

25 ANOS DE INVESTIGAÇÃO NA FEUP NO DOMÍNIO DOS GEOSSINTÉTICOS

25 years of research on geosynthetics at FEUP

Maria Lurdes Lopes *

RESUMO – Neste trabalho resume-se a investigação (no domínio dos geossintéticos) desenvolvida ao longo de 25 anos na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) com base, fundamentalmente, nos projetos de investigação financiados. Para cada projeto são indicados os objetivos da investigação correspondente e os indicadores de realização mais relevantes, nomeadamente: patentes, protótipos, instalações piloto, aplicações computacionais e dissertações de doutoramento. As dissertações de mestrado mencionadas no texto resumem-se às que contribuíram de modo relevante para os indicadores atrás referidos. Apenas as publicações alvo de prémios Revista Geotecnia são mencionadas no texto.

SYNOPSIS – This work summarizes the research (on geosynthetics) developed over 25 years at the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP) based, fundamentally, on funded research projects. For each project the objectives of the corresponding research and the most relevant achievement indicators are referred, namely: patents, prototypes, pilot installations, computational applications and PhD theses. The MSc dissertations mentioned in the text are only those that contributed in a relevant way to the aforementioned indicators. Only the Revista Geotecnia Prize-winning publications are mentioned in the text.

Palavras-chave – Investigação, geossintéticos, indicadores relevantes.

Keywords – Research, geosynthetics, relevant indicators.

1 – INTRODUÇÃO

A dissertação de doutoramento intitulada “Muros reforçados com geossintéticos” publicada em 1992 constitui o primeiro indicador relevante da investigação no domínio dos geossintéticos na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Neste trabalho, orientado por António Cardoso, Lopes (1992) investigou fundamentalmente:

- os geossintéticos enquanto materiais de construção, dando especial realce às suas potencialidades como elementos de reforço de solos;
- as propriedades dos geossintéticos e a sua alteração no tempo, bem como as metodologias de controlo dessas propriedades;
- o comportamento de estruturas (aterros) reforçadas com elementos metálicos e com geossintéticos;
- as características geotécnicas e mecânicas dos solos e a sua modelação matemática;
- a modelação matemática das características físicas e mecânicas dos geossintéticos a curto e a longo prazo;
- o desenvolvimento de modelos numéricos 2D, baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), capazes de simular a construção e de prever o comportamento ao longo do tempo de aterros reforçados com geossintéticos.

* CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto. Email: lcosta@fe.up.pt

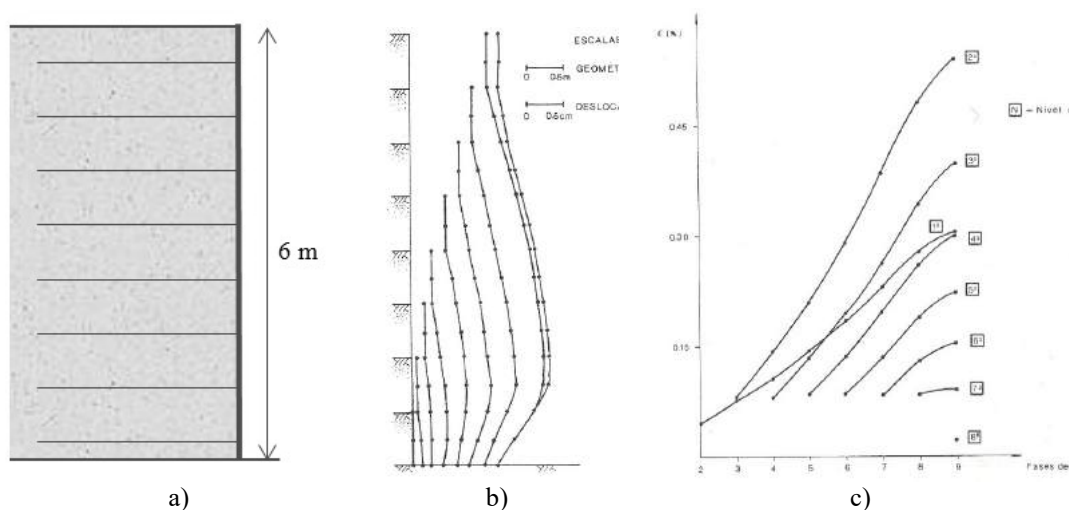


Fig. 1 – Simulação numérica do comportamento durante a construção de um muro reforçado com geossintéticos: a) estrutura analisada; b) evolução dos deslocamentos da face; c) evolução do esforço nos reforços (Lopes, 1992).

Desta investigação resultaram 5 publicações em revista (1 em revista internacional e 4 em revista nacional), tendo sido atribuído o Prémio Revista Geotecnia para o biénio 1992/93 ao trabalho intitulado “Análise do comportamento de um muro reforçado com geossintéticos” da autoria de Lopes & Cardoso (1993).

De seguida apresentam-se alguns resultados da investigação desenvolvida. Na Figura 1 mostra-se uma estrutura reforçada com geossintéticos modelada pelo MEF, bem como a evolução dos deslocamentos da face e dos esforços nos reforços durante a construção.

Após esta dissertação, a investigação prosseguiu em diferentes temáticas e áreas de aplicação dos geossintéticos, de acordo com as diretivas, à data, da Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS) que consistiam no desenvolvimento de investigação laboratorial e *in situ* com vista a uma melhor compreensão do comportamento dos materiais nas estruturas em que estavam inseridos e no desenvolvimento de metodologias de dimensionamento específicas para os geossintéticos e ainda no desenvolvimento de normalização de ensaios de geossintéticos.

De seguida serão descritas de modo, tanto quanto possível, cronológico não só esta investigação como toda a posterior até aos dias de hoje com base nos projetos de investigação financiados.

2 – PROJETOS DE INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

2.1 – Estudo integrado de muros e taludes reforçados com materiais poliméricos

O projeto de investigação (PBIC/C/CEG/1327/92), intitulado “Estudo Integrado de muros e taludes reforçados com materiais poliméricos”, decorreu entre 1992 e 1995 e foi financiado pela JNICT. A instituição proponente foi a FEUP e a instituição participante a Universidade de Strathclyde – Glasgow – UK. O investigador responsável do projeto foi António Cardoso.

Os objetivos desta investigação foram:

- o estudo integrado, nas vertentes experimental, analítica e numérica, da utilização de geossintéticos no reforço de solos;

- propor novos e mais adequados métodos de dimensionamento e formular critérios para a seleção dos tipos de geossintéticos mais adequados em vários tipos de aplicações;
- explorar o potencial para a utilização inovadora dos geossintéticos na solução de problemas geotécnicos complexos.

Para atingir estes objetivos foram desenvolvidos vários protótipos laboratoriais, nomeadamente o do equipamento para ensaio de arranque de geossintéticos (Figura 2), desenvolvido no âmbito da dissertação de mestrado em Estruturas de Engenharia Civil da FEUP, intitulada “Estudo dos fenómenos da interação solo-geossintético através de ensaios de arranque”, de Miguel Ângelo Simões de Almeida Ladeira, em 1995, à qual foi atribuída o Prémio Sociedade Portuguesa de Geotecnia para o biénio 1995/96.

Este ensaio fornece informação acerca da variação da força de arranque com o deslocamento na interface solo-geossintético e da variação das tensões de corte ao longo do reforço na mesma interface (Figura 3). Com a informação obtida através do ensaio é possível calcular o coeficiente de resistência na interface (f), parâmetro fundamental para o dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos, onde o movimento de ocorrência provável na interface solo-

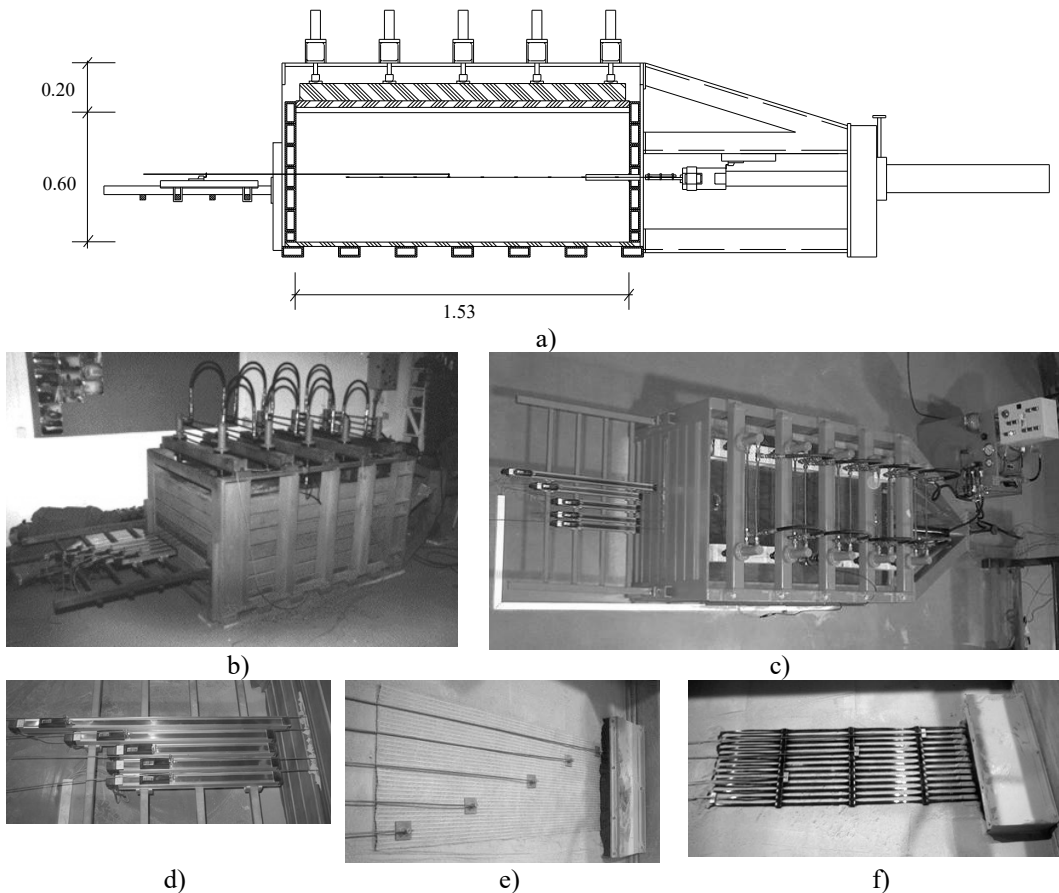


Fig. 2 – Equipamento de ensaio de arranque: a) representação esquemática; b) vista do equipamento à data da construção (1994); c) vista atual do equipamento; d) potenciômetros lineares para medição dos deslocamentos ao longo dos reforços; e) vista do posicionamento dos potenciômetros num geotêxtil; f) vista do posicionamento dos potenciômetros numa geogrelha.

