



**CONGRESSO NACIONAL
DE GEOTECNIA**

Évora 2023

Atas do 18º Congresso Nacional de Geotecnia (18CNG)
Geotecnia e Alterações Climáticas, Évora, 14 a 17 de maio de 2023

Editores: Isabel Duarte, João Marcelino, António Pinho, Paula Faria, Luís Lopes e Pedro Pereira

Maio de 2023

Sociedade Portuguesa de Geotecnia

ISBN: 978-989-54038-9-9

18ENG

**CONGRESSO NACIONAL
DE GEOTECNIA**

Universidade de Évora
14 – 17 | maio | 2023

Livro de Atas



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS



Sociedade
Portuguesa
de Geotecnia

RESISTÊNCIA À DANIFICAÇÃO MECÂNICA DE GEOSSINTÉTICOS USADOS NO SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE BASE DE ATERROS DE RESÍDUOS

RESISTANCE TO MECHANICAL DAMAGE OF GEOSYNTHETICS USED IN THE BASE LINER SYSTEM OF WASTE LANDFILLS

Carneiro, José Ricardo, *Construct-Geo, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal*, rcarneir@fe.up.pt*

Brás, Ana Cláudia, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal*, ec11268@fe.up.pt

Lopes, Maria de Lurdes, *Construct-Geo, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal*, lcosta@fe.up.pt

*autor para correspondência

RESUMO

Os geossintéticos possuem um papel fundamental na impermeabilização de aterros de resíduos. Este trabalho avaliou a resistência destes materiais à danificação mecânica. Para tal, geossintéticos tipicamente usados no sistema de impermeabilização de base de aterros de resíduos (conjunto de um geocompósito bentonítico, uma geomembrana e um geotêxtil) foram submetidos, em laboratório, a ensaios de danificação mecânica com diferentes bases de ensaio (rígida e flexível) e diferentes materiais granulares de danificação (*corundum* e brita 14/20). Foram testados sistemas de impermeabilização com diferentes geotêxteis (massas por unidade de área de 312 e 411 g/m²). Os danos sofridos pelos geossintéticos foram avaliados qualitativamente por inspeção visual e quantitativamente pela monitorização de alterações nas suas propriedades mecânicas. De um modo geral, os danos ocorridos nos geossintéticos foram pouco pronunciados (os materiais mais afetados foram os geotêxteis). O desempenho da geomembrana (na sua função de barreira de fluidos) não foi comprometido. Desta forma, ambos os geotêxteis cumpriram corretamente a sua função de proteção.

ABSTRACT

Geosynthetics play a key role in containing fluids in waste landfills. This work evaluated the resistance of these materials to mechanical damage. Geosynthetics typically used in the base liner system of waste landfills (a combination of a bentonite geocomposite, a geomembrane and a geotextile) were submitted to laboratory mechanical damage tests with different test bases (rigid or flexible) and different granular damage materials (*corundum* and gravel 14/20). Liner systems with different geotextiles (masses per unit area of 312 and 411 g/m²) were tested. The damage suffered by the geosynthetics was evaluated qualitatively by visual inspection and quantitatively by monitoring changes in their mechanical properties. In general, the geosynthetics were not severely damaged (the most affected materials were geotextiles). The performance of the geomembrane (in its fluid barrier function) was not compromised. Therefore, both geotextiles correctly fulfilled their protective function.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de impermeabilização de base dos aterros de resíduos são projetados para proteger o solo e águas subterrâneas dos contaminantes presentes nos resíduos. Estes sistemas são tipicamente formados por uma combinação de geossintéticos (um geocompósito bentonítico, uma geomembrana e um geotêxtil) instalados sobre uma camada de argila compactada. Sobre os geossintéticos, é normalmente colocada uma camada de drenagem granular.

Os geocompósitos bentoníticos e as geomembranas possuem como função impedir a passagem de líquidos ou gases. Por sua vez, os geotêxteis são materiais permeáveis com capacidade para o desempenho de várias funções, como por exemplo: filtragem, drenagem, separação, proteção ou reforço. A sua principal função quando parte de um sistema de impermeabilização de base de um aterro de resíduos é conferir proteção à geomembrana contra perfurações ou rasgos induzidos pelas partículas da camada de drenagem subjacente.

A instalação da camada de drenagem pode causar danos aos geossintéticos utilizados no sistema de impermeabilização. Estes danos devem ser conhecidos e considerados na fase de projeto. A avaliação de danos na instalação pode ser realizada por ensaios de campo (instalação sob condições reais e recuperação imediata dos materiais para análise) ou por ensaios laboratoriais que simulem ações de danificação.

