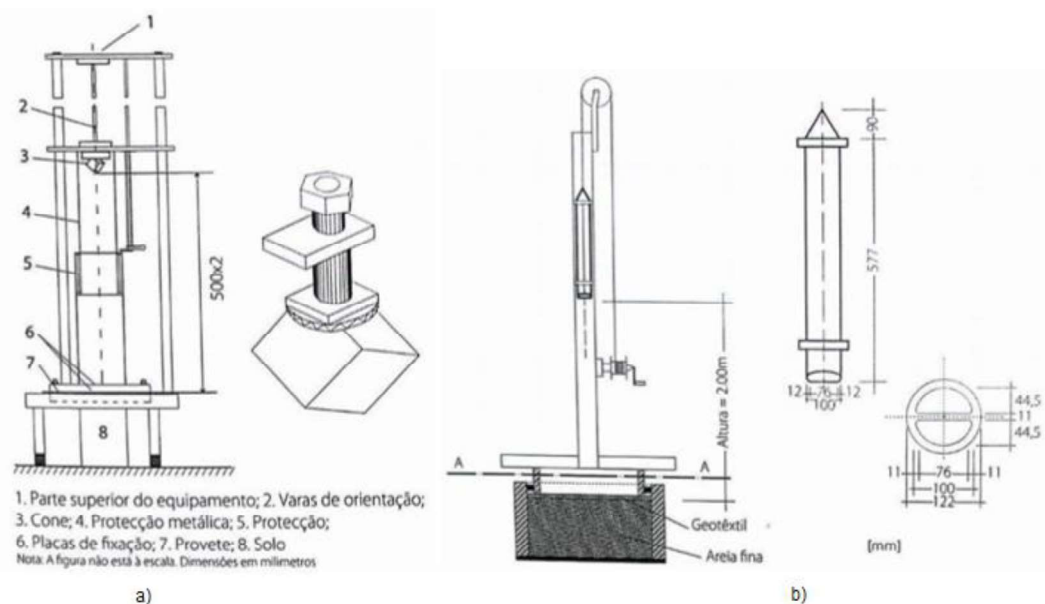


Fig.3.6- Ensaios Laboratoriais: a) esquema do ensaio de queda de pirâmide; b) esquema do ensaio para simulação de queda de blocos e material rochoso (adaptado d Pinho-Lopes e Lopes, 2010)

3.2.4. ESTUDOS DE ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA REALIZADOS NA FEUP

3.2.4.1. ESTUDO REALIZADO POR PAULA ET AL., 2004

O estudo realizado por Paula *et al.* (2004) teve como objetivo caracterizar o efeito da danificação mecânica em geossintéticos, quando usados solos de granulometria semelhante à do agregado sintético normalizado (*corundum*). Para tal, os autores desenvolveram um programa experimental de ensaios de danificação mecânica (ensaio normalizado na EN ISO 10722:2007) onde se utilizaram dois solos de confinamento com a granulometria referida e cinco geossintéticos distintos. Após a danificação mecânica e, de modo a avaliar o seu efeito, realizaram-se ensaios de tração normalizados na NP EN ISO 10319: 2003.

Os materiais utilizados pelos autores foram cinco geossintéticos com características distintas (tabela 3.3) e dois materiais granulares naturais (granítico e calcário) definidos na tabela 3.4 através da gama de

dimensões das partículas constituintes e do coeficiente de *Los Angeles* (LA), com as respectivas curvas granulométricas identificadas na figura 3.7.

Tabela 3.3- Características dos geossintéticos antes da danificação mecânica (adaptado de Paula, *et al.*, 2004)

Geossintético	Características	Resistência à tração [kN/m]	Extensão na rotura [%]
GGeu	Geogrelha extrudida uniaxial (polietileno de alta densidade)	57,36	13,83
GGeb	Geogrelha extrudida biaxial (polipropileno)	45,91	14,83
GGt	Geogrelha tecida biaxial (poliéster)	60,14	21,07
NT800	Geotêxtil não-tecido em polipropileno (MUA=800 g/m ²)	50,11	111,94
T320	Geotêxtil tecido em polipropileno (MUA=320 g/m ²)	68,97	14,89

Tabela 3.4- Materiais granulares (adaptado de Paula *et al.*, 2004)

Agregado	Gama de dimensões [mm]	LA [%]
Granítico (1)	4,75 - 12,50	28,0
Calcário (2)	4,75 - 19,00	19,3

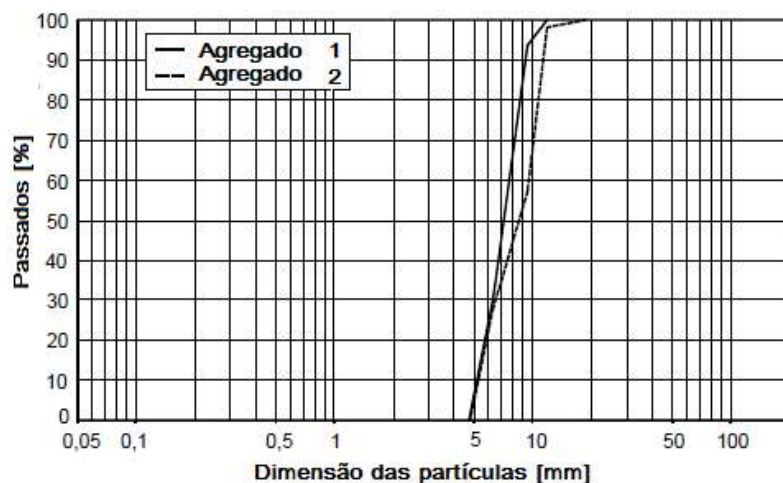


Fig.3.7- Curvas granulométricas dos materiais granulares (Paula *et al.*, 2004)

Os principais resultados obtidos neste estudo estão representados na figura 3.8 e são relativos à resistência à tração residual obtida para os diferentes geossintéticos depois das diferentes danificações.

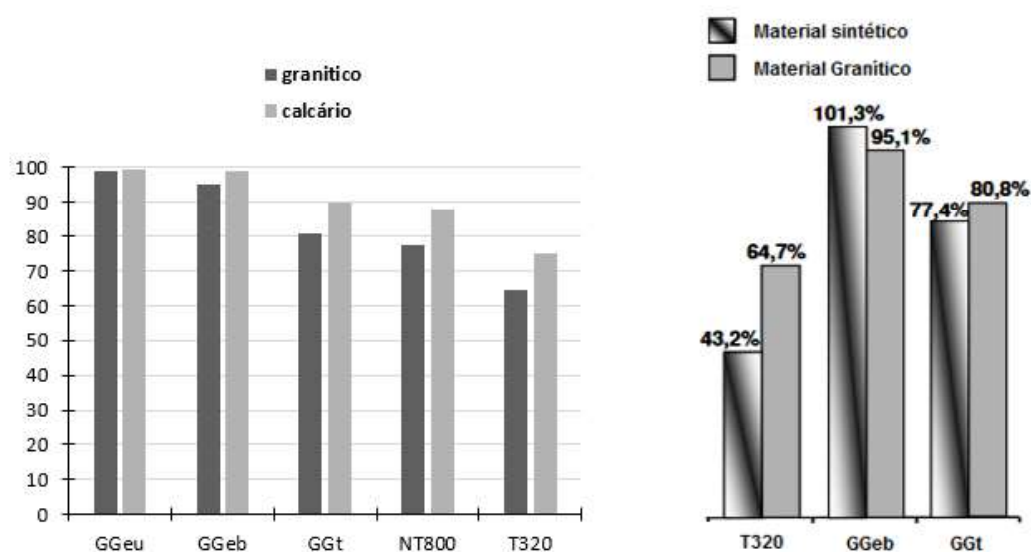


Fig.3.8- Resistências à tração residuais, em percentagem, obtidas para os materiais danificados (adaptado de Paula *et al.*, 2004)

Paula *et al.* (2004) concluem que quando são utilizados na danificação mecânica materiais confinantes deste tipo, estes podem assumir papéis importantes em termos de danificação induzida aos geossintéticos. A DDI realizada em laboratório assume efeitos de danificação mais gravosos quando utilizado o agregado sintético normalizado como material confinante, e neste estudo os geotêxteis foram os geossintéticos que revelaram maior fragilidade face à danificação mecânica, especialmente o geotêxtil tecido.

O estudo comparativo efetuado pelos autores, realça a importância e interesse na utilização de material granular confinante nos ensaios laboratoriais, que simule mais fidedignamente a instalação de geossintéticos em obras reais.

3.2.4.2. ESTUDO REALIZADO POR CARNEIRO *ET AL.*, 2012

O estudo realizado por Carneiro *et al.* (2012) teve como principal objetivo avaliar o efeito da DDI no comportamento a curto prazo, em quatro geotêxteis não-tecidos com massas por unidade de área distintas. O processo experimental consistiu na realização de ensaios de danificação mecânica normalizados na EN ISO 10722: 2007, onde se utilizou o agregado sintético normalizado (*corundum*) e, na avaliação dessa mesma danificação através de ensaios de tração NP EN ISO 10319: 2008), ensaios de rasgamento (ASTM D4533-04: 2009) e ensaios de punçoamento estático (NP EN ISO 12236: 2008).

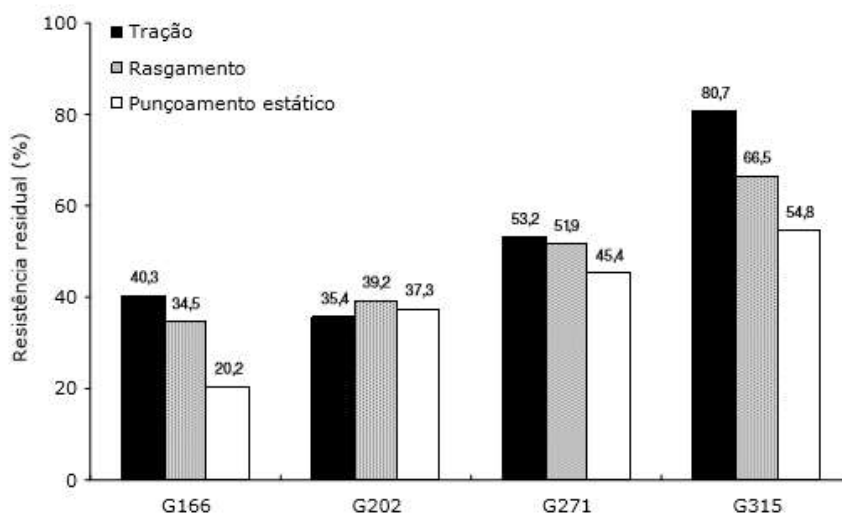
Os autores avaliaram o comportamento de quatro geotêxteis não-tecidos agulhados, face à danificação mecânica causada durante a instalação, pelo *corundum*. Na tabela 3.5 apresentam-se caracterizados os geotêxteis ensaiados e as suas características.

Tabela 3.5- Características dos geotêxteis intactos (adaptado de Carneiro *et al.*, 2012)

Geotêxtil	MUA [g/m ²]	Espessura [mm]	Resistência à tração [kN/m]	Extensão na força máxima [%]	Resistência ao punçoamento [N]	Resistência ao rasgamento [N]
G166	166	2,65	1,73	95,8	470	110
G202	202	2,85	2,33	95,5	622	130
G271	271	3,22	3,89	84,7	945	183
G315	315	3,58	4,99	82,8	1227	260

Após a danificação mecânica com o agregado sintético normalizado (*corundum*), os autores obtiveram reduções dos valores das propriedades mecânicas avaliadas, para os quatro geotêxteis. Como se pode ver através da figura 3.9, os geotêxteis não-tecidos com maior MUA foram os mais resistentes aos danos ocorridos durante o processo de instalação, tendo resultado nos menores decréscimos de resistência. Para os geotêxteis de menor MUA obtiveram-se as maiores reduções de resistência à tração, ao punçoamento e ao rasgamento.

Entre as diferentes propriedades mecânicas avaliadas, a resistência ao punçoamento foi quase sempre a mais afetada pelos ensaios de DDI.

Fig.3.9- Resistências residuais obtidas à tração, punçoamento estático e rasgamento dos materiais danificados (adaptado de Carneiro *et al.*, 2012)

Os autores referem ainda que, uma vez conhecidas as reduções de resistência associadas aos processos de instalação dos geotêxteis, estas podem ser devidamente compensadas através da introdução de coeficientes de segurança introduzidos no seu dimensionamento.

3.2.4.3. ESTUDO REALIZADO POR CARLOS *ET AL.*, 2015

Este trabalho, realizado em 2015, teve como objetivo avaliar o efeito da danificação mecânica no comportamento a curto prazo de dois geotêxteis não-tecidos com MUA distintas. Foi constituído por

um programa experimental que incluía ensaios de danificação mecânica, no qual foram utilizados o *corundum* e oito solos utilizados frequentemente em aplicações de engenharia civil, e ensaios de tração.

Os geotêxteis não-tecidos utilizados neste estudo estão caracterizados na tabela 3.6 e os materiais granulares utilizados na danificação destes geotêxteis representados através das suas curvas granulométricas (fig.3.10)

Tabela 3.6- Características dos geotêxteis intactos (adaptado de Carlos *et al.*, 2015)

Geotêxtil	MUA [g/m ²]	Espessura [mm]	Resistência à tração [kN/m]	Extensão na Força máxima [%]
G250	262	2,37	16,00	70,4
G400	412	3,32	25,56	7,9

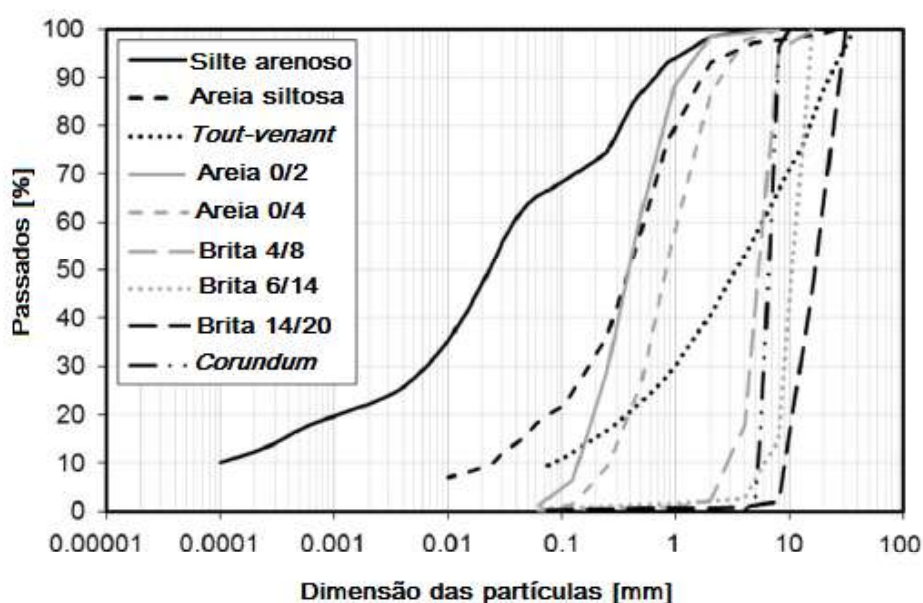


Fig.3.10- Curvas granulométricas dos solos utilizados na danificação mecânica

(adaptado de Carlos *et al.*, 2015)

Os autores concluíram, com base nos resultados obtidos (fig.3.11), que nem todos os solos utilizados na danificação mecânica causaram reduções de resistência à tração nos geotêxteis estudados. As maiores reduções de resistência foram obtidas para os solos naturais de maior granulometria, tendo os mais finos praticamente não provocado alteração da capacidade resistente dos geotêxteis não-tecidos. Dentro dos solos de agregados de maior dimensão, os que continham maior percentagem de material fino, danificaram menos os geotêxteis, contribuindo para uma menor redução da sua resistência. O geotêxtil para o qual se obtiveram resultados mais favoráveis, ou seja, menores reduções de capacidade resistente à tração foi o G400, uma vez que possui maior MUA que o outro geotêxtil avaliado.

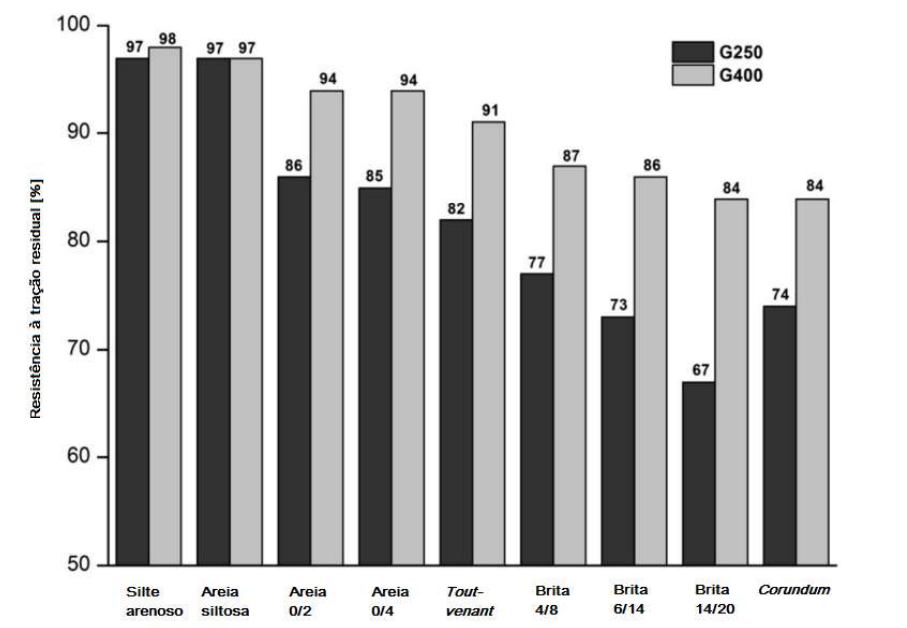


Fig.3.11- Resistência à tração residual obtida nas diferentes danificações (Carlos *et al.*, 2015)

Carlos *et al.* (2015) concluem ainda que o *corundum* foi o agregado que mais danificação induziu nos materiais estudados, comprovando que o uso deste agregado sintético estipulado pela EN ISO 10722: 2007 fornece resultados conservativos, face à utilização de geotêxteis não-tecidos aplicados em solos finos.

3.2.4.4 ESTUDO REALIZADO POR VIOLANTE, 2016

O objetivo primordial do estudo de Violante (2016) foi determinar a influência da danificação mecânica na resistência de alguns geossintéticos. Para tal, o autor realizou um plano experimental que incluiu ensaios de danificação mecânica, ensaios de tração e de punçoamento estático, de modo a caracterizar a danificação mecânica provocada nos materiais em estudo.

O autor avaliou o efeito da danificação mecânica em diferentes tipos de geossintéticos: uma geogrelha tecida, dois geotêxteis tecidos de MUA diferente e dois geotêxteis não-tecidos também estes com MUA distintas. Na tabela 3.7, encontram-se sintetizadas, tanto as características de todos os materiais estudados, assim como as características mecânicas avaliadas sem efeitos de danificação (intactos). Para a danificação mecânica foram utilizados cinco solos naturais frequentemente aplicados em obras de engenharia civil (areia siltosa, areia de granulometria 0/4, *tout-venant*, brita de granulometria 4/8 e brita de granulometria 6/14) e o agregado sintético da norma EN ISO 10722: 2007 (*corundum*), caracterizados através das respetivas curvas granulométricas na figura 3.12.

Tabela 3.7- características dos geossintéticos estudados quando intactos (adaptado de Violante, 2016)

Geossintético	Tipo	MUA [g/m ²]	Espessura [mm]	Resistência à tração [kN/m]	Resistência ao punção [N]
T80	Tecido	79	0,58	11,1	1529
T200	Tecido	207	0,85	27,7	4188
NT200	Não-tecido	191	1,57	11,9	2341
NT300	Não-tecido	297	2,38	13,0	2176
GG	Tecida	291	1,84	45,7	---

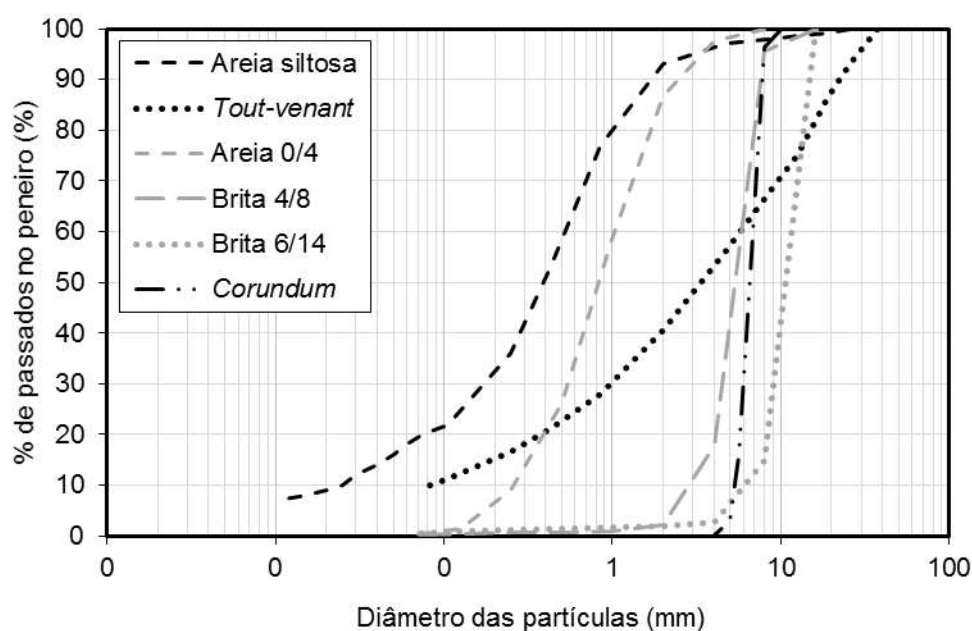


Fig.3.12- Curvas granulométricas dos solos naturais e corundum (Violante, 2016)

O autor conclui que o *corundum* foi o material que mais danificou os geossintéticos utilizados no estudo e os solos de partículas de dimensão reduzida praticamente não influenciaram a capacidade resistente dos geossintéticos (Fig.3.13 e 3.14). O *corundum* estabelece uma abordagem conservativa em termos de danificação mecânica, face ao que acontece em obras reais, onde se utilizam solos naturais.

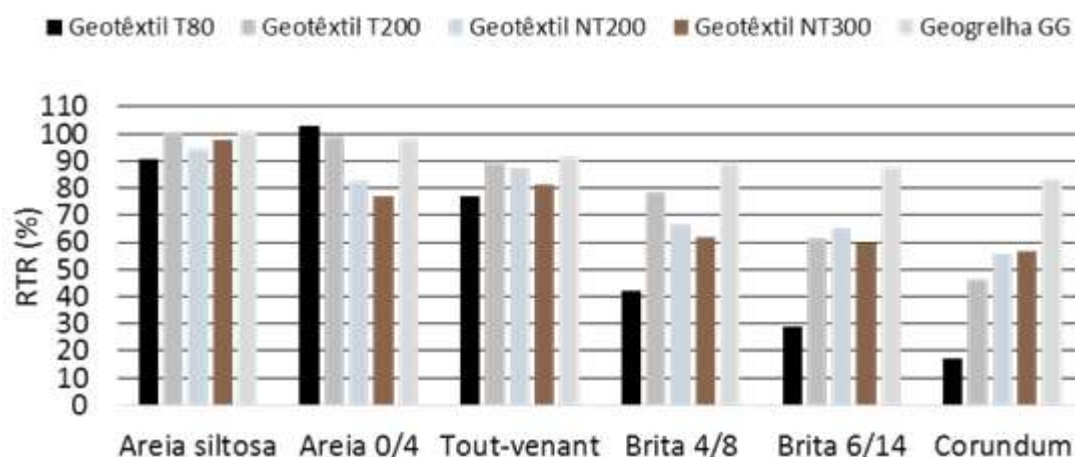


Fig.3.13- Resistência à tração residual dos materiais danificados (Violante, 2016)

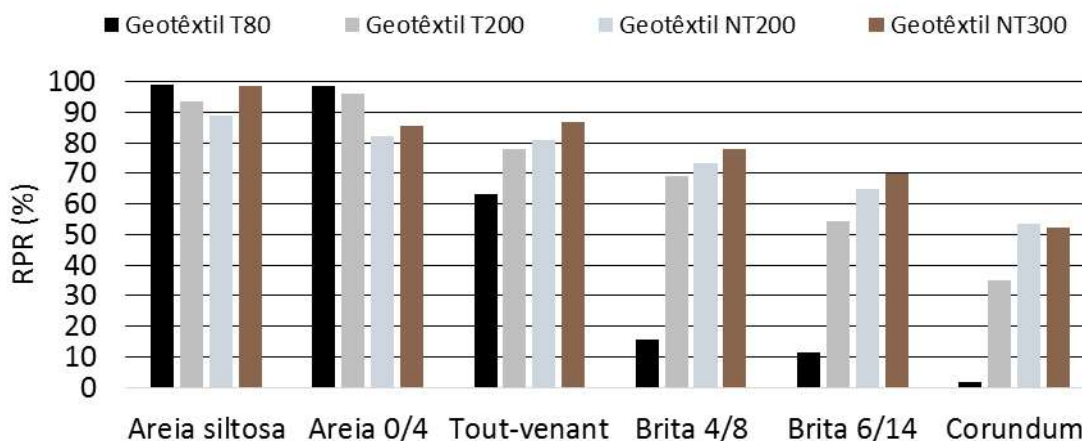


Fig.3.14- Resistência ao punçamento residual dos materiais danificados (Violante, 2016)

O autor concluiu ainda que os solos granulares constituídos por partículas de grande dimensão, e com distribuição granulométrica pouco extensa, provocam danos superiores, uma vez que a superfície de contacto durante a danificação mecânica é irregular, e provoca punçamentos pontuais e cortes nos materiais. A textura associada aos solos também é um fator importante uma vez que tem grande peso no efeito abrasivo e cortes que surgem no material, pois quando mais irregulares as partículas constituintes, maior é o efeito abrasivo produzido e maiores os cortes provocados. De um modo geral os solos granulares com partículas de maior dimensão tendem a induzir perdas de resistência à tração superiores enquanto que os solos finos de um modo geral provocaram danos mínimos. Violante (2016) salienta ainda a importância de utilizar solos naturais nos ensaios laboratoriais, uma vez que estes simulam a danificação durante a instalação dos geossintéticos em obras reais.