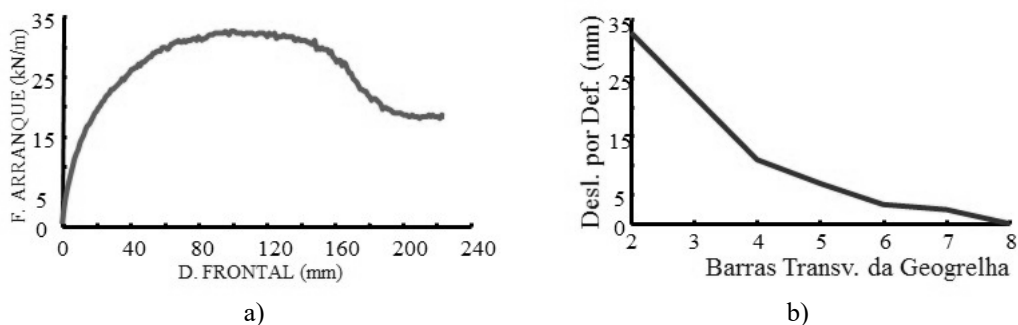


Fig. 3 – Resultados do ensaio de arranque de geossintéticos: a) variação da força de arranque com o deslocamento frontal; b) deslocamentos por deformação dos reforços.

geossintético é o movimento de arranque (Lopes, 2012).

É importante realçar que este protótipo e os ensaios nele realizados foram decisivos para a elaboração da norma Europeia EN 13738 (geotextiles and geotextile-related products – determination of pullout resistance in soil) desenvolvida pelo CEN/TC 189 – Geosynthetics.

Acresce referir que este equipamento foi considerado como “possuidor de um dos resultados mais interessantes apurados no âmbito do Levantamento de Resultados de I&D da Agência Inovação, S.A, em 1996.

Os outros protótipos desenvolvidos no decurso deste projeto de investigação foram os de: i) ensaio de punção estático (CBR test) (Figura 4a); ii) garras mecânicas para o ensaio de tração-extensão (Figura 4b).

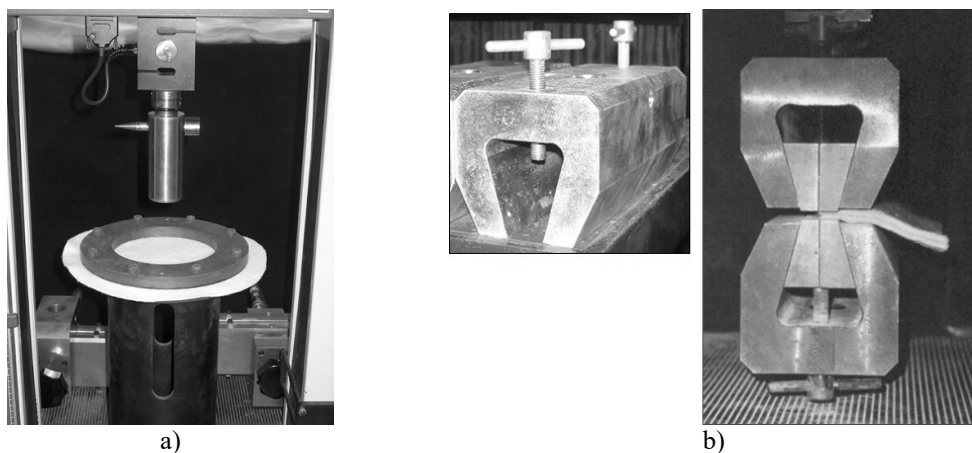


Fig. 4 – Protótipos de: a) equipamento de ensaio de punção estático (CBR test); b) garras mecânicas para o ensaio de tração-extensão.

2.2 – Estudo dos geossintéticos como materiais de controlo ambiental

O projeto de investigação (PRAXIS XXI 3/3.1/CEG/2598/95), intitulado “Estudo dos geossintéticos como materiais de controlo ambiental”, decorreu entre 1997 e 2000 e foi financiado pela JNICT. A instituição proponente foi a FEUP e as instituições participantes foram o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC, a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCT-UC) e a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP). A investigadora responsável do projeto foi Maria de Lurdes Lopes.

Os objetivos desta investigação foram:

- a caracterização mecânica dos geossintéticos a curto prazo;
- a caracterização mecânica das interfaces solo-geossintético através de ensaios de arranque e de corte em plano inclinado;
- a caracterização da durabilidade dos geossintéticos;
- o estudo das técnicas e métodos de instrumentação e observação de taludes reais;
- a construção, instrumentação e observação de um talude reforçado com geossintéticos – análise do comportamento e da estabilidade global.

Em simultâneo com este projeto competitivo decorreram 2 ações no âmbito do protocolo de investigação JAE-FEUP intituladas: 1ª) Aterro reforçado com geogrelhas – IP3, lanço Régua/Reconcos – conceção, construção e observação; 2ª) Danificação durante a construção de geossintéticos – estudo de coeficientes de segurança a adotar.

Como indicadores mais relevantes destes projetos pode-se referir: a) o desenvolvimento de 2 protótipos de equipamentos de ensaio de geossintéticos; b) 2 instalações piloto; c) 1 dissertação de doutoramento e 2 dissertações de mestrado.

Os protótipos de equipamentos de ensaio de geossintéticos desenvolvidos foram o de ensaio de corte em plano inclinado (Figura 5) e o de ensaio de danificação durante a instalação (Figura 6).

No ensaio de corte em plano inclinado obtém-se informação acerca da resistência das interfaces solo-geossintéticos instalados em taludes e sob tensão de confinamento baixa. Uma descrição exaustiva do ensaio pode ser encontrada em Costa-Lopes (2001) e Lopes et al. (2001).

No ensaio de danificação durante a instalação (DDI) de geossintéticos simula-se os danos que estes materiais sofrem durante a construção decorrentes de diferentes ações, em particular da compactação dos materiais adjacentes. Uma descrição exaustiva deste ensaio pode ser encontrada em Paula (2003) e Paula et al. (2004).

Na Figura 7 apresenta-se as diferentes fases de análise dos resultados do ensaio de danificação durante a instalação: a) inspeção visual; b) análise por microscopia eletrónica de varrimento; c) resistência residual.

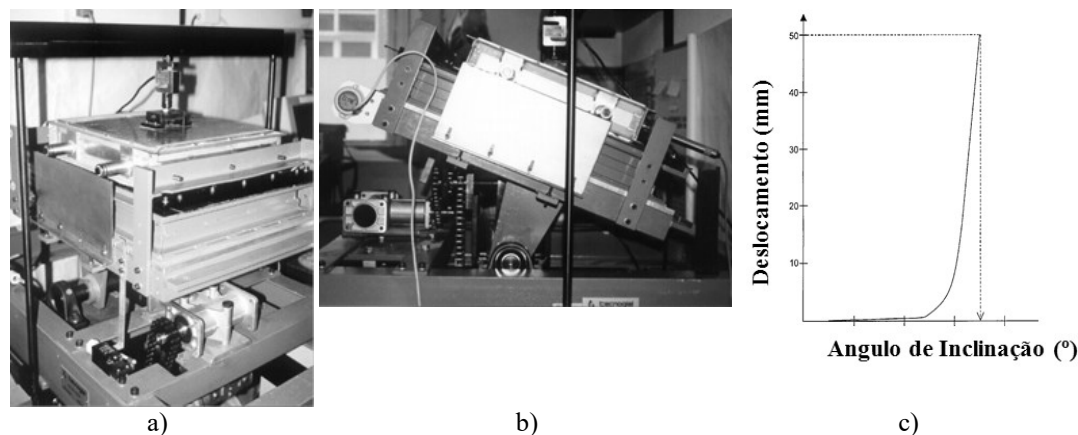


Fig. 5 – Ensaio de corte em plano incinado: a) início do ensaio; b) ensaio em curso; c) apresentação dos resultados do ensaio.

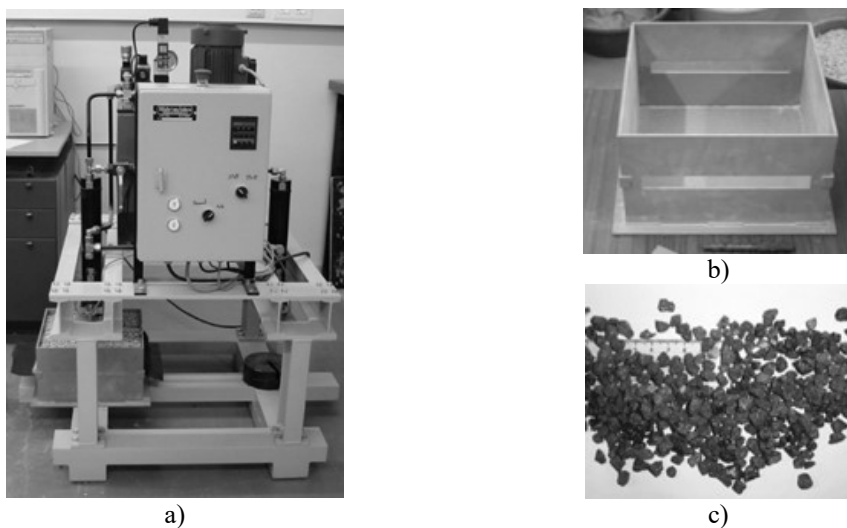


Fig. 6 – Equipamento de simulação da danificação durante a instalação de geossintéticos. a) vista global do equipamento; b) caixa onde se confina superior e inferiormente o geossintético; c) material confinante (brita siliciosa - *corundum*).

De notar que a resistência residual é definida em relação ao valor da propriedade em análise da amostra intacta.

A Figura 8 apresenta o aterro reforçado com geogrelhas do IP3 (lanço Régua-Reconcos) concebido, construído, instrumentado e observado durante 10 meses após a construção.

O aterro reforçado constitui um restabelecimento do IP3 com cerca de 106,2m de comprimento. O ângulo de inclinação dos taludes é de 60°. Os reforços foram colocados na horizontal com um espaçamento de 0,60m.

O perfil instrumentado (km 0+150) corresponde à altura máxima do aterro, estando reforçado com geogrelhas numa altura de 19,6m no extradorso. Neste perfil o comprimento dos reforços é de 11m.