Este trabalho avalia, em laboratório, a danificação mecânica sofrida por geossintéticos usados em sistemas de impermeabilização de base de aterros de resíduos. Para esse fim, foram realizados ensaios de danificação mecânica sob carga repetida e avaliou-se o efeito desses ensaios no comportamento mecânico dos geossintéticos. Os principais objetivos do trabalho incluíram: quantificar as alterações ocorridas nas propriedades mecânicas dos geossintéticos; avaliar o efeito do uso de diferentes bases de ensaio e agregados nos ensaios de danificação mecânica; e determinar a influência do uso de diferentes geotêxteis de proteção na degradação sofrida pela geomembrana.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Geossintéticos

As atividades experimentais deste trabalho envolveram o uso de quatro geossintéticos: dois geotêxteis não-tecidos agulhados de polipropileno (PP), um com 300 g/m² (G300) e outro com 400 g/m² (G400) (valores de massa por unidade de área reportados pelo fabricante); uma geomembrana de polietileno de alta densidade com superfície lisa; e um geocompósito constituído por uma camada de bentonite sódica encapsulada entre dois geotêxteis de PP, um tecido e um não-tecido. A Figura 1 ilustra os geossintéticos (amostras com dimensões de ≈ 10 cm x 10 cm) estudados neste trabalho. Os valores das massas por unidade de área (μ_A) e espessuras (t) dos geossintéticos, bem como os respetivos intervalos de confiança de 95%, encontram-se resumidos no Quadro 1. A massa por unidade de área foi determinada de acordo com as normas EN ISO 9864 (2005) (geotêxteis e geomembrana) e EN 14196 (2016) (geocompósito). Por sua vez, a espessura foi obtida de acordo com a norma EN ISO 9863-1 (2016). Os materiais estudados possuíam características compatíveis com as frequentemente requisitadas para utilização em sistemas de impermeabilização de base de aterros de resíduos.

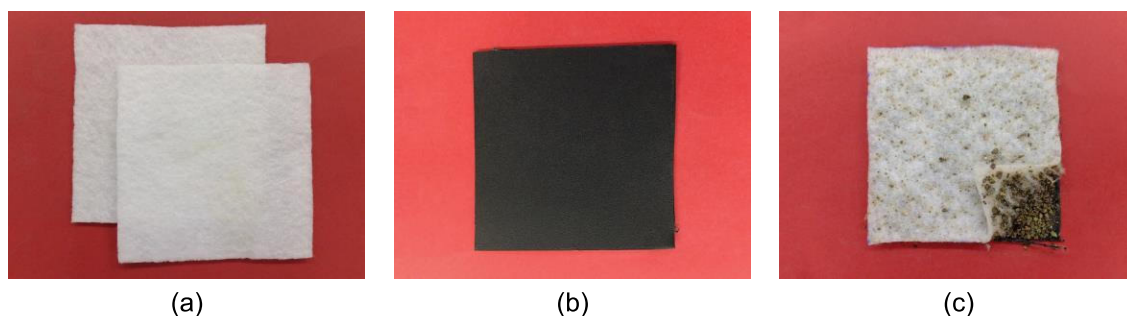


Figura 1 – Geossintéticos: (a) Geotêxteis G300 e G400; (b) Geomembrana; (c) Geocompósito.

Quadro 1 – Massa por Unidade de Área e Espessura dos Geossintéticos.

Geossintético	μ_A (g/m ²)	t (mm)
Geotêxtil G300	312 ± 20	$2,65 \pm 0,12$
Geotêxtil G400	411 ± 12	$2,81 \pm 0,07$
Geomembrana	1773 ± 13	$1,96 \pm 0,02$
Geocompósito	6858 ± 123	$8,44 \pm 0,34$

2.2. Danificação mecânica sob carga repetida

Os ensaios de danificação mecânica sob carga repetida (para simplificação de escrita, doravante designados por ensaios de DM) pretendem simular a danificação mecânica, causada por solos/agregados, a que os geossintéticos estão sujeitos quando expostos a cargas repetidas. Estes ensaios foram realizados num protótipo laboratorial existente na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Os principais constituintes do equipamento incluíam: caixa de danificação, placa de carga e sistema de aplicação de carga. A caixa de danificação possuía 300 mm de comprimento, 300 mm de largura e 180 mm de altura. Por sua vez, a placa de carga possuía um comprimento de 200 mm e uma largura de 100 mm.