3.3. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO DEMOLIÇÃO

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são definidos pelo Decreto-Lei nº178/2006, de 5 de setembro, como “resíduos proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação, demolição e derrocada de edificações”. Deste modo, são considerados RCD quaisquer resíduos provenientes das obras anteriormente descritas, incluindo os fluxos específicos de resíduos nele contidos, sendo que, quer os resíduos urbanos ou similares, quer a mistura de resíduos provenientes da obra com outros resíduos de origem distinta, não se incluem neste universo.

O sector da construção civil é responsável por uma parte muito significativa dos resíduos produzidos em Portugal e nos demais estados membros da União Europeia, em que se estima uma produção anual global entre 310 e 700 milhões de toneladas de RCD (EC DG ENV, 2011). Contudo, estes resíduos foram desde sempre enviados para lixeiras sem separação prévia por tipologias e sem qualquer atenção ao nível de contaminação associado.

Sendo a produção de RCD bastante elevada nos países da União Europeia (UE) é crucial saber a sua origem, constituição, onde são depositados e se é possível o reaproveitamento dos mesmos, de modo a maximizar a sua valorização e a minimizar o seu desperdício.

O conhecimento da legislação em vigor, assim como a realização de estudos relativos à utilização, valorização e gestão dos RCD, são fundamentais para que sejam adotadas medidas, tanto na fase de projeto, como na fase de execução da obra. Estes estudos são também importantes para sensibilizar as empresas para as vantagens ambientais da utilização destes materiais, não prejudicando o desempenho e durabilidade das obras em que são inseridos.

3.3.1. PRODUÇÃO DE RCD

Desde o início dos tempos e da história do Homem, que este se ocupa em transformar as paisagens naturais que o rodeiam de modo a produzir materiais e infraestruturas necessários à sua sobrevivência, potencializando deste modo a geração de resíduos. A geração destes resíduos tem vindo a aumentar até aos dias de hoje, principalmente após a revolução industrial. O exponencial crescimento populacional, o desenvolvimento económico, a deficiente gestão e uso das matérias-primas, aliados à falta de consciência ecológica da sociedade, tornaram os resíduos uma questão económica, social e ambiental fulcral das sociedades atuais (Santos, 2007).

Os RCD são gerados diariamente na indústria da construção civil em quantidades e etapas distintas: durante a construção, a manutenção e a demolição (tabela 3.8) (Rocha, 2016).

Tabela 3.8- Percentagem de resíduos produzidos na UE consoante o tipo de obra (Rocha, 2016)

Origem dos resíduos	Produção de resíduos (%)
Construção	10-20
Reabilitação, renovação e remodelação	30-40
Demolição	40-50

Os resíduos relativos à etapa da construção resultam de vários fatores associados a erros de dimensionamento das matérias-primas necessárias à execução da obra, danos ocorridos nos materiais e perdas inerentes às soluções adotadas, bem como a restos de embalagens associadas ao transporte e acondicionamento dos materiais de construção (Botelho, 2010). Estes resíduos surgem naturalmente em

menor quantidade em obra comparativamente aos resultantes da etapa da demolição, mas com igual diversidade de materiais constituintes.

Os resíduos de manutenção, remodelação e reabilitação, pelo carácter variado do tipo de intervenção necessária, apresentam uma composição também muito variada. Estes resíduos têm vindo a ganhar importância no papel da geração dos RCD, dado o número de obras deste tipo verificadas (Ferreira, 2009). A geração de resíduos na fase de manutenção está associada a correções de patologias, substituição de componentes que tenham ultrapassado o tempo de vida útil e a reabilitação de edifícios ou parte dos mesmos associadas a demolições parciais (John e Agopyan, 2000).

O maior volume de RCD produzidos está associado à fase de demolição em obra. Este produto é essencialmente aquele que foi utilizado na construção da estrutura a demolir, sendo constituído em grande quantidade por material inerte e solos. A sua constituição é muito variada e pode variar em função do tipo de obra a demolir, da época da construção, do uso para o qual as obras estavam direccionadas, a zona onde foi efetuada a construção e se incorpora materiais característicos dessa mesma zona (Pereira e Vieira, 2013).

A falta de proatividade das empresas construtoras relativamente à produção de RCD contribui para a ineficiente gestão de matérias-primas e consequente aumento da produção de resíduos. Pois embora haja conhecimento relativo à produção dos mesmos, a grande parte das entidades não sabe o destino que estes resíduos produzidos nas várias etapas da construção devem ter.

3.3.2. CLASSIFICAÇÃO

O Homem ao longo dos tempos em várias ocasiões deparou-se com uma produção de RCD em escala alargada e em períodos de tempo muito curtos. Para garantir a reutilização, reciclagem e eliminação adequada, é necessário conhecer quais materiais constituintes dos RCD com os quais estamos a lidar.

Para além das quantidades muito significativas a que estão associados, estes resíduos apresentam outras particularidades que dificultam a sua gestão, de entre as quais se destacam a sua heterogeneidade com frações de dimensões variadas (figura 3.15).



Fig.3.15- Resíduos de construção e demolição de diferentes granulometrias e constituição (adaptado do site www.rcd.pt)

Com o intuito de caracterizar e classificar os RCD, foi aprovada a Lista Europeia de Resíduos (LER), pela Portaria nº 209/2004, de 3 de março. Esta lista veio substituir o anterior Código Europeu de Resíduos (CER) e surge com o principal objetivo de uniformizar e facilitar a identificação de resíduos em toda a União Europeia. Na tabela 3.9 está identificada a classificação dos RCD de acordo com a Portaria nº 209/2004, referida no capítulo 17 da LER.

Tabela 3.9- Capítulo 17 da LER (Portaria 209/2004, 2004))

Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (17 01)	Betão (17 01 01)
	Tijolos (17 01 02)
	Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (17 01 03)
	Misturas ou frações separadas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (17 01 06)
	Misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais abrangidos em 17 01 06 (17 01 07)
Madeira, vidro e plástico (17 02)	Madeira (17 02 01)
	Vidro (17 02 02)
	Plástico (17 02 03)
	Vidro, plástico e madeira contaminados com substâncias perigosas (17 02 04)
Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão (17 03)	Misturas betuminosas contendo alcatrão (17 03 01)
	Misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01 (17 03 02)
	Alcatrão e produtos de alcatrão (17 03 03)
Metais (incluindo ligas) (17 04)	Cobre, bronze e latão (17 04 01)
	Alumínio (17 04 02)
	Chumbo (17 04 03)
	Zinco (17 04 04)
	Ferro e aço (17 04 05)
	Estanho (17 04 06)
	Mistura de metais (17 04 07)
	Resíduos metálicos contaminados com substâncias perigosas (17 04 09)
	Cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão ou outras substâncias perigosas (17 04 10)
	Cabos não abrangidos em 17 04 10 (17 04 11)
Solos (incluindo escavados em locais contaminados), rochas e lamas de dragagem (17 05)	Solos e rochas contendo substâncias perigosas (17 05 03)
	Solos e rochas não abrangidos em 17 05 03 (17 05 04)
	Lamas de dragagem contendo substâncias perigosas (17 05 05)
	Lamas de dragagem não abrangidas por 17 05 05 (17 05 06)
	Balastros de linhas de caminhos-de-ferro contendo substâncias perigosas (17 05 07)
	Balastros de linhas de caminhos-de ferro não abrangidos por 17 05 07 (17 05 08)
Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto (17 06)	Materiais de isolamento contendo amianto (17 06 01)
	Outros materiais de isolamento contendo ou constituídos por substâncias perigosas (17 06 03)
	Materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03 (17 06 04)
	Materiais de construção contendo amianto (17 06 05)
Materiais de construção à base de gesso (17 08)	Materiais de construção à base de gesso contaminados com substâncias perigosas (17 08 01)
	Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01 (17 08 02)
Outros resíduos de construção e demolição (17 09)	Resíduos de construção e demolição contendo mercúrio (17 09 01)
	Resíduos de construção e demolição contendo PBB (vedantes com PCB, revestimentos de piso à base de resinas com PCB, condensadores com PCB) (17 09 02)

	Outros resíduos de construção e demolição (incluindo misturas) contendo substâncias perigosas (17 09 03)
	Misturas de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 03 (17 09 04)

Para além dos resíduos referidos na tabela 3.9, a LER contém outros resíduos que podem ser usualmente gerados numa obra, nomeadamente tintas e vernizes (capítulo 8), embalagens (capítulo 15), óleos lubrificantes usados (capítulo 13), resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos, pilhas e baterias, pneus (capítulo 16), estando estes já abrangidos por sistemas individuais ou coletivos geridos pelos seus produtores ou entidades gestoras (Monteiro, 2015).

Para além da LER, os resíduos de construção e demolição podem ainda ser classificados através do tipo de obra em que foram obtidos, do tipo de material constituinte e ainda do destino final dos resíduos. Todas estas classificações em contextos muito específicos têm vantagens e também limitações (Pereira e Vieira, 2013). Na tabela 3.10 resume-se de forma sintetizada cada uma das classificações existentes.

Tabela 3.10- Classificações dos RCD, adaptado de Pereira e Vieira (2013)

Classificação de acordo com a Lista Europeia de Resíduos (LER)	A LER foi transposta pela portaria nº 209/2004, de 3 de Março. Nesta lista os Resíduos de Construção e Demolição são classificados com o código 170000, sendo os últimos quatro dígitos relativos ao tipo de RCD em questão
Classificação de acordo com o tipo de obra	Resíduos de construção: resíduos provenientes de obras novas de construção de edifícios e infraestruturas; Resíduos de Reabilitação: resíduos resultantes de obras de reparação, remodelação ou reabilitação de edifícios ou infraestruturas; Resíduos de Demolição: resíduos obtidos de obras de demolição de edifícios ou infraestruturas
Classificação segundo o material constituinte	Resíduos inertes: terras, argamassas, tijolos, telhas, alvenaria, etc; Resíduos não inertes: embalagens diversas, plásticos, madeiras, metais, vidros, etc; Resíduos perigosos: óleos usados, latas de tintas, solventes, amianto, etc
Classificação segundo o destino final do resíduo	Resíduos reutilizáveis: resíduos que podem ser inseridos de imediato no local da obra onde são obtidos ou noutras; Resíduos recicláveis: resíduos que podem ser reciclados;

Resíduos não recicláveis: resíduos que pelas suas características, ou por estarem contaminados não podem ser reciclados.

3.3.3 GESTÃO E RECICLAGEM DOS RCD

O ato de reciclar é tão antigo quanto a humanidade. Schulz e Hendricks (1992) citam registros do uso de alvenaria esmagada pelos Romanos na produção de uma mistura de cal, água, cinzas e areia para construir os seus edifícios. Após a Segunda Guerra Mundial, os principais países onde esta se desenrolou, acumularam largas quantidades de RCD devido aos inúmeros bombardeamentos e consequente destruição de edifícios e infraestruturas. A falta de recursos e o elevado volume de RCD depositados nos locais onde seriam reconstruídas as cidades, levaram ao desenvolvimento de técnicas de reciclagem como solução para o problema (por exemplo o uso de tijolo moído como agregado para betão).

Atualmente, a não reutilização ou valorização destes materiais leva à deposição dos mesmos em aterros de resíduos. A sua deposição, por vezes indevida, pode levar à contaminação de águas subterrâneas e do solo devido à possibilidade de existência de produtos tóxicos na sua constituição. Por outro lado, o recurso à reutilização de RCD, ou valorização dos mesmos, contribui para a redução do consumo de matérias-primas, redução das emissões de gases com efeito de estufa, provenientes de alguns processos de extração de matéria-prima e permite ainda uma maior disponibilidade de espaço nos aterros de resíduos, dado que por vezes os RCD ocupam uma elevada parte dos mesmos.

Os RCD necessitam de soluções adequadas para que possa obter uma construção sustentável. Para isso, vários são os intervenientes que terão de contribuir para o desenvolvimento sustentável, desde projetistas, diretores de obra e todos aqueles que estão ligados direta ou indiretamente à Indústria da Construção Civil. Para tal, devem pôr-se em prática estratégias que possam controlar e prevenir a sua produção, minimizando as quantidades produzidas através da sua redução, reutilização e reciclagem.

Hoje em dia as empresas de construção civil de grande dimensão, já se encontram bastante sensibilizadas para a gestão dos resíduos, aplicando com alguma normalidade boas práticas ambientais. Existem boas práticas difíceis de implementar em situações reais de obra, nomeadamente a reutilização de resíduos e a utilização de materiais reciclados. O processo de gestão dos RCD deverá começar anteriormente ao início da obra, adotando técnicas de desconstrução que incluam a reutilização e reciclagem dos materiais constituintes, por forma a introduzi-los em aplicações diferentes das originais, mesmo que não sejam no âmbito da indústria da construção.

Para que a valorização dos RCD seja bem-sucedida, a triagem e a reciclagem são etapas cruciais. A triagem permite a separação dos resíduos consoante a sua natureza sendo que nenhum resíduo poderá ser depositado em aterro sem ter passado por esta fase (Torgal e Jalali, 2010).

A reciclagem de resíduos em obras de engenharia civil deve ser previamente avaliada mediante a realização de um estudo que contemple a avaliação das suas propriedades ambientais e a viabilidade da sua aplicação em engenharia. Caso não exista perigo de contaminação e de modo a não colocar em risco o ambiente e a saúde pública e aliando a isso propriedades que garantam um desempenho adequado às obras no seu tempo de vida útil, é de privilegiar a utilização destes materiais alternativos, como alternativa aos naturais (Roque, 2015).

Em dezembro de 2013, existiam cerca de 500 operadores de resíduos licenciados pelo Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e pela Direção Geral de Saúde a receber estes resíduos (Vieira *et al.*, 2014). Um exemplo das empresas portuguesas que recebe RCD no nosso país é a empresa Renascimento, que possui três unidades de triagem, valorização e reciclagem de RCD (norte, centro e sul do país). Esta possui os equipamentos, meios humanos e técnicos necessários a estas operações de modo a maximizar a reutilização e reciclagem destes produtos.

Os RCD são (ou deveriam ser) transportados os guias de acompanhamento de resíduos, onde são especificadas características e quantidades entre outros parâmetros do material. Quando chegados à empresa, são sujeitos a triagem e processamento, de modo a facilitar o encaminhamento para reutilização, reciclagem, tratamento, incineração ou deposição em aterros legalizados.

Embora já se comece a mudar a maneira de encarar este problema, apenas nas últimas décadas se despertou para a preocupação com o desempenho ambiental relacionado com os RCD. A difícil quantificação, caracterização, classificação e deposição não controlada, aliadas à necessidade de contribuir para situações ambientalmente sustentáveis, levou à preparação de legislação adequada e necessária (APA, 2016).

3.3.4. ENQUADRAMENTO LEGAL DOS RCD

Com o principal objetivo de salvaguardar o ambiente de eventuais impactes negativos e executar de modo correto a prevenção e gestão dos Resíduos de Construção e Demolição, torna-se necessário ter conhecimento da legislação aplicada e as particularidades dos RCD. Nas últimas décadas, vários congressos internacionais têm vindo a ser realizados tendo como tema principal a reutilização de resíduos, nos quais se foram desenvolvendo normalizações para a utilização de agregados de RCD reciclados (Pereira e Vieira, 2013).

Em Portugal, a classificação dos RCD sofreu ao longo do tempo algumas alterações. Inicialmente os RCD eram classificados como um dos 9 fluxos de resíduos que constituíam os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), aprovado em Novembro de 1997. Mais tarde, e de modo a potencializar a sua reutilização e/ou reciclagem, existiu a necessidade de considerá-los como um fluxo específico. Apresentaram-se então como Resíduos Industriais (RI) através do Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Industriais, estabelecido pelo Decreto-Lei nº 516/99, de 2 de Dezembro, e revisto pelo Decreto-Lei nº 89/2002, de 9 de Abril, onde foram incluídos na categoria dos Resíduos Industriais Perigosos (RIP), devido à possibilidade de estes conterem componentes perigosos (Vieira e Pereira, 2014).

As crescentes preocupações associadas aos RCD, assim como as dificuldades associadas à sua gestão, levaram à elaboração do Decreto-Lei n.º 46/2008 que define especificamente os procedimentos de gestão específicos para estes resíduos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental (Rocha, 2016). Definindo ainda que a gestão dos resíduos de construção e demolição é da responsabilidade de todos os intervenientes no seu ciclo de vida, desde o produto original até ao resíduo produzido. Em obras particulares isentas de licença e não submetidas a comunicação prévia, a gestão destes resíduos cabe à entidade responsável pela gestão de Resíduos Urbanos. Na impossibilidade de determinar quem produziu o resíduo, a responsabilidade pela respetiva gestão recai sobre o seu detentor. A responsabilidade sobre os resíduos gerados pelo setor da construção extingue-se através da sua transmissão a um operador licenciado na gestão de resíduos (Vieira, 2016).

Uma vez que a aplicação destes resíduos não estava totalmente clarificada, na Diretiva 2008/98/CE de 19 de Novembro de 2008, procurou-se definir com clareza as condições para que um resíduo deixe de

ser considerado como tal, permitindo assim a mudança da opinião pouco fundamentada de que a reciclagem dos Resíduos de Construção e Demolição origina materiais de pouca qualidade (Pereira e Vieira, 2013). É ainda importante referir que esta Diretiva estabelece uma meta de reciclagem de RCD a alcançar em 2020, sendo que até esse ano, os países da União Europeia devem reciclar 70% dos Resíduos de Construção e Demolição produzidos, para posteriormente proceder à sua valorização. Com a elaboração desta diretiva, pretendeu-se criar condições legais para tornar a gestão dos RCD mais eficiente. Enfatizando a prevenção da produção e perigosidade, recorrendo à triagem na origem, à reciclagem e outras formas de valorização, para que se possa diminuir o recurso a matérias-primas e minimizar a deposição desmedida e ilegal em aterros.

A legislação atualmente em vigor em Portugal relativa aos resíduos de construção e demolição encontra-se sintetizada na tabela 3.11.

Tabela 3.11- Legislação: Resíduos de Construção e Demolição em Portugal

Portaria nº 335/97 - 16 de Maio	Estabelece as regras de transporte de resíduos
Decreto-Lei nº 516/99 - 2 de Dezembro	Aprova o Plano Estratégico para os resíduos industriais não perigosos
Decreto-Lei nº 3/2004 - 3 de Janeiro	Define o regime jurídico do licenciamento, da instalação e da exploração dos centros integrados de recuperação, valorização e eliminação de resíduos perigosos
Portaria nº 209/2004 - 3 de Março	Substituição da Portaria nº 15/96-23 de Janeiro onde foram aprovadas as operações de gestão de resíduos
	Aprovada a Lista Europeia de Resíduos
Decreto-Lei nº 178/2006 - 5 de Setembro	Substituição do Decreto-Lei 239/97, de 9 de setembro, onde foram estabelecidas as regras gerais de resíduos
	Legisla a autorização de processos de gestão de resíduos industriais urbanos e de outros tipos, revogando o Portaria nº 961/98-10 de Novembro
Portaria nº 1408/2006 - 18 de Dezembro	Aprova a lista de resíduos não perigosos revogando o Portaria nº 792/98 - 22 de Setembro
	Aprova o Regulamento do Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos
Decreto-Lei nº 46/2008 - 12 de Março	Estabelece o regime das operações de gestão de resíduos de construção e demolição, compreendendo a sua prevenção, reutilização, recolha, transporte, armazenamento, tratamento, valorização e eliminação.
Portaria nº 417/2008 - 11 de Junho	Aprova os modelos de guias de acompanhamento do transporte de resíduos de construção e demolição
Decreto-Lei nº 183/2009 - 10 de Agosto	Regime jurídico da deposição de resíduos em aterro.
	Revoga o Decreto-Lei nº 152/2002, onde eram regulamentada a instalação, utilização, encerramento e pós encerramento de aterros, que por sua vez anulou o Decreto-Lei nº 321/99
Decreto-Lei nº 73/2011 - 17 de Junho	Estabelece o regime das operações de gestão de resíduos e pretende clarificar as definições de resíduo, prevenção, reutilização, preparação para a reutilização, tratamento e reciclagem.

	Revoga os Decreto-Lei nº 239/97 - 9 de Setembro e Decreto-Lei nº 178/2006 - 5 de Setembro, onde eram definidas as regras gerais de resíduos
Portaria nº 40/2014 - 17 de Fevereiro	Estabelece as normas para a correta remoção dos materiais com amianto, inclusive os resíduos de construção e demolição com amianto

É importante referir ainda que na impossibilidade de se aplicarem as normas apresentadas na tabela 3.11, devem ser aplicadas as especificações técnicas definidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e homologadas pelos membros do Governo responsáveis pelas áreas do ambiente e das obras públicas, relativas à utilização destes resíduos. As especificações do LNEC que referem a utilização destes resíduos em pavimentos e betão estão indicadas na tabela 3.12.

Tabela 3.12- Especificações do LNEC referentes à aplicação de Resíduos de Construção e Demolição

LNEC E 471	Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos
LNEC E 472	Guia para reciclagem de misturas betuminosas a quente em central
LNEC E 473	Guia para utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos
LNEC E 474	Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte

3.3.5. ESTUDOS RELACIONADOS COM A APLICAÇÃO DE RCD

Com o desenvolvimento normativo e metas de reciclagem impostas, relativas ao uso dos RCD, tem-se vindo a desenvolver vários estudos sobre o seu comportamento quando utilizados em argamassas, betão, infraestruturas de transporte e obras geotécnicas (Vieira e Pereira, 2015)

Atualmente a valorização de RCD em obras geotécnicas restringe-se, quase exclusivamente, à sua utilização como materiais granulares em bases e sub-bases de infraestruturas rodoviárias e mais recentemente, ao uso destes materiais em aterros reforçados com geossintéticos (Santos, 2007; Santos, 2011; Vieira e Pereira, 2015; Vieira *et al.*, 2016).

Sendo o tema principal desta dissertação a danificação mecânica de geossintéticos provocada por RCD, de seguida apresentam-se alguns estudos realizados nesse mesmo âmbito.

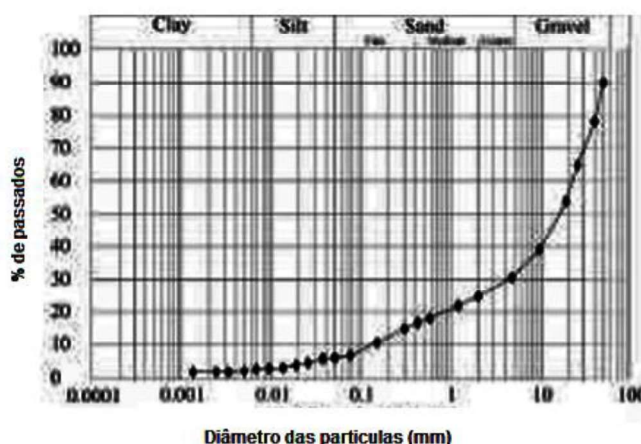
3.3.5.1. ESTUDO REALIZADO POR SANTOS *ET AL.*, 2012.

Santos *et al.* (2012) pretenderam avaliar a danificação mecânica de dois geossintéticos (uma geogrelha e um geotêxtil), durante o processo de construção de muros reforçados, devido a processos de colocação do RCD reciclado. Deste modo, realizaram em campo simulações deste processo sobre amostras de geossintéticos, utilizando um martelo vibratório e um rolo leve de 1,45 kN.

As características dos geossintéticos estão sintetizadas na tabela 3.13 e a curva granulométrica do RCD reciclado encontra-se representada na figura 3.16.

Tabela 3.13- Características dos materiais intactos (Santos *et al.*, 2012)

Geossintético	Descrição	Resistência à tração [kN/m]
GG	Geogrelha em poliéster	22,70
GNT	Geotêxtil não-tecido em polipropileno	24,01

Fig.3.16- Curva granulométrica do RCR reciclado (Santos *et al.*, 2012)

Após as diferentes ações de compactação, os autores exumaram de imediato as amostras e submeteram-nas a ensaios de tração. Os resultados obtidos das amostras exumada, para cada tipo de compactação estudados encontram-se sintetizados na tabela 3.14.

Tabela 3.14- Resultados obtidos em cada tipo de compactação (Santos *et al.*, 2012)

Geossintético	Tipo de compactação	Resistência à tração [kN/m]
GG	Com martelo vibratório	16,77
	Com rolo leve	20,26
GNT	Com martelo vibratório	23,99
	Com rolo leve	23,33

Através da análise dos resultados obtidos, os autores concluíram que a danificação mecânica causada pelo RCD é diferente consoante o tipo de geossintético utilizado. As amostras de geogrelha submetidas a compactação com martelo vibratório sofreram maior redução de resistência à tração (28%) comparativamente com as amostras submetidas a compactação com rolo (12%). Quanto ao geotêxtil, este não sofreu danificação mecânica relevante quando submetido aos dois métodos de compactação

3.3.5.2. ESTUDO REALIZADO POR VIEIRA E PEREIRA, 2015

Com o objetivo de estudar a degradação química e biológica, induzida por RCD em dois geossintéticos de características diferentes, foi construído um aterro experimental. Assim, pretendeu-se avaliar o efeito da degradação induzida pelos RCD no comportamento à tração dos geossintéticos em estudo. De modo a avaliar este comportamento, os autores procederam à exumação das amostras de geossintéticos após

6, 12 e 24 meses da construção do aterro. Este estudo realizado em 2015, refere apenas os resultados obtidos para os geossintéticos exumados com 6 meses, avaliando o seu comportamento à tração a curto prazo. Após a exumação, os provetes foram ensaiados à tração, segundo a norma europeia EN ISO 10319 (2008), sendo posteriormente comparados com os resultados obtido para as amostras intactas do mesmo material.

