

**CARACTERIZAÇÃO DA INTERACÇÃO  
SOLO-GEOSSINTÉTICO E  
GEOSSINTÉTICO-GEOSSINTÉTICO  
APLICADOS EM TALUDES RODOVIÁRIOS  
ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CORTE EM  
PLANO INCLINADO**

**ANTÓNIO MANUEL DE PINHO GERALDES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO**

---

Orientador: Professora Doutora Maria de Lurdes da Costa Lopes

JULHO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto: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](mailto: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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais, irmã e Avó Emília por acreditarem e me apoiarem.

*Saber tudo equivaleria a nada saber*  
*Antero Quental*



## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta dissertação teria sido impossível sem o auxílio de inúmeras pessoas e entidades e às quais quero deixar os meus mais profundos agradecimentos, em especial:

- à Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, pela sua constante presença e interesse durante a concretização da dissertação, pelo apoio e conselhos que me orientaram na obtenção deste trabalho, os meus mais sinceros agradecimentos e reconhecimento.

- ao Engenheiro André Lopes que colaborou com grande interesse e com valiosas informações prestadas;

- aos meus colegas e amigos que, quer pela companhia quer pelo apoio técnico, contribuíram para a concretização deste trabalho;

-à secção de Vias de Comunicação da F.E.U.P, que permitiu a realização deste trabalho;

-aos meus pais, irmã e avós pelo amor, carinho, amizade, alegria, paciência com que me acompanharam ao longo deste tempo bem como terem acreditado em mim;

-à Cristina Santos, mais que uma Engenheira e melhor amiga, a namorada, pela sua insubstituível companhia, para além do tempo em que se revelou incansável na preciosa colaboração e paciência; pelas palavras de infinita coragem e força.



## **RESUMO**

Os geossintéticos são materiais versáteis e de fácil de aplicação, vantagens que, aliadas a um baixo custo, os tornam competitivos em relação aos materiais tradicionais.

Os geossintéticos são actualmente aplicados, praticamente, em todas as áreas da Engenharia Civil. Em muitas situações, por exemplo, em estruturas de controlo de erosão de taludes de vias de comunicação. A combinação de diferentes geossintéticos com características funcionais distintas permite um melhor desempenho global da estrutura. Porém, um dos aspectos fundamentais associados à qualidade desse desempenho relaciona-se com o comportamento das interfaces entre os diferentes materiais constituintes.

No presente trabalho estuda-se o comportamento de interfaces solo-geossintético e geossintético-geossintético sob acções estáticas quando aplicados em taludes. Para tal, recorreu-se a ensaios laboratoriais, de corte em plano inclinado, realizados de acordo com a norma NP EN ISO 12957-2 (Geossintéticos – Determinação das características de atrito – Parte 2: Ensaio de corte em plano inclinado), tendo-se considerado diferentes solos e geossintéticos associados.

No Capítulo 1 aborda-se a interacção solo-geossintético sendo o estudo experimental apresentado e analisado no Capítulo 2.

**PALAVRAS-CHAVE:** geossintéticos, ensaio de corte em plano inclinado, geossintético-geossintético, taludes



## **ABSTRACT**

Geosynthetics are versatile materials easy to implement, 2 advantages that, allied with their low cost, make them competitive as compared with traditional materials.

The geosynthetics are currently applied in all areas of Civil Engineering such as structures of erosion control in embankments of roadways. The combination of different geosynthetics with distinct features allows a better overall performance of the structure. One of the fundamental aspects associated with quality of performance is related to the behavior of interfaces between different materials constituents.

This study analyses the behavior of interfaces soil-geosynthetic and geosynthetic-geosynthetic under static actions when applied in embankments. We carried through laboratory tests of an inclined surface in accordance with the norm NP EN ISO 12957-2 ( Geosynthetics -- Determination of friction characteristics -- Part 2: Inclined plane) considering different geosynthetics and soils.

The Chapter 1 focuses the interaction between soil-geosynthetic while Chapter 2 presents and discusses the experimental study.

**KEY WORDS:** geosynthetics, inclined plane test, geosynthetic-geosynthetic, embankments



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT .....	v
<b>1 FENÓMENOS DE INTERACÇÃO E ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2 INTERACÇÃO SOLO – GEOSSINTÉTICO .....	1
1.2.1 GENERALIDADES.....	1
1.2.2 RESISTÊNCIA DA INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO.....	2
1.2.3 ENSAIOS LABORATORIAIS PARA AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA INTERACÇÃO SOLO-GEOSSINTÉTICO .....	3
1.3 INTERACÇÃO GEOSSINTÉTICO-GEOSSINTÉTICO.....	4
1.3.1 GENERALIDADES.....	4
1.3.2 INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DOS GEOSSINTÉTICOS NA SUA INTERACÇÃO.....	5
1.3.3 RESISTÊNCIA AO CORTE DE INTERFACES GEOTÊXTIL – GEOMEMBRANA .....	8
1.3.3.1 INFLUÊNCIA DA TEXTURA DA GEOMEMBRANA.....	9
1.3.3.2 INFLUÊNCIA DO SOLO DE COBERTURA.....	12
1.3.3.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA E DA MASSA POR UNIDADE DE ÁREA DOS GEOTÊXTEIS.....	15
1.3.3.4 INFLUÊNCIA DO POLÍMERO CONSTITUINTE DOS GEOTÊXTEIS.....	15
1.3.3.5 INFLUÊNCIA DO POLÍMERO CONSTITUINTE DAS GEOMEMBRANAS.....	18
1.3.3.6 INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE ÁGUA NA INTERFACE.....	21
1.3.4 CORTE DIRECTO / . CORTE EM PLANO INCLINADO .....	24
1.3.4.1 ESTUDOS DE WASTI E ÖZDÜZGÜN (2001).....	24
1.3.4.2 ESTUDOS DE REYES RAMIREZ E GOURC (2003).....	27
1.4 ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO .....	29
1.4.1 INTRODUÇÃO .....	29
<b>2 COMPORTAMENTO DE INTERFACES EM CORTE EM PLANO INCLINADO .....</b>	<b>33</b>
2.1 - INTRODUÇÃO .....	33
2.2 – SOLOS UTILIZADOS.....	33
2.3 – GEOSSINTÉTICOS UTILIZADOS.....	35
2.3.1 - GEOMEMBRANAS.....	35

2.3.2 - GEOTÊXTEIS .....	35
2.3.3 - GEOGRELHAS .....	36
2.3.4 - GEOTAPETE .....	37
2.4 – METODOLOGIAS E PROGRAMA DE ENSAIOS .....	37
2.5 – ANÁLISE DE UM ENSAIO TIPO .....	39
2.6 – INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DO GEOSSINTÉTICO.....	41
2.6.1 – INTERFACES SOLO-GEOTÊXTIL .....	41
2.6.2 – INTERFACES GEOSSINTÉTICO-GEOSSINTÉTICO.....	43
2.6.2.1 - INTRODUÇÃO .....	43
2.6.2.2 – GEOSSINTÉTICO INFERIOR - GEOMEMBRANAS .....	44
2.6.2.3 – GEOSSINTÉTICOS INFERIORES – GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS .....	53
2.6.2.4 – GEOSSINTÉTICOS INFERIORES – GEOTÊXTEIS NÃO TECIDO AGULHADO E TECIDO.....	61
2.6.2.5 – GEOSSINTÉTICOS INFERIORES – GEOTÊXTEIS NÃO TECIDO TERMOLIGADO E TECIDO.....	64
2.6.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
2.7 –INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO.....	67
2.7.1 – INTRODUÇÃO.....	67
2.7.2 – INTERFACES SOLO-GEOTÊXTIL .....	68
2.7.3 – INTERFACES GEOSSINTÉTICO-GEOSSINTÉTICO.....	72
2.7.3.1 - INTRODUÇÃO .....	72
2.7.3.2 – GEOMEMBRANA LISA – GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO .....	72
2.7.3.3 - GEOSSINTÉTICO SUPERIOR – GEOTAPETE .....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 – MECANISMOS DE INTERACÇÃO SOLO-GEOGRELHA: A) ATRITO LATERAL; B) IMPULSO PASSIVO NAS BARRAS TRANSVERSAIS DA GEOGRELHA (JEWELL <i>ET AL.</i> , 1984) .....	2
FIGURA 1. 2 – DESLOCAMENTO DA CAIXA SUPERIOR / INCLINAÇÃO DO PLANO, PARA DIFERENTES INTERFACES ENTRE GEOSSINTÉTICOS (PALMEIRA <i>ET AL.</i> , 2002).....	6
FIGURA 1. 3 – FORÇA DE TRACÇÃO MOBILIZADA NA GEOMEMBRANA COM O AUMENTO DA INCLINAÇÃO DO PLANO (PALMEIRA <i>ET AL.</i> , 2002).....	7
FIGURA 1. 4 – TRANFERÊNCIA DE TENSÕES DE CORTE PARA ENSAIOS COM DUAS CAMADAS DE GEOSSINTÉTICOS E COM UMA SOBRECARGA DE 5,75kPA: A) GTN3 – GM1; B) GTW1 – GM1; C) GN1 – GM1; D) GG1 – GM1 (ADAPTADO DE PALMEIRA <i>ET AL.</i> , 2002).....	8
FIGURA 1. 5 – TENSÃO DE CORTE / DESLOCAMENTO: (A) INTERFACE GEOMEMBRANA LISA – GEOTÊXTIL; (B) INTERFACE GEOMEMBRANA TEXTURADA – GEOTÊXTIL (JONES E DIXON, 1998).....	11
FIGURA 1. 6 – TENSÃO DE CORTE / DESLOCAMENTO NA INTERFACE GEOMEMBRANA TEXTURADA – GEOTÊXTIL UTILIZANDO UMA GRAVILHA NATURAL MAL GRADUADA COMO MATERIAL DE COBERTURA (JONES E DIXON, 1998) .....	13
FIGURA 1. 7 – TENSÃO DE CORTE / DESLOCAMENTO NA INTERFACE GEOMEMBRANA TEXTURADA – GEOTÊXTIL UTILIZANDO UM BLOCO DE NYLON COMO MATERIAL DE COBERTURA (JONES E DIXON, 1998) .....	14
FIGURA 1. 8 – TENSÃO DE CORTE / DESLOCAMENTO NA INTERFACE GEOMEMBRANA LISA – GEOTÊXTIL EM PEAD, UTILIZANDO UMA GRAVILHA BRITADA MAL GRADUADA COMO MATERIAL DE COBERTURA (JONES E DIXON, 1998). .....	16
FIGURA 1. 9 – TENSÃO DE CORTE / DESLOCAMENTO NA INTERFACE GEOMEMBRANA TEXTURADA – GEOTÊXTIL EM PEAD, UTILIZANDO UMA GRAVILHA NATURAL MAL GRADUADA COMO MATERIAL DE COBERTURA (JONES E DIXON, 1998). .....	17
FIGURA 1. 10 - TENSÃO DE CORTE / DESLOCAMENTO NA INTERFACE GEOMEMBRANA LISA EM PP – GEOTÊXTIL, UTILIZANDO UMA GRAVILHA BRITADA BEM GRADUADA COMO MATERIAL DE COBERTURA (JONES E DIXON, 1998) .....	18
FIGURA 1. 11 – RESULTADOS DE ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO DE 60MM X 60MM, EM INTERFACES GEOTÊXTIL – GEOMEMBRANA (WASTI E ÖZDÜZGÜN, 2001). .....	20
FIGURA 1. 12 – INFLUÊNCIA DA NATUREZA DA GEOMEMBRANA NA RESISTÊNCIA AO CORTE DA INTERFACE GEOTÊXTIL – GEOMEMBRANA: A) ENSAIOS COM GTXP; B) ENSAIOS COM GTXR (ADAPTADO DE BRIANÇON, 2001).....	21
FIGURA 1. 13 – DIFERENTES CONDIÇÕES HIDRÁULICAS ENSAIADAS POR BRIANÇON <i>ET AL.</i> (2002): A) PEQUENO FLUXO AO NÍVEL DOS GEOSSINTÉTICOS; B) PARCELA DE SOLO DE COBERTURA SATURADA (BRIANÇON <i>ET AL.</i> , 2002). .....	21
FIGURA 1. 14 – INFLUÊNCIA QUE A PRESENÇA DE ÁGUA NA INTERFACE EXERCE SOBRE O ÂNGULO DE ATRITO DE DIFERENTES INTERFACES ENTRE GEOSSINTÉTICOS (BRIANÇON <i>ET AL.</i> , 2002).....	22
FIGURA 1. 15 – RESULTADO DE UM ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO DO TIPO F, COM CONDIÇÕES HIDRÁULICAS VARIÁVEIS AO LONGO DO TEMPO (BRIANÇON <i>ET AL.</i> , 2002). .....	23

FIGURA 1. 16 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM O ENSAIO DE CORTE DIRECTO E COM O ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO, EM INTERFACES GEOTÊXTIL A – GEOMEMBRANA A DE 60MM X 60MM (WASTI E ÖZDÜZGÜN, 2001).....	26
FIGURA 1. 17 – EFEITO DA TENSÃO NORMAL NA RESISTÊNCIA AO CORTE DAS INTERFACES GEOTÊXTIL A – GEOMEMBRANA A (WASTI E ÖZDÜZGÜN, 2001).....	27
FIGURA 1. 18 – CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CORTE DA INTERFACE GEOTÊXTIL – GEOREDE: A) ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CORTE DIRECTO; B) ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO, PARA UMA TENSÃO NORMAL $\sigma'_0 = 5,7\text{kPa}$ (REYES RAMIREZ E GOURC, 2003).....	27
FIGURA 1. 19 – A ANÁLISE DA FASE DE DESLIZAMENTO GRADUAL QUE PRECEDE O ESTADO LIMITE É GERALMENTE RELEGADA PARA SEGUNDO PLANO (REYES RAMIREZ E GOURC, 2003). ....	29
FIGURA 1. 20 – TENTATIVA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DE CORTE DIRECTO E OS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO NUM MESMO DIAGRAMA: INTERFACE GEOTÊXTIL – GEOREDE (REYES RAMIREZ E GOURC, 2003).....	29
FIGURA 1. 21 – EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO: A) VISTA GERAL DO EQUIPAMENTO; B) BASE INFERIOR RÍGIDA.....	30
FIGURA 2. 1– DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA: A) SOLO 1; B) SOLO 2.....	34
FIGURA 2. 2– GEOMEMBRANAS LISA E TEXTURADA .....	35
FIGURA 2. 3– GEOTÊXTEIS: A) TECIDO (GTXT); B) NÃO TECIDO AGULHADO (GTXNT); C) NÃO TECIDO TERMOLIGADO (GTXTL).....	35
FIGURA 2. 4– GEOGRELHAS EXTRUDIDAS: A) UNIAXIAL; B) BIAXIAL.....	36
FIGURA 2. 5– CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS GEOGRELHAS:A) UNIAXIAL; B) BIAXIAL.....	36
FIGURA 2. 6– GEOTAPETE .....	37
FIGURA 2. 7– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA A INTERFACE GML – GTXNT. ....	39
FIGURA 2. 8– SISTEMA DE FORÇAS APLICADO NO(S) GEOSSINTÉTICO(S) (COSTA LOPES, 2000). ....	39
FIGURA 2. 9– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS TRÊS INTERFACES SOLO-GEOTÊXTIL ESTUDADAS. ....	41
FIGURA 2. 10– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOMEMBRANAS-GEOGRELHA BIAXIAL. ....	44
FIGURA 2. 11– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOMEMBRANAS-GEOGRELHA UNIAXIAL. ....	45
FIGURA 2. 12–CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOMEMBRANAS-GTXT. ....	47
FIGURA 2. 13– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOMEMBRANAS-GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO.....	49
FIGURA 2. 14– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOMEMBRANAS-GEOTÊXTIL NÃO TECIDO TERMOLIGADO. ....	50
FIGURA 2. 15– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS- GEOGRELHA BIAXIAL. ....	53

FIGURA 2. 16– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS- GEOGRELHA UNIAXIAL.....	54
FIGURA 2. 17– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS- GEOTÊXTIL TECIDO. ....	56
FIGURA 2. 18– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS- GEOTAPETE.....	58
FIGURA 2. 19– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA A INTERFACE GTXNT-GTXTL.....	59
FIGURA 2. 20– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES DA GGB COM O GTXNT E COM O GTXT.....	61
FIGURA 2. 21– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES DA GGU COM O GTXNT E COM O GTXT.....	62
FIGURA 2. 22– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES DA GTAP COM O GTXNT E COM O GTXT.....	63
FIGURA 2. 23– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES DA GGB COM O GTXTL E COM O GTXT.....	64
FIGURA 2. 24– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES DA GGU COM O GTXTL E COM O GTXT.....	65
FIGURA 2. 25– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES DA GTAP COM O GTXTL E COM O GTXT.....	66
FIGURA 2. 26– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA AS INTERFACES SOLOS (1 E 2) – GEOTÊXTIL: A) NÃO TECIDO AGULHADO; B) NÃO TECIDO TERMOLIGADO; C) TECIDO.....	68
FIGURA 2. 27– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA A INTERFACE GEOMEMBRANA LISA-GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO PARA DIFERENTES TIPOS DE PREENCHIMENTO DA CAIXA SUPERIOR. ....	73
FIGURA 2. 28– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA A INTERFACE GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO- GEOTAPETE PARA DIFERENTES TIPOS DE PREENCHIMENTO DA CAIXA SUPERIOR.....	75
FIGURA 2. 29– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA A INTERFACE GEOTÊXTIL NÃO TECIDO TERMOLIGADO-GEOTAPETE PARA DIFERENTES TIPOS DE PREENCHIMENTO DA CAIXA SUPERIOR..	77
FIGURA 2. 30– CURVAS DESLOCAMENTO/INCLINAÇÃO PARA A INTERFACE GEOTÊXTIL TECIDO-GEOTAPETE PARA DIFERENTES TIPOS DE PREENCHIMENTO DA CAIXA SUPERIOR.....	79

## ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1. 1 - NÚMERO E TÍTULO DAS NORMAS DE ENSAIO DE INTERACÇÃO COM GEOSSINTÉTICOS.....	4
QUADRO 1. 2 – CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS UTILIZADOS (ADAPTADO DE PALMEIRA <i>ET AL.</i> , 2002) .....	6
QUADRO 1. 3 – ÂNGULOS DE ATRITO DE INTERFACES ENTRE GEOSSINTÉTICOS (PALMEIRA <i>ET AL.</i> , 2002)	7
QUADRO 1. 4 - VALORES MÉDIOS DO ÂNGULO DE ATRITO E DA COESÃO APARENTE NA INTERFACE GEOTÊXTIL- GEOMEMBRANA, DE ACORDO COM A TEXTURA DA GEOMEMBRANA (ADAPTADO DE JONES E DIXON, 1998) .....	10
QUADRO 1. 5 – VALORES DA ADESÃO E ÂNGULO DE ATRITO NA INTERFACE GEOTÊXTIL – GEOMEMBRANA, DE ACORDO COM A TEXTURA DA GEOMEMBRANA (ADAPTADO DE WASTI E ÖZDÜZGÜN, 2001).....	12
QUADRO 1. 6 - VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E DA COESÃO APARENTE NA INTERFACE GEOTÊXTIL- GEOMEMBRANA, DE ACORDO COM O MATERIAL DE COBERTURA (ADAPTADO DE JONES E DIXON, 1998) .....	13
QUADRO 1. 7 - VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E DA COESÃO APARENTE NA INTERFACE GEOTÊXTIL- GEOMEMBRANA, DE ACORDO COM A GRAMAGEM E ESPESSURA DOS GEOTÊXTEIS (ADAPTADO DE JONES E DIXON, 1998).....	15
QUADRO 1. 8 – VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E DA COESÃO APARENTE NA INTERFACE GEOTÊXTIL- GEOMEMBRANA, DE ACORDO COM O POLÍMERO CONSITUINTE DOS GEOTÊXTEIS (ADAPTADO DE JONES E DIXON, 1998).....	17
QUADRO 1. 9 – VALORES DA ADESÃO E ÂNGULO DE ATRITO NA INTERFACE GEOTÊXTIL-GEOMEMBRANA, DE ACORDO COM O POLÍMERO CONSTITUINTE DA GEOMEMBRANA (ADAPTADO DE WASTI E ÖZDÜZGÜN, 2001) .....	19
QUADRO 1. 10 - VALORES DA ADESÃO E ÂNGULO DE ATRITO NA INTERFACE GEOTÊXTIL-GEOMEMBRANA, DE ACORDO COM O TIPO DE ENSAIO (ADAPTADO DE WASTI E ÖZDÜZGÜN, 2001) .....	25
QUADRO 1. 11 – VARIANTES AO ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO PERMITIDAS PELO EQUIPAMENTO DO LGS. ....	31
QUADRO 2. 1 – CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS. ....	34
QUADRO 2. 2 – PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS.....	35
QUADRO 2. 3 – VALORES DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA GEOGRELHA UNIAXIAL.....	37
QUADRO 2. 4 – VALORES DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA GEOGRELHA BIAXIAL .....	37
QUADRO 2. 5 – PROGRAMA DE ENSAIOS .....	38
QUADRO 2. 6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO .....	40
QUADRO 2. 7 – DEFINIÇÃO DA FORÇA $f(\beta)$ .....	41
QUADRO 2. 8 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNT) .....	42
QUADRO 2. 9 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXTL).....	43

QUADRO 2. 10 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXt) .....	43
QUADRO 2. 11 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GML).....	44
QUADRO 2. 12 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GMT) .....	45
QUADRO 2. 13 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GML).....	46
QUADRO 2. 14 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GMT) .....	47
QUADRO 2. 15 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GML).....	48
QUADRO 2. 16 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GMT) .....	48
QUADRO 2. 17 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GML).....	49
QUADRO 2. 18 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GMT) .....	50
QUADRO 2. 19 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GML).....	51
QUADRO 2. 20 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GMT) .....	51
QUADRO 2. 21 – COMPARAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATRITO NAS INTERFACES COM AS GEOMEMBRANAS .....	52
QUADRO 2. 22 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXnt).....	53
QUADRO 2. 23 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXtl) .....	54
QUADRO 2. 24 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXnt).....	55
QUADRO 2. 25 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXtl) .....	55
QUADRO 2. 26 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXnt).....	56
QUADRO 2. 27 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXtl) .....	57
QUADRO 2. 28 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXnt).....	58
QUADRO 2. 29 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXtl) .....	59
QUADRO 2. 30 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXnt).....	60
QUADRO 2. 31 – COMPARAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATRITO NAS INTERFACES COM OS GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS .....	60
QUADRO 2. 32 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXt) .....	61
QUADRO 2. 33 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXt) .....	62
QUADRO 2. 34 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXt) .....	63
QUADRO 2. 35 – COMPARAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATRITO NAS INTERFACES COM OS GEOTÊXTEIS NÃO TECIDO AGULHADO E TECIDO.....	64
QUADRO 2. 36 – COMPARAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATRITO NAS INTERFACES COM OS GEOTÊXTEIS NÃO TECIDO TERMOLIGADO E TECIDO.....	66
QUADRO 2. 37 – ÂNGULO DE ATRITO NAS INTERFACES GEOSSINTÉTICO-GEOSSINTÉTICO – RESUMO DE RESULTADOS.....	67
QUADRO 2. 38 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXt) .....	69
QUADRO 2. 39 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXnt).....	69
QUADRO 2. 40 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXtl) .....	70

QUADRO 2. 41 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNT) .....	70
QUADRO 2. 42 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNTL) .....	71
QUADRO 2. 43 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXT) .....	71
QUADRO 2. 44 – COMPARAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATRITO NAS INTERFACES SOLO-GEOTÊXTIL.....	72
QUADRO 2. 45 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNT) .....	73
QUADRO 2. 46 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNT) .....	74
QUADRO 2. 47 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNT) .....	75
QUADRO 2. 48 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNT) .....	76
QUADRO 2. 49 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNTL) .....	77
QUADRO 2. 50 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXNTL) .....	78
QUADRO 2. 51 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXT) .....	79
QUADRO 2. 52 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PLANO INCLINADO (GTXT) .....	80
QUADRO 2. 53 – COMPARAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATRITO NA INTERFACE GEOMEMBRANA LISA – GEOTÊXTIL NÃO TECIDO TERMOLIGADO .....	80
QUADRO 2. 54 – COMPARAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATRITO NAS INTERFACES GEOTEXTIL – GEOTAPETE .....	81

## SIMBOLOS E ABREVIATURAS

PE - Poliéster

PET - Polietileno

PP - Polipropileno

PVC - Policloreto de vinilo

S - Distância entre barras transversais da geogrelha

$a_s$  - Fração sólida da area superficial da geogrelha

$a_b$  - Fração da largura da geogrelha disponível para mobilização da resistência passiva

B - Espessura das barras das geogrelhas

T - Resistência ao corte da interface solo-geossintético

$C_1$  - Adesão entre os materiais em contacto

$e_{sat}$  - Altura de solo saturado

f - Coeficiente de resistência da interface (varia entre 0 e 1)

$f_{cd}$  - Coeficiente de resistência da interface de corte directo

$f_a$  - Coeficiente de resistência da interface de arranque

FS - Factor de segurança

L - Comprimento do geossintético

PEAD - Polietileno de alta densidade

$T_p$  - Impulso passivo

W - Largura do geossintético

$\phi'$  - Ângulo de atrito do solo

$\sigma'_p$  - Tensão passivo em termos de tensões efectivas

$\delta_p$  - Resistência ao corte numa interface de dois materiais

$\delta_1$  - Ângulo de atrito entre os componentes do sistema composto de geossintéticos

$\delta_H$  - Ângulo de atrito na interface em presença de água

$\delta_H$  - deslocamento correspondente ao atrito máximo

$\Delta\delta$  -  $\delta - \delta_H$

$\sigma'_0$  - Tensão normal inicial

$d\delta/dt$  - Razão de deslocamento

$d\beta/dt$  - Razão de Inclinação

A - Área de contacto do solo com o provete

$A_L$  - Distância entre as barras transversais das geogrelhas

$A_T$  - Distância entre as barras longitudinais das geogrelhas

$B_{WT}$  - Largura das barras transversais das geogrelhas  
 $C_u$  - Coeficiente de Uniformidade  
 $C_c$  - Coeficiente de Curvatura  
 $D_{máx}$  - Diâmetro máximo do solo  
 $D_{mín}$  - Diâmetro mínimo do solo  
 $D_{10}$  - Diâmetro efectivo do solo  
 $D_{30}$  - Diâmetros das partículas do solo correspondente a 30% de passados  
 $D_{50}$  - Dimensão media das partículas  
 $D_{60}$  - Diâmetros das partículas do solo correspondente a 60% de passados  
 $F_v$  - Força vertical que actua na interface do geossintético  
 $F_{WL}$  - Largura das barras longitudinais da geogrelha uniaxial  
 $f(\beta)$  - Força necessária para evitar o movimento da caixa superior vazia  
GGb - Geogrelha biaxial  
Ggu - Geogrelha uniaxial  
GML - Geomembrana lisa  
GMT - Geomembrana texturada  
GTAP - Geotapete  
GTXnt - Geotêxtil não tecido agulhado  
GTXt - Geotêxtil tecido  
GTXtl - Geotêxtil não tecido termoligado  
ID - Índice de compacidade  
MUA - Massa por unidade de área  
MD - Bloco de madeira  
 $t_F$  - Espessura das barras longitudinais da geogrelha uniaxial  
 $t_B$  - Espessura das barras transversais da geogrelha uniaxial  
 $t_J$  - Espessura dos nós da geogrelha biaxial  
 $t_{TR}$  - Espessura das barras transversais da geogrelha biaxial  
 $t_{LR}$  - Espessura das barras longitudinais da geogrelha biaxial  
 $W_{LR}$  - Largura das barras longitudinais (biaxial)  
 $W_{TR}$  - Largura das barras transversais (biaxial)  
 $\beta$  - Ângulo de deslizamento da caixa superior  
 $\gamma_{máx}$  - Peso volúmico máximo  
 $\gamma_{mín}$  - Peso volúmico mínimo  
 $\gamma_{(ID=50\%)}$  - Peso volúmico para índice de compacidade de 50%

$\phi$  - Ângulo de atrito

$\delta$  - Tensão de corte ao longo da superfície de deslizamento

$\sigma_n$  - Tensão normal efectiva no plano de corte

$\phi_{sg}$  - Ângulo de atrito na interface geossintético-geossintético



# 1

## FENÓMENOS DE INTERACÇÃO E ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO

### 1.1 INTRODUÇÃO

O enquadramento geral aos geossintéticos tem sido abordado em vários trabalhos de investigação com grande exaustão, em particular por Pinho-Lopes (2004). Por essa razão, e dadas as características deste trabalho, optou-se por fazer apenas a introdução teórica aos fenómenos de interacção de interfaces com geossintéticos.

A resistência friccional mobilizada entre a superfície de um geossintético e qualquer outra superfície depende, entre outras coisas, das propriedades físicas e mecânicas desse geossintético. No contexto da aplicação de geossintéticos em engenharia civil, o projectista está geralmente interessado na resistência friccional que pode ser mobilizada entre um geossintético e um solo ou entre um geossintético e qualquer outro material de construção, tal como blocos de betão ou até outro geossintético (Ingold, 1994).

Na verdade, é nesta resistência friccional mobilizada nas interfaces entre os diferentes materiais que se baseia a estabilidade global de aterros reforçados com geossintéticos e de sistemas de impermeabilização de aterros de resíduos ou de controlo de erosão superficial de taludes. Nestas estruturas, os diferentes geossintéticos e o solo interagem entre si, transferindo tensões através do atrito mobilizado nas interfaces.

No caso de aterros reforçados com geossintéticos, as tensões de tracção não suportadas pelo solo são transferidas para os geossintéticos através das forças de atrito que se mobilizam na interface solo-geossintético. No caso de sistemas de controlo de erosão superficial de taludes, a resistência ao corte das interfaces solo – geossintético ou das interfaces entre dois geossintéticos diferentes, baseada no atrito que nestas se desenvolve, torna possível que não haja deslizamentos ao longo das superfícies de contacto entre os diferentes materiais.

Neste capítulo, pretende-se caracterizar e descrever os fenómenos de interacção entre os diferentes materiais que integram estruturas com geossintéticos. Numa primeira fase, será dada especial atenção à interacção solo – geossintético. Posteriormente, serão abordadas questões relativas à interacção geossintético – geossintético.

### 1.2 INTERACÇÃO SOLO – GEOSSINTÉTICO

#### 1.2.1 GENERALIDADES

A interacção solo-geossintético é da maior importância em muitas aplicações destes materiais, nomeadamente em situações em que os geossintéticos actuam como reforço, ou mesmo quando são colocados sobre taludes como constituintes de sistemas de protecção contra a erosão ou de sistemas de impermeabilização de taludes laterais de aterros de resíduos. Factores como a geometria do sistema solo-geossintético e o processo construtivo podem influenciar as características da interacção solo-

geossintético. Todavia, estas são fortemente determinadas pelo mecanismo de interação, pelas propriedades físicas e mecânicas do solo (índice de compactidade, forma e dimensão dos grãos, granulometria, teor em água, etc.) e pelas propriedades mecânicas, forma e geometria dos geossintéticos.

Nas interfaces solo-geossintético podem ser identificados três mecanismos de interação:

- atrito lateral ao longo do geossintético;
- atrito solo-solo;
- impulso passivo nas barras transversais do geossintético.

O atrito lateral é o único mecanismo presente nos geotêxteis e geomembranas. No caso das geogrelhas deve ser também considerado o impulso passivo nas barras transversais das grelhas e, no caso de ocorrência de movimento relativo no solo ao longo das aberturas da geogrelha, o atrito solo-solo (Figura 1.1).