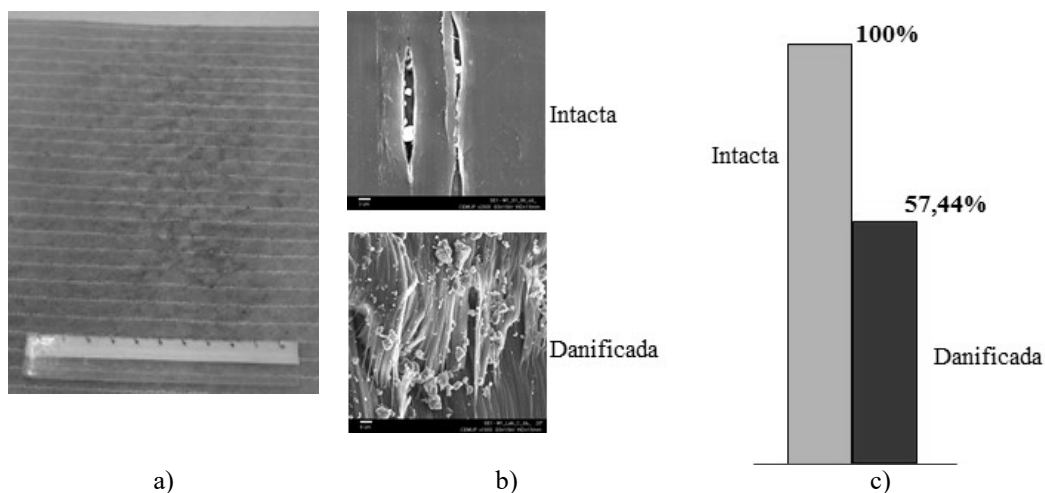


Fig. 7 – Fases de análise dos resultados do ensaio de danificação durante a instalação: a) inspeção visual; b) microscopia eletrónica de varrimento; c) resistência residual.

O aterro foi instrumentado com o objetivo de se observar o seu comportamento em termos de: i) deformações instaladas nos reforços; ii) deslocamentos internos; iii) deslocamentos da face; iv) tensões verticais.

Para o registo das deformações instaladas nos reforços foram usados extensómetros lineares espaçados de 0,50m nos níveis 4, 18 e 26 de reforço (Figuras 8 e 9). Os deslocamentos internos do aterro foram registados através de 2 tubos inclinómetros (I1 e I2 na Figura 8). Os deslocamentos da face foram medidos topograficamente através de 13 alvos colocados ao longo da altura do extradorso do perfil. As pressões de terras foram medidas através de células de tensões totais colocadas à cota dos níveis de reforço 4, 18 e 26.

Uma descrição detalhada da instalação piloto pode ser encontrada em Mendonça (2004). A título de exemplo apresenta-se na Figura 9 os resultados da observação das deformações instaladas nos reforços no fim da construção e 10 meses depois.

A outra instalação piloto executada, tal como a anterior, no âmbito do protocolo de investigação JAE-FEUP, consistiu na execução de aterros experimentais provisórios com o objetivo de aferir *in situ* a influência da danificação durante a instalação no comportamento mecânico a curto e a longo prazo dos geossintéticos. Para tal, foram utilizados 2 tipos de solo

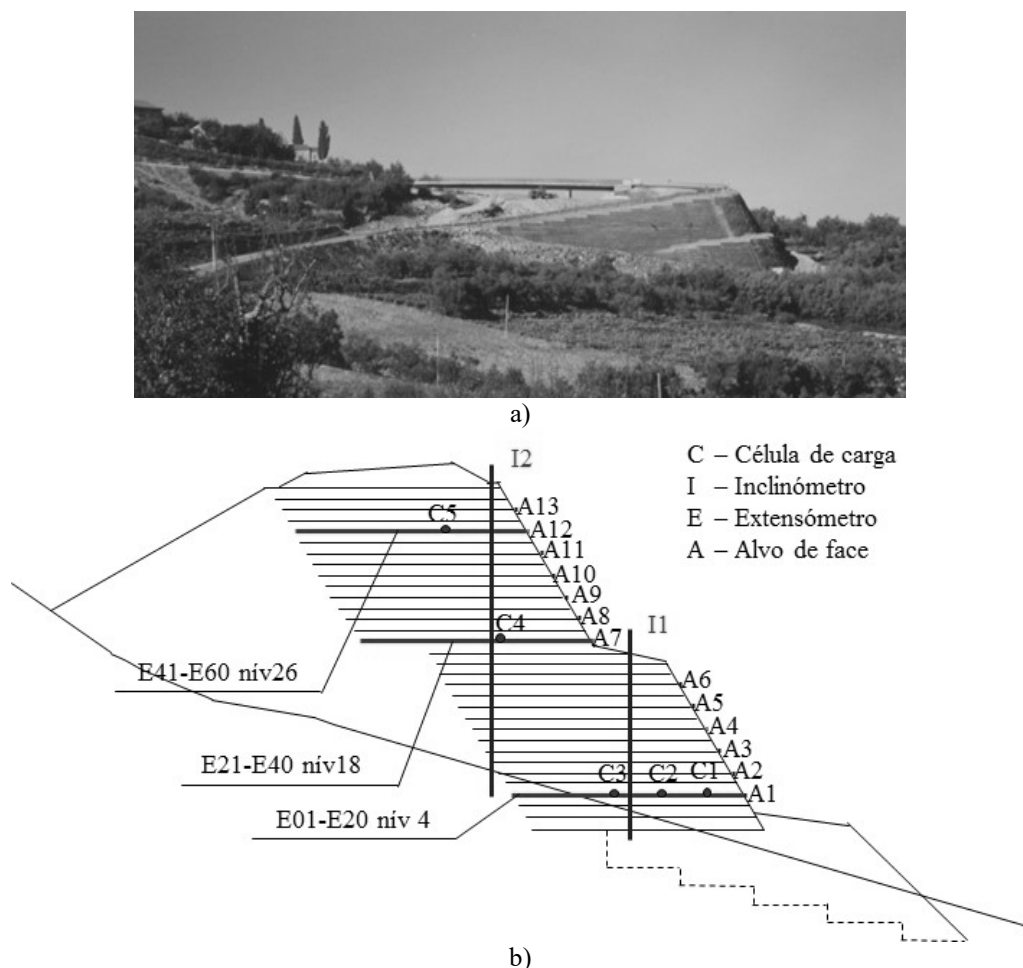


Fig. 8 – Aterro reforçado com geogrelhas do IP3 (lanço Régua-Reconcos): a) vista geral; b) perfil instrumentado (km 0+150).

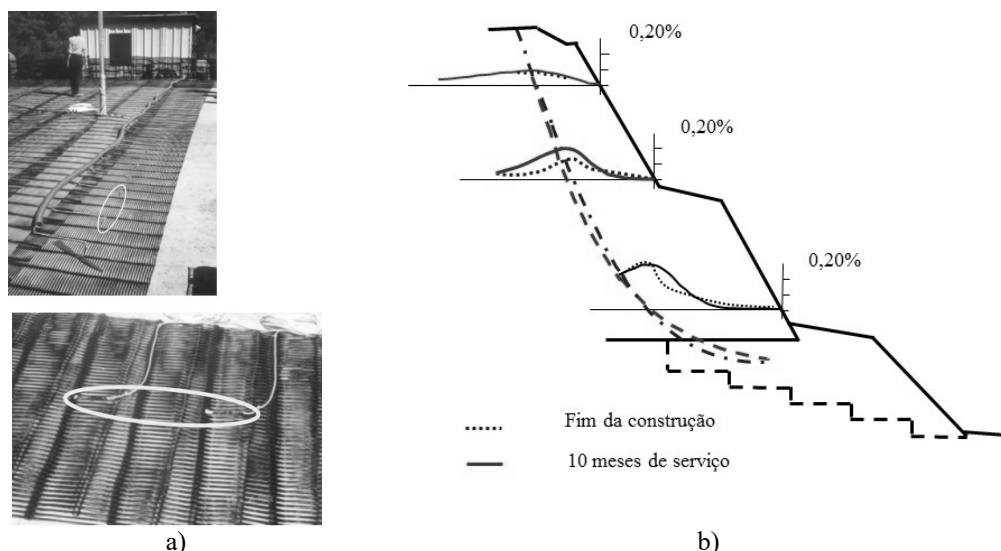


Fig. 9 – Deformações nos reforços: a) instrumentação; b) deformações instaladas no fim da construção e ao fim de 10 meses de serviço.

compactados, cada um, com 2 energias de compactação distintas e 8 tipos de geossintéticos diferentes.

Nas Figuras 10 e 11 pode observar-se a sequência da execução desses aterros experimentais, nomeadamente a: preparação da fundação; colocação dos geossintéticos; espalhamento e compactação do solo confinante; exumação dos geossintéticos.

Uma descrição detalhada deste estudo pode ser encontrada em Pinho-Lopes (2006).

A investigação descrita ao longo desta secção deu origem a uma dissertação de doutoramento em 2004 (“Estudo do comportamento de estruturas reforçadas com geogrelhas” de António Agostinho Martins Mendonça) e várias dissertações de mestrado de entre as quais se destacam as seguintes:

- “Estudo da influência da granulometria do solo e da estrutura do reforço nos mecanismos de interação solo-geossintético” de Margarida Pinho-Lopes, em 1999;
- “Estudo dos fenómenos de interação solo-geossintético através de ensaios de corte em plano inclinado” de Patrícia Costa-Lopes, em 2001.

Neste mesmo período o trabalho intitulado “Mecanismos de interacção solo-geogrelhas – papel da granulometria do solo e das barras transversais do reforço” de Pinho-Lopes e Lopes (1999), foi Prémio Revista Geotecnia (1998/99).

2.3 – Comportamento sísmico de muros e taludes reforçados com geossintéticos

O primeiro projeto competitivo financiado após a criação, em 2002, do Laboratório de Geossintéticos da FEUP (LGS-FEUP) foi o projeto de investigação (POCTI / ECM / 42806 / 2001), intitulado “Comportamento sísmico de muros e taludes reforçados com geossintéticos”, que decorreu entre 2002 e 2005 e foi financiado pela FCT. A instituição proponente foi a FEUP e a instituição participante foi o LNEC. A investigadora responsável do projeto foi Maria de Lurdes Lopes.