Os geossintéticos utilizados neste estudo foram uma geogrelha uniaxial e um geocompósito de reforço, estando as suas principais características resumidas na tabela 3.15. Na figura 3.17 encontra-se a curva granulométrica do RCD fino utilizado no estudo.

Tabela 3.15- Propriedades dos geossintéticos para as amostras intactas (adaptado de Vieira e Pereira, 2015)

Geossintético	Descrição	MUA [g/m ²]	T _{máx} [kN/m]	ε _{máx} [%]	J _{2%} [kN/m]	J _{Tmáx} [kN/m]
GG	Geogrelha uniaxial em polietileno de alta densidade	450	60,3	10,1	1085	597
GC	Geocompósito unidirecional (geotêxtil não-tecido em polipropileno e filamentos em poliéster)	340	70,6	9,7	647	728

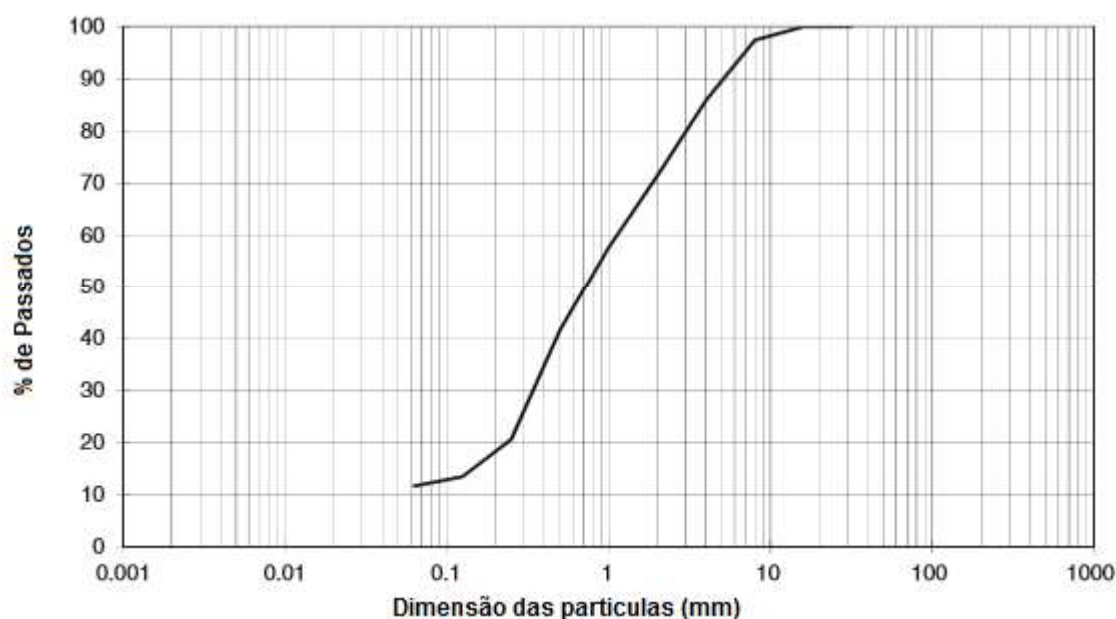


Fig.3.17- Curva granulométrica do RCD (Vieira e Pereira, 2015)

De modo a caracterizar as alterações a curto prazo dos dois geossintéticos utilizados no estudo, os autores obtiveram os resultados de resistência à tração, extensão na força máxima e rigidez representados na tabela 3.16 e, calcularam os valores residuais destes mesmos parâmetros (fig.3.18).

Tabela 3.16- Valores médios obtidos no ensaio de tração (Vieira e Pereira, 2015)

Geossintético	T _{máx} [kN/m]	ε _{máx} [%]	J _{2%} [kN/m]	J _{Tmáx} [kN/m]
GG	56,7	10,6	1012	534
GC	59,3	8,9	642	667

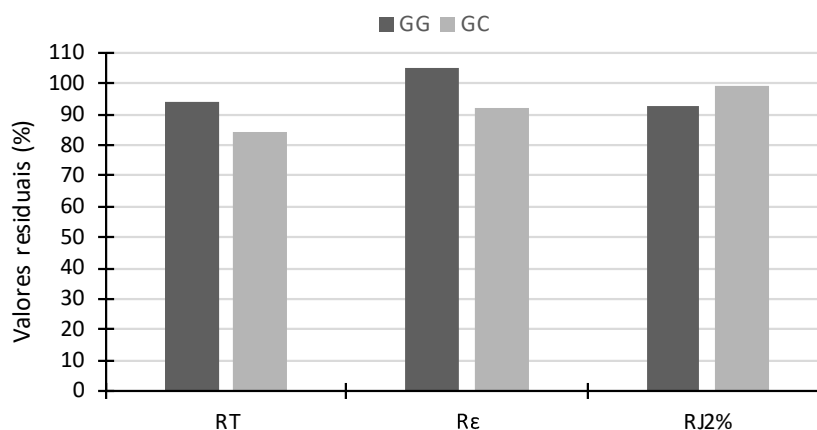


Fig.3.18- Valores residuais dos parâmetros obtidos no ensaio de tração (Vieira e Pereira, 2015)

Através da análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração e pela inspeção visual da danificação, assim como as imagens obtidas pelo microscópio eletrônico, os autores concluíram que os danos induzidos pela exposição ao RCD por um período de tempo de 6 meses, tanto na geogrelha como no geocompósito, não foram muito significativos, uma vez que a resistência à tração após a danificação destes materiais não revelou reduções muito elevadas.

A inspeção visual e as imagens obtidas no microscópio eletrônico do geocompósito de reforço, não revelaram danos significativos nas fibras de polietileno, embora sejam visíveis alguns danos produzidos pelas raízes das plantas no geotêxtil tecido (base do geocompósito). O que permitiu ainda aos autores concluir que o efeito induzido pelos RCD no comportamento à tração a curto prazo dos geotêxteis depende da estrutura e do polímero constituinte.

Relativamente à geogrelha de polietileno de alta densidade, a exposição durante 6 meses ao RCD induziu um pequeno decréscimo da sua resistência à tração e da sua rigidez. Já no geocompósito, essa mesma exposição, provocou uma redução de resistência à tração de 16%, embora e em termos de rigidez, o seu contributo não tenha sido tão significativo.

Importante referir ainda que os resultados e conclusões obtidas e apresentadas no estudo de Vieira e Pereira (2015) apenas fazem referência às amostras exumadas após 6 meses da sua instalação.

3.3.5.3. ESTUDO REALIZADO POR SILVA *ET AL.*, 2015

O estudo realizado por Silva *et al.* (2015) baseou-se na avaliação experimental os danos mecânicos que podem ser causados nos geossintéticos através dos processos de colocação e compactação dos RCD em obras geotécnicas. Para tal, foi construída uma caixa de madeira (4x1,2x0,3 m³), com o objetivo de controlar o ambiente onde as amostras foram ensaiadas, evitando a mistura com o solo natural.

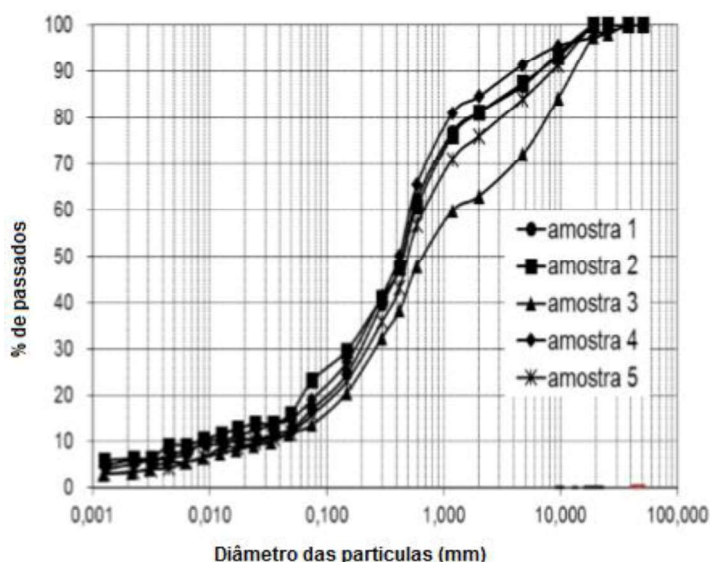
Fig.3.19- Caixa de madeira utilizada no estudo de Silva *et al* (2015)

A caixa foi preenchida inicialmente com 0,08 m de espessura com o RCD, de seguida colocou-se o geossintético em estudo e, por fim, foi colocada outra camada de RCD com alturas de queda diferentes (0, 1 e 2 m). A caixa encontra-se representada na figura 3.19.

Neste estudo foi utilizado um RCD reciclado da região de Recife e um geotêxtil tecido em polipropileno, cujas propriedades estão representadas na tabela 3.17. a curva granulométrica do RCD está representada na figura 3.20.

Tabela 3.17- Características do material intacto (adaptado de Silva *et al.*, 2015)

Geossintético	Descrição	MUA [g/m ²]	Resistência à tração [kN/m]
GT	Geotêxtil tecido em polipropileno	250	43,20

Fig.3.20- Curvas granulométricas das cinco amostras de RCD reciclado utilizadas (Silva *et al.*, 2015)

Após a exumação de todas as amostras danificadas durante a colocação do RCD reciclado, para cada caso de diferentes alturas de queda do mesmo, as amostras do geotêxtil tecido procedeu-se a ensaios de

tração para análise das mesmas. Os resultados obtidos no ensaio de tração para o geotêxtil para cada caso de altura de queda do RCD reciclado foram a resistência à tração do material danificado e os respectivos coeficientes de redução e, encontram-se sintetizados na tabela 3.18.

Tabela 3.18- resultados do ensaio de tração (adaptado de Silva *et al.*, 2015)

Altura de queda do RCD-R [m]	Resistência à tração [kN/m]	Fatores de redução
0	41,51	1,04
1	38,96	1,11
2	35,97	1,20

Através da análise dos resultados obtidos, os autores concluem que as amostras submetidas apenas à compactação, ou seja com altura de queda do RCD reciclado nula, apresentaram uma baixa redução na sua resistência à tração relativamente às amostras intactas do mesmo material. Para além disso, refere-se ainda a importância da altura de queda do material confinante, que nos casos de altura de queda igual a um e dois metros, os autores obtiveram reduções da resistência do material, um pouco mais significativas e com coeficientes de redução associados a cada um destes casos superiores ao caso anterior (altura de queda nula).

4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Com o intuito de avaliar a danificação mecânica de geossintéticos causada por materiais de aterro constituídos por resíduos reciclados, realizou-se um programa experimental, que é descrito neste capítulo de forma sucinta. Assim sendo, serão identificados e caracterizados os geossintéticos utilizados, os resíduos e serão ainda descritos os ensaios de danificação mecânica sob carga repetida, de tração e de punçoamento estático. A figura 4.1 ilustra esquemática e sucintamente todo o processo laboratorial de avaliação da danificação mecânica.

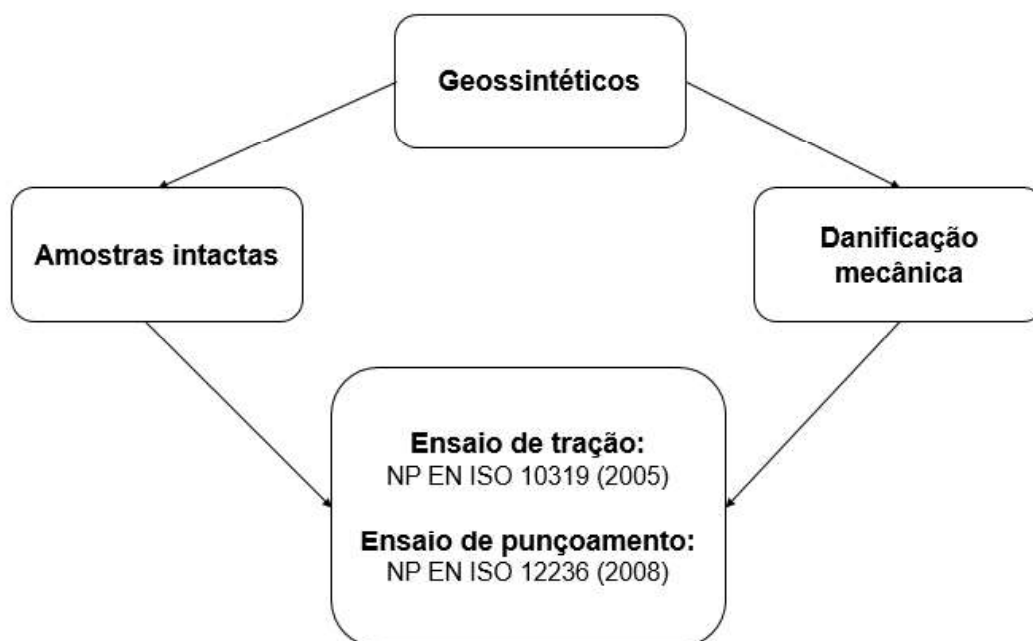


Fig.4.1- Diagrama do procedimento experimental

4.2. GEOSSINTÉTICOS

Neste estudo foram utilizados cinco geossintéticos diferentes, dois deles geotêxteis tecidos, dois geotêxteis não-tecidos e uma geogrelha tecida. Para os quatro primeiros foram atribuídas designações

identificativas do tipo de material e da respetiva massa por unidade de área, usando-se “T” para os geotêxteis tecidos e “NT” para os geotêxteis não-tecidos, sendo os números que sucedem estas letras identificativos da massa por unidade de área (MUA). Para a geogrelhas usou-se a designação “GG” visto ser o único material deste tipo.

Na tabela seguinte estão definidos os materiais em estudo, assim como as suas principais características, sendo que a MUA foi determinada de acordo com a norma NP EN ISO 9864:2006 e a espessura de acordo com a norma NP EN ISO 9863-1:2006. De referir que todos os provetes de geossintéticos utilizados nos ensaios do programa experimental foram obtidos através da norma NP EN ISO 9862:2007.

Tabela 4.1- Principais características dos geossintéticos

Geossintético	Tipo	Material constituinte	MUA [g/m ²]	Espessura [mm]
T80	Tecido	Polietileno de alta densidade	81 (0,8%)	0,54 (1,3%)
T200	Tecido	Polietileno de alta densidade	204 (0,9%)	0,88 (1,2%)
NT100	Não-tecido	Polipropileno	112 (6,8%)	1,07 (12,7%)
NT400	Não-tecido	Polipropileno	396 (4,7%)	3,03 (3,7%)
GG	Tecida	Poliéster com revestimento de PVC	289 (2,6%)	1,72 (2,4%)

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

4.3. ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA

4.3.1. EQUIPAMENTO

De modo a avaliar a danificação mecânica procedeu-se á danificação dos geossintéticos descritos anteriormente pelo ensaio de danificação mecânica sob carga repetida (que a partir deste momento e de modo a simplificar a escrita será denominado apenas por de ensaio de danificação mecânica). A danificação pode ser avaliada qualitativamente (através da inspeção visual) e através da alteração das propriedades mecânicas, como a resistência à tração e ao punçoamento.

O processo experimental de danificação foi executado num equipamento do laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (figura 4.2), com base na norma EN ISO 10722:2007. O equipamento é formado por uma caixa metálica com 300 mm por 300 mm (dimensões internas), dividida em duas partes, uma superior e outra inferior (75 mm de altura cada) (figura 4.2b e 4.2c). Possui um mecanismo de aplicação de carga que é controlado de forma a produzir uma pressão sinusoidal entre $5 \pm 0,5$ kPa e 500 ± 10 kPa na placa de carregamento a uma frequência de 1 Hz. Os provetes de geossintéticos usados no ensaio de danificação mecânica foram cortados com 250 mm de largura e 500 mm de comprimento, à exceção da geogrelha que se danificaram provetes com 500 mm de comprimento e 7 barras de largura.



a)



b)

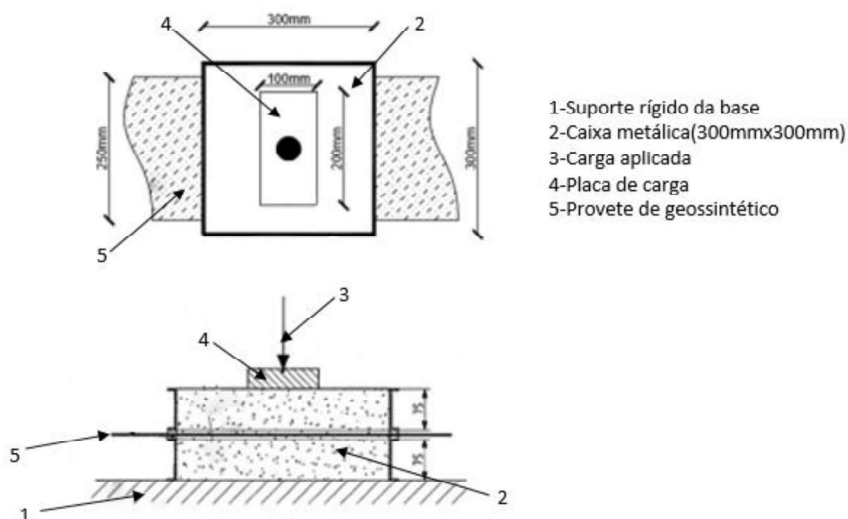


Fig.4.2-Equipamento de danificação mecânica: a) Vista geral do equipamento de ensaio de danificação mecânica; b) Caixa metálica de danificação, c) Esquema representativo do equipamento, adaptado de Violante, 2016.

Após a preparação dos provetes a ensaiar, iniciou-se a preparação do ensaio de danificação mecânica com o enchimento faseado da caixa inferior. A primeira fase do enchimento consistiu em colocar o resíduo utilizado até meio da caixa inferior (37,5 mm) seguido de compactação desta mesma camada (Fig.4.3a e b). Depois desta primeira fase completou-se o enchimento da caixa inferior seguido novamente de compactação (fig.4.3c). De notar que cada processo de compactação consistiu em aplicar uma pressão de (200 ± 2) kPa sobre uma placa metálica com as dimensões internas da caixa, durante 60

segundos. Acima do geossintético foi colocada a parte superior da caixa metálica com uma camada única de material não compactado (com 75 mm de altura), como podemos ver nas figuras 4.3d) e 4.3e).

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

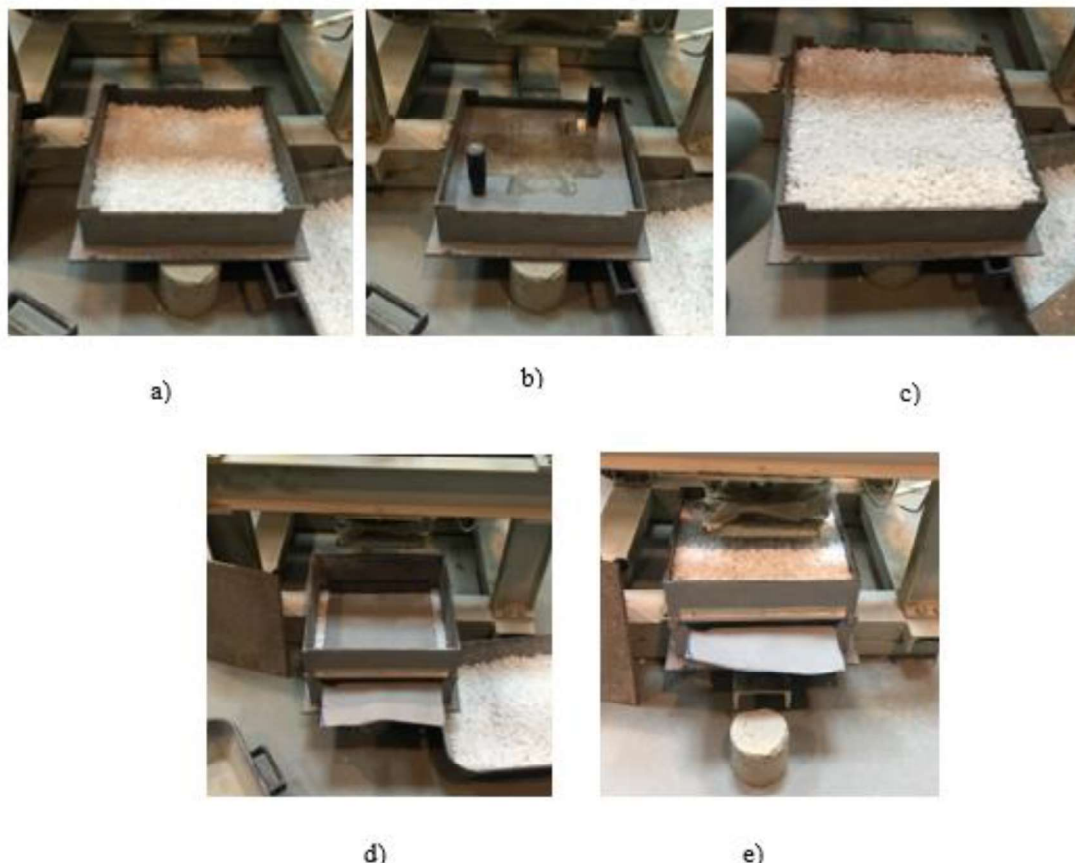


Fig.4.3- Faseamento da preparação do ensaio de danificação mecânica: a) enchimento da primeira metade da caixa inferior, b) placa metálica posicionada para a primeira compactação do processo, c) segunda fase de enchimento da caixa inferior, d) posicionamento do provete e da caixa superior, e) enchimento da caixa superior.

4.3.2. MATERIAIS UTILIZADOS NA DANIFICAÇÃO MECÂNICA

O ensaio de danificação mecânica foi efetuado com o agregado sintético de óxido de alumínio (*corundum*), como especificado na EN ISO 10722:2007, e com mais quatro materiais de aterro constituídos por resíduos. Os resíduos foram escolhidos com o objetivo de reaproveitar este tipo de material percebendo como é que estes se comportam quando utilizados em aterros (em termos de danificação dos geossintéticos) e ainda tentar estabelecer uma relação do seu comportamento com o de solos naturais de granulometria semelhante, dos quais existem alguns estudos (como por exemplo, Violante (2016) que avalia a danificação mecânica de geossintéticos). Assim sendo os resíduos selecionados foram um RCD fino, um RCD cerâmico, um RCD de betão e um resíduo constituído por restos de inceneração (cinzas), e podemos observar as suas composições na figura 4.4.



Fig.4.4- Materiais utilizados na danificação mecânica: a) RCD fino, b) RCD cerâmico, c) RCD de betão, d) cinzas, e) *corundum*

Para a caracterização dos resíduos procedeu-se à inspeção visual e à determinação das curvas granulométricas dos mesmos através do ensaio normalizado descrito na NP EN ISO 933-1:2000. Em termos visuais, avaliou-se o tipo de materiais que constituíam os RCD e o resíduo não reciclado (cinzas), como podemos ver na figura 4.11 e na tabela 4.2, onde se descriminam as componentes visíveis dos mesmos.

Tabela4.2- Inspeção visual dos resíduos reciclados e cinzas

Solos	Análise visual
RCD fino	Solo, alvenaria, vidro
RCD cerâmico	Telhas, mosaicos, tijolos, ladrilhos
RCD betão	Cimento, agregados, argamassas
Cinzas	Vidros, metais, agregados, cinzas volantes

Na avaliação da granulometria dos resíduos reciclados, optou-se por não fazer lavagem prévia dos materiais, tendo sido apenas feita secagem em estufa durante 24 horas. A quantidade de amostra a analisar depende do diâmetro máximo das partículas que constituem os agregados, como especifica a

norma NP EN 933-1:2000 (Fig.4.5). Deste modo, ensaiaram-se 2357 g de RCD fino, 5865 g de RCD cerâmico, 10234 g de RCD de betão e 5503,0 g de cinzas.

Dimensão máxima D (mm)	Massa mínima do provete (kg)
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

NOTA 1: Para os agregados de tamanho diferente, a massa mínima do provete deve ser interpolada a partir das massas do quadro 1.

Fig.4.5- Massas de amostra a ensaiar, adaptado da NP EN 933-1

Existem três séries de peneiros (série base, série um e série dois) que podem ser utilizadas nestas determinações, das quais podemos usar no máximo duas delas. A figura 4.6 mostra as distribuições das aberturas dos peneiros para cada uma das séries. Neste estudo, utilizaram-se a série base e a série dois, por este conjunto ser o mais utilizado em determinações granulométricas e por ser constituído por um número total de peneiros superior a qualquer outro conjunto de séries. Esta escolha deveu-se ainda ao facto de todos os RCD reciclados à exceção do RCD fino, aparentarem ter uma variedade granulométrica significativa, o que permitiria uma caracterização mais completa dos mesmos.

Série base	Série 1	Série 2
<u>Abertura dos peneiros (mm)</u>	<u>Abertura dos peneiros (mm)</u>	<u>Abertura dos peneiros (mm)</u>
63,0	45,0	40,0
31,5	22,4	20,0
16,0	11,2	14,0
8,0	5,6	12,5
4,0		10,0
2,0		6,3
1,0		
0,500		
0,250		
0,125		
0,063		

Fig.4.6- Séries de peneiros e respetivas aberturas

Após a obtenção das curvas granulométricas dos resíduos (Fig.4.7), foram determinados alguns parâmetros indicadores e caracterizantes do tipo de solo e tipo de partículas constituintes (Tabela 4.3), de modo a ter uma noção de como são os granulometricamente os resíduos utilizados:

- $D_{máx}$: dimensão máxima das partículas e representa pelo menos 10% da amostra ensaiada;
- D_x : dimensão em que x% da amostra é inferior a essa mesma dimensão (exemplo: $D_{10}=0.125$ mm, 10% da amostra total é inferior a 0,125 mm);
- Coeficiente de curvatura (C_c): fornece informação sobre a graduação do solo ($1 < C_c < 3$: designam-se solos bem graduados, através do Sistema Unificado de classificação dos solos);
- Coeficiente de uniformidade (C_u): dá indicação do grau de uniformidade do solo ($C_u < 5$: o solo é uniforme; $5 < C_u < 15$: o solo é medianamente uniforme; $C_u > 15$: o solo não é uniforme, de acordo com o Sistema Unificado de classificação dos solos).