O procedimento de ensaio foi o seguinte: (1) preenchimento da parte inferior da caixa de danificação com uma base (altura de 75 mm) rígida (betão) ou flexível (areia siltosa com um índice de compactidade de 50%); (2) colocação dos geossintéticos sobre a base; (3) colocação de uma camada de agregado com uma altura de 75 mm; e (4) aplicação de uma carga cíclica entre $(5,0 \pm 0,5)$ kPa e (500 ± 10) kPa (frequência de 1 Hz, 200 ciclos) (Figura 2). O procedimento de ensaio é uma adaptação do método da norma EN ISO 10722 (2007). O plano de ensaios encontra-se resumido no Quadro 2.

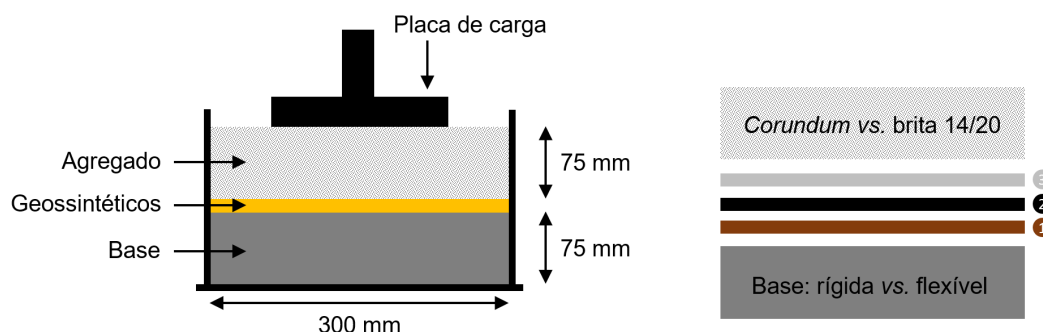


Figura 2 – Representação Esquemática dos Ensaio de Danificação Mecânica.
Legenda: (1) Geocompósito; (2) Geomembrana; (3) Geotêxtil.

Quadro 2 – Plano de Ensaios de Danificação Mecânica.

Sistema de impermeabilização	Base	Agregado
Geotêxtil 400 – Geomembrana – Geocompósito	Rígida	Corundum Brita 14/20
	Flexível	Corundum Brita 14/20
Geotêxtil 300 – Geomembrana – Geocompósito	Rígida	Corundum Brita 14/20

No passo 2 do procedimento anterior, foram sempre colocados três geossintéticos: o geocompósito (em contacto com a base), a geomembrana e, por último, um geotêxtil (G300 ou G400). O teste simultâneo dos materiais deveu-se ao facto de, em situações reais, estes serem instalados em conjunto em sistemas de impermeabilização de base de aterros de resíduos. Os agregados mencionados no passo 4 incluíram o *corundum* (agregado sintético de óxido de alumínio especificado na norma EN ISO 10722 (2007)) e brita 14/20 (Quadro 3).

Quadro 3 – Agregados Usados nos Ensaios de Danificação Mecânica.

Agregado	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D _{Max} (mm)
Corundum	5,8	7,1	7,9	8,4	10,0
Brita 14/20	9,4	13,0	16,3	17,1	20,0

D_x – diâmetro correspondente a X% de passados; D_{Max} – diâmetro máximo das partículas

2.3. Avaliação dos danos sofridos pelos geossintéticos

A degradação ocorrida nos geossintéticos durante os ensaios de DM foi avaliada pela monitorização de alterações nas suas propriedades mecânicas. Para tal, efetuaram-se ensaios de tração, rasgamento e punçoamento estático (os subpontos 2.3.1 a 2.3.4 incluem uma breve descrição desses ensaios). Os valores das propriedades de tração, rasgamento e punçoamento estático correspondem à média aritmética de 5 provetes e são apresentados com intervalos de confiança de 95% de acordo com Montgomery e Runger (2010). As propriedades de tração e rasgamento foram obtidas na direção de fabrico dos geossintéticos.

2.3.1. Tração: geotêxteis e geocompósito

Os ensaios de tração dos geotêxteis e do geocompósito foram realizados de acordo com a norma EN ISO 10319 (2015). Os provetes possuíam 300 mm de comprimento (100 mm de comprimento entre garras) e 200 mm de largura. A velocidade de ensaio foi de 20 mm/min. As propriedades obtidas nos ensaios de tração foram a resistência à tração (força máxima por unidade de largura) (T , em kN/m) e a extensão na força máxima (E_T , em %). A extensão foi medida através do deslocamento relativo entre as garras.