Os objetivos desta investigação foram:

- a construção de um protótipo laboratorial de um equipamento de corte directo cíclico para caracterização da resistência ao corte do solo e das interfaces solo-geossintético e geossintético-geossintético;

- a caracterização de interfaces solo-geossintético em condições de carregamento monotônico e cíclico;
- a caracterização de interfaces solo-geossintético para tensões de confinamento cíclicas;
- o desenvolvimento de metodologias de dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos;
- a modelação numérica do comportamento sísmico de estruturas de solo reforçado com geossintéticos

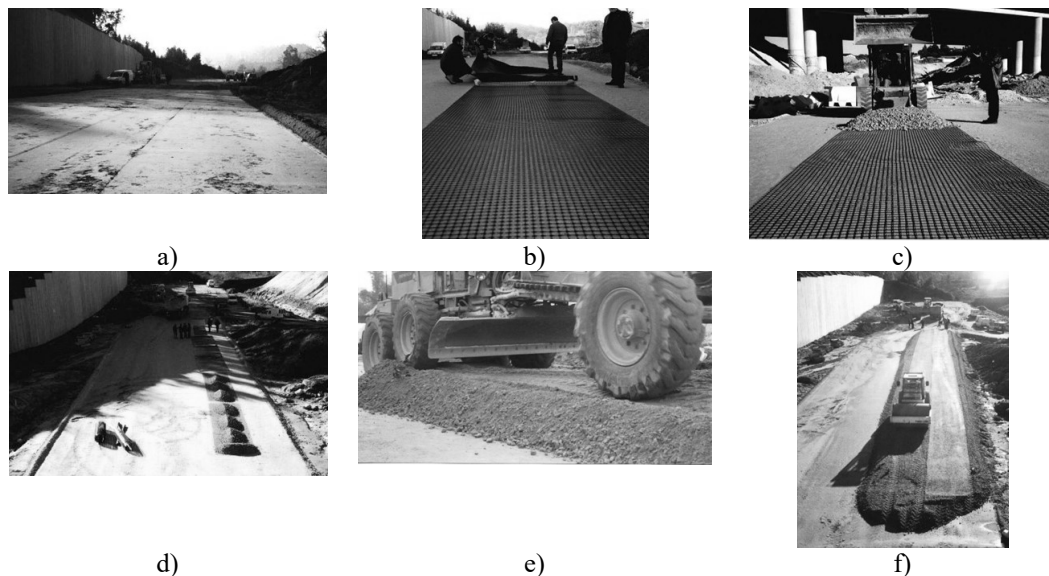


Fig. 10 – Execução dos aterros experimentais provisórios: a) fundação; b) colocação dos geossintéticos; c) e d) colocação do solo; e) espalhamento do solo; f) compactação do solo.

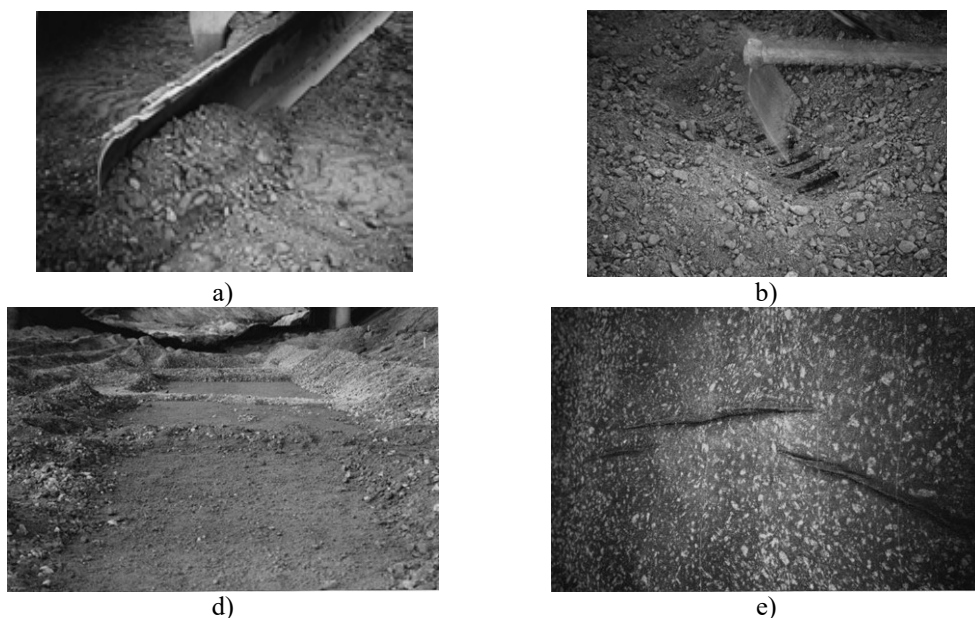
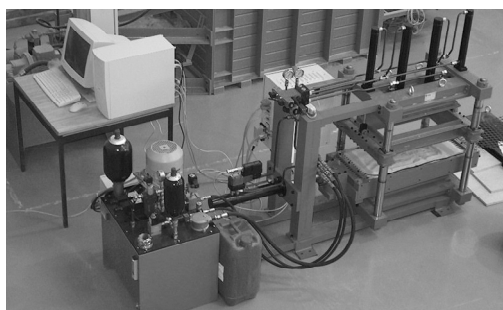


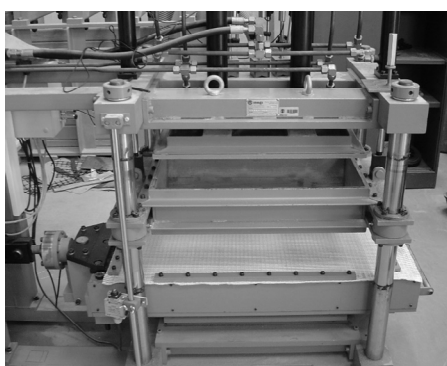
Fig. 11 – a) b) Exumação dos geossintéticos; c) fundação após exumação dos geossintéticos; d) geossintético após instalação em obra.



a)



b)



c)

Fig. 12 – Equipamento de corte directo cíclico: a) vista geral; b) equipamento sem caixa inferior; c) equipamento com caixa inferior.

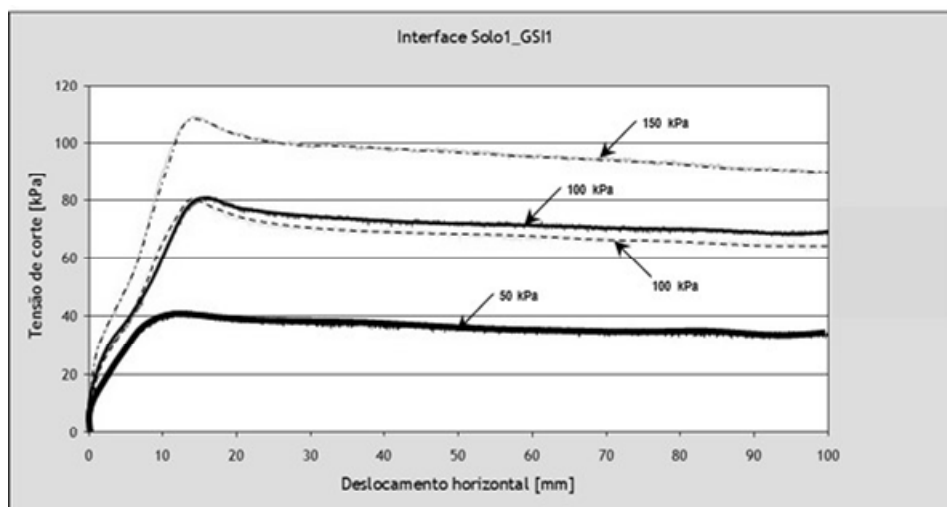


Fig. 13 – Resultados do ensaio de corte direto numa interface solo-geossintético.

As dimensões em planta da caixa de corte são 300mm x 600mm e a altura das caixas inferior e superior é de 100mm. O equipamento possui atuadores hidráulicos de efeito duplo, a força horizontal de corte máxima é de 50kN e a tensão normal máxima é de 220kN. Uma descrição detalhada do equipamento pode ser encontrada em Vieira (2008).

Tendo por base a investigação desenvolvida neste projeto foi aprovada em 2008 a dissertação de doutoramento intitulada “Muros e taludes de solo reforçado com geossintéticos. Comportamento sísmico e metodologias de dimensionamento” de Castorina Vieira.

O projeto de investigação (POCTI / ECM / 42822 / 2001), intitulado “Estudo da durabilidade dos geossintéticos com vista a uma melhor definição dos seus coeficientes de segurança”, decorreu entre 2002 e 2005 e foi financiado pela FCT. A instituição proponente foi a FEUP e a instituição participante foi o FCUP. A investigadora responsável do projeto foi Maria de Lurdes Lopes.

```

graph LR
    1["(1) Geossintéticos"] --> 2["(2) Degradação Química"]
    2 --> 3["(3) Avaliação dos Danos"]
    3 --> 4["(4) Coeficientes de Segurança"]

```

(1) Geossintéticos

- Diferentes estruturas
- Diferentes polímeros
- Diferentes aditivos químicos

(2) Degradação Química

(3) Avaliação dos Danos

- Propriedades físicas
- Propriedades mecânicas
- Propriedades hidráulicas

(4) Coeficientes de Segurança

a)

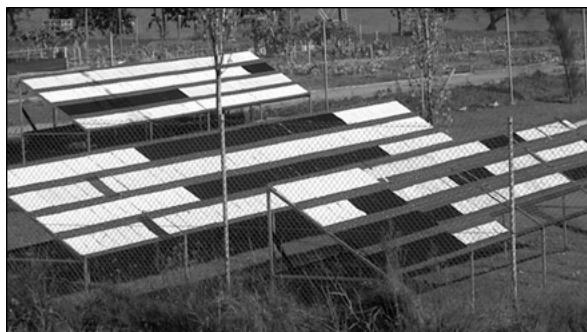
b)

59



(QUV Weathering Tester)

a)



(envelhecimento climático)

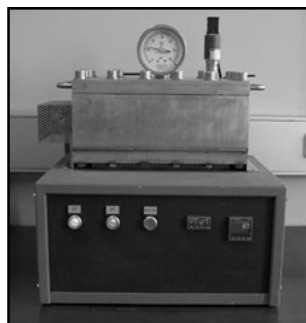
b)

Fig. 16 – Envelhecimento climático: a) em laboratório; b) em campo.

Os geotêxteis utilizados no estudo eram não tecidos em polipropileno aditivados com Chimassorb 944 ou negro de carbono (Figura 15). Os agentes de degradação química considerados foram os líquidos (ácidos, bases, hidrólise), a termo-oxidação, o envelhecimento climático (em laboratório) (Figura 16a) e o envelhecimento climático (em campo) (Figura 16b).