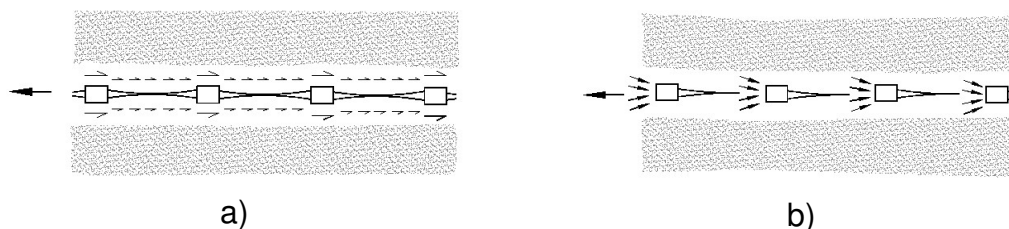


Figura 1. 1 – Mecanismos de interação solo-geogrelha: a) atrito lateral; b) impulso passivo nas barras transversais da geogrelha (Jewell *et al.*, 1984)

A mobilização da resistência ao corte entre solos granulares e geotêxteis ou geomembranas é um fenómeno bidimensional, onde a dilatância é permitida e que é muito influenciado pela extensibilidade destes geossintéticos. No caso das geogrelhas, o fenómeno é tridimensional, mobilizando-se atrito lateral para pequenos deslocamentos e, progressivamente, impulso passivo nas barras transversais das grelhas à medida que o deslocamento aumenta.

#### 1.2.2 RESISTÊNCIA DA INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO

Existem dois movimentos relativos que podem ser responsáveis pela mobilização de resistência nas interfaces solo-geossintético:

- o geossintético permanece solidário com parte do solo envolvente, sendo a resistência da interface mobilizada pelo deslizamento da restante massa de solo em relação ao geossintético (corte directo);
- o geossintético move-se em relação ao solo envolvente (arranque).

No primeiro caso, quando a resistência ao corte da interface solo-geossintético é ultrapassada, a rotura dá-se por corte directo e, no segundo caso, por arranque. A resistência ao corte da interface solo-geossintético, quando o movimento relativo é de corte directo, pode ser definida de acordo com a seguinte expressão:

$$T = WL \sigma'_n f \tan \phi' \quad (1.1)$$

em que  $f$  é o coeficiente de resistência da interface,  $\phi'$  é o ângulo de atrito do solo em termos de tensões efectivas,  $\sigma'_n$  a tensão normal efectiva actuante na interface e  $W$  e  $L$  a largura e o comprimento do geossintético.

A resistência ao corte da interface solo-geossintético, quando o movimento relativo é de arranque, é dada por:

$$T = 2 W L \sigma'_n f \operatorname{tg} \phi' \quad (1.2)$$

O coeficiente de resistência da interface,  $f$ , varia entre 0 e 1 e depende do mecanismo de interacção mobilizado na interface solo-geossintético e do movimento relativo que ocorre nessa mesma interface. Se o único mecanismo mobilizado é o atrito lateral,  $f$  é próximo, senão idêntico, para os movimentos de corte directo e de arranque (Jewell, 1996), sendo dado por:

$$f = f_{cd} = f_a = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \phi'} \quad (1.3)$$

Onde,  $\delta$  é o ângulo de atrito na interface solo-geossintético e  $f_{cd}$  e  $f_a$  são os coeficientes de resistência da interface de corte directo e arranque, respectivamente.

No caso das geogrelhas, a resistência ao corte na interface solo-geossintético quando o movimento é de corte directo é a soma de duas parcelas, sendo uma correspondente ao mecanismo de atrito lateral e outra correspondente ao mecanismo de atrito solo-solo. Para este tipo de movimento, considera-se desprezável a contribuição do mecanismo de mobilização do impulso passivo nas barras transversais das geogrelhas. O coeficiente de resistência da interface em corte directo é obtido a partir da seguinte equação:

$$f = f_{cd} = a_s \left( \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \phi'} \right) + (1 - a_s) \quad (1.4)$$

Onde,  $a_s$  é a fracção sólida da área superficial da grelha.

Quando o movimento é de arranque pode considerar-se nula a contribuição para a resistência da interface solo – geossintético do mecanismo de atrito solo-solo, sendo a resistência dessa interface devida à contribuição dos mecanismos de atrito lateral e de mobilização do impulso passivo nas barras transversais das geogrelhas. Neste caso, o coeficiente de resistência da interface (coeficiente de arranque) é dado por:

$$f = f_a = a_s \left( \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \phi'} \right) + \left( \frac{\sigma'_p}{\sigma'_n} \right) \left( \frac{a_b B}{S} \right) \left( \frac{1}{2 \operatorname{tg} \phi'} \right) \quad (1.5)$$

Sendo  $S$ ,  $B$  e  $a_b$ , respectivamente, a distância entre barras transversais da geogrelha, a espessura dessas barras e a fracção da largura da geogrelha disponível para mobilização da resistência passiva,  $\sigma'_p$  é a tensão passiva mobilizada em termos de tensões efectivas.

De realçar que existem vários factores que influenciam a interacção solo-geossintético e, consequentemente, a resistência numa interface desse tipo. De entre esses factores destaca-se: a dimensão das partículas de solo; a tensão de confinamento; o índice de compacidade do solo e a estrutura do geossintético.

### 1.2.3 ENSAIOS LABORATORIAIS PARA AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA INTERACÇÃO SOLO-GEOSSINTÉTICO

Os ensaios laboratoriais mais frequentemente usados para quantificação da resistência da interface solo-geossintético são os ensaios de corte directo e de arranque. No entanto, os ensaios de corte em

plano inclinado são por vezes os mais adequados ao problema que se pretende estudar, como adiante se verá. Estes três ensaios encontram-se normalizados a nível Europeu e Nacional (Quadro 1.1).

A adequação de cada um dos ensaios para a definição das características da interface baseia-se no movimento relativo que com maior probabilidade ocorrerá na interface solo-geossintético: para o movimento de corte directo, o ensaio de corte directo é o mais adequado, sendo para o movimento de arranque o ensaio de arranque. Para problemas de estabilidade de camadas superficiais de geossintéticos em taludes, o ensaio de corte em plano inclinado será o mais adequado. No entanto, cada um destes ensaios tem limitações na simulação de um problema real, tais como questões de escala e de condições fronteira (McGown *et al.*, 1998).

Quadro 1. 1 - Número e título das normas de ensaio de interação com geossintéticos

Número	Nome
<b>NP EN ISO 12957-1</b>	Geossintéticos – Determinação das características de atrito – Parte 1: Ensaio de corte directo
<b>NP EN ISO 12957-2</b>	Geossintéticos – Determinação das características de atrito – Parte 2: Ensaio em plano inclinado
<b>NP EN 13738</b>	Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da resistência ao arranque no solo

### 1.3 INTERACÇÃO GEOSSINTÉTICO-GEOSSINTÉTICO

#### 1.3.1 GENERALIDADES

O uso de vários tipos de geossintéticos nas mais diversas aplicações, como por exemplo em sistemas de controlo de erosão de taludes ou em sistemas de impermeabilização de aterros de resíduos, dá origem à existência de interfaces entre diferentes geossintéticos, nas quais estão geralmente posicionados os planos de rotura preferenciais.

Na verdade, existem nestes sistemas vários tipos de interface ao longo das quais é possível a ocorrência de deslizamentos. Qualquer combinação tecnicamente aceitável entre geotêxteis, geomembranas, geotapetes, geogrelhas, georedes, geocompósitos e solos é susceptível de constituir um tipo de interface.

A determinação dos parâmetros de resistência ao corte, nomeadamente dos valores da adesão e do ângulo de atrito entre os materiais que compõem a interface, bem como do comportamento desta em termos da relação tensões de corte / deslocamentos por corte, é essencial para uma avaliação precisa da estabilidade do sistema compósito e da integridade dos geossintéticos que o constituem.

Considera-se que a estabilidade de um sistema composto por vários tipos de geossintéticos está assegurada caso não existam deslizamentos incontrolados entre os vários componentes que o constituem. Tais deslizamentos poderiam originar tensões locais excessivas nos geossintéticos e conduzir ao rasgamento, ou então induzir uma rotura global no talude.

As tensões que se desenvolvem nos vários componentes de um sistema compósito são de difícil avaliação. Embora o equilíbrio de forças para a situação de rotura iminente seja conhecido, verifica-se que o estado de tensão no sistema correspondente a solicitações de serviço ou de instalação permanece difícil de determinar.

Em resultado do que acima foi exposto, conclui-se que o projecto deste tipo de sistemas para taludes requer o conhecimento dos parâmetros de resistência ao corte das interfaces entre os diferentes geossintéticos. Estes parâmetros são definidos de acordo com o critério de rotura de Mohr-Coulomb, traduzido pela Equação (1.6):

$$\tau_p = c_1 + \sigma_n \tan \delta_1 \quad (1.6)$$

em que,  $\tau_p$  representa a resistência ao corte numa interface entre dois materiais,  $\sigma_n$  é a tensão normal efectiva no plano de corte,  $c_1$  representa a adesão entre os materiais em contacto e  $\delta_1$  é o ângulo de atrito entre os componentes do sistema composto de geossintéticos.

Para caracterizar o comportamento de uma determinada interface entre dois geossintéticos quando esta é solicitada por corte, pode recorrer-se a quatro tipos de ensaios laboratoriais distintos: ensaios de corte directo; ensaios de corte em plano inclinado; ensaios de arranque; ensaios de corte torsionais.

No entanto, a adequação e a fiabilidade de cada um destes ensaios é fortemente dependente do tipo de informação específica que se pretende obter, resultante da função específica para a qual o sistema composto é projectado e, conseqüentemente, do tipo de solicitações a que vai estar submetido.

Assim sendo, no caso dos sistemas de controlo de erosão de taludes ou dos sistemas de impermeabilização de aterros de resíduos, nos quais as interfaces entre os seus vários componentes estão submetidas a baixas tensões de confinamento, o ensaio de corte em plano inclinado aparenta ser o tipo de ensaio mais adequado à caracterização dos mecanismos que controlam a resistência ao corte dessas interfaces.

Alguns estudos já efectuados, como por exemplo o levado a cabo por Izgin e Wasti (1998), sugerem que os ensaios de corte em plano inclinado conduzem à obtenção de envolventes de rotura com valores nulos ou muito baixos para a adesão. Estes autores verificaram ainda que os ensaios de corte directo, por seu lado, fornecem valores superiores para a adesão e para o ângulo de atrito na interface. Em relação a este último parâmetro, é possível observar um aumento de cerca de 5° a 10° em comparação com o ensaio de corte em plano inclinado.

Conclui-se assim que o ensaio de corte em plano inclinado, para além de ser o ensaio que melhor simula as condições reais verificadas em obras de controlo de erosão de taludes ou de impermeabilização de aterros, é aquele que fornece os valores mais conservativos para dimensionamento. Na verdade, verifica-se que os ensaios de corte directo fornecem valores pouco fiáveis e inseguros para as resistências ao corte de interfaces sujeitas a baixas tensões normais.

Por fim, resta assinalar que existem na bibliografia da especialidade valores publicados para as resistências ao corte e ângulos de atrito de interfaces entre vários materiais. Embora estes valores sejam úteis para fornecer uma estimativa razoável numa primeira abordagem, os valores a utilizar no dimensionamento em fase de projecto de execução deverão ser baseados num programa experimental cuidado, no qual devem ser utilizados os solos específicos do local da obra e os geossintéticos escolhidos para o projecto em questão.

### 1.3.2 INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DOS GEOSSINTÉTICOS NA SUA INTERACÇÃO

Palmeira *et al.* (2002) estudaram a influência do tipo e da estrutura dos geossintéticos que constituem uma determinada interface na resistência ao corte dessa mesma interface. Para esse efeito, recorreram a ensaios de corte em plano inclinado e utilizaram diferentes geossintéticos, cujas características se encontram resumidas no Quadro 1.2.

Na Figura 1.2 são apresentados os resultados obtidos pelos autores. Verifica-se que o deslocamento da caixa superior na rotura (deslizamento completo da caixa ao longo do plano inclinado) é muito superior para a interface georrede GN1 – geomembrana GM1, podendo este facto ser explicado pela grande extensibilidade da georrede GN1.

Verifica-se ainda que o deslocamento da caixa superior começa a aumentar para inclinações do plano iguais ou ligeiramente menores que os ângulos de atrito da interface apresentados no Quadro 1.3. Devido à extensibilidade de alguns dos geossintéticos utilizados, é esperada uma distribuição muito pouco uniforme das tensões de corte ao longo do comprimento destes, bem como distintos deslocamentos relativos nas diferentes interfaces.

Quadro 1. 2 – Características dos geossintéticos utilizados (adaptado de Palmeira *et al.*, 2002)

Código	Tipo	Polímero	MA (g/m <sup>2</sup> )	t <sub>G</sub> (mm)	T <sub>max</sub> (kN/m)	ε <sub>max</sub> (%)	J (kN/m)
GTN3	GTN	PET	300	2,6	20	50	45
GTW1	GTW	PP	138	0,4	22	15	110
GG1	GG	PET	540	0,6 – 1,6	110/30 (**)	12	900
GG2	GG	PET	710	1,0 – 2,8	200/35 (**)	12	1650
GN1	GN	PE	311	2,0 – 5,7	3,4/2,8 (**)	100/60 (**)	15
GN2	GN	PE	730	4,8	22	70	102
GM1	GM	PVC	1380	1,0	14 (*)	350	6,5 (***)

NOTAS: GTN = Geotêxtil não tecido agulhado; GTW = Geotêxtil tecido; GG = Geogrelha; GN = Georede; GM = Geomembrana; PET = Poliéster; PP = Polipropileno; PE = Polietileno; PVC = Cloreto de polivinilo; MA = Massa por unidade de área; t<sub>G</sub> = Espessura; T<sub>max</sub> = Resistência à tracção; ε<sub>max</sub> = Extensão na rotura; J = Rigidez secante para ε = 10%; (\*) Tensão de rotura em MPa; (\*\*) Direcções longitudinal e transversal; (\*\*\*) Módulo de tensão para ε = 100%, em MPa.

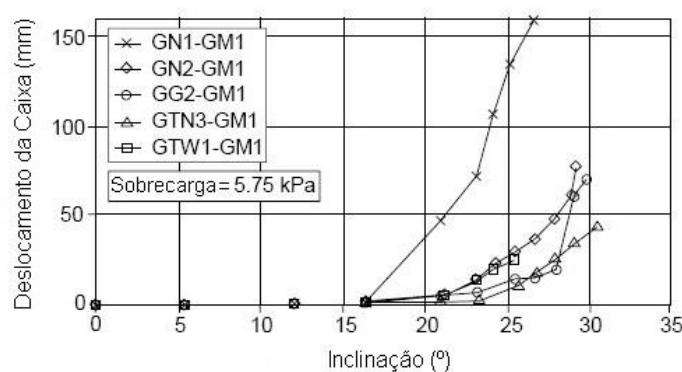


Figura 1. 2 – Deslocamento da caixa superior / inclinação do plano, para diferentes interfaces entre geossintéticos (Palmeira *et al.*, 2002).

Quadro 1. 3 – Ângulos de atrito de interfaces entre geossintéticos (Palmeira *et al.*, 2002)

	$\phi_{gg}$ (°)		
	GM1	GTN3	GTW1
GM1	22	21	17
GTN3	21	24	25
GTW1	17	25	-
GN1	22	-	-
GN2	24	-	-
GG1	31	-	-
GG2	27	-	-

Palmeira *et al.* (2002) também analisaram a variação das tensões de tracção na geomembrana com o aumento da inclinação do plano, para os diferentes geossintéticos sobre ela colocados. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 1.3, tendo os autores concluído que, quanto maior for a interacção entre a geomembrana e o geossintético subjacente, mais cedo se mobilizam as tensões de tracção na primeira.

Analisando a Figura 1.3, verifica-se que a mais reduzida mobilização de forças de tracção na geomembrana ocorreu nos ensaios com o geotêxtil tecido GTW1, o que é consistente com os baixos valores do ângulo de atrito na interface GTW1 – GM1 apresentados no Quadro 1.3. É ainda possível observar que a aplicação das georredes extensíveis (GN1 e GN2) directamente sobre a geomembrana impõe nesta esforços de tracção menores do que os resultantes da utilização de geogrelhas mais rígidas. Conclui-se, então, que a geometria e a dimensão das aberturas das grelhas relativamente às partículas de solo, bem como as características friccionais da interface geogrelha – geomembrana, influenciam directamente a interacção entre estes dois geossintéticos, sendo factores importantes a ter em conta para a diminuição dos esforços transmitidos à geomembrana.

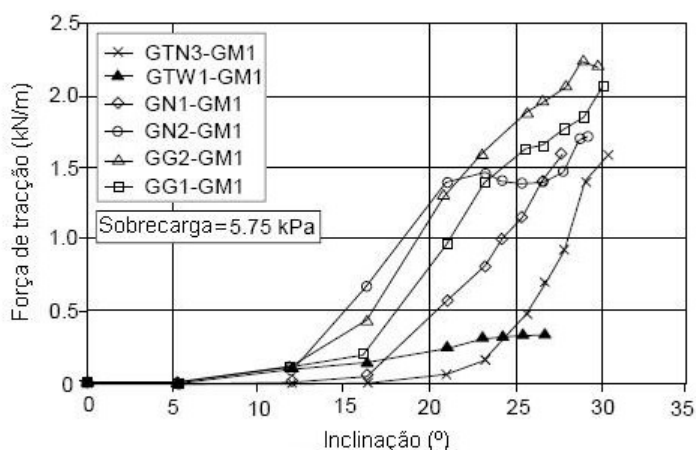


Figura 1. 3 – Força de tracção mobilizada na geomembrana com o aumento da inclinação do plano (Palmeira *et al.*, 2002).

Palmeira *et al.* (2002) estudaram ainda os mecanismos de transferência de tensões de corte entre as diferentes interfaces presentes num sistema composto de geossintéticos aplicado sobre um talude. Para tal, colocaram sobre a base rígida do equipamento de corte em plano inclinado uma geomembrana (GM1) e, sobre esta, os geotêxteis GTN3 e GTW1, a georrede GN1 e a geogrelha GG1. Medindo a tensão de corte em cada uma das camadas de geossintético durante a inclinação do plano, obtiveram os gráficos apresentados na Figura 1.4.

De acordo com a Figura 1.4, o ângulo de atrito na interface crítica (valor mais baixo) controla a transferência de esforços entre as várias camadas de geossintético. Inicialmente, a quase totalidade das tensões de corte são suportadas pela base do equipamento. Quando ocorre deslizamento ao longo da interface menos resistente, inicia-se uma redistribuição de tensões de corte. No caso de não existir muita aderência entre os geossintéticos (Figuras 1.10 b e c), verifica-se que a maioria dos esforços de tracção são suportados pelo geossintético superior.

Assim sendo, com vista a minimizar os esforços de tracção no geossintético inferior (neste caso a geomembrana GM1), o geossintético sobrejacente deve apresentar boa rigidez à tracção mas também uma fraca interação com aquele sobre o qual está colocado. Conclui-se então que, para garantir a estabilidade de um sistema composto de geossintéticos nas suas várias vertentes, a escolha dos componentes de deve ser realizada criteriosamente, tendo em atenção não só as propriedades de cada um dos geossintéticos isoladamente, mas também as características da interação entre eles.

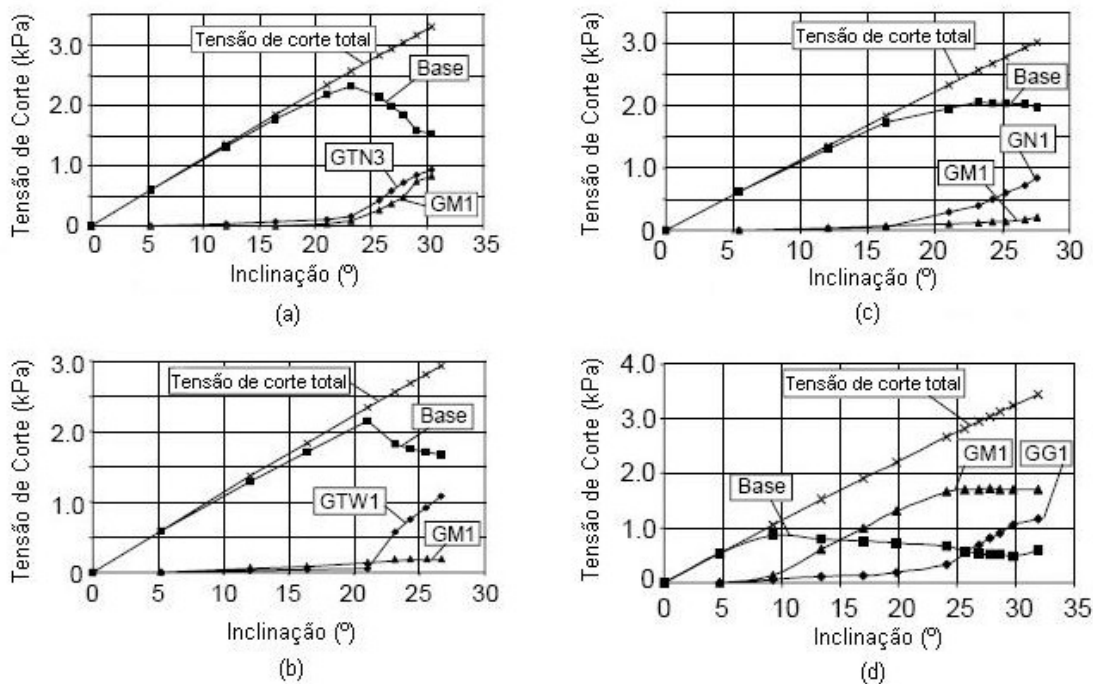


Figura 1. 4 – Transferência de tensões de corte para ensaios com duas camadas de geossintéticos e com uma sobrecarga de 5,75kPa: a) GTN3 – GM1; b) GTW1 – GM1; c) GN1 – GM1; d) GG1 – GM1 (adaptado de Palmeira *et al.*, 2002).

### 1.3.3 RESISTÊNCIA AO CORTE DE INTERFACES GEOTÊXTEL – GEOMEMBRANA

De todas as interfaces entre diferentes geossintéticos, a interface geotêxtil – geomembrana é aquela que se encontra mais estudada e sobre a qual existe um conhecimento mais profundo. Nesta secção, procura-se caracterizar o comportamento deste tipo de interfaces no que respeita à sua resistência ao corte, com base em vários estudos publicados na bibliografia da especialidade.

A textura e polímero constituinte da geomembrana, a espessura, massa por unidade de área e polímero constituinte do geotêxtil, o solo de cobertura e a presença de água na interface estão entre os factores que mais influenciam a resistência de interfaces geotêxtil – geomembrana quando solicitadas por corte. É precisamente a influência destes factores que se pretende caracterizar e quantificar em seguida.

#### 1.3.3.1 INFLUÊNCIA DA TEXTURA DA GEOMEMBRANA

A textura da geomembrana é o factor que mais decisivamente influencia a resistência ao corte das interfaces geotêxtil – geomembrana. Para ilustrar este facto, recorre-se nesta secção aos resultados publicados por Jones e Dixon (1998) e por Wasti e Özdüzgün (2001).

##### Estudos de Jones e Dixon (1998)

Jones e Dixon (1998) estudaram a influência da textura da geomembrana no comportamento das interfaces geotêxtil-geomembrana solicitadas por corte, recorrendo a ensaios de corte directo.

Os autores utilizaram três geomembranas diferentes em PEAD, sendo uma delas lisa e as outras duas texturadas, uma por extrusão e outra por impregnação. Foram ainda usados neste estudo três tipos diferentes de geotêxteis não tecidos agulhados, sendo um deles em PEAD, com 800g/m<sup>2</sup>, e os outros dois fabricados em PP, com 750g/m<sup>2</sup> e 1200g/m<sup>2</sup>.

Como solo de cobertura, os autores recorreram a três tipos diferentes de gravilha. O solo A é uma gravilha natural mal graduada com partículas arredondadas ou sub-arredondadas de média dimensão. O solo B tem granulometria semelhante ao solo A mas foi obtido por britagem e como tal possui partículas angulosas. O solo C, também obtido por britagem, apresenta-se bem graduado, contendo gravilha fina e areia grossa.

No Quadro 1.4 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos por Jones e Dixon (1998). Os valores apresentados para o ângulo de atrito e coesão aparente nas interfaces geotêxtil – geomembrana correspondem à média dos valores obtidos com cada um dos solos descritos no parágrafo anterior, uma vez que nesta fase apenas se pretende analisar a influência da textura da geomembrana. As diferenças observadas na resistência ao corte da interface consoante o tipo de solo utilizado serão detalhadamente analisadas numa fase posterior deste trabalho.

Como se pode ver pelo Quadro 1.4, a utilização de geomembranas texturadas implica aumentos do ângulo de atrito na interface geotêxtil – geomembrana entre os 16,8° e os 19,7°, dependendo não só do tipo de textura da geomembrana mas também, e principalmente, do polímero constituinte do geotêxtil. Na prática, este aumento significa que o ângulo de atrito na interface triplica quando se utiliza uma geomembrana texturada em vez de uma lisa. No que se refere à coesão aparente, os autores registaram aumentos entre os 3,1kPa e os 16,4kPa.

Quadro 1. 4 - Valores médios do ângulo de atrito e da coesão aparente na interface geotêxtil-geomembrana, de acordo com a textura da geomembrana (adaptado de Jones e Dixon, 1998)

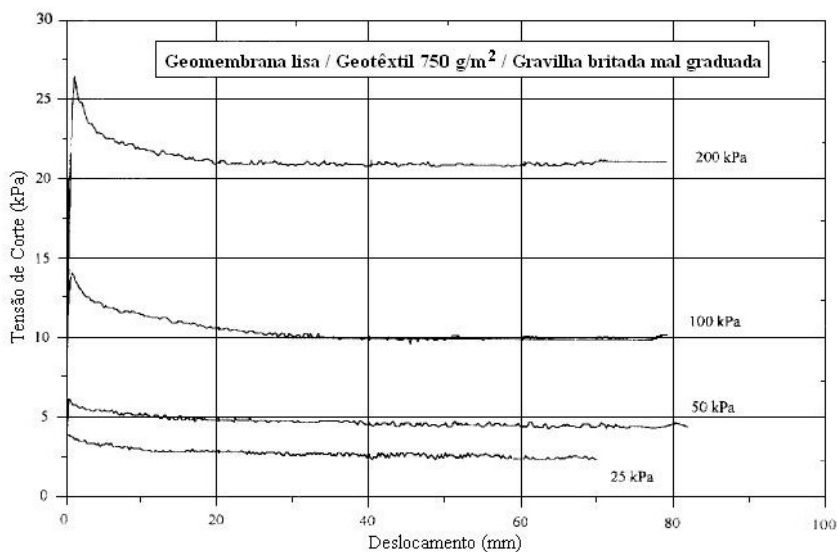
			GEOTÊXTEIS					
			750 PP		1200 PP		800 PEAD	
			Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)
GEOMEMBRANAS	LISA	Resultados	7,7	0,8	7,0	0,7	8,4	-0,1
	TEXTURADA POR IMPREGNAÇÃO	Resultados	25,8	17,2	24,7	15,3	27,8	12,3
		Diferença face à geomembrana lisa	+ 18,1	+ 16,4	+ 17,7	+ 14,6	+ 19,4	+ 12,4
	TEXTURADA POR EXTRUSÃO	Resultados	24,5	5,9	25,9	3,8	28,1	3,0
		Diferença face à geomembrana lisa	+ 16,8	+ 5,1	+ 18,9	+ 3,1	+ 19,7	+ 3,1

O comportamento da interface entre uma geomembrana lisa em PEAD e um geotêxtil não tecido agulhado em PP, utilizando uma gravilha mal graduada obtida por britagem como solo de cobertura sobre o geotêxtil é ilustrado na Figura 1.5a. Verifica-se que existe um rápido aumento na tensão de corte logo que se inicia o deslocamento, ao que se segue uma diminuição dessa tensão com a continuação do aumento do deslocamento.

Este tipo de comportamento, caracterizado pela perda de resistência à medida que o deslocamento aumenta, é evidente para todas as quatro tensões de confinamento aplicadas. Para interfaces entre geomembranas lisas e geotêxteis não tecidos agulhados, a resistência ao corte máxima (de pico) ocorre, tipicamente, para deslocamentos inferiores a 2mm. Verifica-se ainda que as tensões de corte sofrem uma redução de 20-30% para deslocamentos da ordem dos 40-50mm, sendo que para além desta gama de valores as reduções se tornam pouco significativas.

Por seu lado, o comportamento de uma interface entre uma geomembrana rugosa em PEAD e um geotêxtil não tecido agulhado em PP, utilizando uma gravilha mal graduada obtida por britagem como solo de cobertura sobre o geotêxtil é ilustrado na Figura 1.5b.

Analisando estes resultados, verifica-se que para mobilizar a resistência ao corte máxima (de pico) desta interface são requeridos deslocamentos superiores aos necessários no caso em que se utiliza uma geomembrana lisa. Dependendo das pressões de confinamento aplicadas, os deslocamentos correspondentes ao pico de resistência ao corte podem oscilar entre os 5mm e os 10mm.



a)

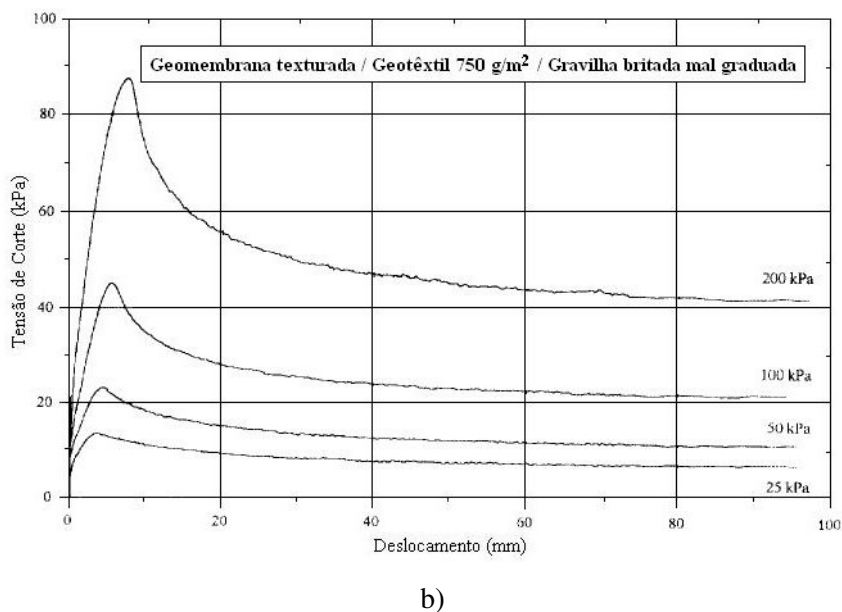


Figura 1. 5 – Tensão de corte / deslocamento: (a) Interface geomembrana lisa – geotêxtil; (b) Interface geomembrana texturada – geotêxtil (Jones e Dixon, 1998)

É ainda possível constatar que os valores de pico para a resistência ao corte da interface surgem significativamente aumentados no caso de se recorrer a uma geomembrana texturada em detrimento de uma lisa. Por outro lado, a utilização de geomembranas rugosas leva a que se observe uma maior redução nas tensões de corte a partir do seu valor máximo, quando os deslocamentos aumentam para valores além dos correspondentes ao pico de resistência. A interface entre o geotêxtil e a geomembrana texturada apresenta uma redução de resistência ao corte de cerca de 50% em relação ao valor máximo, para deslocamentos da ordem dos 50mm.