Em relação ao *corundum*, optou-se por usar a curva granulométrica (Fig.4.7) obtida no estudo de Carlos *et al.* (2015), e a partir da qual se calcularam os mesmos parâmetros determinados para os materiais de aterro constituídos por resíduos reciclados.

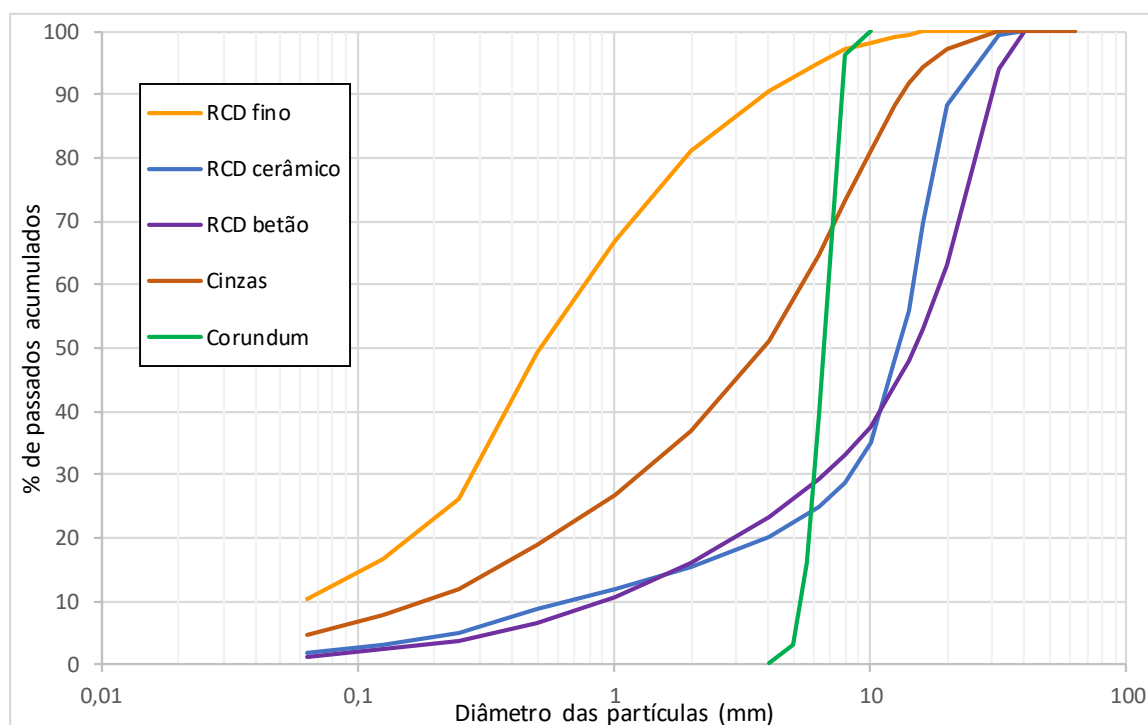


Fig.4.7- Curvas granulométricas dos RCD, cinzas e corundum.

Tabela 4.3- Características dos RCD, cinzas e corundum.

Solos	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D _{máx} (mm)	C _u	C _c
RCD fino	-	0,292	0,524	0,806	6,3	-	-
RCD cerâmico	0,710	8,412	12,847	14,615	20,0	20,6	6,8
RCD betão	0,934	6,592	14,814	18,709	31,5	20,0	2,5
Cinzas	0,187	1,326	3,833	5,484	12,5	29,3	1,7
Corundum	5,323	6,017	6,661	6,913	10	1,3	1,0

Neste estudo apenas se obtiveram laboratorialmente as curvas granulométricas dos resíduos reciclados e os respetivos parâmetros associados. Uma vez que não foi possível obter informação acerca das partículas inferiores ao peneiro de menor dimensão (0.063 mm), não foi possível determinar alguns parâmetros (D₁₀, C_u e C_c) relativos à caracterização do RCD fino. No entanto, Vieira *et al.* (2016), obtiveram essa informação para o mesmo RCD fino em estudo com recurso ao processo de sedimentação de partículas. (Tabela 4.4). De salientar que D₃₀, D₅₀, D₆₀ e D_{máx} determinados por Vieira *et al.* (2016) (tabela 4.4), diferem ligeiramente dos obtidos no presente trabalho. Estas diferenças podem dever-se a vários fatores, entre os quais a amostra ensaiada no presente estudo ser diferente da utilizada por Vieira *et al.* (2016) (uma vez que esta é aleatória) e ao facto destes autores terem efetuado lavagem prévia do RCD

Tabela 4.4 -Características granulométricas do RCD fino (Vieira *et al.*, 2016)

Solo	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D _{máx} (mm)	C _u	C _c
RCD fino	0,013	0,274	0.646	1,028	6,4	79,1	5,6

4.4.AVALIAÇÃO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA

De modo a perceber se houve alteração das propriedades mecânicas, e de acordo com a norma EN ISO 10722:2007, os provetes para além de serem avaliados qualitativamente (através da inspeção visual) devem ser avaliados com recurso a ensaios de referência. Estes ensaios incluem o ensaio de tração em tiras largas, especificado na NP EN ISO 10319:2005 (de carácter obrigatório) e outros ensaios mecânicos e/ou hidráulicos, dos quais se escolheu o ensaio de punção estático baseado na norma NP EN ISO 12236:2008.

4.4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

Como foi referido anteriormente, o ensaio de tração (NP EN ISO 10319:2005) tem como objetivo caracterizar o comportamento à tração dos geossintéticos. Este trabalho permitiu avaliar o comportamento à tração dos provetes danificados através do ensaio de danificação mecânica e comparar com provetes, do mesmo material, não danificados. O ensaio é aplicável à maioria dos geotêxteis, geocompósitos e geogrelhas, sendo que nestas últimas é necessário fazer algumas adaptações às dimensões dos provetes.

4.4.1.1. PROCEDIMENTO

O ensaio de tração foi realizado num equipamento de marca *Lloyd Instruments*, modelo LR 50 K, equipado com uma célula de carga de 10 kN, garras de compressão hidráulica e com velocidade de ensaio previamente definida de 20 %/min (fig.4.8). Os geotêxteis foram ensaiados usando provetes de 300 mm de comprimento e 200 mm de largura, mas uma vez que parte do provete fica no interior das garras, a área útil de ensaio de tração é de (100x200) mm (fig.4.9b). A geogrelha tinha 46 barras num metro (número mínimo) e ensaiaram-se provetes com 5 barras de largura, por 300 mm. Todos os geossintéticos foram ensaiados na direção de fabrico.



Fig.4.8- Ensaio de tração: a) geotêxtil NT110, com recurso a vídeo-extensómetro; b) geotêxtil T200, sem vídeo-extensómetro

A extensão dos geotêxteis não-tecidos e da geogrelha foi obtida com recurso a um vídeo-extensómetro, fixando dois pontos centrados e distados de 60mm no sentido da força de tração. Para os geotêxteis tecidos, e devido à sua estrutura, não foi possível fixar corretamente os pontos de modo a utilizar o vídeo-extensómetro, pelo que a extensão foi medida através do deslocamento relativo entre as garras (Fig.4.8b). Nestes materiais (geotêxteis T80 e T200) tanto a medição da extensão, como a colocação dos provetes nas garras foram diferentes dos restantes materiais. Efetuaram-se colagens de geotêxteis não-tecidos na zona dos provetes que fica dentro das garras de modo a não haver deslizamento dos materiais nas mesmas (Fig.4.9a). Foram escolhidas garras de compressão hidráulica de modo a evitar escorregamentos dos provetes e pelo facto de tornar a colocação dos provetes mais fácil e rápida.

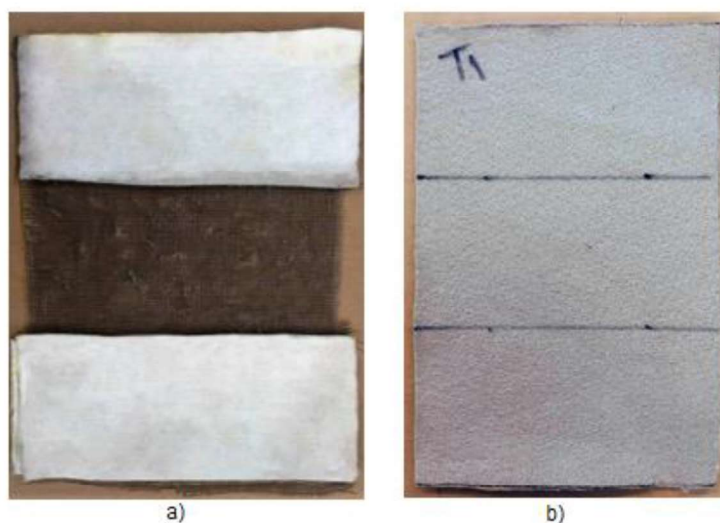


Fig.4.9- Provêtes do ensaio de tração: a) exemplo de colagem do geotêxtil T80, b) provete de NT400.

4.4.2.2. TRATAMENTO DE DADOS

Para cada um dos geossintéticos escolhidos, foram ensaiados 5 provêtes. E para cada provete foram obtidos, os valores da força (em N) e da extensão, tanto através do vídeo-extensômetro como através do deslocamento relativo entre garras (em %). Com estes valores foram calculados o valor da força por unidade de largura (T , em kN/m), a extensão (ϵ , em %) e a rigidez secante a 2%, 5% e 10% ($J_{sec2\%}$, $J_{sec5\%}$ e $J_{sec10\%}$) recorrendo a algumas expressões.

Para os geotêxteis, calculou-se a força por unidade de largura (1.1), em kN/m:

$$T = \frac{F}{0,2} \times \frac{1}{46} [kN \ m] \quad (1.1)$$

Onde, F - é a força registada em N e a constante 0,2 representa a largura nominal dos provêtes em metros.

Para a geogrelha, obteve-se a força de tração por unidade de largura através da seguinte expressão:

$$T = \frac{F}{5} \times \frac{1}{46} [kN \ m] \quad (1.2)$$

Onde, F é a força registada em N; 46 representa o número de barras num metro de largura de material; e 5 é o número de barras tracionado.

No cálculo da extensão obtida no ensaio de tração utilizou-se a expressão 1.3 tanto para os geotêxteis como para a geogrelha:

$$\varepsilon = \frac{l - l_i}{l_i} \times \quad [\quad] \quad (1.3)$$

Onde, l é a distância entre garras ou entre pontos de referência para uma determinada força e l_i é a distância entre garras ou pontos de referência iniciais. Esta expressão permite calcular a extensão correspondente a vários valores de força exercidos ao provete durante o ensaio, contudo o valor a ter em consideração e a ser avaliado neste trabalho é o valor da extensão na força máxima (ε_{FM}).

Com os valores obtidos através das expressões anteriores calcularam-se os respetivos valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação. Na tabela 4.5 e como exemplo do tratamento de dados efetuado, encontram-se os resultados obtidos para o ensaio de tração da amostra intacta do geotêxtil NT400.

Tabela 4.5- Resultados obtidos no ensaio de tração do geotêxtil NT400 (amostra de referência).

Provete	Força [N]	T [kN/m]	ε_{FM} [%]
1	4586	22,93	79,2
2	4864	24,32	77,7
3	5018	25,09	84,9
4	4789	23,95	81,5
5	5345	26,73	83,1
Valor Médio	4920	24,60	81,3
Desvio Padrão	284	1,42	2,9
Coeficiente de Variação [%]	5,8	5,8	3,5

De modo a quantificar a variação da resistência à tração associada a cada geossintético, determinou-se a resistência à tração residual (RTR, em %), que representa a resistência que o material tem depois de danificado, comparativamente à resistência à tração que este tinha quando intacto. Para este cálculo recorreu-se à seguinte expressão:

$$RTR = \frac{Td}{Ti} \times \quad [\quad] \quad (1.4)$$

Onde, Td é o valor médio da resistência à tração dos provetes danificados e Ti o valor médio da resistência à tração dos provetes intactos.

A figura 4.10 representa as curvas obtidas no ensaio de tração para cada provete intacto do geotêxtil NT400 e a respetiva curva média. De salientar que as curvas médias para caso de danificação permitem uma melhor e mais precisa análise (entre os vários tipos de danificação) e posterior comparação dos resultados obtidos.

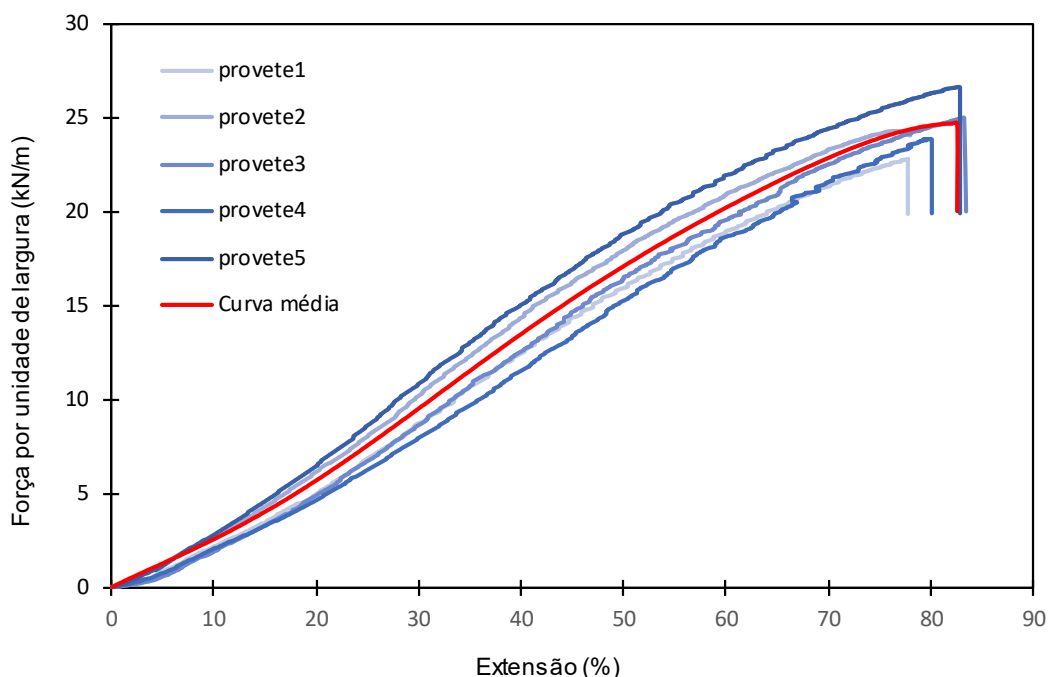


Fig.4.10- Curvas força-extensão dos cinco provetes de geotêxtil NT400 e respetiva curva média

A partir das curvas relativas ao ensaio de cada provete calculou-se a rigidez secante a 2%, 5% e 10% (1.5), como está especificado na norma NP EN ISO 10319:2005, com o objetivo de avaliar a variação da rigidez dos geossintéticos em estudo, antes e após as danificações com os diferentes resíduos e *corundum*. Na tabela 4.6 e a título de exemplo encontram-se representados os valores de rigidez obtidos em todos os provetes, a 2%, 5% e 10% de extensão

$$J = \frac{T}{\varepsilon} \times [kN \ m] \quad (1.5)$$

Onde T é a força por unidade de largura (para a extensão especificada) em kN/m e ε a extensão especificada em percentagem.

Tabela 4.6- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil NT400

Proвете	J _{sec2%} [kN/m]	J _{sec5%} [kN/m]	J _{sec10%} [kN/m]
1	7,15	17,14	21,67
2	20,40	24,50	27,23
3	6,55	11,42	18,82
4	10,40	15,00	20,60
5	18,80	18,14	27,94
Valor Médio	12,66	18,14	23,25
Desvio Padrão	6,53	5,40	4,09
Coefficiente de Variação [%]	51,6	29,8	17,6

De modo a quantificar a variação da resistência à tração associada a cada geossintético, determinou-se a resistência à tração residual (RTR, em %), que representa a quantidade de resistência que o material tem depois de danificado, comparativamente à resistência à tração que este tinha quando intacto. Para este cálculo recorreu-se à seguinte expressão:

$$RTR = \frac{Td}{Ti} \times [\quad] \quad (1.4)$$

Onde, Td é o valor médio da resistência à tração dos provetes danificados e Ti o valor médio da resistência à tração dos provetes intactos.

4.4.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

O ensaio de punçoamento estático foi realizado com base na NP EN ISO 12236:2008 de modo determinar a resistência ao punçoamento estático e deslocamento para a força máxima dos geossintéticos em estudo, através da quantificação da força que pressiona um pilão de extremidade plana através dos materiais. O ensaio é aplicável à maior parte dos geossintéticos, com exceção de materiais com aberturas superiores a 10 mm. Precisamente por este motivo, este ensaio só foi realizado para os geotêxteis tecidos e não-tecidos, não tendo sido realizado para a geogrelha.

4.4.3.1. PROCEDIMENTO

Os ensaios de punçoamento estático realizaram-se na mesma máquina dos ensaios de tração (*Lloyd Instruments*, modelo LR 50 K), equipada também com a célula de carga de 10 kN. Cortaram-se os provetes em forma de círculo, com uma área útil de ensaio de 50 mm de diâmetro (Fig. 4.11a) De seguida e para que se pudesse iniciar o ensaio procedeu-se à fixação dos provetes entre dois anéis de aço com diâmetro interno igual a $(150 \pm 0,5)$ mm (processo realizado para cada provete). A fixação dos geotêxteis tecidos (T80 e T200) teve de ser adaptada de modo a não existir escorregamento dos provetes, e para tal efetuaram-se colagens de geotêxteis não-tecidos, como podemos ver na figura 4.11b. Após toda a montagem deu-se início ao ensaio, fazendo então descer o pilão com $(50 \pm 0,5)$ mm de diâmetro em direção ao provete, até este entrar em contacto com o material e sem infringir qualquer tipo de deslocamento no mesmo (posição inicial de referência). De seguida, o pilão avançou a uma velocidade constante de 50 mm/min, tendo sido registados os valores da força de punçoamento e deslocamento, até à rotura. A figura 4.11c apresenta já o pilão em contacto com o material durante o ensaio.

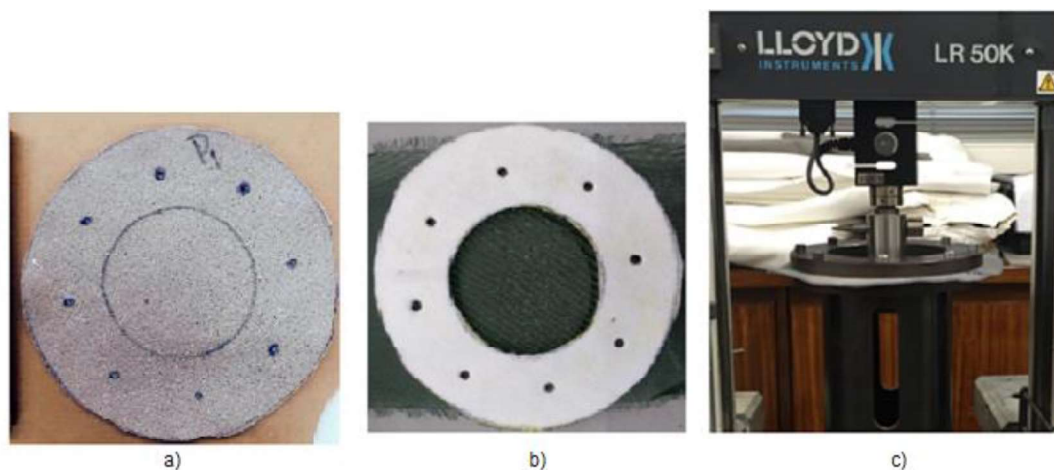


Fig.4.11- Ensaio de punção estático: a) provete de NT400; b) exemplo de colagem dos provetes de T200, c) ensaio de punção a decorrer.

4.4.3.2. TRATAMENTO DE DADOS

Para cada um dos geossintéticos foram testados cinco provetes, como no ensaio de tração, e para cada um desses provetes as propriedades determinadas foram a força (em N) e a distância percorrida pelo pilão após ter iniciado o contacto com o material (em mm). Na tabela 4.7 encontram-se os resultados obtidos durante o ensaio de punção estático dos provetes intactos do geotêxtil NT400, onde foram calculadas a força máxima de punção (F_p , em N) e o deslocamento obtido para essa mesma força (h_p , em mm). Na figura 4.12 estão representadas as curvas força-deslocamento obtidas no ensaio de punção estático para os cinco provetes do geotêxtil NT400 e a respetiva curva média.

Tabela 4.7 Resultados obtidos no ensaio de punção estático do geotêxtil NT400 (amostra de referência).

Proвете	F_p (N)	h_p [mm]
1	4773	63,7
2	5105	66,2
3	4886	64,3
4	4630	62,7
5	5278	66,2
Valor médio	4934	64,6
Desvio padrão	259	1,6
Coefficiente de variação [%]	5,2	2,4

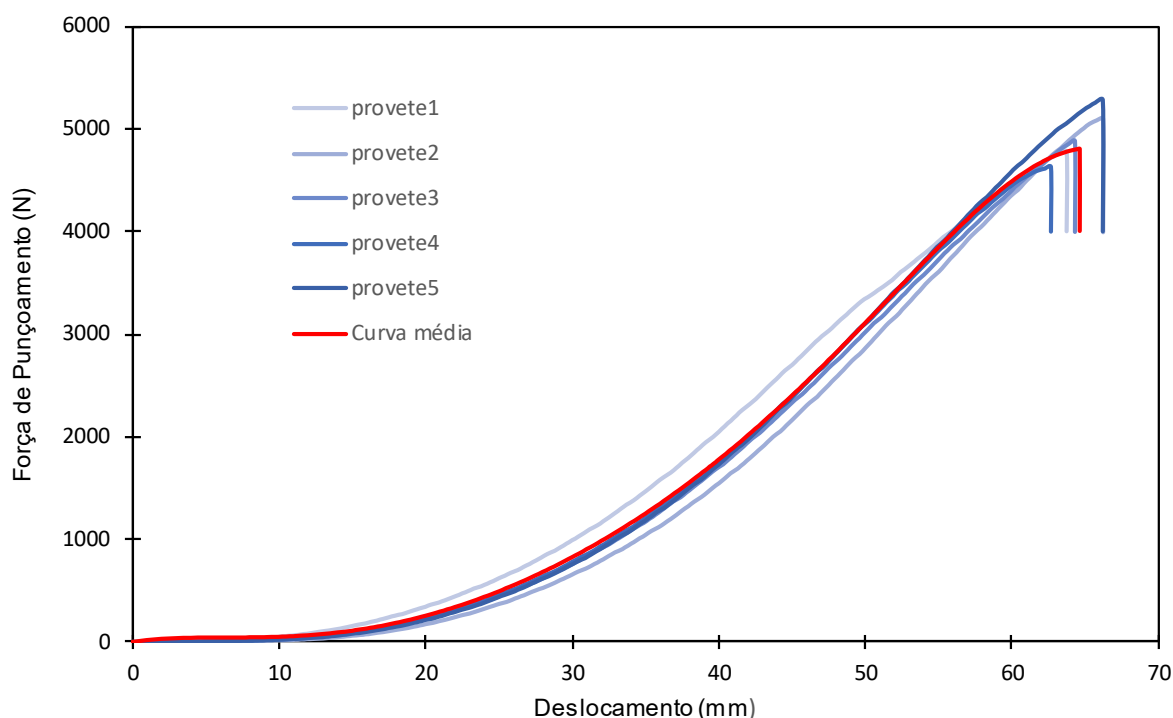


Fig.4.12- Curvas força-deslocamento dos 5 provetes intactos do geotêxtil NT400 no ensaio de punçãoamento estático

Analogamente ao procedimento efetuado no ensaio de tração e de modo a perceber qual a variação de resistência dos provetes danificados com os resíduos e o *corundum* comparativamente aos provetes intactos, calculou-se a resistência ao punçãoamento residual (RPR), que traduz a capacidade resistente do material após os ensaios de degradação mecânica em percentagem, através da seguinte expressão:

$$RPR = \frac{FPd}{FPI} \times [\quad] \quad (1.6)$$

Onde FPd é o valor médio da resistência ao punçãoamento dos provetes danificados e FPI o valor médio da resistência ao punçãoamento dos provetes intactos.

4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa experimental teve como objetivo perceber o comportamento dos geossintéticos quando usados em aterros constituídos por resíduos reciclados. Assim sendo utilizaram-se três RCD, um resíduo não reciclado (cinzas) e o *corundum* e ensaiaram-se os geossintéticos (danificados e intactos) à tração e ao punçãoamento, de modo a avaliar a variação das propriedades mecânicas induzidas pelos materiais utilizados na danificação mecânica, estabelecendo sempre que possível relações entre os mesmos a partir dos resultados obtidos. No capítulo seguinte são apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise de resultados, e fazem-se ainda algumas comparações com resultados obtidos em estudos efetuados por outros autores.