Para além da instalação piloto de envelhecimento climático de geossintéticos sob condições de degradação reais (Figura 16b) desenvolveu-se um protótipo do equipamento para a realização de ensaios de termo-oxidação (Figura 17) e propôs-se uma nova metodologia de ensaio.

No projeto foi ainda avaliada a influência da ação de agentes mecânicos no comportamento força-extensão a curto prazo e força-extensão-tempo, bem como na interação solo-geossintético e geossintético-geossintético. Avaliou-se também a validade dos ensaios de danificação em laboratório versus ensaios *in situ*. No final do projeto sugeriu-se alterações aos valores correntes dos coeficientes de segurança para os geossintéticos. Para além do protótipo Thermoxis (Figura 17), ao longo do projeto foram desenvolvidos mais 7 protótipos (Figura 18): a) equipamento de ensaio de abrasão; b) garras hidráulicas; c) garras cilíndricas; d) equipamento de ensaio de punçoamento dinâmico; e) equipamento de ensaio de fluência e rotura em fluência; f) equipamento de ensaio de capacidade de escoamento no plano; g) equipamento de ensaio de permeabilidade normal.



(protótipo *Thermoxis*)

Fig. 17 – Protótipo do equipamento para a realização de ensaios de termo-oxidação.

Com base na investigação desenvolvida no projeto destaca-se a conclusão de 2 dissertações, uma de mestrado, em 2003, intitulada “Danificação durante a instalação – avaliação laboratorial da influência no comportamento dos Geossintéticos” de António Miguel Paula, e outra de doutoramento, em 2004, intitulada “Estudo dos coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão de solos e de estabilização de maciços com geossintéticos”, de Margarida Pinho-Lopes.

À publicação de 2004 na revista Geotecnia nº 102, pp 71-83, intitulada “Avaliação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos. Influência do material de confinamento” de António M. Paula; Margarida P Lopes; M. Lurdes Lopes foi atribuído o Prémio Revista Geotecnia (Menção Honrosa) (2004/05).

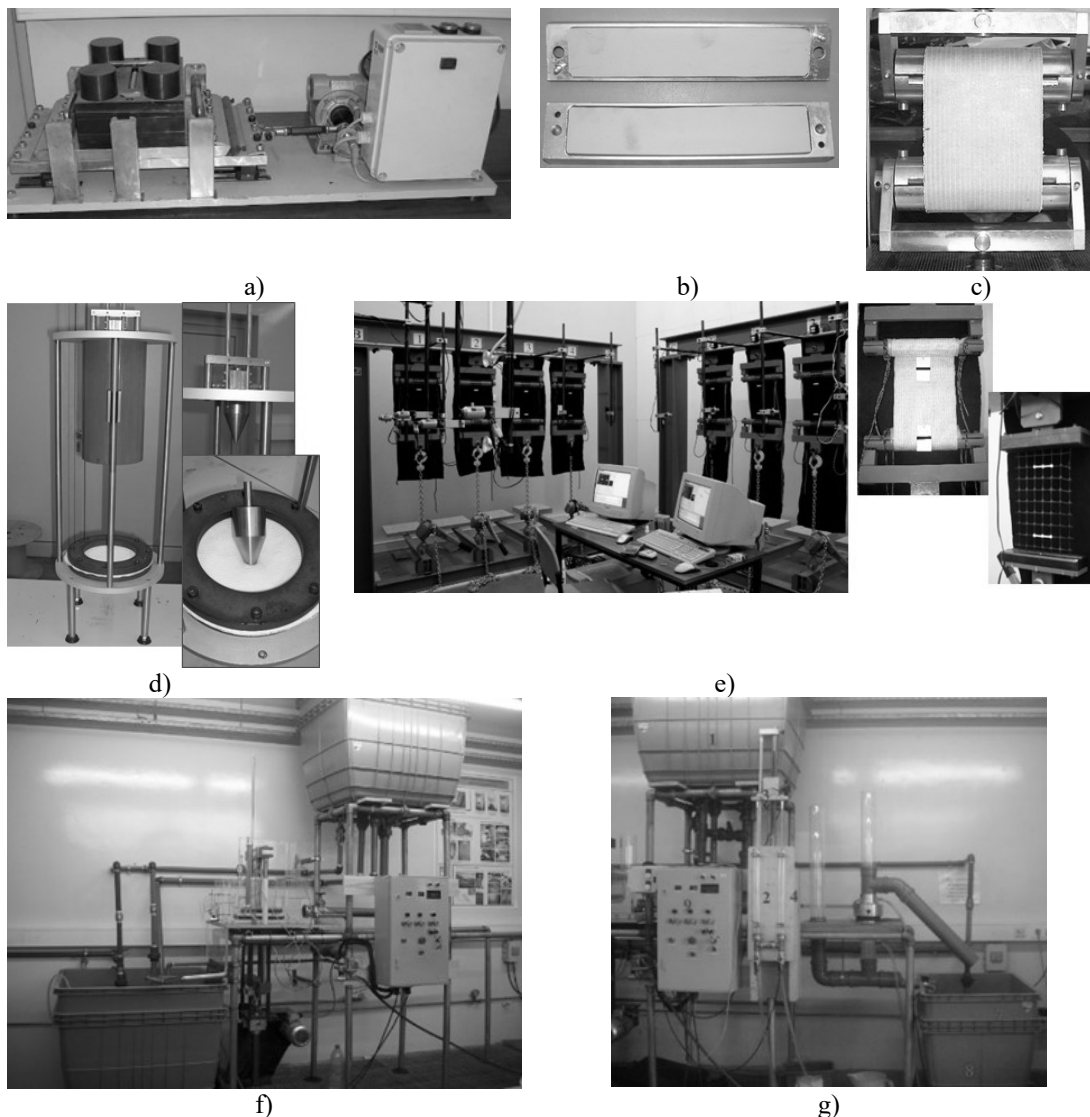


Fig. 18 – Protótipos: a) equipamento de ensaio de abrasão; b) garras hidráulicas; c) garras cilíndricas; l) equipamento de ensaio de punção dinâmico; e) equipamento de ensaio de fluência e rotura em fluência; f) equipamento de ensaio de capacidade de escoamento no plano; g) equipamento de ensaio

2.5 – Análise experimental da estabilidade de geocontentores sob a ação da agitação marítima (GeoWAVE)

O projeto de investigação (POCI / ECM / 60807 / 2004), intitulado “Análise experimental da estabilidade de geocontentores sob a ação da agitação marítima (GeoWAVE)”, decorreu entre 2005 e 2008 e foi financiado pela FCT. A instituição proponente foi o IHRH da UP e a instituição participante foi a FEUP. A investigadora responsável do projeto foi Maria de Lurdes Lopes.

Os objetivos da investigação deste projeto foram:

- identificar os parâmetros e processos críticos para o comportamento hidráulico e estabilidade de sistemas de controlo de erosão dunar utilizando sacos geotêxteis cheios com areia;
- identificar as zonas da estrutura mais solicitadas e aquelas que tem que ser explicitamente considerados no dimensionamento deste tipo de sistemas;
- estudar o efeito da reflexão da onda na estrutura, designadamente o seu impacto no aumento da erosão na praia frontal e na estabilidade da fundação;
- estudar possíveis efeitos de escala.

Os principais indicadores da investigação desenvolvida foram:

- a execução de uma instalação piloto de uma estrutura de proteção costeira em geo-sacos em Ofir (Figura 19);
- o desenvolvimento de uma aplicação computacional designada por SynthCOAST, que consiste numa ferramenta de apoio à decisão sobre a incorporação de geossintéticos em estruturas de defesa costeira, baseada na experiência adquirida em obras realizadas, em resultados obtidos em estudos de modelação física e em recomendações técnicas e construtivas existentes;
- uma dissertação de doutoramento, em 2011, intitulada “Experimental stability analysis of geotextile encapsulated-sand systems under wave-loading”, de Luciana Paiva das Neves;
- uma dissertação de mestrado, em 2007, intitulada “Aplicação informática de apoio à seleção de sistemas de proteção costeira com geossintéticos”, de Susana Pereira Garcia.

2.6 – Durabilidade de geossintéticos expostos a agentes físicos e químicos (GeoChem)

O projeto de investigação (PTDC/ECM/67547/2006), intitulado “Durabilidade de geossintéticos expostos a agentes físicos e químicos (GeoChem)”, decorreu entre 2008 e 2011 e foi financiado pela FCT. A instituição proponente foi a FEUP e a instituição participante foi a FCUP. A investigadora responsável do projeto foi Maria de Lurdes Lopes.

Os objetivos da investigação deste projeto foram:

- a exposição em laboratório a líquidos, termo-oxidação e envelhecimento climatérico;
- a exposição *in situ* a envelhecimento climatérico;
- a exposição *in situ* a agentes de degradação presentes em ambientes marinhos (UV, água do mar, ação das marés);



Fig. 19 – Instalação piloto de estrutura de proteção costeira em geo-sacos.

- a exposição *in situ* a agentes do solo (microrganismos, roedores, plantas, raízes);
- a avaliação de sinergismos entre agentes de degradação químicos;
- o desenvolvimento de um método para a determinação do Chimassorb 944 em geotêxteis de PP por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção UV;
- a análise do grau de fotodegradação de geotêxteis por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR);
- a análise de produtos de fotodegradação de geotêxteis por cromatografia gasosa e líquida com detecção por massa (GC-MS e LC-MS).

Como principais indicadores da investigação desenvolvida destacam-se:

- 2 instalações piloto, uma de exposição dos geossintéticos aos agentes do solo e outra de exposição dos geossintéticos em ambientes marinhos (Figura 20);
- a Patente de invenção nacional n.º 104126 (2008) “Equipamento e método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação” (P.J. Almeida, M.L. Lopes, J.R. Carneiro);
- uma dissertação de doutoramento, em 2009, intitulada “Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental - a importância da incorporação de aditivos químicos”, de José Ricardo Carneiro;
- o início, em 2013, de um projeto de investigação pós-doutoral intitulado “Estudo dos efeitos sinérgicos dos agentes de Degradação no comportamento a longo prazo dos Geossintéticos” por José Ricardo Carneiro.