2.3.2. Tração: geomembrana

Os ensaios de tração da geomembrana foram efetuados segundo o método da norma ASTM D638 (2014) – velocidade de ensaio de 50 mm/min. As propriedades mecânicas determinadas nestes ensaios foram: tensão na cedência (valor máximo) (T_C , em MPa), deformação na cedência (D_C , em %), tensão na rotura (valor máximo) (T_R , em MPa) e deformação na rotura (D_R , em %).

2.3.3. Rasgamento

Os ensaios de rasgamento foram realizados apenas para a geomembrana e seguiram as indicações da norma ASTM D1004 (2013) – velocidade de ensaio de 51 mm/min. A propriedade obtida nestes ensaios foi a resistência ao rasgamento (força máxima) (F_R , em N).

2.3.4. Punçãoamento estático

Os ensaios de punçãoamento estático foram efetuados de acordo com a norma EN ISO 12236 (2006). Estes ensaios foram aplicados a todos os geossintéticos e envolveram o teste de provetes circulares com um diâmetro útil de 150 mm (área do provete entre as garras). O cilindro em aço inoxidável que atravessou os provetes (velocidade de 50 mm/min) possuía um diâmetro de 50 mm. As propriedades determinadas nos ensaios de punçãoamento estático foram a resistência ao punçãoamento (força máxima) (F_P , em kN) e o deslocamento na força máxima de punçãoamento (h_P , em mm).

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Nos pontos seguintes, os resultados serão apresentados por geossintético. Contudo, é importante relembrar que os materiais foram expostos em conjunto (o geocompósito, a geomembrana e um geotêxtil, G300 ou G400) aos ensaios de DM, tal como descrito no Quadro 2.

3.1. Geotêxtil G400

Em termos visuais (inspeção a olho nu), os ensaios de DM (bases rígida e flexível) não causaram danos muito significativos no geotêxtil G400. Foram, no entanto, detetadas algumas marcas de compressão (sem furo) e alguns punçoamentos pontuais (devido à angulosidade das partículas dos agregados). No caso dos ensaios com *corundum*, foi também possível detetar cortes de fibras e alguma abrasão. Estes danos, embora de baixa intensidade, resultaram em alterações nas propriedades mecânicas do geotêxtil G400 (Quadro 4).

Quadro 4 – Propriedades Mecânicas do Geotêxtil G400, Antes e Após os Ensaios de DM.

Amostra	Base	T (kN/m)	E_T (%)	F_P (kN)	h_P (mm)
Intacto	–	$29,49 \pm 3,19$	$82,7 \pm 5,2$	$5,39 \pm 0,19$	$55,1 \pm 0,8$
DM <i>corundum</i>	Rígida	$23,22 \pm 2,83$	$55,9 \pm 5,5$	$4,29 \pm 0,53$	$46,3 \pm 1,9$
DM brita 14/20	Rígida	$25,54 \pm 2,38$	$62,0 \pm 5,3$	$4,39 \pm 0,34$	$48,0 \pm 4,1$
DM <i>corundum</i>	Flexível	$23,44 \pm 2,21$	$56,9 \pm 3,6$	$4,18 \pm 0,48$	$47,5 \pm 2,5$
DM brita 14/20	Flexível	$25,88 \pm 2,70$	$61,0 \pm 4,3$	$4,81 \pm 0,53$	$49,5 \pm 1,3$

A resistência à tração do geotêxtil G400 sofreu uma redução (21,3%) após os ensaios de DM com *corundum*, com base rígida. No caso dos ensaios com brita 14/20, usando a mesma base, a redução foi ligeiramente inferior, nomeadamente de 13,4%. A maior redução promovida pelo *corundum* poderá estar relacionada com os cortes de fibras e abrasão, danos que não foram detetados quando os ensaios de DM foram realizados com brita 14/20. Embora o *corundum* fosse constituído por partículas com dimensões inferiores às da brita 14/20 (Quadro 3), estas eram muito angulares e ásperas, o que poderá explicar os danos adicionais (cortes de fibras e abrasão) acima referidos. Tal como a resistência à tração, a extensão na força máxima também diminuiu depois dos

ensaios de DM. O impacto dos dois agregados não foi muito diferente, novamente com tendência para uma menor diminuição provocada pela brita 14/20.

Ainda na base rígida, as variações provocadas pelos ensaios de DM na resistência ao punção do geotêxtil G400 foram muito idênticas às anteriormente descritas para a sua resistência à tração. De facto, em termos percentuais, os ensaios com *corundum* e brita 14/20 causaram reduções na resistência ao punção de, respetivamente, 20,4% e 18,6% (21,3% e 13,4%, respetivamente, no caso da resistência à tração). O deslocamento na força máxima de punção sofreu também uma redução. De um modo geral, as propriedades de punção foram afetadas de forma idêntica pelos dois agregados (ligeira tendência para um maior impacto do *corundum*).