5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram identificados os materiais em estudo e descritos os ensaios de danificação mecânica, de tração e de punçoamento estático. Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração e de punçoamento para cada geossintético sujeito a danificação mecânica, comparativamente com os resultados obtidos para as amostras intactas dos mesmos materiais. O principal objetivo é estabelecer ligações e/ou comparações das danificações ocorridas nos diferentes geossintéticos utilizados neste estudo, e ainda comparar com os resultados de Violante (2016), onde foram utilizados solos naturais na danificação mecânica.

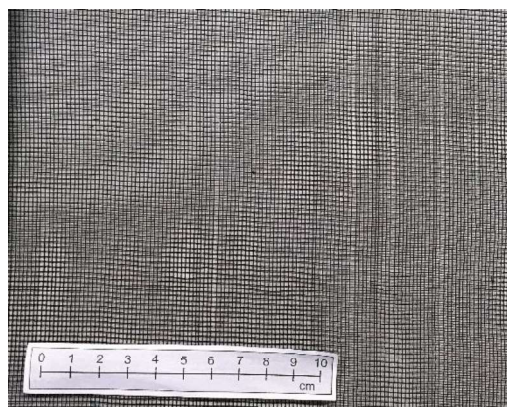
5.2. GEOTÊXTIL TECIDO T80

5.2.1. ANÁLISE VISUAL

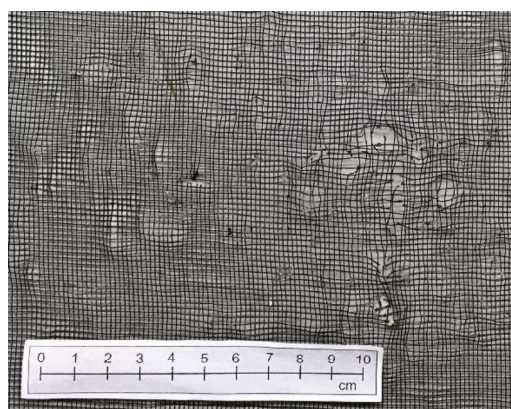
O geotêxtil tecido T80 foi afetado de modo distinto, dependendo do resíduo usado na danificação mecânica. O RCD fino praticamente não provocou danos nos provetes (fig. 5.1b), ao contrário dos restantes materiais de danificação utilizados. Como podemos ver na figura 5.1, o RCD cerâmico (fig. 5.1c), RCD de betão (fig. 5.1d), as cinzas (fig. 5.1e) e *corundum* (fig. 5.1f) provocaram danos significativos no geossintético em análise. Os danos visualmente mais graves foram provocados pelo RCD cerâmico e pelo *corundum* e reproduziram-se em cortes, abrasões e punçoamentos pontuais. Através da análise visual espera-se que o RCD fino não induza grandes perdas de resistência no geotêxtil, o RCD cerâmico, o RCD de betão e as cinzas levem a perdas semelhantes de resistência. Por último espera-se que o *corundum* seja o material de danificação que induz decréscimos mais significativos da resistência do geotêxtil T80.



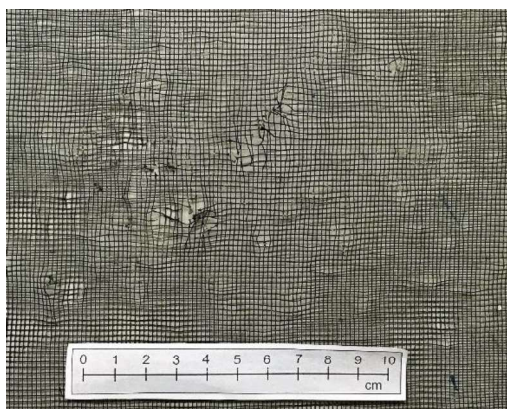
a)



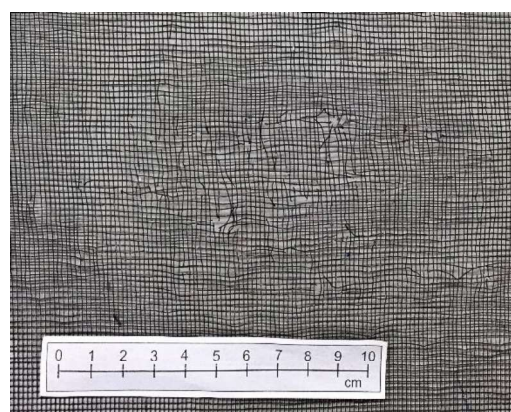
b)



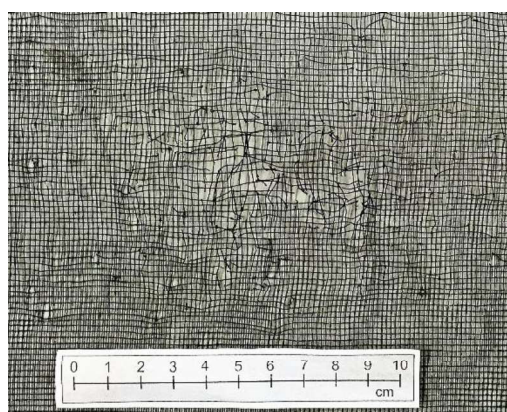
c)



d)



e)



f)

Fig.5.1- Geotêxtil T80: a) intacto; b) danificado com RCD fino; c) danificado com RCD cerâmico; d) danificado com RCD de betão; e) danificado com cinzas; f) danificado com *corundum*

5.2.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Através do ensaio de tração avaliaram-se as alterações das propriedades mecânica do geotêxtil T80 (T , ϵ_{FM} e RTR) após a danificação com os materiais de danificação referidos anteriormente. Os resultados obtidos neste ensaio encontram-se sintetizados na tabela 5.1.

Tabela 5.1- Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil T80 (amostras intacta e danificadas)

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Não danificado	11,48 (2,8%)	29,4 (9,6%)	-
Danificado com RCD fino	11,56 (2,1%)	27,5 (6,5%)	100,7
Danificado com RCD cerâmico	5,06 (14,2%)	14,3 (9,4%)	44,1
Danificado com RCD de betão	5,09 (16,4%)	13,9 (12,5%)	44,3
Danificado com cinzas	4,35 (14,4%)	11,4 (10,7%)	37,9
Danificado com <i>corundum</i>	2,52 (7,9%)	10,8 (26,9%)	22,0

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

O RCD fino não provocou danificação no geotêxtil T80, uma vez que a sua resistência à tração quando danificado com este resíduo era similar à resistência à tração do original. Já a extensão na força máxima diminuiu em aproximadamente 2%, tendo então este material danificado deformado menos que o material intacto.

Os RCD cerâmico, RCD de betão e as cinzas provocaram perdas de resistência muito semelhantes, sendo que as maiores se verificaram nas amostras danificadas com cinzas, uma vez que este resíduo têm na sua constituição material cortante. A resistência à tração do geotêxtil T80, após danificação com estes três resíduos, diminuiu em 55,9%, 55,7% e 62,1% (RCD cerâmico, RCD de betão e cinzas, respetivamente).

O *corundum* foi material que provocou mais danos no geotêxtil T80. Este apenas conseguiu manter 22,0% da sua capacidade resistente.

Os valores obtidos na tabela 5.1, tanto em termos de variação da resistência à tração, como de extensão na força máxima foram mais desfavoráveis (maior diminuição) quando se utilizou *corundum* na danificação mecânica e menos desfavoráveis quando se utilizou RCD fino. Para os restantes resíduos obtiveram-se resultados semelhantes e intermédios aos obtidos com o RCD fino e o *corundum*.

Para completar a avaliação da danificação provocada pelos resíduos e pelo *corundum* no geotêxtil T80, apresentam-se as curvas médias obtidas (figura 5.2) para cada caso de danificação e calculou-se ainda a rigidez secante do geotêxtil a 2%, 5% e 10% de extensão (tabela 5.2).

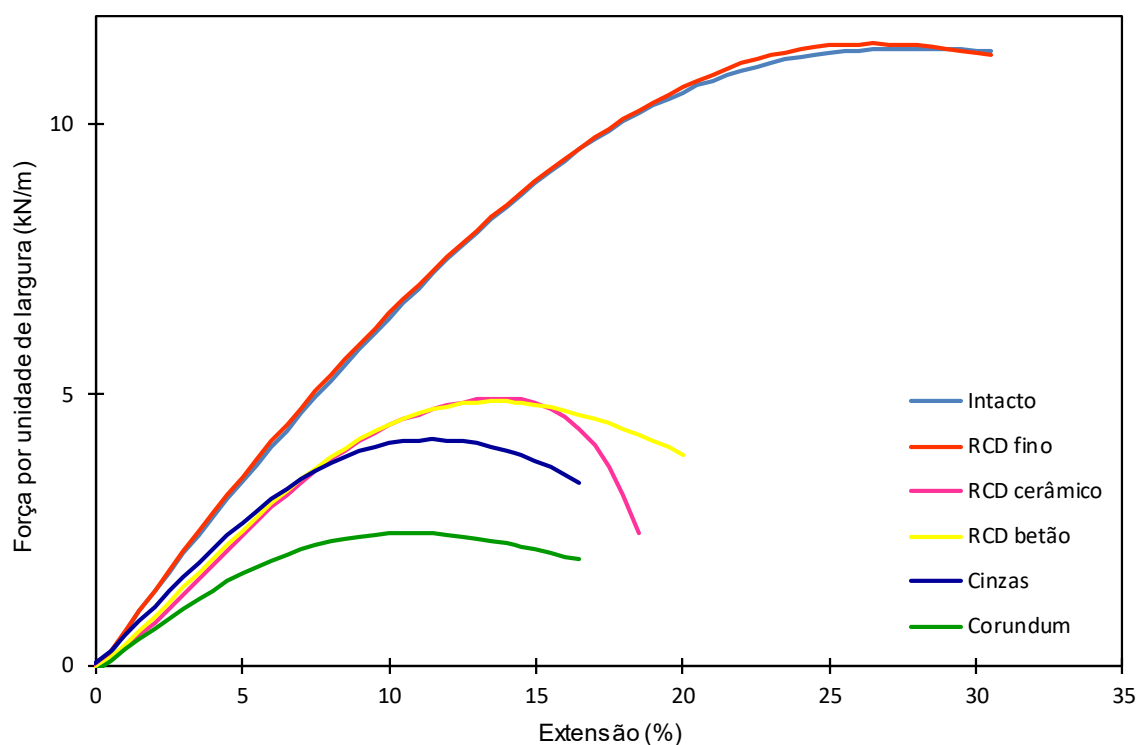


Fig.5.2 - Curvas médias força-estiramento obtidas para a o geotêxtil T80, antes e após a danificação mecânica

Tabela 5.2- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil T80, antes e após a danificação mecânica

	J _{sec} 2%	J _{sec} 5%	J _{sec} 10%
	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
Intacto	62,4 (18,2%)	69,2 (6,1%)	64,0 (2,3%)
Danificado com RCD fino	66,1 (16,1%)	70,6 (7,7%)	64,7 (3,5%)
Danificado com RCD cerâmico	41,1 (32,7%)	48,3 (19,5%)	44,6 (12,7%)
Danificado com RCD de betão	43,0 (25,1%)	50,4 (14,0%)	43,8 (14,4%)
Danificado com cinzas	53,2 (13,5%)	53,2 (12,8%)	41,3 (12,5%)
Danificado com <i>corundum</i>	35,5 (18,5%)	34,5 (11,1%)	23,7 (9,8%)

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

Pode-se constatar que a danificação com RCD fino analogamente ao sucedido nos outros parâmetros de avaliação da mesma (resistência à tração e extensão na força máxima), praticamente não afetou a rigidez do geotêxtil T80. O *corundum* foi o material que maior decréscimo de rigidez provocou neste geotêxtil tecido e os RCD cerâmico, RCD de betão e cinzas os que mais uma vez tiveram comportamentos intermédios e sem grandes diferenças significativas.

É importante referir que para todos os casos de danificação, a rigidez obtida para os 2% de extensão não diferiu significativamente das obtidas para 5% e 10%. Os coeficientes de variação obtidos no cálculo da

rigidez para as três extensões especificadas diminuíram com o aumento da extensão, ou seja obtiveram-se coeficientes de variação superiores para os 2% de extensão e mais baixos para os 10%. Este acontecimento deveu-se algumas condições de ensaio mais difíceis de controlar, como por exemplo o ajuste das garras logo no início do ensaio.

5.2.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

Neste ponto apresentam-se e avaliam-se os resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil T80. Na tabela 5.3 estão representados os valores médios dos parâmetros obtidos neste ensaio após a danificação mecânica (força máxima de punçoamento, deslocamento na força máxima e a resistência ao punçoamento residual).

Tabela 5.3- Valores obtidos nos ensaios de punçoamento do geotêxtil T80 (amostras intactas e danificadas)

	F _P [N]	h _P [mm]	RPR [%]
Não danificado	1603 (1,5%)	39,8 (1,9%)	-
Danificado com RCD fino	1445 (4,0%)	44,0 (11,4%)	90,4
Danificado com RCD cerâmico	544 (23,8%)	30,2 (13,2%)	33,9
Danificado com RCD de betão	715 (26,7%)	33,0 (6,8%)	44,6
Danificado com cinzas	759 (17,4%)	33,2 (7,9%)	47,4
Danificado com <i>corundum</i>	88 (39,4%)	20,0 (29,0%)	5,5

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

O RCD fino não teve muita influência em termos de danificação deste material, o geotêxtil T80 sofreu uma pequena redução na sua resistência ao punçoamento, embora que superior à obtida no ensaio de tração, passando a suportar cerca de 90% das cargas que suportadas quando intacto. Em termos de deslocamento na força máxima para o geotêxtil danificado com RCD fino obteve-se um valor superior ao do material intacto, o que não era muito previsível, mas que pode ser justificado pela falta de controlo na heterogeneidade dos geossintéticos (como podemos comprovar pelos coeficientes de variação obtidos).

Os RCD cerâmico, RCD de betão e cinzas mantiveram uma contribuição muito significativa em termos de danificação do geotêxtil, embora tenha sido o RCD cerâmico a induzir o maior decréscimo de resistência ao punçoamento neste geotêxtil (66,1%). Comparando estes decréscimos de resistência ao punçoamento, com os obtidos para o ensaio de tração, verificou-se que nos ensaios de punçoamento, estes decréscimos foram mais significativos. Obtiveram-se, ainda, para o geotêxtil danificado com RCD cerâmico, deslocamentos na força máxima inferiores em quase 10% relativamente ao obtido nas amostras intactas.

Para as amostras danificadas com RCD de betão e com cinzas obtiveram-se 55,4% e 52,6% de perda de resistência ao punçoamento. Estes resíduos induziram reduções de resistência tanto à tração como ao punçoamento muito próximas e semelhantes para este geotêxtil tecido. Os valores obtidos no deslocamento na força máxima para as amostras danificadas com o RCD de betão e com as cinzas foram

semelhantes entre si e inferiores aos do geotêxtil intacto, tendo sofrido neste parâmetro uma redução de aproximadamente 6,5 mm.

Para as amostras de geotêxtil T80 danificadas com *corundum*, atingiram-se perdas de resistência ao punçoamento muito graves e deslocamentos na força máxima mais pequenos que nos outros casos. Este geotêxtil apenas manteve cerca de 5% da sua resistência ao punçoamento relativamente às amostras intactas, o que leva a concluir que tanto para a tração como para o punçoamento, o *corundum* é o material que mais influenciou negativamente a capacidade resistente do geotêxtil T80.

Estas afirmações face aos resultados dos ensaios de punçoamento estático para o geotêxtil T80 podem ser comprovadas através da análise da figura 5.3, onde estão representadas as curvas médias obtidas nos ensaios de punçoamento estático para cada tipo de danificação e para as amostras intactas.

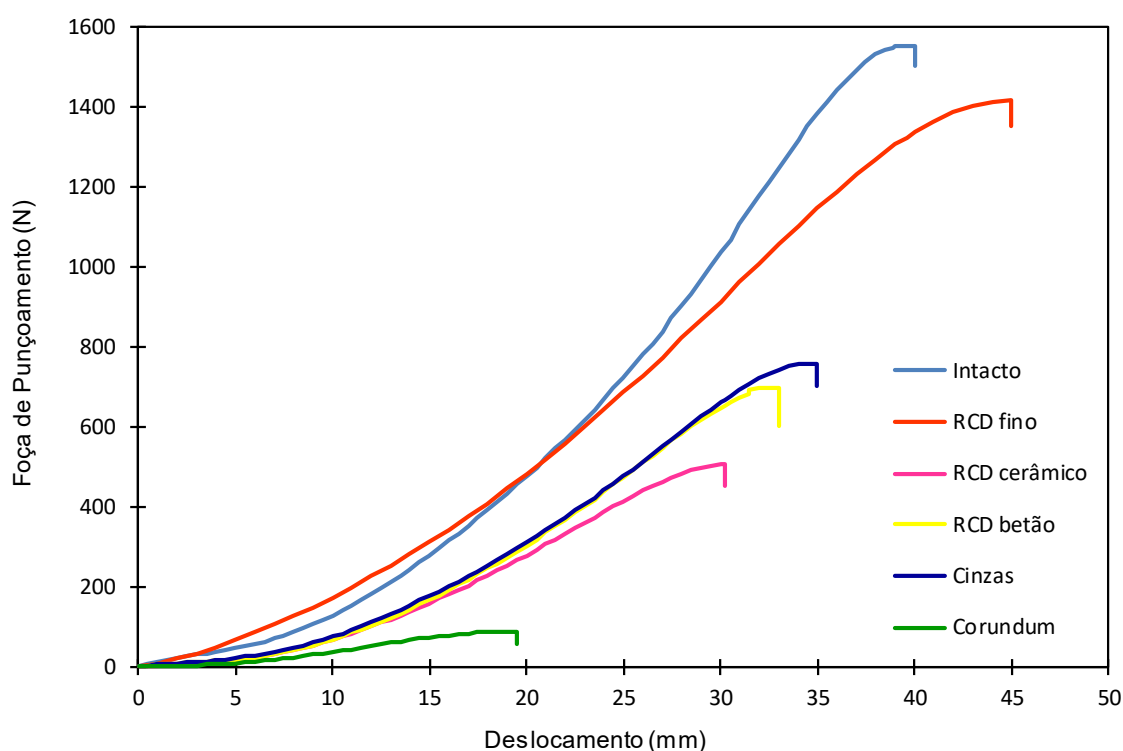


Fig.5.3-Curvas médias força-deslocamento obtidas para os ensaios de punçoamento do geotêxtil T80

5.3. GEOTÊXTEL TECIDO T200

5.3.1. ANÁLISE VISUAL

O geotêxtil T200, como podemos ver na figura 5.4, aparenta ter sido mais danificado pelos RCD cerâmico (fig. 5.4c), RCD de betão (fig. 5.4d), cinzas (fig. 5.4e) e *corundum* (fig. 5.4f) do que pelo RCD fino (fig. 5.4b), que poucos ou nenhuns danos parece ter causado. A olho nu conseguem-se identificar pequenos punçoamentos pontuais e pequenos cortes de filamentos nas amostras danificadas com RCD cerâmico, RCD de betão, cinzas e *corundum*.

Comparativamente ao outro geotêxtil tecido utilizado neste trabalho (T80), o geotêxtil T200 foi visivelmente menos danificado, por este ser mais robusto (maior MUA e espessura) não permitiu o aparecimento de cortes e punçoamentos pontuais tão graves durante a danificação mecânica como o geotêxtil T80.



Fig.5.4- Geotêxtil T200: a) intacto; b) danificado com RCD fino; c) danificado com RCD cerâmico; d) danificado com RCD de betão; e) danificado com cinzas; f) danificado com *corundum*

5.3.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Neste ponto são apresentados e interpretados os resultados obtidos nos ensaios de tração para o geotêxtil T200 (tabela 5.4).

Tabela 5.4- Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil T200 (amostras intactas e danificadas)

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Não danificado	28,25 (3,0%)	53,6 (6,0%)	-
Danificado com RCD fino	27,00 (3,3%)	53,2 (2,1%)	95,6
Danificado com RCD cerâmico	19,61 (3,7%)	31,4 (6,6%)	69,4
Danificado com RCD de betão	18,68 (7,9%)	33,8 (6,2%)	66,1
Danificado com cinzas	19,17 (4,3%)	30,8 (8,1%)	67,9
Danificado com <i>corundum</i>	13,26 (5,3%)	20,2 (4,0%)	46,9

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

O geotêxtil tecido T200 perdeu muito pouca resistência à tração quando danificado com RCD fino, tendo sofrido um decréscimo de 4,4%. Também a extensão na força máxima, para as amostras danificadas com este resíduo sofreu uma pequena redução, fazendo deste modo com que o RCD fino fosse o resíduo que menos contribuiu para a alteração das capacidades resistentes do geotêxtil T200.

O RCD cerâmico, RCD de betão e cinzas induziram perdas de resistência à tração muito semelhantes no geotêxtil (30,6%, 33,9% e 32,1%, respetivamente). Para além da semelhança nas perdas de resistência à tração, fizeram-se notar também as semelhanças na diminuição da extensão na força máxima.

O *corundum* voltou a provocar mais danos que os resíduos, tendo induzido reduções de resistência à tração de 53,1% e de extensão na força máxima de 33,4%, logo mais significativas.

O geotêxtil T200 sofreu menores perdas de resistência à tração e menores reduções de extensão na força máxima que o geotêxtil T80. Tal deve-se ao facto do geotêxtil T200 ser um material com maior MUA e espessura, sendo mais robusto e menos suscetível à danificação provocada pelos resíduos e pelo *corundum* do que o geotêxtil T80. Por exemplo, as amostras do geotêxtil T200 danificadas com cinzas sofreram um decréscimo da sua resistência à tração de 32,1%, inferior ao obtido para o geotêxtil T80 (62,1%).

Determinaram-se as curvas médias dos ensaios de tração do geotêxtil T200 (Fig. 5.5), onde se podem comprovar os resultados obtidos. Calculou-se ainda a rigidez secante para as extensões especificadas (tabela 5.4).

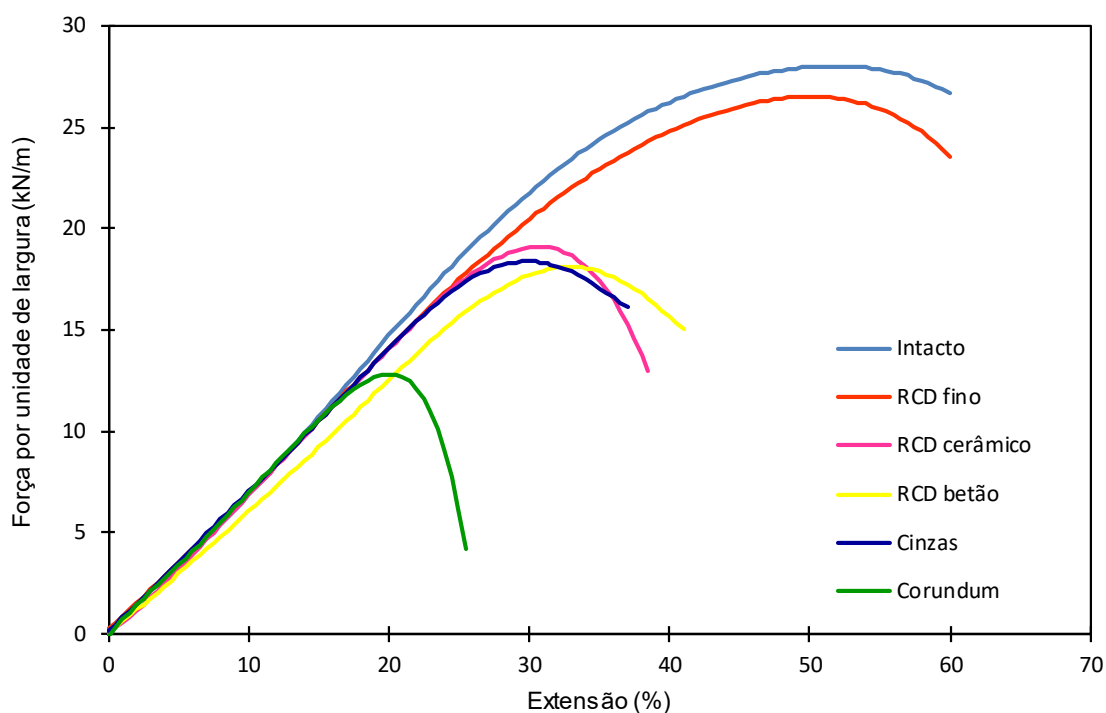


Fig.5.5- Curvas médias tração-extensão obtidas para o ensaio de tração do geotêxtil T200

Tabela 5.5- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil T200, antes e após a danificação mecânica

	J _{sec} 2%	J _{sec} 5%	J _{sec} 10%
	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
Intacto	82,1 (6,2%)	66,8 (4,4%)	67,8 (6,8%)
Danificado com RCD fino	81,1 (7,3%)	70,1 (3,7%)	68,7 (5,4%)
Danificado com RCD cerâmico	60,1 (8,5%)	64,9 (14,6%)	67,4 (2,8%)
Danificado com RCD de betão	62,1 (15,8%)	60,3 (10,4%)	59,6 (11,7%)
Danificado com cinzas	77,8 (6,2%)	71,6 (4,1%)	69,6 (5,5%)
Danificado com <i>corundum</i>	70,8 (14,1%)	68,6 (2,8%)	70,2 (2,4%)

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

Em termos de rigidez do geossintético, verificou-se que os valores obtidos em cada caso de danificação não diferem muito significativamente (principalmente uma extensão de 10%). O que permite afirmar que os diversos casos de danificação (com os diferentes resíduos e corundum) não contribuem com uma variação pronunciada da rigidez do geotêxtil T200. Os valores de rigidez obtidos para o geotêxtil T200 intacto e danificado com RCD fino foram semelhantes. Relativamente aos restantes resíduos e ao *corundum* não se conseguem definir padrões significativos, para além do facto dos valores de rigidez a 2%, 5% e 10% serem semelhantes entre si, contrariamente ao que aconteceu com o geotêxtil T80. As

diferenças de rigidez obtidas nos diferentes casos de danificação não são tão nítidas neste geotêxtil tecido como no geotêxtil T80 e isto verificou-se em todas as extensões especificadas.

5.3.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

A tabela 5.5 sintetiza os resultados obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil T200 que podem ser complementados pela figura 5.6, onde estão representadas as curvas médias relativas aos diferentes casos de danificação e isenção de danificação.

Tabela 5.6- Valores obtidos nos ensaios de punçoamento do geotêxtil T200 (amostras intactas e danificadas)

	F _P [N]	h _P [mm]	RPR [%]
Não danificado	4372 (5,2%)	54,7 (9,5%)	-
Danificado com RCD fino	4184 (2,0%)	52,2 (2,3%)	95,7
Danificado com RCD cerâmico	2673 (10,9%)	38,4 (6,5%)	61,1
Danificado com RCD de betão	3088 (9,5%)	49,1 (9,0%)	70,6
Danificado com cinzas	2383 (8,2%)	42,4 (3,6%)	54,5
Danificado com corundum	1452 (5,0%)	31,5 (21,2%)	33,2

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

Mais uma vez o resíduo mais fino foi o que provocou menos danificação no geotêxtil T200. Obteve-se uma perda de resistência para as amostras danificadas com este resíduo de 4,3%, e redução do deslocamento na força máxima em 1,5 mm, permitindo deste modo concluir que este resíduo não afeta significativamente o geotêxtil. Estas perdas menos relevantes de resistência ocorreram tanto para a tração como para o punçoamento de forma semelhante e com efeito muito reduzido.

Os materiais de danificação de maior granulometria contribuíram para reduções de resistência mais relevantes no geotêxtil. Os RCD cerâmico, RCD de betão e cinzas induziram novamente valores intermédios em termos de perda de resistência ao punçoamento, tendo-se traduzido em reduções de 38,9%, 29,4% e 45,5% da resistência ao punçoamento. Contrariamente ao que se obteve no ensaio de tração, destes três resíduos, foram as cinzas que induziram maior danificação no geotêxtil T200 e consequentemente maior perda de resistência. Nestas condições, o RCD de betão foi o resíduo que provocou o menor decréscimo de resistência ao punçoamento. Tal alteração pode dever-se ao facto do RCD de betão ser constituído maioritariamente por partículas mais arredondadas e as cinzas por material anguloso e cortante. Sendo o material em estudo um geotêxtil tecido (constituído por filamentos) prevê-se que o corte dos filamentos constituintes contribua negativamente para a resistência ao punçoamento do geotêxtil. Deste modo quantos mais filamentos cortados ou danificados, menor resistência ao punçoamento o geotêxtil apresenta. Isto verificou-se nos casos de danificação com as cinzas, em que após a danificação mecânica verificou-se que o geotêxtil T200 tinha muitos dos seus filamentos constituintes cortados. Este acontecimento foi comprovado durante o ensaio de punçoamento, uma vez que as cinzas foram o resíduo que maior redução de resistência ao punçoamento induziu.

O *corundum* foi novamente o material para o qual se obtiveram os resultados mais gravosos, em que o geotêxtil T200 obteve uma perda de 76,8% da sua resistência ao punçoamento e uma redução em 23,2

mm do deslocamento na força máxima. Para este geotêxtil obtiveram-se perdas de resistência mais elevadas no ensaio de punçoamento estático do que no ensaio de tração. Estas perdas de resistência mais acentuadas nos ensaios de punçoamento das amostras danificadas com *corundum* devem ao facto de o *corundum*, ser constituído por partículas muito angulosas. Apesar de não ter partículas de grandes dimensões (como por exemplo o RCD de betão), a forma das mesmas acabou por provocar cortes e punçoamentos muito graves nos filamentos do geotêxtil tecido T200, e analogamente ao sucedido para as danificações com cinzas, induziu perdas de resistência superiores para esta propriedade.

Em termos de comparação com o geotêxtil T80, obtiveram-se perdas de resistência ao punçoamento menos graves no geotêxtil T200, assim como deslocamentos para a força máxima com decréscimos inferiores. Mais uma vez estes resultados devem-se à elevada MUA e espessura que o geotêxtil T200 apresenta, como foi referido anteriormente.

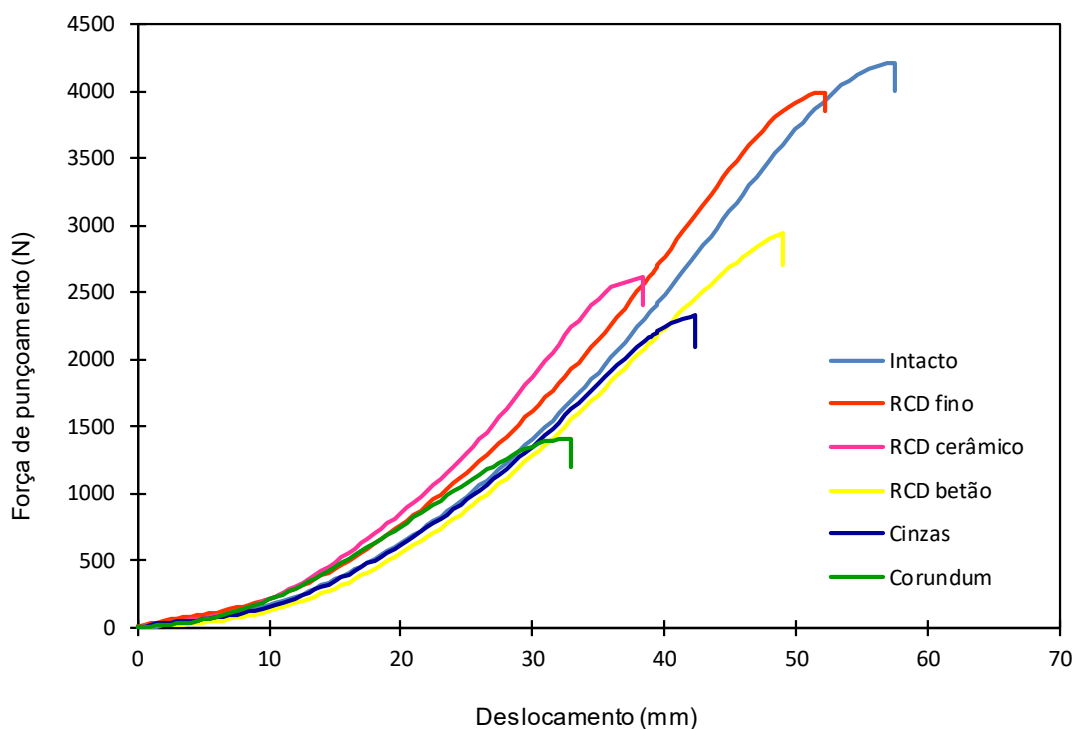


Fig.5.6- Curvas médias força-deslocamento obtidas para o ensaio de punçoamento do geotêxtil T200

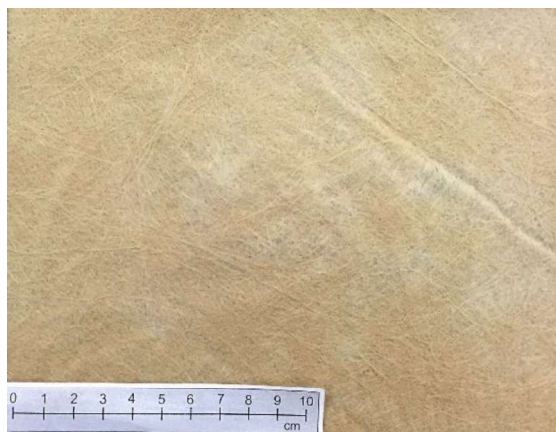
5.4. GEOTÊXTEL NÃO-TECIDO NT100

5.4.1. ANÁLISE VISUAL

Este geotêxtil não-tecido foi o geossintético que tátil e visualmente mais fez notar a sua heterogeneidade (quando intacto). Este facto foi reforçado na determinação da MUA e espessura, onde se obtiveram os maiores coeficientes de variação de todos os geossintéticos em estudo. Após a danificação mecânica, foi possível observar que todos os materiais utilizados na danificação mecânica induziram punçoamentos pontuais, cortes e principalmente efeitos abrasivos no geotêxtil não-tecido, à exceção do RCD fino, como podemos ver na figura 5.7. Nas amostras danificadas com RCD fino (fig.5.7b) não foi possível visualizar qualquer tipo de mecanismo de danificação mecânica a olho nu, o que faz com que se esperem muito poucas reduções de resistência tanto ao punçoamento como à tração comparativamente com as amostras intactas ensaiadas (fig.5.7a). Foi nas amostras danificadas com RCD cerâmico (fig.5.7c), RCD de betão (fig.5.7d), cinzas (fig.5.7e) e *corundum* (fig.5.7f) que se identificaram visualmente os punçoamentos e cortes mais graves.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fig.5.7- Geotêxtil NT100: a) intacto; b) danificado com RCD fino; c) danificado com RCD cerâmico; d) danificado com RCD de betão; e) danificado com cinzas; f) danificado com *corundum*

5.4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Analogamente aos ensaios de tração dos materiais anteriores, neste ponto, e sintetizados na tabela 5.6 encontram-se os valores médios dos parâmetros obtidos neste ensaio, para cada material usado na danificação mecânica assim como para as amostras não danificadas.

Tabela 5.7- Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil NT100 (amostras intactas e danificadas)

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Não danificado	8,80 (10,4)	71,1 (13,8)	-
Danificado com RCD fino	7,36 (8,2)	57,5 (16,1)	83,6
Danificado com RCD cerâmico	5,60 (12,2)	44,7 (27,9)	63,6
Danificado com RCD betão	4,99 (13,7)	44,8 (17,0)	56,7
Danificado com cinzas	3,88 (11,1)	41,5 (15,2)	44,1
Danificado com corundum	2,27 (21,2)	38,6 (32,1)	25,8

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

O geotêxtil NT100 suportou esforços de tração inferiores aos geotêxteis tecidos analisados anteriormente, contudo atinge extensões para a força máxima superiores, por ser um material mais extensível que os referidos.

O RCD fino danificou menos gravosamente o geotêxtil não-tecido, contudo de modo um pouco mais significativo que nos geotêxteis T80 e T200. Neste geotêxtil (NT100) foram induzidas perdas de resistência à tração de 16,4% e decréscimos de extensão na força máxima de 13,6 % comparativamente com amostras do mesmo geossintético não danificado.

O RCD cerâmico e o RCD de betão acabaram por ter um efeito semelhante em termos de danificação deste material, tendo induzido perdas de resistência à tração de 36,4% e 43,3 %, respetivamente. Este efeito semelhante pode dever-se ao facto destes resíduos terem valores de D_{50} aproximados. Em termos de extensão na força máxima, para este material obtiveram-se valores muito semelhantes para as amostras submetidas a danificação mecânica com RCD cerâmico e RCD de betão.

Relativamente às cinzas, que nos geotêxteis tecidos induziram danificação semelhante à causada pelos RCD cerâmico e RCD de betão, no geotêxtil NT100 acabaram por induzir uma redução mais pronunciada da resistência à tração. Para além deste decréscimo de resistência à tração (55,9%), contribuiu ainda para uma diminuição, também esta mais pronunciada, da extensão na força máxima que os RCD cerâmico e RCD de betão. De referir ainda, que as cinzas induziram perdas de resistência à tração mais significativas no geotêxtil NT100 do que nos geotêxtil tecido T200 e semelhantes às induzidas para o geotêxtil T80.

O *corundum* foi o material que fez com que a resistência à tração do geotêxtil reduzisse mais drasticamente, sendo que neste caso o geotêxtil NT100 apenas manteve 25,8% da sua resistência à tração. Obteve-se ainda a diminuição mais acentuada da extensão para a força máxima do geotêxtil neste caso de danificação do que para os resíduos, tendo a extensão diminuído 32,5%.

Para completar esta análise dos resultados obtidos para este geossintético, obtiveram-se as curvas médias associadas a cada caso de danificação mecânica (fig.5.8) e calculou-se a rigidez secante para cada um desses casos a 2%, 5% e 10% de extensão (tabela5.7).

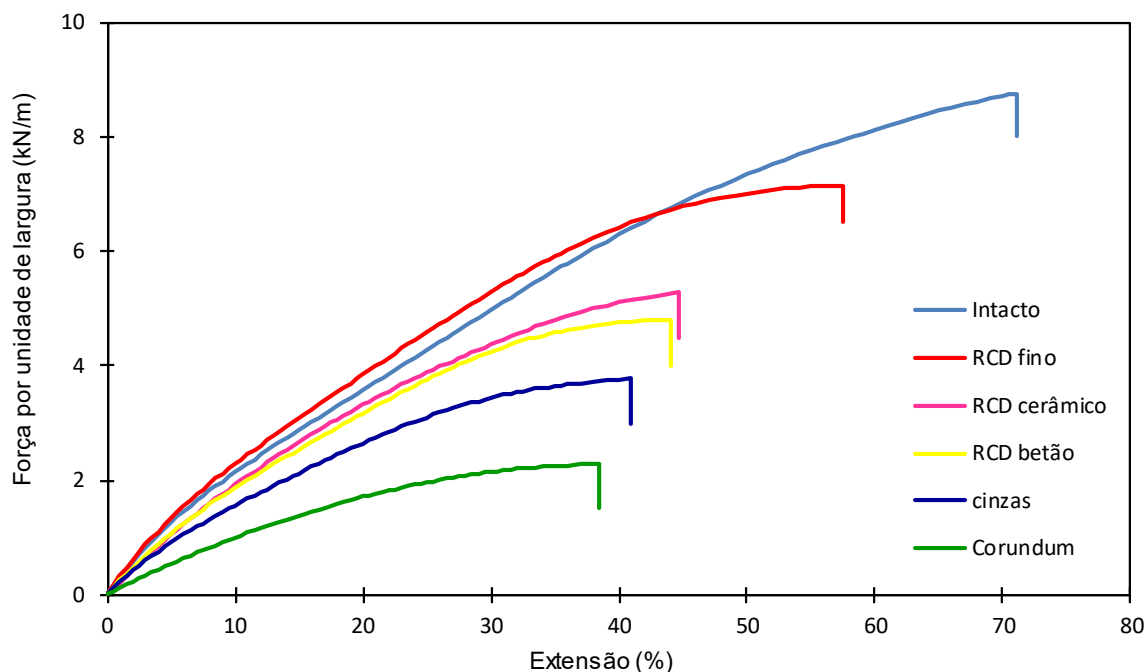


Fig.5.8- Curvas médias obtidas nos ensaio de tração do geotêxtil NT100

Tabela 5.8- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil NT100, antes e após a danificação mecânica

	J _{sec} 2%	J _{sec} 5%	J _{sec} 10%
	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
Intacto	25,4 (21,4%)	24,9 (10,4%)	20,52 (10,3%)
Danificado com RCD fino	22,5 (35,2%)	24,4 (24,2%)	21,6 (20,5%)
Danificado com RCD cerâmico	22,8 (24,4%)	25,9 (39,3%)	21,7 (30,1%)
Danificado com RCD de betão	21,0 (27,8%)	21,0 (20,0%)	18,3 (13,4%)
Danificado com cinzas	17,2 (23,8%)	17,4 (21,4%)	15,0 (19,8%)
Danificado com <i>corundum</i>	9,5 (44,6%)	10,6 (38,9%)	9,8 (37,6%)

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

Analisando a tabela 5.8, podemos ver que a evolução da rigidez a 2%, 5% e 10% de extensão não variou muito relativamente ao sucedido nos casos anteriores, sendo que se obtiveram valores de rigidez semelhantes nas diferentes extensões especificadas.

O RCD fino e o RCD cerâmico, tiveram pouca influência na rigidez do geotêxtil NT100, tendo-se observado comportamentos semelhantes nas amostras danificadas com estes resíduos e nas amostras intactas. Os restantes resíduos (RCD de betão e cinzas) influenciaram de modo semelhante o geotêxtil não-tecido e, mais pronunciados que o observado para o RCD fino e RCD cerâmico. Já para o *corundum*, verificou-se a maior redução de rigidez do material, à semelhança do sucedido para o geotêxtil T80.

Nas determinações da rigidez deste geotêxtil não-tecido obtiveram-se coeficientes de variação muito elevados, não sendo possível tirar conclusões muito significativas e verificar padrões nos resultados obtidos. Isto deve-se não só às características heterogêneas do geotêxtil, mas também aos ajustes das garras ao material que está a ser ensaiado.

5.4.2. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTATICO

Os resultados médios obtidos no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil NT100 encontram-se sintetizados tabela 5.9, e ainda representados através das curvas médias do geotêxtil NT100 relativas a cada caso de danificação e isenção de danificação na figura 5.9.

Tabela 5.9- Valores obtidos nos ensaios de punçoamento do geotêxtil NT100 (amostras intactas e danificadas)

	F _P [N]	h _P [mm]	RPR [%]
Não danificado	1336 (11,7%)	62,8 (28,5%)	-
Danificado com RCD fino	1267 (8,8%)	50,6 (7,3%)	94,8
Danificado com RCD cerâmico	854 (14,6%)	46,5 (6,8%)	63,9
Danificado com RCD de betão	826 (9,2%)	46,9 (7,9%)	61,8
Danificado com cinzas	548 (29,4%)	37,7 (14,6%)	41,0
Danificado com <i>corundum</i>	381 (25,4%)	34,6 (7,8%)	28,5

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

Analogamente ao sucedido nos casos analisados anteriormente, o RCD fino foi o resíduo que induziu menor redução de resistência ao punçoamento e o *corundum*, o que induziu maior redução da mesma resistência, respetivamente 5,2% e 71,5%. Em termos de deslocamento na força máxima, após danificação com RCD fino, obteve-se um deslocamento inferior em aproximadamente 12 mm relativamente ao material intacto. Para o *corundum* essa diferença foi mais do dobro, tendo-se obtido uma diminuição de deslocamento na força máxima de 28 mm aproximadamente. Comparativamente com as reduções de resistência que estes induziram no ensaio de tração para o mesmo geotêxtil, o RCD fino voltou a ter menor influência, como aconteceu para aos geotêxteis T80 e T200, e o *corundum* induziu perdas de resistência semelhantes à tração e ao punçoamento.

Os RCD cerâmico e RCD de betão voltaram a produzir efeitos muito semelhantes, em termos de resistência ao punçoamento, sendo que o geotêxtil não-tecido manteve, respetivamente 63,9% e 61,8% da sua resistência inicial. O deslocamento na força máxima atingido, para os casos de danificação com estes resíduos, reproduziu-se numa diminuição 16,3 mm e 15,9 mm, respetivamente, face ao obtido para as amostras intactas. Em modo de comparação, obtiveram-se valores de capacidade resistente tanto à tração como ao punçoamento similares para os geotêxteis NT100 e T200. Por exemplo, para as amostras

danificadas com RCD cerâmico, os decréscimos de resistência ao punçoamento induzidos foram de 36,1% e 38,9% (NT100 e T200 respetivamente). Já no geotêxtil T80 obtiveram-se perdas de capacidade resistente mais significativas, quando este foi sujeito a danificação mecânica por estes dois resíduos (RCD cerâmico e RCD de betão). Tal deveu-se ao facto do geotêxtil T80 ser o material com menor MUA e menor espessura de todos os geossintéticos utilizados neste estudo e portanto ser mais sensível aos mecanismos de danificação mecânica.

As cinzas induziram uma perda de resistência ao punçoamento similar à induzida para a tração, tendo resultado numa redução de 59,0% da resistência inicial. De notar que as cinzas apesar de conterem partículas de dimensão inferior às dos RCD de betão e cerâmico, possuem na sua constituição material cortante, desde vidros a metais. O que neste tipo de geotêxtil com baixa MUA e espessura pode refletir-se em danificações mais gravosas (cortes e abrasões) que as provocadas por partículas de maior dimensão neste tipo de geotêxtil. Em todos os geotêxteis analisados até este ponto, as cinzas tiveram um efeito muito significativo em termos de danificação mecânica, contribuindo para reduções relevantes de capacidade resistente tanto à tração como ao punçoamento dos geossintéticos referidos anteriormente (T80, T200 e NT100).

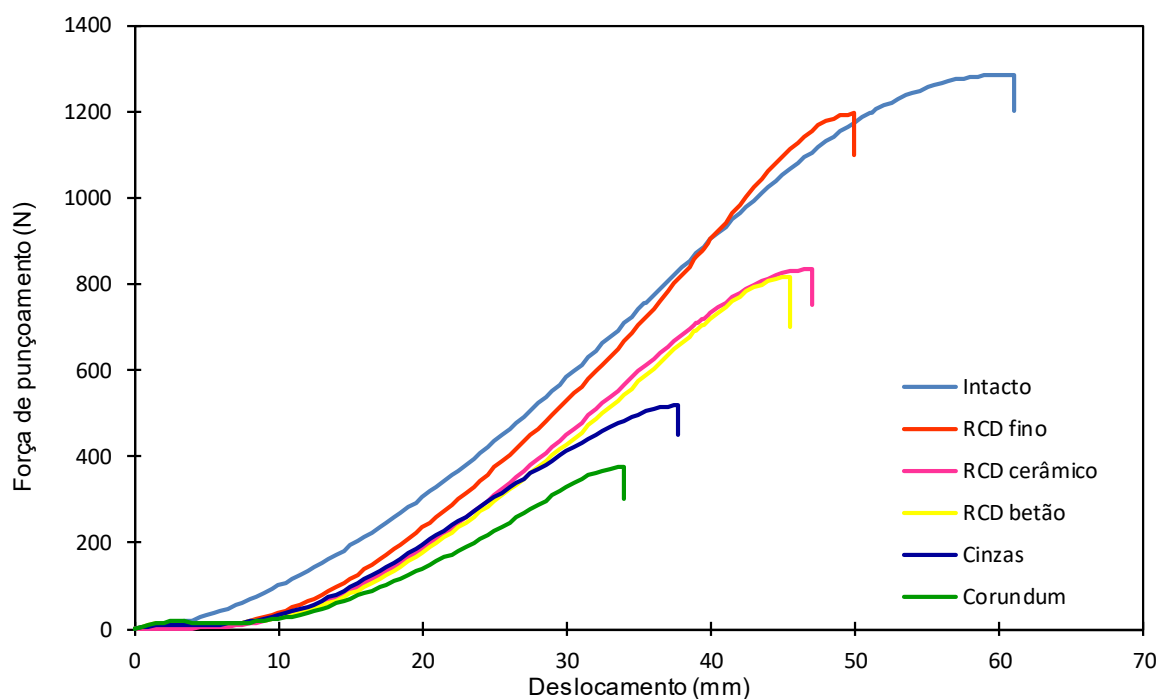


Fig.5.9-Curvas médias força-deslocamento obtidas nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil NT100

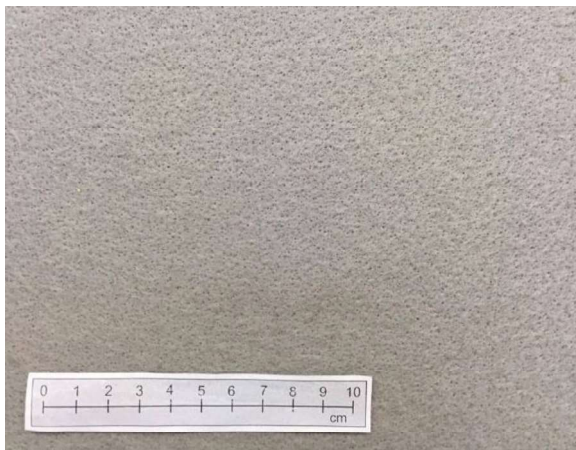
5.5. GEOTÊXTEL NÃO-TECIDO NT400

5.5.1. ANÁLISE VISUAL

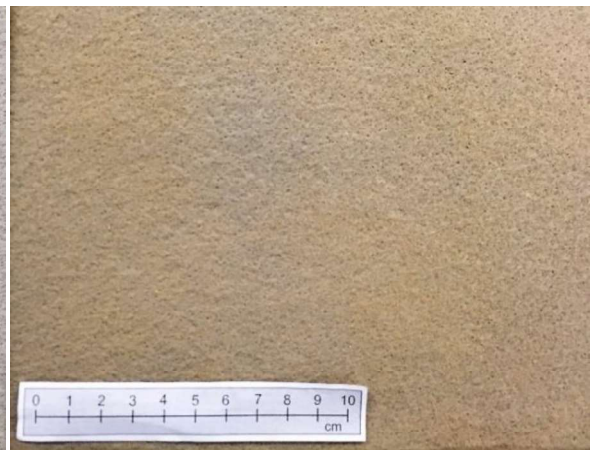
O geotêxtil não-tecido NT400 foi o geossintético com maior MUA e espessura de todos os geossintéticos utilizado neste estudo, prevendo-se deste modo que este sofra menores reduções nas suas propriedades mecânicas que os restantes. Através das imagens da figura 5.10 observa-se o pequeno efeito provocado sobre os provetes por todos os materiais usados na danificação mecânica. A olho nu tornou-se muito difícil avaliar o grau de degradação induzido neste geotêxtil.

O RCD fino não causou praticamente nenhuma degradação no material, visto que apenas foram detetados sinais de sujidade e abrasão nos provetes danificados com este resíduo (fig.5.10b), assim sendo não devem obter-se grandes alterações na resistência deste geotêxtil não-tecido.

Os restantes materiais utilizados na danificação mecânica (RCD cerâmico, RCD de betão, cinzas e *corundum*) permitem identificar no geotêxtil, pequenos punçoamentos e abrasão. Nas amostras danificadas com RCD cerâmico (fig.5.10c) e RCD de betão (fig.5.10d) conseguiram-se identificar ligeiras reduções de espessura. Já para as amostras danificadas com cinzas (fig.5.10e) e com *corundum* (fig.5.10f) identificaram-se para além das pequenas reduções de espessura, pequenos punçoamentos localizados.



a)



b)



c)



d)

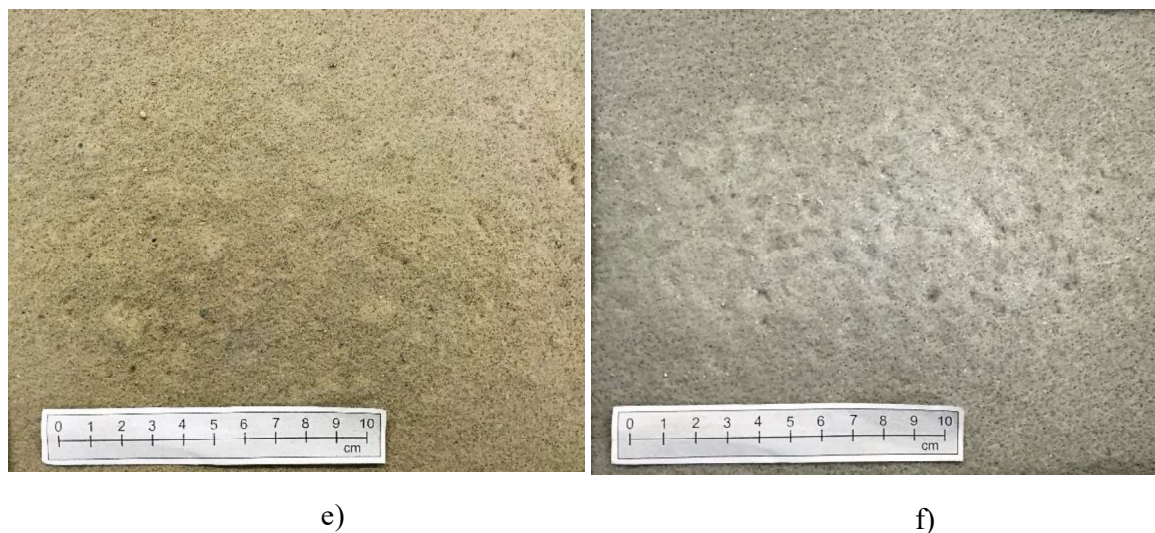


Fig.5.10- Geotêxtil NT400: a) intactos; b) danificados com RCD fino; c) danificados com RCD cerâmico; d) danificados com RCD de betão; e) danificados com cinzas; f) danificados com *corundum*

5.5.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

Na tabela 5.10, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de tração do geotêxtil NT400 e a resistência à tração residual calculada a partir dos mesmos.

Tabela 5.10- Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil NT400 (amostras intactas e danificadas)

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Não danificado	24,60 (5,8)	81,3 (3,5)	-
Danificado com RCD fino	24,99 (3,3)	68,2 (8,8)	101,6
Danificado com RCD cerâmico	23,99 (4,2)	68,6 (11,2)	97,5
Danificado com RCD de betão	24,57 (7,6)	67,6 (6,6)	99,9
Danificado com cinzas	23,08 (5,9)	67,1 (8,2)	93,8
Danificado com <i>corundum</i>	20,65 (5,8)	59,2 (9,1)	83,9

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

O geotêxtil NT400 foi o material que sofreu menores perdas de resistência à tração após os ensaios de danificação mecânica. O RCD fino praticamente não influenciou a resistência à tração deste geotêxtil, pois como podemos ver na tabela 5.10, a resistência à tração do geotêxtil NT400 aumentou ligeiramente, e este acontecimento pode ter sido influenciado pela heterogeneidade do geotêxtil não-tecido. A extensão na força máxima obtida para as amostras danificadas com este resíduo foi inferior à obtida para as amostras intactas. Uma vez que o material não sofreu redução da sua resistência à tração, mas sofreu uma redução da extensão na força máxima. O que não se verificou para os restantes geotêxteis analisados até este ponto.

Os RCD cerâmico, RCD de betão e as cinzas induziram perdas de resistência à tração muito próximas e pouco significativas, contrariamente ao sucedido nos geotêxteis analisados até este ponto (T80, T200 e NT100). O RCD de betão não influenciou a resistência à tração do geotêxtil NT400, mas contribuiu para uma redução da extensão na força máxima de 13,3%. O RCD cerâmico e as cinzas provocaram perdas de resistência de 2,5% e 6,2% respetivamente, valores estes com muito pouco significado. Contudo para as amostras danificadas com estes resíduos obtiveram-se reduções da extensão na força máxima de 12,7% e 14,2% (RCD cerâmico e RCD de betão, respetivamente).

A redução da extensão para a força máxima do geotêxtil NT400, relativamente às amostras intactas deste material, foi semelhante para todos os resíduos, o que pode dever-se ao facto dos danos que cada um destes resíduos provocou serem semelhantes entre si. Apesar do RCD cerâmico e do RCD de betão serem constituídos por partículas de maiores dimensões (maior $D_{máx}$) também têm grande quantidade de finos que devem ter contribuído como camada protetora para o geotêxtil NT400 das partículas angulosas e de maior dimensão. Para além disso, é de voltar a salientar que este geotêxtil não-tecido tem MUA e espessura elevadas, não permitindo deste modo danos tão gravosos nos seus provetes.

O *corundum* foi o material mais danoso para este geotêxtil e, à semelhança do sucedido com os geotêxteis anteriores, provocou maior perda de resistência à tração que os resíduos, embora não tão acentuada). Para os outros geotêxteis obtiveram-se perdas de resistência à tração superiores a 50%, e no caso do geotêxtil NT400 obteve-se uma perda de resistência à tração de 16,1%. Para além de ter induzido o maior decréscimo da resistência à tração, o *corundum* contribuiu ainda para o maior decréscimo da extensão na força máxima.

Para além dos parâmetros avaliados anteriormente, e à semelhança do efetuado para os outros geotêxteis estudados, obtiveram-se as curvas médias associadas a cada caso de danificação mecânica, incluindo amostras danificadas (fig.5.11), e calculou-se a rigidez secante a 2%, 5% e 10% de extensão (tabela5.11) para os mesmos casos.

O NT400 foi o geotêxtil mais robusto dos geotêxteis utilizados neste estudo (maior MUA e espessura) e para o qual se obtiveram os resultados mais favoráveis à utilização de resíduos como material de aterro.

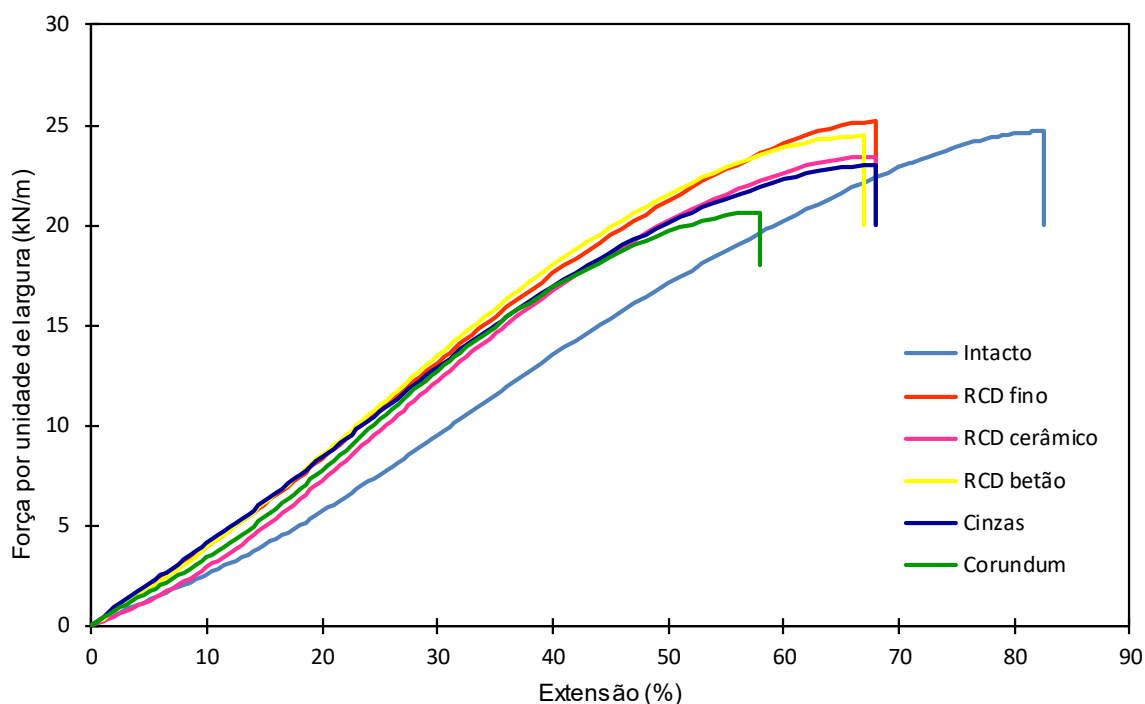


Fig.5.11-Curvas médias tração-extensão obtidas no ensaio de tração para o geotêxtil NT400

Tabela 5.11- Rigidez secante a 2%, 5% e 10% do geotêxtil NT400, antes e após a danificação mecânica

	J _{sec} 2%	J _{sec} 5%	J _{sec} 10%
	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
Intacto	12,7 (51,6%)	18,1 (29,8%)	23,3 (17,6%)
Danificado com RCD fino	10,0 (17,3%)	23,7 (30,2%)	33,4 (20,4%)
Danificado com RCD cerâmico	7,4 (49,7%)	13,6 (49,9%)	25,8 (20,1%)
Danificado com RCD de betão	25,8 (27,2%)	32,4 (19,9%)	36,5 (11,1%)
Danificado com cinzas	34,8 (17,8%)	39,8 (10,8%)	39,7 (12,3%)
Danificado com <i>corundum</i>	18,3 (7,6%)	26,4 (8,8%)	32,0 (10,7%)

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

Em todos os casos de danificação, verificou-se um aumento tendencial de rigidez do geotêxtil NT400 com o aumento da extensão até aos 10%. Em praticamente todos os casos de danificação, os materiais induziram um aumento da rigidez do geotêxtil não-tecido. Pode ainda afirmar-se que não é possível arranjar termo de comparação em relação à rigidez, dos quatro geotêxteis em estudo, uma vez que não se conseguem identificar tendências ou padrões relativamente à evolução da rigidez dos mesmos nos diferentes casos de danificação. A evolução da rigidez nos quatro materiais é distinta e incomparável, contrariamente ao obtido para os outros parâmetros de avaliação da danificação (resistência à tração e extensão na força máxima).

5.5.2. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

Neste ponto são analisados os resultados obtidos para o ensaio de punçoamento estático do geotêxtil NT400. Estes são apresentados de forma simplificada e sintetizada na tabela 5.12.

Tabela 5.12- Valores obtidos nos ensaios de punçoamento do geotêxtil NT400 (amostras intactas e danificadas)

	F _P [N]	h _P [mm]	RPR [%]
Não danificado	4934 (5,2%)	64,6 (2,4%)	-
Danificado com RCD fino	5176 (7,0%)	63,1 (1,3%)	104,9
Danificado com RCD cerâmico	4863 (8,2%)	64,5 (24,4%)	98,6
Danificado com RCD de betão	4678 (8,8%)	56,5 (5,0%)	94,8
Danificado com cinzas	4863 (5,3%)	56,0 (5,8%)	98,6
Danificado com <i>corundum</i>	3993 (5,7%)	52,6 (2,2%)	80,9

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

Nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil NT400 obtiveram-se resultados semelhantes aos obtidos para o mesmo material nos ensaios de tração. Este geotêxtil, pela sua robustez e pelo processo de fabrico que lhe está associado, não permite a formação de danos tão gravesos como os outros geotêxteis avaliados.

O RCD fino foi o solo que menos influenciou a resistência ao punçoamento deste geotêxtil não-tecido. De facto, após a danificação mecânica com utilização deste resíduo, a resistência ao punçoamento estático sofreu um ligeiro aumento (4,9%), o que pode dever-se à heterogeneidade do geotêxtil NT400, que como foi referido anteriormente é um parâmetro que não pode ser controlado. Quanto ao deslocamento obtido para a força de punçoamento máxima, o decréscimo foi muito ligeiro, passando de 64,6 mm nas amostras intactas para 63,1 mm nas amostras danificadas com este resíduo.

O RCD cerâmico, o RCD de betão e as cinzas não provocaram alterações muito relevantes da resistência ao punçoamento deste geotêxtil. O RCD de betão e as cinzas induziram uma redução mais acentuada do deslocamento na força máxima que o RCD cerâmico, em que para os primeiros esta diminuição foi de aproximadamente 8 mm e no caso do RCD cerâmico obteve-se um resultado idêntico ao das amostras intactas.

Na danificação do geotêxtil NT400 com *corundum*, obteve-se uma perda de resistência ao punçoamento face ao material intacto de 19,1%, que é uma percentagem pouco significativa comparativamente com os valores obtidos para os outros geotêxteis de MUA, espessura e processo de fabrico diferentes. Em relação ao deslocamento na força máxima após a danificação mecânica com este agregado sintético, obteve-se um valor inferior em 12 mm em relação à amostra intacta.

Como foi referido ao longo do trabalho, o geotêxtil NT400, foi o material mais robusto utilizado neste estudo e, consequentemente conduziu a resultados mais favoráveis à sua utilização. O geotêxtil não-tecido, mesmo sofrendo redução das suas capacidades resistentes, tanto à tração como ao punçoamento, estas não foram tão significativas como se verificou nos restantes geossintéticos (T80, T200 e NT100).

Estas propriedades e conclusões são reforçadas através da análise da figura 5.12, onde estão representadas as curvas médias obtidas nos ensaios de punçoamento estático deste geotêxtil não-tecido.

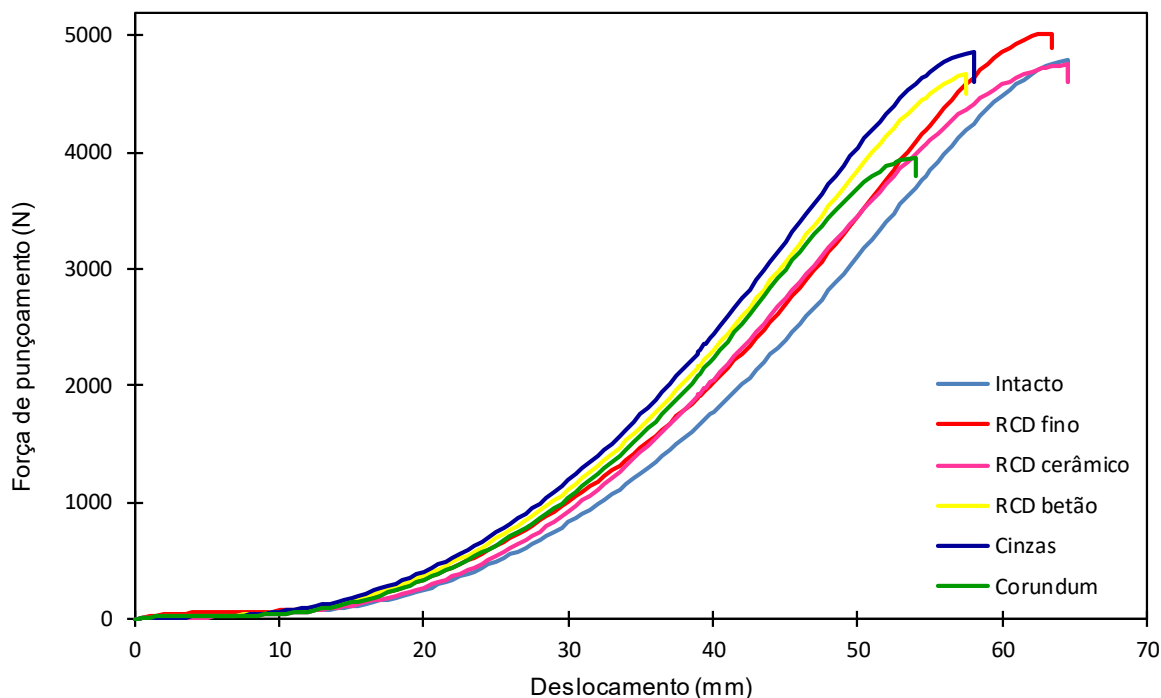


Fig.5.12- Curvas médias força-deslocamento obtidas no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil NT400

5.6. GEOGRELHA

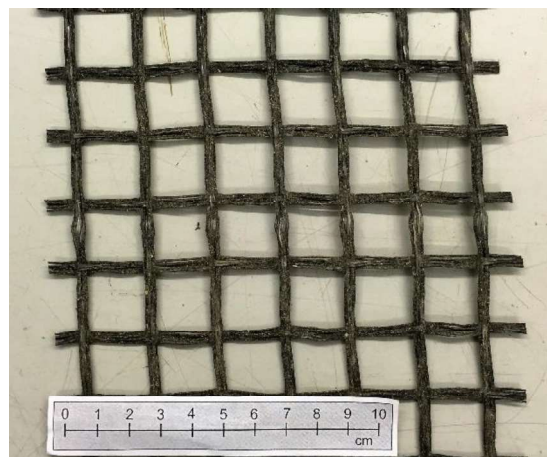
5.6.1. ANÁLISE VISUAL

A geogrelha tecida visualmente não sofreu danos muito graves após a danificação mecânica. Através da análise da figura 5.12, podemos ver a danificação que cada um dos materiais utilizados na danificação mecânica provocou nesta geogrelha.

O RCD fino não provocou danos aparentes na geogrelha (fig.5.12b), uma vez que não é possível identificar qualquer tipo de mecanismo de danificação provocado pelo resíduo. Já o RCD cerâmico (fig.5.12c) e o RCD de betão (fig.5.12d), que tiveram um comportamento semelhante na danificação desta geogrelha, mostraram ter provocado danos também estes semelhantes, como cortes e abrasões. As cinzas (fig.5.12e) e o *corundum* (fig.5.12f) parecem ter contribuído de forma similar aos RCD cerâmico e de betão, embora os efeitos abrasivos e os cortes tenham sido ligeiramente mais evidentes.



a)



b)



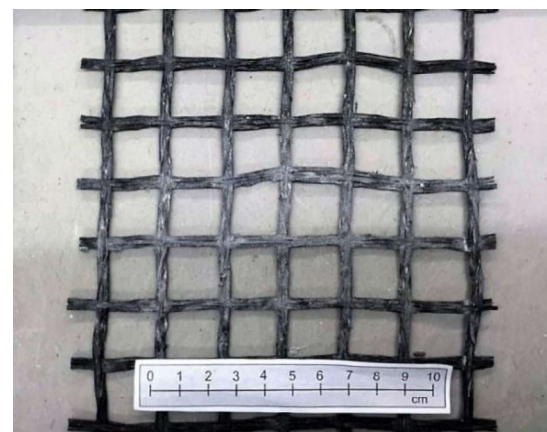
c)



d)



e)



f)

Fig.5.13- Geogrelha: a) intacta b) danificada com RCD fino; c) danificada com RCD cerâmico; d) danificada com RCD de betão; e) danificada com cinzas; f) danificada com *corundum*

5.6.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a geogrelha apenas se avaliou a resistência à tração e extensão na força máxima, após a danificação mecânica, uma vez que este material não cumpre os requisitos normativos referentes às aberturas do material para a realização do ensaio de punção estático. Na tabela 5.12 encontram-se os resultados médios e parâmetros obtidos para o ensaio de tração desta geogrelha tecida.

Tabela 5.13- Valores obtidos nos ensaios de tração da geogrelha (amostras intactas e danificadas)

	T [kN/m]	ϵ_{FM} [%]	RTR [%]
Não danificado	47,69 (2,8)	9,7 (4,1)	-
Danificado com RCD fino	45,86 (3,8)	9,7 (9,4)	96,2
Danificado com RCD cerâmico	44,17 (3,5)	9,4 (7,6)	92,6
Danificado com RCD de betão	44,89 (5,7)	9,6 (17,8)	94,1
Danificado com cinzas	41,59 (6,9)	9,9 (11,9)	87,2
Danificado com <i>corundum</i>	35,21 (5,6)	9,1 (5,3)	73,8

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

Assim como para os restantes geossintéticos utilizados neste estudo, o RCD fino não influenciou significativamente a resistência à tração da geogrelha, tendo induzido uma pequena redução de resistência à tração (3,8%) e não teve influência na extensão na força máxima.

Para as amostras danificadas com os RCD cerâmico e RCD de betão obtiveram-se os valores de resistência à tração mais semelhantes e intermédios, sendo que estes induziram decréscimos de 7,4% e 5,9% da resistência à tração inicial da geogrelha. Os decréscimos de resistência obtidos para as amostras danificadas com estes resíduos, não foram tão significativos quanto os induzidos nos geotêxteis T80, T200 e NT100 (refletidos na perdas de resistência mais pronunciadas e referidas anteriormente).

As cinzas provocaram uma perda de resistência à tração (12,8%) um pouco mais pronunciada que os RCD cerâmico e RCD de betão, e menos acentuadas que as perdas de resistência registadas para os outros geossintéticos. De notar que a extensão média para a força máxima obtida nas amostras danificadas com as cinzas praticamente não variou. Este fenómeno pode explicar-se pelo carácter heterogéneo do material.

O *corundum* foi o material de danificação mais desfavorável à geogrelha, tendo induzido uma perda de resistência à tração de 26,2% e uma diminuição em 6% da extensão na força máxima. Estes resultados foram mais positivos comparativamente com os obtidos para os geotêxteis T80, T200 e NT100.

5.7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com o intuito de comparar e compreender a alteração das propriedades mecânicas dos geossintéticos em estudo, face à danificação mecânica provocada por resíduos e pelo *corundum*, as figuras 5.13 e 5.14 ilustram a evolução das resistências residuais, tanto à tração (fig.5.13) como ao punção estático, (fig.5.14) de todos os geossintéticos após os ensaios de danificação mecânica.

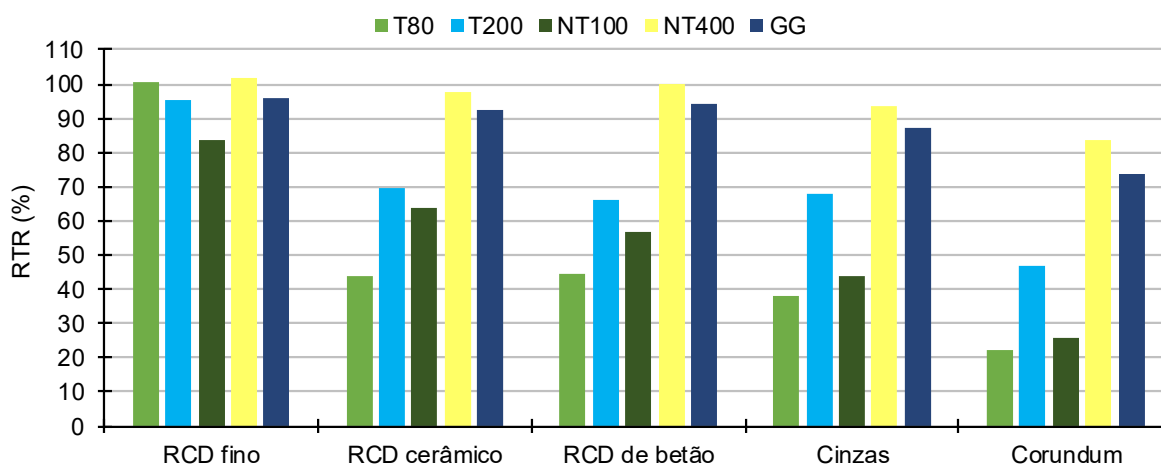


Fig.5.14- Resistência à tração residual dos geossintéticos após os ensaios de danificação mecânica

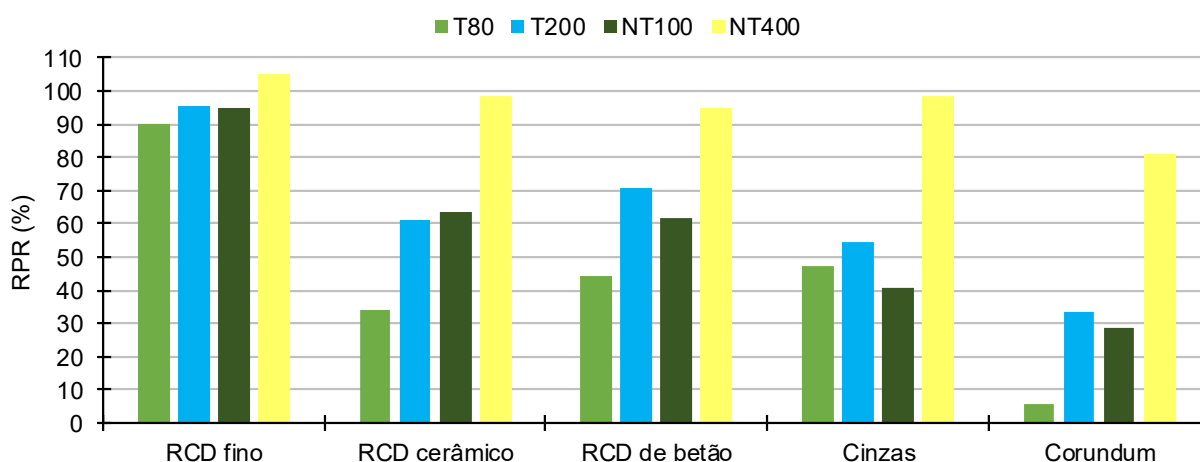


Fig.5.15- Resistência ao punçoamento residual após ensaios de danificação mecânica

O RCD fino foi o resíduo para o qual se obtiveram resultados mais favoráveis, uma vez que todos os geossintéticos em estudo tiveram variações de resistência, tanto à tração como ao punçoamento, pouco significativas (valores de RTR e RPR elevados). Por ser um RCD constituído por partículas de pequena dimensão e possuir o D_{max} mais baixo de todos os resíduos estudados, os seus efeitos na danificação mecânica não se fizeram notar. Os geotêxteis T80 e NT100 foram os que mais se degradaram em termos mecânicos devido à danificação com este resíduo.

O RCD cerâmico foi dos resíduos mais agressivos estudados neste trabalho. Sendo este constituído por partículas de grande dimensão e angulosas, induziu perdas de resistência, tanto à tração como ao punçoamento, com muito significado nos materiais com menor MUA e espessura, tendo sido o geotêxtil não-tecido NT400 e a geogrelha os mais resistentes à danificação mecânica provocada pelo mesmo. Neste caso não foi possível concluir que este resíduo tenha tido mais influência na perda de propriedades de tração nos geotêxteis tecidos do que nos não-tecidos, contrariamente ao que acontece para as propriedades de punçoamento. Contudo, concluiu-se que é um material agressivo para geossintéticos de reduzida MUA e espessura.

Os resultados obtidos após a danificação mecânica em que se utilizou RCD de betão foram muito próximos dos obtidos para o RCD cerâmico. O RCD de betão tem na sua constituição partículas de maior dimensão que o RCD cerâmico, contudo mais arredondadas. Os danos físicos provocados por este resíduo foram principalmente punçoamentos e abrasão, não tendo influenciado significativamente a capacidade resistente da geogrelha e do geotêxtil NT400. Para os restantes geossintéticos este resíduo contribuiu com perdas de resistência mais significativas tanto à tração como ao punçoamento, na gama dos 30% a 50%. Deste RCD tecem-se considerações idênticas às do RCD cerâmico, principalmente que estes resíduos contribuem para uma maior redução da resistência ao punçoamento nos geotêxteis tecidos, contrariamente ao verificado nos geotêxteis não-tecidos, que pela sua estrutura, resultante do seu processo de fabrico, se tornam mais resistentes a estas ações.

As cinzas, contrariamente ao que se esperou do seu comportamento, induziram perdas de resistência muito significativas nos geossintéticos. Embora não fossem constituídas pelas partículas de maiores dimensões, tinham na sua constituição material cortante, como vidros e metais, que facilitaram a formação de cortes e rasgões, que contribuíram drasticamente para estas reduções de resistência. Em termos de resistência à tração, os geossintéticos com menor MUA foram os mais afetados por este resíduo. Já em relação à resistência ao punçoamento, os geotêxteis tecidos foram os que assumiram reduções mais desfavoráveis na sua resistência. À semelhança dos restantes casos de danificação, a geogrelha e o geotêxtil NT400 foram os geossintéticos para os quais se obtiveram resultados mais favoráveis, sendo que o decréscimo das suas capacidades resistentes não foi muito acentuado e por vezes inexistente.

Concluiu-se ainda que o *corundum* foi o material de danificação mais gravoso para os geossintéticos, tendo sido o causador das maiores perdas de resistência à tração e ao punçoamento. Os geotêxteis tecidos (T80 e T200) foram os mais danificados por este agregado sintético, tendo-se obtido valores de resistência residual, tanto à tração como ao punçoamento, muito baixos. O *corundum* é um agregado sintético uniforme e bem graduado, e mesmo não tendo na sua constituição partículas de grandes dimensões comparativamente com os RCD cerâmico, RCD de betão e cinzas, tem partículas muito angulosas que danificaram severamente os geossintéticos em estudo. O geotêxtil NT400 foi o geossintético mais resistente às ações mecânicas do *corundum*, seguido da geogrelha, tendo ocorrido nestes casos perdas de resistência com pouco significado (quando comparadas com as induzidas nos outros geossintéticos), próximas dos 20% à tração e ao punçoamento.

5.7.1. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR VIOLANTE, 2016

Violante (2016) estudou três materiais iguais aos utilizados no presente trabalho: os geotêxteis tecidos (T80 e T200) e a geogrelha. Os resultados obtidos para estes materiais após se ter usado *corundum* na danificação mecânica, foram semelhantes aos obtidos pelo autor, tendo sido em ambos os trabalhos o agregado que mais influenciou as propriedades mecânicas dos geossintéticos em estudo. De facto, o *corundum* induziu perdas de resistência, tanto à tração como ao punçoamento, superiores às provocadas pelos resíduos ou pelos solos naturais estudados por Violante (2016).

De um modo geral, Violante (2016) obteve reduções de resistência à tração e ao punçoamento, superiores para os geossintéticos danificados com solos de partículas de maiores dimensões, à exceção do tout-venant. No presente estudo, a relação direta entre a maior danificação induzida e a maior dimensão do agregado também não se verificou. As figuras 5.15 e 5.16 comparam os resultados obtidos pelo autor com aqueles obtidos no presente trabalho para os geotêxteis T80 e T200 e para a geogrelha.

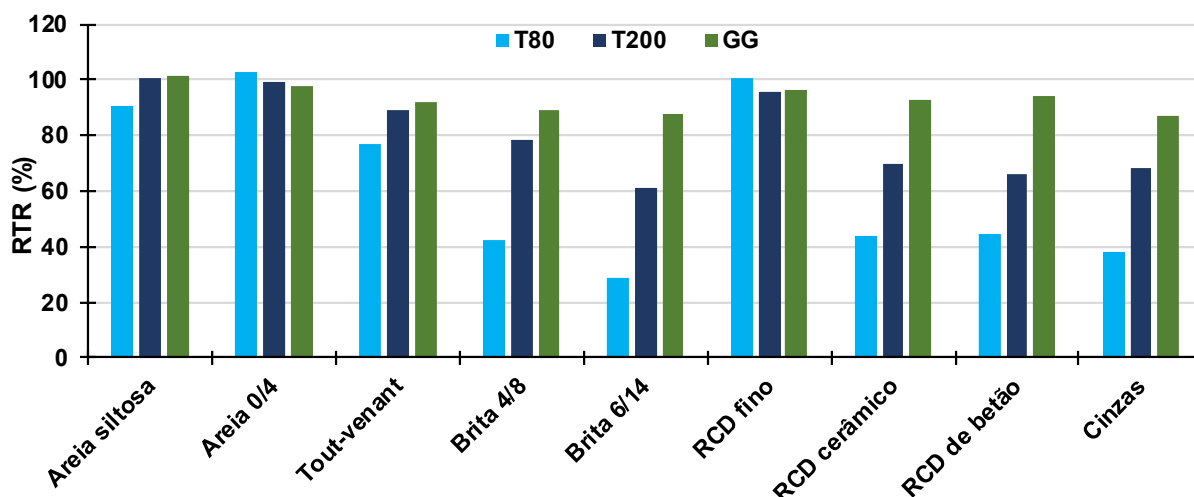


Fig.5.16 – Resistência à tração residual dos geotêxteis T80 e T200 e da geogrelha.

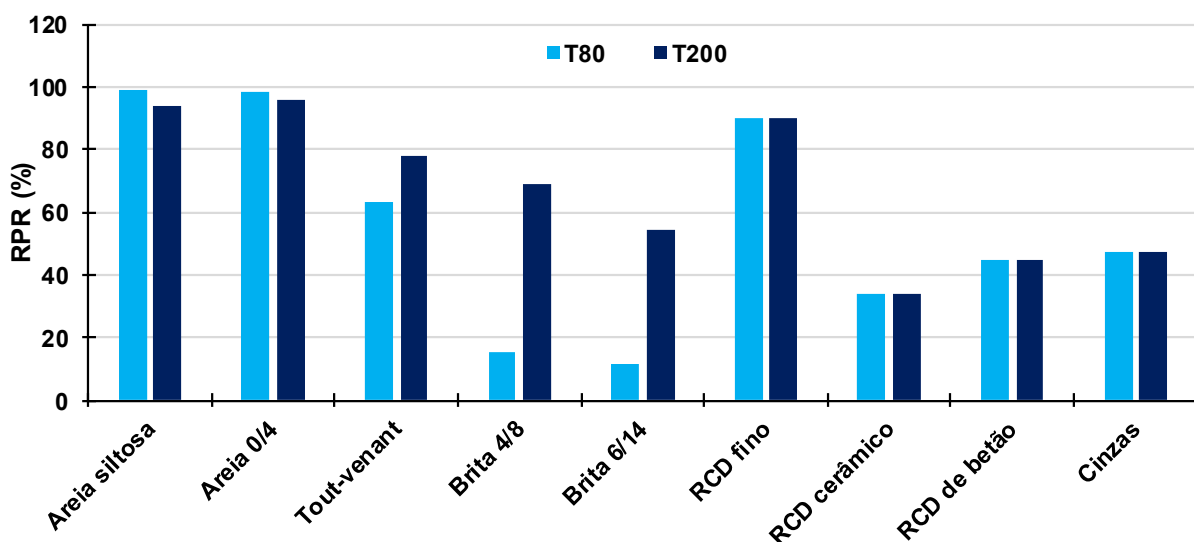


Fig.5.17. Resistência ao punçoamento residual dos geotêxteis T80 e T200.

O RCD fino e a areia 0/4 apresentaram um comportamento semelhante, tanto à tração como ao punçoamento. Estes praticamente não induziram danificação nos geotêxteis T80 e T200 e na geogrelha, uma vez que as diferenças face às amostras intactas foram muito pouco significativas (abaixo de 10%).

O comportamento do RCD cerâmico, do RCD de betão e das cinzas assemelhou-se ao verificado por Violante (2016) para a brita 4/8. Isto verificou-se apenas nas propriedades de tração, visto que a brita 4/8 provocou reduções da resistência ao punçoamento mais gravosas que estes resíduos. No ensaio de tração os quatro materiais de danificação induziram perdas de resistência à tração na ordem dos 55%, mas ainda assim, reduções inferiores às obtidas para as amostras danificadas com *corundum*.

Tendencialmente a brita 6/14, dentro dos solos naturais e dos resíduos, foi o material que provocou maior danificação nestes três geossintéticos. Uma vez que os resíduos induziram menor variação das propriedades mecânicas que esta brita, pode considerar-se a possível inclusão destes resíduos como

material de aterro em estruturas que também incluíam geossintéticos. Pode-se concluir ainda que a geogrelha e os geotêxteis não-tecidos (tanto o NT400 como o NT300 usado por Violante, 2016) foram os geossintéticos que melhor se comportaram no estudo da danificação mecânica, nos quais se obtiveram as variações mais baixas das suas propriedades mecânicas.

5.7.2. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR SANTOS *ET AL.*, 2012

Os autores avaliaram a danificação mecânica causada por um resíduo reciclado durante a instalação, numa geogrelha e num geotêxtil não-tecido. Ensaíram à tração as amostras danificadas e concluíram que a geogrelha sofre maior redução da sua resistência à tração que o geotêxtil.

Neste trabalho obtiveram-se reduções de resistência à tração na geogrelha superiores às obtidas para o geotêxtil não-tecido de maior MUA. Contudo, as reduções de resistência à tração sofridas pelo geotêxtil não-tecido de menor MUA foram superiores às da geogrelha. A comparação destes resultados com os obtidos por Santos *et al* (2012) é complexa, pois os autores em causa não mencionaram as propriedades físicas dos materiais avaliados.

5.7.3. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR VIEIRA E PEREIRA, 2015

Os autores ensaiaram uma geogrelha e um geocompósito (instalação *in situ*) e concluíram que, após 6 meses da sua colocação, os materiais não sofreram alterações muito significativas no seu comportamento à tração. A geogrelha ensaiada no presente trabalho, quando danificada com RCD fino (resíduo semelhante ao utilizado no estudo de Vieira e Pereira, 2015), praticamente não sofreu alteração da sua resistência à tração face às amostras intactas, tal como aconteceu no estudo referido.

5.7.4. COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR SILVA *ET AL.*, 2015

Silva *et al* (2015) concluíram que a resistência à tração de um geotêxtil tecido (MUA de 250 g/m²) não sofreu redução significativa quando danificado por um resíduo idêntico ao RCD fino usado no presente estudo. Tal como nesse trabalho, a resistência à tração do geotêxtil T200 (geotêxtil tecido usado neste trabalho com MUA mais próxima da do geotêxtil estudado por Silva *et al.*, 2015) também não sofreu diminuição relevante quando danificado com RCD fino. Adicionalmente, o presente trabalho mostrou que o RCD fino não causou danificação relevante num geotêxtil tecido de MUA ainda mais reduzida (geotêxtil T80 – MUA de 81g/m²)

6

CONCLUSÃO

O presente trabalho envolveu a avaliação do efeito da danificação mecânica provocada por resíduos em cinco geossintéticos. Inicialmente os geossintéticos foram sujeitos a danificação mecânica sob carga repetida de acordo com a norma EN ISO 10722:2007. A caracterização da danificação provocada foi baseada na inspeção visual dos provetes danificados e nos resultados obtidos nos ensaios de tração (NP EN ISO 10319: 2005) e de punçoamento estático (NP EN ISO 12236: 2008). Neste último capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas no trabalho experimental e, apresentadas algumas propostas de desenvolvimentos futuros no âmbito do trabalho desenvolvido.

Os danos causados pelos ensaios de danificação mecânica incluíram cortes, punçoamentos, abrasões e redução da espessura dos geossintéticos. Os danos mais graves ocorreram nos geotêxteis tecidos, tendo-se observado vários filamentos cortados e punçoamentos de dimensão considerável. Nos geotêxteis não-tecidos, os danos identificados foram essencialmente abrasão e redução de espessura no geotêxtil NT400, e cortes, abrasão e punçoamentos pontuais no geotêxtil NT100. De notar que os danos mais graves ocorreram para o geotêxtil tecido de menor MUA e espessura. Na danificação da geogrelha apenas foi possível identificar abrasão.

Os resultados obtidos nos dois geotêxteis tecidos (T80 e T200) utilizados neste estudo mostraram que o geotêxtil T80 sofreu reduções de resistência, tanto à tração como ao punçoamento superiores às ocorridas no geotêxtil T200. Apesar destes dois geotêxteis terem o mesmo processo de fabrico, o geotêxtil T200 possuía maior MUA e espessura, o que o fez suportar um pouco melhor os efeitos induzidos pelos resíduos e pelo *corundum* durante a danificação mecânica.

Comparando os resultados obtidos para os geotêxteis tecidos com os obtidos para os não-tecidos, embora estes tenham diferentes MUA e espessura, identificou-se uma tendência na variação da resistência ao punçoamento. Para todas as amostras de geotêxteis danificadas com os diversos materiais de danificação utilizados (RCD fino, RCD cerâmico, RCD de betão, cinzas e *corundum*), os geotêxteis não-tecidos sofreram menores reduções da sua resistência ao punçoamento do que os geotêxteis tecidos.

A geogrelha teve um comportamento bastante positivo face à danificação mecânica, não se tendo identificado visualmente danos muitos graves na mesma em nenhum caso de danificação. As reduções de resistência à tração da geogrelha não foram muito pronunciadas, tendo assumido um valor máximo de 30% face às amostras intactas (na danificação com *corundum*).

Relativamente ao comportamento dos materiais de danificação, concluiu-se que o *corundum* foi o agregado que induziu danos mais graves em todos os geossintéticos, tendo estabelecido uma abordagem conservativa, relativamente aos restantes materiais de danificação utilizados, como já foi observado por outros autores (Paula, 2004 e Carneiro *et al.*, 2009; Violante, 2016). O RCD fino foi o

resíduo que menos influenciou as propriedades mecânicas de todos os geossintéticos utilizados neste estudo, tendo provocado danos pouco significativos nos mesmos. O RCD cerâmico, RCD de betão e as cinzas tiveram um contributo muito próximo na danificação dos geossintéticos, uma vez que contribuíram para reduções de resistência muito idênticas nas propriedades avaliadas (resistência à tração e resistência ao punçoamento estático). É importante salientar o contributo das cinzas neste estudo uma vez que nas danificações realizadas com este resíduo se obtiveram resultados sujeitos a discussão. Era de esperar que o RCD cerâmico e o RCD de betão provocassem danos mais graves nos geossintéticos do que as cinzas nos geossintéticos, uma vez que as cinzas eram constituídas por uma grande quantidade de finos e partículas de menor dimensão. Contudo, o contributo deste resíduo foi semelhante ao dos RCD referidos, uma vez que os danos provocados pelo mesmo foram significativos e semelhantes aos provocados pelos RCD cerâmico e RCD de betão.

Através dos resultados obtidos pode concluir-se que, dos cinco geossintéticos utilizados neste estudo, a geogrelha e o geotêxtil NT400 foram os materiais que sofreram menor danificação e menor redução das suas propriedades mecânicas face aos materiais de danificação utilizados. Estes resultados mais favoráveis devem-se na geogrelha ao facto dos seus filamentos constituintes serem revestidos de PVC, protegendo-os da degradação e no geotêxtil NT400 pelas suas MUA e espessura relativamente elevadas.

Em relação à possibilidade de inserção dos resíduos como material de aterro, os estudos realizados não permitem tirar conclusões definitivas, uma vez que apenas se avaliou a danificação mecânica que estes provocam a curto prazo em geossintéticos. No entanto, os resultados obtidos neste estudo revelaram que os danos causados pelos resíduos não diferem muito dos provocados por materiais naturais frequentemente utilizados em engenharia civil.

6.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho permitiu obter algumas conclusões importantes (contudo ainda insuficientes) sobre a utilização de resíduos como materiais de aterro em contacto com geossintéticos. Deste modo sugere-se como continuação deste estudo a realização dos mesmos ensaios de avaliação das propriedades mecânicas a curto prazo, de geossintéticos, com características, processos de fabrico e estruturas diferentes.

Propõe-se ainda a avaliação dos efeitos mecânicos e químicos que estes resíduos provocam a longo prazo tanto nos geossintéticos utilizados neste trabalho, noutras geossintéticos (com processos de fabrico distintos) e no meio ambiente circundante.

Seria também interessante desenvolver estudos *in situ* com mais resíduos deste tipo, de modo a futuramente ser possível comprovar sem hesitação que estes materiais podem ser utilizados correntemente em obras de engenharia em que se utilizem geossintéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, T. M. e Bathurst, R.J. (1994). *Characterization of Geosynthetics Load-Strain Behavior After Installation Damage*, Geosynthetics International, vol. 1, nº 2, 1994, pp. 181 -199
- Austin, R. A. (1998). *Installation Effects on Geosynthetics*. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Reino Unido, pp. 3.2.1 - 3.2.10.
- Braü G.(1998) *Experience with damage during installations in Germany – Field and laboratory testing*. Seminar volume on installation damage in geosynthetics. Leatherhead, Reino Unido., pp. 41- 44.
- Botelho, M. J. (2010). *Resíduos de Construção e Demolição*. Verlag Dashöfer, Portugal.
- Carlos, D.M., Carneiro J.R., Pinho-Lopes M., e Lopes M-L. (2015) *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. (2009). *Durabilidade de Materiais Geossintéticos em Estruturas de Carácter Ambiental - A Importância da Incorporação de Aditivos Químicos*. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Carneiro, J.R., Morais L. M. e Lopes M.L. (2012). *Efeito do processo de instalação no comportamento mecânico de geotêxteis não-tecidos*. Atas do 13º Congresso Nacional de Geotecnia, CD-ROM, 7p , Lisboa, Portugal.
- Carvalho, F. (2014) *Resistência de Um Geocompósito de Reforço à Danificação Durante a Instalação E à Abrasão*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Christopher, B. R. e Elias, V. (1998) *Evaluation of Installation Damage in Geosynthetics: a US Perspective*. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Reino Unido, pp. 1.2.1 – 1.2.12.
- Decreto-Lei nº 48/2008 (2008) - Portugal: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- Decreto-Lei nº 178/2011 (2006) - Portugal: Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território
- EN ISO 13433. (2006). *Geosynthetics - Dynamic perforation test (cone drop test)*.

EN ISO 10722. (2007). *Geosynthetics test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading* – Damage caused by granular material.

Faria, B. (2014). *Estudo da interação geossintético/resíduo de construção e demolição (RCD) através de ensaios de arranque*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Ferreira, J.F.B. (2009). *Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em camadas de base e sub-base não ligadas de estradas de baixo tráfego*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico

Ferreira, F. (2010). *Comportamento das interfaces solo-geossintético*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Giroud, J.P. (1986). *From Geotextiles to Geosynthetics: A Evolution in Geotechnical Engineering*. Proceedings of the 3rd International Conference on Geotextiles, Voll, Vienna, Austria, PP1-18.

Ingold, T. e Miller, K. S. (1998). *Geotextiles Handbook*. Thomas Telford LTDA, Londres, Inglaterra.

Jewell, R.A. (1996). *Soil reinforcement with geotextiles*. Construction Industry Research and Information Association, Maryland, United States.

John, V.M. e Agopyan (2000). Seminário de Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares. São Paulo, Brasil.

Koerner, R.M. (1999) *Designing with geosynthetics*. Prentice-Hall, Upper River, NJ, USA.

Lopes, M. P., Lopes, M. L. (2010) *Durabilidade de Geossintéticos*. FEUP Edições, Porto.

Lopes, M.L. (1998) *Aplicação de geossintéticos em engenharia civil*", Texto de apoio, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Monteiro, V. (2015). *Gestão de RCD's – Dimensão crítica e enquadramento legal*, In Seminário: Resíduos de Construção e Demolição - um resíduo a valorizar. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Moreira, S.P. (2009) *Efeitos da danificação mecânica de geossintéticos no comportamento como filtro em sistemas de cobertura de estruturas de confinamento de resíduos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

NP EN 933-1. (2000). *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados*. Parte 1: análise granulométrica.

NP EN ISO 10319.(2005). *Geotêxteis – Ensaio de tração em tiras largas*.

NP EN ISO 9863-1. (2006). *Geossintéticos - Determinação da espessura e pressões especificadas*.

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

NP EN ISO 9862. (2007). *Geossintéticos - Amostragem e preparação de provetes*.

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

Paula, A.M. (2004). *Danificação durante a instalação - Avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Paula, A.M. (2012). *Estudo dos coeficientes de segurança por danificação durante a instalação e por fluência em estruturas reforçadas com geossintéticos*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Página da internet da Associação Portuguesa do Ambiente: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>, consultado a 1 de Julho de 2016.

Página da internet da empresa Renascimento: [http://www.renascimento.pt/pt/?id=2312§ion=Renascimento#Areas de negocio#Residuos de C onstrucao&mid](http://www.renascimento.pt/pt/?id=2312§ion=Renascimento#Areas%20de%20negocio#Residuos%20de%20Construcao&mid), consultado a 5 de Julho de 2016

Página da internet da Resíduos de Construção e Demolição SA: <http://www.rcd.pt>, consultado a 13 de Julho de 2016.

Pereira, P. e Vieira, C. (2013). *Resíduos de construção e demolição: um estado de arte visando a sua valorização em trabalhos geotécnicos*. Relatório de investigação no âmbito do projeto: “Aplicação Sustentável de resíduos de construção e demolição (RCD) em estruturas reforçadas com geossintéticos”, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Pinho-Lopes, M. (2004). *Estudo dos coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Portaria nº 209/2004 (2004) - Portugal: Ministérios da Economia, da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas, da Saúde e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.

Rocha, T.S.V. (2016). *Resíduos de Construção e Demolição como substituto parcial do cimento: efeito na durabilidade em materiais cimentícios* - Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Roque, A. (2015). *Utilização de RCD em estruturas de drenagem de obras geotécnicas* In Seminário: Resíduos de Construção e Demolição - um resíduo a valorizar. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Santos, E.C.G. (2007) *Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclador (RCD-R) em estruturas de solo reforçado*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Santos, E.C.G; Bueno, B.S., Palmeira, E.M. (2012). *Strength reduction of geosynthetics used in RSW built with RCDW as backfill material*. Proceedings of the 5th European Geosynthetic Congress, Valência, pp. 481-485.

Silva, E. M.; Santos, E.C.G., Palmeira, E. M. (2015). *Fatores de redução de resistência de geotêxtil tecido devido a danos mecânicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)*. In: VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2015) e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2015), 2015, Brasília-DF.

Schulz, R. R., Hendricks, C.F. (1992). *Recycling of masonry rubble*. HANSEN T.C. Recycling of demolished concrete and masonry. London, Chapman and Hall.

Shukla, S.K. (2002). *Geosynthetics and Their Applications*. Thomas Telford Publishing, Londres, Reino Unido.

Torgal, P.F.; Jalili, S. (2010). *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. TecMinho.

Vieira, C.S., Pereira, P.P., Lopes, M.L. (2014). *Estudo sobre a aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em estruturas reforçadas com geossintéticos*. 14º Congresso Nacional de Geotecnia, 4-9 de abril de 2014, Covilhã, Portugal.

Vieira, C.S., Pereira, P.P. (2014). *Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em aterros reforçados com geossintéticos*. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 5-7 de março de 2014, Guimarães, Portugal.

Vieira, C. Lopes, M.L., Pereira, P. (2015). *Utilização de RCD em aterros reforçados com geossintéticos* In Seminário: Resíduos de Construção e Demolição - um recurso a valorizar. Porto, FEUP.

Vieira, C.S, Pereira, P.M. (2015). *Damage induced by recycled construction and demolition wastes on the short-term behaviour of two geosynthetics*. Transportation Geotechnics 4, pp.64-75, ELSEVIER, Amesterdão.

Vieira, C.S., Pereira, P.M. (2016). *Interface shear properties of geosynthetics and construction and demolition waste from large scale direct shear tests*. Geosynthetics International. Vol. 23, nº1, pp 62-70.

Vieira, C.S., Pereira, P.M. e Lopes, M. L. (2016). *Recycled construction and demolition wastes as filling material for geosynthetic reinforced structures*. Interface properties journal of cleaner production (DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.115)

Violante, F.M. (2016). *Caracterização da danificação mecânica de geossintéticos*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP.

Watn, A.E., Chew, S.H. (2002). *Geosynthetics damage – from laboratory to field*. Proceedings of the 7th international conference on geosynthetics, Vol. 4, Nice, França, pp 1203-1226.