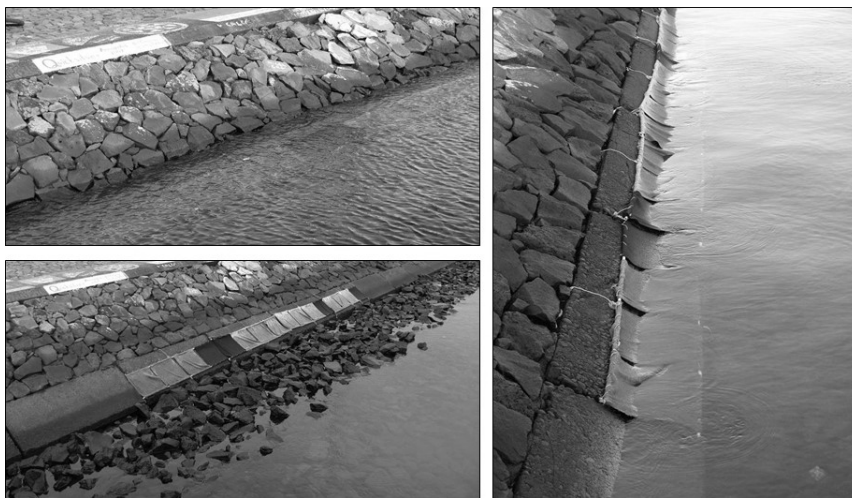


Fig. 20 – Instalação piloto de exposição dos geossintéticos em ambientes marinhos.

2.7 – Durabilidade associada à resistência de geossintéticos – GeoEndurance

O projeto de investigação (PTDC/ECM/099087/2008) intitulado, “Durabilidade associada à resistência de geossintéticos – GeoEndurance”, decorreu entre 2010 e 2013 e foi financiado pela FCT. A instituição proponente foi a Universidade de Aveiro (UA) e a instituição participante foi a FEUP. A investigadora responsável do projeto foi Margarida Pinho-Lopes.

O principal objetivo da investigação deste projeto foi o estudo do efeito em propriedades mecânicas e hidráulicas de geossintéticos de agentes e mecanismos relativos à durabilidade associada à resistência: danificação durante a instalação, fluência, abrasão e fluência em compressão.

A metodologia seguida para atingir este objetivo está exposta na Figura 21.



Fig. 21 – Metodologia de investigação.

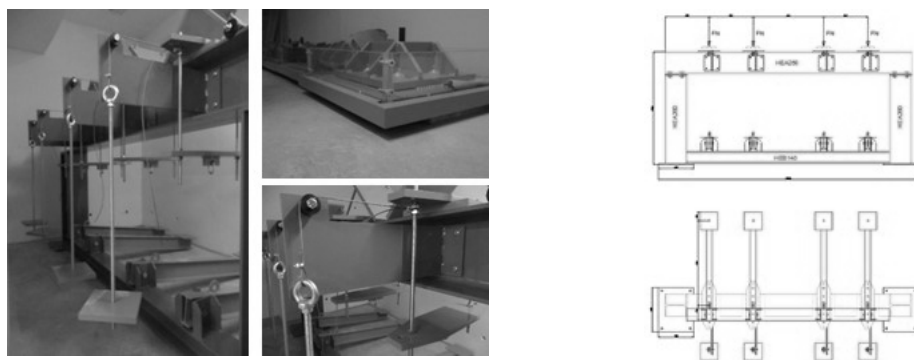


Fig. 22 – Protótipo de equipamento de ensaio de fluência em compressão.

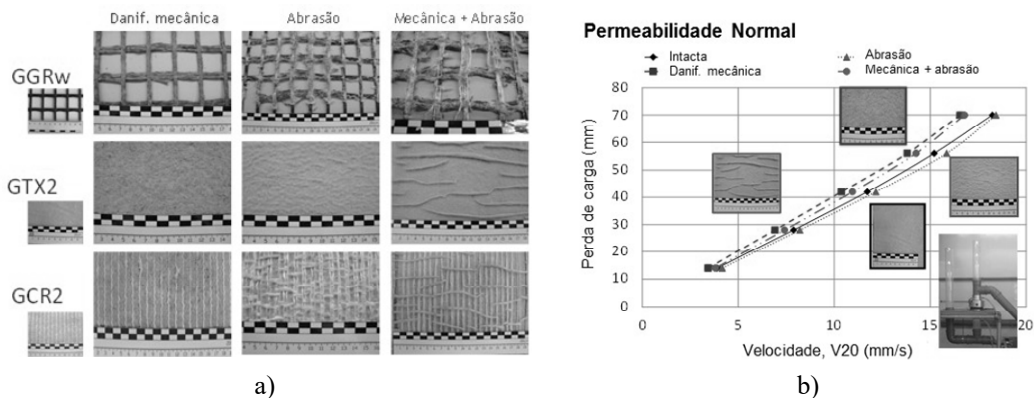


Fig. 23 – Sinergia entre agentes e mecanismos que afetam a durabilidade associada à resistência de geossintéticos: a) inspeção visual; b) efeito na permeabilidade normal.



Fig. 24 – Caso de estudo: muros das marinhas de sal na Ria de Aveiro.

Ao longo do projeto desenvolveu-se um protótipo do equipamento de ensaio de fluência em compressão (Figura 22) e uma aplicação computacional para o dimensionamento de filtros granulares em geotêxtil. Constatou-se a existência de sinergia entre agentes e mecanismos que afetam a durabilidade associada à resistência de geossintéticos (Figura 23). Foram determinados e propostos valores para os coeficientes de redução a usar no dimensionamento dos geossintéticos, tendo-se implementado ferramentas de apoio a projetistas que incluem bases de dados para os coeficientes de redução que representem a durabilidade associada à resistência de geossintéticos.

Os resultados da investigação foram aplicados a casos de estudo relevantes (Figura 24) para divulgação da base de dados (coeficientes de redução), guiando os utilizadores na sua utilização.

Como indicadores mais relevantes da investigação realizada no projeto, refira-se a dissertação de doutoramento, em 2012, intitulada “Estudo dos coeficientes de segurança por danificação durante a instalação e por fluência em estruturas reforçadas com geossintéticos” de António Miguel Paula e, em 2010, a publicação do livro intitulado “A Durabilidade dos Geossintéticos” da autoria de Margarida Pinho-Lopes e Maria de Lurdes Lopes.

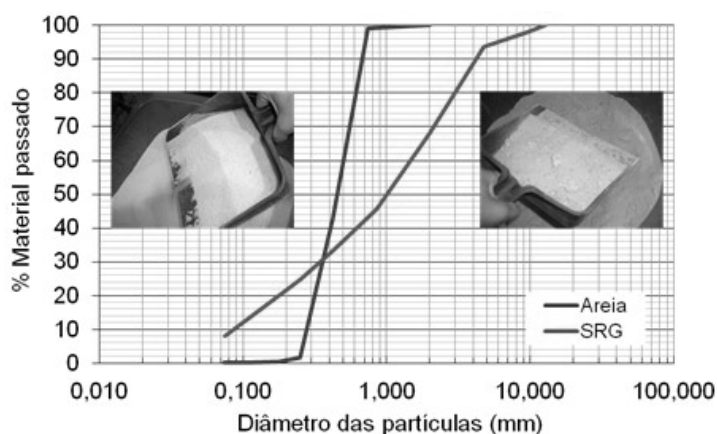
2.8 – Utilização de solos “pobres” na execução de estruturas reforçadas com geossintéticos.

Estudo experimental do comportamento (ValorSoil)

O projeto de investigação (PTDC/ECM/100975/2008), intitulado “Utilização de solos “pobres” na execução de estruturas reforçadas com geossintéticos. Estudo experimental do comportamento (ValorSoil)”, decorreu entre 2010 e 2013 e foi financiado pela FCT. A instituição proponente foi a FEUP e a instituição participante foi a UA. A investigadora responsável do projeto foi Maria de Lurdes Lopes.

Os objetivos da investigação deste projeto foram:

- contribuir para uma construção mais económica e tecnicamente eficiente;
- estudar a possibilidade de utilizar solos de baixa qualidade em estruturas de solo reforçadas com geossintéticos;
- analisar o comportamento mecânico do solo isolado e reforçado com geossintéticos através da realização de ensaios triaxiais;
- estudar o comportamento das interfaces solo (de baixa qualidade) - geossintético em movimento de arranque, de corte direto e de corte em plano inclinado em condições de carregamento monotónico e cíclico;
- avaliar a influência do teor em água do solo e do tipo de geossintético no comportamento das interfaces solo-geossintético;
- analisar numericamente o comportamento de solos finos reforçados com geossintéticos.



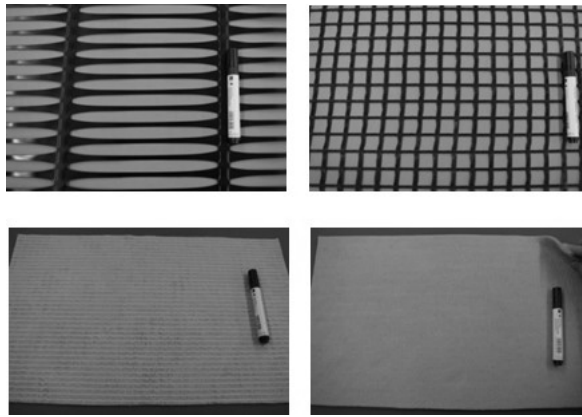
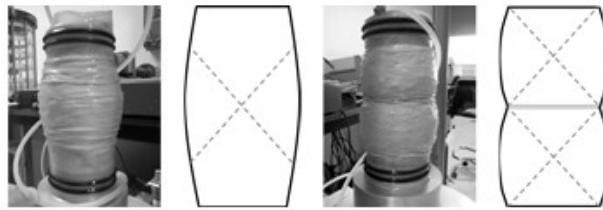


Fig. 26 – Geossintéticos utilizados na investigação.



Solo isolado e reforçado

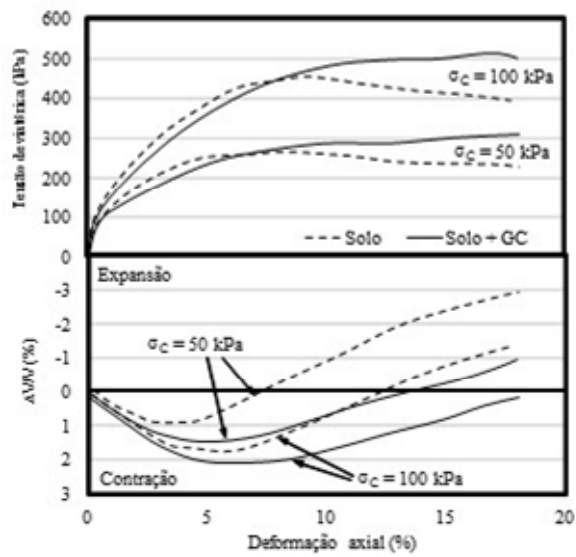


Fig. 27 – Ensaio triaxiais do solo isolado e reforçado.