Terminada a análise do efeito dos ensaios de DM com base rígida no comportamento do geotêxtil G400, é importante comparar com o que aconteceu na base flexível. Esta comparação permite concluir que não existiram diferenças significativas entre as duas bases de ensaio. De facto, e como ilustrado no Quadro 4, para o mesmo agregado nas diferentes bases de ensaio, o impacto dos ensaios de DM nas propriedades de tração e punção do geotêxtil G400 foi praticamente igual. Embora as diferenças sejam relativamente pequenas, considerando todos os resultados, observa-se uma tendência para uma maior danificação do geotêxtil G400 nos ensaios de DM com *corundum* (em comparação com a brita 14/20).

3.2. Geotêxtil G300

De um modo geral, em termos visuais, as alterações provocadas pelos ensaios de DM no geotêxtil G300 foram idênticas às anteriormente descritas para o geotêxtil G400. De facto, não foram detetados danos muito pronunciados: apenas marcas de compressão (sem furo) e alguns punções pontuais e, no caso dos ensaios com *corundum*, também cortes de algumas fibras e alguma abrasão. Contudo, e tal como no geotêxtil G400, estes danos resultaram em alterações nas propriedades mecânicas do geotêxtil G300 (Quadro 5).

Quadro 5 – Propriedades Mecânicas do Geotêxtil G300, Antes e Após os Ensaios de DM.

Amostra	Base	T (kN/m)	E _T (%)	F _P (kN)	h _P (mm)
Intacto	–	25,09 ± 1,78	78,9 ± 8,6	5,05 ± 0,80	58,4 ± 1,5
DM <i>corundum</i>	Rígida	17,94 ± 1,54	51,9 ± 8,3	3,48 ± 0,38	46,7 ± 1,4
DM brita 14/20	Rígida	21,01 ± 3,42	59,9 ± 10,1	4,14 ± 0,47	49,2 ± 1,6

Os ensaios de DM com *corundum* e brita 14/20 causaram uma redução na resistência à tração do geotêxtil G300. O impacto do *corundum* (redução de 28,5%) foi superior ao da brita 14/20 (redução de 16,3%). Este comportamento foi também observado para a resistência ao punção, com reduções de 31,1% e 18,0%, respetivamente. Tal como no geotêxtil G400, as resistências à tração e ao punção foram afetadas de forma idêntica pelos ensaios de DM. As diminuições observadas na extensão na força máxima e no deslocamento na força máxima de punção foram tendencialmente maiores quando os ensaios de DM foram realizados com *corundum*. As razões para o maior impacto deste agregado (comparativamente com a brita 14/20) foram discutidas no ponto anterior.

Apesar dos danos visuais serem idênticos, a resistência do geotêxtil G300 às ações de danificação (medida pela capacidade dos materiais conservarem as suas propriedades mecânicas) foi ligeiramente inferior à do geotêxtil G400. As diminuições ocorridas nas resistências à tração e ao punção dos geotêxteis G300 e G400 após os ensaios

de DM com *corundum* e brita 14/20 (base rígida) estão ilustradas na Figura 3. A maior massa por unidade de área e espessura (comparativamente ao geotêxtil G300) explica a maior resistência do geotêxtil G400 às ações de danificação.

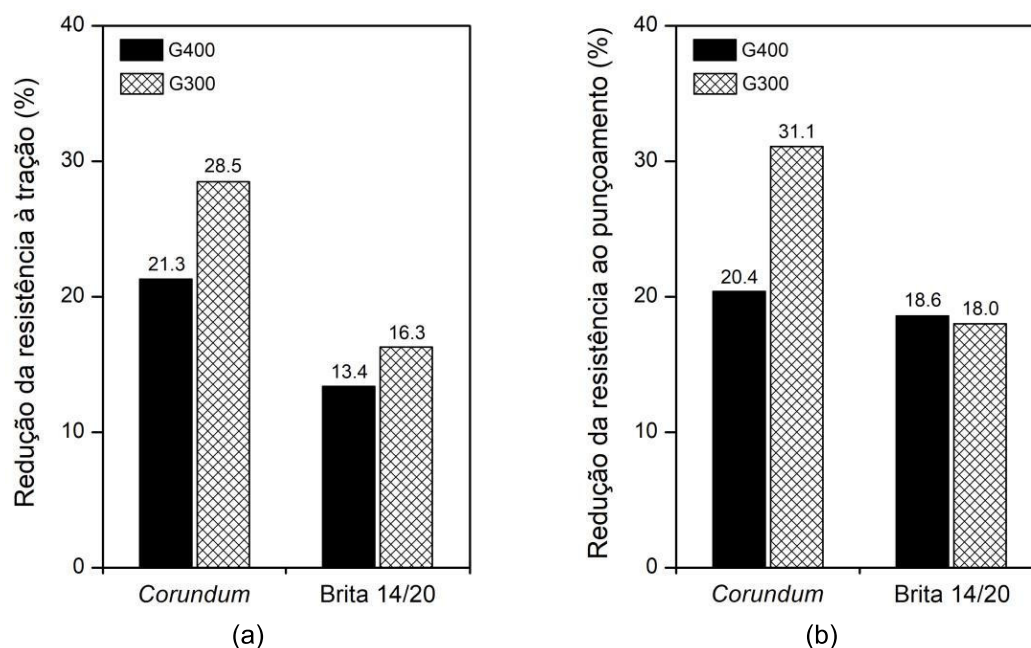


Figura 3 – Redução Percentual da Resistência Mecânica dos Geotêxteis G400 e G300 Após os Ensaios de DM (Base Rígida): (a) Resistência à Tração; (b) Resistência ao Punçoamento.

3.3. Geomembrana

De um modo geral, a geomembrana não sofreu danos muito pronunciados durante os ensaios de DM. Visualmente, foram apenas detetadas algumas marcas (compressões) induzidas pelas partículas dos agregados (Figura 4). Estas marcas, as quais possuíam dimensões muito reduzidas, eram mais evidentes após os ensaios com brita 14/20 do que com *corundum*. O maior impacto da brita 14/20 pode ser atribuído ao tamanho das suas partículas, as quais possuíam dimensões superiores às do *corundum*. Não foram encontrados cortes ou perfuração da geomembrana. Desta forma, foi possível concluir que os ensaios de DM não colocaram em causa a sua função de barreira de fluidos.

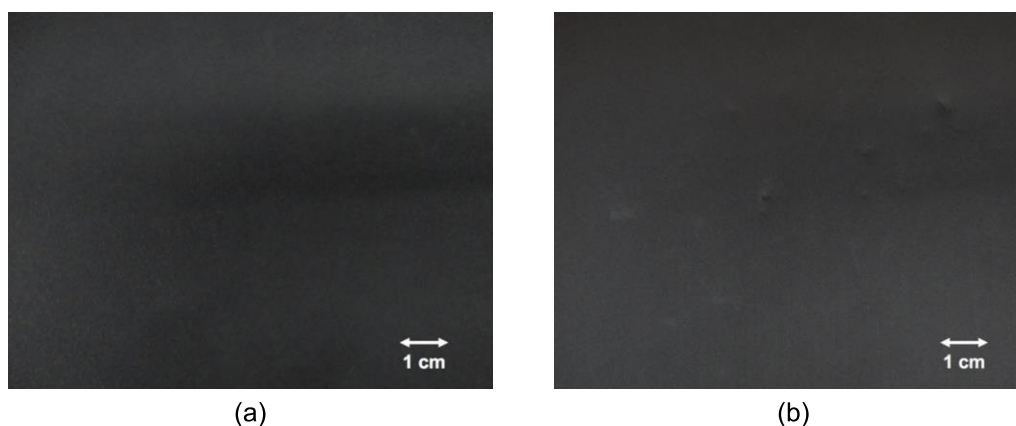


Figura 4 – Geomembrana: (a) Amostra Intacta; (b) Amostra Danificada com Brita 14/20 (Base Rígida; Sistema com Geotêxtil G400)

Os danos visualmente detetáveis na geomembrana não foram influenciados pela base de ensaio. Igualmente, também não existiram diferenças significativas entre os danos ocorridos quando esta foi protegida pelos geotêxteis G300 ou G400. As propriedades mecânicas da geomembrana, antes e depois dos ensaios de DM, são apresentadas nos subpontos seguintes.

3.3.1. Sistema com geotêxtil G400

As propriedades de tração da geomembrana (sistema com geotêxtil G400) podem ser encontradas no Quadro 6. Por sua vez, o Quadro 7 resume as restantes propriedades mecânicas (rasgamento e punçoamento).

Quadro 7 – Propriedades de Tração da Geomembrana,
Antes e Após os Ensaios de DM: Sistema Com Geotêxtil G400.

Amostra	Base	T _C (MPa)	T _R (MPa)	D _C (%)	D _R (%)
Intacto	–	20,0 ± 0,8	19,1 ± 1,9	20,5 ± 1,5	627 ± 65
DM <i>corundum</i>	Rígida	20,8 ± 0,5	19,0 ± 1,3	20,7 ± 1,3	616 ± 66
DM brita 14/20	Rígida	21,1 ± 0,5	18,9 ± 1,9	19,3 ± 0,8	557 ± 172
DM <i>corundum</i>	Flexível	20,6 ± 0,4	18,0 ± 1,3	19,1 ± 1,4	538 ± 80
DM brita 14/20	Flexível	20,5 ± 0,6	18,5 ± 1,1	19,5 ± 1,0	605 ± 52

Quadro 7 – Propriedades de Rasgamento e Punçoamento da Geomembrana,
Antes e Após os Ensaios de DM: Sistema Com Geotêxtil G400.

Amostra	Base	F _R (N)	F _P (kN)	h _P (mm)
Intacto	–	345 ± 8	5,93 ± 0,12	128,4 ± 1,9
DM <i>corundum</i>	Rígida	343 ± 9	5,87 ± 0,14	124,2 ± 5,9
DM brita 14/20	Rígida	346 ± 9	5,79 ± 0,17	122,4 ± 4,0
DM <i>corundum</i>	Flexível	348 ± 18	5,67 ± 0,07	120,1 ± 2,2
DM brita 14/20	Flexível	346 ± 13	5,83 ± 0,13	123,4 ± 2,6

Contrariamente ao que ocorreu no geotêxtil G400 (em contacto direto com o *corundum* e com a brita 14/20), os ensaios de DM não foram responsáveis por alterações muito significativas no comportamento mecânico da geomembrana (testada entre o geotêxtil G400 e o geocompósito). De facto, o impacto dos ensaios de DM (independentemente do agregado ou base de ensaio) foi mínimo: variações entre +2,5% e +5,5% na tensão na cedência, entre -5,8% e -0,5% na tensão na rotura, inferiores a ±1% na resistência ao rasgamento e entre -4,4% e -1,0% na resistência ao punçoamento. A deformação na cedência e na rotura, bem como o deslocamento na força máxima de punçoamento, também não sofreram variações relevantes.

A ausência de danos consideráveis na geomembrana, ilustrado por variações mínimas nas suas propriedades mecânicas (variações essas que até podem apenas traduzir a habitual variabilidade entre os valores obtidos em ensaios repetidos de um material), indicou que o geotêxtil G400 protegeu a geomembrana contra as ações de danificação mecânica, desempenhando corretamente a sua função de proteção.

3.3.2. Sistema com geotêxtil G300

O Quadro 8 resume as propriedades de tração da geomembrana, quando testada em conjunto com o geotêxtil G300. As propriedades de rasgamento e punçoamento estão resumidas no Quadro 9.

Quadro 8 – Propriedades de Tração da Geomembrana,
Antes e Após os Ensaio de DM: Sistema Com Geotêxtil G300.

Amostra	Base	T _C (MPa)	T _R (MPa)	D _C (%)	D _R (%)
Intacto	–	20,0 ± 0,8	19,1 ± 1,9	20,5 ± 1,5	627 ± 65
DM <i>corundum</i>	Rígida	21,2 ± 0,7	21,3 ± 2,6	20,4 ± 0,6	700 ± 102
DM brita 14/20	Rígida	20,9 ± 0,6	23,1 ± 0,2	20,7 ± 0,6	785 ± 42

Quadro 9 – Propriedades de Rasgamento e Punçoamento da Geomembrana,
Antes e Após os Ensaio de DM: Sistema Com Geotêxtil G300.

Amostra	Base	F _R (N)	F _P (kN)	h _P (mm)
Intacto	–	345 ± 8	5,93 ± 0,12	128,4 ± 1,9
DM <i>corundum</i>	Rígida	360 ± 25	5,77 ± 0,15	123,8 ± 4,0
DM brita 14/20	Rígida	358 ± 24	5,66 ± 0,12	121,6 ± 1,1

Tal como no caso anterior (sistema com geotêxtil G400), o comportamento mecânico da geomembrana (sistema com geotêxtil G300) não sofreu alterações relevantes após os ensaios de DM (independentemente do agregado). De facto, as variações ocorridas nas suas propriedades de tração, rasgamento e punçoamento foram marginais. Desta forma, o geotêxtil G300 também protegeu devidamente a geomembrana das ações de danificação mecânica.

3.4. Geocompósito

Os ensaios de DM não induziram danos visíveis no geocompósito, independentemente do agregado de danificação, base de ensaio ou geotêxtil de proteção. Este desfecho era esperado, uma vez que o geocompósito contactou apenas com a geomembrana e com a base de ensaio (superfície relativamente lisa e com área de contacto elevada). As propriedades mecânicas do geocompósito encontram-se resumidas nos Quadros 10 (sistema com geotêxtil G400) e 11 (sistema com geotêxtil G300).

Quadro 10 – Propriedades Mecânicas do Geocompósito,
Antes e Após os Ensaio de DM: Sistema com Geotêxtil G400.

Amostra	Base	T (kN/m)	E _T (%)	F _P (kN)	h _P (mm)
Intacto	–	19,15 ± 1,12	28,7 ± 3,3	2,90 ± 0,21	42,5 ± 4,5
DM <i>corundum</i>	Rígida	19,42 ± 1,66	28,8 ± 2,6	2,80 ± 0,21	39,4 ± 1,6
DM brita 14/20	Rígida	19,68 ± 1,88	28,7 ± 3,1	2,81 ± 0,20	40,3 ± 5,5
DM <i>corundum</i>	Flexível	18,77 ± 1,12	28,3 ± 1,9	2,94 ± 0,25	39,0 ± 4,6
DM brita 14/20	Flexível	19,17 ± 0,69	28,0 ± 1,9	2,77 ± 0,26	36,5 ± 2,0

Quadro 11 – Propriedades Mecânicas do Geocompósito,
Antes e Após os Ensaio de DM: Sistema com Geotêxtil G300.

Amostra	Base	T (kN/m)	E _T (%)	F _P (kN)	h _P (mm)
Intacto	–	19,15 ± 1,12	28,7 ± 3,3	2,90 ± 0,21	42,5 ± 4,5
DM <i>corundum</i>	Rígida	19,26 ± 1,12	28,5 ± 3,2	2,91 ± 0,15	44,5 ± 5,1
DM brita 14/20	Rígida	18,86 ± 0,70	28,5 ± 1,4	2,90 ± 0,22	43,8 ± 7,2

Tal como ocorreu para a geomembrana, as propriedades mecânicas do geocompósito mantiveram-se inalteradas após os ensaios de DM, independentemente do agregado de danificação (*corundum* ou brita 14/20), da base de ensaio ou do geotêxtil utilizado no sistema de impermeabilização. Foram observadas variações na resistência à tração entre -2,0% e +2,8%. No caso da resistência ao punçoamento, as variações estiveram compreendidas entre -4,5% e +1,4%. Estas pequenas diferenças não têm significado, representando apenas a típica variabilidade entre resultados obtidos em repetições de um mesmo ensaio de caracterização.

4. CONCLUSÕES

De um modo geral, os ensaios laboratoriais de danificação mecânica não provocaram danos muito relevantes em geossintéticos usados em sistemas de impermeabilização de base de aterros de resíduos. O desempenho da geomembrana e do geocompósito bentonítico não foi comprometido: estes materiais não sofreram danos visíveis muito pronunciados e não foram observadas variações significativas nas suas propriedades mecânicas. No caso dos geotêxteis, foram detetados alguns danos visíveis (marcas de compressão por parte dos agregados (sem indução de furo), punçoamentos pontuais, cortes de fibras e abrasão) e ocorreram alterações no seu comportamento mecânico. Estas alterações foram ligeiramente mais acentuadas no geotêxtil com menor massa por unidade de área e espessura. Relativamente aos dois agregados de danificação, o impacto do *corundum* tendeu a ser superior ao da brita 14/20. Por sua vez, a alteração da base de ensaio (rígida ou flexível) não teve influência na degradação sofrida pelos geotêxteis.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento base – UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).



REFERÊNCIAS

- ASTM D638 (2014). *Standard test method for tensile properties of plastics*. ASTM International, West Conshohocken, Estados Unidos da América.
- ASTM D1004 (2013). *Standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting*. ASTM International, West Conshohocken, Estados Unidos da América.
- EN 14196 (2016). *Geosynthetics – Test methods for measuring mass per unit area of clay geosynthetic barriers*. Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.
- EN ISO 9863-1 (2016). *Geosynthetics – Determination of thickness at specified pressures – Part 1: Single layers*. Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.
- EN ISO 9864 (2005). *Geosynthetics – Test method for the determination of mass per unit area of geotextiles and geotextile-related products*. Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.
- EN ISO 10319 (2015). *Geosynthetics – Wide-width tensile test*. Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.
- EN ISO 10722 (2007). *Geosynthetics – Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material*. Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.
- EN ISO 12236 (2006). *Geosynthetics. Static puncture test (CBR test)*. Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.
- Montgomery, D.C. e Runger, G.C. (2010). *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 5ª ed., John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque, Estados Unidos da América.