#### Estudos de Wasti e Özdüzgün (2001)

Wasti e Özdüzgün (2001) estudaram a influência da textura da geomembrana na resistência da interface geotêxtil – geomembrana com base em ensaios de corte directo e de corte em plano inclinado. Para tal, utilizaram três tipos de geomembrana em PEAD (GM-A, GM-B, GM-C) e dois tipos de geotêxtil não tecido agulhado de 500g/m<sup>2</sup>, um deles em PET com espessura de 4,1mm (GT-A) e o outro em PE com espessura de 3,4mm (GT-B). As características detalhadas dos geossintéticos usados estão descritas em Wasti e Özdüzgün (2001) e estes autores obtiveram os resultados que se apresentam no Quadro 1.5.

Como se pode ver no Quadro 1.5, os valores do ângulo de atrito na interface geotêxtil – geomembrana lisa variam entre os 10,32° e os 14,19° e os correspondentes valores da adesão entre os 0,29kPa e os 3,34kPa. No caso da interface geotêxtil – geomembrana texturada, os valores do ângulo de atrito situam-se entre os 25,58° e os 30,34° enquanto que os valores da adesão oscilam entre os 0,72kPa e os 30,00kPa.

Apesar de algumas diferenças relativas ao método de ensaio, à área da interface e aos polímeros constituintes dos geossintéticos, questões estas que serão posteriormente alvo de uma análise detalhada neste trabalho, conclui-se que a textura da geomembrana assume um papel fundamental na resistência ao corte da interface geotêxtil – geomembrana.

Quadro 1. 5 – Valores da adesão e ângulo de atrito na interface geotêxtil – geomembrana, de acordo com a textura da geomembrana (adaptado de Wasti e Özdüzgün, 2001)

TIPO DE ENSAIO	ÁREA DE CONTACTO	GEOTÊXTIL	GEOMEMBRANAS TEXTURADAS			GEOMEMBRANAS LISAS			DIFERENÇA	
			Tipo	a (kPa)	$\delta$ (°)	Tipo	a (kPa)	$\delta$ (°)	$\Delta a$ (kPa)	$\Delta \delta$ (°)
Corte em plano inclinado	300mm x 300mm	A	A	1,29	26,92	A	0,29	12,41	1,0	14,5
	60mm x 60mm	A	A	0,72	25,58	A	0,38	11,59	0,3	14,0
			B	-	-	B	0,97	10,32	-	-
			C	1,82	27,56	C	-	-	-	-
		B	A	1,66	25,95	A	1,32	12,96	0,3	13,0
			B	-	-	B	0,92	12,41	-	-
C	2,74	27,90	C	-	-	-	-			
Corte directo	300mm x 300mm	A	A	30,00	27,00	A	3,34	12,28	26,7	14,7
	60mm x 60mm	A	A	15,83	28,10	A	0,72	12,30	15,1	15,8
			B	-	-	B	1,61	13,43	-	-
			C	19,75	29,55	C	-	-	-	-
		B	A	13,06	28,11	A	1,27	13,85	11,8	14,3
			B	-	-	B	2,22	14,19	-	-
C	12,70	30,34	C	-	-	-	-			

Pode então afirmar-se que os resultados obtidos por Wasti e Özdüzgün (2001) indicam que a utilização de uma geomembrana texturada em vez de uma lisa conduz a um aumento de 13,0° a 15,8° do ângulo de atrito na interface geotêxtil – geomembrana. No limite, e caso se considere a diferença entre os valores obtidos com as geomembranas B e C, este aumento pode atingir os 17,2°. No que diz respeito aos valores da adesão, este estudo permite observar aumentos entre 0,3kPa e 26,7kPa, quando se substitui a geomembrana lisa por uma texturada.

### 1.3.3.2 INFLUÊNCIA DO SOLO DE COBERTURA

Qualquer geotêxtil instalado com a finalidade de proteger uma geomembrana, por exemplo, terá sempre uma cobertura de material granular colocada sobre si. Jones e Dixon (1998) estudaram o efeito destas camadas granulares na resistência ao corte das interfaces geomembrana – geotêxtil.

Neste estudo, os autores utilizaram os geossintéticos já descritos secção 1.3.3.1., isto é, geomembranas lisas e rugosas em PEAD e geotêxteis em PP e em PEAD. Como material de cobertura sobre o geotêxtil, recorreram a um bloco de nylon e a três tipos diferentes de gravilha. O solo A é uma gravilha natural mal graduada com partículas arredondadas ou sub-arredondadas de média dimensão. O solo B tem granulometria semelhante ao solo A mas foi obtido por britagem e como tal possui partículas angulosas. O solo C, também obtido por britagem, apresenta-se bem graduado, contendo gravilha fina e areia grossa.

Analisando os resultados obtidos (ver Quadro 1.6), pode verificar-se que o material de cobertura colocado sobre o geotêxtil tem bastante influência na resistência das interfaces geotêxtil – geomembrana. No entanto, essa influência parece estar fortemente dependente da textura da geomembrana.

Quadro 1. 6 - Valores do ângulo de atrito e da coesão aparente na interface geotêxtil-geomembrana, de acordo com o material de cobertura (adaptado de Jones e Dixon, 1998)

GEOMEMBRANA	COBERTURA	SOLO A		SOLO B		SOLO C		BLOCO DE NYLON	
		Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)
LISA	750 PP	7,2	-2,4	7,5	0,3	8,4	-0,4	8,4	3,2
	1200 PP	5,3	1,6	8,1	0,9	7,7	-0,4	8,2	0,1
	800 PEAD	6,6	0,8	10,1	-0,8	8,6	-0,1	9,5	0
TEXTURADA POR IMPREGNAÇÃO	750 PP	28,5	22,9	23	2,5	25,6	26,2	22,2	3,9
	1200 PP	26,2	21,8	22,3	3,7	25,4	20,3	20,7	3,2
	800 PEAD	29,7	10,4	24,5	3,2	29,2	23,3	20,4	5,2
TEXTURADA POR EXTRUSÃO	750 PP	23,8	9,6	25,5	4,2	24,1	3,9	21,3	7,4
	1200 PP	27,4	5,3	26,4	3,2	23,9	2,8	22,1	5,8
	800 PEAD	31,6	-1,8	27,9	4,2	24,6	6,6	21	7,7

No caso das interfaces geotêxtil – geomembrana lisa, os autores verificaram que não existem diferenças significativas entre os ensaios realizados com cada um dos solos acima referidos, no que se refere ao comportamento tensão de corte / deslocamento. No entanto, é possível observar que a utilização do solo A, de partículas arredondadas, origina que os ângulos de atrito na interface sejam mais baixos do que quando se recorre a qualquer um dos outros materiais de cobertura.

No caso das interfaces geotêxtil – geomembrana texturada, a utilização da gravilha natural mal graduada (solo A) como material de cobertura conduziu ao aumento da resistência ao corte na interface para qualquer uma das quatro pressões de confinamento aplicadas (Quadro 1.6 e Figura 1.6, tendo presente a Figura 1.5b). Ainda em relação a este último tipo de interface, foi possível constatar que as tensões de corte para grandes deslocamentos são cerca de 65% inferiores às tensões de corte de pico, para cada um dos três solos analisados.

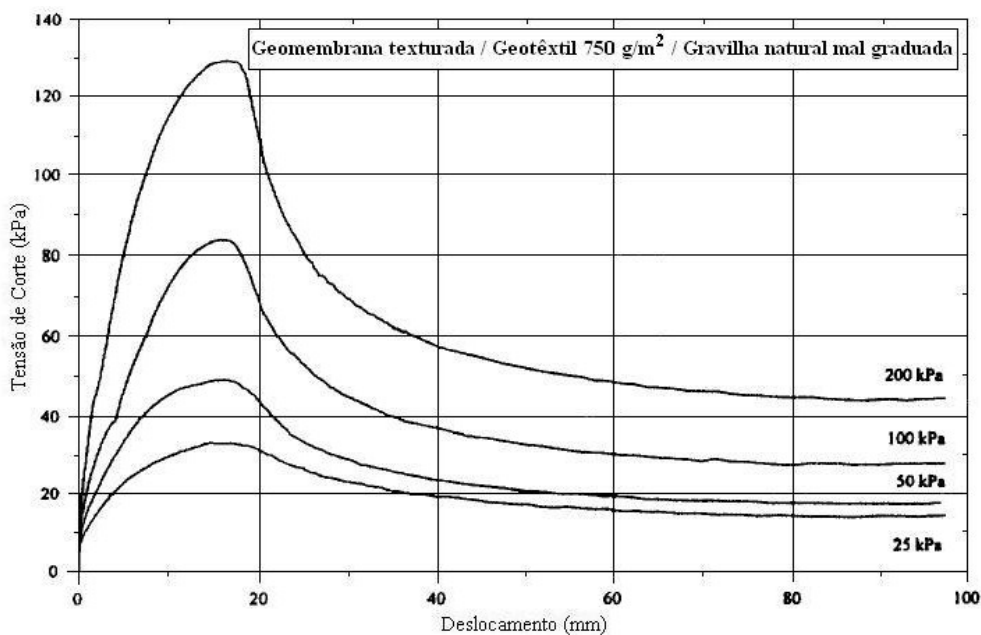


Figura 1. 6 – Tensão de corte / deslocamento na interface geomembrana texturada – geotêxtil utilizando uma gravilha natural mal graduada como material de cobertura (Jones e Dixon, 1998)

A utilização de um bloco de nylon sobre o geotêxtil permite obter informação sobre a resistência ao corte da interface geotêxtil – geomembrana que é independente do solo de cobertura utilizado (Jones e Dixon, 1998). A forma das curvas tensão de corte / deslocamento para a interface geomembrana lisa – geotêxtil em PP não é alterada pelo uso do bloco de nylon. As tensões de corte de pico são semelhantes às que se obtêm com as gravilhas britadas, isto é, superiores àquelas que se obtêm com a gravilha de partículas arredondadas.

No entanto, a forma das curvas tensão de corte / deslocamento para a interface geomembrana texturada – geotêxtil em PP é significativamente alterada pelo uso de um bloco de nylon como material de cobertura (comparar a Figura 1.7 com as Figuras 1.5b e 1.6).

Na Figura 1.7 pode observar-se que a tensão de corte aumenta proporcionalmente ao deslocamento até este atingir cerca de 4mm, sendo que para além deste valor se verifica uma forte alteração na forma da referida curva. Pensa-se que, durante esta mudança na relação tensão de corte / deslocamento, o efeito do estiramento do geotêxtil se torna um factor determinante para o comportamento da interface.

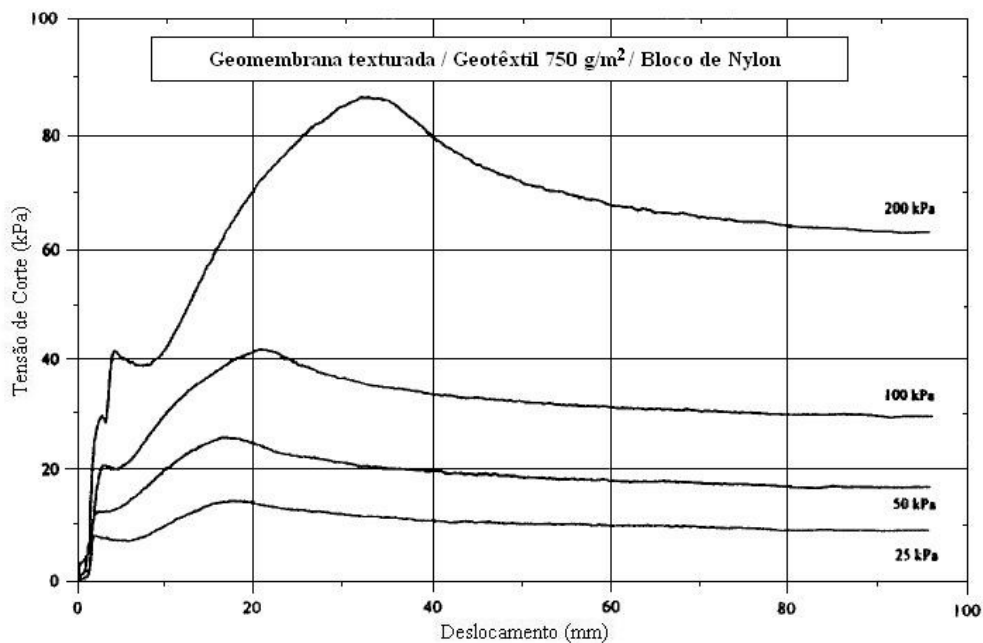


Figura 1.7 – Tensão de corte / deslocamento na interface geomembrana texturada – geotêxtil utilizando um bloco de nylon como material de cobertura (Jones e Dixon, 1998)

As tensões de corte de pico que são obtidas utilizando um bloco de nylon são então menores do que no caso em que se recorre a solos de cobertura, e estes picos ocorrem para deslocamentos muito superiores. Os autores reportam que o estiramento do geotêxtil foi claramente observado e medido ao desmontar o equipamento após cada ensaio, e acrescentam que o grau de alongamento aparenta ser proporcional às tensões de corte medidas.

Quanto às tensões de corte para grandes deslocamentos, pode verificar-se que os valores obtidos com o bloco de nylon são da mesma ordem dos obtidos com os solos de cobertura. Isto sugere que a resistência ao corte residual da interface é uma propriedade da geomembrana e do geotêxtil utilizado, sendo por isso independente do tipo de cobertura.

Para concluir, falta apenas procurar explicar as diferenças que se verificam em termos da influência do material de cobertura consoante a textura da geomembrana. No caso de uma interface entre um geotêxtil e uma geomembrana lisa, conclui-se que as partículas de solo mais finas (solo C) permitem

aumentar a área de contacto e, conseqüentemente, a resistência ao corte. De uma forma idêntica, quando se utiliza um bloco de nylon como material de cobertura, verifica-se um aumento na resistência ao corte da interface uma vez que o uso do bloco origina um aumento na área de contacto entre o geotêxtil e a geomembrana lisa.

Por outro lado, no caso da interface entre o geotêxtil e uma geomembrana texturada, o uso do bloco de nylon conduz a menores resistências ao corte do que o uso de solos de cobertura.

### 1.3.3.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA E DA MASSA POR UNIDADE DE ÁREA DOS GEOTÊXTEIS

Jones e Dixon (1998) estudaram a influência da espessura e da massa por unidade de área (m.u.a) dos geotêxteis na resistência da interface geotêxtil – geomembrana. Neste estudo foram utilizados dois geotêxteis não tecidos agulhados em PP, com massas por unidade de área de 750g/m<sup>2</sup> e 1200g/m<sup>2</sup>, e provenientes do mesmo fabricante. Enquanto que a espessura do geotêxtil de 750g/m<sup>2</sup> é de cerca de 5mm, a espessura do geotêxtil de 1200g/m<sup>2</sup> ronda os 7mm.

Foram ainda utilizadas as geomembranas lisas e rugosas em PEAD já descritas na secção 1.3.3.1., bem como os três tipos diferentes de gravilha e o bloco de nylon descritos na secção 1.3.3.2 e 1.3.3.1. Os resultados obtidos encontram-se descritos no Quadro 1.7.

Quadro 1. 7 - Valores do ângulo de atrito e da coesão aparente na interface geotêxtil-geomembrana, de acordo com a massa por unidade de área (MUA) e espessura dos geotêxteis (adaptado de Jones e Dixon, 1998)

GEOMEMBRANA	COBERTURA	SOLO A		SOLO B		SOLO C		BLOCO DE NYLON	
		Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)
LISA	750 PP	7,2	-2,4	7,5	0,3	8,4	-0,4	8,4	3,2
	1200 PP	5,3	1,6	8,1	0,9	7,7	-0,4	8,2	0,1
	Diferença	1,9	-4	-0,6	-0,6	0,7	0	0,2	3,1
TEXTURADA POR IMPREGNAÇÃO	750 PP	28,5	22,9	23	2,5	25,6	26,2	22,2	3,9
	1200 PP	26,2	21,8	22,3	3,7	25,4	20,3	20,7	3,2
	Diferença	2,3	1,1	0,7	-1,2	0,2	5,9	1,5	0,7
TEXTURADA POR EXTRUSÃO	750 PP	23,8	9,6	25,5	4,2	24,1	3,9	21,3	7,4
	1200 PP	27,4	5,3	26,4	3,2	23,9	2,8	22,1	5,8
	Diferença	-3,6	4,3	-0,9	1	0,2	1,1	-0,8	1,6

A resistência ao corte máxima varia de acordo com o tipo de geomembrana utilizada e de acordo com o tipo de cobertura mas, de um modo geral, e embora se deva reconhecer que as diferenças são bastante pequenas, são os geotêxteis mais finos e de menor massa por unidade de área (MUA) que conduzem às maiores resistências ao corte na interface.

O ângulo de atrito calculado para a interface que compreende o geotêxtil mais pesado e mais espesso foi, na maior parte dos casos, inferior em cerca de 1° - 2° ao calculado para o geotêxtil mais leve e mais fino. Este facto está provavelmente relacionado com a capacidade das partículas de solo para penetrarem o geotêxtil e assim poderem exercer a sua acção através deste. Assim sendo, um geotêxtil mais espesso e mais pesado, que resiste melhor à penetração das partículas de solo, não será capaz de mobilizar resistências ao corte tão elevadas na interface geotêxtil – geomembrana.

### 1.3.3.4 INFLUÊNCIA DO POLÍMERO CONSTITUINTE DOS GEOTÊXTEIS

Jones e Dixon (1998) estudaram a influência do polímero constituinte dos geotêxteis na resistência da interface geotêxtil – geomembrana. Neste estudo foram utilizados dois geotêxteis não tecidos

agulhados, um em PP (750g/m<sup>2</sup>) e outro em PEAD (800g/m<sup>2</sup>), três geomembranas em PEAD, uma lisa e duas rugosas (uma por impregnação e outra por extrusão), os três tipos de solo descritos na secção 1.3.3.2. (solos A, B e C) e o bloco de nylon a que também se fez referência na secção 1.3.3.2.

O comportamento da interface entre a geomembrana lisa e o geotêxtil em PEAD, em termos da relação deslocamento/tensão de corte, encontra-se representado no gráfico da Figura 1.8. A máxima resistência ao corte da interface é atingida para pequenos deslocamentos e é comparável à obtida com o geotêxtil de PP (ver Figura 1.5a), com excepção do valor obtido com uma pressão de confinamento de 200kPa. Neste caso, a resistência ao corte máxima é ligeiramente superior se o geotêxtil utilizado for aquele que é fabricado em PEAD.

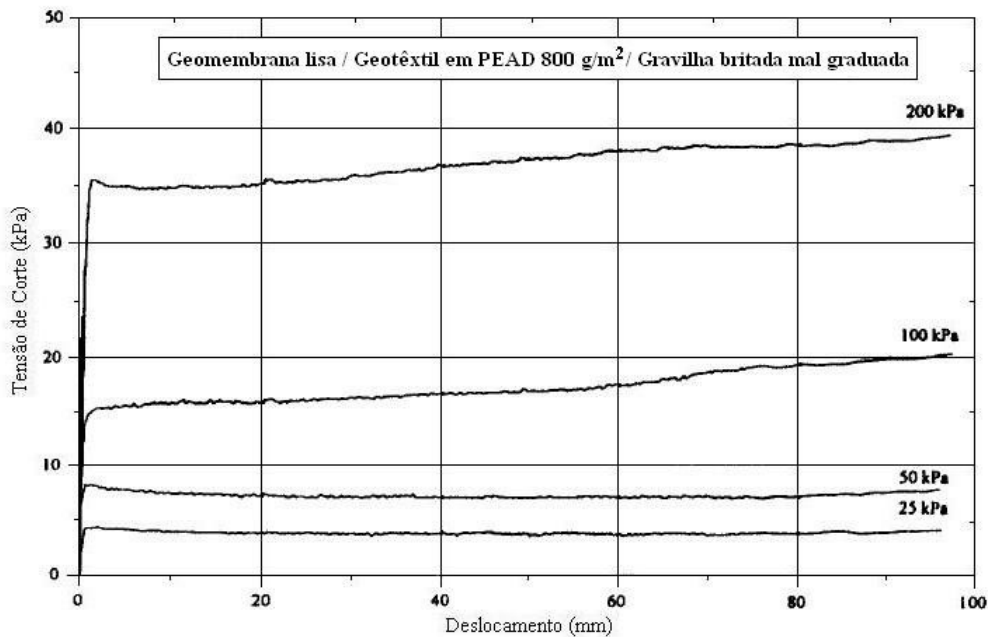


Figura 1. 8 – Tensão de corte / deslocamento na interface geomembrana lisa – geotêxtil em PEAD, utilizando uma gravilha britada mal graduada como material de cobertura (Jones e Dixon, 1998).

No entanto, o comportamento observado após o pico de resistência é bastante variável de acordo com o tipo de polímero constituinte do geotêxtil. Se este for constituído por fibras de PEAD, verifica-se uma pequena redução nas tensões de corte após o pico ou até algum aumento de resistência no caso de as tensões normais serem iguais ou superiores a 100kPa. Por outro lado, se as fibras constituintes do geotêxtil forem de PP, o comportamento da interface geotêxtil – geomembrana em termos da relação deslocamento / tensão de corte é substancialmente diferente (ver Figura 1.5a).

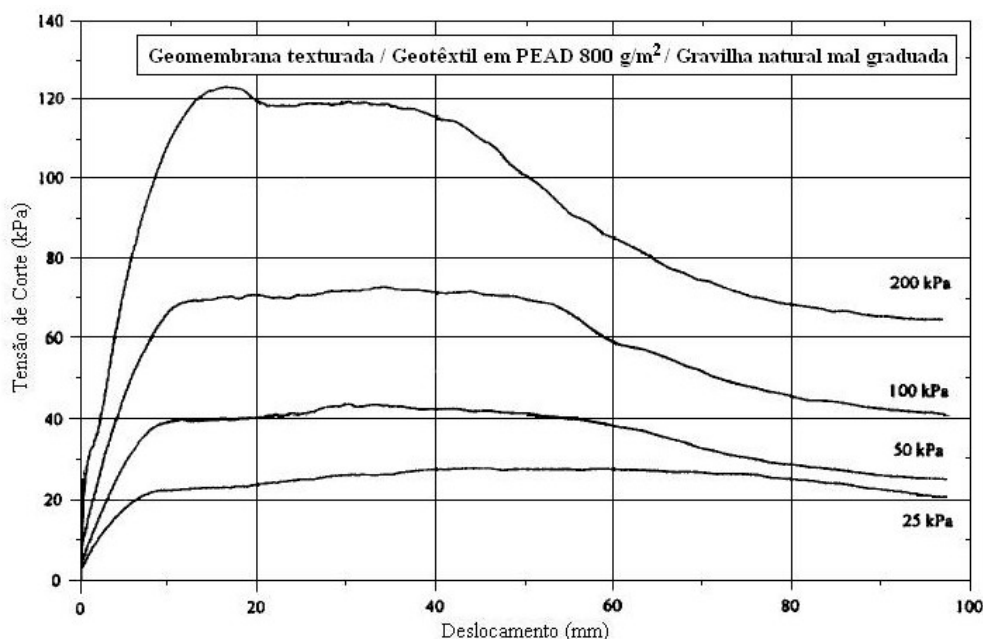


Figura 1.9 – Tensão de corte / deslocamento na interface geomembrana texturada – geotêxtil em PEAD, utilizando uma gravelha natural mal graduada como material de cobertura (Jones e Dixon, 1998).

Relativamente à interface entre uma geomembrana texturada e um geotêxtil em PEAD, pode afirmar-se que o seu comportamento em termos da relação deslocamento / tensão de corte é muito semelhante ao observado recorrendo a um geotêxtil em PP, quando o solo de cobertura utilizado é uma gravelha britada (ver Figura 1.5b). No entanto, quando se utiliza uma gravelha natural, o comportamento desta interface é vincadamente distinto, como se pode ver na Figura 1.9 e tendo presente a Figura 1.6.

Neste caso, o pico de tensão de corte é bastante plano, havendo uma larga gama de deslocamentos para a qual a tensão de corte se mantém praticamente constante. Este tipo de comportamento pode ser devido ao alongamento do geotêxtil em PEAD ou, por outras palavras, ao movimento relativo que ocorre não só na interface solo – geotêxtil como também na interface geomembrana – geotêxtil.

Quadro 1.8 – Valores do ângulo de atrito e da coesão aparente na interface geotêxtil-geomembrana, de acordo com o polímero constituinte dos geotêxteis (adaptado de Jones e Dixon, 1998)

GEOMEMBRANA	COBERTURA	SOLO A		SOLO B		SOLO C		BLOCO DE NYLON	
		Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão aparente (kPa)
LISA	750 PP	7,2	-2,4	7,5	0,3	8,4	-0,4	8,4	3,2
	800 PEAD	6,6	0,8	10,1	-0,8	8,6	-0,1	9,5	0,0
	Diferença	0,6	-3,2	-2,6	1,1	-0,2	-0,3	-1,1	3,2
TEXTURADA POR IMPREGNAÇÃO	750 PP	28,5	22,9	23	2,5	25,6	26,2	22,2	3,9
	800 PEAD	29,7	10,4	24,5	3,2	29,2	23,3	20,4	5,2
	Diferença	-1,2	12,5	-1,5	-0,7	-3,6	2,9	1,8	-1,3
TEXTURADA POR EXTRUSÃO	750 PP	23,8	9,6	25,5	4,2	24,1	3,9	21,3	7,4
	800 PEAD	31,6	-1,8	27,9	4,2	24,6	6,6	21,0	7,7
	Diferença	-7,8	11,4	-2,4	0,0	-0,5	-2,7	0,3	-0,3

O Quadro 1.8 apresenta os resultados obtidos. Como se pode ver, no caso dos solos britados (solos B e C), a utilização do geotêxtil em PEAD origina sempre um aumento do ângulo de atrito na interface. No caso do solo natural (solo A), esta tendência mantém-se se as geomembranas utilizadas forem texturadas, acontecendo o inverso se estas forem lisas. Pelo contrário, caso se utilize um bloco de

nylon como cobertura, verifica-se que o emprego de um geotêxtil em PEAD aumenta o ângulo de atrito na interface com uma geomembrana lisa mas leva à sua diminuição se a membrana for texturada.

### 1.3.3.5 INFLUÊNCIA DO POLÍMERO CONSTITUINTE DAS GEOMEMBRANAS

#### Estudos de Jones e Dixon (1998)

Jones e Dixon (1998) testaram ainda a interface entre uma geomembrana lisa de PP e um geotêxtil de 1200 g/m<sup>2</sup> constituído pelo mesmo polímero, recorrendo a uma gravilha britada fina, com areia e bem graduada como solo de cobertura (solo C da secção 1.3.3.3.).

Estes autores reportam que a forma das curvas tensão de corte/deslocamento não evidencia a ocorrência de amolecimento após o pico, tal como acontece no caso em que se utiliza uma geomembrana em PEAD. Estas curvas, que se encontram representadas na Figura 1.10, permitem observar que logo após o rápido aumento inicial das tensões de corte, ocorre uma ligeira quebra no valor destas tensões que, por sua vez, antecede o aumento gradual até aos valores de pico. Note-se, no entanto, que este aumento gradual não se verifica para a tensão normal de 25kPa.

Perante os resultados obtidos (entre outros resultados apresentados por Jones e Dixon (1998)), é ainda possível verificar que as resistências ao corte mobilizadas durante o pico inicial são superiores àquelas observadas quando se utilizam geomembranas em PEAD. No caso das tensões de corte mobilizadas para grandes deslocamentos, constata-se que esta diferença é ainda mais acentuada, obtendo-se resistências muito superiores com a utilização de geomembranas em PP.

Por fim, os autores afirmam que o uso de diferentes tipos de solo de cobertura tem muito pouca influência na resistência ao corte da interface geotêxtil – geomembrana em PP, contrariamente ao que sucede se forem utilizadas geomembranas em PEAD. Neste último caso, o uso de um solo de cobertura com partículas mais angulosas aumenta a resistência ao corte da interface geotêxtil – geomembrana em PEAD.

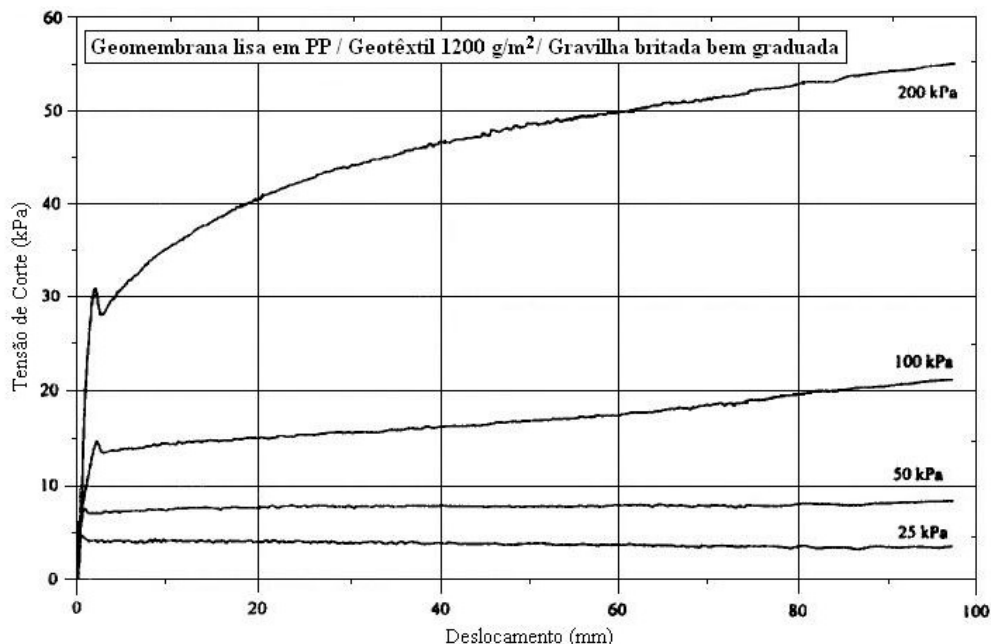


Figura 1. 10 - Tensão de corte / deslocamento na interface geomembrana lisa em PP – geotêxtil, utilizando uma gravilha britada bem graduada como material de cobertura (Jones e Dixon, 1998)

Estudos de Wasti e Özdüzgün (2001)

Wasti e Özdüzgün (2001) estudaram a influência do polímero constituinte da geomembrana na resistência da interface geotêxtil – geomembrana com base em ensaios de corte directo e de corte em plano inclinado.

Para tal, utilizaram dois tipos de geotêxtil não tecido agulhado de 500g/m<sup>2</sup>, um deles em PET com espessura de 4,1mm (GT-A) e o outro em PE com espessura de 3,4mm (GT-B). Utilizaram ainda uma geomembrana em PVC com 1,2mm de espessura e uma densidade relativa de 1,34, bem como dois tipos de geomembrana lisa em PEAD (GM-A e GM-B). As características detalhadas dos geossintéticos usados estão descritas em Wasti e Özdüzgün (2001). Os resultados obtidos por estes autores são apresentados no Quadro 1.9.

Quadro 1. 9 – Valores da adesão e ângulo de atrito na interface geotêxtil-geomembrana, de acordo com o polímero constituinte da geomembrana (adaptado de Wasti e Özdüzgün, 2001)

TIPO DE ENSAIO	GEOTÊXTIL	GEOMEMBRANAS LISAS EM PVC			GEOMEMBRANAS LISAS EM PEAD			DIFERENÇA	
		Tipo	a (kPa)	$\delta$ (°)	Tipo	a (kPa)	$\delta$ (°)	$\Delta a$ (kPa)	$\Delta\delta$ (°)
Corte em plano inclinado (60mm x 60mm)	A	PVC	1,08	18,32	A	0,38	11,59	0,7	6,7
					B	0,97	10,32	0,1	8,0
	B	PVC	1,20	18,75	A	1,32	12,96	-0,1	5,8
					B	0,92	12,41	0,3	6,3
Corte directo (60mm x 60mm)	A	PVC	1,00	24,15	A	0,72	12,30	0,3	11,9
					B	1,61	13,43	-0,6	10,7
	B	PVC	2,04	25,52	A	1,27	13,85	0,8	11,7
					B	2,22	14,19	-0,2	11,3

A Figura 1.11 ilustra o incremento de resistência ao corte na interface que se obtém com a utilização de geomembranas em PVC.

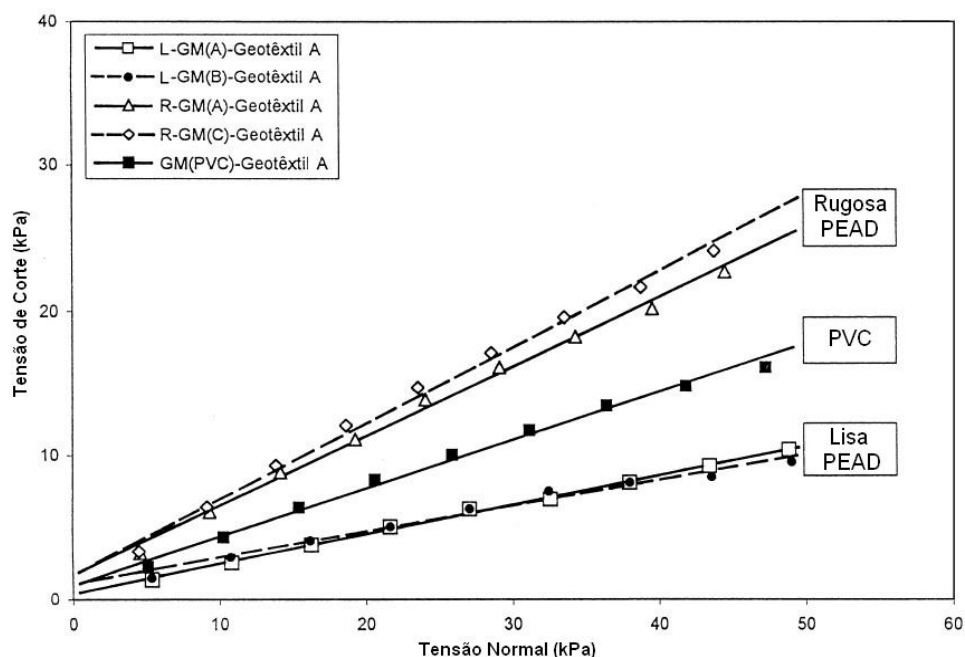


Figura 1. 11 – Resultados de ensaios de corte em plano inclinado de 60mm x 60mm, em interfaces geotêxtil – geomembrana (Wasti e Özdüzgün, 2001).

Verifica-se que a utilização de uma geomembrana em PVC em vez de uma em PEAD aumenta significativamente a resistência da interface geotêxtil – geomembrana. Em ensaios de corte em plano inclinado, esse aumento traduz-se por ângulos de atrito na interface superiores em cerca de  $6^\circ$  para o geotêxtil B e em cerca de  $7^\circ$  para o geotêxtil A. Em ensaios de corte directo, as diferenças obtidas são mais significativas, sendo possível identificar aumentos do ângulo de atrito na interface de cerca de  $11^\circ$ .

Fica no entanto claro, por análise da figura, que a influência do polímero constituinte da geomembrana nos parâmetros de resistência ao corte, apesar de ser significativa, não assume a importância da influência da textura da geomembrana.

#### Estudos de Briançon (2001)

Utilizando três tipos de geomembranas lisas (betuminosas, em PEAD ou em PP) e dois tipos de geotêxteis não tecidos agulhados em PP (GTXP com função de protecção e GTXR com função de reforço) cujas características detalhadas são apresentadas em Briançon (2001), o autor estudou a influência da natureza da geomembrana na resistência ao corte da interface geotêxtil – geomembrana, através de ensaios de corte em plano inclinado. Na Figura 1.12 são ilustrados os resultados obtidos por Briançon (2001).

Da figura, pode concluir-se que a utilização de uma geomembrana betuminosa permite aumentar o ângulo de atrito na interface geotêxtil – geomembrana, em comparação com o que sucede com as geomembranas em PEAD e em PP. Embora não se verifiquem diferenças acentuadas entre estes dois últimos tipos de geomembrana, é de referir que os resultados de Briançon (2001) não contradizem os resultados de Jones e Dixon (1998), segundo os quais a utilização de uma geomembrana em PP conduz à obtenção de ângulos de atrito superiores.

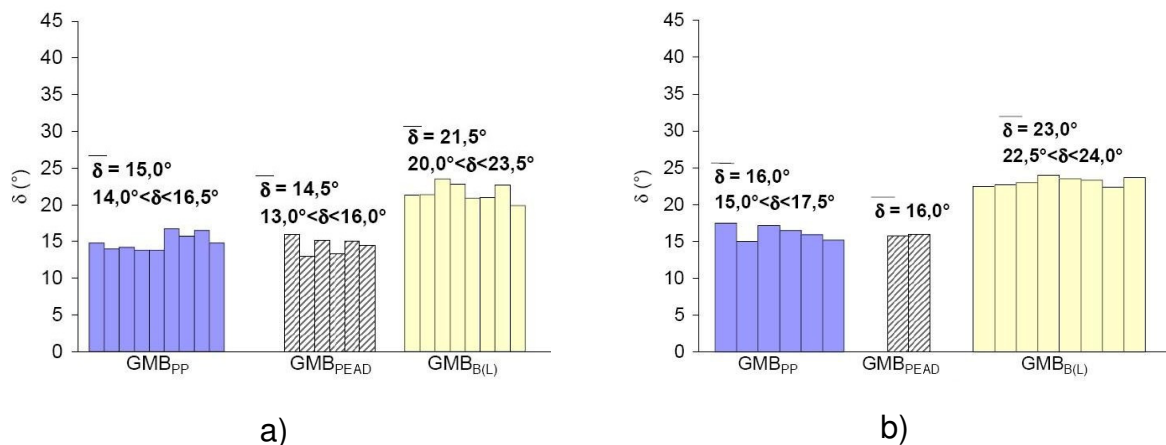


Figura 1. 12 – Influência da natureza da geomembrana na resistência ao corte da interface geotêxtil – geomembrana: a) ensaios com GTXP; b) ensaios com GTXR (adaptado de Briançon, 2001).

### 1.3.3.6 INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE ÁGUA NA INTERFACE

Briançon *et al.* (2002), através de ensaios de corte em plano inclinado, estudaram a influência que a presença de água na interface geotêxtil – geomembrana exerce sobre a resistência ao corte dessa mesma interface. Os autores usaram três tipos de geomembranas lisas (betuminosas, em PEAD e em PP) e três tipos de geotêxteis não tecidos agulhados em PP (GTXP com função de protecção, GTXR com função de reforço e GTXS com função de separação). As características detalhadas dos referidos geossintéticos são apresentadas em Briançon *et al.* (2002).

Os autores realizaram uma série de ensaios de corte em plano inclinado de dois tipos diferentes. No primeiro tipo de ensaios (Teste F) foi medida a força  $F$  necessária para impedir o movimento da caixa superior do equipamento de ensaio de corte em plano inclinado, caixa esta que contém o solo de cobertura do sistema composto de geossintéticos e à qual está fixado o geotêxtil. Por seu lado, nos ensaios do segundo tipo (Teste D2) foi medido o deslocamento dessa mesma caixa.

Foram ainda realizados ensaios em três condições de humidade distintas. Numa primeira fase, foram testadas as diferentes interfaces em condições secas. Posteriormente, essas mesmas interfaces foram ensaiadas na presença de água, inicialmente apenas com um pequeno fluxo ao nível dos geossintéticos (Figura 1.13 a) e em seguida com uma parcela do solo de cobertura saturada (Figura 1.13 b).

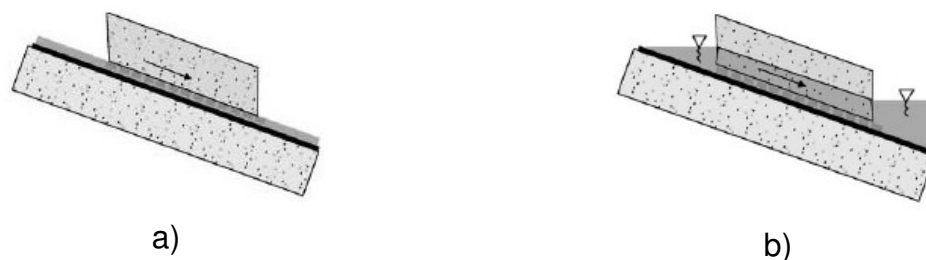


Figura 1. 13 – Diferentes condições hidráulicas ensaiadas por Briançon *et al.* (2002): a) pequeno fluxo ao nível dos geossintéticos; b) parcela de solo de cobertura saturada (Briançon *et al.*, 2002).

Na Figura 1.14 estabelece-se a comparação entre os ângulos de atrito na interface geotêxtil – geomembrana obtidos em condições secas e aqueles obtidos nas condições ilustradas na Figura 1.13a).

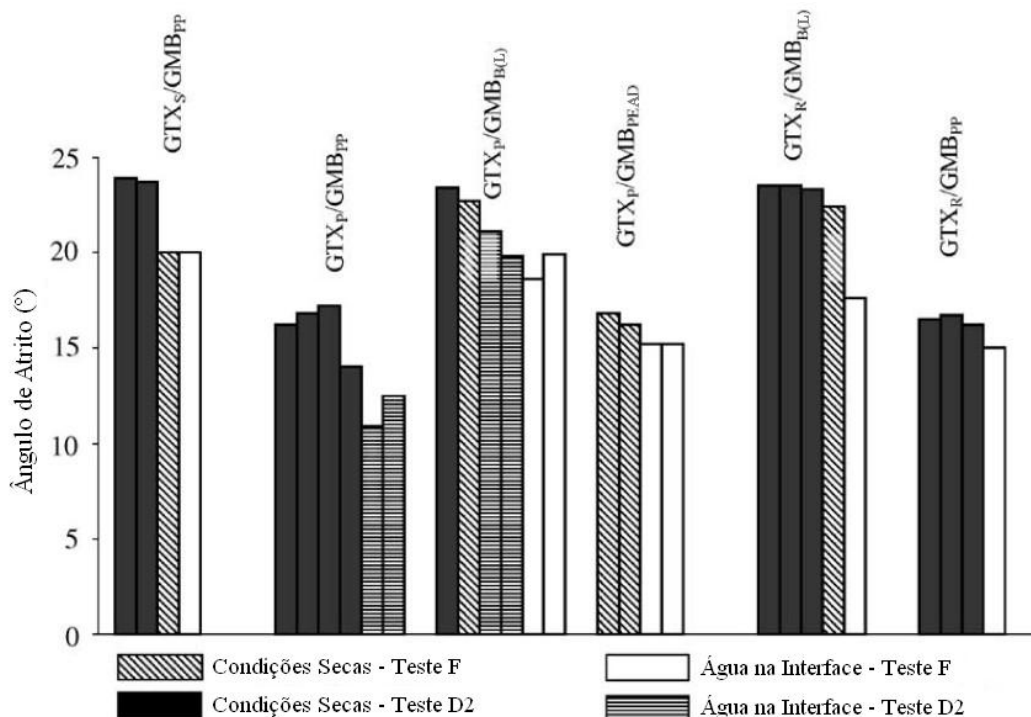


Figura 1. 14 – Influência que a presença de água na interface exerce sobre o ângulo de atrito de diferentes interfaces entre geossintéticos (Briançon *et al.*, 2002).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 1.14, verifica-se que a presença de água ao nível da interface geotêxtil – geomembrana conduz, globalmente, à diminuição da força de atrito medida, embora a sua influência seja variável de acordo com o tipo de interface. Supondo que o movimento da água não gera pressões na interface (baixo fluxo de água), é possível medir o ângulo para o qual ocorre o deslizamento da caixa superior e posteriormente calcular o ângulo de atrito na interface em presença de água,  $\delta H$ .

Para todas as interfaces testadas, este ângulo de atrito,  $\delta H$ , é inferior ao calculado em condições secas. A diferença  $\Delta\delta$  entre estes dois ângulos de atrito ( $\Delta\delta = \delta - \delta H$ ), permite quantificar a sensibilidade de uma determinada interface a um baixo fluxo de água que a humedece sem, no entanto, criar pressões hidráulicas.

Os resultados deste estudo evidenciam que algumas das interfaces ensaiadas não são particularmente sensíveis à água, como é o caso das interfaces GTXR / GMBPP e GTXP / GMBPEAD, que apresentam, respectivamente,  $\Delta\delta = 1,5^\circ$  e  $\Delta\delta = 1,3^\circ$ . Por outro lado, em condições secas, a interface GTXR / GMBB(L) apresenta um ângulo de atrito  $5^\circ$  superior ao que acontece em condições húmidas, enquanto que na interface GTXP / GMBPP essa diferença é de  $4,3^\circ$ .

Focando agora a atenção nos ensaios do tipo F, onde se mede a força, F, necessária para segurar a caixa superior, verifica-se que é possível tirar algumas conclusões que não são evidenciadas nos ensaios do tipo D2.

O ensaio do tipo F desenvolve-se em três fases distintas: inclinação gradual do plano, em condições secas; criação de um fluxo de água mínimo ao nível da interface entre os geossintéticos; criação de um fluxo de água mínimo ao nível do solo, de forma a garantir uma altura de solo saturado, esat, constante.

Na Figura 1.15 apresenta-se o resultado obtido com o ensaio do tipo F para a interface entre uma geomembrana betuminosa lisa (GMBB(L)) e um geotêxtil de reforço (GTXR). O sistema compósito de geossintéticos usado neste ensaio foi coberto por uma camada de solo de 0,3m de espessura.

Analisando a Figura 1.15, conclui-se que a presença de água aumenta significativamente a força necessária para segurar a caixa superior do equipamento de ensaio de corte em plano inclinado, mantendo-se a inclinação constante. Baseando-se nestes resultados, Briançon *et al.* (2002) demonstraram ainda que o aumento de peso do solo devido à sua saturação é insuficiente para explicar a redução nas forças resistentes ao deslizamento, redução esta que se expressa precisamente através do aumento da força requerida para segurar a referida caixa superior. Assim sendo, os autores afirmam que a redução das forças resistentes ao deslizamento se deve, principalmente, ao desenvolvimento de pressões de água ao nível da interface geotêxtil – geomembrana.

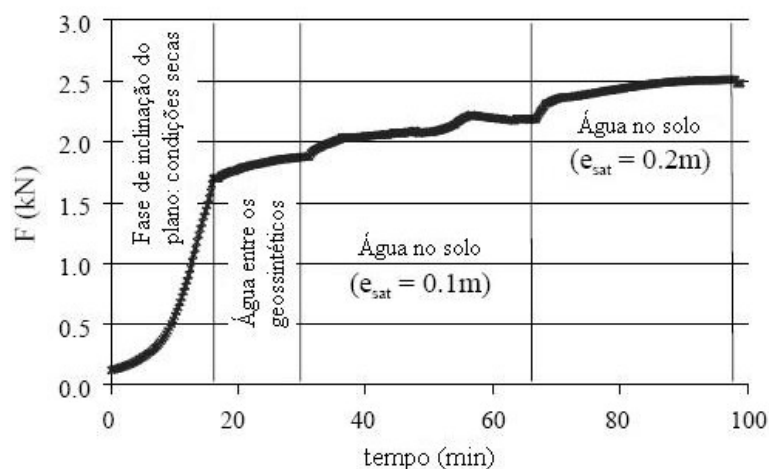


Figura 1. 15 – Resultado de um ensaio de corte em plano inclinado do tipo F, com condições hidráulicas variáveis ao longo do tempo (Briançon *et al.*, 2002).

Briançon *et al.* (2002) apresentam ainda os resultados de alguns cálculos que efectuaram e com os quais pretendem determinar o coeficiente de segurança FS e a tensão T (para FS = 1,3) desenvolvida no geotêxtil que deve ser tida em consideração na crista de um talude coberto por um sistema geomembrana – geotêxtil, para garantir a sua estabilidade.

Através de dois métodos de cálculo diferentes descritos em Briançon *et al.* (2002), mais precisamente o método dos dois blocos e o método do talude infinito, e considerando um ângulo de atrito na interface seca,  $\delta$ , igual a  $20^\circ$  e superior em  $2^\circ$  ao ângulo de atrito na interface húmida,  $\delta$  igual a  $18^\circ$ ,  $\delta H$ , os autores reportam os seguintes resultados:

- o decréscimo de  $2^\circ$  no ângulo de atrito correspondente à consideração de humidade na interface conduz a um acréscimo de 8% (0,2m de espessura saturada de solo) e de 12% (0,1m de espessura saturada de solo) na tensão desenvolvida no geotêxtil;
- para um ângulo de atrito na interface  $\delta$  igual a  $18^\circ$ , a existência de uma espessura saturada de solo igual a 1/3 da espessura total de solo conduz a um acréscimo de 58% da tensão no geotêxtil, em comparação com a situação de inexistência de água; no caso da espessura saturada ser de 2/3 da espessura de solo, esse acréscimo ascende aos 98%;
- olhando para os resultados dos ensaios de corte em plano inclinado, e comparando-os com os obtidos numericamente, verifica-se que os acréscimos referidos no ponto anterior baixam para 50% ( $e_{sat} = 1/3$  e) e 83% ( $e_{sat} = 2/3$  e).

Para concluir esta análise sobre a influência da água na resistência ao corte de interfaces geotêxtil – geomembrana, e de acordo com Briançon *et al.* (2002), pode afirmar-se que o efeito da água se faz sentir de três formas distintas:

- um efeito directo no ângulo de atrito a interface - um decréscimo que varia de acordo com o tipo específico de interface;
- um efeito no peso do solo de cobertura;
- um efeito nas forças de atrito (um decréscimo – devido às pressões de água na interface).

Pelo exposto, os autores concluem que a influência da água na estabilidade ao corte de sistemas compósitos de geossintéticos é bastante elevada. Assim sendo, é altamente recomendável que seja considerada no dimensionamento deste tipo de sistemas, devendo ainda existir um adequado sistema de drenagem que reduza as pressões de água na interface no caso de serem utilizadas geomembranas.

#### 1.3.4 CORTE DIRECTO / CORTE EM PLANO INCLINADO

Os ensaios laboratoriais mais utilizados para quantificar a resistência ao corte de interfaces entre diferentes geossintéticos têm sido os ensaios de corte em plano inclinado e os ensaios de corte directo.

No caso das interfaces solo – geossintético, parece existir um consenso sobre o facto de o ensaio de corte em plano inclinado ser mais adequado ao estudo de problemas envolvendo a colocação de geossintéticos na superfície de taludes, sob baixas tensões de confinamento. Vários autores, de entre os quais se destacam Izgin e Wasti (1998), afirmam que, para além de o mecanismo de rotura do ensaio de corte em plano inclinado ser mais próximo do que ocorre na realidade em sistemas de revestimento de taludes, o ensaio de corte directo fornece resultados não conservativos para a resistência ao corte de interfaces sujeitas a baixas pressões de confinamento, sobrestimando principalmente a adesão na interface.

No entanto, no caso da avaliação da resistência ao corte das interfaces geossintético – geossintético, subsistem ainda dúvidas quanto à influência do tipo de ensaio. Apesar de autores como Wasti e Özdüzgün (2001) e Palmeira *et al.* (2002) defenderem que, em interfaces geotêxtil – geomembrana, a influência do tipo de ensaio se faz sentir de forma idêntica ao que ocorre em interfaces solo – geossintético, Reyes Ramirez e Gourc (2003) reportam ângulos de atrito na interface geotêxtil – georrede obtidos em ensaios de corte directo inferiores aos obtidos com o plano inclinado.

Esta divergência de resultados sugere então a necessidade de investigações futuras nesta área. No âmbito deste trabalho, faz-se de seguida uma breve abordagem aos estudos de Wasti e Özdüzgün (2001) e de Reyes Ramirez e Gourc (2003), com vista a ilustrar com maior precisão as diferenças que acabam de ser referidas.

##### 1.3.4.1 ESTUDOS DE WASTI E ÖZDÜZGÜN (2001)

Wasti e Özdüzgün (2001) estudaram a influência da metodologia de ensaio na determinação da resistência ao corte da interface geotêxtil – geomembrana. Para isso, recorreram a ensaios de corte directo e de corte em plano inclinado, tendo ainda testado diferentes áreas de contacto entre os geossintéticos. Estes autores utilizaram três tipos de geomembrana em PEAD (GM-A, GM-B, GM-C) e dois tipos de geotêxtil não tecido agulhado de 500g/m<sup>2</sup>, um deles fabricado em PET com espessura de 4,1mm (GT-A) e o outro em PE com espessura de 3,4mm (GT-B). As características detalhadas dos geossintéticos usados estão descritas em Wasti e Özdüzgün (2001) e os resultados obtidos são os que se apresentam no Quadro 1.10.

Para além dos resultados, o Quadro 1.10 ilustra também, directamente, as diferenças entre os resultados obtidos com os ensaios de corte directo e de corte em plano inclinado, para áreas de interface iguais. Tanto os valores da adesão como os valores do ângulo de atrito são quase sempre superiores para os ensaios de corte directo, sendo que a grandeza desta diferença é bastante variável.

Baseando a análise nos ensaios realizados com uma área de contacto de 60mm × 60mm, pode constatar-se que, utilizando uma geomembrana lisa em PEAD, os dois tipos de ensaio fornecem resultados comparáveis, sendo os valores da adesão e ângulo de atrito obtidos por corte directo apenas ligeiramente superiores. No entanto, para a interface geotêxtil – geomembrana rugosa em PEAD, os valores da adesão obtidos por corte directo são muito superiores, embora os valores do ângulo de atrito sejam semelhantes.

Quadro 1. 10 - Valores da adesão e ângulo de atrito na interface geotêxtil-geomembrana, de acordo com o tipo de ensaio (adaptado de Wasti e Özdüzgün, 2001)

TIPO DE GEOMEMBRANA	TIPO DE GEOTÊXTIL	CORTE DIRECTO				CORTE EM PLANO INCLINADO				DIFERENÇA			
		60mm x 60mm		300mm x 300mm		60mm x 60mm		300mm x 300mm		60mm x 60mm		300mm x 300mm	
		a (kPa)	δ (°)	a (kPa)	δ (°)	a (kPa)	δ (°)	a (kPa)	δ (°)	Δa (kPa)	Δδ (°)	Δa (kPa)	Δδ (°)
LISA (A)	A	0,72	12,30	3,34	12,28	0,38	11,59	0,29	12,41	0,3	0,7	3,1	-0,1
	B	1,27	13,85	-	-	1,32	12,96	-	-	-0,1	0,9	-	-
LISA (B)	A	1,61	13,43	-	-	0,97	10,32	-	-	0,6	3,1	-	-
	B	2,22	14,19	-	-	0,92	12,41	-	-	1,3	1,8	-	-
TEXTURADA (A)	A	15,83	28,10	30,00	27,00	0,72	25,58	1,29	26,92	15,1	2,5	28,7	0,1
	B	13,06	28,11	-	-	1,66	25,95	-	-	11,4	2,2	-	-
TEXTURADA (C)	A	19,75	29,55	-	-	1,82	27,56	-	-	17,9	2,0	-	-
	B	12,70	30,34	-	-	2,74	27,90	-	-	10,0	2,4	-	-
PVC	A	1,00	24,15	-	-	1,08	18,32	-	-	-0,1	5,8	-	-
	B	2,04	25,52	-	-	1,20	18,75	-	-	0,8	6,8	-	-

Assim sendo, a envolvente de rotura dos ensaios de corte directo fica colocada acima da correspondente aos ensaios de corte em plano inclinado, tal como se ilustra na Figura 1.16 para a interface de 60mm × 60mm entre a geomembrana A e o geotêxtil A. Nesta figura, os pontos obtidos experimentalmente não se encontram identificados e foram extrapoladas envolventes de rotura lineares para além das tensões normais ensaiadas, para possibilitar a comparação entre os dois tipos de ensaio.

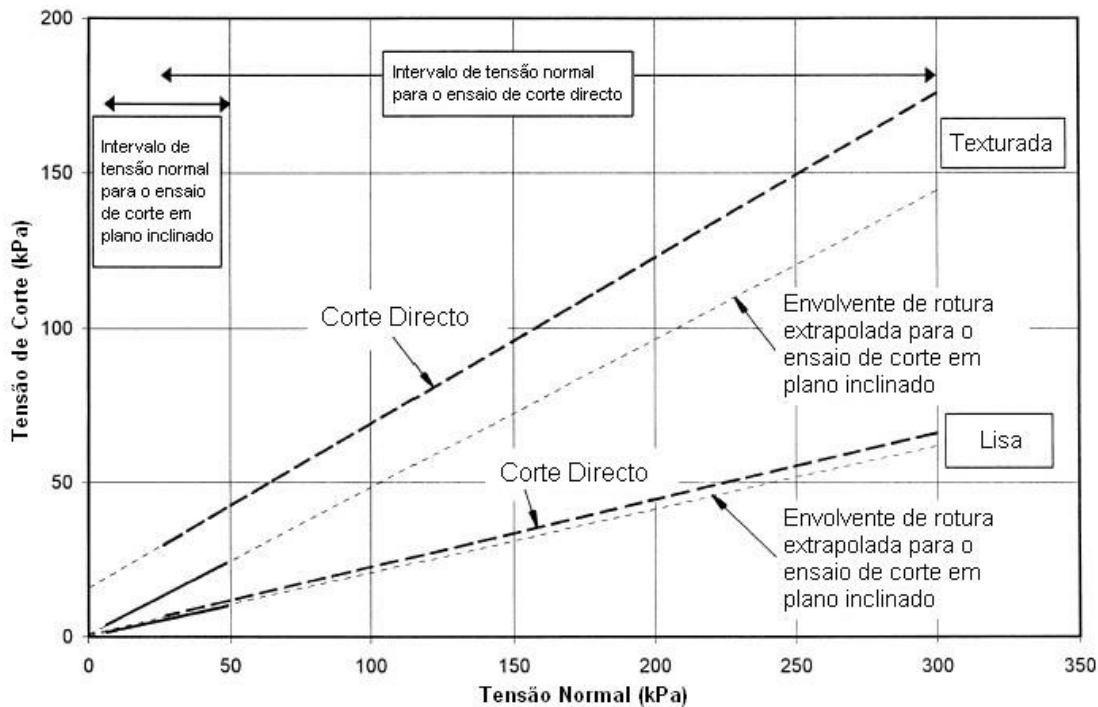


Figura 1. 16 – Comparação entre os resultados obtidos com o ensaio de corte directo e com o ensaio de corte em plano inclinado, em interfaces geotêxtil A – geomembrana A de 60mm x 60mm (Wasti e Özdüzgün, 2001).

Wasti e Özdüzgün (2001) estudaram ainda o efeito nos resultados da tensão normal aplicada na interface. Os intervalos de tensões normais que é possível aplicar em ensaios de corte directo e em ensaios de corte em plano inclinado não são os mesmos, intersectando-se apenas parcialmente.

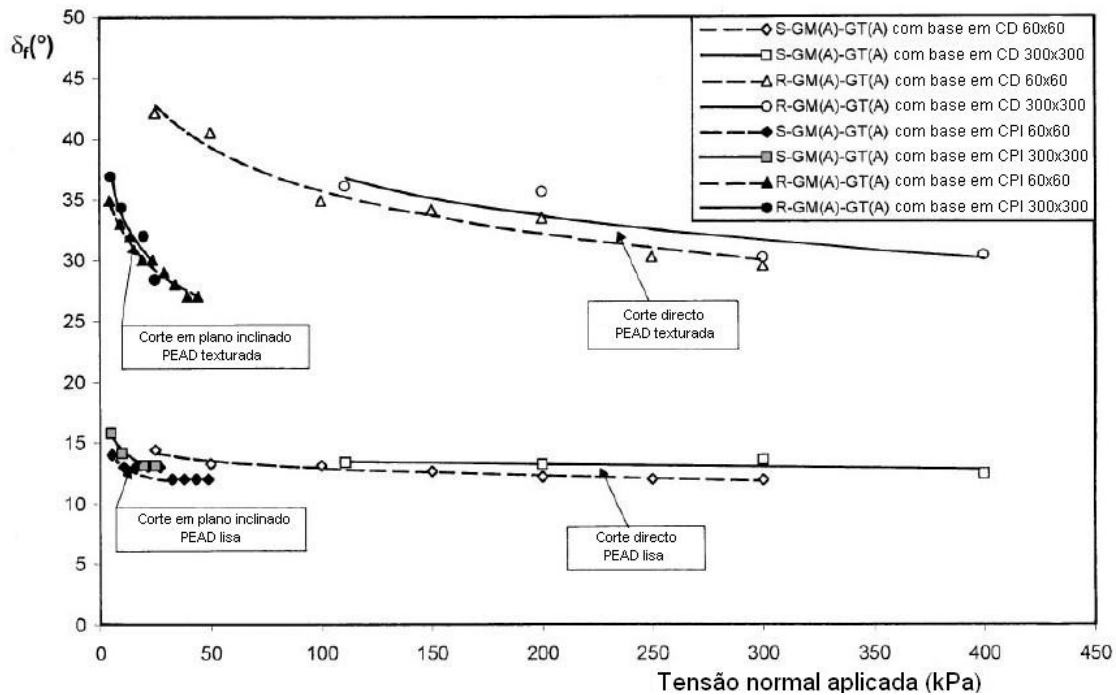
Os parâmetros de resistência ao corte da interface (adesão e ângulo de atrito) foram obtidos por regressão linear através das tensões normais e tangenciais actuantes na interface no instante da rotura. No entanto, observa-se que as envolventes de rotura não são perfeitamente lineares, exibindo curvatura para baixas tensões normais e para geomembranas rugosas, sugerindo dependência entre a resistência ao corte da interface e a tensão normal. Na Figura 1.17 ilustra-se o efeito da tensão normal na resistência das interfaces indicadas.

A Figura 1.17 evidencia que o efeito da magnitude da tensão normal no ângulo de atrito da interface,  $\delta f$ , é mais pronunciado no caso da geomembrana texturada. Para a interface geomembrana rugosa (R-GM(A)) – geotêxtil (GT(A)), verifica-se que  $\delta f$  baixa cerca de  $12^\circ$  e  $7^\circ$ , respectivamente, quando a tensão normal aumenta de 25kPa para 300kPa e de 110kPa para 400kPa em ensaios de corte directo. Constata-se ainda que o decréscimo de  $\delta f$  é mais significativo para as tensões normais mais baixas, isto é, inferiores a 100kPa.

No caso dos ensaios de corte em plano inclinado, para a mesma interface referida no anteriormente, a diminuição de  $\delta f$  foi de cerca de  $10^\circ$ , resultante de um aumento de tensão normal de 5,5kPa para 50 kPa. Por fim, refira-se ainda que no caso das geomembranas lisas em PEAD, e para ambos os tipos de ensaio, a diminuição de  $\delta f$  atingiu no máximo  $2^\circ$  -  $3^\circ$ .

Ainda com base na Figura 1.17, Wasti e Özdüzgün (2001) compararam os valores do ângulo de atrito na interface obtidos através das duas metodologias de ensaio, para tensões normais entre 25kPa e 50 kPa, sob as quais ambos os ensaios podem ser conduzidos. Para a interface geomembrana rugosa – geotêxtil, os valores obtidos em ensaios de corte directo são cerca de  $13^\circ$  superiores aos obtidos em

ensaios de corte em plano inclinado, enquanto que no caso das geomembranas lisas esta diferença ascende a poucos graus.



### 1.3.4.2 ESTUDOS DE REYES RAMIREZ E GOURC (2003)

Reyes Ramirez e Gourc (2003) estudaram a influência da metodologia de ensaio na determinação da resistência ao corte da interface geotêxtil – georrede. Para isso, recorreram a ensaios de corte directo e de corte em plano inclinado. As características detalhadas do geotêxtil e da georrede encontram-se descritas em Reyes Ramirez e Gourc (2003). Estes autores obtiveram os resultados que se apresentam na Figura 1.18.

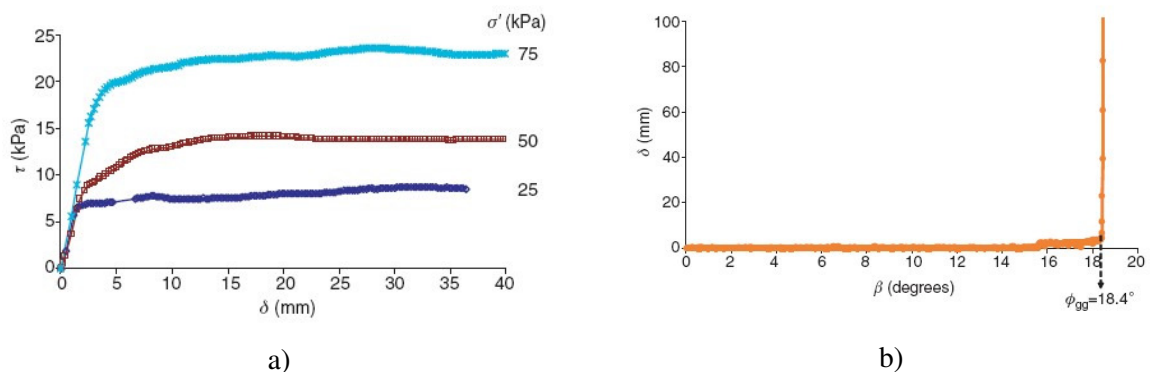


Figura 1. 18 – Caracterização da resistência ao corte da interface geotêxtil – georrede: a) através de ensaios de corte directo; b) através de ensaios de corte em plano inclinado, para uma tensão normal  $\sigma'0 = 5,7\text{kPa}$  (Reyes Ramirez e Gourc, 2003).

Os ensaios de corte directo (Figura 1.18a), com uma razão de deslocamento de  $d\delta/dt = 1\text{mm/min}$  e três níveis de tensão normal ( $\sigma' = 25, 50$  e  $75\text{kPa}$ ) conduziram a um ângulo de atrito na interface  $\phi_{gg} = 16,8^\circ$ . Note-se que não se observa qualquer pico de resistência para esta interface em particular.

No caso do ensaio de corte em plano inclinado (Figura 1.18b), realizado com a tensão normal inicial  $\sigma'_0 = 5,7\text{kPa}$  e com uma razão de inclinação de  $d\beta/dt = 3^\circ/\text{min}$ , verifica-se que a cedência se dá para a inclinação  $\beta = 18,4^\circ$ , ou seja, o ângulo de atrito na interface obtido com este tipo de ensaio é de  $\phi_{gg} = 18,4^\circ$ .

Esta diminuição do ângulo de atrito no ensaio de corte directo, em comparação com o ensaio de corte em plano inclinado, pode ser atribuída ao aumento na tensão normal na interface. Sob determinadas condições de ensaio, pode mesmo considerar-se que os valores do ângulo de atrito obtidos pelos dois ensaios são até compatíveis.

Há no entanto dois aspectos que importa realçar. O primeiro prende-se com o facto de a cinemática do ensaio de corte em plano inclinado ser completamente distinta da do ensaio de corte directo. Apesar de não se ter observado perda de resistência ao corte da interface após o pico nos ensaios de corte directo, deve ser destacado que o atrito residual não pode em circunstância alguma ser determinado através do ensaio de corte em plano inclinado. Para que tal acontecesse, seria necessário reduzir a inclinação  $\beta$  logo que o primeiro sinal de instabilidade fosse detectado.

O segundo aspecto que importa referir tem a ver com o facto de a determinação do ângulo de atrito da interface através do ensaio de corte em plano inclinado, tal como estipulado na respectiva Norma Europeia, ser efectuada para um deslocamento relativo de  $\delta = 50\text{mm}$ . Reyes Ramirez e Gourc (2003) defendem que este valor é bastante elevado, sobretudo para as interfaces geossintético – geossintético.

Para além disto, a informação sobre o comportamento de uma determinada interface que se encontra disponível na fase precedente ao deslizamento não estabilizado, que pode variar bastante de um geossintético para outro, é normalmente relegada para segundo plano na interpretação de resultados de ensaios de corte em plano inclinado (Figura 1.19). Na verdade, a análise do comportamento durante esta fase pode servir para distinguir entre várias interfaces que exibem o mesmo valor do ângulo de atrito,  $\phi_{gg}$ .

A tensão normal efectiva,  $\sigma'$ , decresce ao longo do ensaio de corte em plano inclinado, e o parâmetro  $\tau / \sigma' = \text{tg } \beta$  foi seleccionado por Reyes Ramirez e Gourc (2003) para permitir a comparação com o ensaio de corte directo. As relações entre o deslocamento,  $\delta$ , e a razão de tensões,  $\tau / \sigma'$ , para os ensaios de corte directo e em plano inclinado estão ilustradas na Figura 1.20, para uma interface geotêxtil – georrede.

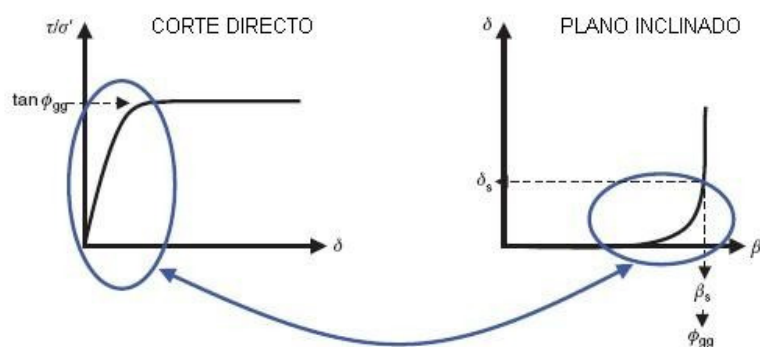


Figura 1. 19 – A análise da fase de deslizamento gradual que precede o estado limite é geralmente relegada para segundo plano (Reyes Ramirez e Gourc, 2003).

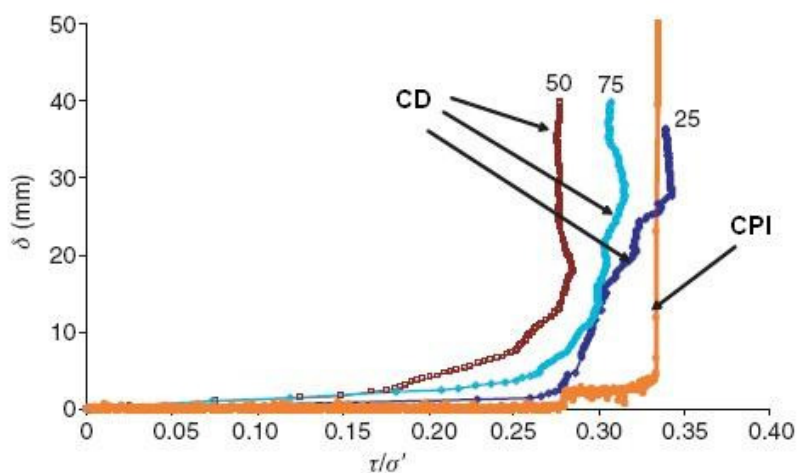


Figura 1. 20 – Tentativa de comparação entre os ensaios de corte directo e os ensaios de corte em plano inclinado num mesmo diagrama: interface geotêxtil – georede (Reyes Ramirez e Gourc, 2003).

A análise da Figura 1.20 permite perceber que o deslocamento correspondente ao atrito máximo na interface é consideravelmente inferior no caso do ensaio de corte em plano inclinado, sendo que esta observação não se deve necessariamente ao facto de as tensões normais serem inferiores. Deve no entanto realçar-se que não é possível realizar ensaios de corte directo para tensões normais tão baixas como as utilizadas no caso do plano inclinado.

Para finalizar, Reyes Ramirez e Gourc (2003) sugerem que o conhecimento do deslocamento correspondente ao atrito máximo,  $\delta_s$ , é essencial quando se pretende incorporar uma relação de atrito na interface precisa em cálculos elaborados, como por exemplo no caso de cálculos envolvendo deformações de sistemas compósitos de geossintéticos, usando o método dos elementos finitos.

## 1.4 ENSAIO DE CORTE EM PLANO INCLINADO

### 1.4.1 INTRODUÇÃO

Como já foi referido, o estudo dos mecanismos de interacção em interfaces solo – geossintético ou em interfaces entre geossintéticos pode ser feito por vários métodos.

No caso do estudo dos mecanismos de interação em interfaces solo – geossintético, os métodos mais utilizados são os que lançam mão de ensaios de corte directo e de ensaios de arranque, aos quais estão associados procedimentos de ensaio, trajectórias de tensão, mecanismos de rotura e condições fronteira distintas. A opção por um ou outro tipo de ensaio está dependente do tipo de geossintético e do tipo de movimento relativo entre este e o solo, que é responsável pela mobilização da resistência nas interfaces.

Se o geossintético permanecer solidário com parte do solo envolvente e a resistência na interface for mobilizada pelo deslizamento da restante massa de solo relativamente ao geossintético, o ensaio mais adequado é o de corte directo. Se, por outro lado, o geossintético se deslocar em relação ao solo envolvente, o ensaio mais adequado para a determinação da resistência da interface é o ensaio de arranque.

Para estudar os mecanismos de interação em interfaces entre diferentes geossintéticos, os métodos baseados em ensaios de corte directo têm sido os mais utilizados. No entanto, mais recentemente, têm sido publicados na bibliografia da especialidade os resultados de vários estudos realizados com recurso ao ensaio de corte em plano inclinado. Este tipo de ensaio foi concebido para tentar ultrapassar algumas das limitações dos ensaios de corte directo e para conseguir simular em laboratório, de forma mais realista, as condições existentes em obra.

O ensaio de corte em plano inclinado é especialmente importante em situações em que os geossintéticos são colocados sobre taludes como constituintes, por exemplo, de sistemas de protecção contra a erosão ou de sistemas de impermeabilização de taludes laterais de aterros de resíduos. É de realçar que, nestes tipos de estruturas, a rotura ocorre geralmente por falta de resistência nas interfaces entre os diferentes materiais que constituem os sistemas.

Tendo em consideração estas circunstâncias, decidiu-se dar especial atenção, neste trabalho, ao estudo do mecanismo de interação geossintético – geossintético quando o movimento relativo na interface é de corte em plano inclinado. O estudo será fundamentalmente direccionado para a caracterização da interação entre diferentes geossintéticos em taludes, uma vez que esta é uma das situações mais desfavoráveis em termos de estabilidade planar e em que a resistência das interfaces é mais determinante. No entanto, será também abordada a interação solo – geossintético.

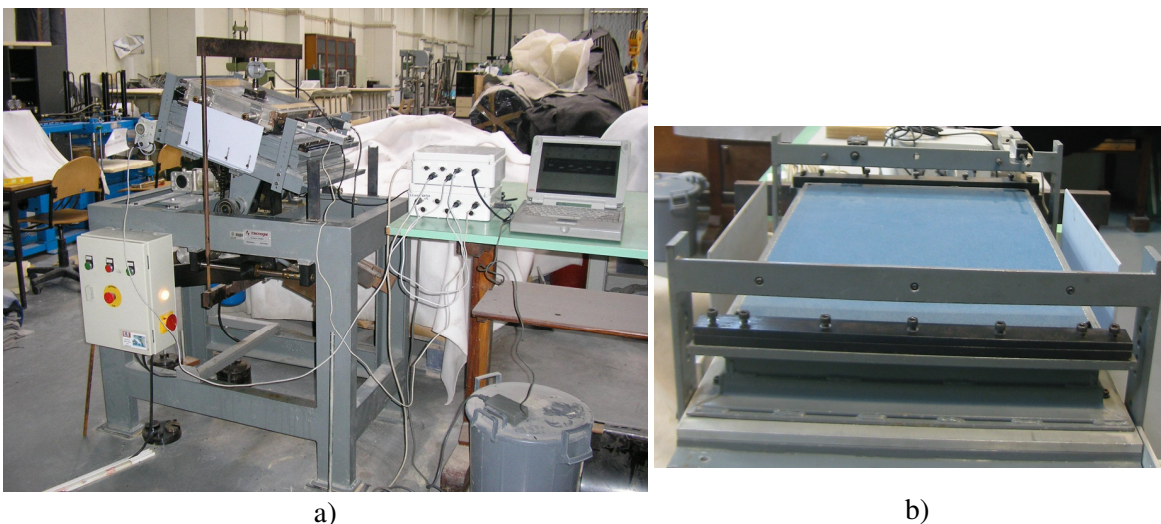


Figura 1. 21 – Equipamento de ensaio de corte em plano inclinado: a) vista geral do equipamento; b) base inferior rígida

O equipamento de ensaio de corte em plano inclinado do LGS da FEUP (ver Figura 1.21), descrito pormenorizadamente por Costa Lopes (2000), foi submetido a algumas alterações de forma a permitir a sua utilização em ensaios de interfaces geossintético – geossintético.

O ensaio de corte em plano inclinado pode ser realizado segundo duas metodologias:

Metodologia 1 - geossintético colocado sobre uma base rígida e lisa;

Metodologia 2 - geossintético colocado sobre uma base rígida e lisa e um outro fixo à caixa superior;

A preocupação em manter ou até melhorar a versatilidade do equipamento foi uma constante e condicionou as soluções adoptadas.

O ensaio de corte em plano inclinado é um ensaio que permite caracterizar a resistência ao corte de uma determinada interface, mediante a determinação do ângulo com a horizontal mínimo para o qual se dá o deslizamento entre as duas superfícies. O equipamento projectado e construído permite que o ensaio de corte em plano inclinado seja realizado de qualquer uma das formas que se indicam no Quadro 1.11

Quadro 1.11 – Variantes ao ensaio de corte em plano inclinado permitidas pelo equipamento do LGS.

Tipo de Interface Testada	Superfície de base	Preenchimento da caixa superior
<b>Solo - Geossintético</b>	Geossintético colocado sobre base rígida	Solo
	Geossintético colocado sobre caixa com solo	Solo
<b>Geossintético - Geossintético</b> Neste tipo de ensaio o geossintético superior é fixado à caixa superior	Geossintético inferior colocado sobre base rígida	Solo
		Bloco rígido
	Geossintético inferior colocado sobre caixa com solo	Solo
		Bloco rígido

Os procedimentos do ensaio de corte em plano inclinado encontram-se descritos na NP EN ISO 12957-2 (Geossintéticos – Determinação das características de atrito – Parte 2: Ensaio em plano inclinado)



# 2

## COMPORTAMENTO DE INTERFACES EM CORTE EM PLANO INCLINADO

### 2.1 - INTRODUÇÃO

A aplicação de geossintéticos em obras de engenharia civil é cada vez mais ampla, a sua aplicação abrange sistemas de impermeabilização, de reforço e de protecção entre outros. Em qualquer um destes sistemas apresentados é de grande importância o valor da resistência nas interfaces dos diferentes materiais que os constituem.

Para analisar os fenómenos de interacção solo – geossintético e geossintético – geossintético em taludes, recorreu-se ao ensaio de corte em plano inclinado. Assim, com o equipamento desenvolvido para este propósito, procura-se compreender esses fenómenos de interacção através da utilização de diferentes geossintéticos e tipos de solos, de tensões de confinamento distintas e de duas metodologias de ensaio diferentes.

Começa-se por descrever os materiais utilizados no estudo, as metodologias de ensaio, apresentando-se e analisando os resultados dos ensaios de corte em plano inclinado. Nesta análise estuda-se a influência, nos fenómenos de interacção solo – geossintético e geossintético – geossintético, da estrutura do geossintético e da granulometria do solo.

### 2.2 – SOLOS UTILIZADOS

As dimensões das partículas dos solos desempenham um importante papel na interacção solo – geossintético, sendo por isto que a análise da influência da granulometria do solo é um dos objectivos do estudo. Para uma melhor compreensão da influência dos solos foram usados dois tipos de solos distintos. Os solos apresentam distribuição granulométrica distinta, tal como se pode observar na Figura 2.1.

O Solo 1 (Figura 2.1a) tem partículas com dimensões que variam entre 0,074mm e 2,00mm, e o seu peso volúmico mínimo e máximo é, respectivamente, 15,00kN/m<sup>3</sup> e 17,90kN/m<sup>3</sup>.

O Solo 2 (Figura 2.1b) tem partículas com dimensões inferiores a 0,08mm (19,87%) e a dimensão máxima é 38,10mm. O peso volúmico mínimo é de 13,59KN/m<sup>3</sup> e o peso volúmico máximo é 17,20KN/m<sup>3</sup>.

No Quadro 2.1 encontram-se algumas das características dos dois solos, tais como: os diâmetros máximos,  $D_{máx}$ , e mínimo,  $D_{mín}$ , os diâmetros  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{60}$ , o coeficiente de uniformidade,  $C_u$ , o coeficiente de curvatura,  $C_c$ , os pesos volúnicos máximo,  $\gamma_{máx}$ , e mínimo,  $\gamma_{mín}$  e o peso volúmico correspondente ao índice de compactidade de 50%,  $\gamma (ID=50\%)$ .

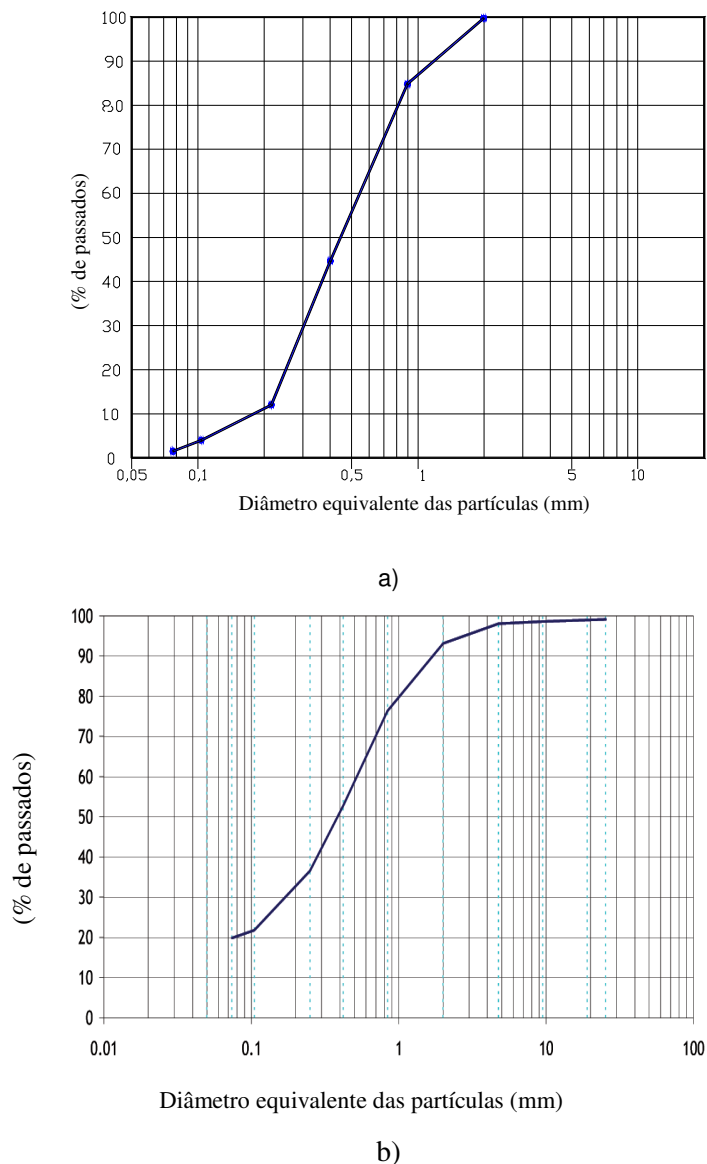


Figura 2. 1– Distribuição granulométrica: a) Solo 1; b) Solo 2.

Quadro 2. 1 – Características dos solos.

Solo	%< 0,08mm	D <sub>min</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>máx</sub>	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	γ <sub>min</sub>	γ <sub>máx</sub>	γ <sub>(I<sub>D</sub>=50%)</sub>	φ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	—	—	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(°)
Solo 1	--	0,074	0,18	0,30	0,43	0,53	2,00	2,94	0,94	15,00	17,90	16,32	36,2
Solo 2	19,87	--	--	0,19	0,39	0,55	38,10	--	--	13,59	17,20	15,18	41,1

## 2.3 – GEOSINTÉTICOS UTILIZADOS

A influência da estrutura dos geossintéticos na interação solo – geossintético e geossintético – geossintético é um dos objectivos deste trabalho. Deste modo, procurou-se estudar geossintéticos com estruturas diferentes: geomembranas lisa e texturada, geogrelhas uniaxial e biaxial, geotêxtil tecido, geotêxteis não tecidos termoligado e agulhado e geotapete.

### 2.3.1 - GEOMEMBRANAS

Foram utilizadas duas geomembranas (Figura 2.2) nos ensaios de corte em plano inclinado. As geomembranas são distintas, sendo uma delas lisa (GML) e a outra texturada (GMT), ambas são em polietileno de alta densidade e têm 2 mm de espessura.



Figura 2. 2– Geomembranas lisa e texturada

A resistência à tracção e a deformação na rotura da geomembrana lisa definidas de acordo com a norma ASTM D638 (Costa Lopes, 2000) é, respectivamente, 31,84N/mm<sup>2</sup> e 473,14%.

### 2.3.2 - GEOTÊXTEIS

Foram ensaiados dois tipos de geotêxteis em polipropileno: tecido e não tecido. Dentro dos geotêxteis não tecidos considerou-se um agulhado e outro termoligado (Figura 2.3).

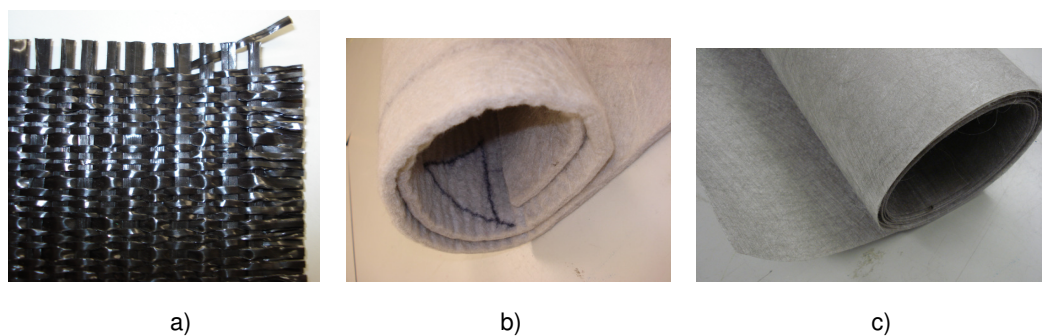


Figura 2. 3– Geotêxteis: a) tecido (GTXt); b) não tecido agulhado (GTXnt); c) não tecido termoligado (GTXtl).

No Quadro 2.2 apresentam-se algumas das propriedades nominais dos geotêxteis.

Quadro 2. 2 – Propriedades dos geotêxteis

Geotêxtil	Sigla	mua* (g/m <sup>2</sup> )	Resistência à tracção (kN/m)	Elongação na rotura** (%)
Tecido	GTXt	210	42	18
Não tecido agulhado	GTXnt	285	21,5	100
Não tecido termoligado	GTXtl	290	21,3	55

\* - massa por unidade de área ; \*\* - na direcção de fabrico

### 2.3.3 - GEOGRELHAS

No estudo foram utilizadas duas geogrelhas extrudidas, uma uniaxial (GGu) em polietileno de alta densidade, e outra biaxial (GGb) em polipropileno (Figura 2.4).

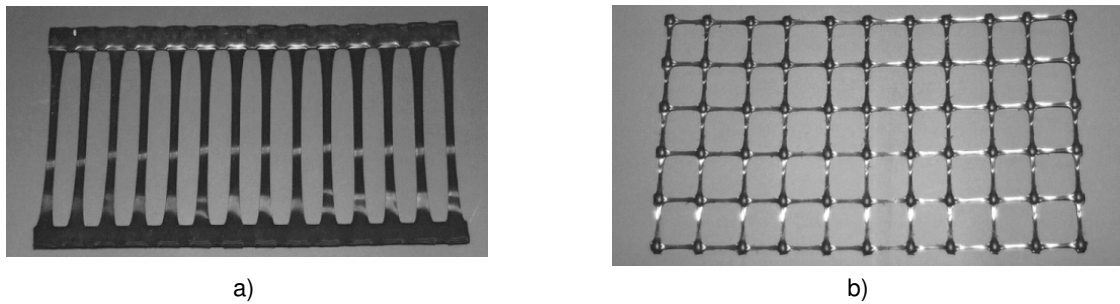


Figura 2. 4– Geogrelhas extrudidas: a) uniaxial; b) biaxial.

A resistência à tracção e a elongação na rotura nominais da geogrelha uniaxial são, respectivamente, 64,50kN/m e 11,50%. A geogrelha biaxial apresenta uma resistência à tracção de 40kN/m, quer na direcção de fabrico, quer na direcção perpendicular a esta e uma elongação na rotura de 11%.

A Figura 2.5 apresenta as características geométricas das geogrelhas uniaxial e biaxial. Os valores dessas características estão indicados nos Quadros 2.3 e 2.4, respectivamente para a geogrelha uniaxial e biaxial.

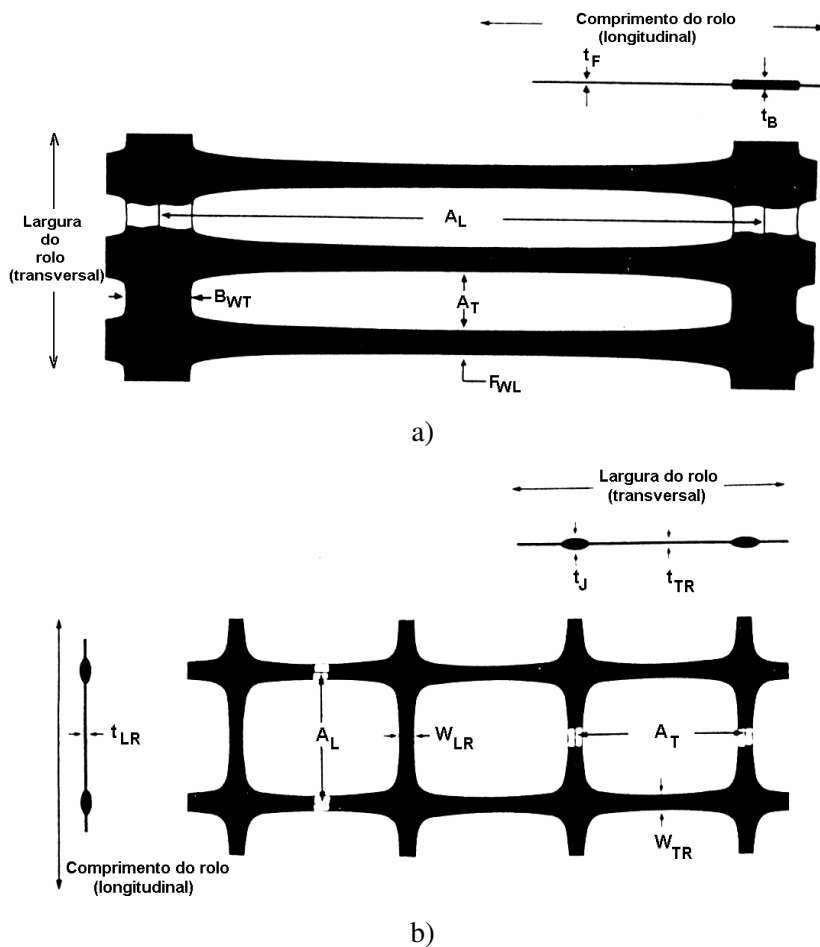


Figura 2. 5– Características geométricas das geogrelhas:a) uniaxial; b) biaxial.

Quadro 2. 3 – Valores das características geométricas da geogrelha uniaxial

	A <sub>L</sub> (mm)	A <sub>T</sub> (mm)	B <sub>WT</sub> (mm)	F <sub>WL</sub> (mm)	t <sub>B</sub> (mm)	t <sub>F</sub> (mm)
GGu	235	16	16	6	2,5 – 2,7	0,9

Quadro 2. 4 – Valores das características geométricas da geogrelha biaxial

	A <sub>L</sub> (mm)	A <sub>T</sub> (mm)	W <sub>LR</sub> (mm)	W <sub>TR</sub> (mm)	t <sub>j</sub> (mm)	t <sub>LR</sub> (mm)	T <sub>TR</sub> (mm)
GGb	33	33	2,2	2,5	5,8	2,2	1,4

#### 2.3.4 - GEOTAPETE

O geotapete (GTAP) ensaiado (Figura 2.6) tem cerca de 90% de vazios e a sua massa por unidade de área é de 450g/m<sup>2</sup>. Os valores nominais de resistência à tracção e alongação na rotura são, respectivamente, 1,80kN/m e 30%.



Figura 2. 6– Geotapete

## 2.4 – METODOLOGIAS E PROGRAMA DE ENSAIOS

Como já havia referido no Capítulo 1, os procedimentos do ensaio de corte em plano inclinado encontram-se descritos na NP EN ISO 12957-2 (Geossintéticos – Determinação das características de atrito – Parte 2: Ensaio em plano inclinado).

No presente estudo são consideradas duas metodologias de ensaio:

- Metodologia 1 - geossintético colocado sobre uma base rígida e lisa;
- Metodologia 2 – um geossintético colocado sobre uma base rígida e lisa e outro fixo á caixa superior

O Quadro 2.5 apresenta o programa de ensaios realizados para o estudo da resistência das interfaces solo – geossintético e geossintético – geossintético.

O quadro organiza-se da esquerda para a direita, com geossintético inferior, geossintético superior, em seguida o tipo de preenchimento da caixa superior e respectivas tensões de confinamento e graus de compactação, e no fim a metodologia usada na realização do ensaio.

As zonas assinaladas com um o símbolo √ e com preenchimento em cinzento, representam os ensaios realizados (repete duas vezes, num total de três provetes ensaiados).

Quadro 2. 5 – Programa de ensaios

<b><u>Geossintético Inferior</u></b>	<b>Geossintético Superior</b>	<b>MD</b>	<b>Areia</b>	<b>Saibro</b>	<b>Método</b>
			<b>I<sub>D</sub>=50%</b>	<b>I<sub>D</sub>=50%</b>	
			<b>10kPa</b>	<b>10kPa</b>	
<b><u>Geomembrana Lisa</u></b>	Geotêxtil NT agulhado	√ √	√	√	2
	Geotêxtil NT termoligado	√			2
	Geotêxtil Tecido	√			2
	Geogrelha uniaxial	√			2
	Geogrelha biaxial	√			2
<b><u>Geomembrana Texturada</u></b>	Geotêxtil NT agulhado	√			2
	Geotêxtil NT termoligado	√			2
	Geotêxtil Tecido	√			2
	Geogrelha uniaxial	√			2
	Geogrelha biaxial	√			2
<b><u>Geotêxtil NT agulhado</u></b>	Geotêxtil NT termoligado	√			2
	Geotêxtil Tecido	√			2
	Geogrelha uniaxial	√			2
	Geogrelha biaxial	√			2
	Geotapete	√	√	√	2
<b><u>Geotêxtil NT termoligado</u></b>	Geotêxtil Tecido	√			2
	Geogrelha uniaxial	√			2
	Geogrelha biaxial	√			2
	Geotapete	√	√	√	2
<b><u>Geotêxtil Tecido</u></b>	Geogrelha uniaxial	√			2
	Geogrelha biaxial	√			2
	Geotapete	√	√	√	2

<b><u>Geossintético Inferior</u></b>	<b>Geossintético Superior</b>	<b>MD</b>	<b>Areia</b>	<b>Saibro</b>	<b>Método</b>
			<b>I<sub>D</sub>=50%</b>	<b>I<sub>D</sub>=50%</b>	
			<b>10kPa</b>	<b>10kPa</b>	
<b><u>Geotêxtil NT agulhado</u></b>	-		√	√	1
<b><u>Geotêxtil NT termoligado</u></b>	-		√	√	1
<b><u>Geotêxtil Tecido</u></b>	-		√	√	1

## 2.5 – ANÁLISE DE UM ENSAIO TIPO

De seguida procede-se a uma análise tipo dos resultados de um ensaio de corte em plano inclinado com o objectivo de facilitar o estudo posterior.

No ensaio tipo efectuado considerou-se: a caixa superior preenchida com um bloco de madeira (MD); a geomembrana lisa como geossintético inferior, o geotextil não tecido agulhado como geossintético superior, uma tensão de confinamento inicial de 10kPa e a metodologia de ensaio 2.

Os elementos obtidos directamente do ensaio são: o tempo de ensaio, o deslocamento da caixa superior e o aumento da inclinação da base inferior. Após o tratamento destes dados para os três provetes ensaiados, obtém-se a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida (Figura 2.7).

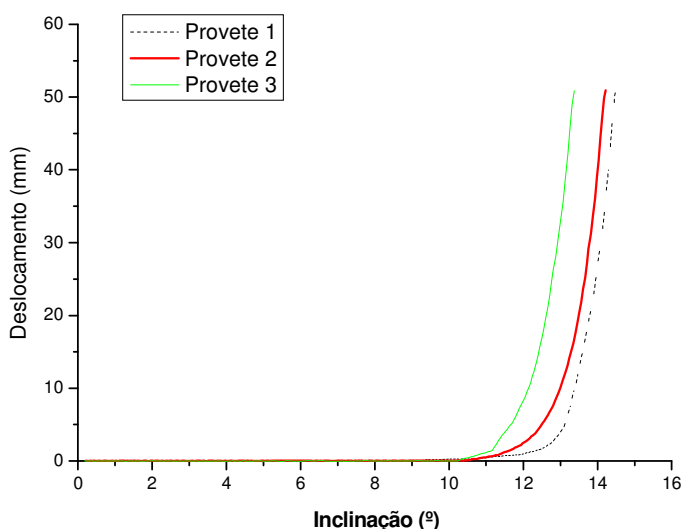


Figura 2. 7– Curvas deslocamento/inclinação para a interface GML – GTXnt.

O ensaio termina quando a caixa superior atinge o deslocamento igual a 50mm e a inclinação correspondente é a máxima. O valor desta inclinação corresponde ao ângulo de deslizamento da caixa superior.

Na Figura 2.8 representa-se um esquema das forças que actuam no sistema de geossintéticos em estudo.

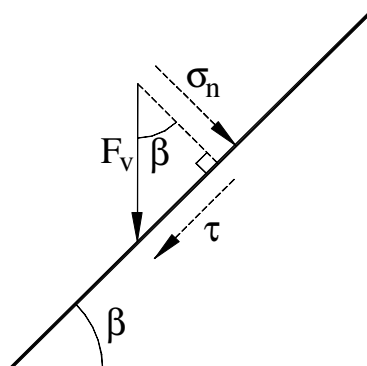


Figura 2. 8– Sistema de forças aplicado no(s) geossintético(s) (Costa Lopes, 2000).

Os passos para o cálculo do ângulo de atrito na interface são referidos a seguir.

Calcular a tensão normal ( $\sigma_n$ ) no momento do deslizamento (inclinação é igual a  $\beta$ ):

$$\sigma = \frac{F_v \times \cos(\beta)}{1000 \times A} \quad (2.1)$$

em que,  $\sigma$  = tensão normal, em kPa,  $F_v$  = força vertical que actua na interface geossintético – geossintético, em N,  $\beta$  = ângulo de deslizamento da caixa superior, graus ( $^\circ$ ),  $A$  = área de contacto, em m<sup>2</sup>.

Calcular a tensão de corte ( $\tau$ ) ao longo da superfície de deslizamento:

$$\tau = \frac{F_v \times \sin(\beta) + f(\beta)}{1000 \times A} \quad (2.2)$$

onde,  $\tau$  = tensão de corte ao longo da superfície de deslizamento, em kPa,  $f(\beta)$  = força necessária para evitar o movimento da caixa superior vazia quando a base está com inclinação igual a  $\beta$ , aplicada na direcção da superfície de deslizamento e expressa em N,  $F_v$ ,  $A$  e  $\beta$  têm o mesmo significado apresentado no ponto anterior.

Por fim, calcular o ângulo de atrito na interface geossintético – geossintético:

$$\operatorname{tg}(\Phi_{gg}) = \frac{\tau}{\sigma_n} \Rightarrow \Phi_{gg} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right) \quad (2.3)$$

Após a determinação do ângulo de atrito para os três provetes, considerou-se como resultado final para cada sistema de geossintéticos ensaiado o valor médio dos três provetes. É igualmente importante, pelo seu significado, determinar o desvio padrão e o coeficiente de variação.

O Quadro 2.6 apresenta os resultados do ensaio e do procedimento de cálculo descrito.

Quadro 2. 6 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGb	<b>Geossintético Inferior</b>	GML	<b>ID(%)</b>	-

Pressão	Provetes	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\beta$ (rad)	$F_v$ (N)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	$f(\beta)$ (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ ( $^\circ$ )
10	1	9,586	0,167	899	0,09	9,852	14,753	1,828	0,186	0,183	10,51
	2	11,175	0,195	901	0,09	9,820	17,892	2,139	0,218	0,214	12,29
	3	9,734	0,170	899	0,09	9,844	15,006	1,855	0,188	0,186	10,67
	Média	10,165				9,838		1,941			11,16
	Desv Pad	0,878				0,017		0,172			0,98
	C Var(%)	8,637				0,169		8,871			8,80

A definição da força  $f(\beta)$  (força necessária para mobilizar a caixa superior vazia quando a base está inclinada de  $\beta$ ), foi feita considerando incrementos de  $5^\circ$  no valor da inclinação da base (Quadro 2.7).

Quadro 2. 7 – Definição da força  $f(\beta)$

$\beta$ (°)	5	10	15	20	25	30
$f(\beta)$ (N)	6,93	15,46	25,81	33,74	42,01	49,95

Para obter os valores de  $f(\beta)$  para ângulos de  $\beta$  situados entre os valores do quadro, recorre-se a uma interpolação linear. No caso de o ângulo  $\beta$  ser superior a 30° o valor da força  $f(\beta)$  pode ser obtida por extrapolação linear.

A contribuição  $f(\beta)$  não tem sentido no caso da tensão normal uma vez que a caixa superior apoia em placas laterais através de roletes, descarregando nelas a componente normal do seu peso, não o transmitindo assim à superfície da interface em estudo, como acontece com a sua componente tangencial que actua na direcção da superfície de deslizamento (Costa Lopes, 2000).

Para finalizar refira-se que o ângulo de atrito médio mobilizado na interface GML-GGb é de 11,16° e o desvio padrão médio é de 0,98°.

## 2.6 – INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DO GEOSSINTÉTICO

### 2.6.1 – INTERFACES SOLO-GEOTÊXTIL

A estrutura dos geossintéticos está intimamente associada ao método de fabrico utilizado.

Para analisar a influência da estrutura dos geotêxteis no ângulo de atrito das interfaces destes materiais com o solo, procedeu-se a ensaios de corte em plano inclinado, de acordo com a norma NP EN ISO 12957-2. Os geotêxteis estudados foram dois não tecidos, um agulhado (GTXnt) e outro termoligado (GTXtl), e um tecido (GTXt).

Todos os ensaios foram realizados sob idênticas condições. A metodologia de ensaio seguida foi a 1 (Costa-Lopes; 2000). O solo utilizado foi o Solo 1 e a tensão de confinamento ao nível da interface foi de 10kPa.

Na Figura 2.9 compara-se a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as três interfaces solo-geotêxtil estudadas.

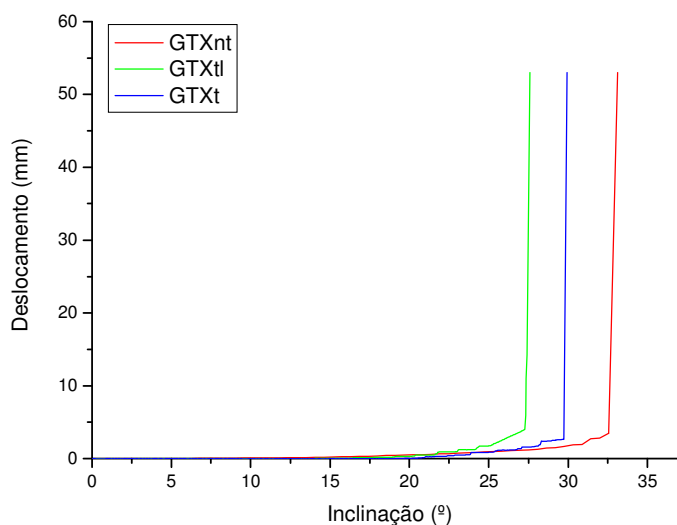


Figura 2. 9– Curvas deslocamento/inclinação para as três interfaces solo-geotêxtil estudadas.

Os Quadros 2.8 a 2.10 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com o geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt), o geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) e o geotêxtil tecido (GTXt).

Verifica-se que o melhor comportamento da interface solo-geossintético ocorre quando o geotêxtil é não tecido agulhado (o ângulo de atrito médio na interface é de 35,95°) e que o pior comportamento da mesma interface dá-se para o geotêxtil não tecido termoligado (o ângulo de atrito médio na interface é de 30,12°) O ângulo de atrito na interface com o solo para o geotêxtil tecido é de 32,60°.

O menor valor do ângulo de atrito na interface solo-GTXtl, deve-se provavelmente à estrutura resultante do método de fabrico. Com efeito, a ligação entre os filamentos deste tipo de geotêxtil é feita por fusão (sob pressão) nos pontos de contacto, seguida de arrefecimento. A estrutura resultante é mais compacta e as superfícies laterais mais lisas do que no caso dos outros geotêxteis considerados, tornando mais difícil o imbricamento dos grãos de solo no geotêxtil.

A estrutura característica do geotêxtil tecido (isto é, filamentos dispostos regularmente segundo a direcção de fabrico e transversalmente a esta), criam uma superfície mais rugosa do que a do geotêxtil termoligado, mas menos rugosa do que a do geotêxtil não tecido agulhado, daí que o valor do ângulo de atrito na interface solo-GTXt esteja entre os obtidos para as interfaces solo-GTXnt e solo-GTXtl.

Quadro 2. 8 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	-	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	33,235	0,580	898	0,09	8,341	55,087	6,078	0,729	0,630	36,08
	2	32,823	0,573	897	0,09	8,379	54,433	6,009	0,717	0,622	35,65
	3	33,281	0,581	901	0,09	8,365	55,160	6,104	0,730	0,630	36,12
	Média	33,113				8,362		6,064			<b>35,95</b>
	Desv Pad	0,252				0,019		0,049			0,26
	C Var (%)	0,761				0,226		0,804			0,72

Quadro 2. 9 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXtl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	GTXtl	<b>Geossintético Inferior</b>	-	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	27,575	0,481	903	0,09	8,892	46,100	5,156	0,580	0,525	30,11
	2	29,554	0,516	896	0,09	8,660	49,242	5,457	0,630	0,562	32,22
	3	25,628	0,447	899	0,09	9,005	43,007	4,798	0,533	0,490	28,05
	Média	27,586				8,852		5,137			<b>30,12</b>
	Desv Pad	1,963				0,176		0,330			2,09
	C Var (%)	7,116				1,989		6,427			6,92

Quadro 2. 10 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	GTXt	<b>Geossintético Inferior</b>	-	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	29,205	0,510	899	0,09	8,722	48,688	5,416	0,621	0,556	31,84
	2		0,000	899	0,09	9,988	0,000	0,000	0,000	0,000	
	3	30,640	0,535	897	0,09	8,574	50,967	5,645	0,658	0,582	33,36
	Média	29,923				9,094		3,687			<b>32,60</b>
	Desv Pad	1,015				0,777		3,195			1,07
	C Var(%)	3,391				8,546		86,658			3,30

## 2.6.2 – INTERFACES GEOSSINTÉTICO-GEOSSINTÉTICO

### 2.6.2.1 - INTRODUÇÃO

Para o estudo da influência da estrutura do geossintético no comportamento das interfaces geossintético-geossintético desenvolveu-se uma metodologia de ensaio que consistiu em, tal como na metodologia 2, fixar o geossintético inferior à base rígida e fixar o geossintético superior à base da caixa superior preenchida, em todo o seu volume interior, por um bloco de madeira (MD). A tensão de confinamento na interface foi de 10kPa.

2.6.2.2 – GEOSSINTÉTICO INFERIOR - GEOMEMBRANAS

Geossintético superior – geogrelha biaxial

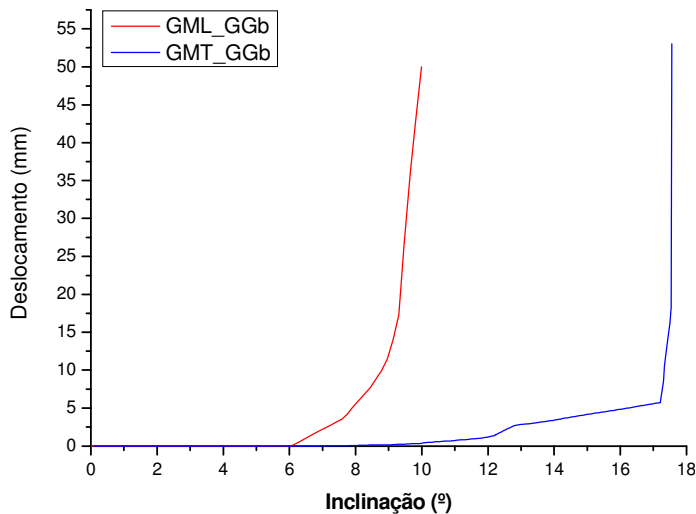


Figura 2. 10– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geomembranas lisa e texturada -geogrelha biaxial.

Na Figura 2.10 compara-se a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geomembrana lisa (GML) -geogrelha biaxial (GGb); geomembrana texturada (GMT) -geogrelha biaxial (GGb). Os Quadros 2.11 e 2.12 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com a geomembrana lisa (GML) e a geomembrana texturada (GMT) como geossintético inferior.

Quadro 2. 11 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GML)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGb	<b>Geossintético Inferior</b>	GML	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	9,586	0,167	899	0,09	9,852	14,753	1,828	0,186	0,183	10,51
	2	11,175	0,195	901	0,09	9,820	17,892	2,139	0,218	0,214	12,29
	3	9,734	0,170	899	0,09	9,844	15,006	1,855	0,188	0,186	10,67
	Média	10,165				9,838		1,941			<b>11,16</b>
	Desv Pad	0,878				0,017		0,172			0,98
	C Var(%)	8,637				0,169		8,871			8,80

Quadro 2. 12 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GMT)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGB	<b>Geossintético Inferior</b>	GMT	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	21,004	0,367	903	0,09	9,368	35,401	3,990	0,426	0,403	23,07
	2	12,651	0,221	920	0,09	9,975	20,949	2,472	0,248	0,243	13,92
	3	19,024	0,332	910	0,09	9,555	32,193	3,652	0,382	0,365	20,92
	Média	17,560					9,633		3,371		<b>19,30</b>
	Desv Pad	4,365					0,311		0,797		4,79
	C Var(%)	24,856					3,225		23,647		24,79

O maior valor médio de ângulo de atrito foi mobilizado na interface da geomembrana texturada-geogrelha biaxial (19,30°), quando o geossintético inferior é a geomembrana lisa o valor do ângulo de atrito na interface é de 11,16°, o que corresponde a uma redução de 42,2%.

#### Geossintético superior – geogrelha uniaxial

Na Figura 2.11 compara-se a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geomembrana lisa (GML) -geogrelha uniaxial (GGu); geomembrana texturada (GMT) -geogrelha uniaxial (GGu). Os Quadros 2.13 e 2.14 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com a geomembrana lisa (GML) e a geomembrana texturada (GMT) como geossintético inferior.

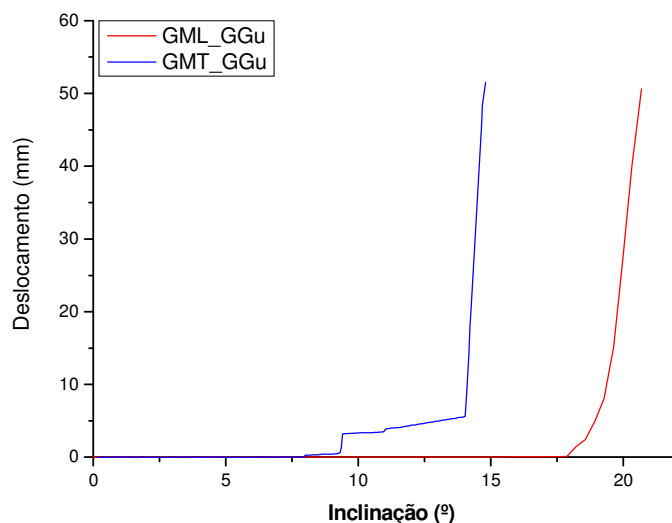


Figura 2. 11– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geomembranas lisa e texturada-geogrelha uniaxial.

O valor médio do ângulo de atrito mais alto foi atingido na interface GML – GGu, com valor igual a 22,74°. No caso da interface GMT – GGu o valor do ângulo de atrito mobilizado no ensaio de corte em plano inclinado foi de 16,32°, sofrendo assim um decréscimo de aproximadamente 28,3%.

O facto de o valor do ângulo de atrito na interface GML – GGu ser superior ao encontrado quando o geossintético inferior é uma geomembrana texturada (GMT) deve-se, possivelmente, à sobreposição dos nós resultantes da extrusão da GMT com os nós resultantes da extrusão das geogrelhas uniaxiais, resultando numa área de contacto menor e à consequente redução do valor ângulo de atrito mobilizado na interface.

É de salientar que o uso do bloco de madeira no preenchimento do interior da caixa superior teve por objectivo evitar qualquer mobilização de impulso passivo nas barras transversais das geogrelhas (tal como acontece nas interfaces solo-geogrelha). Assim, para uma dada tensão de confinamento, é apenas a área de geossintéticos em contacto que oferece resistência ao movimento e consequentemente os valores obtidos nos ensaios de corte em plano inclinado apenas dependem da estrutura dos geossintéticos considerados.

Quadro 2. 13 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GML)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGu	<b>Geossintético Inferior</b>	GML	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	19,845	0,346	896	0,09	9,363	33,494	3,751	0,401	0,381	21,83
	2	20,716	0,362	897	0,09	9,327	34,925	3,915	0,420	0,397	22,77
	3	21,497	0,375	895	0,09	9,250	36,216	4,046	0,437	0,412	23,62
	Média	20,686				9,313		3,904			<b>22,74</b>
	Desv Pad	0,827				0,058		0,147			0,89
	C Var(%)	3,996				0,619		3,777			3,93

Quadro 2. 14 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GMT)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGu	<b>Geossintético Inferior</b>	GMT	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	17,149	0,299	902	0,09	9,574	29,219	3,279	0,342	0,330	18,91
	2	14,856	0,259	912	0,09	9,791	25,512	2,880	0,294	0,286	16,39
	3	12,409	0,217	905	0,09	9,823	20,447	2,389	0,243	0,239	13,67
	Média	14,805				9,729		2,849			<b>16,32</b>
	Desv Pad	2,370				0,135		0,446			2,62
	C Var(%)	16,012				1,392		15,654			16,05

#### Geossintético superior – geotêxtil tecido

A Figura 2.12 mostra a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geomembrana lisa (GML) – geotêxtil tecido (GTXt); geomembrana texturada (GMT) - geotêxtil tecido (GTXt). Os Quadros 2.15 e 2.16 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com a geomembrana lisa (GML) e a geomembrana texturada (GMT) como geossintético inferior.

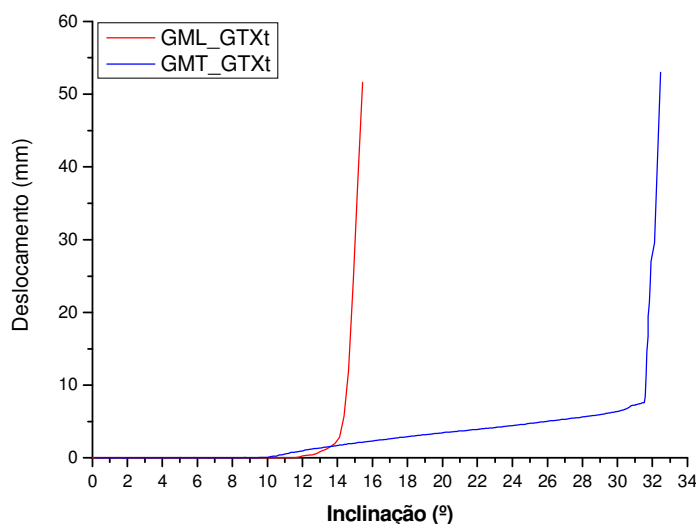


Figura 2. 12–Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geomembranas-GTXt.

Da figura e dos quadros constata-se que o ângulo de atrito na interface do geotêxtil tecido com a geomembrana texturada é muito superior ao que ocorre na interface do mesmo geotêxtil com a geomembrana lisa, 35,27° no primeiro caso e 17,04° no segundo. Esta diferença (superior a 100%) resulta claramente da maior rugosidade da geomembrana texturada e da maior área de contacto entre o

geotêxtil e as geomembranas quando comparada com as existentes entre as geogrelhas e as geomembranas.

Quadro 2. 15 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GML)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXt	<b>Geossintético Inferior</b>	GML	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	16,081	0,281	896	0,09	9,571	27,525	3,065	0,320	0,310	17,76
	2	14,838	0,259	896	0,09	9,620	25,475	2,831	0,294	0,286	16,40
	3	15,362	0,268	897	0,09	9,612	26,384	2,934	0,305	0,296	16,97
	Média	15,427				9,601		2,944			<b>17,04</b>
	Desv Pad	0,624				0,026		0,117			0,68
	C Var (%)	4,046				0,272		3,977			3,99

Quadro 2. 16 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GMT)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXt	<b>Geossintético Inferior</b>	GMT	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	32,113	0,560	889	0,09	8,369	53,306	5,845	0,698	0,610	34,93
	2	31,057	0,542	899	0,09	8,562	51,629	5,730	0,669	0,590	33,79
	3	34,203	0,597	894	0,09	8,213	56,624	6,212	0,756	0,648	37,10
	Média	32,458				8,381		5,929			<b>35,27</b>
	Desv Pad	1,601				0,175		0,252			1,68
	C Var (%)	4,932				2,082		4,244			4,76

#### Geossintético superior – geotêxtil não tecido agulhado

A Figura 2.13 mostra a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geomembrana lisa (GML) – geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt); geomembrana texturada (GMT) - geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt). Os Quadros 2.17 e 2.18 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com a geomembrana lisa (GML) e a geomembrana texturada (GMT) como geossintético inferior.

Tal como no caso das interfaces geomembranas-geotêxtil tecido verifica-se que o ângulo de atrito na interface do geotêxtil não tecido agulhado com a geomembrana texturada é superior ao que ocorre na interface do mesmo geotêxtil com a geomembrana lisa, 30,42° no primeiro caso e 15,49° no segundo. A diferença nos valores é da mesma ordem de grandeza da que se verifica para o geotêxtil tecido (aproximadamente 96%). No entanto, em valor absoluto, os valores dos ângulos de atrito nas interfaces geomembranas-geotêxtil não tecido agulhado são menores do que quando o geotêxtil é tecido.

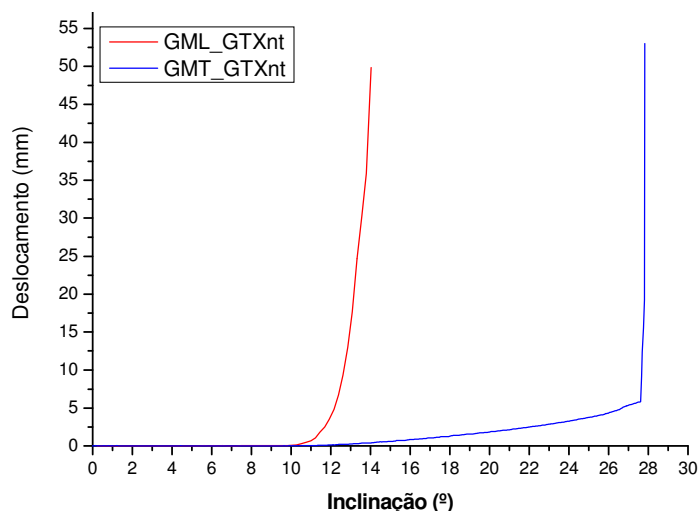


Figura 2. 13– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geomembranas-geotêxtil não tecido agulhado.

Quadro 2. 17 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GML)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXnt	<b>Geossintético Inferior</b>	GML	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	14,483	0,253	897	0,09	9,645	24,740	2,766	0,287	0,279	16,00
	2	14,223	0,248	898	0,09	9,674	24,202	2,721	0,281	0,274	15,71
	3	13,375	0,233	897	0,09	9,697	22,445	2,555	0,263	0,258	14,76
	Média	14,027				9,672		2,681			<b>15,49</b>
	Desv Pad	0,580				0,026		0,111			0,65
	C Var (%)	4,134				0,270		4,149			4,19

Quadro 2. 18 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GMT)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXnt	<b>Geossintético Inferior</b>	GMT	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	28,837	0,503	893	0,09	8,692	48,103	5,320	0,612	0,549	31,47
	2	27,695	0,483	897	0,09	8,828	46,290	5,148	0,583	0,528	30,25
	3	26,935	0,470	861	0,09	8,534	45,082	4,837	0,567	0,516	29,54
	Média	27,822					8,685		5,102		<b>30,42</b>
	Desv Pad	0,957					0,147		0,245		0,97
	C Var (%)	3,441					1,696		4,804		3,20

Geossintético superior – geotêxtil não tecido termoligado

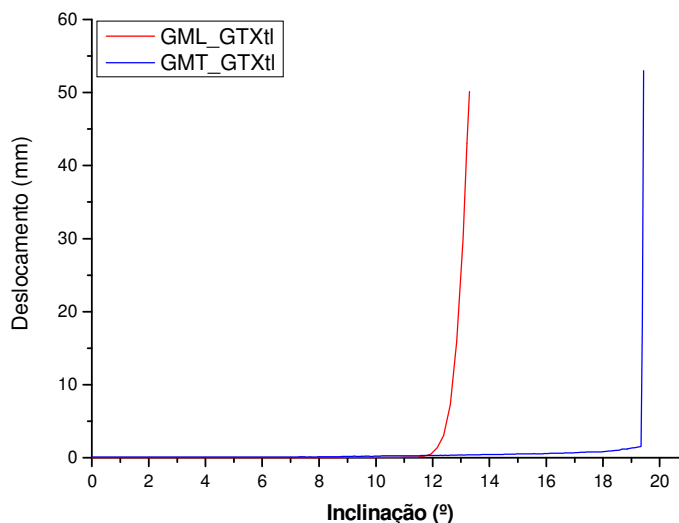


Figura 2. 14– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geomembranas-geotêxtil não tecido termoligado.

A Figura 2.14 mostra a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geomembrana lisa (GML) – geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl); geomembrana texturada (GMT) - geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl). Os Quadros 2.19 e 2.20 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com a geomembrana lisa (GML) e a geomembrana texturada (GMT) como geossintético inferior.

Tal como no caso das interfaces geomembranas com os dois geotêxteis considerados anteriormente verifica-se que o ângulo de atrito na interface do geotêxtil não tecido termoligado com a geomembrana

texturada (21,37°) é superior ao que ocorre na interface do mesmo geotêxtil com a geomembrana lisa (14,68°) apenas a diferença nos valores é menor (da ordem dos 45%). Em valor absoluto, os valores dos ângulos de atrito nas interfaces geomembranas-geotêxtil não tecido termoligado são menores do que quando o geotêxtil é tecido ou não tecido agulhado.

Quadro 2. 19 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GML)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXtl	<b>Geossintético Inferior</b>	GML	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	13,210	0,231	902	0,09	9,759	22,105	2,536	0,260	0,254	14,57
	2	13,211	0,231	896	0,09	9,690	22,106	2,520	0,260	0,254	14,58
	3	13,479	0,235	898	0,09	9,699	22,662	2,577	0,266	0,260	14,88
	Média	13,300				9,716		2,544			<b>14,68</b>
	Desv Pad	0,155				0,038		0,029			0,18
	C Var (%)	1,168				0,389		1,139			1,20

Quadro 2. 20 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GMT)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXtl	<b>Geossintético Inferior</b>	GMT	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	18,857	0,329	904	0,09	9,505	31,928	3,601	0,379	0,362	20,75
	2	19,792	0,345	899	0,09	9,400	33,410	3,754	0,399	0,380	21,77
	3	19,629	0,343	902	0,09	9,438	33,152	3,735	0,396	0,377	21,59
	Média	19,426				9,448		3,697			<b>21,37</b>
	Desv Pad	0,499				0,053		0,083			0,54
	C Var (%)	2,570				0,563		2,250			2,55

### Comparação de resultados

No Quadro 2.21 compara-se os valores dos ângulos de atrito nas interfaces geomembranas-geossintéticos superiores estudados.

O comportamento das interfaces da geogrelha uniaxial com as geomembranas é o oposto do dos restantes geossintéticos superiores considerados.

Tal como foi referido anteriormente, para todos os tipos de geotêxteis estudados a maior resistência da interface dá-se quando estão em contacto com a geomembrana texturada. Porém, as diferenças entre os valores do ângulo de atrito encontrado quando os geotêxteis fazem interface com a geomembranas lisa e a texturada depende do tipo de geotêxtil.

Com efeito a maior diferença ocorre para o geotêxtil tecido (107%) e a menor para o geotêxtil não tecido termoligado (45,6%). No primeiro caso, tal acontece devido à distribuição regular dos poros característica dos geotêxteis tecidos e à distribuição também regular das saliências da geomembrana textura. As segundas penetram nos primeiros mobilizando, por isso, maior resistência na interface. No segundo caso deve-se à menor porosidade e á maior lisura da superfície do geotêxtil não tecido termoligado.

Quadro 2. 21 – Comparação dos ângulos de atrito nas interfaces com as geomembranas

Geossintético Superior	Ângulo de Atrito (°)		Acréscimo (%)
	Geomembrana (GM) Inferior		
	GM Lisa	GM Texturada	
Geogrelha biaxial	11,16 °	19,30 °	72,9%
Geogrelha uniaxial	22,74 °	16,32 °	-28,2%
Geotêxtil Tecido	17,04 °	35,27 °	107%
Geotêxtil não tecido agulhado	15,49 °	30,42 °	96,4%
Geotêxtil não tecido termoligado	14,68 °	21,37 °	45,6%

Com o geotêxtil não tecido agulhado observa-se um valor da diferença nos ângulos de atrito medidos nas interfaces com a geomembranas lisa e a texturada muito próximo do encontrado para o geotêxtil tecido. De facto a ligação mecânica do geotêxtil não tecido agulhado facilita a penetração das saliências da geomembrana texturada nos poros dos geotêxtil aumentando a resistência mobilizada na interface.

O facto de em valores absolutos as resistências das interfaces das geomembranas com o geotêxtil tecido serem maiores do que quando os geotêxteis são não tecidos denota uma maior eficácia na mobilização da resistência do geotêxtil tecido. Situação especialmente relevante no caso das interfaces com a geomembrana lisa.

2.6.2.3 – GEOSSINTÉTICOS INFERIORES – GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS

Geossintético superior – geogrelha biaxial

A Figura 2.15 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) – geogrelha biaxial (GGB); geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) – geogrelha biaxial (GGB). Os Quadros 2.22 e 2.23 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com o geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) e o geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) como geossintético inferior.

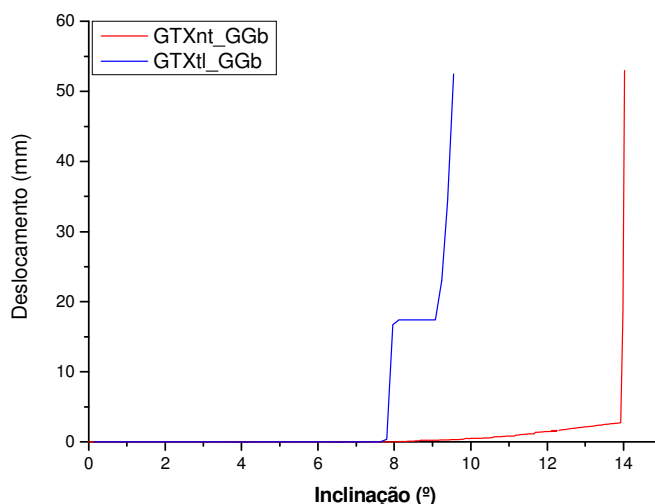


Figura 2. 15– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geotêxteis não tecidos-geogrelha biaxial.

Quadro 2. 22 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGB	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	12,249	0,214	888	0,09	9,639	20,115	2,316	0,240	0,236	13,51
	2	14,106	0,246	895	0,09	9,648	23,960	2,691	0,279	0,272	15,58
	3	15,716	0,274	892	0,09	9,540	26,945	2,984	0,313	0,303	17,37
	Média	14,024				9,609		2,664			<b>15,49</b>
	Desv Pad	1,735				0,059		0,335			1,93
	C Var(%)	12,372				0,619		12,569			12,46

Quadro 2. 23 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXtl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGB	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXtl	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1		0,000	898	0,09	9,983	0,000	0,000	0,000	0,000	
	2	9,828	0,172	908	0,09	9,939	15,167	1,890	0,190	0,188	10,77
	3	9,279	0,162	903	0,09	9,900	14,230	1,776	0,179	0,177	10,17
	Média	9,554				9,940			1,222		<b>10,47</b>
	Desv Pad	0,388				0,042			1,060		0,42
	C Var (%)	4,064				0,419			86,730		4,06

Da figura e dos quadros constata-se que o ângulo de atrito na interface do geotêxtil não tecido agulhado com a geogrelha biaxial (15,49°) é superior ao que ocorre na interface do geotêxtil não tecido termoligado com a mesma geogrelha (10,47°), provavelmente devido à maior deformabilidade do geotêxtil agulhado que facilita um melhor encaixe dos nós da geogrelha na superfície do geotêxtil.

#### Geossintético superior – geogrelha uniaxial

A Figura 2.16 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) – geogrelha uniaxial (GGU); geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) – geogrelha uniaxial (GGU). Os Quadros 2.24 e 2.25 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com o geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) e o geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) como geossintético inferior.

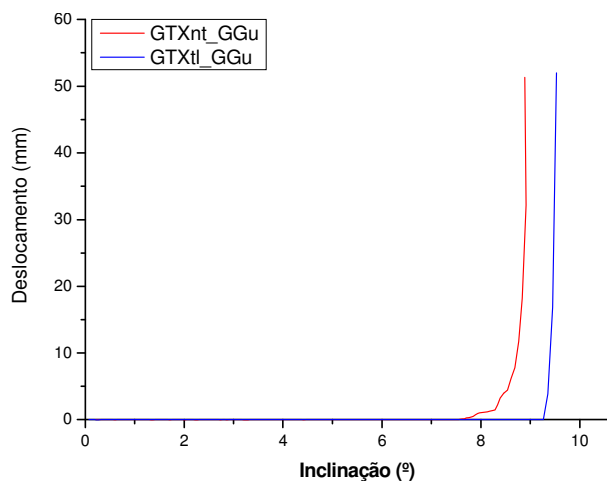


Figura 2. 16– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geotêxteis não tecidos-geogrelha uniaxial.

Observa-se que, embora da mesma ordem de grandeza, o ângulo de atrito mobilizado na interface GTXtl – GGU é superior ao mobilizado na interface GTXnt-GGU. No primeiro caso esse ângulo é de 10,92° e no segundo é de 9,84°.

Quadro 2. 24 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGU	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	8,538	0,149	900	0,09	9,888	12,966	1,628	0,165	0,163	9,35
	2	9,943	0,174	903	0,09	9,880	15,362	1,903	0,193	0,190	10,90
	3	8,468	0,148	900	0,109	9,891	12,846	1,615	0,163	0,162	9,27
	Média	8,983				9,886		1,715			<b>9,84</b>
	Desv Pad	0,832				0,006		0,162			0,92
	C Var (%)	9,263				0,057		9,457			9,31

Quadro 2. 25 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXtl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGU	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXtl	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	9,181	0,160	899	0,09	9,862	14,062	1,750	0,177	0,176	10,06
	2	10,220	0,178	906	0,09	9,911	15,915	1,964	0,198	0,196	11,21
	3	10,459	0,183	895	0,09	9,779	16,410	1,988	0,203	0,201	11,49
	Média	9,953				9,851		1,900			<b>10,92</b>
	Desv Pad	0,679				0,067		0,131			0,75
	C Var (%)	6,826				0,678		6,880			6,91

É interessante notar que, tal como aconteceu para as interfaces da GGU com as geomembranas o maior valor de ângulo de atrito na interface surge quando o contacto com a geogrelha é uma superfície mais lisa (GML e GTXtl). Embora com justificações distintas este comportamento resulta da estrutura da geogrelha uniaxial. No presente caso, os nós da extrusão da geogrelha associados á rigidez do

material provocam o rompimento da ligação mecânica dos filamentos do geotêxtil, diminuindo a resistência mobilizada.

**Geossintético superior – geotêxtil tecido**

A Figura 2.17 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) – geotêxtil tecido (GTX); geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) – geotêxtil tecido (GTX). Os Quadros 2.26 e 2.27 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com o geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) e o geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) como geossintético inferior.

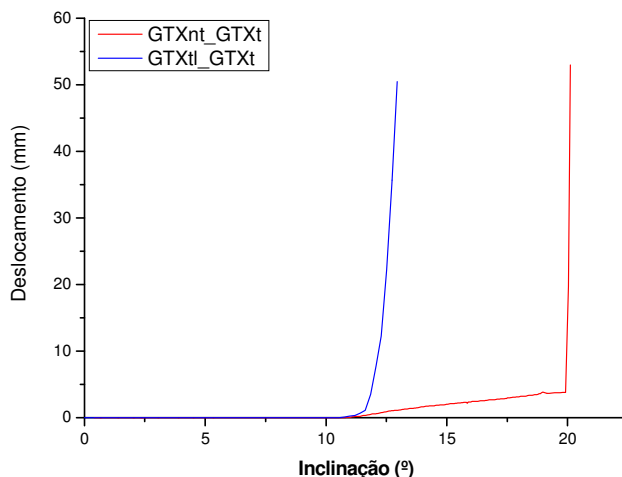


Figura 2. 17– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geotêxteis não tecidas-geotêxtil tecido.

Quadro 2. 26 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXt	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	19,144	0,334	900	0,09	9,447	32,382	3,639	0,385	0,368	21,07
	2	21,053	0,367	901	0,09	9,339	35,482	3,989	0,427	0,404	23,13
	3	20,15	0,352	900	0,09	9,386	33,988	3,822	0,407	0,387	22,15
	Média	20,116					9,391		3,817		<b>22,12</b>
	Desv Pad	0,955					0,054		0,175		1,03
	C Var (%)	4,749					0,577		4,585		4,66

Quadro 2. 27 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXtl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXt	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXtl	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	13,288	0,232	897	0,09	9,704	22,266	2,539	0,262	0,256	14,66
	2	12,782	0,223	898	0,09	9,735	21,219	2,444	0,251	0,246	14,09
	3	12,774	0,223	896	0,09	9,714	21,201	2,438	0,251	0,246	14,09
	Média	12,948				9,718		2,474			<b>14,28</b>
	Desv Pad	0,294				0,016		0,057			0,33
	C Var (%)	2,274				0,163		2,292			2,31

Verifica-se que o ângulo de atrito na interface GTXnt-GTX é de 22,12° e que o valor do mesmo parâmetro na interface GTXtl-GTX é de 14,28°. A redução de cerca de 35,4% do ângulo de atrito da interface GTXtl-GTX em relação ao valor encontrado na interface GTXnt-GTX resulta da maior rugosidade do GTXnt em relação ao GTXtl.

#### Geossintético superior – geotapete

A Figura 2.18 mostra a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) – geotapete (GTAP); geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) – geotapete (GTAP). Os Quadros 2.28 e 2.29 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com o geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) e o geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) como geossintético inferior.

Da figura e dos quadros conclui-se que a interface mais resistente é a GTXnt-GTAP, sendo o ângulo de atrito na interface de 23,17°. Na interface GTXtl-GTAP o valor do ângulo de atrito é de 18,14°, isto é cerca de 27,7% menor do que no caso anterior.

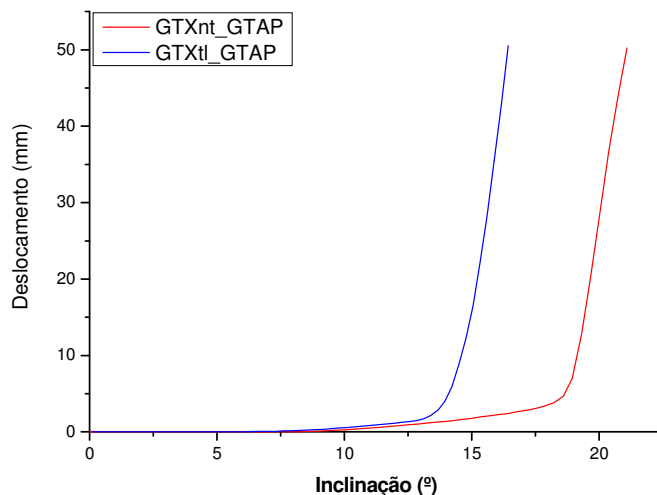


Figura 2. 18– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces geotêxteis não tecidos-geotapete.

Quadro 2. 28 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	20,727	0,362	898	0,09	9,337	34,943	3,921	0,420	0,398	22,78
	2	20,865	0,364	895	0,09	9,293	35,171	3,933	0,423	0,400	22,94
	3	21,669	0,378	897	0,09	9,267	36,500	4,087	0,441	0,415	23,80
	Média	21,087				9,299		3,981			<b>23,17</b>
	Desv Pad	0,508				0,035		0,093			0,55
	C Var (%)	2,411				0,380		2,327			2,37

Quadro 2. 29 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXtl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXtl	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	15,767	0,275	895	0,09	9,574	27,026	3,003	0,314	0,304	17,42
	2	17,117	0,299	894	0,09	9,496	29,168	3,248	0,342	0,330	18,89
	3	16,422	0,287	894	0,09	9,532	28,066	3,121	0,327	0,316	18,13
	Média	16,435				9,534		3,124			<b>18,14</b>
	Desv Pad	0,675				0,039		0,123			0,73
	C Var (%)	4,109				0,412		3,922			4,05

Geossintético superior – geotêxtil não tecido termoligado

A Figura 2.19 mostra a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para a interface geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) – geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl). O Quadro 2.30 apresenta os resultados do ensaio de corte em plano inclinado para a mesma interface.

Observa-se que o ângulo de atrito na interface GTXnt-GTXtl é de 18,56°.

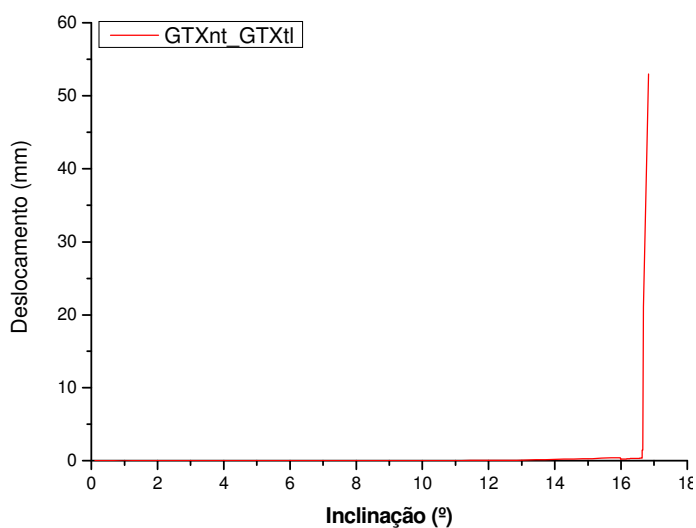


Figura 2. 19– Curvas deslocamento/inclinação para a interface GTXnt-GTXtl.

Quadro 2. 30 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTXtl	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	16,480	0,288	904	0,09	9,633	28,157	3,163	0,328	0,317	18,18
	2	16,901	0,295	902	0,09	9,588	28,825	3,234	0,337	0,325	18,64
	3	17,111	0,299	902	0,09	9,575	29,158	3,272	0,342	0,329	18,86
	Média	16,831					9,599		3,223		<b>18,56</b>
	Desv Pad	0,321					0,030		0,055		0,35
	C Var (%)	1,910					0,314		1,719		1,89

### Comparação de resultados

No Quadro 2.31 compara-se os valores dos ângulos de atrito nas interfaces geotêxteis não tecidos-geossintéticos superiores estudados.

Tal como observado anteriormente, o comportamento das interfaces da geogrelha uniaxial com os geotêxteis não tecidos é o oposto do dos restantes geossintéticos superiores considerados.

Para os restantes geossintéticos observa-se uma maior eficácia na mobilização da resistência na interface com o geotêxtil não tecido agulhado do que com o geotêxtil não tecido termoligado.

Excluindo as geogrelhas verifica-se que a interface com o geotêxtil não tecido agulhado mais resistente ocorre com o geotapete e a menos resistente dá-se com o geotêxtil não tecido termoligado. Em valor absoluto a interface menos resistente ocorre entre o geotêxtil termoligado e o geotêxtil tecido.

Quadro 2. 31 – Comparação dos ângulos de atrito nas interfaces com os geotêxteis não tecidos

<b>Geossintético Superior</b>	<b>Ângulo de Atrito (°)</b>		<b>Acréscimo (%)</b>
	Geotêxtil não tecido (GT) Inferior		
	GT agulhado	GT termoligado	
Geogrelha biaxial	15,49°	10,47°	-32,41%
Geogrelha uniaxial	9,84°	10,92°	10,98%
Geotêxtil Tecido	22,12°	14,28°	-35,44%
Geotapete	23,17°	18,14°	-21,71%
Geotêxtil não tecido termoligado	18,56°		

2.6.2.4 – GEOSSINTÉTICOS INFERIORES – GEOTÊXTEIS NÃO TECIDO AGULHADO E TECIDO  
Geossintético superior – geogrelha biaxial

A Figura 2.20 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) – geogrelha biaxial (GGB); geotêxtil tecido (GTXt) – geogrelha biaxial (GGB).

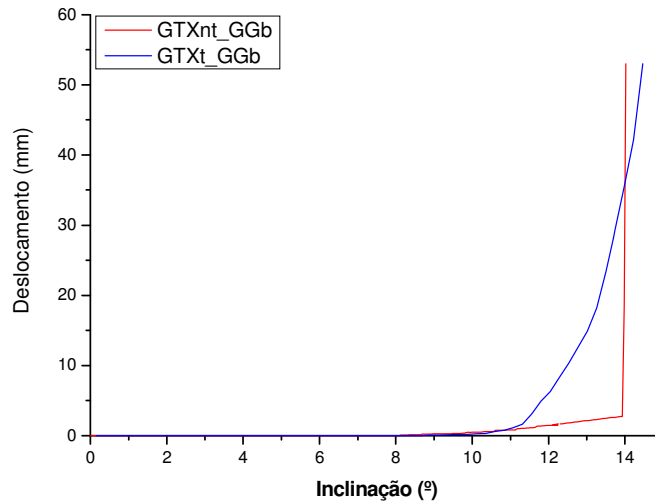


Figura 2. 20– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces da GGB com o GTXnt e com o GTXt.

O Quadro 2.32 apresenta os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil tecido (GTXt). No Quadro 2.32 estão expressos os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt).

Quadro 2. 32 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGB	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	14,303	0,250	900	0,09	9,690	24,367	2,741	0,283	0,276	15,80
	2	15,364	0,268	900	0,09	9,639	26,387	2,942	0,305	0,296	16,97
	3	13,745	0,240	897	0,09	9,683	23,211	2,626	0,271	0,265	15,18
	Média	14,470				9,671		2,770			<b>15,98</b>
	Desv Pad	0,822				0,028		0,160			0,91
	C Var (%)	5,684				0,286		5,761			5,71

Observa-se que a resistência mobilizada nas interfaces do geotêxtil tecido e do geotêxtil não tecido agulhado com geogrelha biaxial é semelhante: 15,98° para o sistema GTXt-GGB, e 15,59° para a interface GTXnt-GGB.

Geossintético superior – geogrelha uniaxial

A Figura 2.21 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) – geogrelha uniaxial (GGU); geotêxtil tecido (GTXt) – geogrelha uniaxial (GGU). O Quadro 2.33 apresenta os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil tecido (GTXt). No Quadro 2.24 estão expressos os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt).

Verifica-se que o ângulo de atrito na interface da geogrelha uniaxial com o geotêxtil tecido é superior ao registado na interface da geogrelha com o geotêxtil não tecido agulhado; 11,50° no primeiro caso e 9,84° no segundo. Este comportamento pode ser justificado pela estrutura do geotêxtil tecido, que sendo mais rígida do que a do geotêxtil não tecido ao ser penetrada pelos nós de extrusão da geogrelha mobiliza resistência, enquanto que no geotêxtil não tecido as ligações entre os filamentos é destruída.

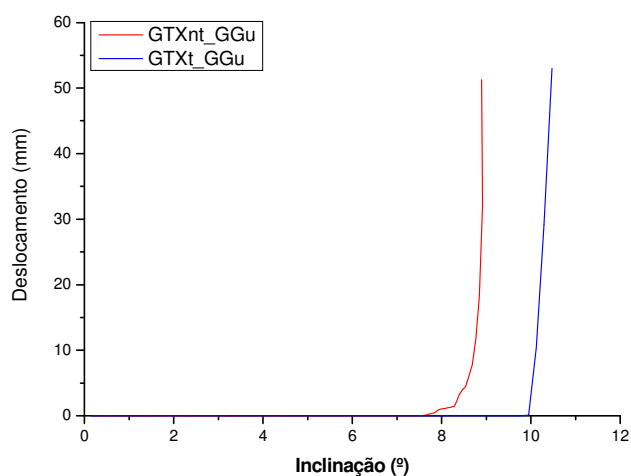


Figura 2. 21– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces da GGU com o GTXnt e com o GTXt.

Quadro 2. 33 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GGU	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	10,357	0,181	897	0,09	9,806	16,199	1,972	0,201	0,198	11,37
	2	10,726	0,187	900	0,09	9,829	16,962	2,050	0,209	0,206	11,78
	3	10,329	0,180	897	0,09	9,802	16,141	1,966	0,201	0,198	11,34
	Média	10,471				9,813		1,996			<b>11,50</b>
	Desv Pad	0,221				0,015		0,047			0,25
	C Var (%)	2,114				0,150		2,357			2,15

### Geossintético superior – geotapete

A Figura 2.22 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt) – geotapete (GTAP); geotêxtil tecido (GTXt) – geotapete (GTAP). O Quadro 2.34 apresenta os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil tecido (GTXt). No Quadro 2.28 estão expressos os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt).

Verifica-se que o valor do ângulo de atrito mobilizado na interface GTXnt-GTAP (23,17°), é um pouco inferior ao valor atingido no sistema GTXt-GTAP (25,17°).

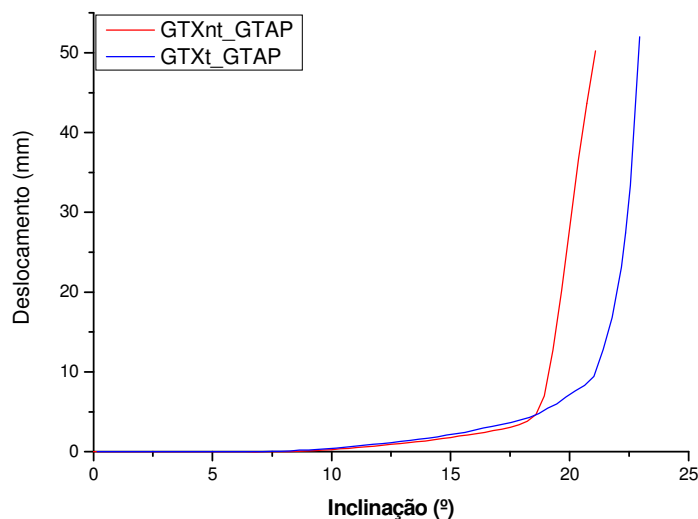


Figura 2. 22– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces da GTAP com o GTXnt e com o GTXt.

Quadro 2. 34 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	MD	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	23,287	0,406	897	0,09	9,159	39,177	4,377	0,478	0,446	25,54
	2	22,357	0,390	902	0,09	9,272	37,639	4,232	0,456	0,428	24,53
	3	23,197	0,405	898	0,09	9,176	39,027	4,366	0,476	0,444	25,44
	Média	22,947				9,202		4,325			<b>25,17</b>
	Desv Pad	0,513				0,061		0,081			0,56
	C Var (%)	2,234				0,660		1,873			2,22

### Comparação de resultados

No Quadro 2.35 compara-se os valores dos ângulos de atrito nas interfaces geotêxteis não tecido agulhado e geotêxtil tecido com os geossintéticos superiores estudados.

A maior diferença no comportamento das interfaces observa-se quando o geossintético superior é uma geogrelha uniaxial (16,87%). Embora para os restantes geossintéticos superiores considerados a resistência das suas interfaces seja superior quando em contacto com o geotêxtil tecido, o acréscimo observado é pouco significativo em particular quando o geossintético superior é uma geogrelha biaxial.

Quadro 2. 35 – Comparação dos ângulos de atrito nas interfaces com os geotêxteis não tecido agulhado e tecido

Geossintético Superior	Ângulo de Atrito (°)		Acréscimo (%)
	Geotêxtil Inferior		
	GT não tecido agulhado	GT tecido	
Geogrelha biaxial	15,49	15,98	3,16%
Geogrelha uniaxial	9,84	11,50	16,87%
Geotapete	23,17	25,17	8,63%

#### 2.6.2.5 – GEOSSINTÉTICOS INFERIORES – GEOTÊXTEIS NÃO TECIDO TERMOLIGADO E TECIDO

##### Geossintético superior – geogrelha biaxial

A Figura 2.23 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido agulhado (GTXtl) – geogrelha biaxial (GGB); geotêxtil tecido (GTXt) – geogrelha biaxial (GGB). Os Quadros 2.23 e 2.32 apresentam, respectivamente, os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) e o geotêxtil tecido (GTXt).

O valor médio mais elevado para o ângulo de atrito foi mobilizado na interface GTXt-GGB, de valor igual a 15,98°, já no caso da interface GTXtl-GGB o ângulo de atrito sofreu um decréscimo de 34,48%, sendo o valor igual a 10,47°.

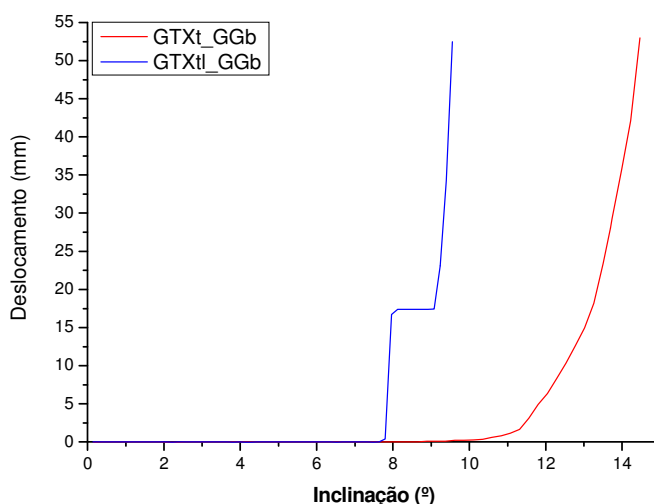


Figura 2. 23– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces da GGB com o GTXtl e com o GTXt.

### Geossintético superior – geogrelha uniaxial

A Figura 2.24 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) – geogrelha uniaxial (GGU); geotêxtil tecido (GTXt) – geogrelha uniaxial (GGU). Os Quadros 2.25 e 2.33 apresentam, respectivamente, os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) e o geotêxtil tecido (GTXt).

O ângulo de atrito mobilizado na interface da geogrelha com o geotêxtil tecido é maior do que o mobilizado na interface da geogrelha com o geotêxtil não tecido termoligado. No primeiro caso o valor do parâmetro é de  $11,50^\circ$  e no segundo de  $10,92^\circ$ .

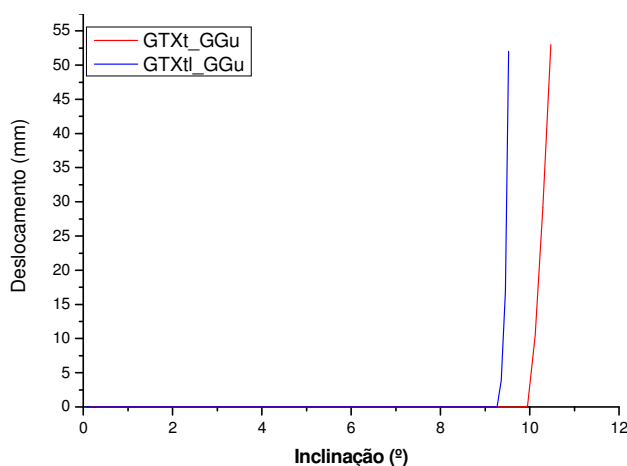


Figura 2. 24– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces da GGU com o GTXtl e com o GTXt

### Geossintético superior – geotapete

A Figura 2.25 apresenta a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as seguintes interfaces geossintético-geossintético: geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) – geotapete (GTAP); geotêxtil tecido (GTXt) – geotapete (GTAP). Os Quadros 2.29 e 2.34 apresentam, respectivamente, os resultados do ensaio de corte em plano inclinado com o geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) e o geotêxtil tecido (GTXt).

O valor médio máximo de ângulo de atrito foi registado na interface geotêxtil tecido – geotapete ( $25,17^\circ$ ). O valor do ângulo de atrito na interface geotêxtil termoligado-geotapete foi de  $18,14^\circ$ .

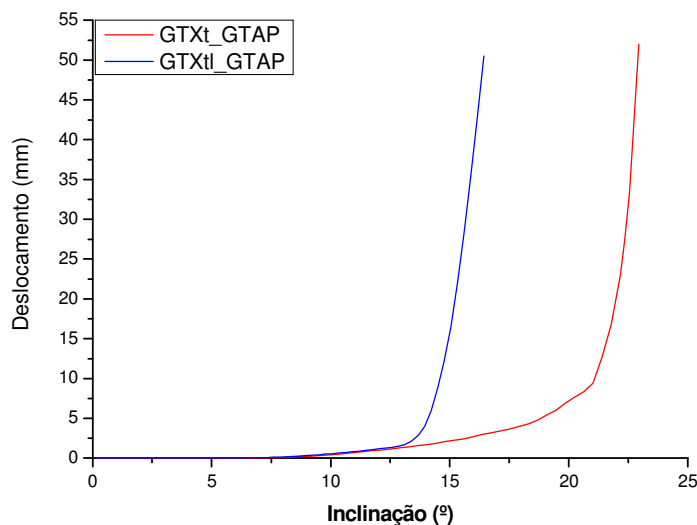


Figura 2. 25– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces da GTAP com o GTXtl e com o GTXt

### Comparação de resultados

No Quadro 2.36 compara-se os valores dos ângulos de atrito nas interfaces geotêxteis não tecido termoligado e geotêxtil tecido com os geossintéticos superiores estudados.

Ao contrário do que se observa quando se compara o geotêxtil não tecido agulhado com o geotêxtil tecido como geossintéticos inferiores. No presente caso a menor diferença no comportamento das interfaces observa-se quando o geossintético superior é uma geogrelha uniaxial (5,31%). Para os restantes geossintéticos superiores considerados a resistência das suas interfaces é notoriamente superior quando em contacto com o geotêxtil tecido.

Quadro 2. 36 – Comparação dos ângulos de atrito nas interfaces com os geotêxteis não tecido termoligado e tecido

Geossintético Superior	Ângulo de Atrito (°)		Acréscimo (%)
	Geotêxtil (GT) Inferior		
	GT não tecido termoligado	GT tecido	
Geogrelha biaxial	10,47	15,98	52,62%
Geogrelha uniaxial	10,92	11,50	5,31%
Geotapete	18,14	25,17	38,75%

### 2.6.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Quadro 2.37 resume os resultados obtidos, em termos de ângulo de atrito na interface, no estudo relativo á influência da estrutura do geossintético na interação geossintético-geossintético em plano inclinado.

Quadro 2. 37 – ângulo de atrito nas interfaces geossintético-geossintético – Resumo de resultados

Geossintéticos Superiores	Geossintéticos Inferiores				
	Geomembrana Lisa	Geomembrana Texturada	Geotêxtil agulhado	Geotêxtil Termoligado	Geotêxtil Tecido
Geogrelha biaxial	11,16 °	19,30 °	15,49 °	10,47 °	15,98 °
Geogrelha uniaxial	22,74 °	16,32 °	<b>9,84 °</b>	10,92 °	11,5 °
Geotêxtil Tecido	17,04 °	<b>35,27 °</b>	22,12 °	14,28 °	
Geotêxtil agulhado	15,49 °	30,42 °			
Geotêxtil termoligado	14,68 °	21,37 °	18,56 °		
Geotapete			23,17	18,14	25,17

Verifica-se que o maior valor da resistência ocorre para a interface geotêxtil tecido- geomembrana texturada e que o menor valor da resistência se verifica para a interface geogrelha uniaxial-geotêxtil agulhado, neste último caso devido à rotura da ligação dos filamentos do geotêxtil pelos nós de extrusão da geogrelha.

Dentro dos geotêxteis o que apresenta, em geral, melhor comportamento nas interfaces é o geotêxtil tecido, embora não sendo globalmente muito significativas as diferenças observadas quando o geotêxtil é não tecido agulhado. O geotêxtil termoligado é de todos os geotêxteis aquele que apresenta menor resistência nas interfaces.

## 2.7 –INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO

### 2.7.1 – INTRODUÇÃO

A granulometria do solo é um dos factores que afecta o comportamento das interfaces solo-geossintético. A influência desta característica do solo foi estudada por alguns autores, de entre os quais, Pinho Lopes (1998), Lopes e Lopes (1999a, b).

Com o objectivo de avaliar a influência da granulometria do solo no mecanismo de interacção solo-geossintético, foram usados os solos caracterizados em 2.2.

Segundo Costa Lopes (2000), a utilização de dois solos distintos implica que parâmetros como os ângulos de atrito e de pico e residual e os pesos volúmicos máximos e mínimo do solo sejam distintos, podendo estas diferenças introduzir alterações em mais do que um parâmetro determinante no

comportamento. Por isso, nos ensaios que realizou procurou que os solos apresentassem o mesmo índice de compactidade, ajustando os modos de colocação e compactação dos solos na caixa. O mesmo procedimento foi seguido neste trabalho. Todos os ensaios foram realizados sob idênticas condições. Foram seguidas as metodologias de ensaio 1 e 2. Os solos utilizados foram o Solo 1(areia) e o Solo 2 (saibro), a tensão de confinamento ao nível da interface foi de 10kPa e o índice de compactidade dos solos era de 50%.

### 2.7.2 – INTERFACES SOLO-GEOTÊXTIL

Na Figura 2.26 comparam-se as variações do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para as interfaces Solo 1(Areia)-geotêxtil e Solo 2(Saibro)-geotêxtil.

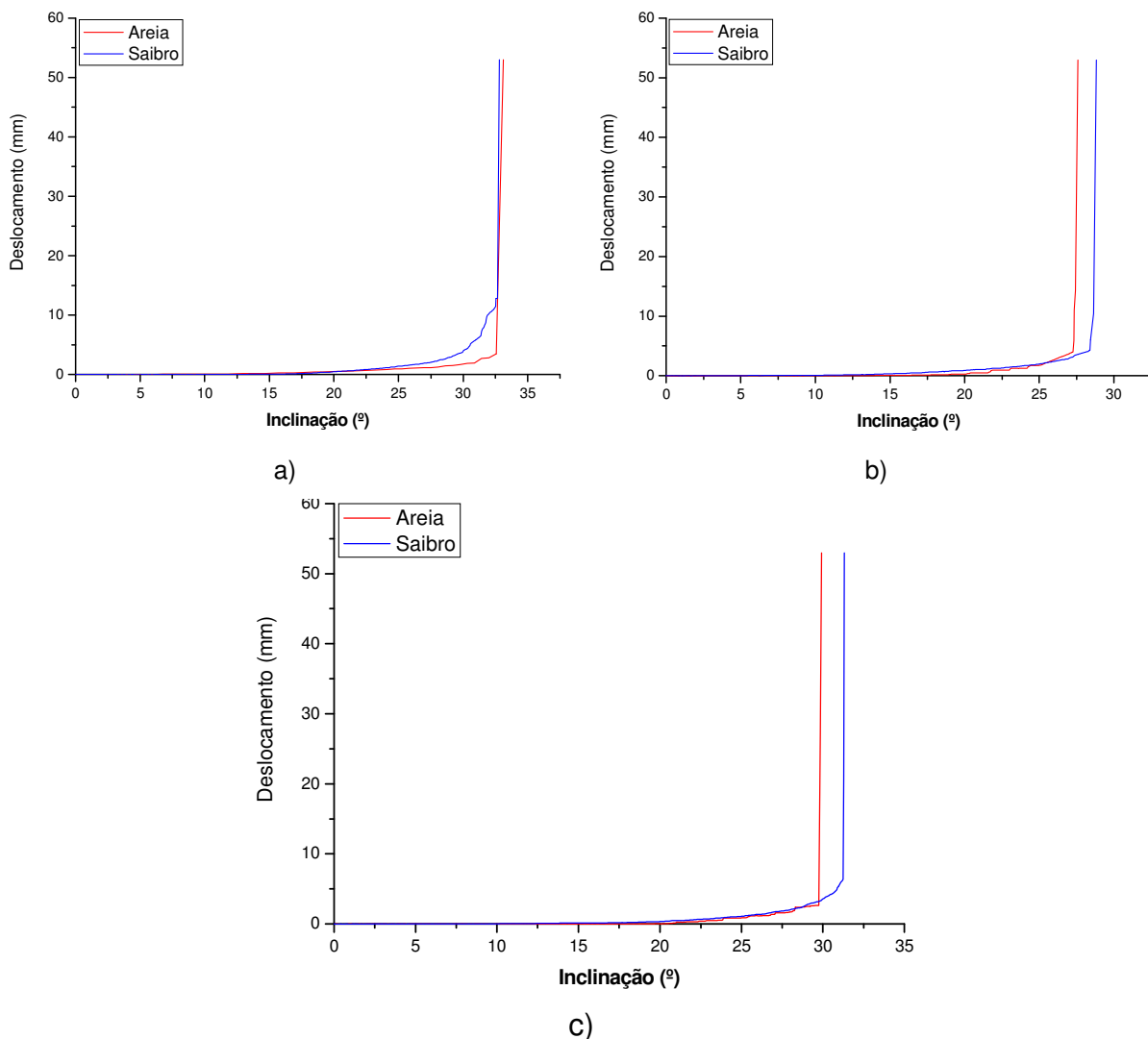


Figura 2. 26– Curvas deslocamento/inclinação para as interfaces Solos (1 e 2) – geotêxtil: a) não tecido agulhado; b) não tecido termoligado; c) tecido.

Os Quadros 2.38 a 2.40 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente para as interfaces com o Solo 2 (saibro) do geotêxtil não tecido agulhado (GTXnt), do geotêxtil não tecido termoligado (GTXtl) e do geotêxtil tecido (GTXt).

Analisando os Quadros 2.38 a 2.40, verifica-se que o melhor comportamento da interface solo-geossintético ocorre quando o geotêxtil é não tecido agulhado (o ângulo de atrito médio na interface é de 35,62°), na mesma interface mas com o Solo 1, o ângulo de atrito médio é de 35,95°. O pior comportamento verifica-se para a interface Solo 2-geotêxtil não tecido termoligado (31,45°), sofrendo um decréscimo de 4,3% no caso da interface ser com o Solo 1 (30,12°). O ângulo de atrito na interface Solo 2-geotêxtil tecido 2 é superior ao da interface do Solo 1 com o mesmo geotêxtil, sendo o valor médio do ângulo de atrito no primeiro caso de 34,05° e no segundo caso de 32,60°.

Quadro 2. 38 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	GTXt	<b>Geossintético Inferior</b>	-	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	29,205	0,510	899	0,09	8,722	48,688	5,416	0,621	0,556	31,84
	2		0,000	899	0,09	9,988	0,000	0,000	0,000	0,000	
	3	30,640	0,535	897	0,09	8,574	50,967	5,645	0,658	0,582	33,36
	Média	29,923				9,094		3,687			32,60
	Desv Pad	1,015				0,777		3,195			1,07
	C Var (%)	3,391				8,546		86,658			3,30

Quadro 2. 39 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	GTXnt	<b>Geossintético Inferior</b>	-	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	33,235	0,580	898	0,09	8,341	55,087	6,078	0,729	0,630	36,08
	2	32,823	0,573	897	0,09	8,379	54,433	6,009	0,717	0,622	35,65
	3	33,281	0,581	901	0,09	8,365	55,160	6,104	0,730	0,630	36,12
	Média	33,113				8,362		6,064			35,95
	Desv Pad	0,252				0,019		0,049			0,26
	C Var (%)	0,761				0,226		0,804			0,72

Quadro 2. 40 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXtl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	GTXtl	<b>Geossintético Inferior</b>	-	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	27,575	0,481	903	0,09	8,892	46,100	5,156	0,580	0,525	30,11
	2	29,554	0,516	896	0,09	8,660	49,242	5,457	0,630	0,562	32,22
	3	25,628	0,447	899	0,09	9,005	43,007	4,798	0,533	0,490	28,05
	Média	27,586					8,852		5,137		30,12
	Desv Pad	1,963					0,176		0,330		2,09
	C Var (%)	7,116					1,989		6,427		6,92

Quadro 2. 41 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 2	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	GTXnt	<b>Geossintético Inferior</b>	-	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	32,649	0,570	896	0,09	8,379	54,156	5,971	0,713	0,619	35,47
	2	32,700	0,571	900	0,09	8,413	54,238	6,004	0,714	0,620	35,51
	3	33,059	0,577	900	0,09	8,379	54,808	6,063	0,724	0,626	35,89
	Média	32,803					8,391		6,013		35,62
	Desv Pad	0,224					0,020		0,047		0,23
	C Var(%)	0,682					0,234		0,777		0,64

Quadro 2. 42 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXntl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 2	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	GTXntl	<b>Geossintético Inferior</b>	-	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	28,633	0,500	897	0,09	8,750	47,779	5,308	0,607	0,545	31,24
	2	28,553	0,498	898	0,09	8,769	47,651	5,301	0,605	0,544	31,15
	3	29,330	0,512	903	0,09	8,744	48,886	5,456	0,624	0,558	31,96
	Média	28,838					8,754		5,355		31,45
	Desv Pad	0,428					0,013		0,088		0,44
	C Var(%)	1,483					0,145		1,637		1,41

Quadro 2. 43 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 2	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	1
<b>Geossintético Superior</b>	GTXt	<b>Geossintético Inferior</b>	-	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	30,945	0,540	895	0,09	8,531	51,450	5,687	0,667	0,588	33,69
	2	31,657	0,553	898	0,09	8,494	52,581	5,821	0,685	0,601	34,42
	3	31,299	0,546	898	0,09	8,526	52,013	5,762	0,676	0,594	34,05
	Média	31,300					8,517		5,757		34,05
	Desv Pad	0,356					0,020		0,068		0,37
	C Var(%)	1,138					0,238		1,174		1,09

No Quadro 2.41 compara-se os valores dos ângulos de atrito nas interfaces Solo 1 –geotêxtil e Solo 2 – geotêxtil.

Para os geotêxteis não tecido termoligado e tecido verifica-se um aumento idêntico do ângulo de atrito na interface com o Solo 2 em relação ao valor desse mesmo ângulo na interface com o Solo 1. Quando o geotêxtil é não tecido agulhado observa-se uma redução pouco significativa (0,9%) do ângulo de atrito quando a interface é com o Solo 2. Porém, é nas interfaces deste geotêxtil com os solos que se mobiliza maior valor médio do ângulo de atrito.

Quadro 2. 44 – Comparação dos ângulos de atrito nas interfaces Solo-geotêxtil

Geotêxteis	Solos		Variação (%)
	Solo 1	Solo 2	
Agulhado	35,95 °	35,62 °	-0,9%
Termoligado	30,12 °	31,45 °	4,4%
Tecido	32,6 °	34,05 °	4,4%

Para os geotêxteis não tecido termoligado e tecido verifica-se um aumento idêntico do ângulo de atrito na interface com o Solo 2 em relação ao valor desse mesmo ângulo na interface com o Solo 1. Quando o geotêxtil é não tecido agulhado observa-se uma redução pouco significativa (0,9%) do ângulo de atrito quando a interface é com o Solo 2. Porém, é nas interfaces deste geotêxtil com os solos que se mobiliza maior valor médio do ângulo de atrito.

A estrutura mais solta do geotêxtil não tecido agulhado que permite um contacto mais eficaz com os solos, não se notando por isso influência significativa da granulometria do solo. No caso dos outros geotêxteis considerados o mesmo não acontece, daí que a granulometria mais extensa do Solo 2 (comparada com a do Solo 1) conduza a uma maior superfície de contacto nas interfaces tendo como resultado o acréscimo da resistência das mesmas.

### 2.7.3 – INTERFACES GEOSSINTÉTICO-GEOSSINTÉTICO

#### 2.7.3.1 - INTRODUÇÃO

Ao longo do Capítulo 3 o estudo do comportamento das interfaces geossintético-geossintético em corte em plano inclinado foi desenvolvido com a caixa superior do equipamento totalmente preenchida por um bloco de madeira (MD). Porém, considerou-se de interesse avaliar a influência do preenchimento dessa mesma caixa com solo no comportamento das referidas interfaces. Todos os ensaios foram realizados nas condições indicadas em 2.7.1.

#### 2.7.3.2 – GEOMEMBRANA LISA – GEOTÊXTEL NÃO TECIDO AGULHADO

Na Figura 2.27 compara-se a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para a interface geomembrana lisa-geotêxtil não tecido agulhado com a caixa superior preenchida com madeira (MDF), Solo 1 (areia) e Solo 2 (saibro). Os Quadros 2.42 e 2.43 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com Solo 1 e Solo 2.

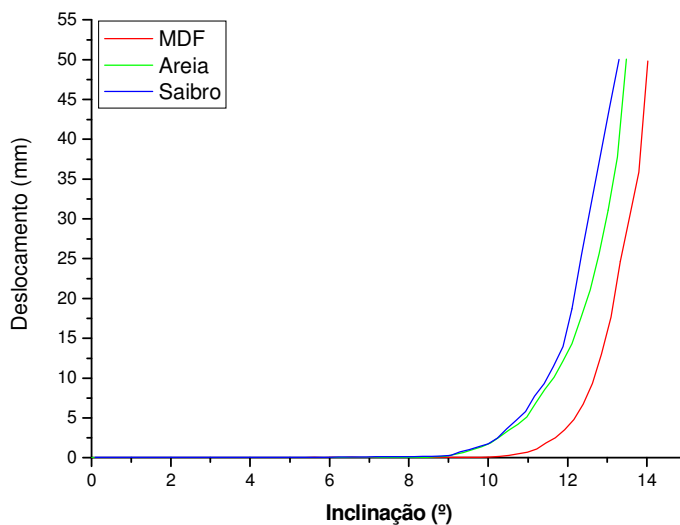


Figura 2. 27– Curvas deslocamento/inclinação para a interface geomembrana lisa-geotêxtil não tecido agulhado para diferentes tipos de preenchimento da caixa superior.

Quadro 2. 45 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GML	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)	
10	1	12,219	0,213	900	0,09	9,776	20,054	2,340	0,239	0,235	13,46	
	2	15,400	0,269	899	0,09	9,633	26,444	2,947	0,306	0,297	17,01	
	3	13,547	0,236	898	0,09	9,698	22,803	2,590	0,267	0,261	14,95	
	Média	13,722					9,703		2,626			15,14
	Desv Pad	1,597					0,072		0,305			1,78
	C Var(%)	11,640					0,742		11,618			11,77

Quadro 2. 46 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 2	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GML	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	13,914	0,243	899	0,09	9,695	23,561	2,664	0,275	0,268	15,36
	2	13,461	0,235	898	0,09	9,699	22,625	2,573	0,265	0,259	14,86
	3	13,073	0,228	898	0,09	9,714	21,821	2,498	0,257	0,252	14,42
	Média	13,483					9,703		2,578		14,88
	Desv Pad	0,421					0,010		0,083		0,47
	C Var(%)	3,122					0,105		3,212		3,16

O menor valor médio do ângulo de atrito é obtido na interface geomembrana lisa – geotêxtil não tecido agulhado com Solo 2 (14,88°), com o Solo 1 o valor sofre um acréscimo de 1,71%, sendo o ângulo de atrito mobilizado igual a 15,14°. De notar que o maior valor registado para este parâmetro ocorre quando a caixa superior está preenchida com madeira (15,49°).

### 2.7.3.3 - GEOSSINTÉTICO SUPERIOR – GEOTAPETE

#### Geossintético inferior – geotêxtil não tecido agulhado

Nas Figura 2.28 compara-se as variações do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para a interface geotêxtil não tecido agulhado-geotapete com preenchimento da caixa superior com os Solos 1 e 2 e com o bloco de madeira. Os Quadros 2.44 e 2.45 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado, respectivamente com o Solo 1 e o Solo 2.

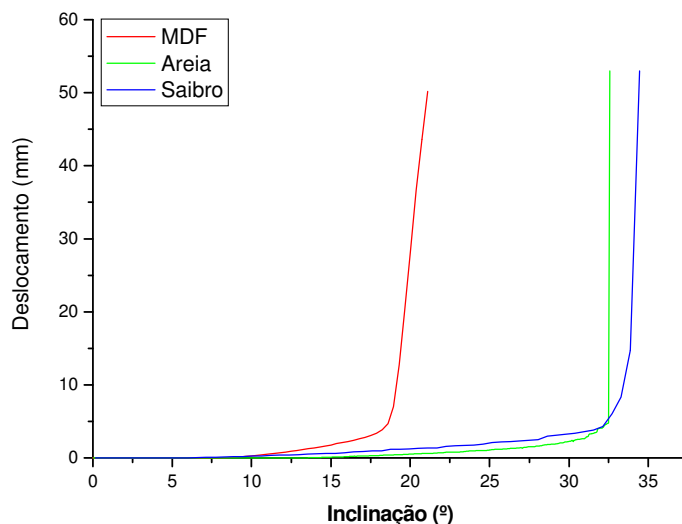


Figura 2. 28– Curvas deslocamento/inclinação para a interface geotêxtil não tecido agulhado-geotapete para diferentes tipos de preenchimento da caixa superior.

Quadro 2. 47 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	33,202	0,579	894	0,09	8,314	55,036	6,053	0,728	0,629	36,05
	2	32,678	0,570	896	0,09	8,383	54,202	5,980	0,713	0,620	35,50
	3	31,831	0,556	877	0,09	8,278	52,857	5,726	0,692	0,605	34,67
	Média	32,570				8,325		5,920			35,41
	Desv Pad	0,692				0,053		0,171			0,70
	C Var(%)	2,125				0,639		2,895			1,96

Quadro 2. 48 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXnt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 2	<b>Tensão Confinamento</b>	10Kpa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXnt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	34,677	0,605	886	0,09	8,097	57,377	6,239	0,771	0,657	37,62
	2	34,710	0,606	899	0,09	8,211	57,429	6,326	0,770	0,656	37,61
	3	33,969	0,593	898	0,09	8,271	56,253	6,198	0,749	0,643	36,84
	Média	34,452				8,193		6,254			37,36
	Desv Pad	0,418				0,089		0,065			0,44
	C Var(%)	1,214				1,081		1,046			1,19

Da figura e dos quadros constata-se, que o ângulo de atrito na interface do geotêxtil não tecido agulhado com o geotapete é superior quando a caixa superior está preenchida com Solo 2 (37,36°). No caso do preenchimento ser com o Solo 1, o ângulo de atrito médio mobilizado na interface é de 35,41°. O menor ângulo de atrito mobilizado na interface ocorre quando o preenchimento da caixa é feito com madeira.

#### Geossintético inferior – geotêxtil não tecido termoligado

Na Figura 2.29 compara-se as variações do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para a interface geotêxtil não tecido termoligado-geotapete com preenchimento da caixa superior com os Solos 1 e 2 e com o bloco de madeira.

Os Quadros 2.46 e 2.47 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado para a interface GTXtl-GTAP, respectivamente com o Solo 1 e o Solo 2.

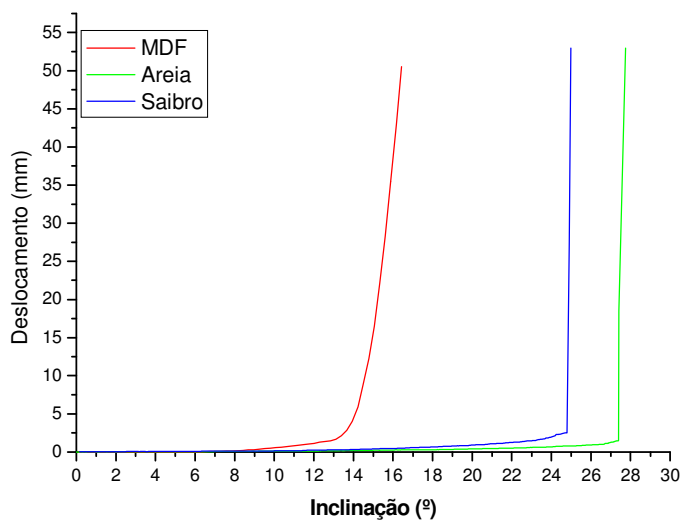


Figura 2. 29– Curvas deslocamento/inclinação para a interface geotêxtil não tecido termoligado-geotapete para diferentes tipos de preenchimento da caixa superior.

Quadro 2. 49 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXntl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXntl	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	27,227	0,475	894	0,09	8,835	45,547	5,052	0,572	0,519	29,76
	2	28,083	0,490	890	0,09	8,727	46,906	5,178	0,593	0,535	30,68
	3	27,957	0,488	884	0,09	8,673	46,705	5,122	0,591	0,533	30,57
	Média	27,756				8,745		5,117			30,34
	Desv Pad	0,462				0,083		0,063			0,50
	C Var(%)	1,664				0,944		1,230			1,65

Quadro 2. 50 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXntl)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 2	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXntl	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	24,353	0,425	898	0,09	9,094	40,940	4,571	0,503	0,466	26,69
	2	25,235	0,440	896	0,09	9,009	42,383	4,717	0,524	0,482	27,64
	3	25,376	0,443	900	0,09	9,039	42,607	4,761	0,527	0,485	27,78
	Média	24,988					9,047		4,683		27,37
	Desv Pad	0,554					0,043		0,099		0,59
	C Var(%)	2,219					0,478		2,121		2,17

É de salientar que o comportamento verificado na interface geotêxtil não tecido termoligado-geotapete é o oposto ao da interface anteriormente estudada. Neste caso o maior ângulo de atrito médio é mobilizado na interface quando o solo de preenchimento é Solo 1 (30,34°), decrescendo 9,8% quando o ensaio decorre com o Solo 2.

#### Geossintético inferior – geotêxtil tecido

A Figura 2.30 mostra a variação do deslocamento da caixa superior com a inclinação da base rígida, em termos de curvas médias, para a interface geotêxtil tecido-geotapete. Os Quadros 2.48 e 2.49 apresentam os resultados do ensaio de corte em plano inclinado para a interface em estudo, respectivamente com Solo 1 e Solo2.

Da figura e dos quadros conclui-se que a interface mais resistente é a GTXt-GTAP quando ensaiado com o Solo 2 (33,49°). Na mesma interface mas com o Solo 1, o valor do ângulo de atrito, embora da mesma ordem de grandeza, decresce 3,91% em relação ao anterior (32,18°).

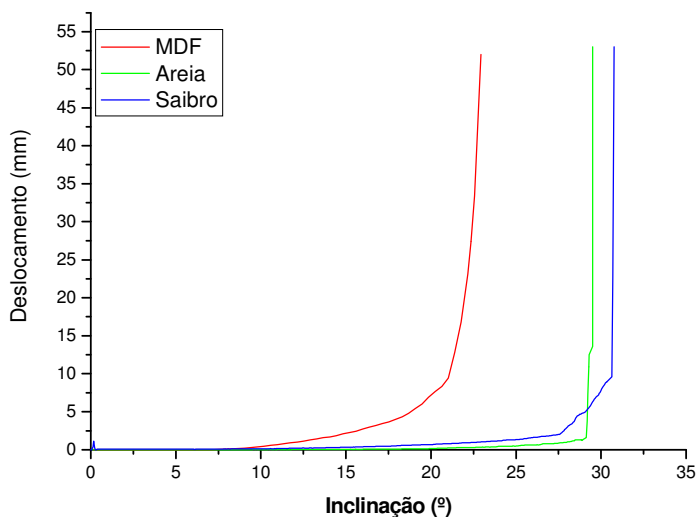


Figura 2. 30– Curvas deslocamento/inclinação para a interface geotêxtil tecido-geotapete para diferentes tipos de preenchimento da caixa superior.

Quadro 2. 51 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 1	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	29,498	0,515	890	0,09	8,603	49,153	5,413	0,629	0,562	32,18
	2	29,357	0,512	901	0,09	8,722	48,929	5,449	0,625	0,558	32,00
	3	29,691	0,518	894	0,09	8,627	49,459	5,468	0,634	0,565	32,37
	Média	29,515				8,650		5,444			32,18
	Desv Pad	0,168				0,063		0,028			0,19
	C Var(%)	0,568				0,727		0,519			0,58

Quadro 2. 52 - Resultados dos ensaios de Corte em Plano Inclinado (GTXt)

<b>Preenchimento da Caixa</b>	Solo 2	<b>Tensão Confinamento</b>	10kPa	<b>Metodologia</b>	2
<b>Geossintético Superior</b>	GTAP	<b>Geossintético Inferior</b>	GTXt	<b>ID(%)</b>	50

Pressão	Provetes	$\beta$ (°)	$\beta$ (rad)	Fv (N)	A (m2)	$\sigma_n$ (kPa)	f( $\beta$ ) (N)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma_n$	$\phi_{sg}$ (rad)	$\phi_{sg}$ (°)
10	1	30,337	0,529	897	0,09	8,602	50,486	5,595	0,650	0,577	33,04
	2	31,376	0,548	907	0,09	8,606	52,136	5,827	0,677	0,595	34,10
	3	30,575	0,534	891	0,09	8,522	50,863	5,600	0,657	0,581	33,31
	Média	30,763					8,577		5,674		33,49
	Desv Pad	0,544					0,048		0,133		0,55
	CVar(%)	1,770					0,556		2,340		1,65

### Comparação de resultados

Nos Quadros 2.50 e 2.51 comparam-se os valores dos ângulos de atrito na interface geossintético-geossintético com o preenchimento da caixa superior com os Solos 1 e 2.

Como já havia sido concluído na análise dos resultados da interface solo-geossintético, na interface geossintético-geossintético o preenchimento da caixa superior com Solo 2 conduz a uma resistência na interface superior do que quando é usado o Solo 1. Só no caso GTXntl-GTAP o comportamento é o oposto, tendo sido nesta mesma interface verificado o menor valor médio do ângulo de atrito quando o solo de preenchimento era Solo 2 (27,37°). Este comportamento provavelmente resulta da superfície mais lisa e da estrutura mais densa características do geotêxtil não tecido termoligado e da maior percentagem de finos e da melhor graduação do Solo 2 em relação ao Solo 1 (ver Figura 2.1) que ao penetrarem com maior facilidade na estrutura aramada do geotapete conduzem a uma interface mais lisa.

Quadro 2. 53 – Comparação dos ângulos de atrito na interface geomembrana lisa – geotêxtil não tecido termoligado

<b>Geossintético Inferior</b>	<b>Geossintético Superior</b>		<b>Varição (%)</b>
	<b>Geotêxtil termoligado</b>		
	<b>Solo de preenchimento</b>		
	<b>Solo 1</b>	<b>Solo 2</b>	
<b>Geomembrana Lisa</b>	14,88	15,14	1,70%

Quadro 2. 54 – Comparação dos ângulos de atrito nas interfaces geotextil – geotapete

Geossintéticos Inferiores	Geossintético Superior Geotapete		Variação (%)
	Solo de preenchimento		
	Solo 1	Solo 2	
<b>Geotêxtil agulhado</b>	35,41°	<b>37,36°</b>	5,51%
<b>Geotêxtil termoligado</b>	30,34	27,37°	-9,79%
<b>Geotêxtil Tecido</b>	32,18°	33,49°	4,07%

O maior valor absoluto de ângulo de atrito foi mobilizado na interface GTXnt-GTAP quando o solo de preenchimento era o Solo 2 (37,36°).

Nas interfaces GML-GTXntl os resultados obtidos são semelhantes, apresentado apenas uma pequena variação de 1,7% com o solo de preenchimento utilizado.

É importante referir que a grande diferença na ordem de grandeza dos resultados apresentados em ambos os quadros devem-se à capacidade dos geossintéticos utilizados serem penetrados pelos solos e também da granulometria destes. Quanto mais extensa é a curva granulométrica maior é a capacidade do solo preencher os espaços vazios. No caso dos ensaios cujo geossintético superior é o geotapete, a grande percentagem de espaços vazios deste permite um bom entrosamento entre o solo e o geossintético superior, aumentando a resistência da interface, facto que é realçado pela menor resistência das interfaces quando o material de preenchimento da caixa superior é madeira.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### **B**

BRIANÇON, L. (2001). « Stabilité sur pentes des dispositifs géosynthétiques — caractérisation du frottement aux interface et applications », Ph.D. thesis, Université Bordeaux I, Talence, France.

BRIANÇON, L.; GIRARD, H.; POULIN, D. (2002). “Slope stability of lining systems – experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces”, *Geotextiles and Geomembranes*, 20, pp. 147-172.

### **C**

COSTA LOPES, C. P. F. (2000). “Estudo da interação solo-geossintético através de ensaios de corte em plano inclinado”. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, FEUP, Porto, 194p.

### **I**

INGOLD, T. S. (1994). “Geotextiles and Geomembranes Manual”. Elsevier Science Publishers, Ltd, ISBN-185617 1981, 597p.

IZGIN, M. e WASTI, Y. (1998). "Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests". *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.16, pp. 207-219.

### **J**

JEWELL, R. A. (1996). “Soil Reinforcement with Geotextiles”. Special Publication 123 CIRIA, 332 páginas.

JEWELL, R. A.; MILLIGAN, G. W. E.; SARSBY, R. W. e DUBOIS, D. (1984). "Interaction between soil and geogrids". Proc. Conf. on Polymer Grid Reinforcement, Thomas Telford ed., London, pp. 18-30.

JONES, D. R. V. e DIXON, N. (1998). "Shear strength properties of geomembrane/geotextile interfaces". Geotextiles and Geomembranes 16, pp. 45-71.

## **L**

LOPES, M. J.; LOPES, M. L. (1999a) – "Soil-geosynthetic interaction – influence of soil particles size and geosynthetic structure", Geosynthetics International Journal, Vol. 6, Nº 4, pp. 261-282

LOPES, M. J. and LOPES, M.L. (1999b) – "Soil grains size and geosynthetic type – role on the pullout behaviour of geosynthetics", Proc. of the XI Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 117-124, Foz do Iguaçu, Brasil.

## **M**

McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; PRAGHAN, S. e KHAN, A. J. (1998). "Limit state design of geosynthetic reinforced soil structures". Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Geosynthetics, pp. 143-179.

## **P**

PALMEIRA, E.M., LIMA, N. R. Jr; MELLO, L.G.R. (2002). "Interaction between soils and geosynthetic layers in large-scale ramp tests", Geosynthetics International, .9, No.2, 149–187

PINHO LOPES M. (1998). "Estudo da influência da granulometria do solo e da estrutura do reforço nos mecanismos de interação solo geossintético". Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, F.E.U.P., Porto, 197p.

PINHO-LOPES (2002). "Danificação durante a instalação : Influência no comportamento a longo prazo dos geossintéticos, Comportamento a longo prazo dos geossintéticos", Seminário Português sobre Geossintéticos 972-752-082-0 Porto 2005 161-174 p

PINHO-LOPES (2004). “Estudo de coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos”, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, F.E.U.P., Portugal, Porto

## **R**

REYES RAMIREZ, R.; GOURC, J. P. (2003). “Use of the inclined plane test in measuring geosynthetic interface friction relationship”, *Geosynthetics International*, 10, nº 5, pp.165-175.

## **W**

WASTI Y. and ÖZDÜZGÜN Z.B. (2001), "Geomembrane-geotextile interface shear properties as determined by inclined board and shear box tests", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 19, pp 45-57.