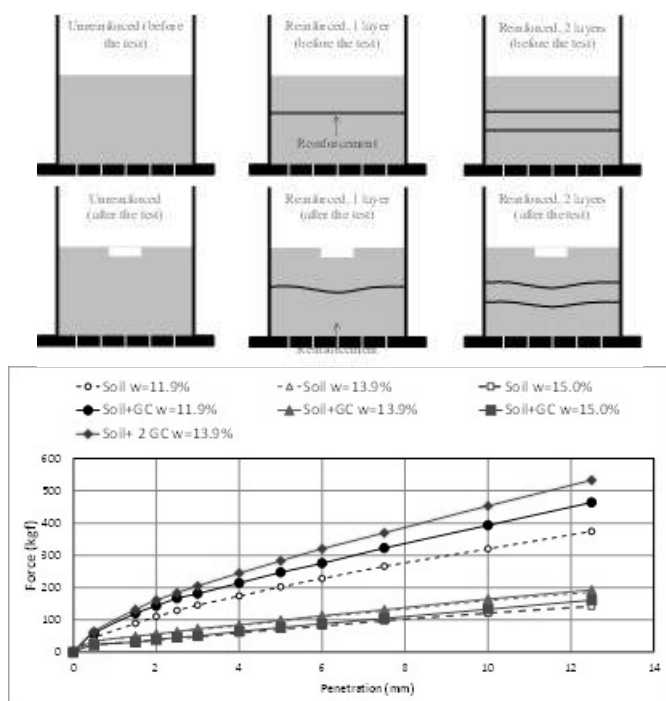


Fig. 28 – Ensaios CBR do solo não reforçado e reforçado.

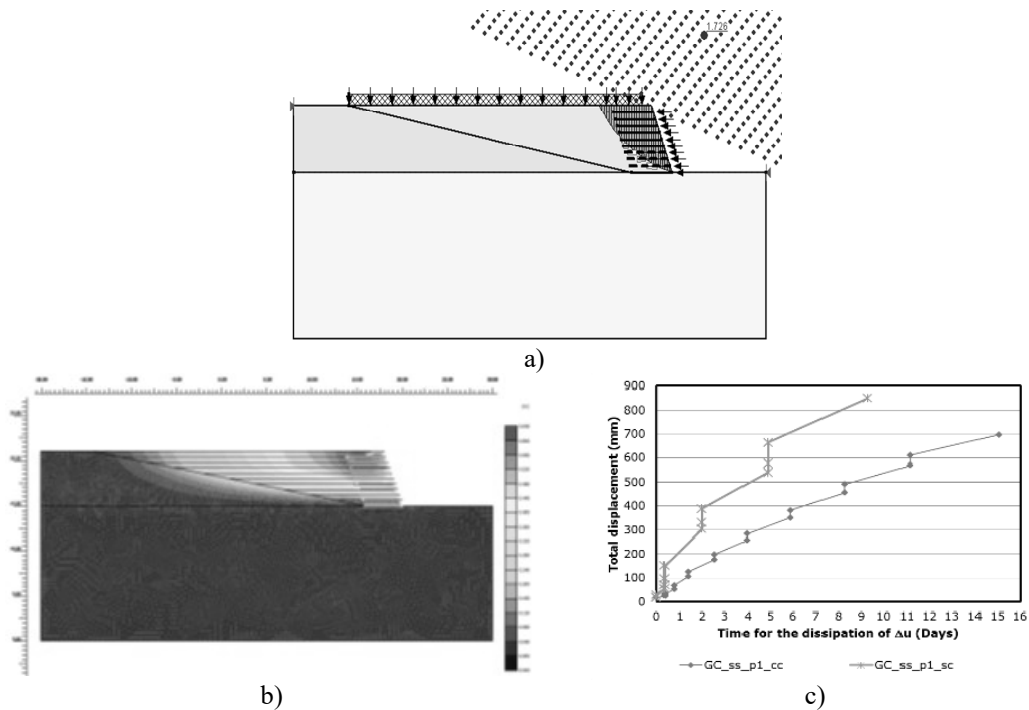


Fig. 29 – a) Modelação numérica do comportamento de solos finos reforçados com geossintéticos; b) processo construtivo; c) processo de consolidação.

2.9 – Avaliação dos níveis de segurança associados a erosões localizadas devidas a geossistemas utilizados para controlo da erosão costeira na costa portuguesa (ScourCoast)

O projeto de investigação (PTDC/ECM/122760/2010), intitulado “Avaliação dos níveis de segurança associados a erosões localizadas devidas a geossistemas utilizados para controlo da erosão costeira na costa portuguesa (ScourCoast)”, decorreu entre 2012 e 2015 e foi financiado pela FCT. A instituição proponente foi a FEUP e a investigadora responsável do projeto foi Maria de Lurdes Lopes.

Os objetivos da investigação deste projeto foram:

- estudar o atrito entre sistemas de confinamento de areia;
- a avaliação do potencial de liquefação induzida pela ação cíclica da agitação marítima;
- o estudo da estabilidade e do comportamento morfológico de sistemas de confinamento de areia, com base em ensaios em modelo físico de fundos móveis construído no LH-SHRHA-DEC-FEUP (Figura 30);
- analisar o desenvolvimento de erosões localizadas em torno dos sistemas de confinamento de areia, de acordo com a posição da estrutura e as condições hidrodinâmicas (Figura 31);
- investigar a eficiência de vários esquemas de proteção (Figura 32);
- estudar a interação onda-estrutura e os processos costeiros (*nearshore*) responsáveis pelo transporte de sedimentos;
- contribuir para uma construção mais económica e tecnicamente eficiente.

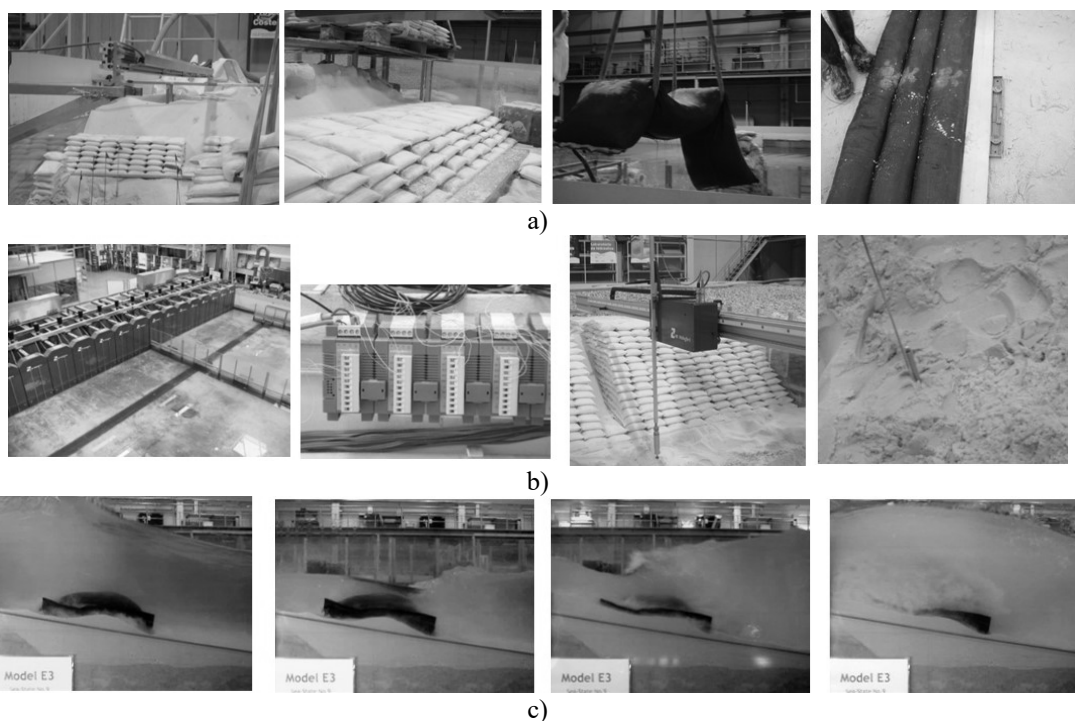


Fig. 30 – a) Aspectos da construção do modelo no tanque de ondas do LH-SHRHA-DEC-FEUP; b) Instrumentação; c) sequência de ondas.

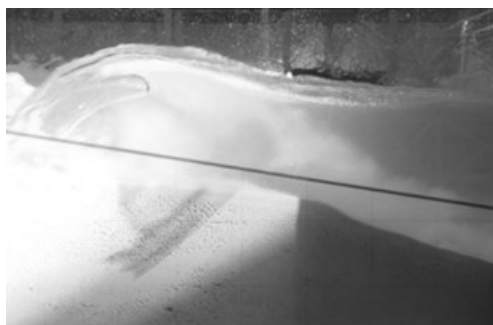
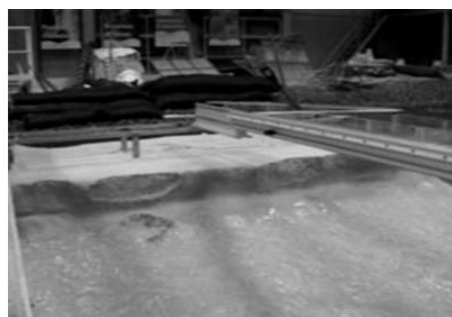
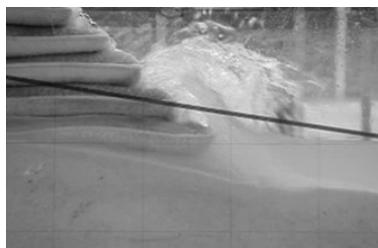


Fig. 31 – Sedimentos em suspensão no modelo físico.



a)



b)



c)

Fig. 32 – Eficiência de vários esquemas proteção: a) modelo A- duna não-reforçada (referência);
b) modelos B a D - sistema de reforço dunar; c) Modelo E - estrutura submersa *nearshore*.

2.10 – Aplicação sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em estruturas reforçadas com geossintéticos (RCD-Valor)

O projeto de investigação (PTDC/ECM-GEO/0622/2012), intitulado “Aplicação sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em estruturas reforçadas com geossintéticos (RCD-Valor)”, decorreu entre 2013 e 2015 e foi financiado pela FCT. A instituição proponente foi a FEUP e a investigadora responsável do projeto foi Castorina Silva Vieira.

O objetivo fundamental da investigação deste projeto foi o estudo da possibilidade da utilização de RCD como material de aterro em estruturas reforçadas com geossintéticos (Figura 33).

Os materiais utilizados no estudo estão indicados na Figura 34. O comportamento das interfaces RCD/ geossintético foi estudado através de ensaios de corte direto e arranque. Foi executada uma instalação piloto que consistiu na construção de aterro experimental e exumação de amostras dos geossintéticos ao fim de 6, 12 e 24 meses de exposição (Figura 35). Os ensaios de corte direto realizados foram modelados numericamente através do FLAC3D (Figura 36) e o comportamento de aterros construídos com RCD e reforçados com geossintéticos foi modelado numericamente através do FLAC2D (Figura 37).



Fig. 33 – a) Resíduos de Construção e Demolição; b) agregado reciclado; c) aterro reforçado com geossintéticos.

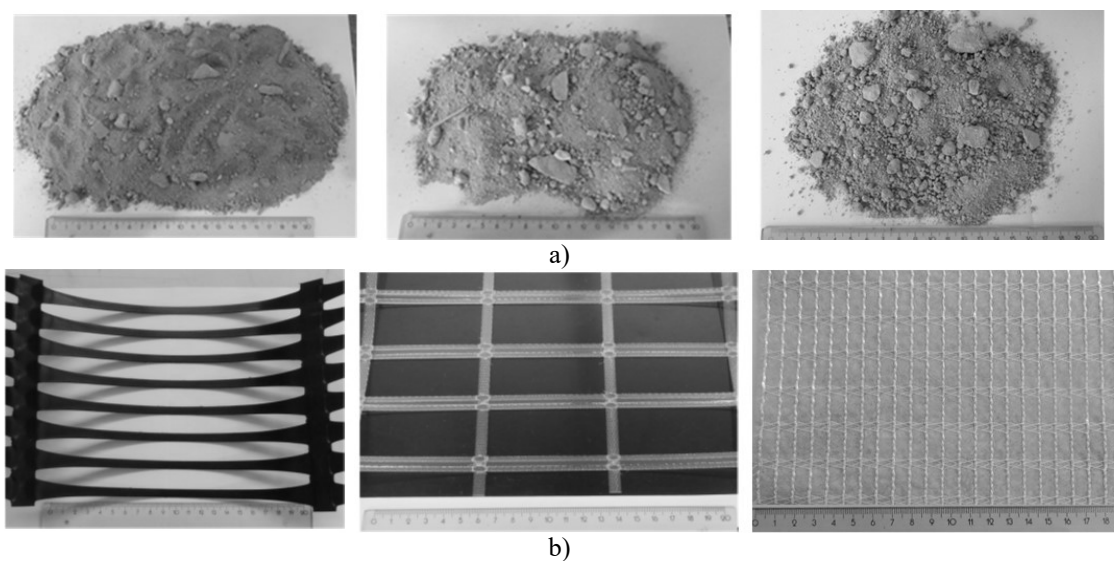


Fig. 34 – Materiais utilizados no estudo: a) RCD reciclado com granulometria fina; c) geossintéticos de reforço.



Fig. 35 – Instalação piloto.

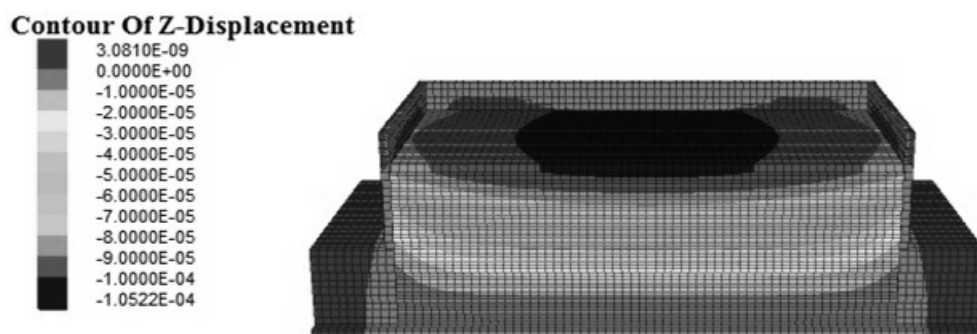


Fig. 36 – Modelação numérica do ensaio de corte direto (FLAC3D).

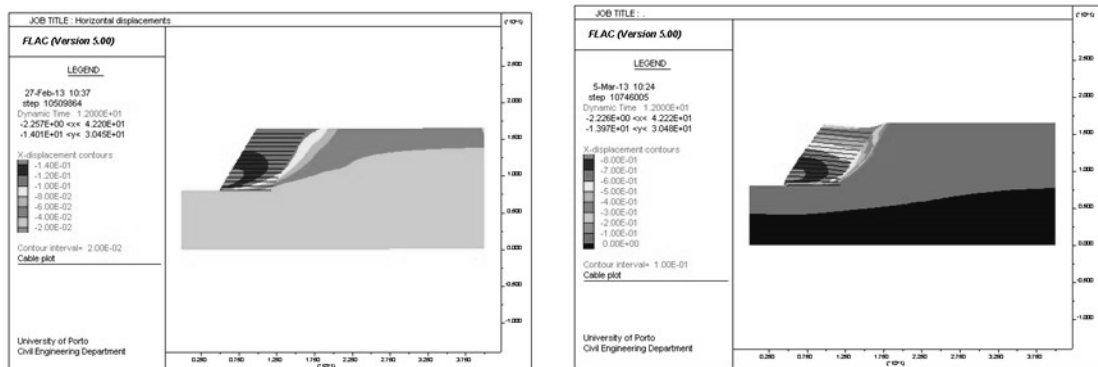


Fig. 37 – Modelação numérica do comportamento de aterros construídos com RCD e reforçados com geossintéticos (FLAC2D).

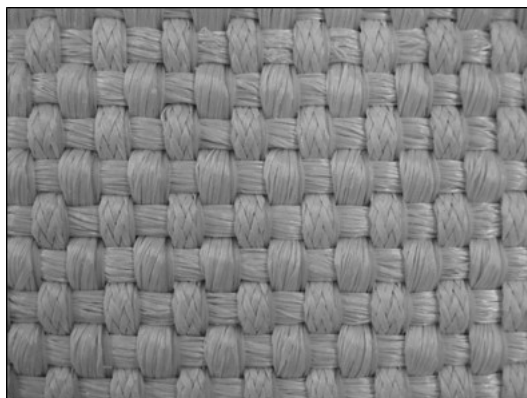
2.11 – Novas tecnologias de proteção costeira incorporando sistemas de confinamento de areias em material geossintético (GeoProtec)

O projeto de investigação (SI IDT – 23093/2011), intitulado “Novas tecnologias de proteção costeira incorporando sistemas de confinamento de areias em material geossintético (GeoProtec)”, decorreu entre 2013 e 2015 e foi financiado pela Agência de Inovação, S.A.. O projeto envolveu duas instituições: a Sicornete – Fios e Redes Lda e a FEUP.

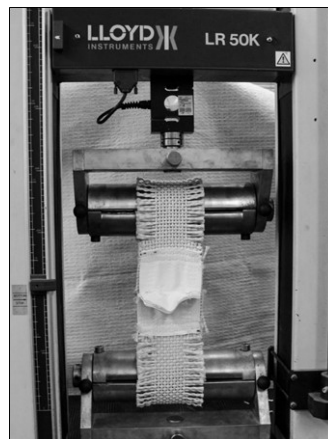
O objetivo fundamental da investigação deste projeto foi desenvolver um geossintético tecido para geocontentores a aplicar em condições de agitação marítima severa.

A Figura 38 mostra o geossintético desenvolvido durante o projeto, bem como o ensaio de tração de costuras, um dos muitos ensaios realizados pelo LGS da FEUP durante o desenvolvimento do produto.

A Figura 39 mostra a instalação piloto do geocontentor desenvolvido no projeto em serviço.



a)



b)

Fig. 38 – a) Geossintético desenvolvido para confinamento de areias; b) ensaio de tração de costuras.



Fig. 39 – Instalação piloto.

3 – NOTA FINAL

Ao longo deste trabalho procurou-se resumir a investigação desenvolvida na FEUP ao longo dos últimos 25 anos com base nos projetos de investigação financiados ao longo deste período.

4 – AGRADECIMENTOS

A autora agradece todo o apoio e disponibilidade para a elaboração deste trabalho das Prof.^{as} Margarida Pinho-Lopes, Castorina Vieira e Luciana Paiva das Neves e dos Doutores Feranada Ferreira e Ricardo Carneiro.

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.



5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Costa Lopes, C. P. F. (2001). *Estudo dos fenómenos de interacção solo-geossintético através de ensaios de corte em plano inclinado*. Dissertação de mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, FEUP, Porto.

- EN 13738 (2004). *Geotextiles and related products. Determination of pullout resistance in soil*. CEN, Brussels, Belgium.
- Lopes, M. L. (1992). *Muros reforçados com geossintéticos*. Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Lopes, M. L. (2012). “*Soil-geosynthetic interaction*”, Capítulo 2 do livro intitulado *Handbook of Geosynthetic Engineering*, ICE publishing, ISBN 978-0-7277-4175-2, pp. 45-66.
- Lopes, M. L. e Cardoso A. S. (1993). *Análise do comportamento de um muro reforçado com geossintéticos*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia – Geotecnia, Nº 68, pp. 47-63, Lisboa.
- Lopes, P. C.; Lopes, M. L. e Lopes, M. P. (2001). *The inclined plane shear behaviour of geosynthetics – influence of soil particles size and geosynthetic structure*. Geosynthetics International Journal, 8(4), 327-342.
- Mendonça, A. A. M. (2004). *Estudo do comportamento de estruturas reforçadas com geogrelhas*. Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Paula, A. M. V. (2003). *Danificação durante a instalação – avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos*. Dissertação de mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, FEUP, Porto.
- Paula, A. M.; Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. L. (2004). *Avaliação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos. Influência do material de confinamento*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia – Geotecnia, nº 102, pp. 71-83, Lisboa.
- Pinho-Lopes, M. J. F. (2006). *Estudo dos coeficientes de segurança a aplicar a estruturas controlo de erosão de solos e de estabilização de maciços com geossintéticos*. Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. L. (1999). *Mecanismos de interação solo-geogrelhas – papel da granulometria do solo e das barras transversais do reforço*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia – Geotecnia, Nº 87, pp. 5-32, Lisboa.
- Vieira, C. F. S. (2008). *Muros e taludes de solo reforçado com geossintéticos. Comportamento sísmico e metodologias de dimensionamento*. Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto.