



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Eduardo Gonçalves Costa

Estudo da degradação de
geotêxteis em fibra natural

José Eduardo Gonçalves Costa
Estudo da degradação de
geotêxteis em fibra natural

UMinho | 2013

outubro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Eduardo Gonçalves Costa

Estudo da degradação de
geotêxteis em fibra natural

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Raul Figueiro
Professor Doutor António Gomes Correia

outubro de 2013

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Raul Figueiro pela orientação prestada e constante disponibilidade durante o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço também ao meu co-orientador, o Professor António Correia, pelo importante auxílio prestado.

Não conseguiria levar a cabo este trabalho sem a preciosa ajuda da Raquel Carvalho no âmbito das fibras. A sua disponibilidade e auxílio irrepreensível foi fundamental para que pudesse obter o melhor resultado final possível. Também não poderia deixar de agradecer ao técnico do Laboratório de Geotecnia da Universidade do Minho, o senhor José Gonçalves, pela ajuda prestada para levar a cabo os ensaios realizados ao solo utilizado.

Por fim, mas o mais importante de todos, aos meus pais e irmão pela constante dedicação, apoio e paciência.

Resumo

A sociedade atual sente cada vez mais a necessidade de procurar soluções eficientes e sustentáveis para os problemas do dia-a-dia. Sendo o setor da construção civil um dos grandes responsáveis pela exploração de recursos e emissão de gases poluentes, fruto da sua atividade, torna-se necessário a alteração de algumas das práticas atuais.

Os geotêxteis usados em diversas aplicações, como por exemplo, controlo da erosão de taludes, reforço ou drenagem de solos em obras de engenharia são quase exclusivamente compostos por materiais sintéticos. A consideração de geotêxteis de fibras naturais, especialmente quando o período funcional requerido a um geotêxtil é de apenas alguns meses, torna-se a solução ideal devido ao facto de estes serem biodegradáveis e constituídos por recursos renováveis, sendo ambientalmente mais sustentáveis que os seus semelhantes sintéticos.

Esta dissertação pretende contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre a viabilidade da consideração de fibras naturais de origem vegetal como geotêxteis, nomeadamente o seu comportamento mecânico e estrutura fibrosa, ao longo do tempo. Para levar a cabo este objetivo foram consideradas as fibras de juta e sisal, incorporadas no solo, sendo este posteriormente exposto a condições ambientais e também a condições controladas, sem ação de agentes climáticos.

Foi possível concluir que as fibras expostas a condições ambientais apresentam uma degradação muito superior àquela verificada para condições controladas, comprovando-se como chave a ação da humidade, temperatura e incidência de radiação solar no processo de biodegradação deste tipo de materiais. A interação de geotêxteis naturais com o solo e agentes climáticos diversos, resultam num acelerar do processo de biodegradação deste tipo de materias, devido à ação química dos solos e também de microorganismos, tal como pode ser comprovado pela perda significativa de propriedades como a resistência à tração, perda de massa das fibras e degradação da superfície da estrutura fibrosa da juta e sisal.

Palavras - Chave: Geotêxteis; fibras naturais; biodegradação; solo; agentes climáticos.

Abstract

Current society increasingly feels the need to seek efficient and sustainable solutions to daily problems. Being the construction industry largely responsible for the exploitation of resources and greenhouse gas emissions as result of its activity, it becomes necessary to change some of the current practices.

Geotextiles used in various applications such as embankment erosion control, soil reinforcement or drainage in engineering works are almost entirely composed of synthetic materials. The consideration of geotextiles made from natural fibers, especially when the working period required is just few months, it's ideal due to the fact that they are made of biodegradable, renewable resources and environmentally more sustainable than their synthetic similar.

This research work aims to contribute to understand the viability of considering natural fibers with vegetable origin as geotextiles, including their mechanical behavior and fibrous structure alterations, over time. In order to accomplish these goals, jute and sisal fibers incorporated in soil were considered, which was then exposed to environmental and controlled conditions, without the influence of climatic agents.

It was concluded that the fibers exposed to environmental conditions have a much higher degradation rate than those of controlled conditions, proving itself as a key in the biodegradation process of these materials, the action of moisture, temperature and solar radiation. The natural fiber geotextile interaction with soil and various climatic agents accelerate the biodegradation process of this type of materials due to chemical actions of soil and micro-organisms such as can be evidenced by a significant loss of properties such as tensile strength, loss of fiber mass and surface degradation of the fibrous structure of jute and sisal.

Keywords: Geotextiles; natural fibers; biodegradation; soil; climatic agents.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. Geotêxteis	5
2.1.1. Tipo de geotêxteis	5
2.1.1.1. Tecidos	6
2.1.1.2. Não-tecidos	7
2.1.1.3. Malhas	8
2.1.2. Funções dos geotêxteis	9
2.1.2.1. Separação	9
2.1.2.2. Filtragem	9
2.1.2.3. Proteção	10
2.1.2.4. Reforço	11
2.1.2.5. Drenagem	11
2.2. As Fibras	12
2.2.1. Poliéster	13
2.2.2. Poliamida	14
2.2.3. Polietileno	15
2.2.4. Polipropileno	16
2.3. Fibras Naturais	16
2.3.1. Fibra de Juta	18
2.3.2. Fibra de Sisal	19
2.3.3. Propriedades das fibras	20
2.3.3.1. Propriedades físicas	20
2.3.3.2. Propriedades químicas	21
2.3.3.3. Propriedades mecânicas	21
2.4. As fibras naturais como solução sustentável	22
2.5. Casos de estudo	24

3. METODOLOGIA	31
3.1. Conceção do estudo	31
3.1.1. Cenários em análise	31
3.1.2. Preparação dos modelos	34
3.2. Materiais	40
3.2.1 Solo	40
3.2.1.1. Análise granulométrica	41
3.2.1.2. Limites de consistência	42
3.2.1.3. Identificação do solo	42
3.2.1.4. Valor de pH	43
3.2.1.5. Ensaio de compactação	43
3.2.2. Fibras	45
3.2.2.1. Massa por unidade de superfície	45
3.2.2.2. Massa linear dos fios	46
3.2.2.3. Espessura	47
3.2.2.4. Número de fios por unidade de comprimento (contextura)	48
3.3. Preparação dos provetes para ensaio	49
3.4. Resistência à tração	51
3.5. Análise de microscopia	52
3.6. Perda de massa	53
3.7. Temperatura do solo	53
3.8. Teor em água do solo	54
3.9. Pluviosidade	55
4. RESULTADOS E ANÁLISE	57
4.1. Resultados da temperatura do solo	57
4.1.1. Condições ambientais	57
4.1.2. Condições controladas	60
4.2. Dados pluviométricos	61
4.3. Resultados do teor em água do solo	63
4.4. Propriedades das fibras	64
4.4.1. Resistência à tração	65
4.4.1.1. Fibra de juta	67
4.4.1.2. Fibra de sisal	70

4.4.2.	Tenacidade	73
4.4.2.1.	Fibra de juta	73
4.4.2.2.	Fibra de sisal	75
4.4.3.	Ductibilidade	76
4.4.3.1.	Fibra de juta	77
4.4.3.2.	Fibra de sisal	78
4.4.4.	Relação entre resistência à tração e alongamento	80
4.5.	Perda de massa das fibras	82
4.5.1.	Fibra de juta	82
4.5.2.	Fibra de sisal	84
4.6.	Análise microscópica	86
4.6.1.	Fibra de juta	90
4.6.2.	Fibra de sisal	93
5.	CONCLUSÕES	99
5.1.	Conclusões gerais	99
5.2.	Perspetivas futuras	104
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXOS		113
Anexo 1:	Valores de controlo dos provetes de juta e sisal	114
Anexo 2:	Resultados dos provetes de juta (condições ambientais)	115
Anexo 3:	Resultados dos provetes de juta (condições controladas)	117
Anexo 4:	Resultados dos provetes de sisal (condições ambientais)	119
Anexo 5:	Resultados dos provetes de sisal (condições controladas)	121
Anexo 6:	Curvas força - alongamento para os provetes de controlo	123
Anexo 7:	Curvas força - alongamento dos provetes de juta (condições ambientais)	124
Anexo 8:	Curvas força - alongamento dos provetes de juta (condições controladas)	126
Anexo 9:	Curvas força - alongamento dos provetes de sisal (condições ambientais)	128
Anexo 10:	Curvas força - alongamento dos provetes de sisal (condições ambientais)	130

Índice de Figuras

Figura 1 - Estrutura de um tecido tafetá.....	6
Figura 2 - Não-tecidos: a) Observação em microscópio electrónico; b), c) e d) Diferentes formas de apresentação.	8
Figura 3 - Malhas: a) malha de trama; b) malha de teia	8
Figura 4 - Função de separação dos geotêxteis.....	9
Figura 5 - Função de filtração dos geotêxteis	10
Figura 6 - Função de proteção dos geotêxteis.....	10
Figura 7 - Função de reforço dos geotêxteis	11
Figura 8 - Função de drenagem dos geotêxteis.....	12
Figura 9 - Juta: a) Planta <i>Corchorus</i> ; b) fibras de juta.....	18
Figura 10 - Sisal: a) Planta <i>Agave sisalana</i> ; b) fibras de sisal	19
Figura 11 - Caixas para conter o solo incorporando as fibras.....	35
Figura 12 - Representação esquemática do solo incorporando as fibras	35
Figura 13 - Processo de corte dos provetes de fibra de juta.....	36
Figura 14 - Processo de compactação do solo.	37
Figura 15 - Colocação das amostras de fibras no solo.....	38
Figura 16 - Colocação das amostras de fibras no solo.....	38
Figura 17 - Colocação da segunda camada de solo.	39
Figura 18 - Modelos de estudo para cenário de condições ambientais.....	39
Figura 19 - Modelos de estudo para cenário de condições controladas.....	40
Figura 20 - Curva granulométrica do solo.	41
Figura 21 - Curva de compactação correspondente à compactação leve.....	44
Figura 22 - Remoção dos provetes de sisal do solo.....	49
Figura 23 - Processo de lavagem dos provetes de fibras.	50
Figura 24 - Máquina universal de ensaio <i>Hounsfield H 100 KS</i>	51
Figura 25 - SEM - <i>Scanning Electron Microscope</i>	52
Figura 26 - Determinação da temperatura do solo através de um termopar.	54
Figura 27 - Resultados da temperatura do solo para condições ambientais	59
Figura 28 - Resultados da temperatura do solo para condições controladas	60
Figura 29 - Dados da precipitação do mês de maio	61
Figura 30 - Dados da precipitação do mês de junho	62
Figura 31 - Dados da precipitação do mês de julho.....	62

Figura 32 - Variação do teor em água do solo ao longo do tempo.	64
Figura 33 - Precipitação semanal verificada em condições ambientais durante todo o estudo.	64
Figura 34 - Curva força - alongamento dos provetes de controlo de juta na direção da teia	66
Figura 35 - Resistência à tração dos provetes de juta.	69
Figura 36 - Resistência à tração dos provetes de sisal	71
Figura 37 - Tenacidade dos provetes de juta	75
Figura 38 - Tenacidade dos provetes de sisal	76
Figura 39 - Alongamento na rotura dos provetes de juta.....	78
Figura 40 - Alongamento na rotura dos provetes de sisal.....	79
Figura 41 - Correlação força - alongamento para a fibra de juta.	80
Figura 42 - Correlação força - alongamento para a fibra de sisal.	81
Figura 43 - Evolução da perda de massa dos provetes de juta ao longo do tempo.....	83
Figura 44 - Correlação perda de força - perda de massa para a fibra de juta.....	84
Figura 45 - Evolução da perda de massa dos provetes de sisal ao longo do tempo.....	85
Figura 46 - Correlação perda de força - perda de massa para a fibra de sisal.	86
Figura 47 - Degradação visual dos provetes de juta para condições ambientais.	87
Figura 48 - Degradação visual dos provetes de juta para condições controladas	88
Figura 49 - Degradação visual dos provetes de sisal para condições ambientais	89
Figura 50 - Degradação visual dos provetes de sisal para condições controladas.....	89
Figura 51 - Observação microscópica para juta em condições ambientais (ampliação 500x).....	90
Figura 52 - Observação microscópica para juta em condições ambientais (ampliação 200x).....	91
Figura 53 - Observação microscópica para juta em condições controladas (ampliação 500x).....	92
Figura 54 - Observação microscópica para juta em condições controladas (ampliação 1000x).....	93
Figura 55 - Observação microscópica para sisal em condições ambientais (ampliação 500x).....	94
Figura 56 - Observação microscópica para sisal em condições ambientais (ampliação 1000x).....	95

Figura 57 - Observação microscópica para sisal em condições controladas (ampliação 200x)96

Figura 58 - Observação microscópica para sisal em condições controladas (ampliação 1000x)97

Figura 59 - Sumário relativamente ao estudo em condições ambientais101

Figura 60 - Sumário relativamente ao estudo em condições controladas103

Índice de Quadros

Quadro 1 - Propriedades físicas das fibras de juta e sisal	20
Quadro 2 - Propriedades químicas das fibras de juta e sisal.....	22
Quadro 3 - Propriedades mecânicas das fibras de juta e sisal.....	23
Quadro 4 - Diferentes cenários em análise no estudo da degradação das fibras naturais.....	34
Quadro 5 - Massa por unidade de superfície dos tecidos de juta e sisal	46
Quadro 6 - Massa linear e contração dos tecidos de juta e sisal.	47
Quadro 7 - Espessura dos tecidos de juta e sisal.....	48
Quadro 8 - Número de fios por unidade de comprimento dos tecidos de juta e sisal.....	48
Quadro 9 - Sistema de classificação dos valores da temperatura.	57
Quadro 10 - Valores do teor em água do solo.	63
Quadro 11 - Resistência à tração da juta para condições ambientais.	67
Quadro 12 - Resistência à tração da juta para condições controladas.	67
Quadro 13 - Resistência à tração do sisal para condições ambientais.	70
Quadro 14 - Resistência à tração do sisal para condições controladas.....	70
Quadro 15 - Tenacidade dos provetes de juta.....	74
Quadro 16 - Tenacidade dos provetes de sisal.....	75
Quadro 17 - Alongamento dos provetes de juta.....	77
Quadro 18 - Alongamento dos provetes de sisal.	79
Quadro 19 - Resultados da perda de massa dos provetes de juta.....	82
Quadro 20 - Resultados da perda de massa dos provetes de sisal.	85

Abreviaturas e símbolos

ASTM	American Society for Testing and Materials
IPQ	Instituto Português da Qualidade
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
SEM	Scanning Electron Microscope
Tex	Massa linear
°C	Grau centígrado
mm	Milímetro
%	Percentagem
g	Gramas
°	Graus
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
m ²	Metro quadrado
kN/m	Quilonewton por metro
cm	Centímetro
kPa	Quilopascal
km	Quilómetro
cm ³	Centímetro cúbico
kg	Quilograma
cm ²	Centímetro quadrado
g/cm ²	Gramas por centímetro quadrado
Pa	Pascal
N	Newton
mm/min	Milímetro por minuto
N/tex	Newton por tex

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Temas como as alterações climáticas ou o aquecimento global, o desequilíbrio dos ecossistemas e os desastres ambientais têm despertado um grande interesse na comunidade científica e na sociedade em geral, onde os efeitos locais, regionais e globais são associados à utilização excessiva de recursos naturais (Marinelli *et al.*, 2008). A cada vez mais crescente consciencialização ambiental das sociedades, a necessidade de cumprimento de normas ambientais e o preço do petróleo, e seus derivados, conduzem à alteração de práticas comuns numa procura de abordagens que sejam mais sustentáveis para o meio ambiente.

A proteção do meio ambiente é importante, pois o setor da construção é um grande responsável pelas alterações climáticas, exploração de recursos e poluição à escala global. Esta estratégia para uma construção mais sustentável é um passo significativo no sentido de uma mais bem-sucedida, social e ambientalmente consciente, atmosfera, significando um importante contributo para uma melhoria da qualidade de vida assinalada pelo nosso desenvolvimento estratégico sustentável (Mwasha, 2008).

Como resposta à necessidade de uma abordagem ambiental e economicamente sustentável, o setor da construção civil tem desenvolvido esforços no sentido de modernizar as suas práticas e produtos, disso são exemplo os geotêxteis, largamente utilizados na área da geotecnia. Na área da geotecnia, a utilização de geotêxteis é feita em associação com o solo e com o objetivo de suprir necessidades de separar, filtrar, reforçar, proteger ou drenar (Rowe, 2012).

Os geotêxteis, membros da família dos geossintéticos, são amplamente utilizados em aplicações de engenharia civil para melhorar o desempenho estrutural do solo. Estes são fabricados tanto com fibras sintéticas como naturais, ambos com diferentes *designs*, formas, tamanhos e composição de acordo com as suas necessidades funcionais (Methacanon *et al.*, 2010).

Os geotêxteis podem agrupar-se em dois grandes conjuntos, geotêxteis sintéticos e geotêxteis naturais. Os primeiros são compostos por uma variedade de polímeros sintéticos como polipropileno, poliéster, polietileno, cloreto de polivinila, poliamida e aramidas; os segundos podem ter origem animal, vegetal ou mineral (Horrocks & Anand, 2000).

A sustentabilidade é um conceito que manifesta uma preocupação crescente em todo o mundo com vista à escassez de recursos naturais e energia, e à geração de vários tipos de resíduos sólidos e emissões de gases de várias fontes. O uso racional de fibras vegetais pode ser uma solução alternativa para a produção de bens duráveis e mais sustentáveis (Savastano *et al.*).

A consideração de fibras naturais, nomeadamente na composição de geotêxteis, apresenta diversas vantagens visto que as matérias-primas utilizadas são “amigas do ambiente”, representam um recurso renovável, a origem da sua produção tem um baixo custo unitário, não só podem ser eficazes, acessíveis e compatíveis com a gestão sustentável dos solos mas também ajudam a suprimir variações extremas da temperatura do solo e aumentam a infiltração dos solos, reduzindo a impermeabilização dos mesmos. Estes materiais apresentam baixa densidade, rigidez, propriedades mecânicas apropriadas e são biodegradáveis (Sarsby, 2007a; Methacanon *et al.*, 2010; Mukhopadhyay *et al.*, 2008).

As fibras naturais de origem vegetal podem ser utilizadas na maioria das aplicações temporárias, como, por exemplo, no controlo de erosão dos solos. Os geotêxteis fabricados com fibras naturais permitem o crescimento da vegetação e o posterior estabelecimento da sua raiz. Uma vez servido o seu propósito, estas matérias desintegram-se naturalmente no solo (Horrocks & Anand, 2000).

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é garantir um maior conhecimento no que diz respeito à utilização de fibras naturais como geotêxteis para aplicações geotécnicas, nomeadamente, perceber a durabilidade destas quando colocadas em contacto com o solo, e também a influência dos fatores ambientais na degradação das mesmas. O conhecimento do seu

comportamento poderá permitir fazer a seleção de um tipo de fibra em particular, para os diferentes tipos de utilização pretendidos.

Assim, pretende-se estudar o comportamento de biodegradação de fibras naturais, quando colocadas em contacto com o solo, considerando diversos factores ambientais como variações na temperatura ambiente, humidade do solo e radiação ultravioleta.

Com vista a atingir este propósito serão considerados dois tipos de fibras naturais de origem vegetal, juta e sisal, colocadas em contacto com o solo e procedendo-se à exposição destas amostras a condições climatéricas ambientais durante um período de tempo considerável que coincidirá com a transição entre as estações da primavera e verão, garantindo que estas sofrem diferentes condições em termos de humidade e temperatura. Pretende-se perceber a influência que esta interação, entre as fibras naturais de origem vegetal, o solo e agentes climáticos, terá ao longo do tempo no comportamento mecânico das fibras e também na sua morfologia.

Paralelamente é também considerada a colocação do mesmo tipo de fibras naturais incorporadas no solo, mas, neste cenário, estas amostras serão colocadas em laboratório, num ambiente condicionado, não estando sujeitas a agentes climáticos. Poderá ser assim aferida a influência que estes referidos agentes têm no acelerar do processo de biodegradação de fibras naturais.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: Apresenta-se o enquadramento do trabalho face à necessidade, pertinência e viabilidade da consideração das fibras naturais como solução sustentável para fins geotêxteis. Neste capítulo são apresentados também os objetivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Estado de Arte: São apresentados conceitos teóricos sobre o tema em questão, nomeadamente sobre os geotêxteis e as fibras, a sustentabilidade associada à utilização de fibras naturais, casos de aplicação e estudos já realizados no âmbito do tema.

Capítulo 3 – Metodologia: Apresenta-se a abordagem adotada para levar a cabo o estudo, os diversos cenários em análise e a preparação dos modelos solo-fibras. São também apresentados neste capítulo os materiais utilizados no estudo e os métodos de ensaio para determinação da resistência à tração, análise de microscopia das fibras e perda de massa das mesmas.

Capítulo 4 – Resultados e Análise: Corresponde à apresentação e análise comparativa dos resultados obtidos no estudo, nomeadamente a variação do comportamento mecânico das fibras, estrutura fibrosa e perda de massa em função da variável tempo, não deixando de ter em conta a sua correlação com aspetos relativos às condições a que foram sujeitas.

Capítulo 5 – Conclusões: Corresponde à apresentação das conclusões do estudo realizado relativas à degradação das fibras naturais como constituintes de um geotêxtil, e também a apresentação de perspetivas futuras a elaborar no âmbito desta temática.

São ainda apresentadas as respetivas referências bibliográficas.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Geotêxteis

Os geotêxteis foram um dos primeiros produtos têxteis da história da humanidade. Escavações do Antigo Egito mostram o uso de esteiras feitas de grama e linho, tendo sido utilizados na construção de estradas no tempo dos faraós para estabilizar as estradas e as suas bermas. Estes primeiros geotêxteis foram feitos de fibras naturais ou vegetação misturada com o solo para melhorar a qualidade das estradas, particularmente quando estas eram feitas em solo instável (Agrawal, 2011).

Apesar deste aproveitamento inicial por parte do Homem dos recursos naturais, a Revolução Industrial na Europa do século XIX marcou o aparecimento das fibras sintéticas produzidas a partir de produtos químicos à base de petróleo. O baixo preço e durabilidade dos geotêxteis sintéticos eliminou o uso dos geotêxteis de fibras naturais, no entanto, a emergente consciência ambiental tem aumentado a atratividade destes últimos.

Os geotêxteis podem agrupar-se em dois grandes grupos, geotêxteis sintéticos e geotêxteis naturais. Os primeiros são compostos por uma variedade de polímeros sintéticos como polipropileno, poliéster, polietileno, cloreto de polivinila, poliamida e aramidas; os segundos podem ter origem animal, vegetal ou mineral (Horrocks & Anand, 2000).

Estes podem ser definidos como tecidos permeáveis que, quando usados em associação com o solo, têm a capacidade de separar, filtrar, reforçar, proteger ou drenar (Rowe, 2012). O seu campo de aplicação em obras de engenharia varia desde aterros, muros de suporte, túneis, reservatórios, canais e obras costeiras, caminhos-de-ferro, proteção de taludes contra fenómenos de erosão e estradas.

2.1.1. Tipo de geotêxteis

Os geotêxteis clássicos são produzidos em duas etapas: primeiro dá-se a produção de fibras, filamentos, bandas e fios, e, posteriormente, a conversão destes materiais constituintes num

tecido. Estes elementos lineares anteriormente referidos são convertidos em diferentes tipos de geotêxteis clássicos, os tecidos, os não-tecidos e as malhas (Rawal *et al.*, 2010).

Para além destas formas de tecidos têxteis, podemos também encontrar têxteis entrançados (braids) ou sistemas híbridos, que fazem a combinação de vários tipos, como por exemplo, não-tecido com tecido ou não-tecido com malha de teia (Araújo *et al.*, 2000).

2.1.1.1. Tecidos

Os geotêxteis tecidos são feitos através de métodos tradicionais de tecelagem em que dois conjuntos paralelos de elementos são entrelaçados ortogonalmente para formar uma estrutura têxtil coerente, com fibras orientadas a 0° e a 90°. As propriedades do geotêxtil resultante serão uma função da natureza dos elementos usados na tecelagem, o material de que estes elementos são feitos e do padrão de tecelagem utilizado (Ingold, 1994).

O debuxo ou padrão é determinado pela maneira como os filamentos são entrelaçados. Os filamentos ou fios nas direções longitudinais e transversais são conhecidos como teia e trama, respetivamente (Rawal *et al.*, 2010).

Os tecidos podem ser constituídos por monofilamentos, multifilamentos, fios fiados, entre outros. A Figura 1 ilustra a estrutura de um tecido em tafetá, bem como a representação do entrelaçamento trama (a 0°) e da teia (a 90°).

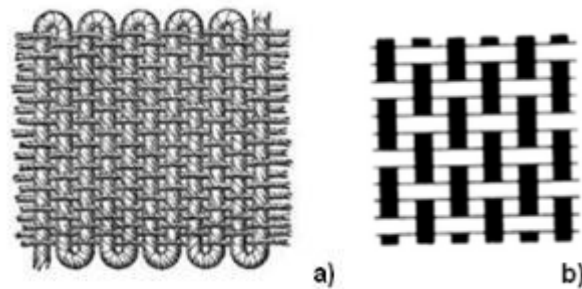


Figura 1 – Estrutura de um tecido tafetá.

Fonte: a) (calça jeans.com); b) (cladonia.co.uk)

2.1.1.2. Não-tecidos

Os não-tecidos são produzidos a partir de matérias-primas convencionais por outros meios que não os tradicionais como a tecelagem, malhas e rendas. Os processos tentam eliminar as etapas trabalhosas e caras usadas em processos tradicionais. Essencialmente, os não-tecidos são construídos diretamente a partir de fibras em vez de fios, embora os fios possam ser utilizados para ligar as fibras em conjunto (Cladonia, 2013).

Os não-tecidos são definidos como uma folha, teia ou manta de fibras/filamentos direcionalmente ou aleatoriamente orientados, ligados por meio de fricção e/ou coesão, e/ou adesão. Em geral a formação de um não-tecido é um processo com duas etapas, a formação da manta (deixando-se as fibras com determinadas características de orientação), e a ligação das fibras por meios mecânicos, térmicos ou químicos (Rawal *et al.*, 2010).

Esta ligação pode ser obtida por processos mecânicos (entrelaçamento dos filamentos provocados por agulhas, designando-se, neste caso, por agulhagem), químicos (a ligação é feita por colagem das fibras introduzindo resinas ou emulsões) ou térmicos (a ligação é feita por fusão parcial das fibras, conseguida pela ação conjunta da pressão e temperatura exercida por dois rolos aquecidos) (Gomes, 2001).

Os filamentos contínuos, ou fibras, são estabelecidos sobre uma correia transportadora especial, chamada *brattice*, sob a forma de uma manta de fibras dispersas. Esta manta passa por vários processos que a consolidam e ligam para formar um tecido coerente. As propriedades do geotêxtil resultante dependerão do polímero a partir do qual os filamentos, ou fibras, são formados, a forma como a manta se encontra disposta, consolidada ou ligada, e de qualquer tratamento posterior, aplicado antes do final do processo (Ingold, 1994).

Na Figura 2 está representada uma observação microscópica de um não-tecido e diferentes formas de apresentação comercial dos mesmos.

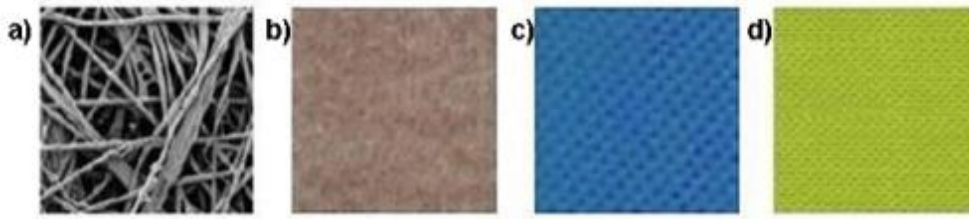


Figura 2 – Não tecido: a) Observação em microscópio electrónico; b), c) e d) Diferentes formas de apresentação.

Fonte: (ctb.com.pt)

2.1.1.3. Malhas

As malhas são fabricadas com um processo adotado na indústria têxtil, nomeadamente a tricotagem (Agrawal, 2011). Estas são produzidas pelo entrelaçar de uma série de laçadas de filamentos ou fios de fibras cortadas, para formar uma estrutura plana. As laçadas da estrutura de uma malha podem ser interligados de diferentes formas, tal como acontece no debuxo dos tecidos (Rawal *et al.*, 2010).

As malhas podem ser construídas com um simples fio, que é formado em laçadas entrelaçadas através do uso de agulhas em forma de gancho. As fileiras de laçadas são produzidas a partir de um único segmento, por meio de um gancho (Corbman, 1985).

As malhas podem ser classificadas como malha de trama e por malha de teia, sendo que as primeiras são produzidas no sentido horizontal a partir de um ou mais fios, já as últimas são produzidas no sentido longitudinal a partir de um conjunto de fios de teia (Araújo *et al.*, 2000). Na Figura 3 encontram-se representações destes dois tipos de malhas.



Figura 3 – Malhas: a) Malha de trama; b) Malha de teia.

Fonte: (cladonia.co.uk)

2.1.2. Funções dos geotêxteis

2.1.2.1. Separação

Um geotêxtil atua como separador prevenindo a mistura de materiais finos e grossos do solo, permitindo ao mesmo tempo, o livre fluxo de água através do geotêxtil (Horrocks & Anand, 2000). Com a função de separação pretende-se que o geotêxtil separe duas camadas de diferentes materiais, de modo a evitar contaminações, misturas ou, até mesmo, o seu contacto (Gomes, 2001). Este tipo de função está ilustrada nas imagens a) e b) presentes na Figura 4.

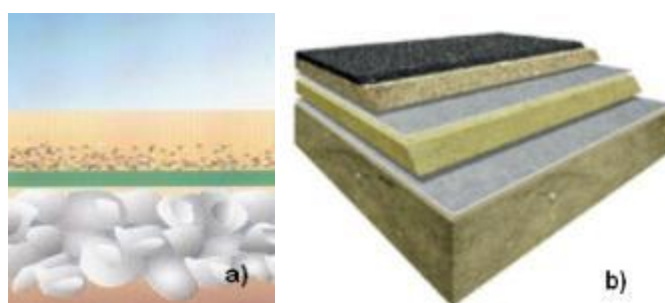


Figura 4 – Função de separação dos geotêxteis.

Fonte: a) (Gomes, 2001); b) (fibertex.com)

2.1.2.2. Filtragem

Define-se a propriedade de filtragem como “o equilíbrio do sistema geotêxtil-solo que permite um fluxo de líquido adequado com a perda de solo limitada através do plano do geotêxtil, ao longo do seu período de vida, compatível com a sua aplicação específica” (Agrawal, 2011). Um geotêxtil atua como filtro permitindo o fluxo de líquidos e gases, prevenindo a passagem de partículas sólidas que possam causar assentamento devido à perda de terreno (Horrocks & Anand, 2000). Esta função está representada nas imagens presentes na Figura 5.

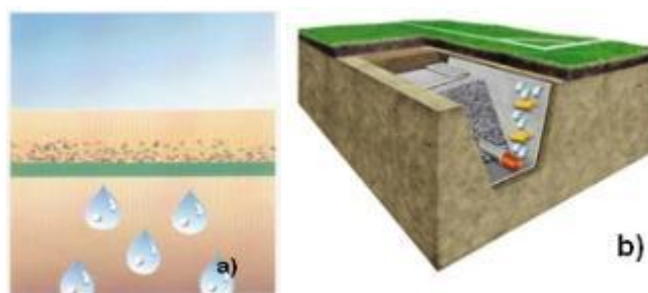


Figura 5 – Função de filtração dos geotêxteis.

Fonte: a) (Gomes, 2001); b) (fibertex.com)

2.1.2.3. Proteção

Com a função de proteção pretende-se que o geotêxtil reduza as ações localizadas com finalidade de evitar, ou reduzir, o dano de outra superfície ou camada. A estrutura do geotêxtil proporciona um efeito de amortecimento, sendo a redistribuição de tensões provocadas pelas cargas, tanto mais eficaz quanto mais espesso e compacto for o geotêxtil (Gomes, 2001).

No âmbito da função de proteção dos geotêxteis é possível referir-se a aplicação destes no controlo da erosão superficial. Os geotêxteis permitem reduzir o escoamento, reter partículas de solo e protegem o solo sem vegetação do sol, chuva e vento (Horrocks & Anand, 2000). Os poros do geotêxtil permitem o desenvolvimento da vegetação que cobre a superfície do solo, e as suas raízes ancoram o solo de modo a que o geotêxtil não seja mais necessário para prevenir a erosão (Sarsby, 2007b). As imagens presentes na Figura 6 ilustram a função de proteção de um geotêxtil.



Figura 6 – Função de proteção dos geotêxteis.

Fonte: a) (Gomes, 2001); b) (environmental-expert.com)

2.1.2.4. Reforço

O geotêxtil atua como reforço quando a estabilidade de um subsolo fraco é complementada pela maior resistência à tração do tecido fibroso. A resistência à tração permite que os geotêxteis funcionem como armadura aumentando a capacidade de suporte e estabilidade do solo. O princípio de utilização de geotêxteis como reforço é combiná-los com a estrutura do solo para que aumente a coesão das suas partículas (Gomes, 2001; Rawal *et al.*, 2010).

O geotêxtil atua, ao deformar-se, como um distribuidor de cargas sobre uma superfície maior. As propriedades de interface, nomeadamente o atrito entre o solo e o geotêxtil, permitem assegurar uma boa transmissão e repartição das tensões no meio envolvente. A inserção de um geotêxtil na base de um aterro construído em solo mole aumenta a sua resistência e evita roturas. Com o passar do tempo, a água dos poros na fundação migra a partir da base do aterro aumentando a resistência da fundação (Gomes, 2001; Sarsby, 2007b). Esta função encontra-se representada nas imagens presentes na Figura 7.



Figura 7 – Função de reforço dos geotêxteis.

Fonte: a) (Gomes, 2001); b) (geo-synthetics.com)

2.1.2.5. Drenagem

Um geotêxtil atua como um dreno quando recolhe e redireciona um líquido ou gás na direção da saída, ou seja, a transmissão do fluido dá-se na direção do fluxo do plano do tecido fibroso, sem qualquer perda de partículas do solo (Rawal *et al.*, 2010). Qualquer geotêxtil com boas características de filtração e permissividade pode ser aplicado com vista à função de drenagem (Rawal *et al.*, 2010). A função de drenagem dos geotêxteis está representada nas imagens presentes na Figura 8.

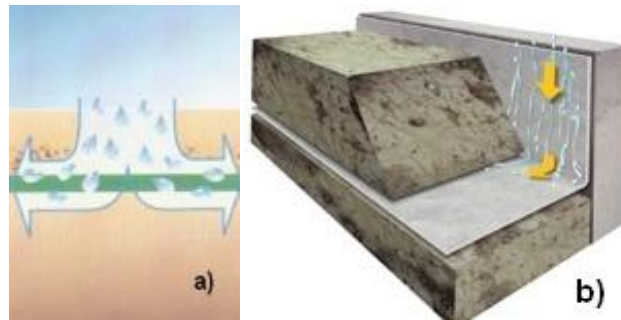


Figura 8 – Função de drenagem dos geotêxteis.

Fonte: a) (Gomes, 2001); b) (fibertex.com)

2.2. As Fibras

As fibras são elementos filiformes caracterizados pela flexibilidade, finura e grande comprimento em relação à dimensão transversal máxima. Existem fibras descontínuas e contínuas, as primeiras possuem o comprimento limitado a alguns centímetros, enquanto as contínuas têm um comprimento muito grande, sendo esses comprimentos limitados devido a razões técnicas. A fibra é o termo genérico para vários tipos de materiais, naturais ou não naturais, que formam os elementos básicos de estruturas fibrosas. De acordo com a ASTM (American Society for Testing and Materials), fibra é um material que se caracteriza por apresentar um comprimento pelo menos 100 vezes superior ao diâmetro ou espessura (Kuasne, 2008).

Atualmente são utilizados diferentes tipos de fibras, como sua matéria-prima, sendo que algumas dessas fibras foram conhecidas e utilizadas nos primeiros anos da civilização, bem como nos tempos modernos (Corbman, 1985). As fibras podem ser classificadas em dois grandes grupos, as fibras naturais e as não naturais, ou seja, produzidas pelo Homem, conhecidas como *man-made fibres*. As fibras naturais, tais como algodão, lã, seda e linho, são aquelas que são proporcionadas diretamente pela natureza, sob uma forma fibrosa já pronta. As fibras não naturais, ou artificiais, são aquelas geradas pelo Homem e que previamente não possuíam uma forma fibrosa adequada. Também nesta categoria de fibras não naturais podemos referir as fibras inorgânicas como o vidro, carbono ou basalto. (Araújo, 2011; Cook, 1984a; Taylor, 1999).

As fibras naturais podem ser subdivididas em três classes, de acordo com a natureza da sua origem, em fibras vegetais, animais e minerais. As fibras vegetais, que podem ser obtidas através do caule, folhas ou semente de plantas, e incluem a mais importante de todas as fibras têxteis, o algodão, em conjunto com o linho, cânhamo, juta e outras fibras que tenham sido produzidas por plantas. Estas baseiam-se em celulose, por natureza o material estrutural no mundo vegetal. As fibras de origem animal, tendo por base a proteína, incluem lã e outras semelhantes a fibras de pêlo, e por fibras como a seda (Cook, 1984b; Taylor, 1999). Em relação às fibras de origem mineral, o amianto é a fibra mais utilizada. O amianto é uma fibra natural obtida a partir de várias rochas, sendo uma forma fibrosa de silicato de magnésio e de cálcio, contendo alumínio, ferro, entre outros minerais. Visto que partículas de fibra de amianto se alojam nos pulmões, e foram encontradas como cancerígenas, a sua utilização tem sido limitada (Corbman, 1985).

As fibras não naturais podem ser subdivididas em duas diferentes classes, de acordo com a substância formadora da fibra. Temos assim, fibras de polímeros naturais, cujo material fibroso tem origem na natureza, e as fibras sintéticas, que são aquelas em que o Homem executou toda a operação de produção das fibras, a partir de produtos químicos derivados de carvão ou petróleo (Araújo, 2011; Cook, 1984a).

As fibras baseadas em polímeros naturais, ou fibras artificiais, mais utilizadas são a viscose, liocel, modal e o acetato. Em relação às fibras sintéticas as mais conhecidas são o poliéster, poliamida, polietileno, polipropileno, poliuretano, elastano, entre outros (Taylor, 1999).

Segundo Agrawal (2011) os polímeros sintéticos mais utilizados como constituinte de geotêxteis de fibras sintéticas são o poliéster, a poliamida, o polietileno e polipropileno. De seguida tratar-se-á de enumerar algumas das características deste tipo de polímeros, que usualmente são escolhidos para a composição dos geotêxteis.

2.2.1. Poliéster

O poliéster é sintetizado por polimerização de etileno glicol com dimetil tereftalato ou com ácido tereftálico. A sua fibra possui elevado módulo de elasticidade, resistência à fluência e inércia química, razão pela qual é adequada para geotêxteis. Possui um pH que varia entre 7 e

10, e um tempo de vida de cerca de 50 anos, contando também com uma elevada resistência a radiações ultravioleta (Agrawal, 2011).

As fibras de poliéster possuem, regra geral, uma elevada resistência ao alongamento, sendo por isso bastante elásticas, e é uma das fibras com menor capacidade absorvente, encolhem até 20% durante o acabamento molhado e são geralmente aquecidas em tratamentos posteriores, como tal, tecidos e malhas de poliéster não sofrerão encolhimento, possuindo uma excelente estabilidade dimensional. O poliéster é absolutamente resistente ao bolor e a ataque de insetos. À temperatura ambiente, tem boa resistência a álcalis fracos e razoável resistência a álcalis fortes, esta resistência é reduzida com o aumento da temperatura. As fibras de poliéster apresentam boa resistência a bolores, envelhecimento, abrasão e quando expostos a radiação solar. Dependendo do tipo de poliéster, este tem excelente a boa resistência a ácidos minerais e orgânicos (Araújo, 2011; Corbman, 1985).

2.2.2. Poliamida

A palavra “*nylon*” é um termo genérico que designa um grupo de compostos químicos classificados como poliamidas (Corbman, 1985). Existem dois tipos de poliamidas que são consideradas as mais importantes, o nylon 6 e nylon 6.6, contudo estes são menos utilizados em geotêxteis. O nylon 6 é uma poliamida alifática obtida através da polimerização de um derivado de petróleo; o nylon 6.6, também uma poliamida alifática, é obtida pela polimerização de sal de ácido adípico e hexametilenodiamina (Agrawal, 2011).

Segundo Corbman (1985), as propriedades destas fibras dependem do tipo de nylon utilizado, da secção transversal da fibra, se o tecido é composto por multifilamentos e pela forma como é construído. As fibras de nylon apresentam excelente durabilidade e propriedades físicas, estas são conhecidas por apresentarem elevada tenacidade, resistência à tração, excelente resistência à abrasão e permitem uma recuperação elástica aquando da extensão. Fruto da sua elasticidade tem a tendência natural de retomar a sua forma original (Taylor, 1999).

O nylon absorve apenas uma pequena parte da humidade, quando comparada com a maior parte das fibras naturais (Cook, 1984a). Este tem uma boa estabilidade dimensional e retém a sua forma depois de molhado, não sofrendo dilatação nem encolhimento. O ponto de fusão do

nylon 6 é de aproximadamente 210 °C, sendo que para o nylon 6.6 este valor sobe para os 250 °C (Araújo, 2011; Taylor, 1999).

Tal como a maior parte das fibras, o nylon é afetado quando prolongadamente exposto à luz solar, com uma progressiva perda de resistência, mas pouca ou nenhuma descoloração. As suas propriedades de tenacidade e elasticidade não são afetadas quando exposto a álcalis, água e hidrocarbonetos, entre outros. Não é atacado por insetos, como traças, pois não lhes serve de alimentação, e não é enfraquecido por microorganismos (Cook, 1984a).

2.2.3. Polietileno

O polietileno é produzido através de um processo de polimerização, de alta temperatura ou baixa temperatura. Duas formas de polietileno podem ser descritas, como polietileno de baixa densidade e polietileno de alta densidade. A resistência à tração de monofilamentos de polietileno de baixa densidade é baixa, por outro lado, monofilamentos de polietileno lineares são três ou quatro vezes mais fortes, e são comparáveis ao nylon (Cook, 1984a).

Os filamentos de polietileno são, regra geral, flexíveis e resilientes, sendo os de baixa densidade mais flexíveis do que os de alta densidade. O polietileno de baixa densidade funde no intervalo 110-120°, sendo o ponto de fusão dos de alta densidade a rondar os 130-138°. A absorção de humidade por parte do polietileno é praticamente nula, retém a sua flexibilidade em ambiente com baixa temperatura e não se degrada na presença de calor, no entanto, filamentos orientados são dimensionalmente instáveis e tendem a retrair quando aquecidos (Cook, 1984a; Guillén, 1991).

A molécula de polietileno é atacada pelo oxigénio, sendo esta reação estimulada por radiações ultravioleta, com o polietileno de baixa densidade a ser mais suscetível a oxidar do que o de alta densidade. Possui elevada resistência a ácidos e álcalis, é completamente resistente a bactérias, bolor e outros microorganismos, e não serve de alimento para insetos ou outros seres vivos (Cook, 1984a; Guillén, 1991).

2.2.4. Polipropileno

O polipropileno é um termoplástico cristalino produzido através da polimerização de monómeros de propileno na presença de um sistema catalítico Zeigler-Natta (Agrawal, 2011). A fibra de polipropileno é a fibra têxtil com menor densidade, a gama de resistência à tração é bastante larga, mas em geral é comparável às do nylon e do poliéster. A boa resistência à tração e à abrasão tornam estas fibras ideais para usos industriais, sendo menos elásticas do que as de nylon, e quando sujeitas a uma tensão constante, durante um certo período de tempo, sofrem fluência (Corbman, 1985; Taylor, 1999).

As fibras de polipropileno possuem baixa absorção de água, a humidade absorvida por estas é tão baixa, ou insignificante, que a água não tem qualquer efeito sobre a resistência à tração ou outras propriedades mecânicas (Araújo, 2011; Cook, 1984a). Como não são afetadas pela água, não sofrem encolhimento (Corbman, 1985).

O ponto de amolecimento é da ordem dos 150 °C, e as fibras têm o seu ponto de fusão a 160-170 °C. As propriedades mecânicas destas fibras deterioram-se com o aumento de temperatura até ao ponto de amolecimento, comportando-se melhor que o polietileno. Possuem excelente resistência a ácidos, alcalis e agentes climáticos, não sofrem ataque de insetos ou microorganismos, sendo também resistentes quando expostas a radiação solar (Araújo, 2011; Cook, 1984a).

2.3. Fibras Naturais

Tal como já foi referido anteriormente, a divisão das fibras naturais pode ser feita em três categorias, vegetais, animais e minerais, de acordo com a sua origem. Como o âmbito deste documento se centra na análise de fibras vegetais, nomeadamente as de juta e sisal, será dada especial atenção a estas, em detrimento das de origem animal e mineral.

As fibras vegetais podem ser classificadas morfologicamente de acordo com a parte da planta a partir da qual estas são obtidas, do caule, das folhas ou de sementes e frutos (Horrocks & Anand, 2000).

As fibras vegetais são paredes celulósicas que existem no caule e em partes de folhas e são constituídas por celulose, hemicelulose, lignina e compostos solúveis em água, ceras, cinzas e outros lípidos. A composição química e estrutura das fibras determinam as suas características, funcionalidades e eficiência de processamento. A celulose é um polímero linear de glicose, na sua forma mais simples é um polímero de hidrato de carbono linear ligado a unidades de glicose. A estrutura de como a glicose está ligada ao polímero linear determina as propriedades da celulose, que está presente nas paredes das células das plantas como microfibrilas que fornecem uma estrutura linear e forte (Akin, 2010).

Depois da celulose, a hemicelulose é o hidrato de carbono mais abundante nas paredes das células vegetais, e é um termo colectivo para um grupo extremamente heterogéneo de polissacarídeos. Em relação à lignina, esta é responsável pela rigidez, resistência e protecção contra agentes microbianos das paredes celulares, o tipo de lignina nos tecidos celulares das fibras influencia o grau de susceptibilidade à biodegradação, acção microbiana e resposta a tratamentos químicos (Akin, 2010).

A espessura das camadas da parede celular e orientação das fibrilas de celulose desempenham um papel fundamental nas propriedades mecânicas das fibras vegetais, estas dependem decisivamente da organização polimérica e interações moleculares das suas paredes celulares. Existe uma relação de dependência entre o ângulo microfibrilar da celulose e o comportamento à tração das fibras, entre o módulo de elasticidade e a orientação das fibrilas de celulose paralelas. Um ângulo microfibrilar baixo, as fibrilas de celulose estão orientadas quase paralelamente à direcção axial, conduz a um elevado módulo de elasticidade, enquanto a rigidez é consideravelmente reduzida para maiores ângulos microfibrilares. A curva tensão-deformação para uma fibra com baixo ângulo microfibrilar mostra uma resposta muito rígida e quase totalmente elástica com uma rotura frágil (Eder & Burgert, 2010).

De seguida apresentam-se as fibras de juta e sisal, escolhidas para figurar neste estudo.

2.3.1. Fibra de Juta

A juta é o nome comum utilizado para as fibras extraídas do caule das plantas pertencentes ao género *Corchorus*, da família *Malvaceae* (Rahman, 2010). Entre os maiores produtores deste tipo de plantas/fibras estão países como a Índia, Bangladesh, China, Tailândia e Indonésia, explicado pelo facto de o ambiente propício ao seu desenvolvimento exigir uma precipitação anual superior a 1800 mm e um clima quente com humidade a variar entre 70 e 90 % (Horrocks & Anand, 2000). Na Figura 9 está ilustrada a planta na qual são extraídas as fibras de juta e também a representação destas.



Figura 9 – Juta: a) Planta *Corchorus*; b) fibras de juta.

Fonte: a) (thejutecompany.com); b) (millerwastemills.com)

As fibras de juta são obtidas por extração a partir da maceração de plantas, que é o processo de separação e extração da fibra da parte do caule por meio de dissolução e decomposição da pectina e outras substâncias mucilaginosas. O processo de maceração é um dos fatores mais importantes que regem a qualidade das fibras e feixes de fibras da juta (Rahman, 2010).

Trata-se de uma fibra higroscópica invulgar, possui a capacidade de absorver cerca de 23 % de água quando em condições de humidade; se mantida seca, a juta, dura indefinidamente embora o elevado teor de matéria não-celulósica tende a torná-la sensível ao ataque químico e fotoquímico. Estas fibras sofrem uma rápida deterioração quando expostas a humidade; já em relação à suscetibilidade a microorganismos, a juta é mais resistente à putrefação que o algodão ou o linho mas suscetível a ataques de microorganismos quando em

climas húmidos. Quando ligeiramente polida a juta pode apresentar excelente resistência devido ao efeito protetor da lignina (Cook, 1984b).

2.3.2. Fibra de Sisal

A fibra de sisal, da espécie *Agave sisalana* e da família *Agavaceae*, é derivada da folha de uma planta considerada indígena na América Central e do Sul. Durante o final do século XVIII e início do século XIX, a plantação de sisal foi iniciada nos continentes africano e asiático, devido ao seu poder para crescer sob diferentes condições ecológicas e climáticas, variando das condições de calor e humidade do Quênia e Tanzânia, para as condições tropicais do Brasil, da costa da Florida e Havai e das ilhas das Caraíbas, e mais recentemente também a China se tornou um país produtor de sisal (Anandjiwala & John, 2010). A Figura 10 ilustra a planta na qual têm origem a fibra de sisal, e também a representação das próprias fibras.



Figura 10 – Sisal: a) Planta *Agave sisalana*; b) fibras de sisal.

Fonte: a) (mellau-sisal.co.uk); b) (sciencedirect.com)

Uma planta de sisal apresenta um período de vida que varia entre 7 e 15 anos, em função do tipo de cultura, espécie, clima, condições de crescimento e qualidade do solo (Anandjiwala & John, 2010).

Uma boa planta de sisal produz cerca de 200 folhas, com cada folha a ter uma composição de 4 % de fibra, 0,75 % de cutícula, 8 % de matéria seca e 87,3 % de humidade. Uma folha normal pesa cerca de 600 g, com as fibras a ocuparem cerca de 3 % do seu peso, e com cada

folha a ter cerca de 1000 fibras. A fibra é extraída da folha por maceração, raspagem, ou por maceração seguida de raspagem ou com recurso a meios mecânicos (Joseph *et al.*, 1999).

As características das fibras de sisal dependem das propriedades dos seus constituintes individuais, da estrutura fibrilar e da matriz das lamelas. A fibra é composta por numerosas e alongadas células de fibra que afunilam para cada uma das extremidades, estas últimas são ligadas entre si por meio de lamelas compostas por lignina, hemicelulose e pectina (Joseph *et al.*, 1999).

2.3.3. Propriedades das fibras

Como forma de melhor aferir e quantificar as características das fibras naturais de origem vegetal anteriormente mencionadas apresentam-se de seguida diferentes aspetos que ajudam a definir as propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras de juta e de sisal

2.3.3.1. Propriedades físicas

O Quadro 1 refere-se a algumas propriedades físicas das fibras de juta e sisal.

Quadro 1 – Propriedades físicas das fibras de juta e sisal.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Porosidade (%)	Cristalinidade (%)	Ângulo microfibrilar (°)	Referência
Juta	1,3 – 1,5	14 - 15	78,47	7 - 10	Müssig <i>et al.</i> , 2010
Sisal	1,0 – 1,5	17	55 – 70,9	10 - 25	Müssig <i>et al.</i> , 2010

2.3.3.2. Propriedades químicas

As propriedades químicas das fibras de juta e sisal encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Propriedades químicas das fibras de juta e sisal.

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Pectina (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Referência
Juta	64,4	16,7	1,8	2,0	-	Horrocks & Anand, 2000
Juta	51 - 84	12 - 24	0,2 - 4,5	5 - 14	0,17 - 0,7	Müssig <i>et al.</i> , 2010
Juta (Brasil)	60	22,1	-	15,9	1,0	Satyanarayana <i>et al.</i> , 2007
Juta (Outros países)	59 -71	12 - 13	-	11,8 – 12,9	0,7	Satyanarayana <i>et al.</i> , 2007
Sisal	65,8	12,0	0,8	9,9	-	Horrocks & Anand, 2000
Sisal	43 - 88	10 - 15	0,5 - 10	4 - 14	0,14 - 0,55	Müssig <i>et al.</i> , 2010
Sisal (Brasil)	74 – 75,2	10 – 13,9	-	7,6 – 7,98	-	Satyanarayana <i>et al.</i> , 2007
Sisal (Outros países)	60 – 67	10 – 15	-	8 – 12	0,14 – 0,87	Satyanarayana <i>et al.</i> , 2007

2.3.3.3. Propriedades mecânicas

O Quadro 3 diz respeito às propriedades mecânicas das fibras de juta e sisal.

Quadro 3 – Propriedades mecânicas das fibras de juta e sisal.

Fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na rotura (%)	Referência
Juta	187 - 800	3 - 64	0,2 - 3,1	Müssig <i>et al.</i> , 2010
Juta (Brasil)	465	-	0,7	Satyanarayana <i>et al.</i> , 2007
Juta (Outros países)	400 - 800	10 - 30	1,5 - 1,8	Satyanarayana <i>et al.</i> , 2007
Juta	393 - 773	26,5	1,5 - 1,8	Suraya & Khalil, 2011
Sisal	80 - 855	9 - 38	1,9 - 14	Müssig <i>et al.</i> , 2010
Sisal (Brasil)	324 - 577	19	2,0 - 2,5	Satyanarayana <i>et al.</i> , 2007
Sisal (Outros países)	530 - 630	17 - 22	3,64 - 5,12	Satyanarayana <i>et al.</i> , 2007
Sisal	511 - 635	9,4 - 22	2,0 - 2,5	Suraya & Khalil, 2011

2.4. As fibras naturais como solução sustentável

Em muitas das aplicações em engenharia, como, por exemplo, estradas temporárias sobre solo mole, reforço ou drenos de consolidação, o tempo de vida requerido aos geotêxteis para cumprir as suas funções é limitado, quando materiais sintéticos têm usualmente grande durabilidade (Horrocks & Anand, 2000).

A mais brilhante estratégia sustentável em geotecnia é a consideração de materiais biodegradáveis como substitutos de materiais não degradáveis, artificiais, em situações onde é requerida uma melhoria do solo a curto prazo. A mais importante propriedade de geotêxteis

biodegradáveis, como as fibras vegetais para reforço do solo, é a sua elevada resistência à tração inicial (Mwasha, 2008).

A consideração de fibras naturais na composição de geotêxteis apresenta diversas vantagens visto que, as matérias-primas utilizadas são “amigas do ambiente”, representam um recurso renovável, a origem da sua produção tem um baixo custo unitário e o uso de fibras naturais indígenas ajuda o desenvolvimento dos países produtores através do suporte à indústria e à criação de postos de trabalho (Sarsby, 2007a; Sarsby, 2007b).

A isto acresce o facto de os geotêxteis de fibra natural, não só poderem ser eficazes, acessíveis e compatíveis com a gestão sustentável dos solos mas também ajudarem a suprimir variações extremas da temperatura do solo, fornecerem sementes com melhor hipótese de germinar e aumentarem a infiltração dos solos, reduzindo a impermeabilização dos mesmos (Methacanon *et al.*, 2010). São vantagens das fibras naturais a sua baixa densidade, rigidez e propriedades mecânicas apropriadas e o facto de serem biodegradáveis (Mukhopadhyay *et al.*, 2008).

Apesar disto os inconvenientes relacionados com o recurso a estas fibras prende-se com o facto de a sua qualidade ser variável, dependendo de influências imprevisíveis como o clima, possuem elevada absorção de água e conseqüente aumento das suas dimensões, a sua temperatura de processamento é restrita e o seu preço está sujeito a alterações, dependendo do rendimento das colheitas ou de políticas agrícolas (Savastano *et al.*, 2009). Os geotêxteis sintéticos não só são elementos estranhos ao solo, mas também têm problemas adversos associados à sua utilização, sendo que alguns produtos sintéticos são feitos a partir do petróleo. Produtos de fibra natural de origem vegetal são muito mais amigos do ambiente do que os seus semelhantes sintéticos, e as próprias fibras são um recurso renovável e biodegradável (Horrocks & Anand, 2000).

Ideias pré-concebidas sobre a aparente baixa resistência à tração de materiais naturais e a percepção de que têm um tempo de vida curto, quando em contacto com solo, limita os seus usos, nomeadamente no reforço de solos na geotecnia. Além disso, a falta de métodos eficazes de juntar componentes fibrosos individuais para formar estruturas fibrosas à tração constitui uma importante limitação ao seu uso (Horrocks & Anand, 2000).

Existem várias situações em geotecnia onde o período crítico no que diz respeito à estabilidade é imediatamente, ou pouco após, a construção, como é exemplo qualquer tipo de carregamento de fundação ou drenagem de solos. Habitualmente este tipo de situações é solucionada com recurso a geotêxteis sintéticos para reforço basal que proporciona uma força de estabilização adicional. Assim, a estabilidade do sistema irá melhorar com o tempo e por isso a força de estabilização, fornecida pelo geotêxtil sintético, irá diminuir. Depois de algum tempo, alguns meses ou poucos anos, todo o sistema será estável com pouca ou nenhuma assistência do geotêxtil, tornando-se assim totalmente redundante (Mwasha, 2008).

As fibras naturais de origem vegetal podem ser utilizadas na maioria das aplicações temporárias, como, por exemplo, no controlo de erosão dos solos. Os geotêxteis fabricados com fibras naturais permitem o crescimento da vegetação e o posterior estabelecimento da sua raiz. Uma vez servido o seu propósito, estas matérias desintegram-se naturalmente no solo (Horrocks & Anand, 2000).

2.5. Casos de estudo

A seguir será feita referência a alguns estudos realizados no âmbito da utilização de fibras naturais como constituintes de um geotêxtil, como, por exemplo, no controlo de erosão e também no reforço de solos, com o objetivo de identificar alguns aspetos relacionados com a degradação das referidas fibras, nomeadamente tipo de solos, diferentes valores de pH e variação das propriedades mecânicas das fibras naturais.

A aplicação de fibras vegetais no controlo de erosão foi estudada por Lekha (2004). O objetivo era estudar o efeito de geotêxteis de fibra de coco na estabilização de encostas em Kerala, Índia. O talude em causa tinha uma área total de 1600 m² e inclinação média de 26°. Foram traçados três conjuntos de parcelas semelhantes, cada parcela tendo uma área protegida e outra não protegida com o referido geotêxtil, em cada par de parcelas uma parte foi protegida usando redes de coco auxiliada por relvado e a outra foi deixada sem proteção. O controlo da erosão foi feito durante um ano hidrológico completo, a partir do período pré-moção, e a monitorização foi feita com recurso a tambores de coleta colocados na parte

inferior de cada parcela de controle, com o objetivo de fazer a coleta dos sedimentos de enxurrada (Lekha, 2004).

Durante o período pré-moção, quatro meses após instalação, a área protegida reduziu a erosão em cerca de 99 %, sendo que em pós-moção o geotêxtil reduziu em 78 % a erosão do solo, quando comparada com a área não protegida. Foi também analisada a biodegradação do geotêxtil. Sendo um material natural, sofre degradação devido à ação microbiana no solo e devido à ação contínua de chuva e sol. A biodegradação de tecidos de fibra de coco foi estudada com base em testes de resistência à tração em amostras de coco periodicamente retiradas. As observações tensão-deformação foram analisadas e foi traçada a curva que compara a resistência à tração máxima com a idade do geotêxtil. Os resultados mostram que este conseguiu reter 22 % da sua resistência inicial ao fim de sete meses (Lekha, 2004).

O tema do reforço de solos com recurso a geotêxteis de fibra natural foi abordado por Mwasha & Petersen (2010), que pretenderam estudar o comportamento de um aterro reforçado com um geotêxtil de fibra de sisal construído sobre solo mole. Para isso construíram um tanque e utilizaram areia de quartzito, com origem em Valência, Trinidad e Tobago, para o referido estudo. O quartzito utilizado era uma forma relativamente pura de quartzo, com cerca de 99 % deste mineral.

O geotêxtil foi colocado sobre um solo mole, uma lama fina retirada do Pântano Caroni, Trinidad e Tobago, sobre o qual se ergueu o referido aterro de areia. No final da consolidação, o aterro foi desmontado a fim de testar o geotêxtil, que apresentava claros sinais de ataque de fungos. O geotêxtil biodegradado foi lavado com água destilada e seco em estufa para depois ser testado. Foi-lhe retirado uma amostra, e verificou-se que a resistência à tração do geotêxtil tinha diminuído de 92 para 10 kN/m após dois meses de teste (Mwasha & Petersen, 2010).

No seu estudo da durabilidade de geotêxteis de fibra de coco, Balan (1995) demonstrou que, quando incorporado no solo, o coco conservou 43 % da sua resistência em meio alcalino com um pH de 11, e 60 % com um pH de 3. Verificou-se que a degradação é mais rápida com valores de pH a variar entre 6 e 8, onde a resistência retida foi de 34 % e 26 %, respetivamente. Contudo a capacidade de absorção de humidade do geotêxtil aumentou à medida que avançou a degradação. Após um ano, a absorção do geotêxtil degradado foi 2,5

vezes maior do que quando em estado fresco. Esta propriedade é uma vantagem na melhoria da humidade do solo e crescimento da vegetação (Vishnudas *et al.*, 2012).

De acordo com Mukkulath & Thampi (2012), Sarsby *et al.* (1992) constatou a redução da resistência em 20 % de cordas de fibra de coco quando incorporadas num solo com pH de 8,7 após 10 meses. A razão para esta redução de resistência foi atribuída ao meio alcalino, em vez da humidade presente no solo.

Num estudo sobre a biodegradação de geotêxteis de fibra de coco, Mukkulath & Thampi (2012) recorreram a este tipo de materiais como biofiltros para o tratamento de águas residuais. Foram estudados vários efluentes, com diferentes valores de pH e foi analisada a redução da resistência à tração das fibras de coco. O estudo mostra que a degradação, ou redução, da resistência à tração dos geotêxteis de fibra de coco era menor quando a gama de pH era de 6,5 a 8. O afastamento das gamas neutras de pH torna o afluente ácido ou alcalino, o que torna as fibras de coco mais frágeis e isso é evidente na redução da resistência à tração.

Um estudo realizado no âmbito da biodegradação de fibras naturais, citado por Joy *et al.* (2011), relata que, nas condições climáticas típicas de Deli, Índia, geotêxteis de juta enterrados a uma profundidade de 300 mm em solo frouxo perderam completamente a sua resistência em dois meses e meio, observando-se também que a redução desta é maior em água com pH de 5,2.

No seu estudo da biodegradação de geotêxteis de fibra de coco em condições tropicais, Joy *et al.* (2011) recorreram a ensaios de resistência à tração, em diferentes intervalos de tempo, com o geotêxtil de coco incorporado em solo laterítico a diferentes profundidades, 15, 45, 75 e 100 cm. Foi observada a redução da resistência à tração em função do tempo, devido à ação de microorganismos, sendo que a biodegradação do geotêxtil foi mais pronunciada à profundidade de 75 cm.

Diferentes amostras do geotêxtil foram retiradas do solo após 30, 60, 75, 105 e 120 dias para serem testados, e verificou-se, no final do estudo, que para uma profundidade de 15 cm a perda de resistência à tração varia entre os 30 e 40 % do valor inicial. As profundidades de 45 e 75 cm verificaram-se ser propícias a uma maior perda de resistência à tração com

percentagem de perda a variar entre 78 e 92 %, ao fim de 120 dias. É de referir ainda que, até aos 105 dias de estudo, as amostras de geotêxtil às profundidades 15 e 100 cm perdem entre 32 e 43 % da sua resistência à tração, sendo que para as profundidades 45 e 75 cm esta perda situa-se entre 54 e 66 %, ou seja, a perda de resistência à tração dos geotêxteis a 45 e 75 cm pode chegar a ser o dobro da verificada a 15 e 100 cm para o mesmo período de análise (Joy *et al.*,2011).

Num estudo sobre a durabilidade de fibras naturais, quando colocadas em contacto com um solo residual granítico, realizado por Carvalho (2012), foram utilizadas três tipos de fibras vegetais, sisal, coco e banana. Ao longo do tempo estas fibras foram sendo analisadas periodicamente com recurso a ensaios de resistência à tração, sendo que foi possível verificar-se que, para o caso das fibras de sisal, a perda mais acentuada deste parâmetro ocorreu nos primeiros 15 dias de estudo, registando-se perdas de resistência à tração entre os 65 e 81 %. Ao fim de 90 dias de estudo a mesma perda de resistência rondava entre os 89 e 96 %, ou seja, nos primeiros 15 dias de estudo as fibras de sisal perderam quatro vezes mais resistência que nos 30 dias que se seguiram.

Em relação às fibras de banana, tal como verificado anteriormente em relação às fibras de sisal, a perda mais acentuada de resistência dá-se até aos 15 dias de estudo, onde a perda variou entre 68 e 83 %, sendo que aos 30 dias e até ao fim do estudo, a perda de resistência foi de 100 %. No que diz respeito às fibras de coco, os resultados obtidos mostram variações ao longo do tempo onde se verificam perdas e ganhos de resistência em relação aos valores padrão, tal facto poderá estar relacionado com a elevada presença de água nas fibras (Carvalho, 2012).

De acordo com um estudo realizado por Babu & Vasudevan (2008), citado por Gaw & Zamora (2010), no âmbito do reforço de solos com recurso a fibras naturais, nomeadamente fibras de coco, cujo objetivo era determinar o efeito deste reforço na resistência ao corte e na rigidez do solo, através de ensaios triaxiais. Foram utilizadas amostras com três diferentes diâmetros de fibra, quatro comprimentos diferentes de fibra, três diferentes pressões confinantes e sete diferentes teores de fibras, expressas em percentagem por peso.

Os resultados indicam que a melhoria da resistência máxima ocorre em teores de fibras entre os 2 e 2,5 %, isto é conseguido a cerca de 10-18 % de tensão para fibras com comprimento de

15 mm e para todas as pressões confinantes. Concluiu-se que o acréscimo de resistência máxima é 3,5 vezes maior do que as amostras de solo não reforçadas com fibras (Gaw & Zamora, 2010).

Os mesmos autores referem também um outro estudo de Marandi (2008), onde foi avaliado o efeito da inclusão de fibras de palmeira na resistência ao corte, avaliada através de ensaios de compressão simples, e capacidade de carga de solos silto-arenosos. Foram estudados diferentes comprimentos e teores de fibras, em percentagem de peso, e concluiu-se que a resistência ao corte máxima das amostras de solo não reforçado foi de 40 kPa, e a resistência ao corte máxima atingida pelo reforço foi de 530 kPa, isto representa um aumento mais de treze vezes em relação à resistência do solo não reforçado. O estudo concluiu que a inclusão de fibras de palmeira no solo pode aumentar a capacidade de carga de um solo não reforçado até 26 vezes (Gaw & Zamora, 2010).

O efeito da inclusão aleatória de fibras de sisal no comportamento da resistência do solo com recurso a ensaios de compressão e compactação triaxiais foi estudado por Prabakar & Sridhar (2002). As fibras de sisal, material escolhido como reforço, foram aleatoriamente incluídas no solo, com diferentes percentagens de fibra por peso de solo, e com diferentes comprimentos, a fim de compreender o comportamento da resistência de um solo não expansivo. Nesta experiência foram utilizadas amostras de solo, de cor castanha, recolhidas próximo de Bhopal, Índia, e procedeu-se à sua caracterização, nomeadamente peso específico, granulometria, limites de consistência e parâmetros de cisalhamento, valor da coesão e ângulo de atrito interno.

Os resultados obtidos mostram que para qualquer percentagem de teor de fibras, a massa volúmica seca diminui com o aumento do comprimento de fibras, implicando que a massa volúmica seca máxima do solo diminuiu com o aumento do comprimento das fibras. O valor da coesão aumenta devido à inclusão das fibras de sisal, o valor máximo é de 66 kPa, em vez dos 18 kPa verificados para a amostra de solo não reforçado. Este valor máximo de coesão foi observado em solo com teor de fibras de 0,75 % e com comprimento de 20 mm, e regista um valor de coesão cerca de 3,6 vezes maior do que o solo não reforçado (Prabakar & Sridhar, 2002).

Num estudo realizado por Ravishankar & Raghavan (2004), citado por Hejazia *et al.* (2012), confirmou-se que, para solos lateríticos estabilizados com coco, a massa volúmica seca máxima do solo diminui com a adição de fibras de coco e o valor do teor ótimo aumenta com o aumento da percentagem de fibras. A resistência à compressão do solo compósito aumenta até um teor de fibra de coco de 1 %, sendo que a partir daí o aumento da quantidade das fibras faz diminuir este valor. A percentagem de absorção de água aumenta com o aumento da percentagem de fibras de coco e a resistência à compressão do solo reforçado com fibras aumenta com o aumento da percentagem de fibras.

Ainda na temática de reforço de solo com fibras naturais, Ahmad *et al.* (2010) misturaram fibras de palmeira com solo de areia siltosa para apurar a resistência ao corte durante compressão triaxial. As amostras de solo foram testadas com 0,25 % e 0,5 % de conteúdo de fibras, com comprimento de fibras revestidas de 30 mm, apresentou um aumento de cerca de 25 % no ângulo de atrito, e de 35 % no valor da coesão, quando comparada com a amostra de areia siltosa não reforçada (Hejazia *et al.*,2010).

3. METODOLOGIA

3.1. Conceção do estudo

Na realização deste estudo sobre a degradação de geotêxteis em fibra natural foram tidos em conta diversos aspetos e componentes, considerados importantes para monitorizar o processo de biodegradação de fibras naturais quando aplicadas na funcionalidade de geotêxteis. Para exprimir este mesmo processo de biodegradação é feito o acompanhamento ao longo do tempo, não só do comportamento mecânico das fibras, como a sua capacidade de resistência à tração, mas também das alterações da morfologia da estrutura fibrosa através de análise microscópica e também da perda de massa das fibras.

Sendo o objetivo do presente estudo, a avaliação da degradação de geotêxteis compostos por fibras naturais, considera-se fundamental a interação de componentes como as fibras, o solo, as condições ambientais diversas e o fator tempo.

Tal como já foi referido anteriormente, as fibras de origem natural escolhidas para figurar no presente estudo foram as fibras de juta e de sisal. No que diz respeito ao solo, onde estas irão ser incorporadas, foi utilizado um saibro granítico, comumente encontrado na região de Guimarães. Em relação a estes materiais, utilizados na realização do estudo, é feita mais à frente uma referência e caracterização aos mesmos no Capítulo 3.2 do presente documento.

3.1.1. Cenários em análise

Com o objetivo de perceber qual a influência que as condições inerentes à função de geotêxteis têm na degradação de fibras naturais, foram concebidos três cenários de análise: fibras em estado natural, de controlo; fibras colocadas em solo exposto a condições ambientais; e por fim, fibras colocadas em solo exposto a condições controladas.

Primeiramente é efetuada uma análise às fibras no seu estado considerado como natural, ou seja, sem que estas tenham sofrido qualquer tipo de degradação por agentes exteriores. Torna-se então necessário perceber qual a influência que a colocação das fibras no solo tem no

comportamento destas. Assim, foi determinado que as fibras em estudo seriam monitorizadas em dois ambientes distintos:

- 1- as fibras são colocadas no solo, sendo que o conjunto solo-fibras é posteriormente exposto às condições ambientais,
- 2- as fibras são colocadas no solo, sendo que o mesmo conjunto é mantido num ambiente controlado.

Pretende-se assim, perceber qual a influência do contacto das fibras unicamente com o solo no comportamento destas, e também estando estes materiais a interagir com agentes climáticos distintos.

Para levar a cabo o presente estudo foi idealizada a construção de uma série de caixas que pudessem conter o solo incorporando as fibras, simulando assim, o cenário de colocação de um geotêxtil no solo. Após a preparação dos modelos das caixas contendo o solo e as fibras, estas foram colocadas nos dois ambientes acima referidos.

Para o cenário relativo às condições ambientais, as referidas caixas foram colocadas no ambiente exterior, estando sujeitas à ação de diversos agentes climáticos como variações de temperatura do solo, fruto não só da transição do dia para a noite, mas também da primavera para o verão; variações de humidade do solo, resultantes da precipitação verificada durante o período em que se desenvolve o estudo; e também da incidência de radiação solar, que seguramente influencia o processo de biodegradação das fibras apesar da espessura da camada superficial de solo ser considerável.

Em relação ao cenário de condições controladas, o objetivo é prevenir a exposição das fibras dos agentes ambientais que aceleram o seu processo de biodegradação, como tal as caixas utilizadas no estudo são mantidas no interior do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Aqui não existem variações no teor de humidade do solo resultante da precipitação, nem qualquer tipo de exposição solar. Relativamente à temperatura a que estes modelos, solo-fibras, estão expostos trata-se da temperatura interior natural do espaço do laboratório, não havendo significativas variações na mesma ao longo do tempo.

Em suma a abordagem adotada permitirá perceber qual o comportamento mecânico das fibras e as alterações na sua morfologia estando estas no seu estado natural, e comparar estes com aqueles resultantes da colocação das fibras no solo em ambientes com e sem a ação de agentes climáticos. Torna-se também necessário referir que segundo a norma NP EN 1226: 2005 Geotêxteis e produtos relacionados. Ensaio gerais para avaliação após ensaios de durabilidade, é necessário ensaiar os geotêxteis, tanto na direção de fabrico (90°), como na direção perpendicular/transversal ao fabrico (0°), ou seja, segundo a teia e trama. O período temporal no qual o estudo se prolongou foi determinado de forma a garantir que as fibras estariam sujeitas a consideráveis variações de temperatura, humidade e radiação solar, características da mudança de estação, da primavera para o verão.

O período de análise para o presente estudo foi de três meses, doze semanas. Previsivelmente as fibras naturais terão uma maior degradação das suas propriedades nas primeiras semanas após a sua colocação no solo, tal como foi mencionado anteriormente relativamente a estudos realizados sobre o tema por Lekha (2004), Mwashha & Petersen (2010) e Carvalho (2012). Assim, este espaço temporal pensa-se ser o necessário para verificar uma efetiva biodegradação das fibras consideradas.

Durante este período de doze semanas foram projetados seis testes, intervalados entre si por duas semanas, com o objetivo de, posteriormente, ser possível traçar curvas que relacionem as variáveis resistência à tração e tempo, perceber a degradação da estrutura fibrosa com recurso a análise microscópica, e também a perda de massa das amostras com os resultados obtidos em cada um dos seis testes.

Tendo isto em consideração, o Quadro 4 exprime, de forma esquemática e resumida, os diferentes cenários em análise.

Quadro 4 – Diferentes cenários em análise no estudo de degradação das fibras naturais.

Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Fibras em estado natural, valores de controlo	Fibras em condições ambientais (exterior)	Fibras em condições controladas (laboratório)
<p>Tecido Fibra de Juta ↙ ↘ Teia Trama</p> <p>Tecido Fibra de Sisal ↙ ↘ Teia Trama</p>	Teste nº1 (2 semanas)	
	<p>Tecido Fibra de Juta Tecido Fibra de Sisal ↙ ↘ ↙ ↘ Teia Trama Teia Trama</p>	
	Teste nº2 (4 semanas)	
	<p>Tecido Fibra de Juta Tecido Fibra de Sisal ↙ ↘ ↙ ↘ Teia Trama Teia Trama</p>	
	(...)	
	Teste nº 6 (12 semanas)	
<p>Tecido Fibra de Juta Tecido Fibra de Sisal ↙ ↘ ↙ ↘ Teia Trama Teia Trama</p>		

3.1.2. Preparação dos modelos

Os modelos solo-fibras idealizados para levar a cabo o presente estudo foram, tal como já havia sido mencionado, realizados numa série de caixas. Para cada um dos cenários, fibras em condições ambientais e fibras em condições controladas, foram construídas quatro caixas, uma para conter provetes de fibra de juta cuja maior dimensão contém fios da teia e outra onde estes têm na maior dimensão fios da trama, o mesmo se passa com os provetes de sisal, existindo uma caixa para provetes com maior dimensão segundo a teia e outra para a trama.

Na Figura 11 mostra-se uma das caixas utilizadas no estudo. Esta encontra-se compartimentada em seis frações, para que se pudessem retirar as fibras do solo de duas em duas semanas para respetiva análise, sem que as restantes fibras sofressem qualquer influência desta operação de remoção. Esta contém também diversos orifícios no seu fundo com o propósito de permitir a drenagem da água contida no solo.



Figura 11 – Caixas para conter o solo incorporando as fibras.

No que diz respeito às dimensões destes recipientes, onde o estudo se desenrola, a altura destes foi escolhida tendo em perspetiva que se pretendem duas camadas de solo, de igual espessura, uma acima e outra abaixo do nível reservado para as fibras. Foi então, projetada a existência de duas camadas de solo, cada uma com 5 cm de espessura, incorporando as amostras de fibras. Este valor permite uma boa simulação das condições reais, sendo que um aumento do mesmo resultaria num significativo aumento das quantidades de solo a movimentar para o estudo. A Figura 12 ilustra a representação esquemática do solo incorporando as fibras.



Figura 12 – Representação esquemática do solo incorporando as fibras.

Relativamente à largura e ao comprimento de cada um dos seis compartimentos, estes resultam de uma leitura da norma NP EN 1226:2005 Geotêxteis e produtos relacionados. Ensaio gerais para avaliação após os ensaios de durabilidade, que indica que o número de provetes de fibras deve ser de, no mínimo, cinco, e as suas dimensões mínimas de 60 mm de

largura e 300 mm de comprimento. Ainda segundo a mesma norma, é necessário referir que os geotêxteis devem ser analisados, com o mesmo número de provetes, tanto na direção da teia como da trama.

Em relação ao número de provetes foi adicionado um provete ao número mínimo descrito, prefazendo um total de seis. Esta opção baseia-se no facto de se estar a trabalhar com materiais de origem natural, como tal possuem qualidade variável, logo, quanto maior for a amostragem disponível, melhor será a uniformização nos resultados obtidos. Previne-se assim, também qualquer situação que leve à inutilização de uma das amostras, como por exemplo, rasgos ou perfurações nas mesmas.

Quanto ao comprimento dos provetes foi apurado que a utilização destes com 300 mm iria implicar movimentar uma quantidade de cerca de 1,4 toneladas de solo. Assim, e por uma razão de simplificação, resolveu-se diminuir o valor do comprimento dos provetes para 200 mm, o que resulta numa diminuição de 45 % na quantidade de solo necessário. Esta opção pela redução das dimensões das amostras resulta numa variação à norma, no entanto, apesar dos resultados serem diferentes daqueles que seriam obtidos com provetes maiores, não afeta a validade dos mesmos, uma vez que se trata de um estudo comparativo. Em relação à largura dos provetes, estes foram considerados com 70 mm. A Figura 13 ilustra a marcação dos provetes no tecido de juta para posterior corte.



Figura 13 – Processo de corte dos provetes de fibra de juta.

Em suma, e tendo em consideração o referido anteriormente, foi projetado cada compartimento com as dimensões 22 x 45 cm, suficiente para conter seis provetes de fibras com 70 x 200 mm, que incluem espaçamentos entre os vários provetes para facilitar a operação de remoção dos mesmos.

O preenchimento destas caixas com o solo foi feito com recurso a compactação manual, através de um compactador, construído para o efeito, composto por um varão de aço e um bloco de madeira numa das extremidades. A Figura 14 ilustra o processo de compactação do solo nas caixas e o referido instrumento de compactação. As Figuras 15 e 16 mostram a colocação das amostras de fibras em estudo, horizontalmente, sobre a primeira camada de solo previamente compactada.



Figura 14 – Processo de compactação do solo.



Figura 15 – Colocação das amostras de fibras no solo.

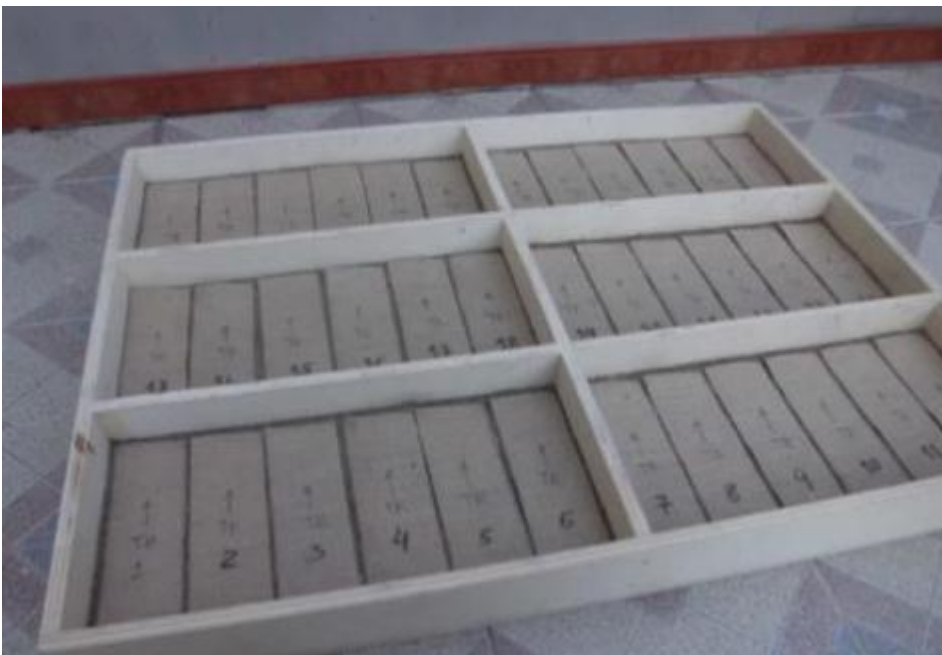


Figura 16 – Colocação das amostras de fibras no solo.

Seguidamente repete-se o mesmo processo para a segunda camada de solo, dando-se a colocação do mesmo sobre as fibras já instaladas, tal como descreve a Figura 17, sendo também este compactado à semelhança do que havia sido feito anteriormente.



Figura 17 – Colocação da segunda camada de solo.

Nas Figuras 18 e 19 estão ilustradas os quatro modelos de estudo já prontos, para cada um dos ambientes em estudo, condições ambientais e condições controladas, respetivamente.



Figura 18 – Modelos de estudo para o cenário de condições ambientais.



Figura 19 – Modelos de estudo para o cenário de condições controladas.

Para determinar a quantidade de solo a colocar em cada uma das camadas, para cada um dos seis compartimentos, foi necessária a realização de um ensaio de compactação do solo com o intuito de determinar os valores relativos ao seu teor em água ótimo e também de massa volúmica seca máxima. Os resultados relativos a este ensaio encontram-se descritos no capítulo 3.2.1.5. do presente documento.

3.2. Materiais

De seguida é feita referência a diferentes aspetos relativos aos materiais utilizados neste estudo, solo e fibras, que permitem fazer uma caracterização dos mesmos.

3.2.1. Solo

O solo utilizado no presente estudo trata-se de um saibro de origem granítica, característico da região de Guimarães. Este foi recolhido a partir de um terreno situado na freguesia de Penselo, concelho de Guimarães, a cerca de 2,5 km do pólo de Azurém da Universidade do Minho. O solo foi alvo de uma série de ensaios com o objetivo de o identificar e caracterizar, relativamente a aspetos como, por exemplo, a sua granulometria e valor de pH.

Através do ensaio de compactação leve foi possível obter os valores relativos ao teor em água ótimo e de massa volúmica seca máxima, imprescindíveis para determinar a quantidade de solo para preencher os modelos de teste com recurso a compactação manual. A determinação do teor em água do solo é utilizada não só durante o ensaio de compactação, como também para monitorizar a variação do teor em água do solo ao longo do tempo no qual decorre o estudo.

3.2.1.1. Análise granulométrica

Através da realização deste ensaio pretende-se caracterizar o solo em termos da dimensão das suas partículas, ou seja, determinar a faixa de tamanho das partículas existentes através da sua expressão numa percentagem do peso total seco.

A análise granulométrica foi realizada através do processo de peneiração, segundo a Especificação do LNEC E 239:1970 Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida, que se destina a determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas de um solo retidas no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) e a quantidade de material passada nesse peneiro. Na Figura 20 apresenta-se a curva granulométrica do solo utilizado no estudo e que reflete os resultados obtidos no ensaio realizado.

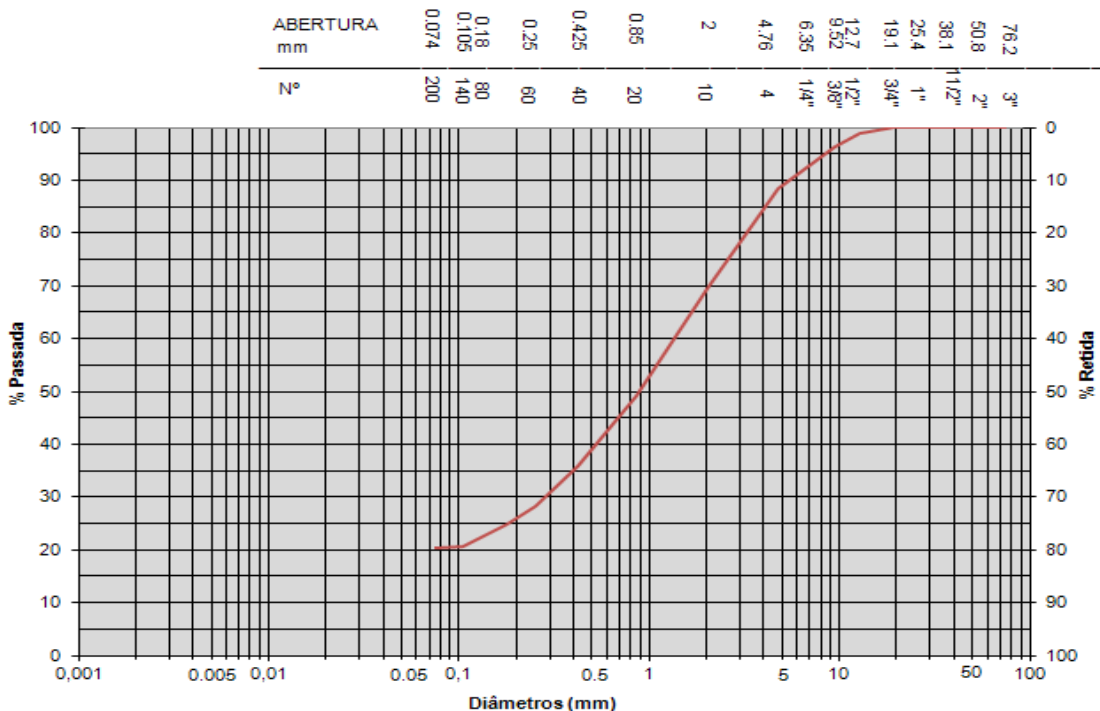


Figura 20 – Curva granulométrica do solo.

3.2.1.2. Limites de consistência

Para ser possível fazer uma identificação do solo utilizado é necessário não só recorrer aos resultados fornecidos pela análise granulométrica, mas também determinar os limites de liquidez e de plasticidade do solo.

Os limites de consistência, também conhecidos como limites de Atterberg, permitem a medição dos teores em água que definem os diferentes estados básicos do solo – sólido, semi-sólido, plástico e líquido. O limite de retração exprime o teor em água que corresponde à transição entre o estado sólido e semi-sólido, o limite de plasticidade traduz o teor em água correspondente à transição entre os estado semi-sólido e plástico, sendo que para a transição do estado plástico para o líquido, este designa-se por limite de liquidez.

O ensaio foi realizado segundo a NP 143:1969 Solos. Determinação dos limites de consistência, com secagem do solo em estufa, recorrendo também à NP 84: 1965 Solos. Determinação do teor em água. Os resultados obtidos permitem aferir que o limite de liquidez do solo é de aproximadamente 28 %, já em relação ao limite de plasticidade, o solo é classificado como ‘não-plástico’. Isto surge pelo facto de o solo em causa ser maioritariamente arenoso, com pequenas quantidades de argila na sua composição, mostrando-se impossível a obtenção do filamento de amostra pretendida devido à desagregação da mesma, visto não se tratar de um material plástico.

3.2.1.3. Identificação do solo

Com base nos resultados obtidos na análise granulométrica e limites de consistência do solo, é possível, com recurso à norma ASTM D 2487:2000 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes, proceder à Classificação Unificada do solo.

Com base na referida norma é possível identificar o solo e conclui-se que este é classificado como areia siltosa, ‘SM’, comumente designado de solo residual granítico.

3.2.1.4. Valor de pH

Torna-se importante a determinação do valor de pH do solo utilizado dada a suscetibilidade química das fibras naturais de origem vegetal em função da acidez ou alcalinidade própria do meio a que são sujeitas. Para levar a cabo a determinação do valor de pH do solo recorreu-se à norma ASTM D 4972:2001 Standard Test Method for pH of Soils, que determina o grau de acidez ou alcalinidade de solo suspenso em água destilada e em 0,01 mols de cloreto de cálcio. Esta medição é feita com recurso a um potenciómetro com eléctrodos sensíveis ao pH e com o solo passado no peneiro nº. 10.

Os resultados obtidos para o ensaio permitem perceber que se está na presença de um solo ácido, uma vez que o valor de pH para a solução de água destilada foi de 5,1 e de 4,9 para a solução de cloreto de cálcio, verificando-se que o valor para o cloreto de cálcio é inferior ao determinado em água.

3.2.1.5. Ensaio de compactação

O ensaio de compactação do solo foi realizado com o objetivo de determinar a relação entre o teor em água e a massa volúmica seca do solo, que permitirá calcular as quantidades de solo a colocar nos modelos solo-fibras utilizados no estudo.

Este foi realizado segundo a metodologia presente na Especificação LNEC E 197:1966 Solos. Ensaio de compactação, com recurso a compactação leve em molde pequeno com 3 camadas aplicando-se 25 pancadas em cada camada. A razão pela qual se optou por um ensaio com compactação leve prende-se com o facto de a compactação do solo nos modelos ser manual com recurso a um instrumento relativamente leve e portanto, a energia de compactação leve é mais executável.

Com base nos resultados obtidos, torna-se possível traçar a curva massa volúmica seca - teor em água, e determina-se nesta os valores do teor em água ótimo e da massa volúmica seca máxima, que correspondem ao ponto máximo dessa curva. Na Figura 21 está ilustrada esta mesma curva, sendo possível determinar que o valor relativo à massa volúmica seca máxima é de 1800 kg/m³ e de cerca de 12,2 % para o teor em água ótimo.

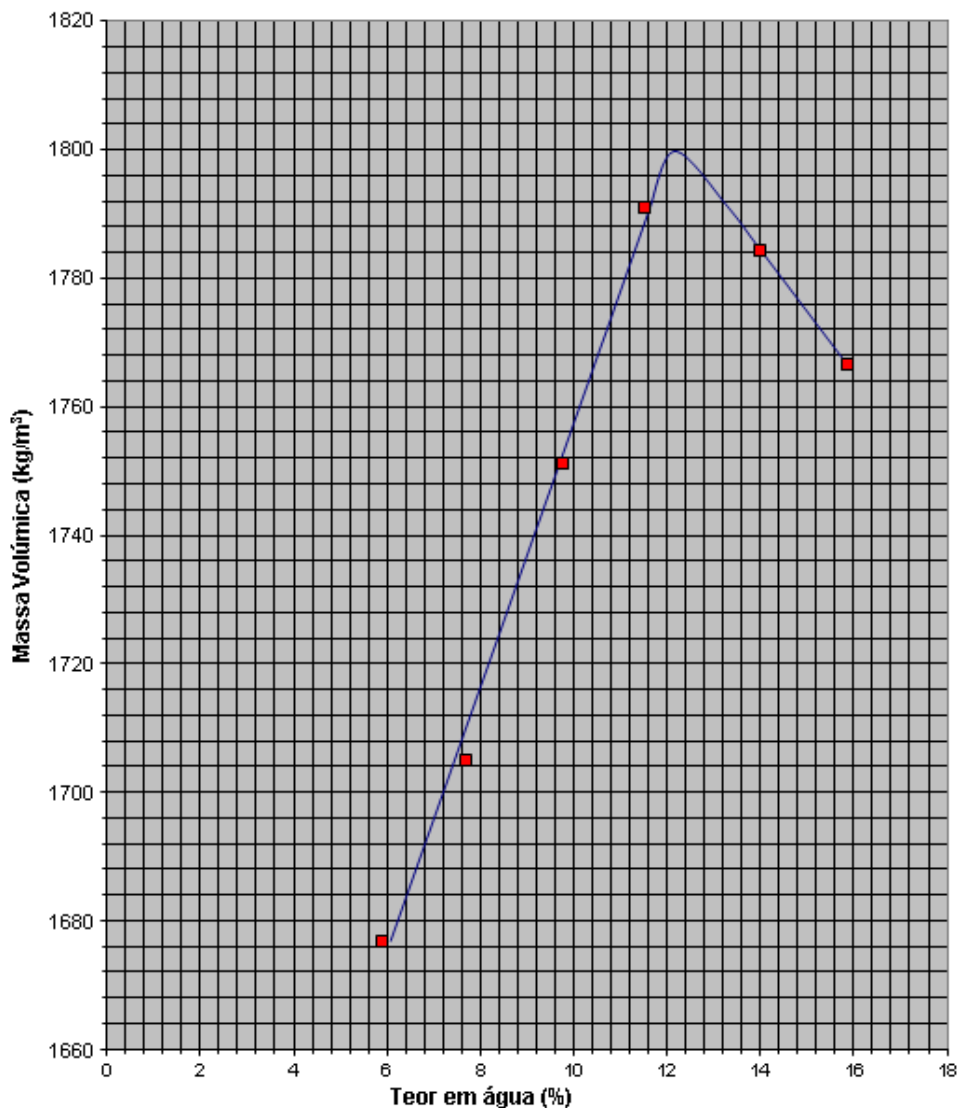


Figura 21 – Curva de compactação correspondente à compactação leve.

Tendo em consideração estes resultados de massa volúmica seca máxima e teor em água ótimo, é possível determinar a quantidade de solo a colocar em cada uma das frações dos modelos do estudo. Com base nas dimensões de cada fração, anteriormente mencionadas, e com cada camada de solo a ter uma espessura de 5 cm, o volume desta mesma camada é de 4950 cm³.

Aquando da sua recolha, o solo escolhido para figurar do estudo possuía um teor em água de aproximadamente 14,3 %, o que corresponde a uma massa volúmica seca, lida na Figura 21, de cerca de 1782 kg/m³. É, assim, possível determinar a quantidade de solo a colocar em cada fração dos modelos recorrendo às equações 1 e 2 (Fernandes, 2006).

$$W_s = V \times \gamma_d \quad (1)$$

Em que: 'W_s' é o peso seco do solo, em g
'V' é o volume, em cm³
'γ_d' é a massa volúmica seca, em g/cm³

$$W_h = W_s \times \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad (2)$$

Em que: 'W_h' é o peso húmido do solo, em g
'W_s' é o peso seco do solo, em g
'w' é o teor em água do solo, em %

O valor relativo ao peso húmido do solo, valor efetivo a colocar nos modelos de estudo em cada camada por fração, é de cerca de 10082 gramas. Por uma razão de simplificação este valor foi arredondado para 10 kg.

3.2.2. Fibras

As fibras naturais de origem vegetal alvo de estudo são as de juta e sisal. Estas serão caracterizadas numa série de propriedades como, massa por unidade de superfície, massa linear dos fios, número de fios por unidade de comprimento e espessura dos tecidos.

3.2.2.1. Massa por unidade de superfície

A determinação da massa por unidade de superfície, massa de uma área do tecido conhecida dividida por essa mesma área, foi feita segundo a norma NP EN 12127:1999 Têxteis. Determinação da massa por unidade de superfície em amostras de pequenas dimensões.

Começa-se pelo corte de, pelo menos, cinco provetes com um mínimo de 100 cm² utilizando um dispositivo de corte próprio para o efeito e de seguida os mesmos são pesados. Para cada um dos provetes é calculada a massa por unidade por superfície, *M*, em gramas por metro

quadrado através da equação 3. Deverá ser calculada a média dos resultados obtidos e arredondado a três algarismos significativos.

$$M = \frac{m}{A} \quad (3)$$

Em que: 'M' é a massa por unidade de superfície, em g/m²

'm' é a massa do provete, em g

'A' é a área do mesmo provete, em m²

De seguida, apresentam-se no Quadro 5 os resultados obtidos relativamente a cada um dos tecidos, das diferentes fibras em análise.

Quadro 5 – Massa por unidade de superfície dos tecidos de juta e sisal.

	Fibra	
	Juta	Sisal
Média de 'M' (g/m ²)	377,602	1117,808
Desvio Padrão (g/m ²)	6,057	43,623
Coefficiente Variação (%)	1,604	3,903

3.2.2.2. Massa linear dos fios

A determinação da massa linear dos fios presentes nos tecidos de juta e sisal utilizados no estudo foi feita com recurso ao documento normativo NP 4105:1990 Têxteis. Determinação da massa linear de um fio retirado de um tecido, que expressa que a mesma determinação deve ser feita utilizando a equação 4:

$$Tex = \frac{m}{c} \quad (4)$$

Em que: 'Tex' é a massa linear dos fios, em tex

'm' é a massa do fio, em g

'c' é o comprimento do mesmo fio, em km

Na norma referida anteriormente, é feita também uma referência à medição do comprimento destes fios com recurso à norma NP 4115:1991 Têxteis. Determinação da contração dos fios num tecido, onde os fios retirados de um tecido, e de comprimento conhecido, são sujeitos a uma tensão de retificação e medidos sob tensão. A determinação da contração é feita com recurso à equação 5:

$$C = \frac{(L-L_0)}{L_0} \times 100 \quad (5)$$

Em que: 'C' é a contração dos fios, em %
 'L' é o comprimento médio sob tensão, em mm
 'L₀' é o comprimento medido no tecido, em mm

Os resultados obtidos estão expressos no Quadro 6, que se apresenta de seguida.

Quadro 6 – Massa linear e contração dos tecidos de juta e sisal.

	Fibra			
	Juta		Sisal	
	Teia	Trama	Teia	Trama
Média de 'C' (%)	4,920	2,140	5,0	0,90
Desvio Padrão (%)	0,329	0,341	1,327	0,170
Coefficiente Variação (%)	6,693	15,915	26,533	18,885
Média de 'Tex' (tex)	275,445	258,009	2097,059	1896,483
Desvio Padrão (tex)	41,300	31,019	396,186	302,202
Coefficiente Variação (%)	14,994	12,022	18,892	15,935

3.2.2.3. Espessura

A espessura de uma estrutura fibrosa pode ser definida como a distância perpendicular entre duas placas de referência que exercem uma determinada pressão sobre o referido têxtil e sua determinação é conseguida segundo a norma NP EN ISO 5084:1999 Têxteis. Determinação da espessura de têxteis e produtos têxteis. Esta enuncia que a espessura de um provete é medida como a distância entre a placa de referência sobre a qual é colocado o provete e um calcador circular paralelo, que exerce uma pressão especificada na área do têxtil sob ensaio.

A obtenção dos resultados foi feita com recurso a um medidor de espessura, com os requisitos necessários para o efeito, a área do calcador utilizada foi de 20 cm², com o calcador a aplicar uma pressão de 100 Pa. O número de ensaios realizados para ambos os provetes, de juta e de sisal, foi de dez. Os resultados relativos a este ensaio estão presentes no Quadro 7.

Quadro 7 – Espessura dos tecidos de juta e sisal.

	Fibra	
	Juta	Sisal
Média da espessura (mm)	1,862	4,637
Desvio Padrão (mm)	0,325	0,263
Coefficiente Variação (%)	17,428	5,679

3.2.2.4. Número de fios por unidade de comprimento (contextura)

A determinação do número de fios por unidade de comprimento, também designada por contextura, tem por objetivo especificar o número de fios por centímetro num determinado tecido. Esta foi conseguida com recurso à norma NP EN 1049-2:1995 Têxteis. Determinação do número de fios por unidade de comprimento, segundo o Método B, aí descrito, com recurso a um conta-fios.

Pretende-se calcular o número de fios por centímetro em cada sentido, para a teia e para a trama, para os dois tecidos em estudo, sendo que o comprimento mínimo de medida para tecidos com um número de fios por centímetro inferior a dez, é de 10 cm. Como tal são feitas dez medições para cada um dos casos. Os resultados obtidos após a realização do presente ensaio estão expressos no Quadro 8.

Quadro 8 – Número de fios por unidade de comprimento dos tecidos de juta e sisal.

	Fibra			
	Juta		Sisal	
	Teia	Trama	Teia	Trama
Média (nº de fios/cm)	7	6	3	3
Desvio Padrão (nº de fios/cm)	0,42	0,32	0	0
Coefficiente Variação (%)	0,058	0,054	0	0

3.3. Preparação dos provetes para ensaio

Antes de ser realizada qualquer tipo de análise aos vários provetes de fibras retirados do solo, foi necessário estabelecer um procedimento que permitisse que estes estivessem em condições de serem ensaiados.

Devido ao facto de terem estado em contacto com o solo, após o processo de remoção dos provetes de fibras deste, torna-se necessário que estes sejam devidamente lavados, para que seja possível retirar da sua estrutura a maior quantidade possível de partículas do solo. Na Figura 22 encontra-se ilustrado o processo de remoção dos provetes de fibras do solo dos modelos de ensaio.



Figura 22 – Remoção dos provetes de sisal do solo.

Seguidamente os provetes deverão ser secos, e, por fim, cortados para possuírem as dimensões adequadas para ensaio. Isto deve-se ao facto de os provetes de fibras terem sido colocados no solo com uma largura superior àquela necessária para ensaio, como forma de prevenir o facto de alguns fios destes provetes se perderem no solo e também no processo de lavagem.

O procedimento para preparação dos provetes antes de ensaio estabeleceu-se, também mas não só, após leitura e conjugação das recomendações presentes nas normas NP EN 12226:

2005 Geotêxteis e produtos relacionados. Ensaio gerais para avaliação após ensaios de durabilidade, e também NP EN ISO 13437:2007 Geotêxteis e produtos relacionados. Método para instalação e extração de amostras no solo e preparação de provetes para ensaios em laboratório.

O procedimento, de preparação das amostras de fibras antes de ensaio, adotado contempla o encadeamento das seguintes ações:

- Lavagem dos provetes de fibras em água destilada e com recurso a um pincel que permita a remoção das partículas do solo, retratada na Figura 23;
- Condicionamento dos provetes lavados em estufa a uma temperatura de 20 °C (± 2 °C) durante um período de 24 horas;
- Conclusão do processo de secagem dos provetes, com a colocação destes numa sala à sua temperatura normal, durante um período de 24 horas, para que sequem ao ar;
- Corte dos provetes para dimensões adequadas ao seu ensaio.

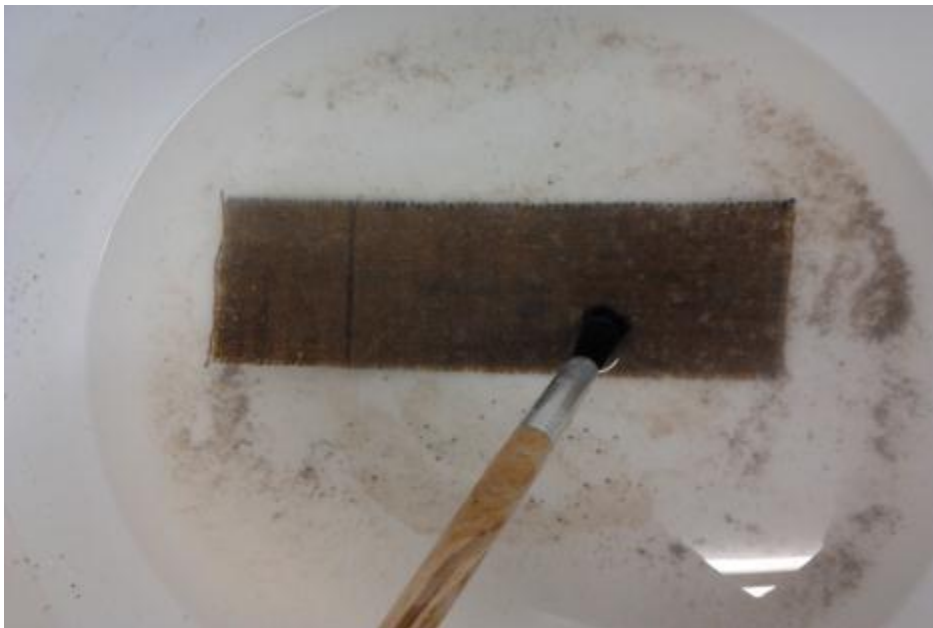


Figura 23 – Processo de lavagem dos provetes de fibras.

3.4. Resistência à tração

A determinação do parâmetro relativo à resistência à tração dos provetes de fibras utilizados no estudo foi feita com recurso à norma NP EN ISO 13934-1:2001 Propriedades de tração dos tecidos. Parte 1: Determinação da força máxima e do alongamento à força máxima pelo método da tira, sendo que o equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaio, neste caso para tração, *Hounsfield H 100 KS* com uma célula de carga de 100 kN. O referido equipamento encontra-se ilustrado na Figura 24.

Segundo o documento normativo do ensaio referido anteriormente, um provete de tecido de dimensões especificadas é tracionado a uma velocidade constante até à rotura deste. As dimensões dos provetes ensaiados possuem 50 mm de largura e um comprimento nominal, distância entre os dois pontos de fixação do aparelho de ensaio, de 100 mm. A razão pela qual o comprimento nominal é de 100 mm, e não de 200 mm pois o alongamento na força máxima ser inferior a 75 %, prende-se com o facto de, tal como foi referido em 3.1.2., os provetes utilizados no estudo terem 200 mm de comprimento em vez dos 300 mm recomendados. A utilização de um comprimento nominal de 100 mm permite que os provetes sejam amarrados na máquina de ensaio com um comprimento de 50 mm em cada uma das maxilas desta.



Figura 24 – Máquina universal de ensaio *Hounsfield H 100 KS*.

A velocidade de extensão do aparelho de ensaio utilizada foi de 100 mm/min e relativamente à pré-tensão, que depende da massa por unidade de superfície do tecido em causa, utilizada no ensaio dos provetes de juta foi de 5 N, por se tratar de um tecido com massa por unidade de superfície entre 200 e 500 g/cm², é de 10 N para os provetes de sisal, pois têm uma massa por unidade de superfície superior a 500 g/cm².

3.5. Análise de microscopia

Com o objetivo de se perceber a degradação física da estrutura fibrosa dos provetes utilizados no estudo, recorreu-se à observação destes com recurso a análises de microscopia através do SEM, *Scanning Electron Microscope*, presente na Figura 25. Foram feitas observações utilizando três amplitudes diferentes de visualização, nomeadamente, 200x, 500x e 1000x.



Figura 25 – SEM - *Scanning Electron Microscope*.

Fonte: (semat.lab.uminho.pt)

Através deste tipo de análise será possível verificar a degradação superficial da estrutura fibrosa dos provetes, partindo da sua estrutura natural para a sua variação ao longo do tempo e para os diferentes cenários em análise. Assim, será possível perceber a existência de uma correlação entre a sua degradação física e as propriedades mecânicas, ou perda de massa, das fibras.

3.6. Perda de massa

Através da quantificação da perda de massa dos provetes de fibras utilizados no estudo é possível aferir a capacidade e suscetibilidade de estas fibras se desintegrarem no solo, fruto do seu processo de biodegradação. Pretende-se assim, quantificar a perda de massa dos provetes após utilização no estudo relativamente ao seu estado inicial.

Para levar a cabo esta quantificação foram pesados todos os provetes utilizados, sendo que, após a sua retirada dos modelos contendo o solo, estes são lavados para que as partículas do solo presentes nos provetes não influenciassem esta quantificação. No entanto, foi possível verificar que alguns fios dos provetes se desintegravam do tecido, quer no solo, resultado da sua exposição a este, quer no processo de lavagem das amostras.

Para ultrapassar este facto, e como forma de determinar a perda de massa dos provetes de fibras após sofrerem exposição ao ambiente em que foram inseridos, foi feita a pesagem dos provetes de fibras após serem cortados com as dimensões em que foram ensaiados à tração, garantindo que estes possuem sempre as mesmas dimensões. Tendo em conta os valores médios relativos às pesagens dos diversos provetes utilizados no estudo, após sujeitos ao processo de ajuste às dimensões de ensaio, estes foram comparados com os valores relativos à pesagem dos provetes de fibras de controlo, definindo-os como o peso de referência, e foi considerando estes que se partiu para a quantificação da perda de massa.

3.7. Temperatura do solo

Torna-se importante a monitorização da temperatura do solo presente nos modelos contendo as fibras na medida em que, relativamente aos modelos colocados em condições ambientais, se prevê um acentuado aumento da temperatura exterior resultado da transição das estações da primavera para o verão, e tal poderá explicar uma possível variação nos resultados obtidos fruto desta amplitude térmica que se prevê. Em relação aos modelos em condições controladas, a determinação da temperatura do solo surge devido à impossibilidade de se impor uma temperatura para o local onde estes se encontram, e permite perceber a

descrepância de valores verificados em ambos os ambientes em estudo, especialmente nos dias de maior calor.

Para o cenário de condições ambientais escolheu-se fazer três leituras ao longo de cada dia, a primeira ao início da manhã, a segunda a meio da tarde, por volta das 16 horas, como forma de registar os maiores valores da temperatura do solo fruto da maior incidência de radiação solar até ao início da tarde, e, por último, ao final do dia, cerca das 23 horas. Já em relação ao cenário de condições controladas, como não se espera uma amplitude de resultados da mesma ordem que o verificado no exterior, escolheu-se fazer uma única leitura por dia, sendo que não foi possível fazê-lo em todos os dias da duração do estudo. Para levar a cabo a leitura da temperatura do solo recorreu-se ao uso de um termopar, como ilustrado na Figura 26.



Figura 26 – Determinação da temperatura do solo através de um termopar.

3.8. Teor em água do solo

Tal como em relação ao descrito relativamente à temperatura do solo, também no que diz respeito ao teor em água do solo se prevê uma variação deste ao longo do tempo. Para o cenário de condições ambientais, este dependerá da precipitação que ocorrer durante o período de duração do estudo, prevendo-se mais efetiva no início, reduzindo drasticamente assim que se der um aumento da temperatura ambiente. Em relação ao cenário de condições

controladas, está excluído qualquer aumento deste valor em relação ao verificado inicialmente, sendo que se assistirá ao seu gradual decréscimo ao longo do tempo.

Na impossibilidade de se recorrer a um instrumento que permitisse fazer uma leitura rápida, e de forma diária, para acompanhar a variação do teor em água do solo ao longo do tempo, decidiu-se fazer uma determinação laboratorial do mesmo, aquando da retirada do solo dos provetes de fibras em cada um dos seis testes previstos. Como no caso do cenário de condições controladas não existe introdução de água nos modelos de estudo ao longo do tempo, este método permitirá a tradução fiel da variação decrescente do teor em água no solo. Já para o cenário de condições ambientais, esta leitura torna-se insuficiente, como tal recorreu-se à monitorização da pluviosidade, tratada em seguida, verificada ao longo do tempo.

A determinação do teor em água do solo foi possível com recurso à norma NP 84: 1965.

3.9. Pluviosidade

Para se proceder à monitorização da precipitação verificada durante o período de estudo foi utilizada uma estação metereológica, localizada no campus de Azurém da Universidade do Minho.

Os dados pluviométricos foram obtidos com recurso a uma estação metereológica *Ez-Mount Weather Station* da *Davis*, através do *software WeatherLink®*.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. Resultados da temperatura do solo

No presente capítulo estão apresentados os resultados obtidos em relação à temperatura do solo presente nos modelos utilizados no estudo ao longo do mesmo, quer para as condições ambientais quer para as condições controladas.

Estes refletem os valores lidos com recurso a um termopar, e permitem perceber não só as extremas variações ocorridas em relação a este parâmetro para o caso dos modelos expostos a condições ambientais ao longo do tempo, mas também as diferenças existentes neste quando comparadas com aquelas verificadas nos modelos colocados em condições controladas. Estes dados encontram-se expressos com recurso a um sistema de cores que melhor ajudam a perceber a variação da temperatura ao longo do tempo. A legenda para esse mesmo sistema está presente no Quadro 9.

Quadro 9 – Sistema de classificação dos valores da temperatura.

Intervalo temperatura	Cor
$\leq 14^{\circ}\text{C}$	Azul
15 a 24 °C	Verde
25 a 34 °C	Amarelo
35 a 44 °C	Laranja
$\geq 45^{\circ}\text{C}$	Vermelho

4.1.1. Condições ambientais

Em relação aos modelos expostos a condições ambientais, e tal como já foi referido anteriormente, foram realizadas três leituras durante o dia para melhor exprimir a variação da temperatura do solo ao longo do tempo, visto o espaço temporal em que se realizou o estudo coincidir com a transição entre as estações da primavera e do verão.

Com base nos dados presentes na Figura 27 é possível perceber que ocorre um aumento gradual das temperaturas lidas no solo desde o mês de maio até julho. Em maio registam-se as

temperaturas mais baixas, tanto ao início como no final do dia, a temperatura média registada neste mês é de 19 °C, sendo que o valor mais elevado lido foi de 34 °C. Para o mês de junho a temperatura média foi de 24 °C tendo como temperatura máxima os 49 °C; já em relação ao mês de julho, este foi aquele que registou uma média de temperatura maior, com cerca de 30 °C, e o valor mais elevado a ser de 52 °C, ligeiramente superior ao verificado no mês anterior. O mês de julho foi aquele onde se registou o maior número de dias com temperatura máxima superior a 40 °C, com mais do dobro do verificado em junho.

Mês de Maio				Mês de Junho				Mês de Julho			
Dia	Temperatura (°C)			Dia	Temperatura (°C)			Dia	Temperatura (°C)		
	9:00h	16:00h	23:00h		9:00h	16:00h	23:00h		9:00h	16:00h	23:00h
5	19	29	17	1	17	36	22	1	25	38	23
6	16	20	16	2	20	37	23	2	21	38	23
7	16	19	15	3	20	37	24	3	22	42	29
8	15	20	17	4	21	37	25	4	26	48	31
9	16	24	16	5	20	35	22	5	28	48	32
10	13	31	18	6	19	23	18	6	30	52	33
11	14	31	18	7	16	22	15	7	31	52	33
12	15	29	19	8	16	19	16	8	28	50	30
13	17	32	22	9	16	19	17	9	26	46	28
14	17	34	20	10	17	17	15	10	24	42	25
15	14	24	16	11	16	20	18	11	22	42	25
16	13	16	14	12	17	28	18	12	22	34	24
17	11	22	13	13	17	29	19	13	22	28	22
18	11	16	13	14	16	34	20	14	23	41	22
19	15	16	12	15	17	34	21	15	21	41	23
20	9	21	15	16	18	30	19	16	22	40	24
21	12	26	17	17	17	19	15	17	22	41	24
22	14	27	19	18	15	25	18	18	22	45	25
23	15	31	19	19	17	27	18	19	22	39	23
24	15	33	21	20	15	26	19	20	21	40	22
25	16	34	21	21	17	29	19	21	20	42	21
26	15	25	18	22	18	33	20	22	20	33	21
27	15	26	18	23	19	38	23	23	21	42	22
28	14	27	16	24	20	40	25	24	22	48	26
29	15	17	14	25	23	43	27	25	24	39	22
30	12	27	17	26	24	45	28	26	22	35	22
31	14	33	20	27	24	41	28	27	22	39	18
				28	24	41	27	28	22	26	
				29	25	46	28	29	25		
				30	26	49	30	30	16		

Figura 27 – Resultados da temperatura do solo para condições ambientais.

4.1.2. Condições controladas

Para o cenário de condições controladas as variações de temperatura no solo verificadas não são tão significativas, no entanto, é possível verificar um ligeiro aumento da mesma com o decurso do estudo fruto do aumento da temperatura ambiente do espaço no qual os modelos estiveram presentes.

Com base nos dados presentes na Figura 28, é possível aferir que os valores obtidos para as condições controladas são muito distintos daqueles apresentados anteriormente para o caso das condições ambientais, a amplitude da temperatura é muito mais reduzida ao longo de todo o estudo, nunca ocorrendo variações drásticas neste parâmetro de um dia para outro. O valor mais baixo lido foi de 16 °C e o mais elevado de 26 °C, o que resulta numa amplitude térmica de 10 °C, em contraposição com o cenário de condições ambientais onde a amplitude térmica foi de 41 °C.

Mês de Maio		Mês de Junho		Mês de Julho		Mês de Agosto	
Dia	Temperatura (°C)	Dia	Temperatura (°C)	Dia	Temperatura (°C)	Dia	Temperatura (°C)
16	17	3	20	1	25	2	22
17	16	4	20	2	24	5	24
20	17	5	19	5	24	6	24
21	17	6	20	8	26	8	24
22	17	10	21	9	26		
23	18	11	21	11	25		
24	17	13	21	15	25		
27	18	14	20	17	24		
28	17	17	20	19	24		
29	17	18	20	22	23		
30	17	19	20	23	24		
31	18	21	21	24	23		
		24	23	26	24		
		25	23	29	23		
		26	22	30	23		
		28	24				

Figura 28 – Resultados da temperatura do solo para condições controladas.

4.2. Dados pluviométricos

Como forma de detalhar as condições ambientais às quais os modelos utilizados no estudo foram sujeitos, foi quantificada a precipitação no período em que este se realizou. É possível aferir que o mês de maio foi aquele com uma maior precipitação, com um total de 64,93 mm, seguindo-se o mês de junho com uma precipitação mensal de 52,63 mm. Por fim, o mês de julho, fruto das elevadas temperaturas verificadas, foi aquele que registou o valor mais baixo em termos de precipitação com um total mensal de 5,55 mm. Os dados relativos à precipitação diária em cada um dos meses, em que decorreu o estudo, encontram-se detalhados nas Figuras 29, 30 e 31.

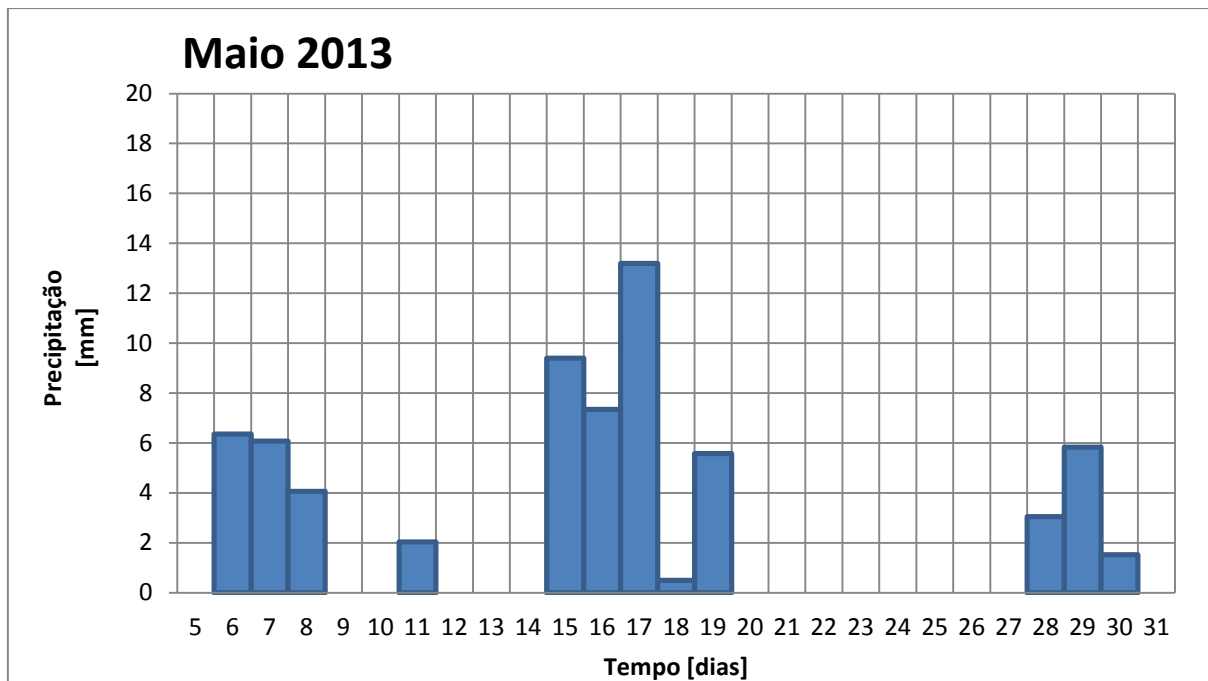


Figura 29 – Dados da precipitação do mês de maio.

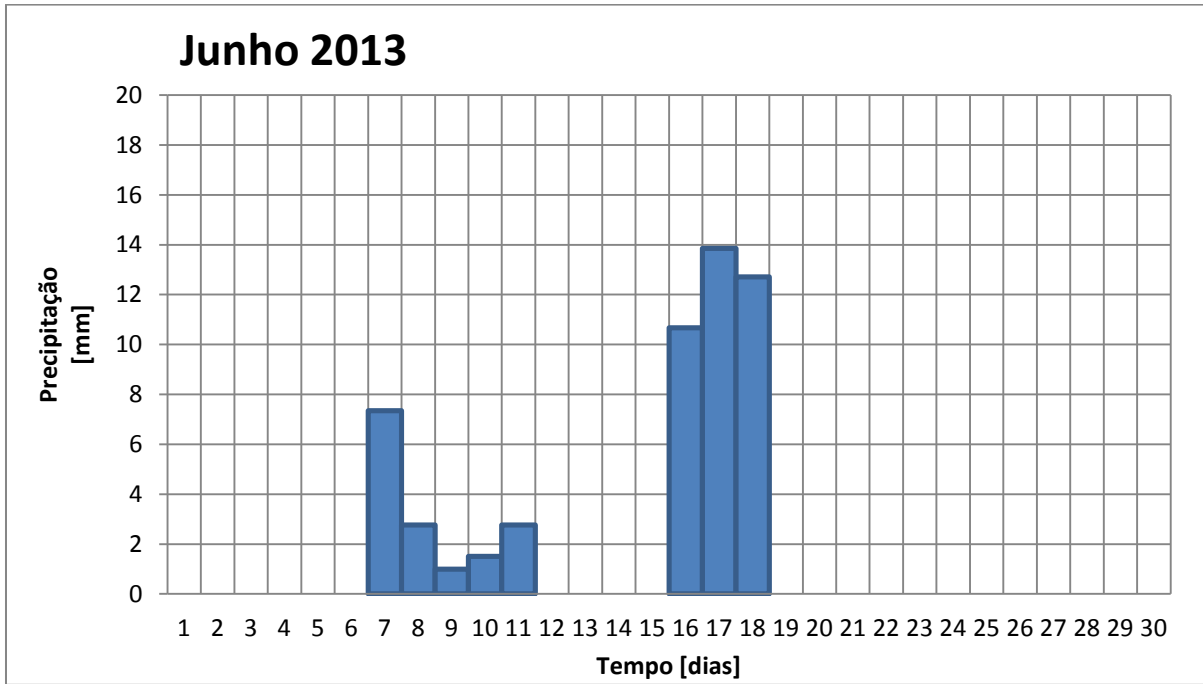


Figura 30 – Dados da precipitação do mês de junho.

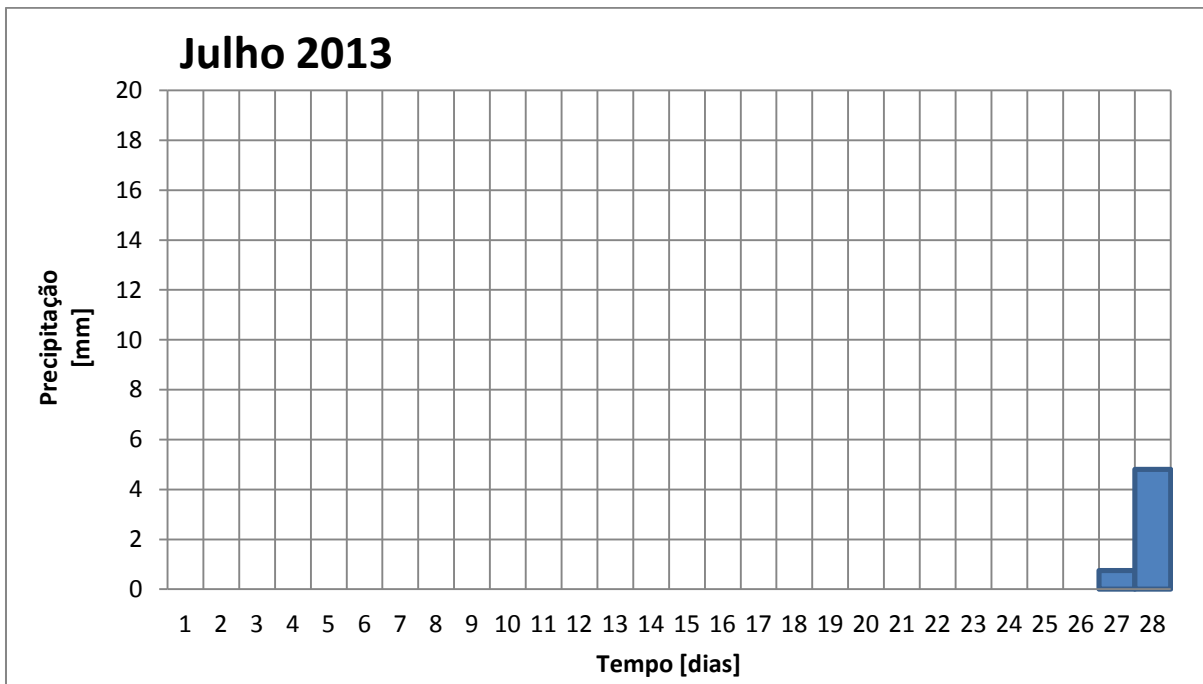


Figura 31 – Dados da precipitação do mês de julho.

4.3. Resultados do teor em água do solo

A determinação do teor em água do solo presente nos modelos foi realizada aquando da retirada dos provetes de fibras deste, e, tal como se pode observar pelos dados presentes no Quadro 10, apesar de em ambos os cenários o ponto de partida deste parâmetro ser sensivelmente o mesmo, a leitura feita para o cenário de condições controladas é consistentemente decrescente ao longo do tempo, sendo que o maior decréscimo em termos do teor em água do solo dá-se nas primeiras duas semanas, estabilizando a partir das oito semanas. Como aqui não ocorreu introdução de água nos modelos, a curva presente na Figura 32, para este cenário, traduz a real variação do teor em água do solo.

Quadro 10 – Valores do teor em água do solo.

Teste	Teor em água do solo (%)	
	Condições Ambientais	Condições Controladas
Valor Inicial	14,32	14,27
Nº 1 (2 semanas)	19,04	4,86
Nº 2 (4 semanas)	4,56	3,68
Nº 3 (6 semanas)	5,26	2,89
Nº 4 (8 semanas)	3,81	2,07
Nº 5 (10 semanas)	1,92	2,03
Nº 6 (12 semanas)	11,42	1,81

Já em relação ao cenário de condições ambientais, a variação deste parâmetro está dependente da precipitação verificada. É possível constatar que esta não é uniforme, e a sua curva, presente na Figura 32, não traduz aquilo que na realidade ocorreu. Por exemplo, o aumento verificado no teor em água entre a décima e décima segunda semanas de estudo não resulta de uma precipitação crescente nesse período, mas sim devido ao facto de nos dias anteriores à retirada dos provetes do solo ter ocorrido uma ligeira precipitação, dias 27 e 28 de julho. Isto pode ser constatado tanto através dos dados pluviométricos já apresentados, como também pela Figura 33 que detalha semanalmente esses mesmos valores da precipitação e ajudam explicar o descrito anteriormente.

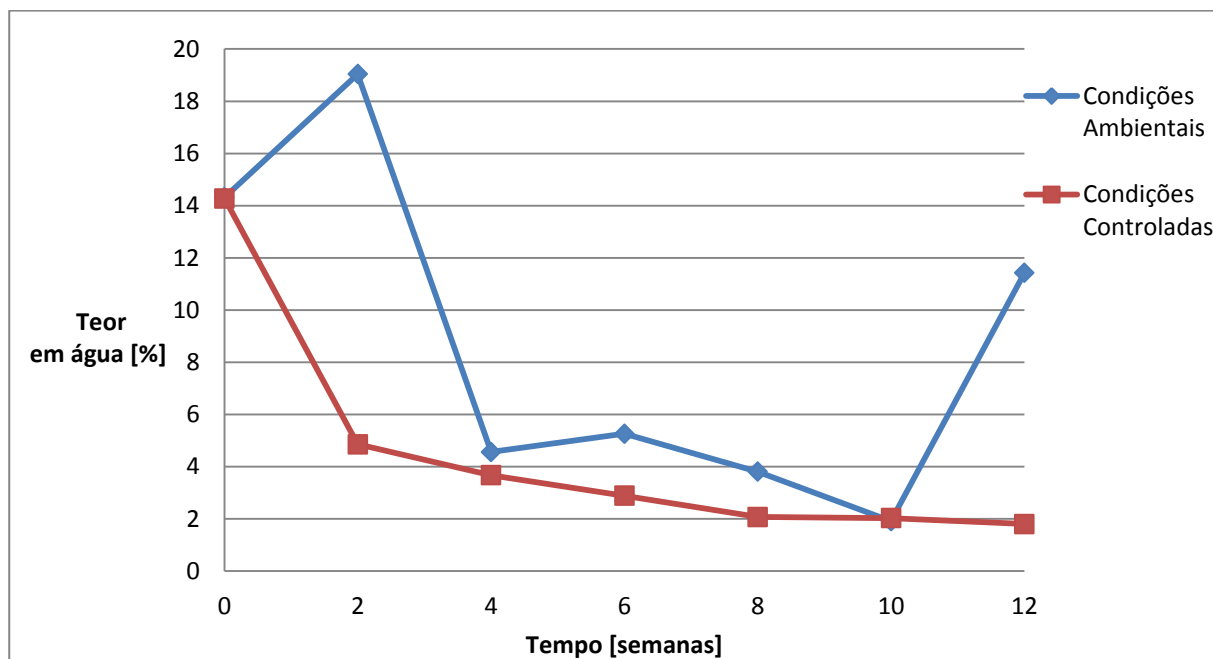


Figura 32 – Variação do teor em água do solo ao longo do tempo.

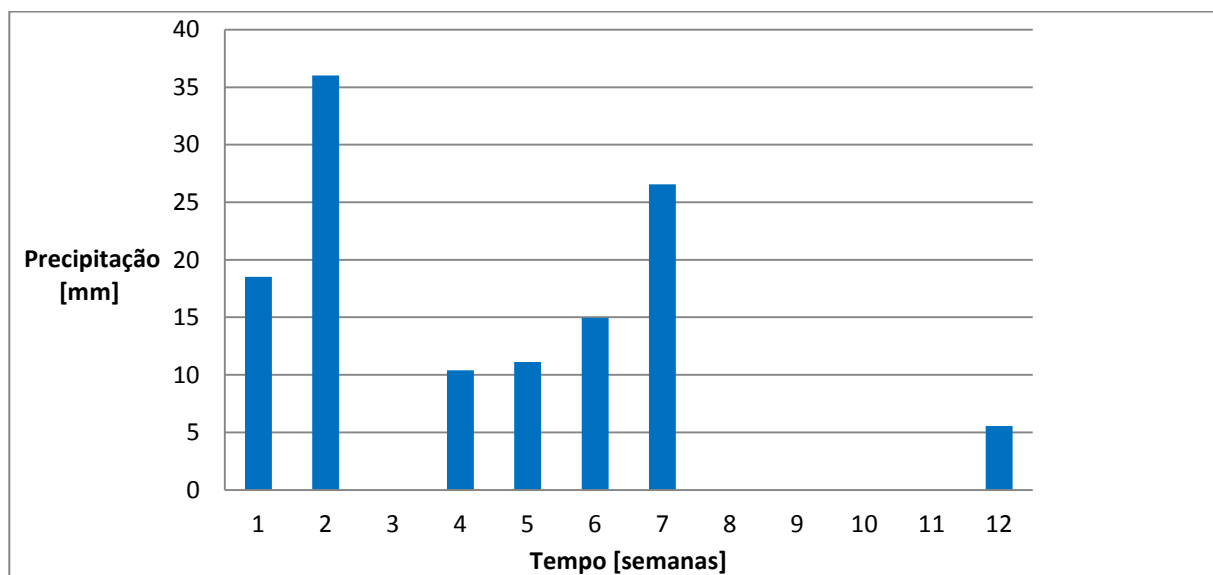


Figura 33 – Precipitação semanal verificada em condições ambientais durante todo o estudo.

4.4. Propriedades das fibras

No presente capítulo são apresentados dados relativamente ao comportamento mecânico e físico das fibras em estudo com base nos resultados obtidos aquando da realização do ensaio de resistência à tração dos provetes de fibras, que permitiu traçar curvas que correlacionam

força (N) e alongamento (mm). Estes resultados permitirão perceber a variação do comportamento das fibras ao longo do tempo, e a forma como as diferentes condições, sob as quais estiveram sujeitas, influenciam o mesmo.

Primeiramente são apresentados os resultados relativos ao comportamento à tração das fibras, com base na força máxima obtida em cada ensaio; juntamente com o valor relativo à massa linear dos fios, é possível determinar a tenacidade dos provetes, e por fim apresentam-se os valores da ductibilidade dos mesmos. Segundo Agrawal (2011) a resistência à tração, tenacidade e a flexibilidade estão entre as características mais importantes dos geotêxteis relativamente às suas propriedades mecânicas.

Os valores apresentados de seguida para a resistência à tração, tenacidade e ductibilidade resultam da média dos resultados obtidos no ensaio de seis provetes, estes encontram-se detalhados nos Anexos 1 a 5.

4.4.1. Resistência à tração

A mais estudada, e também a mais importante, propriedade das fibras é o seu comportamento à tração, ou seja, o seu comportamento quando sujeitas a forças e deformações aplicadas ao longo das mesmas, permitindo estudar experimentalmente o alongamento e finalmente a rotura, sob um crescente acréscimo de força. A resistência à tração é uma medida da força, aplicada de forma constante, necessária para provocar a rotura de uma fibra, e é determinada experimentalmente pela carga máxima num ensaio de tração (Morton & Hearle, 1962).

Com recurso a ensaios de resistência à tração dos provetes de fibras, através de uma máquina universal de ensaio, torna-se possível traçar curvas de variação força - alongamento de ambos os conjuntos de fibras, juta e sisal, para os diferentes cenários em análise.

A determinação da força máxima dos provetes, primeiramente no seu estado natural e posteriormente, de forma periódica, após estarem em contacto com o solo, permite traçar uma curva que relacione essa mesma força máxima, a resistência à tração, e o factor tempo, para ambos os tipos de fibras consideradas e para os cenários de condições ambientais e condições controladas a que foram sujeitas.

A título de exemplo, na Figura 34 estão representadas as curvas força - alongamento resultantes do ensaio de resistência à tração dos vários provetes de fibras, neste caso de juta na direção da teia e no seu estado natural. As restantes curvas obtidas nos ensaios realizados aos provetes de juta e sisal, para condições ambientais e controladas, encontram-se presentes nos Anexos 6 a 10. Tal como referido por Horrocks & Anand (2000), é possível verificar que os tecidos apresentam um alongamento dos fios que produz um módulo de elasticidade inicial baixo, devido ao frisado; posteriormente este módulo de elasticidade aumenta com o alongamento dos fios a absorverem a carga diretamente, ou seja, de forma linear.

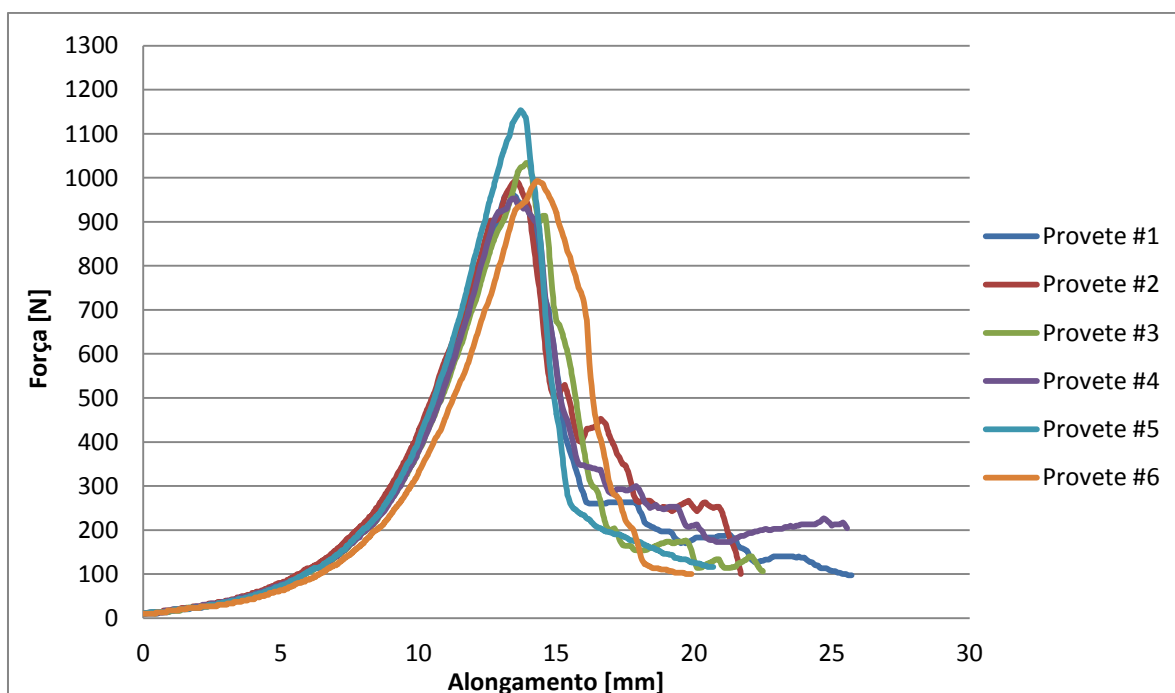


Figura 34 – Curva força – alongamento dos provetes de controlo de juta na direção da teia

De seguida são apresentados os resultados relativos à resistência à tração dos provetes de fibras de juta e sisal, resultantes de uma média dos valores da força máxima das curvas como as apresentadas anteriormente. A análise centra-se na variação desta propriedade ao longo do tempo e tendo em conta as condições dos cenários onde estiveram incorporados, ambientais e controladas.

4.4.1.1. Fibra de juta

Para o caso dos provetes de juta, os resultados obtidos para a resistência à tração estão presentes nos Quadros 11 e 12, para as condições ambientais e controladas, respetivamente, onde se expressa também a perda em percentagem deste parâmetro, tendo como referência os valores de controlo.

Através da análise dos mesmos é possível verificar que para o caso das condições ambientais se verifica uma perda crescente de resistência ao longo do tempo, quer para os provetes ensaiados na direção da teia, quer na direção da trama. Para o caso da teia, o valor de controlo situou-se nos 1018 N e foi de 776 N para a trama, sendo que, o valor ao fim de doze semanas de exposição, foi de 91 N e 95 N, respetivamente, o que se traduz numa perda de resistência à tração de cerca de 91 % para o caso da teia e de 88 % para a trama.

Quadro 11 – Resistência à tração das fibras de juta para condições ambientais.

Teste	Sentido da teia		Sentido da trama	
	Força (N)	Perda de resistência (%)	Força (N)	Perda de resistência (%)
Valor de controlo	1018	-	776	-
Nº 1 (2 semanas)	908	10,79	580	25,27
Nº 2 (4 semanas)	616	39,52	375	51,64
Nº 3 (6 semanas)	171	83,20	194	75,03
Nº 4 (8 semanas)	173	83,02	140	82,03
Nº 5 (10 semanas)	97	90,45	117	84,88
Nº 6 (12 semanas)	91	91,04	95	87,83

Quadro 12 – Resistência à tração das fibras de juta para condições controladas.

Teste	Sentido da teia		Sentido da trama	
	Força (N)	Perda de resistência (%)	Força (N)	Perda de resistência (%)
Valor de controlo	1018	-	776	-
Nº 1 (2 semanas)	909	10,71	770	0,80
Nº 2 (4 semanas)	978	4,11	723	6,89
Nº 3 (6 semanas)	866	14,89	591	23,90
Nº 4 (8 semanas)	746	26,74	637	17,91
Nº 5 (10 semanas)	899	11,63	740	4,66
Nº 6 (12 semanas)	842	17,29	738	4,96

Para o cenário de condições controladas é possível verificar uma perda de resistência em relação aos valores de controlo. No entanto, esta perda não ocorre de forma consistente ao longo do tempo, tal como se verifica no caso das condições ambientais.

É possível aferir que ocorreu uma perda de resistência à tração máxima de cerca de 27 % para o caso da teia e de 24 % para o caso da trama. No entanto, estes valores não foram registados após doze semanas de estudo, mas sim após oito e seis semanas, respetivamente. Apesar de se poder identificar a tendência para uma ligeira perda de resistência, é um facto que essa perda de resistência para as condições controladas não se mostra consistentemente crescente, por exemplo, para o caso da trama na oitava semana ocorre uma perda de 18 % sendo que nas duas semanas seguintes este valor é de apenas 5 %. Isto atesta bem a variabilidade quanto à natureza deste tipo de materiais, uma das suas grandes desvantagens.

O facto de, quer para a teia quer para a trama, ocorrer um drástico aumento na perda de resistência das quatro primeiras semanas, para as quatro semanas que se sucedem, pode estar relacionado com o ligeiro aumento da temperatura do solo, cerca de 4 a 5 °C, que se verificou nesta altura, tal como pode ser visto na Figura 28 apresentada anteriormente, entre o dia 17 de Junho e 11 de Julho. No entanto, após dez e doze semanas de estudo, já com uma ligeira diminuição da temperatura do solo, existe uma discrepância muito grande entre a perda de resistência para o caso da trama, cerca de 5 %, e da teia com 12 e 17 % de perda.

Como forma de melhor perceber a variação da resistência à tração dos provetes ao longo do tempo, os dados apresentados anteriormente encontram-se representados esquematicamente na Figura 35. Da análise do mesmo é possível verificar que existe, tal como seria de esperar, uma muito maior perda de resistência para as fibras expostas a condições ambientais, do que aquela verificada para condições controladas. No pior dos casos, as fibras expostas a condições controladas perdem cerca de 27 e 24 % de resistência, para a teia e trama, respetivamente, sendo que esta é da ordem dos 90 % para o cenário de condições ambientais, coincidente com o final do estudo. Isto permite constatar que os diversos fatores ambientais, como por exemplo, chuva, temperatura do solo e radiação solar, são responsáveis pela esmagadora maioria das perdas de resistência verificadas.

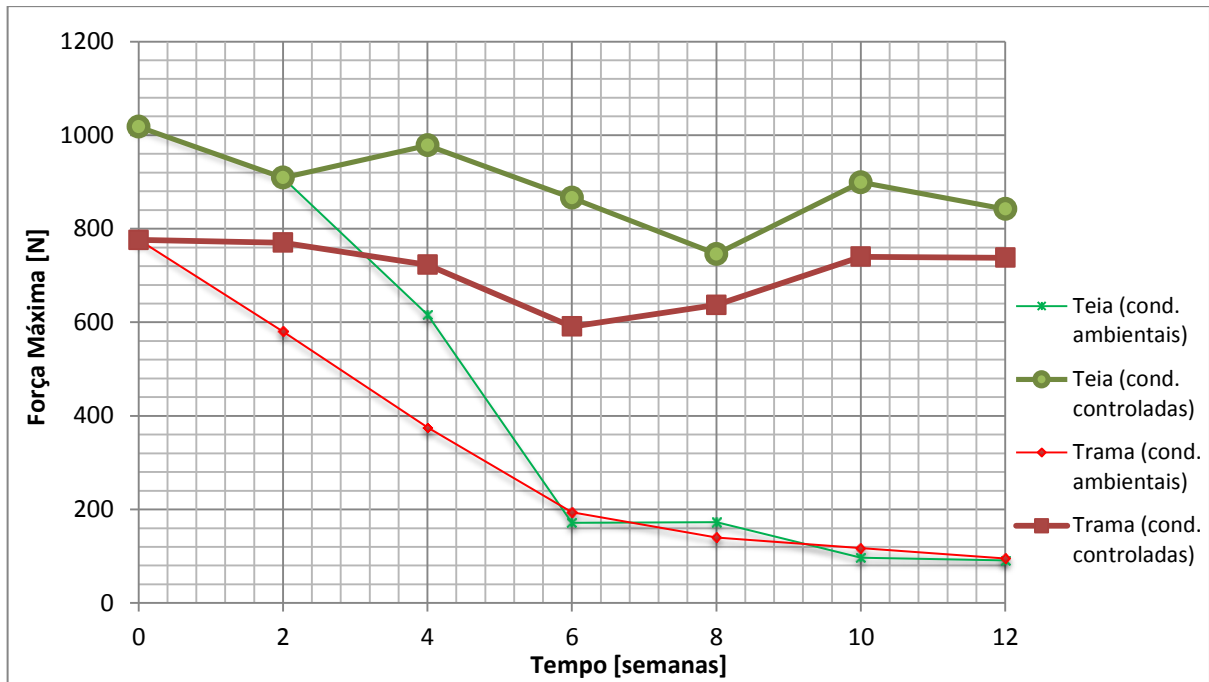


Figura 35 – Resistência à tração das fibras de juta.

É possível concluir que, para o cenário de condições ambientais, a perda de resistência é evidente e acentuada nas primeiras seis semanas de estudo, onde existe uma perda de 83 e 75 %, para a teia e trama, respectivamente, sendo que nas seis semanas seguintes o acréscimo de perda é de apenas 8 e 12 %. Curiosamente é até às seis semanas de estudo, dia 16 de Junho, que ocorre a maior precipitação, tal como apresentado nas Figuras 29 a 31 e também na 33. Até essa altura, a precipitação acumulada é de 93,8 mm e nas semanas que se seguiram a precipitação é no total de 31, 62 mm, sendo que grande parte deste último valor acontece nos dias 17 e 18 de Julho. Isto significa que na primeira metade do estudo as fibras estiveram sujeitas a condições de elevada humidade, sendo que a segunda metade se caracteriza por um aumento da temperatura do solo e muito pouca precipitação.

Como são evidentes as condições de elevada humidade a que os provetes foram sujeitos, sobretudo nas primeiras seis semanas de exposição, torna-se óbvio de que estas foram responsáveis pelo acelerar do processo de biodegradação das fibras de juta que, tal como já havia sido mencionado anteriormente, sofrem uma rápida deterioração quando na presença de humidade e são suscetíveis ao ataque de microorganismos, que têm mais condições de proliferar neste tipo de ambientes.

4.4.1.2. Fibra de sisal

No que diz respeito aos provetes de sisal, é possível verificar que estes, no seu estado natural, possuem uma maior resistência, quando comparados com os de juta, pois os seus fios têm uma maior massa linear.

Os resultados obtidos para a resistência à tração dos provetes de sisal encontram-se apresentados no Quadro 13 para as condições ambientais e no Quadro 14 para controladas.

Quadro 13 – Resistência à tração das fibras de sisal para condições ambientais.

Teste	Sentido da teia		Sentido da trama	
	Força (N)	Perda de resistência (%)	Força (N)	Perda de resistência (%)
Valor de controlo	4003	-	3981	-
Nº 1 (2 semanas)	2352	41,24	2303	42,16
Nº 2 (4 semanas)	1797	55,12	1472	63,03
Nº 3 (6 semanas)	1238	69,09	881	77,87
Nº 4 (8 semanas)	823	79,45	694	82,58
Nº 5 (10 semanas)	325	91,89	329	91,73
Nº 6 (12 semanas)	357	91,08	308	92,26

Quadro 14 – Resistência à tração das fibras de sisal para condições controladas.

Teste	Sentido da teia		Sentido da trama	
	Força (N)	Perda de resistência (%)	Força (N)	Perda de resistência (%)
Valor de controlo	4003	-	3981	-
Nº 1 (2 semanas)	3141	21,55	2986	24,99
Nº 2 (4 semanas)	2373	40,73	2531	36,42
Nº 3 (6 semanas)	2395	40,16	2426	39,07
Nº 4 (8 semanas)	2078	48,09	2404	39,61
Nº 5 (10 semanas)	1988	50,34	2424	39,11
Nº 6 (12 semanas)	1910	52,28	2095	47,37

Os valores de controlo para a resistência à tração, nas direções da teia e trama, são relativamente próximos, 4003 N e 3981 N, respetivamente. Com o aumentar do tempo de exposição é possível verificar uma clara diminuição em relação a este parâmetro, quer para o cenário de condições ambientais, quer para condições controladas. Tal como foi anteriormente apresentado, nos provetes de juta para o cenário de ausência de agentes ambientais esta perda

de resistência não se mostrava tão consistente como no sisal exposto às mesmas condições. Apesar da ligeira tendência de diminuição, a perda de resistência da juta em condições controladas é significativamente inferior à do sisal.

É possível verificar que apenas com duas semanas de exposição em condições ambientais, os provetes de sisal perdem cerca de 42 % da sua resistência, muito superior ao verificado para a juta, o que também se confirma para as condições controladas, onde a perda no mesmo período de tempo é de 22 e 25 %. Conclui-se assim, uma maior degradação da fibra de sisal, mesmo em condições controladas, sem a ação de agentes climáticos, quando comparada com a juta.

Ao fim de doze semanas de exposição a perda de resistência à tração é, para condições ambientais, de 91 e 92 %, para a teia e trama, respetivamente, sendo que para condições controladas este valor fica-se pelos 52 e 47 %. Neste mesmo período de tempo os provetes em condições controladas apresentam uma resistência 80% superior àquela encontrada em condições ambientais. Os resultados presentes nos Quadros 13 e 14 encontram expressos esquematicamente na Figura 36.

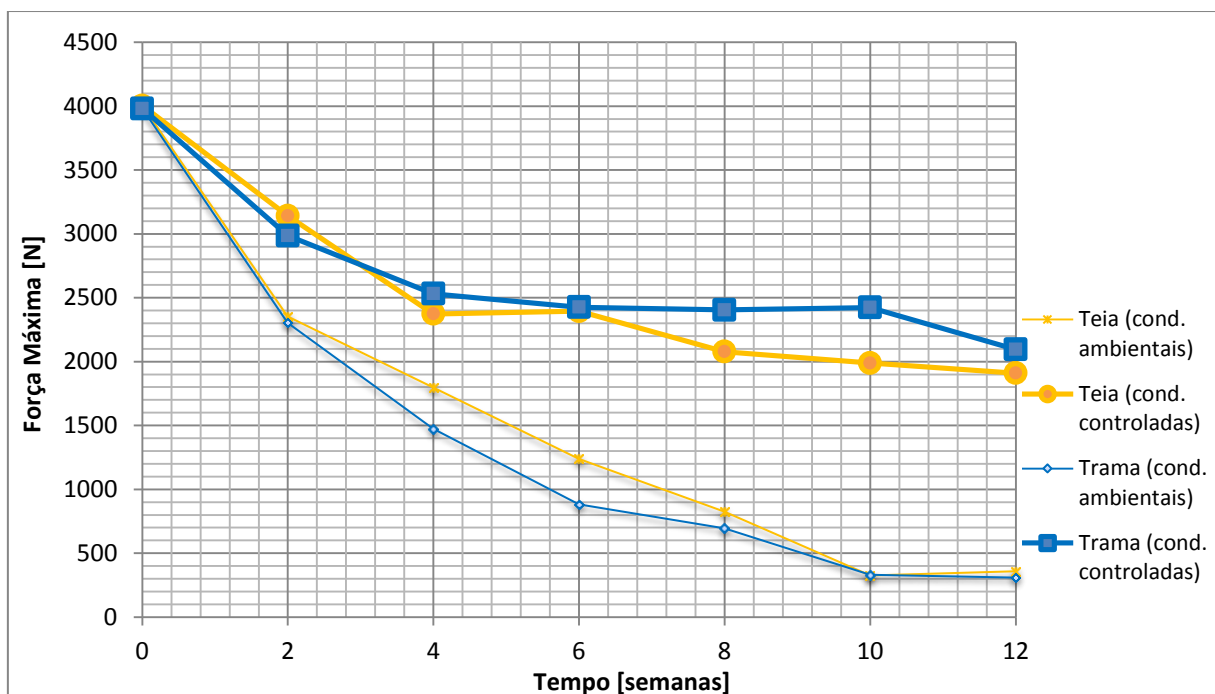


Figura 36 – Resistência à tração das fibras de sisal.

Como se pode verificar pelo comportamento da resistência à tração dos provetes de sisal ao longo do tempo, apresentado na Figura 36, existe uma tendência de estabilização desta após algum tempo, tal como aconteceu para a fibra de juta. Esta estabilização dá-se após quatro semanas, para condições controladas, e após dez semanas para as ambientais, o que permite concluir que o continuar da exposição das fibras após este período de tempo não irá resultar numa grande perda de resistência à tração.

Tal como foi referido anteriormente para o caso da juta, também aqui é possível verificar que é até às seis semanas de exposição em condições ambientais que se verifica a perda mais acentuada de resistência, onde se perde entre 69 e 78 % desta, sendo que nas seis semanas seguintes apenas se perde mais 20 e 14 % para a teia e trama, respetivamente. Aqui, tal como na juta, as condições de humidade no solo provocadas pela precipitação potenciam a proliferação de microorganismos. Sendo certo que este tipo de fibras possui um melhor desempenho mecânico quando molhadas, ao invés de quando em estado seco como foi mostrado por Methacanon (2010), tal facto parece não se verificar estando as mesmas incorporadas no solo. Sendo as fibras naturais, juta e sisal, materiais de base celulósica, este componente é sujeito a ataque por parte de bolores e bactérias, que o decompõem e fazem uso dos produtos de degradação como alimento (Cook, 1984b).

Após a análise dos resultados de resistência à tração para as fibras de juta e sisal é possível encontrar uma correlação com alguns estudos já realizados no âmbito deste tema, e mencionados anteriormente, e que destacam a rápida e acentuada degradação destas propriedades nas fibras durante as primeiras semanas de exposição no solo. Por exemplo, Carvalho (2012) concluiu sobre o elevado ritmo de biodegradação de fibras individuais de sisal incorporadas em solo granítico, onde em apenas 15 dias estas perderam entre 65 e 81 % da resistência inicial. Também aqui se verificou que ao fim de 90 dias de exposição as fibras perdem entre 89 e 96 % da resistência inicial o que está de acordo com o concluído anteriormente para o sisal onde se quantificou uma perda de resistência de 92 %, neste caso para 84 dias de exposição.

4.4.2. Tenacidade

A tenacidade corresponde à energia que um material tem capacidade de absorver até fraturar, sendo que quanto maior a tensão máxima e maior a capacidade de deformação de um material, maior será a sua tenacidade.

A determinação da tenacidade das fibras é feita tendo em conta o valor da força na rotura, obtido no ensaio de resistência à tração, e a massa linear dos fios que compõem os tecidos utilizados. Desta forma é possível comparar fibras diferentes pois a tenacidade considera não só a força máxima que estas conseguem absorver, mas também a massa destas, o que tem influência nos valores de carga obtidos.

De seguida são apresentados os resultados da tenacidade dos fios que compõem os provetes de juta e sisal. Estes foram obtidos a partir do quociente entre os valores da resistência à tração, força máxima verificada em cada ensaio apresentada anteriormente, e o número de fios que os provetes contêm na direção da tração. Posteriormente este valor é dividido pela massa linear dos fios, como forma de obter a força máxima suportada por cada fio, em função da sua massa linear.

4.4.2.1. Fibra de juta

Os valores relativos à tenacidade dos provetes de juta encontram-se presentes no Quadro 15. Estes foram obtidos através dos valores da resistência à tração anteriormente apresentados e do valor da massa linear dos fios que compõem o tecido de juta utilizado. Tal como havia sido mencionado anteriormente, o valor da massa linear dos fios de juta obtido foi de 275,45 tex para a teia e de 258,01 tex para a trama. Os resultados apresentados a seguir têm em consideração que os provetes ensaiados na direção da teia possuem 36 fios no sentido da tração, e 29 fios no sentido da trama.

Quadro 15 – Tenacidade dos provetes de juta.

Teste	Tenacidade (N/tex)			
	Condições ambientais		Condições controladas	
	Teia	Trama	Teia	Trama
Valor de controlo	0,1026	0,1037	0,1026	0,1037
Nº 1 (2 semanas)	0,0916	0,0775	0,0916	0,1029
Nº 2 (4 semanas)	0,0621	0,0502	0,0984	0,0966
Nº 3 (6 semanas)	0,0172	0,0259	0,0874	0,0789
Nº 4 (8 semanas)	0,0174	0,0186	0,0752	0,0852
Nº 5 (10 semanas)	0,0101	0,0157	0,0907	0,0989
Nº 6 (12 semanas)	0,0095	0,0126	0,0849	0,0986

Através da variação da tenacidade dos provetes de juta ao longo do tempo para condições ambientais e controladas, ilustrada na Figura 37, é possível perceber que, quando comparado com o comportamento da resistência à tração, apresentado anteriormente, os valores obtidos para a teia e trama são mais próximos uns dos outros, fruto da consideração que a tenacidade tem sobre o número de fios e massa linear destes, que compõem os provetes.

Tal como para o caso da resistência à tração, a mais acentuada perda de tenacidade ocorre nos provetes expostos até seis semanas em condições ambientais, ocorrendo uma estabilização deste parâmetro até ao final do estudo. A tenacidade dos provetes colocados em condições controladas apresentam ligeira tendência de diminuição, no entanto, esta não apresenta um comportamento consistente ao longo do tempo, fruto da ausência de agentes que potenciam a degradação das fibras, o que torna mais evidente a variabilidade no comportamento deste tipo de materiais.

Ao fim de doze semanas de exposição os provetes em condições ambientais apresentam uma perda de tenacidade de cerca de 90 % quando comparada com os provetes de controlo, tanto para a teia como para a trama, apresentando também uma tenacidade entre oito a nove vezes inferior aquela verificada nos provetes expostos a condições controladas durante o mesmo período de tempo.

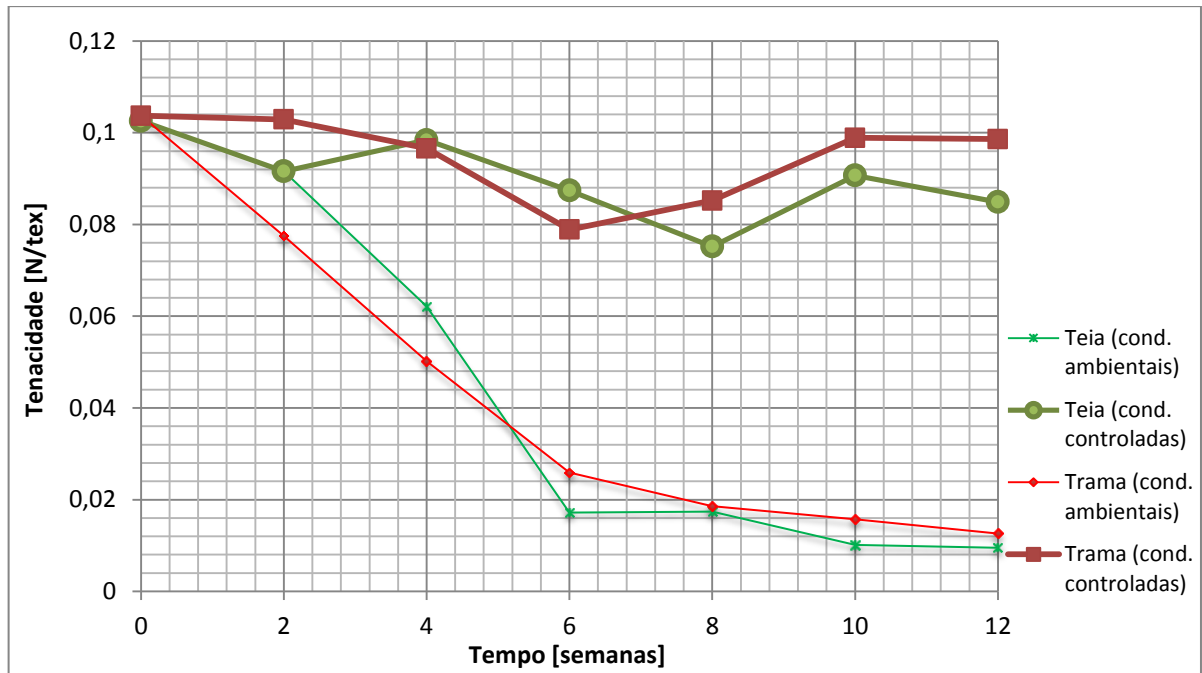


Figura 37 – Tenacidade dos provetes de juta.

4.4.2.2. Fibra de sisal

Para a fibra de sisal a determinação da tenacidade dos provetes foi feita tendo como valores para a massa linear dos fios, 2097,60 tex para a teia e de 1896,48 tex para a trama, e considerando que os provetes foram ensaiados à tração com 14 fios, tanto na direção da teia como da trama. Os valores deste parâmetro encontram-se presentes no Quadro 16, que se apresenta de seguida.

Quadro 16 – Tenacidade dos provetes de sisal.

Teste	Tenacidade (N/tex)			
	Condições ambientais		Condições controladas	
	Teia	Trama	Teia	Trama
Valor de controlo	0,1363	0,1499	0,1363	0,1499
Nº 1 (2 semanas)	0,0801	0,0867	0,1069	0,1125
Nº 2 (4 semanas)	0,0612	0,0554	0,0808	0,0953
Nº 3 (6 semanas)	0,0421	0,0332	0,0816	0,0914
Nº 4 (8 semanas)	0,0280	0,0261	0,0708	0,0905
Nº 5 (10 semanas)	0,0111	0,0124	0,0677	0,0913
Nº 6 (12 semanas)	0,0122	0,0116	0,0651	0,0789

Na Figura 38 apresenta-se a variação da tenacidade dos provetes de sisal em função do tempo de exposição, exprimindo os resultados presentes no Quadro 16. Esta apresenta um comportamento que se assemelha ao verificado para a resistência à tração dos provetes deste tipo de fibra.

Para condições ambientais ocorre uma diminuição consistente deste parâmetro até às dez semanas de exposição, estabilizando a partir daí, sendo que para o cenário de condições controladas o decréscimo de tenacidade dos provetes é mais acentuado nas primeiras quatro semanas de exposição. Ao fim de doze semanas de exposição em condições controladas, os provetes de sisal possuem uma tenacidade 80 % superior aquela verificada para condições ambientais, tanto para a teia como para a trama.

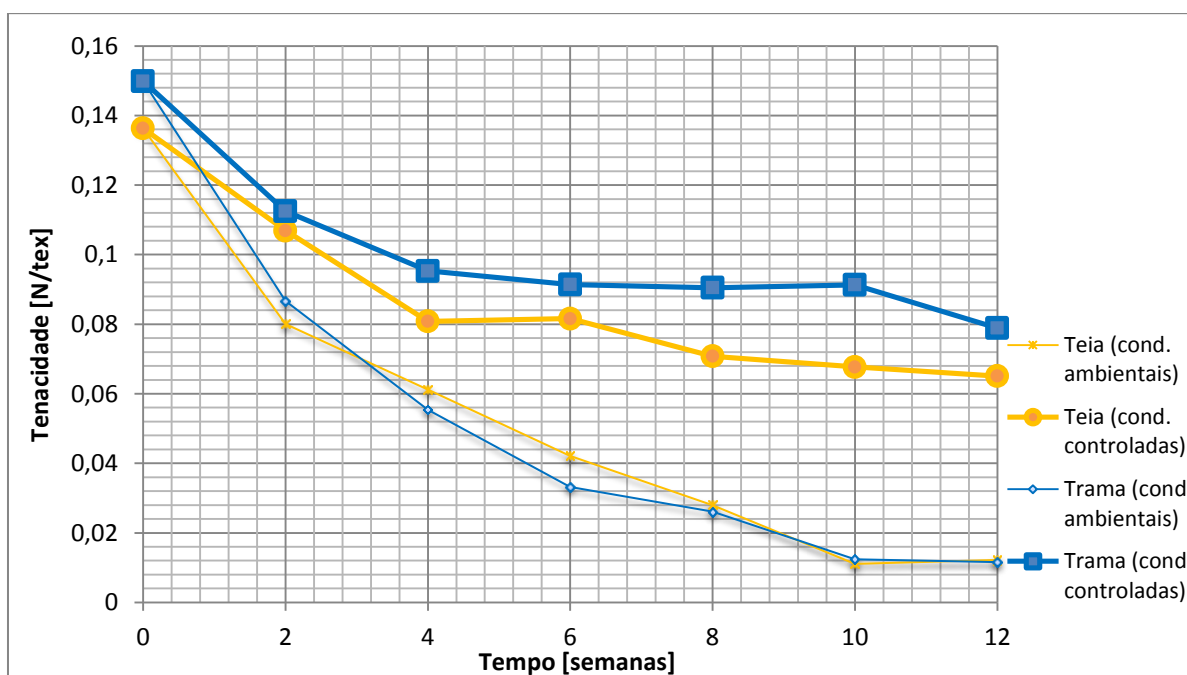


Figura 38 – Tenacidade dos provetes de sisal.

4.4.3. Ductibilidade

A ductibilidade mede a deformação que um material consegue sustentar sem que se atinja a rotura do mesmo, a sua determinação é possível através da medição da distância entre as amarras da máquina universal de ensaio, utilizada para testar a resistência à tração, antes e

após o ensaio dos provetes de fibras. O alongamento é a extensão até à qual o provete se deforma antes da rotura e expressa-se em percentagem, através da seguinte equação (Askeland, 1994):

$$\% \text{ Alongamento} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (6)$$

Em que: l_f é a distância entre as amarras após rotura do provete, em mm

l_0 é a distância entre as amarras inicial, em mm

De seguida são apresentados os dados relativos ao alongamento verificado em cada um dos ensaios realizados, valores esses que resultam da média aritmética dos resultados obtidos em cada um dos seis provetes.

4.4.3.1. Fibra de juta

Através dos dados presentes no Quadro 17, que exprime os resultados do alongamento dos provetes de juta para condições ambientais e controladas, é possível constatar um maior alongamento do tecido na direção da teia do que na trama, em cerca de 50 %.

Quadro 17 – Alongamento dos provetes de juta.

Teste	Alongamento (%)			
	Condições ambientais		Condições controladas	
	Teia	Trama	Teia	Trama
Valor de controlo	13,68	6,11	13,68	6,11
Nº 1 (2 semanas)	9,20	5,01	10,49	5,79
Nº 2 (4 semanas)	9,58	4,4	9,12	5,72
Nº 3 (6 semanas)	6,11	3,57	9,91	5,86
Nº 4 (8 semanas)	6,87	3,93	10,11	5,38
Nº 5 (10 semanas)	5,33	3,65	11,23	5,69
Nº 6 (12 semanas)	5,82	3,86	10,13	5,66

Após doze semanas de exposição em condições ambientais os provetes de juta perdem cerca de 57 e 37 %, respetivamente, para a teia e trama, do alongamento verificado inicialmente, sendo que esta diminuição é muito menor quando na ausência de fatores ambientais a aceleraram o processo de degradação das fibras. Os provetes de juta em condições controladas conseguem manter uma grande parte da ductibilidade inicial ao longo de todo o período de

exposição, no final do estudo a ductibilidade é entre 32 e 43 % superior à verificada em condições ambientais para a trama e teia. Ao fim de doze semanas de exposição, os provetes em condições controladas mantêm entre 74 e 92 %, para a teia e trama respetivamente, da ductibilidade verificada inicialmente. Na Figura 39 encontra-se ilustrada a variação do alongamento na rotura para a fibra de juta.

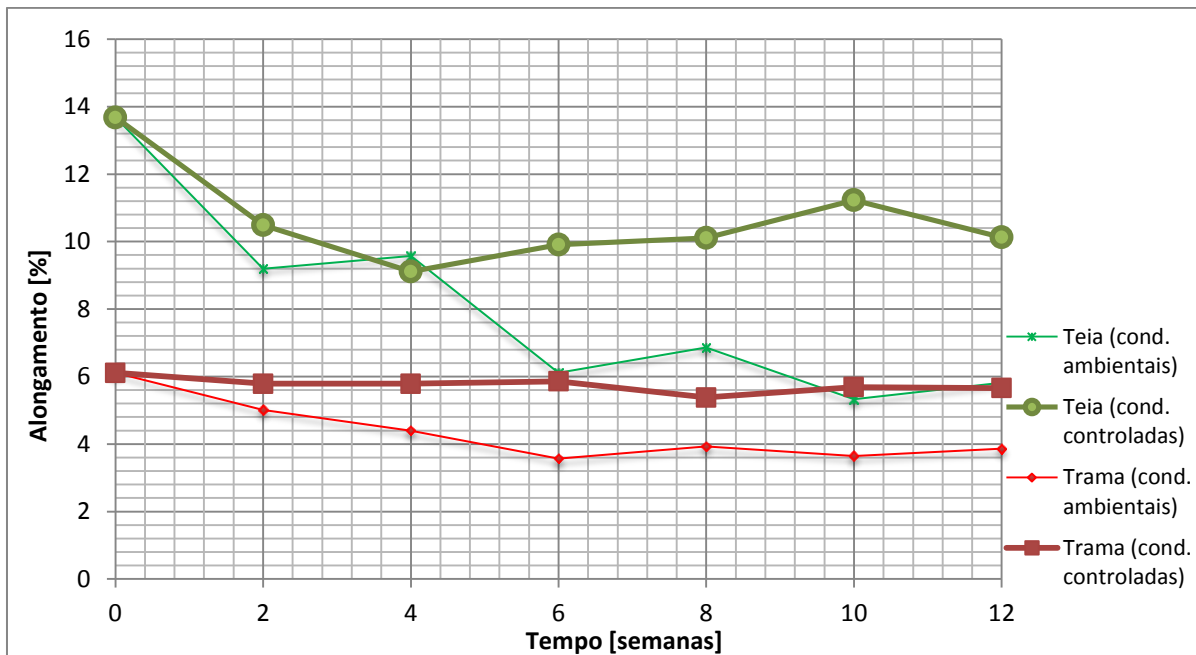


Figura 39 – Alongamento na rotura dos provetes de juta.

Aqui é possível constatar que existe uma clara diminuição do alongamento dos provetes de juta para condições ambientais ao longo do tempo. Já em relação a condições controladas também se verifica uma tendência de diminuição da ductibilidade deste tipo de provetes, mais evidente para os provetes na direção da teia do que da trama.

4.4.3.2. Fibra de sisal

A fibra de sisal possibilita valores de alongamento muito superiores aos dos verificados para a juta. Através dos resultados presentes no Quadro 18, que exprimem o alongamento médio dos provetes de sisal ao longo do tempo, é possível verificar uma perda de ductibilidade para condições ambientais de 47 e 62 %, para teia e trama, ao fim de doze semanas de exposição

Quadro 18 – Alongamento dos provetes de sisal.

Teste	Alongamento (%)			
	Condições ambientais		Condições controladas	
	Teia	Trama	Teia	Trama
Valor de controlo	31,39	12,47	31,39	12,47
Nº 1 (2 semanas)	26,36	8,36	29,45	10,14
Nº 2 (4 semanas)	27,20	7,45	25,92	8,48
Nº 3 (6 semanas)	21,95	5,97	26,95	9,02
Nº 4 (8 semanas)	20,29	5,74	26,50	8,75
Nº 5 (10 semanas)	16,38	4,74	27,29	9,52
Nº 6 (12 semanas)	16,53	4,78	27,53	9,01

Tal como se verificou para a juta, também no sisal em condições controladas se verifica uma tendência de perda de alongamento em função do tempo de exposição, apesar de alguma flutuação de valores. Isto é explicado pelo facto de não haver exposição a agentes externos que acelerem o processo de biodegradação, entrando aí em causa a variabilidade na composição das fibras. O alongamento verificado na rotura dos fios é particularmente sensível a todas as heterogeneidades e pequenos defeitos presentes neste tipo de materiais (Methacanon, 2010). No pior dos cenários, que não coincide com o período final do estudo, para condições ambientais existe uma ductibilidade 30 % inferior aquela verificada em condições controladas, para a teia e de 44 % para a trama. A Figura 40 representa a variação do alongamento dos provetes de sisal ao longo do tempo, para cada um dos ambientes de exposição.

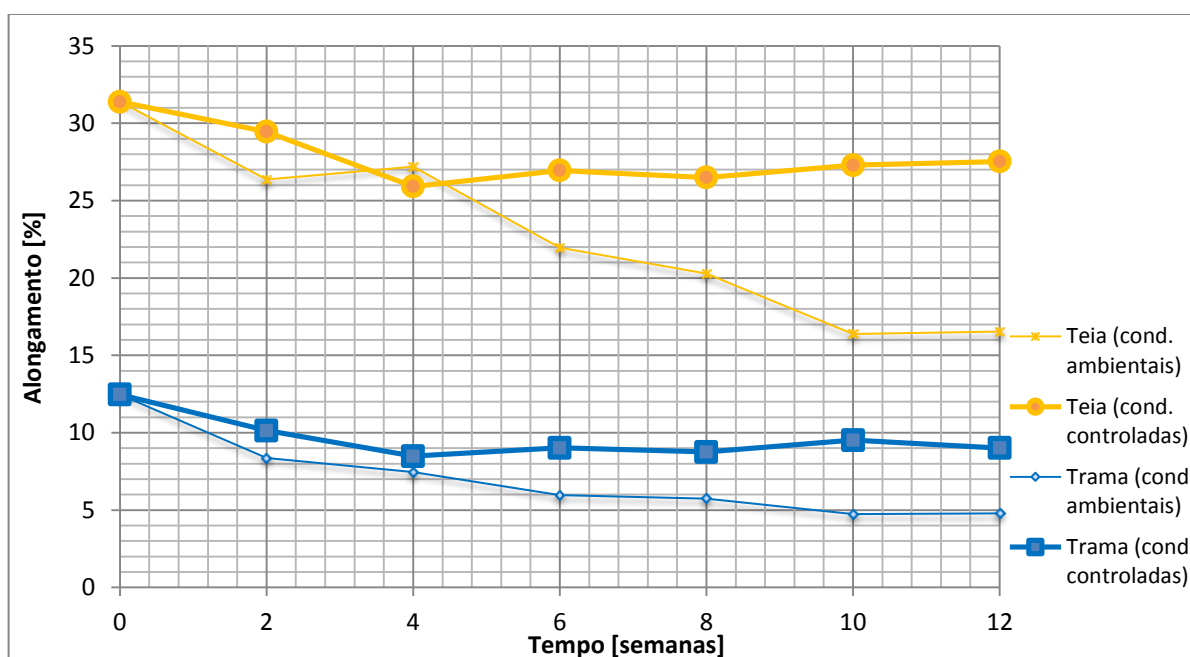


Figura 40 – Alongamento na rotura dos provetes de sisal.

4.4.4. Relação entre resistência à tração e alongamento

Tendo por base os resultados apresentados anteriormente em relação às propriedades de resistência à tração e alongamento na rotura das fibras estudadas, de seguida apresenta-se uma correlação entre estes dois parâmetros de modo a aferir a sua interligação.

Através da Figura 41, que expressa a correlação entre resistência à tração dos provetes de juta e o respetivo alongamento, é possível perceber que os resultados obtidos para condições ambientais traduzem uma perda de alongamento mais acentuada para os provetes na direção da teia. Anote-se que para este caso, a perda de força ao longo do tempo traduz-se numa maior perda de alongamento do que para a trama.

Para o caso das condições controladas, em relação aos provetes, tanto da teia como da trama, os seus resultados apresentam pouca variação da força e do alongamento, sendo que para a teia essa variação é relativamente maior, os resultados obtidos encontram-se mais dispersos.

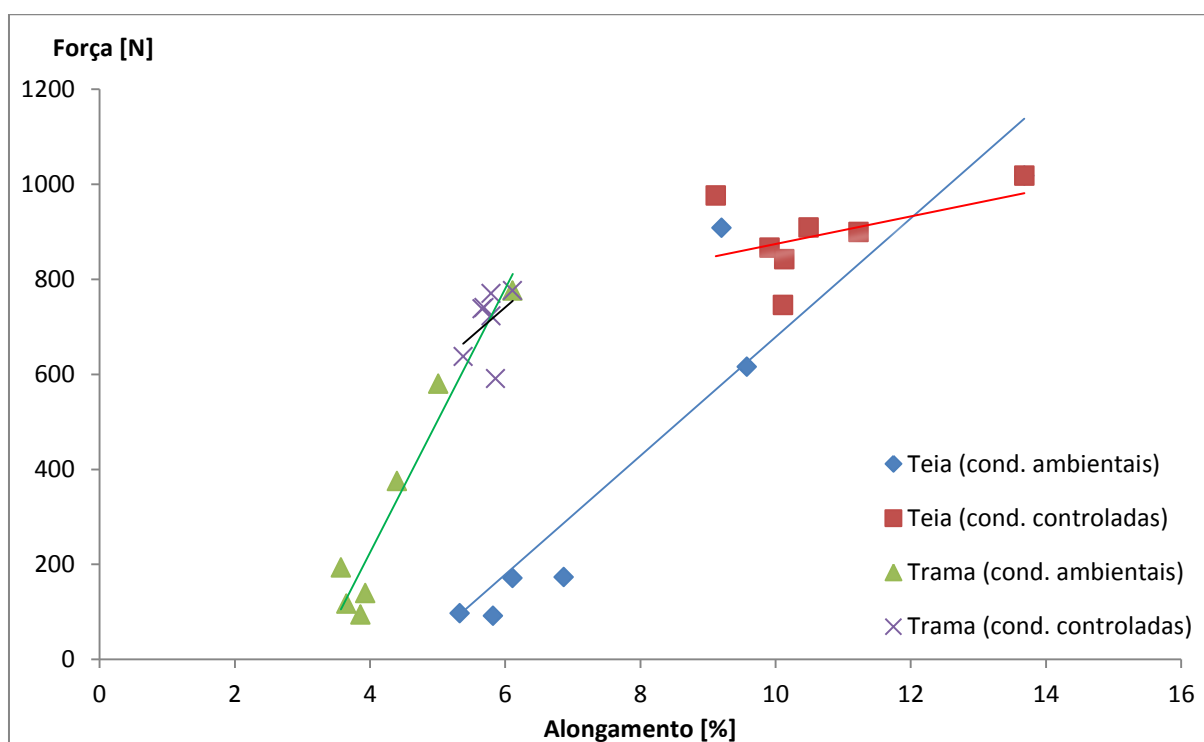


Figura 41 – Correlação força - alongamento para a fibra de juta.

Em relação aos provetes de sisal a correlação entre força máxima e alongamento, presente na Figura 42, é consistente para a trama, em condições controladas e ambientais, tendo uma amplitude de valores maior neste último caso. Aqui verifica-se uma clara linearidade entre os valores de resistência e de alongamento ao longo do tempo, sendo que comparado com os provetes na direção da teia, para a trama a perda de força acontece para uma menor extensão de valores de alongamento; para a teia a perda de força traduz-se numa maior perda de ductibilidade.

No que diz respeito aos provetes colocados em ambiente controlado existe uma clara diferença entre os dois primeiros testes, correspondentes a duas e quatro semanas de exposição, e os restantes, onde os valores flutuam entre perda e ganho de força e alongamento, de um teste para o outro. É possível verificar que, mesmo para gamas de valores distintos, a correlação força - alongamento para condições controladas, quer para a teia quer para a trama, tem sensivelmente o mesmo tipo de comportamento linear. Ao contrário do que aconteceu no caso da juta, aqui é muito mais acentuada a perda de força.

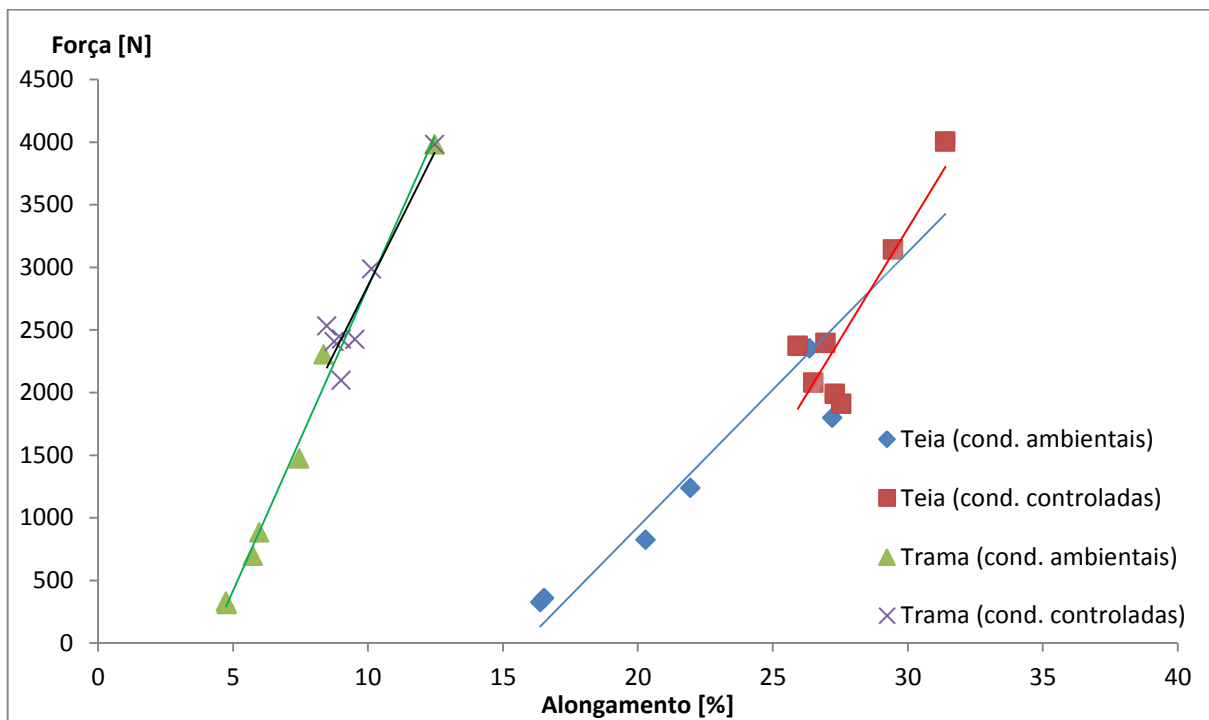


Figura 42 – Correlação força - alongamento para a fibra de sisal.

4.5. Perda de massa das fibras

A perda de massa dos provetes de fibras em função do tempo de exposição está intimamente relacionada com a perda dos vários constituintes da composição química das fibras, hemicelulose, celulose, lignina entre outros, resultado do processo de biodegradação das mesmas.

De seguida será feita uma quantificação da perda de massa das fibras em função do respetivo tempo de exposição e uma tentativa de correlação deste parâmetro com os resultados apresentados para as propriedades mecânicas das mesmas.

4.5.1. Fibra de juta

Os resultados presentes no Quadro 19 permitem concluir a existência de uma perda de massa relativamente consistente dos provetes de juta para condições ambientais. O mesmo não se verifica aquando da ausência de fatores ambientais, tal como acontecia relativamente às propriedades mecânicas das fibras.

Quadro 19 – Resultados da perda de massa dos provetes de juta.

Teste	Perda de massa (%)			
	Condições ambientais		Condições controladas	
	Teia	Trama	Teia	Trama
Nº 1 (2 semanas)	0,83	2,49	0,27	0,927
Nº 2 (4 semanas)	5,89	6,37	0,23	2,79
Nº 3 (6 semanas)	19,36	19,83	0,53	1,82
Nº 4 (8 semanas)	16,82	19,60	2,89	2,35
Nº 5 (10 semanas)	24,80	23,68	1,28	2,93
Nº 6 (12 semanas)	21,19	24,72	2,84	1,39

É possível verificar que para condições ambientais a perda de massa é mais acentuada entre as quatro e seis semanas de exposição, com esta a triplicar o seu valor, o que está de acordo com o verificado relativamente à resistência à tração e alongamento na rotura dos provetes, pois é neste intervalo de tempo que se podem encontrar algumas das maiores perdas em relação a estes dois parâmetros. No pior dos cenários, a perda de massa para condições ambientais

ronda os 25 %, não atingindo sequer aos 3 % para condições controladas, o que significa que na presença de agentes ambientais existe uma perda de massa oito vezes superior.

Tal como se pode perceber, a evolução da perda de massa para os provetes expostos a condições controladas, ilustrada na Figura 43, não é consistente ao longo do tempo, apesar de existir uma tendência de aumento em relação a esta característica. Ainda assim, também aqui se encontra uma relação entre perda de massa e perda de resistência à tração, para o caso dos provetes na direção da teia as perdas de cerca de 3 % do seu peso após oito e doze semanas de exposição conduzem à maior diminuição da resistência à tração dos provetes, 27 e 17 % respetivamente. Em relação aos provetes na direção da trama esta correlação não é tão evidente.

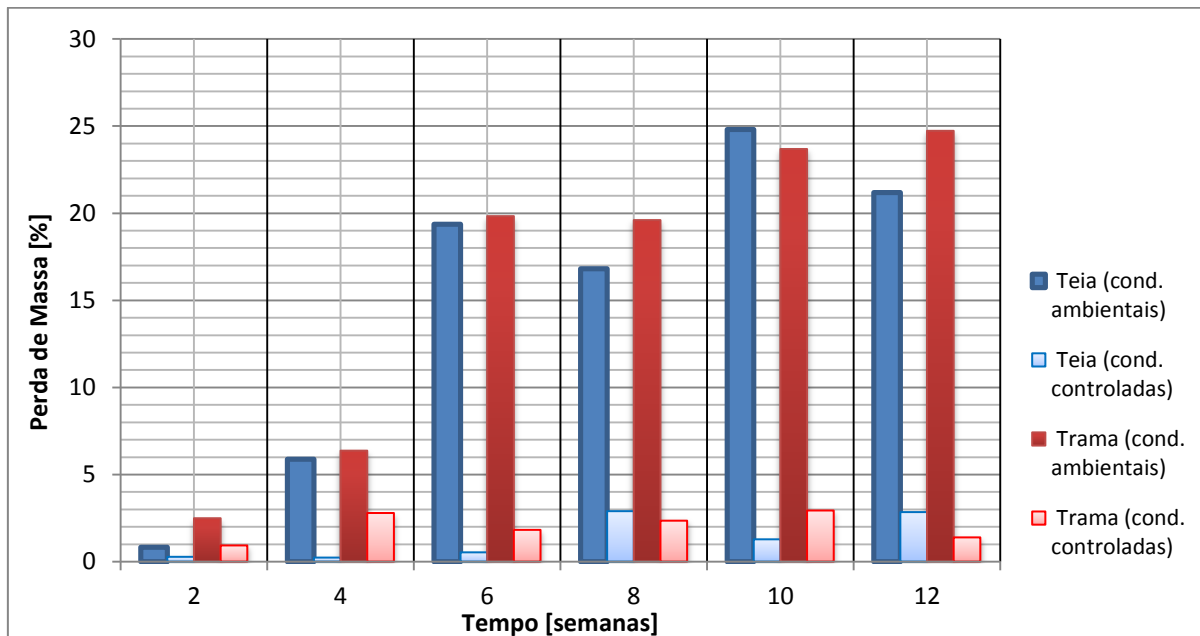


Figura 43 – Evolução da perda de massa dos provetes de juta ao longo do tempo.

Na Figura 44, estão representadas curvas que correlacionam a perda de massa e de resistência à tração. Nestas, é possível constatar que para condições ambientais a perda de resistência inicial não é acompanhada por uma grande perda em termos de massa. No entanto, após quatro semanas de exposição, ocorre a perda de resistência mais acentuada, consistente com a perda de massa dos provetes de forma linear.

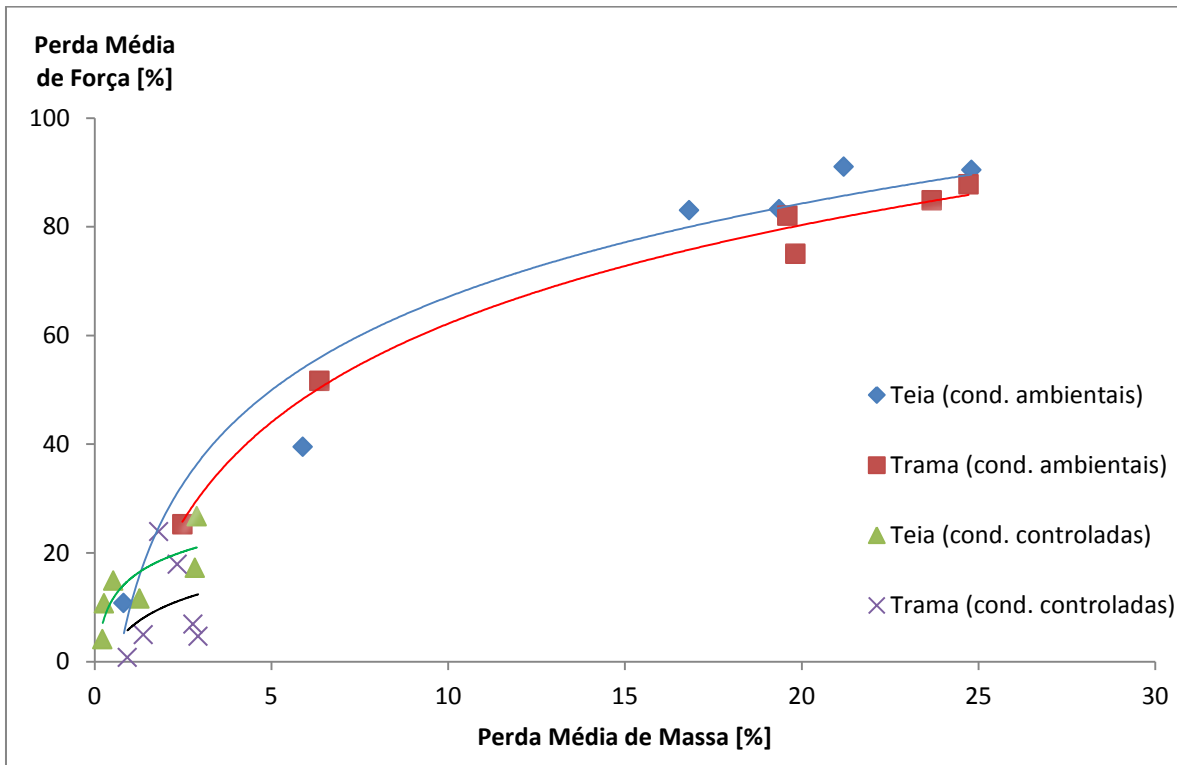


Figura 44 – Correlação perda de força - perda de massa para a fibra de juta.

4.5.2. Fibra de sisal

A perda de massa para os provetes de sisal apresenta valores superiores aos verificados para a juta, sobretudo para condições controladas. Tal como se pode verificar através dos resultados presentes no Quadro 20, a perda de massa para condições ambientais é sensivelmente a mesma para a teia e trama, sendo que, ao fim de doze semanas de exposição, os provetes mantêm cerca de 70 % do seu peso inicial. Para o cenário de ausência de agentes climáticos esta perda é consideravelmente inferior, sendo que nas primeiras duas semanas de exposição existe uma perda tão ou mais evidente que nas oito semanas que se seguiram.

Ao fim de doze semanas de exposição, constata-se que para o cenário de condições ambientais, a perda de massa é de mais do dobro da verificada em condições controladas. É possível concluir que a degradação de matéria nos provetes de juta é quase sempre inferior à do sisal em condições ambientais ao longo de todo o estudo. Tal facto, também é possível comprovar para condições controladas, e ainda mais evidente, onde a perda de massa do sisal é quase cinco vezes superior à da juta ao fim de doze semanas.

Quadro 20 – Resultados da perda de massa dos provetes de sisal.

Teste	Perda de massa (%)			
	Condições ambientais		Condições controladas	
	Teia	Trama	Teia	Trama
Nº 1 (2 semanas)	11,53	9,71	6,80	9,14
Nº 2 (4 semanas)	12,15	13,01	9,486	13,09
Nº 3 (6 semanas)	17,04	23,76	10,28	8,43
Nº 4 (8 semanas)	20,91	25,33	10,96	10,10
Nº 5 (10 semanas)	30,39	31,46	14,17	13,61
Nº 6 (12 semanas)	31,29	31,23	11,59	14,12

A perda de massa para condições ambientais nas duas primeiras semanas resulta na perda de resistência mais acentuada para a fibra de sisal, cerca de 42 %, sendo que até ao final do estudo é necessário um acréscimo na perda de massa em cerca de três vezes para fazer com que as fibras mantenham apenas 10 % da sua resistência inicial. A Figura 45 expressa os resultados presentes no Quadro 20.

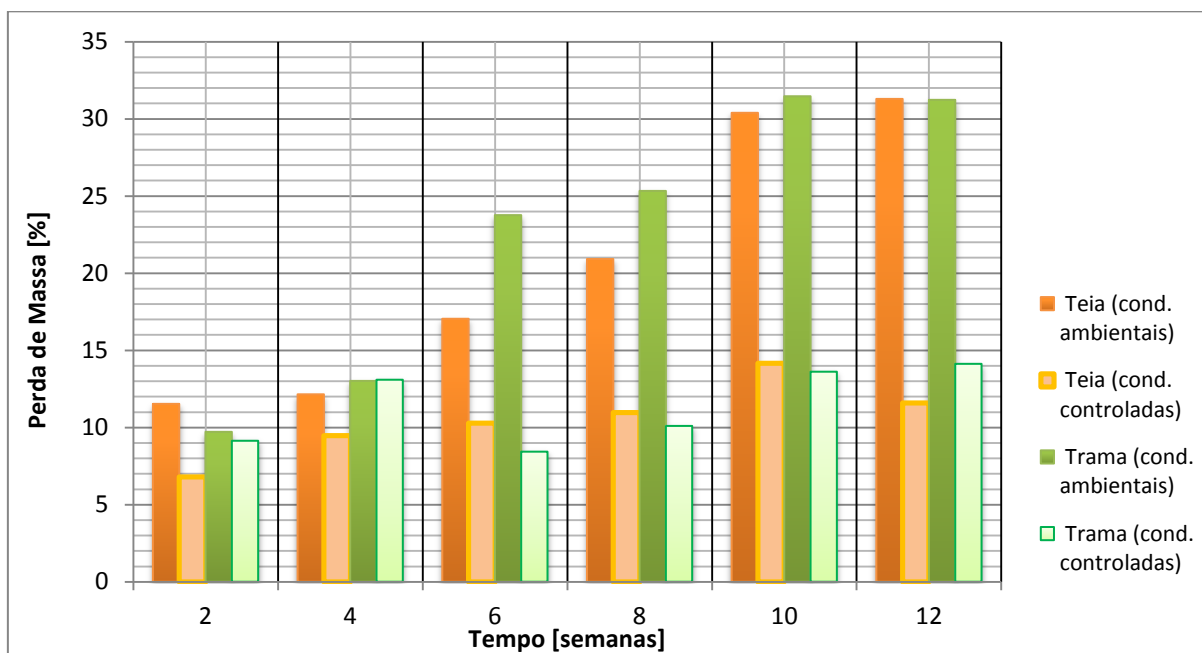


Figura 45 – Evolução da perda de massa dos provetes de sisal ao longo do tempo.

Através da correlação entre perda de resistência à tração e perda de massa, presente na Figura 46, é possível aferir da linearidade entre estas duas variáveis quando as fibras de sisal estão expostas a condições ambientais. Já em relação às condições controladas esta correlação é

distinta para os provetes ensaiados na direção da trama, aqui o aumento da perda de resistência não resulta de uma proporcional perda de massa.

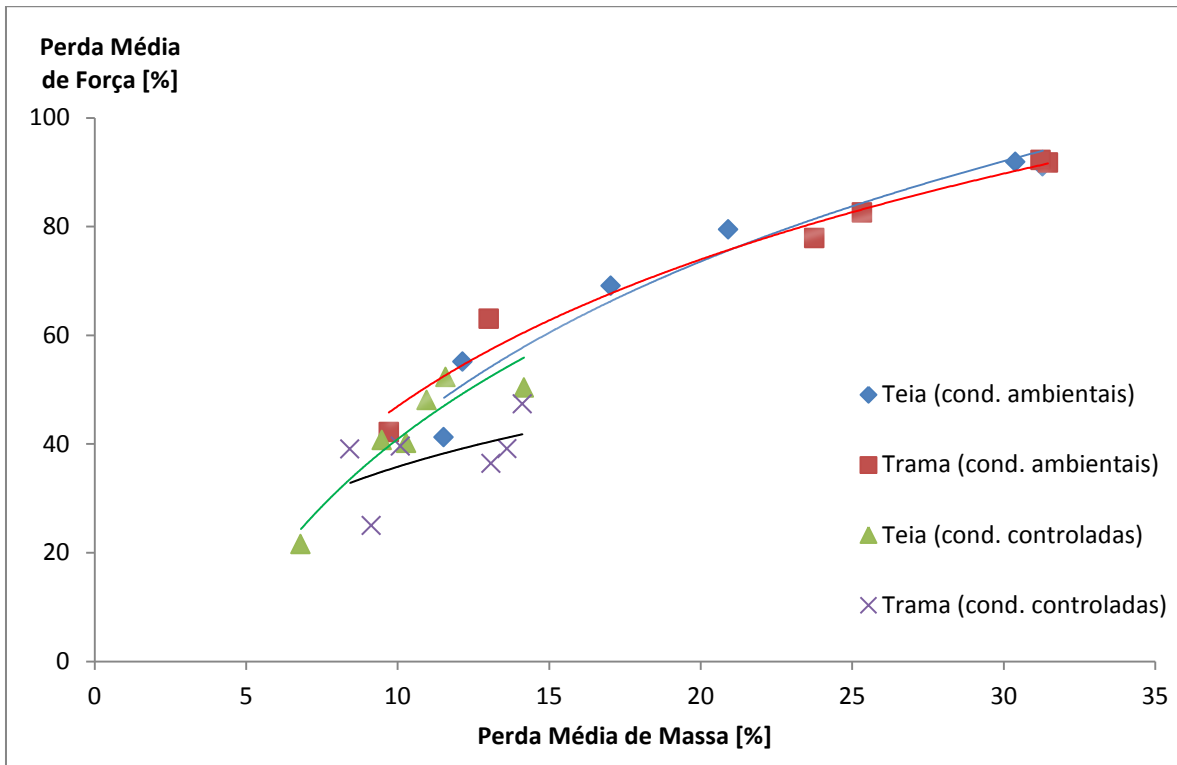


Figura 46 – Correlação perda de força - perda de massa para a fibra de sisal.

4.6. Análise microscópica

O período de exposição, juntamente com as diversas condições da mesma, a que as fibras estiveram sujeitas provocou nestas, tal como foi anteriormente demonstrado, uma perda significativa nas suas propriedades mecânicas, o que se relaciona com a natural perda de matéria existente na composição das fibras.

Aquilo que se pretende atingir com a observação microscópica de amostras retiradas dos provetes utilizados no presente estudo é confirmar o estado de degradação da estrutura fibrosa que permita explicar, não só a perda de qualidades mecânicas, mas fundamentalmente, a perda de matéria que se verificou ao longo do tempo.

Antes de se proceder à apresentação das observações microscópicas das fibras, são apresentadas imagens que retratam o aspeto dos provetes utilizados no estudo após o seu respetivo período de exposição. Tal como se pode verificar, mesmo do ponto de vista estético, exteriormente estes apresentam uma clara degradação no seu aspeto.

As Figuras 47 e 48 representam a degradação visual dos provetes de juta quando expostos a condições ambientais e controladas, respetivamente. Na Figura 47, a imagem em a) representa o provete no seu estado natural, sendo que as apresentadas em b), c) e d) representam um, dois e três meses de exposição no solo em condições ambientais. Para a Figura 48, as imagens a), b) e c) representam igualmente um, dois e três meses de exposição mas sem a influência de agentes climáticos.

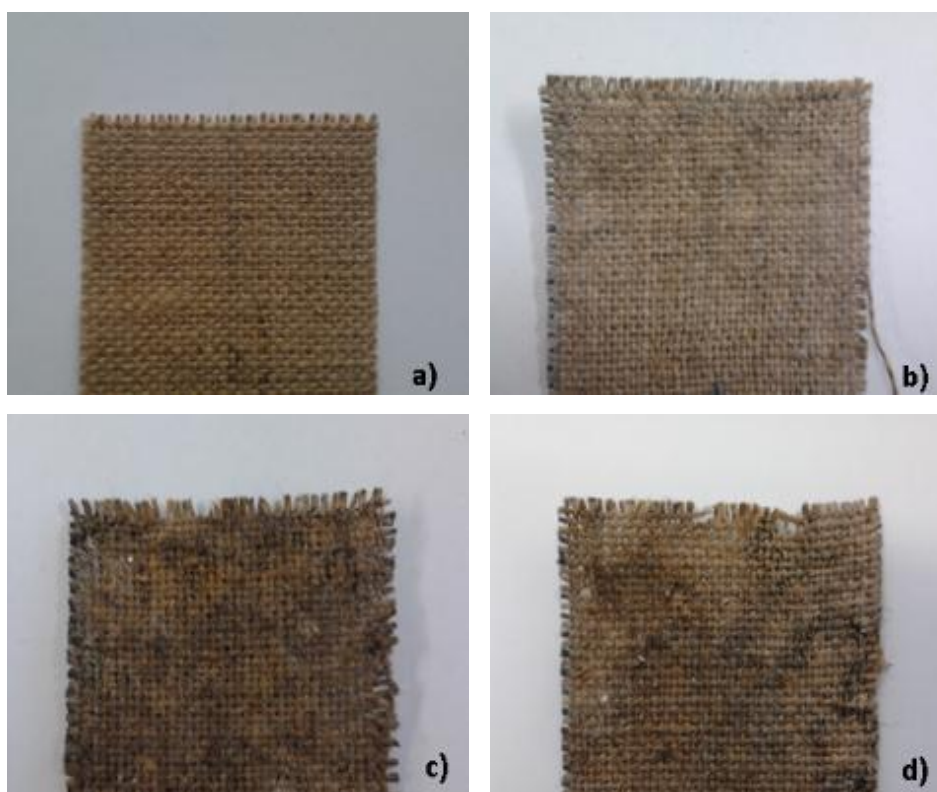


Figura 47 – Degradação visual dos provetes de juta para condições ambientais:
a) Provede de controlo; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

É facilmente perceptível uma maior degradação dos provetes colocados em condições ambientais, que apresentam várias manchas de bolor, sendo estas mais evidentes entre o primeiro e o segundo mês de exposição. Este ataque de microorganismos não é evidente em

termos visuais para condições controladas, no entanto, é possível verificar uma clara perda uniforme de brilho dos provetes de juta em todos os períodos de exposição considerados.

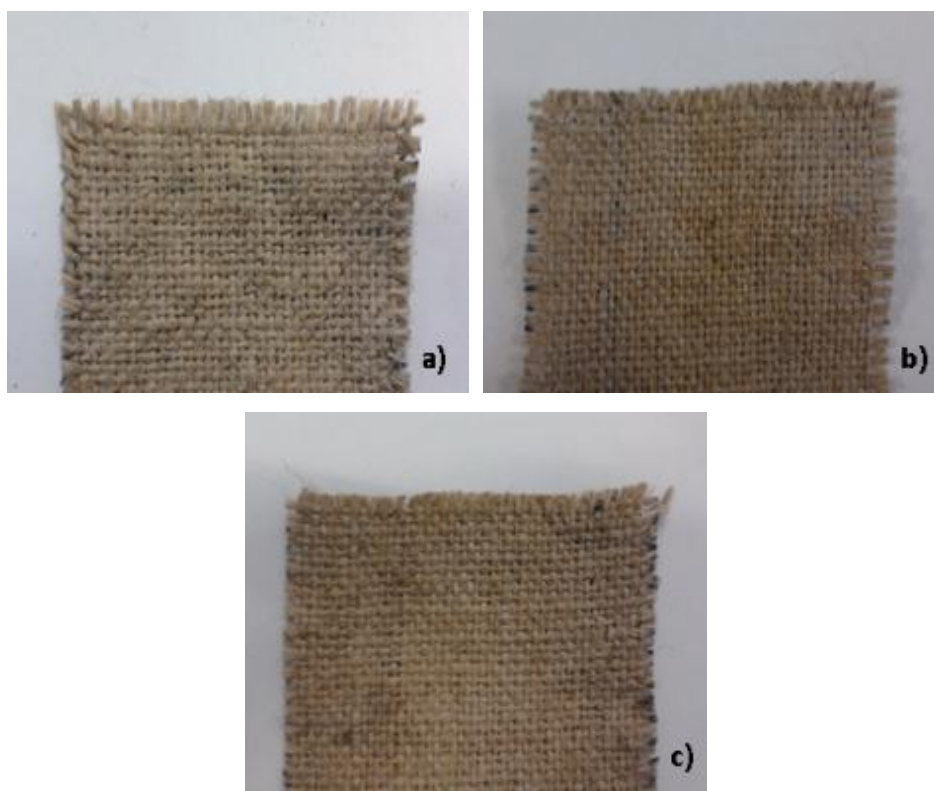


Figura 48 – Degradação visual dos provetes de juta para condições controladas:
a) 4 semanas exposição; b) 8 semanas exposição; c) 12 semanas exposição.

Em relação aos provetes de sisal, apresentados nas Figuras 49 e 50, também estes apresentam uma clara degradação quando expostos a condições ambientais, incomparavelmente superior ao verificado em condições controladas. Ao contrário da juta, nestes não são visíveis sinais de bolor no entanto a sua coloração está visivelmente alterada, podendo também constatar-se pelo tato, que os seus fios vão se tornando muito mais rígidos ao longo do tempo, o que está de acordo com as perdas de resistência e ductibilidade verificadas anteriormente.

Para o cenário de condições controladas, a degradação visual dos provetes de sisal apenas caracteriza-se por uma perda do seu brilho inicial. Na Figura 49 as imagens a), b), c) e d) correspondem a um provete no seu estado natural, com um, dois e três meses de exposição, respetivamente. Também na Figura 50 as imagens apresentadas referem-se a um, dois e três meses de exposição, mas neste caso para condições controladas.

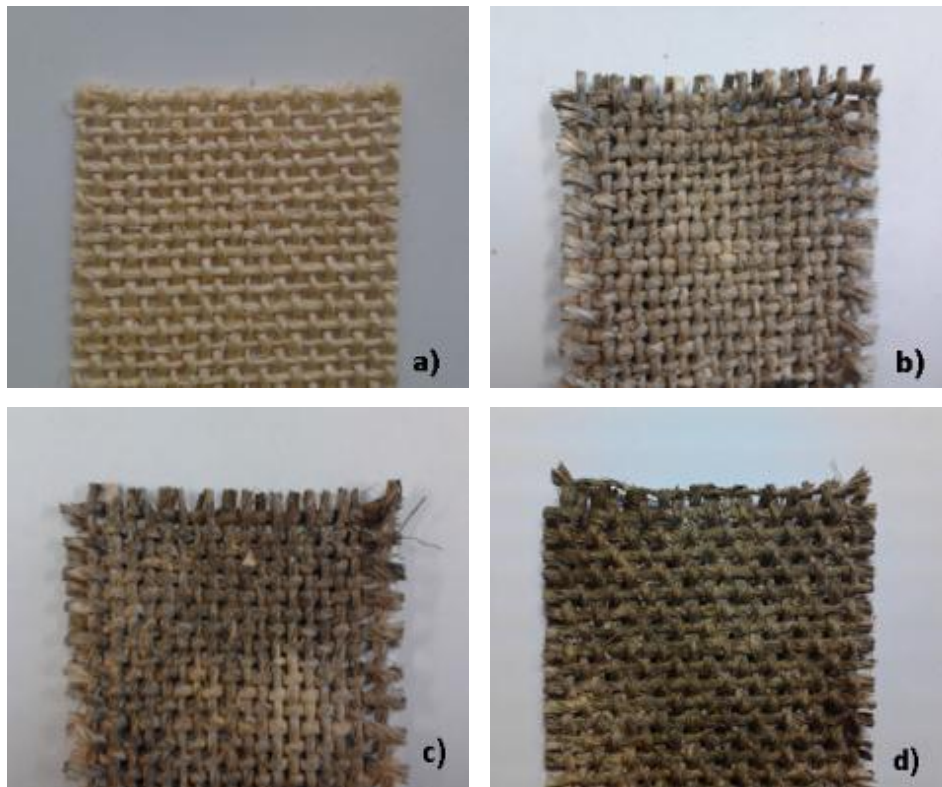


Figura 49 – Degradação visual dos provetes de sisal para condições ambientais:
a) Provede de controlo; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

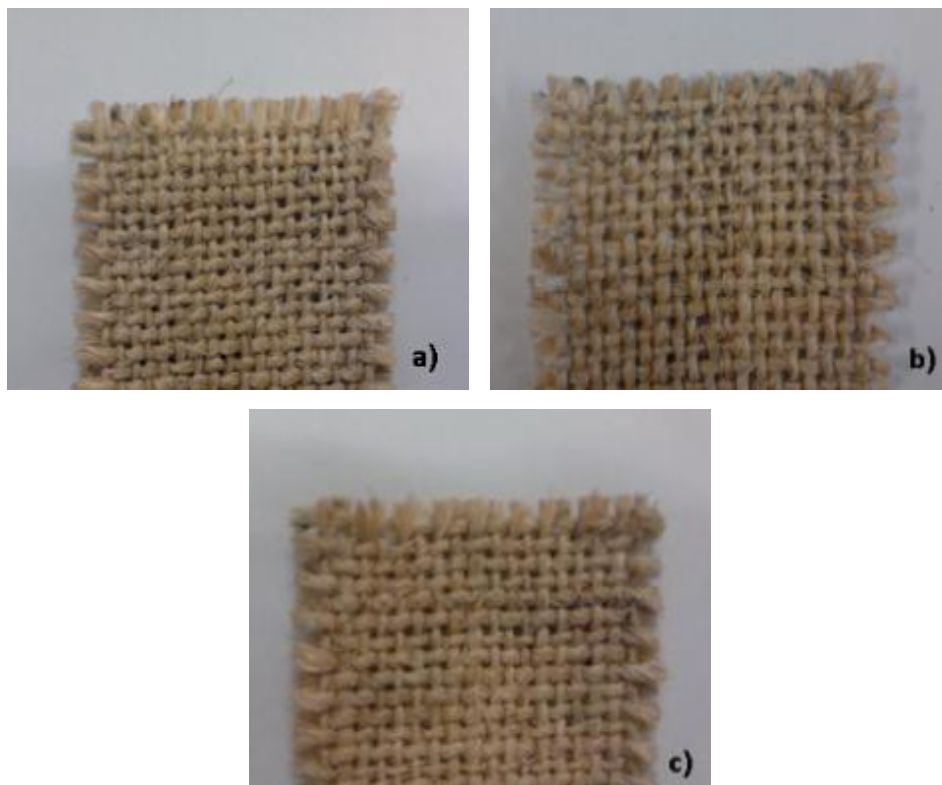


Figura 50 – Degradação visual dos provetes de sisal para condições controladas:
a) 4 semanas exposição; b) 8 semanas exposição; c) 12 semanas exposição.

As imagens que se seguem resultam da observação microscópica no SEM, com amplitudes de 200x, 500x e 1000x de amostras retiradas dos vários provetes utilizados no estudo após o seu respetivo período de exposição. Nestas encontram-se assinalados alguns sinais de degradação superficial das fibras.

4.6.1. Fibra de juta

Condições ambientais

As imagens presentes nas Figuras 51 e 52 representam a observação de provetes de juta para condições ambientais com ampliações de 500x e 200x, respetivamente. Aqui é possível verificar a uniformidade presente na estrutura fibrosa dos provetes de controlo, na imagem a), e com o decorrer do período de exposição é evidente a decomposição de matéria na superfície em b), e a desintegração das fibrilas constituintes das fibras de juta, apresentadas em d).

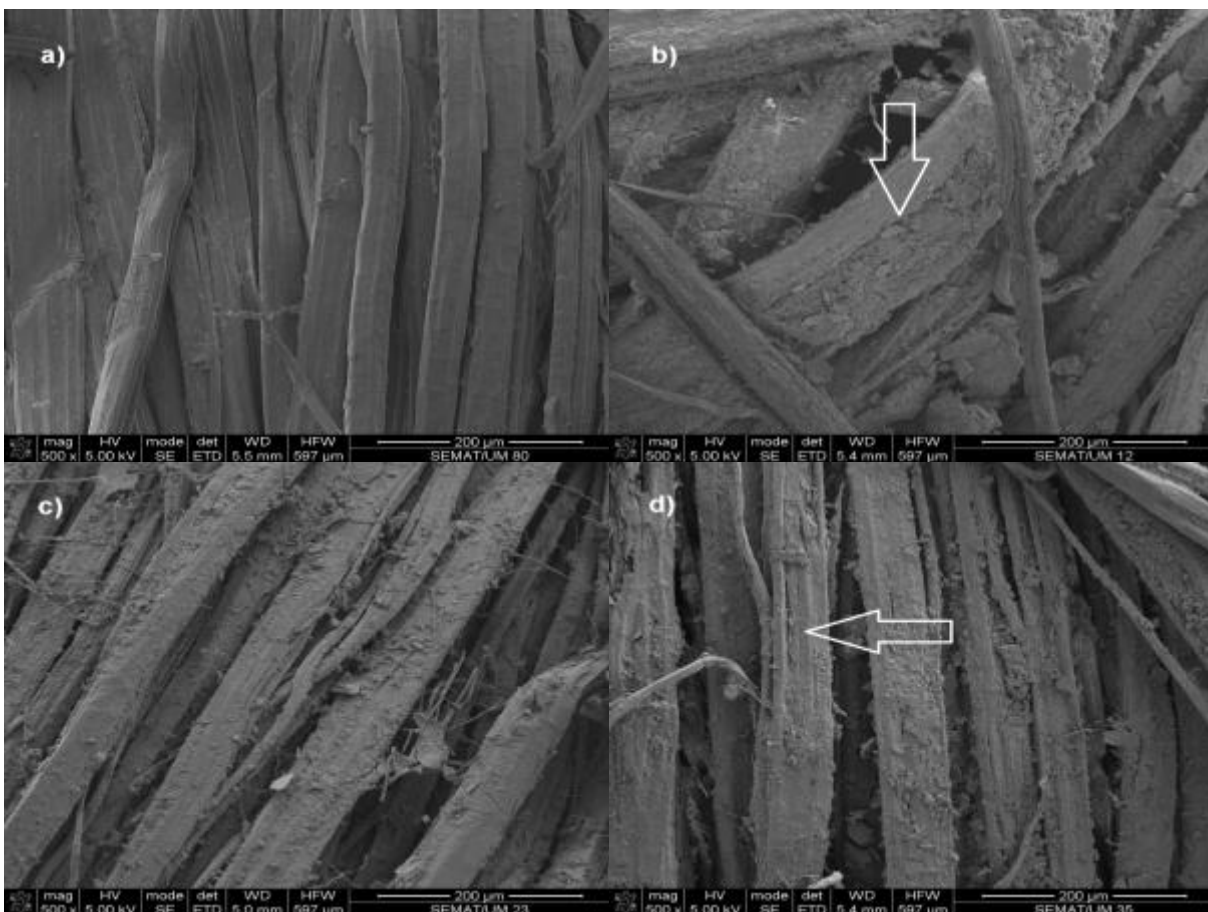


Figura 51 – Observação microscópica para juta em condições ambientais (ampliação 500x):
a) Provede controlo; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

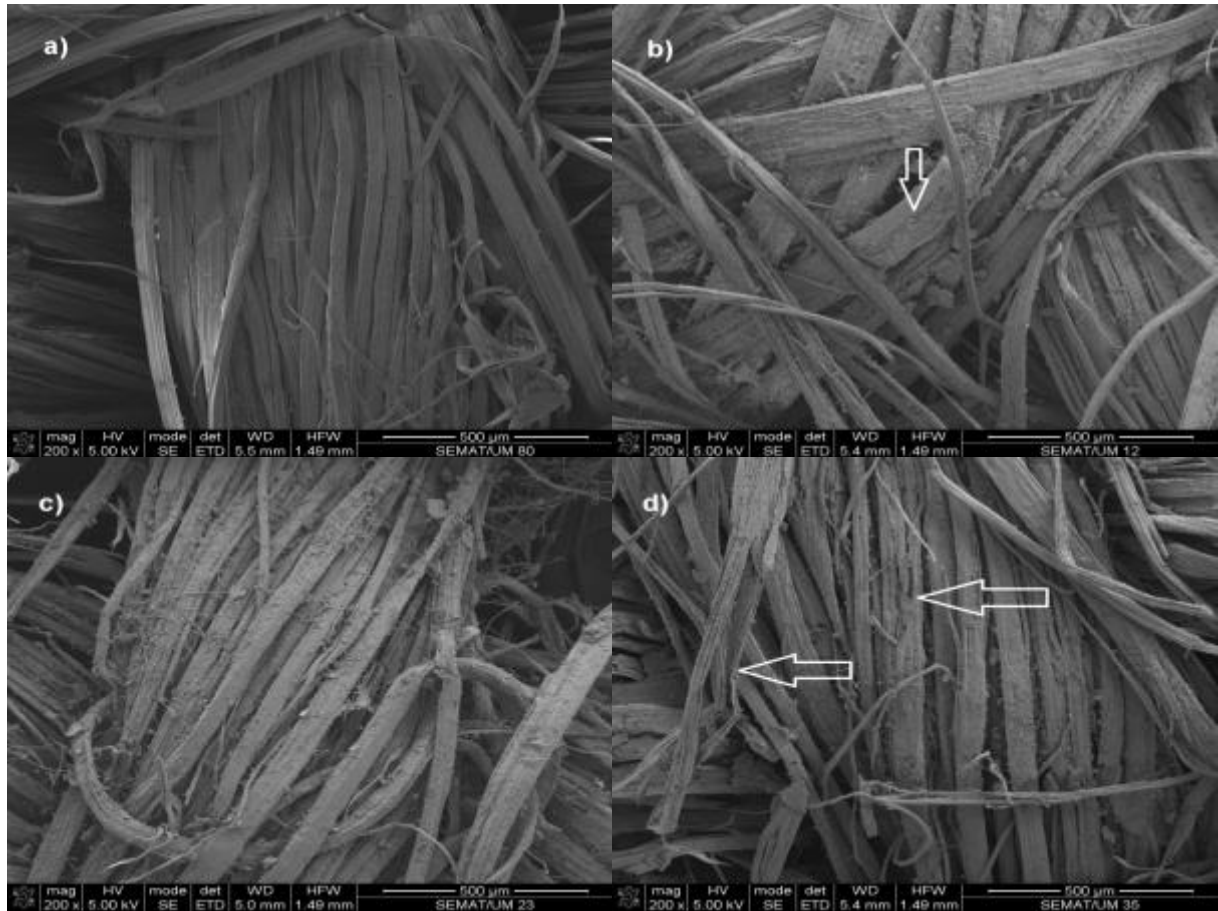


Figura 52 – Observação microscópica para juta em condições ambientais (ampliação 200x):
a) Provete controlo; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

Condições controladas

Para condições controladas a degradação nas amostras, presente nas Figuras 53 e 54 com ampliações de 500x e 1000x, caracteriza-se pela desintegração e rotura das fibras, em b) e c), embora parece menos evidente do que para condições ambientais; e em d) pela formação de fissuras longitudinalmente no sentido da fibra.

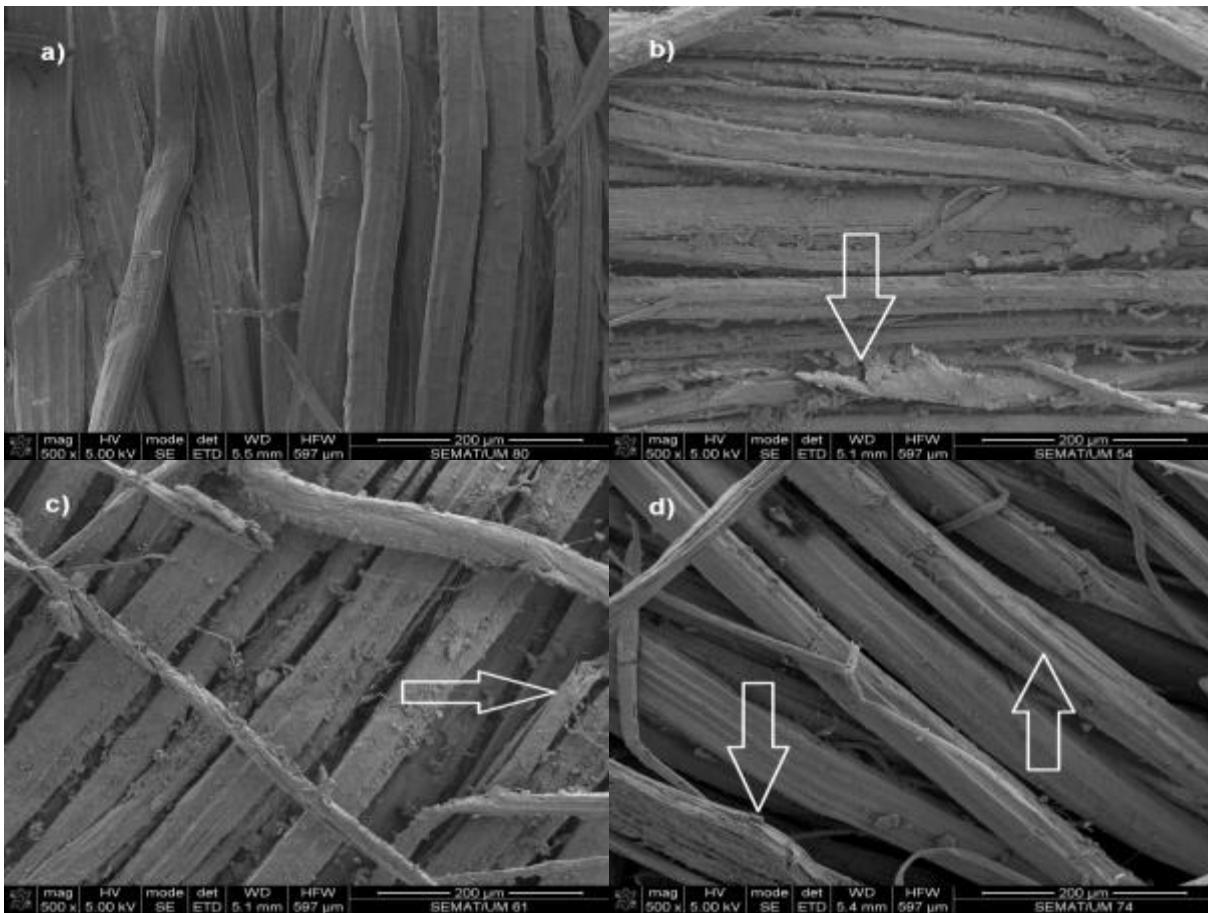


Figura 53 – Observação microscópica para juta em condições controladas (ampliação 500x):
a) Provetes controle; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

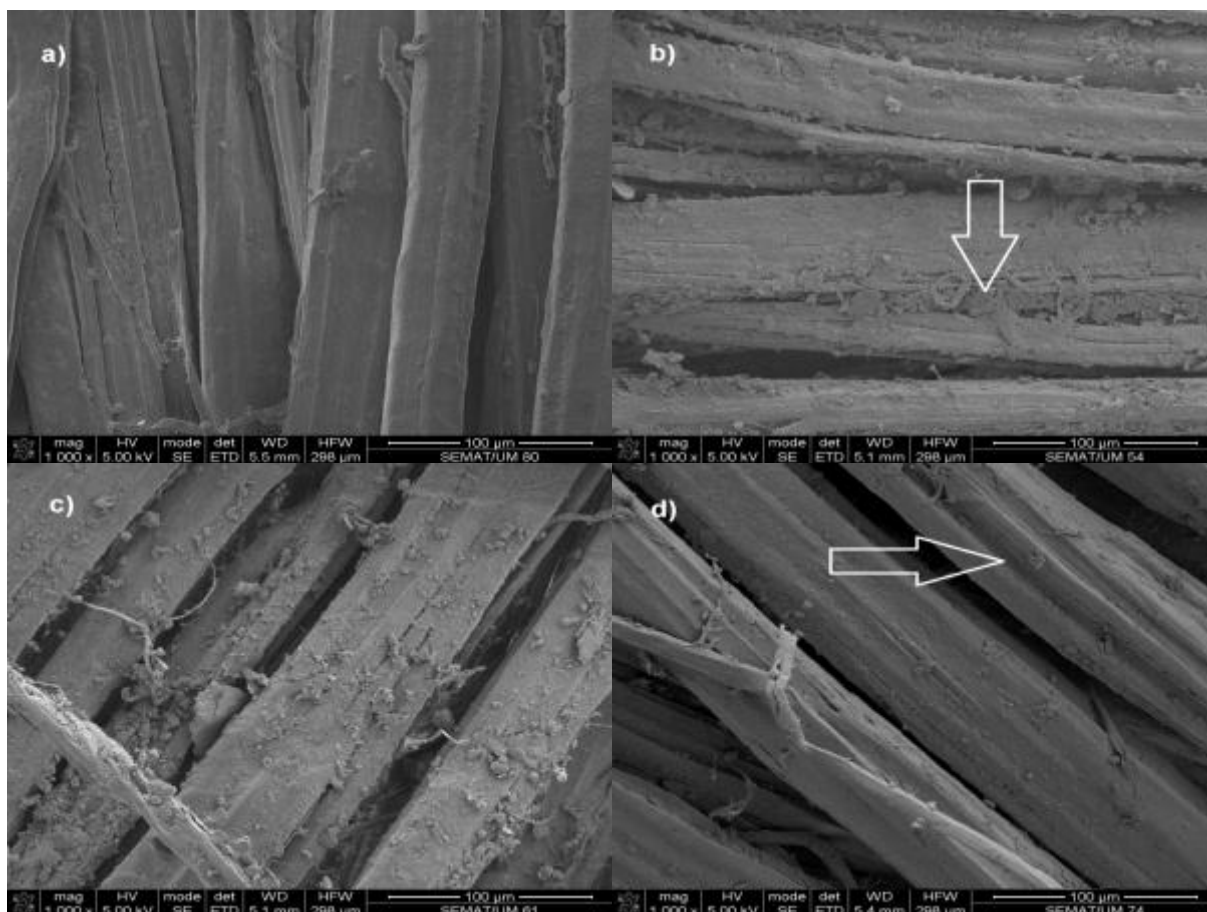


Figura 54 – Observação microscópica para juta em condições controladas (ampliação 1000x):
a) Provete controlo; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

4.6.2. Fibra de sisal

Condições ambientais

Nas Figuras 55 e 56, encontram-se observações microscópicas de amostras de sisal expostas a condições ambientais nas quais se utilizaram amplitudes de 500x e 1000x, respetivamente. Nestas é possível identificar uniformidade superficial das fibras nas imagens a), e sinais de degradação para todos os períodos de exposição, nomeadamente, a rotura de filamentos das fibras nas imagens b) e d). Também para as ampliações referidas é possível verificar em c) a perda de matéria dos filamentos de sisal.

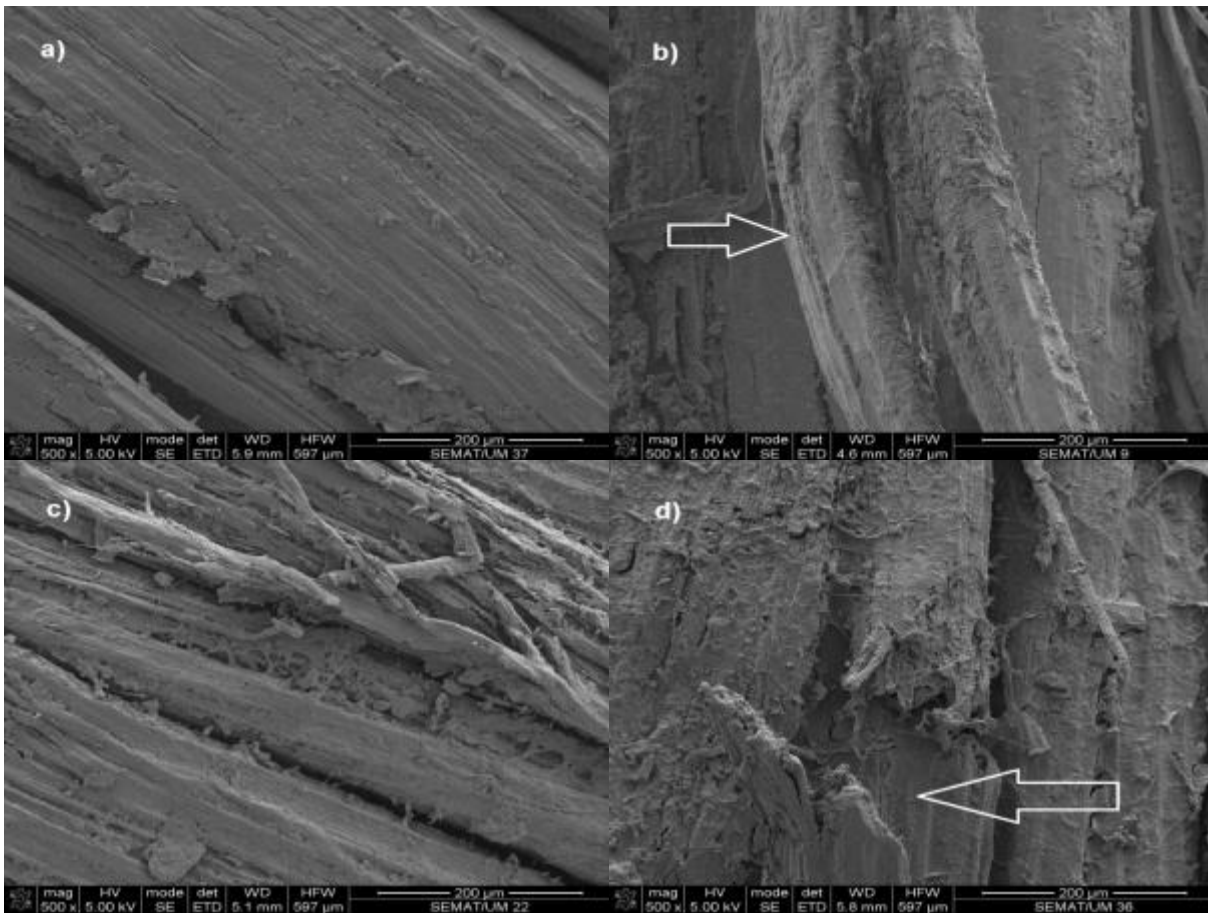


Figura 55 – Observação microscópica para sisal em condições ambientais (ampliação 500x):
a) Provetes controle; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

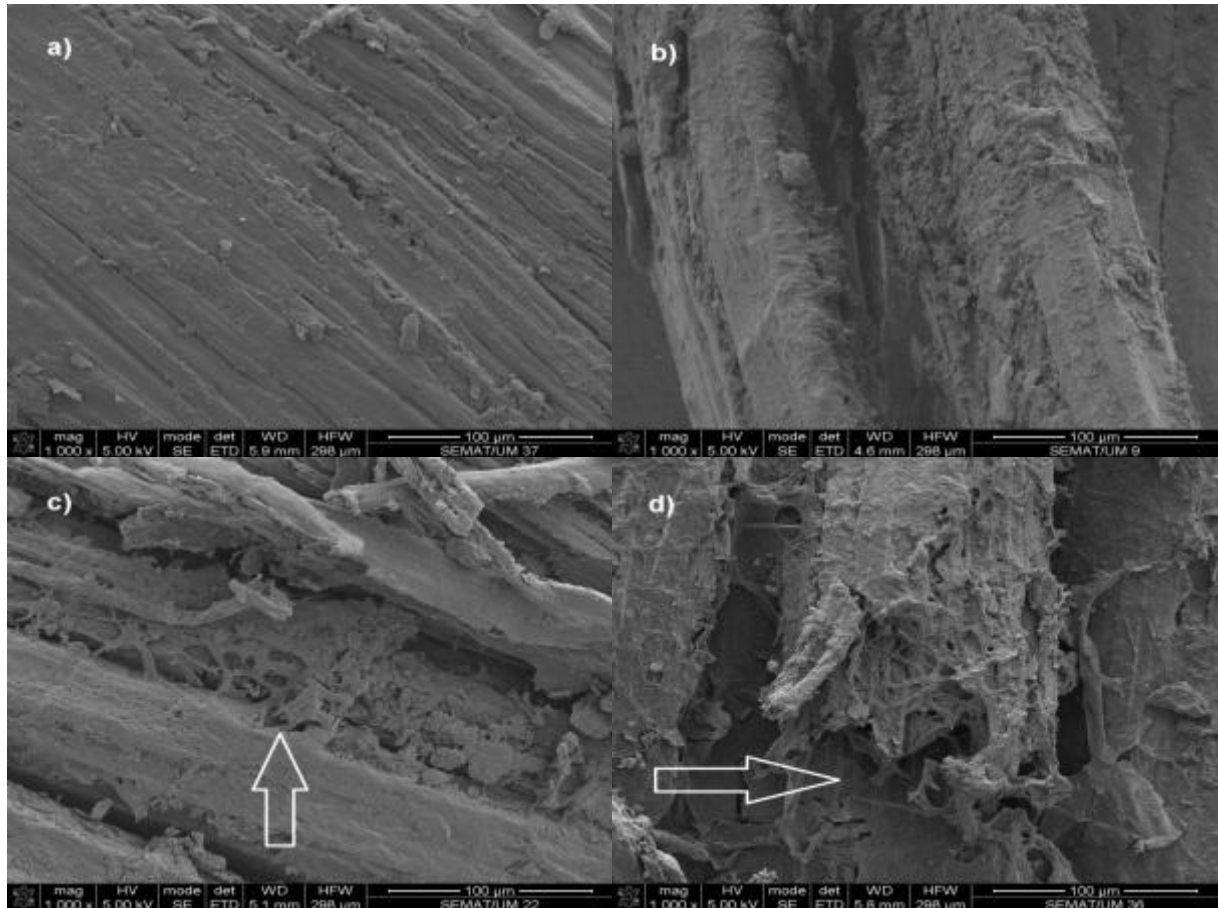


Figura 56 – Observação microscópica para sisal em condições ambientais (ampliação 1000x):
a) Provete controle; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

Condições controladas

Após a exposição dos provetes de sisal a condições controladas, a degradação superficial na sua superfície é menos evidente que para condições ambientais. No entanto, é visível na Figura 57, usando uma ampliação de 200x, a perda de matéria nas fibras, imagem c); sendo que em b) e d) é possível identificar ligeira fissuração superficial.

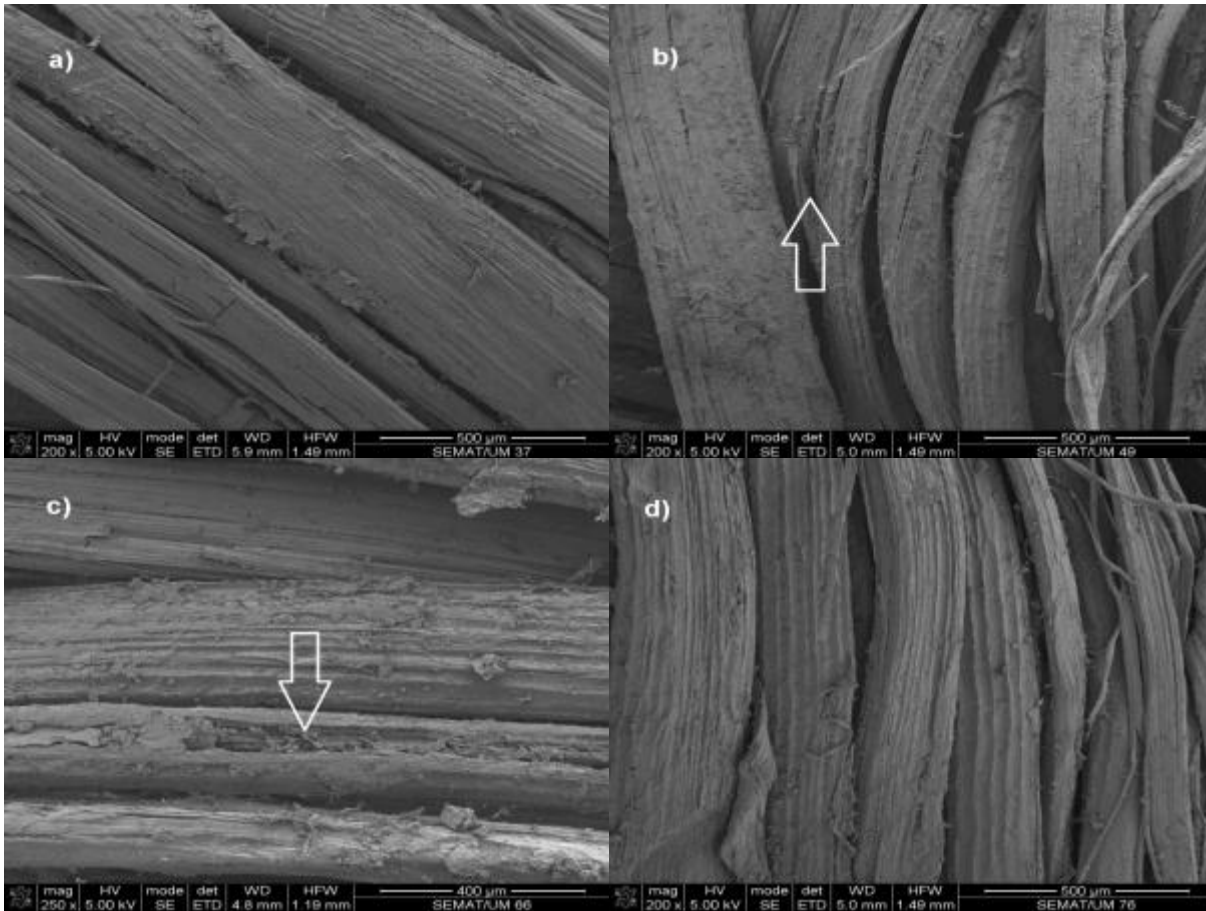


Figura 57 – Observação microscópica para sisal em condições controladas (ampliação 200x):
a) Provette controlo; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

Através das imagens presentes na Figura 58, ampliação de 1000x, não se verifica grande degradação superficial após quatro semanas de exposição, imagem b), quando comparado com a superfície de um provete de controlo. No entanto, após oito semanas de exposição, imagem c), já é evidente a desintegração de matéria na fibra de sisal, tal facto é também identificável na imagem d), onde a fissuração longitudinal das fibras já é evidente.

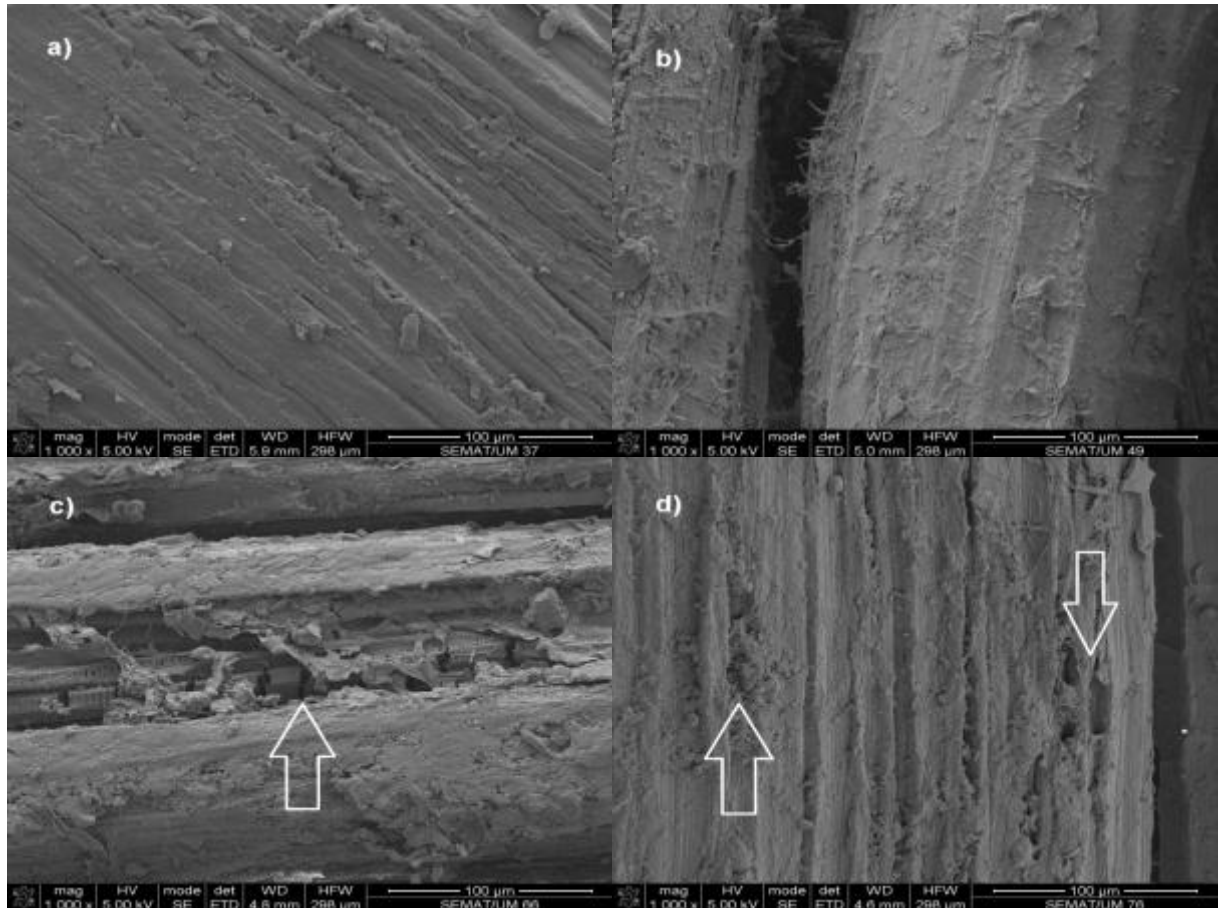


Figura 58 – Observação microscópica para sisal em condições controladas (ampliação 1000x):
a) Provetes controle; b) 4 semanas exposição; c) 8 semanas exposição; d) 12 semanas exposição.

Após a apresentação da análise de microscopia das fibras, é possível concluir que a degradação das mesmas é mais severa para condições ambientais, indo de encontro aos mais elevados valores de perda de resistência, alongamento e de massa apresentados anteriormente, do que para o cenário de ausência de fatores ambientais.

Apesar de em termos visuais, para condições controladas, a degradação ser praticamente desprezável quando comparada com os provetes em condições ambientais, como foi apresentado nas Figuras 48 e 50, verificam-se microscopicamente sinais de degradação nas suas estruturas fibrosas, o que ajudam a explicar a perda de algumas características destes.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões gerais

A realização do presente estudo teve como finalidade compreender o mecanismo de biodegradação de fibras naturais para fins geotêxteis, e a respetiva influência dos agentes ambientais. Para levar a cabo este objetivo foram incorporados no solo provetes tecidos em fibra de juta e de sisal, considerando para ambos, provetes na direção da teia e da trama, que periodicamente foram monitorizados através do seu comportamento mecânico, resistência à tração e alongamento na rotura, perda de massa e análise de microscopia, para dois tipos de cenários distintos, um exposto a condições ambientais, e outro em condições controladas, não havendo aqui influência de variações de temperatura, humidade e radiação solar.

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que para a fibra de juta, em condições ambientais, existe uma perda de resistência de aproximadamente 90 % ao fim de doze semanas de exposição neste cenário, sendo que às seis semanas já ocorreu a maior parte de degradação desta propriedade, 83 % para a teia e de 75 % para a trama. Já para o cenário de condições controladas, a perda de resistência máxima situa-se entre os 24 e 27 %.

Em relação à fibra de sisal, esta perde cerca de 92 % da sua resistência à tração ao fim de doze semanas, sendo que apenas com duas primeiras semanas de exposição em condições ambientais verifica-se uma perda de 42 %. Para condições controladas, verifica-se uma perda de resistência de cerca de 50 % no final do estudo, sendo que nas duas primeiras semanas, a perda é cerca de metade da existente na presença de agentes ambientais. Também para este cenário se verificou que a fibra de sisal sofreu uma perda de resistência muito superior, cerca de o dobro, àquela encontrada para o caso da juta quando colocada sobre as mesmas condições.

No que diz respeito à ductibilidade das fibras, a perda de alongamento para condições ambientais, na direção da teia, é de 47 %, após doze semanas, sendo de 12 % para condições controladas. No caso dos provetes na direção da trama, ocorre uma perda de ductibilidade de 62 % na presença de agentes ambientais, sendo o dobro da verificada no cenário de ausência

dos mesmos. Para a fibra de juta, em condições ambientais e para a teia, existe uma perda de ductibilidade de quase o dobro da verificada em condições controladas, sendo que para a trama esta diferença fica-se pelos 32 %, também para o período de doze semanas.

É possível concluir também que para o cenário de condições ambientais, replicando as condições reais onde os geotêxteis têm efetiva aplicação, a degradação das fibras é bastante significativa nas primeiras semanas de exposição; apenas com seis semanas decorridas verifica-se já uma perda de resistência à tração entre 75 e 83 % para a juta e entre os 70 a 80 % para o sisal; perdas de ductibilidade na ordem dos 40 - 55 % para juta, e 30 - 50 % para sisal, e, por fim, perdas de massa a rondar os 20 % para os dois tipos de fibras. Neste cenário foi possível constatar o elevado, e acentuado, ritmo de biodegradação das fibras naturais quando incluídas no solo, tal como se tinha previsto através da leitura de casos de aplicação destes materiais realizados anteriormente. Foi possível identificar que o tempo de exposição necessário para que haja uma estabilização em relação à perda de propriedades mecânicas das fibras é de seis semanas para a juta, e de dez semanas para o sisal.

No cenário de condições controladas, apesar de também se verificarem perdas de resistência, alongamento e massa, estas são, regra geral, muito menos evidentes do que aquelas verificadas para condições ambientais. De facto, neste cenário verifica-se uma mais ligeira tendência para a perda destas propriedades, apesar da variabilidade dos resultados inerentes à natureza das próprias fibras. É possível constatar que, nestas condições, em relação à perda de massa dos provetes, esta é muito mais significativa na fibra de sisal, cuja perda de massa ao fim de doze semanas de exposição é de aproximadamente cinco vezes mais do que na juta.

Como forma de congregar os aspetos considerados mais importantes resultantes deste estudo, apresentam-se nas Figura 59 e 60, sumários relativamente ao estudo em condições ambientais e controladas, respetivamente. Nestes é possível acompanhar em função do tempo a variação da precipitação, esta apenas para condições ambientais, teor em água e temperatura do solo ao mesmo tempo que se observa o comportamento da resistência à tração dos provetes de juta e sisal.

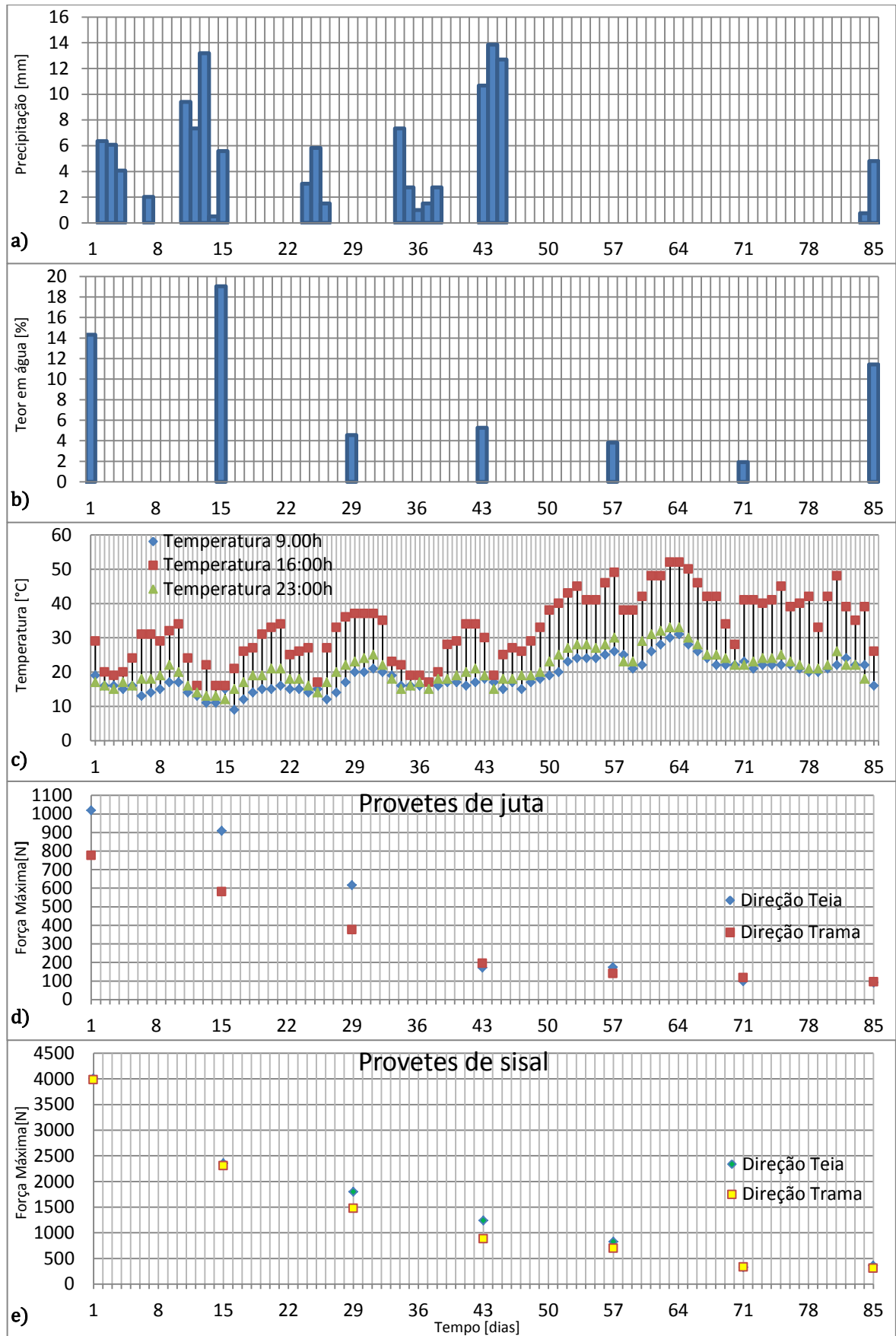


Figura 59 – Sumário relativamente ao estudo em condições ambientais.

Como já foi referido anteriormente, é possível perceber que para o cenário de condições ambientais a primeira metade do período de exposição das fibras constitui-se fundamental para a degradação destas. Tal pode ser comprovado pelo maior decréscimo de resistência à tração tanto da juta como do sisal, presente nos gráficos d) e e) da Figura 59. A isto não é alheio o facto de, ser precisamente até esta altura que se encontram as condições de maior humidade presente no solo em contacto com as fibras. Isto é possível aferir através dos gráficos a) e b) da figura acima referida, sendo que a partir das seis semanas de estudo a temperatura presente no solo aumenta, como evidenciado no gráfico c).

Em relação ao cenário de condições controladas, resumido na Figura 60, a influência da humidade no processo de biodegradação das fibras parece ser menor do que quando comparada com o cenário de condições ambientais, aqui não existe exposição à precipitação, como tal, o teor em água do solo decresce naturalmente ao longo do tempo até estabilizar. Apesar disso é no período em que o solo tem maior teor em água, primeiras quatro semanas, que, por exemplo, se verifica a mais acentuada perda de resistência nos provetes de sisal, presente no gráfico d).

Em relação à temperatura do solo, presente no gráfico b) da Figura 60, esta aumenta ligeiramente, e de forma progressiva, ao longo do tempo mas não se pensa que tenha funcionado como catalisador da degradação das fibras.

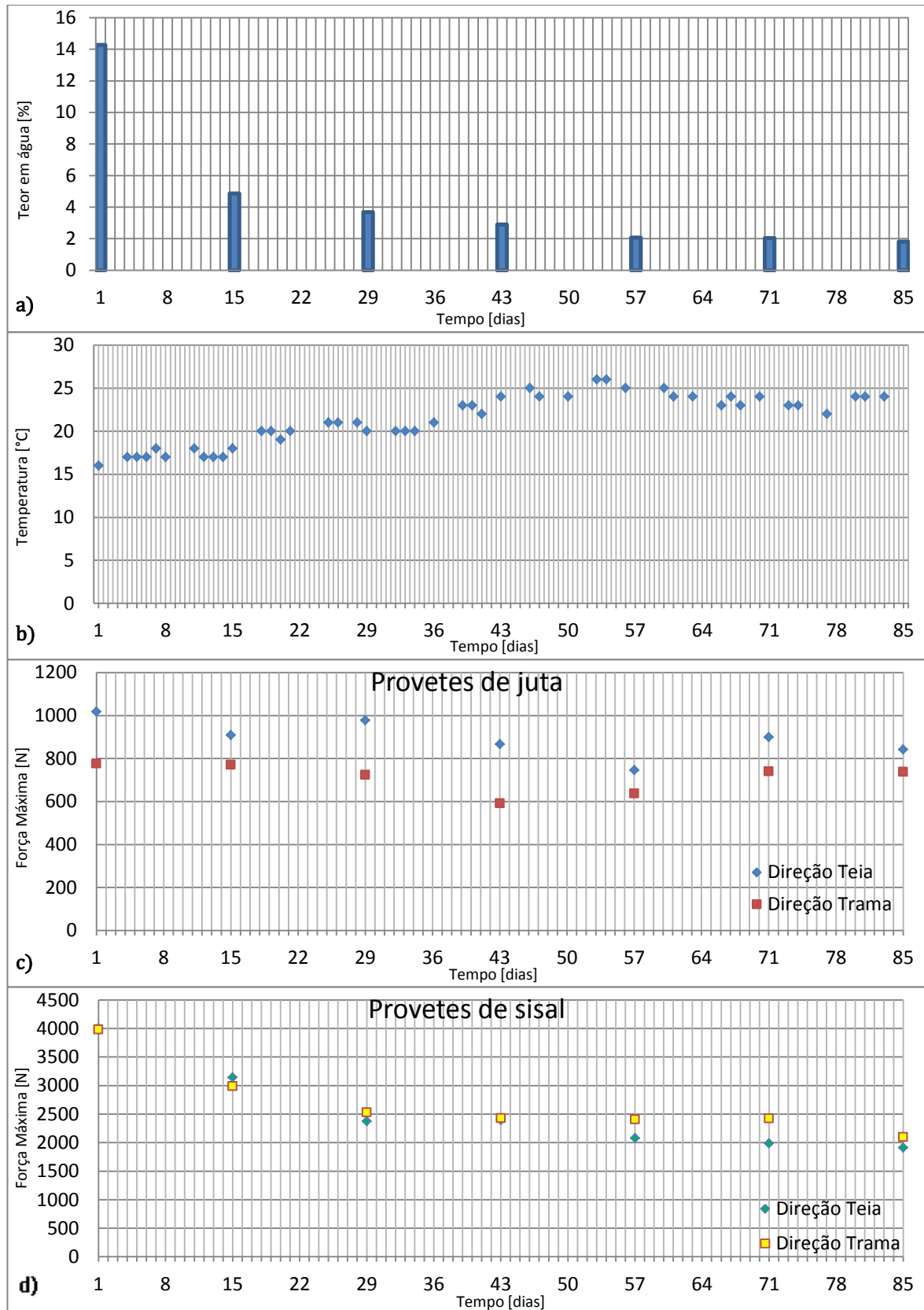


Figura 60 – Sumário relativamente ao estudo em condições controladas.

Em suma, após a análise dos resultados do presente estudo é possível concluir que os agentes ambientais constituem o fator chave da degradação de fibras naturais quando colocadas em contacto com o solo. O processo de biodegradação das fibras é claramente acelerado devido à ação da temperatura, precipitação e até incidência de radiação solar, explicando uma maior degradação das fibras de juta e sisal quando expostas a estes.

5.2. Perspetivas futuras

A temática da utilização de fibras naturais como constituintes de geotêxteis tem vindo a ser desenvolvida e estudada recentemente, no entanto, existem ainda diversas questões que poderão ser ponto de partida para futuros trabalhos a realizar nesta área.

No presente estudo foi estudado o comportamento de estruturas fibrosas de juta e sisal quando colocadas em contacto com o solo, torna-se assim relevante alargar o tipo de fibras estudadas. É sabido da consideração da fibra de coco como geotêxtil, mas a esta podem juntar-se as fibras de abacá, linho, cânhamo ou rami, que por possuírem elevada resistência, elevado módulo de elasticidade, e baixa extensão na rotura se tornam ideais quando a finalidade do geotêxtil é o reforço (Anand, 2008).

O posicionamento das fibras no solo é também algo que precisará de aprofundamento futuro. Neste estudo as fibras de juta e sisal foram colocadas entre duas camadas de 5 cm cada, mas será necessário perceber qual a influência que uma profundidade superior terá no processo de biodegradação das fibras. Com uma maior espessura da camada de solo sobre as fibras teremos um diferente alcance dos raios solares no solo e da humidade, fruto da precipitação; também a temperatura na envolvente das fibras será necessariamente diferente.

Sendo o meio em que se encontram expostos este tipo de materiais importante para o seu comportamento e mecanismo de biodegradação, será necessário perceber a influência nestes que a colocação das fibras em diferentes tipos de solo acarreta, nomeadamente com diferentes valores de acidez e alcalinidade, no que diz respeito ao valor de pH do solo.

Este estudo centrou a sua análise em alguns aspetos que caracterizam as propriedades mecânicas das fibras como a resistência à tração e ductibilidade, no entanto, dependendo do tipo de finalidade do geotêxtil, será importante perceber a degradação de outras propriedades como a resistência química, resistência à perfuração, porosidade, permeabilidade e capacidade de absorção de água de estruturas fibrosas compostas por materiais naturais quando colocadas em contacto com o solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, B.J. (2011). Geotextile: It's applications to civil engineering – overview. National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology.

Akin, D.E. (2010). Chemistry of Plant Fibers. In J. Müssig, ed. Industrial applications of natural fibers. UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Anand, S. (2008). Designer natural fibre geotextiles – A new concept. Indian Journal of Fibre & Textile Research. vol.33, pp.339-344.

Anandjiwala, R.D. & John, M. (2010). Sisal – Cultivation, Processing and Products. In J. Müssig, ed. Industrial applications of natural fibers. UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Araújo, M.D. de; Figueiro, R.; Hong, H. (2000). Têxteis técnicos: materiais do novo milénio, vol.2: Aplicações, tecnologias e métodos de ensaio.

Araújo, Mário de (2011). Natural and man-made fibers: Physical and mechanical properties. In R. Figueiro, ed. Fibrous and composite materials for civil engineering applications. UK: Woodhead Publishing Limited.

Cladonia Resources, informação disponível online em:
www.cladonia.co.uk/psd/portuguese/textiles/text

Cook, J.G. (1984a). Handbook of Textile Fibres – Man-made Fibres. England: Merrow Publishing Co. Ltd.

Cook, J.G. (1984b). Handbook of Textile Fibres – Natural Fibres. England: Merrow Publishing Co. Ltd.

Corbman, B.P. (1985). Textiles: Fiber to Fabric, Sixth Edition. New York: McGraw-Hill International Editions.

D 2487:2000 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes. ASTM.

D 4972:2001 Standard Test Method for pH of Soils. ASTM.

E 197:1966 Solos. Ensaio de compactação. LNEC.

E 239:1970 Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. LNEC.

Eder, M. & Burgert, I. (2010). Natural Fibres – Function in Nature. In J. Müssig, ed. Industrial applications of natural fibers. UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Fernandes, Manuel de Matos (2006). Mecânica dos solos, vol.I: Conceitos e Princípios Fundamentais. Porto: FEUP Edições.

Gaw, B. & Zamora, S. (2010). Soil Reinforcement with Natural Fibers for Low-Income Housing Communities. Major Qualifying Project for the Degree of Bachelor of Science. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts, United States of America.

Gomes, L.M.F. (2001). Geotêxteis e suas aplicações. Seminário: A Indústria Têxtil nos Caminhos da Inovação. Universidade da Beira Interior, pp.10-20.

Guillén, Joaquín Gacén (1991). Fibras textiles: propiedades y descripción: curso básico. Terrassa: Universitat Politècnica de Catalunya.

Hejazia, S.M.; Sheikhzadeha, M.; Abtahib, S.M.; Zadhousha, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and Building Materials. vol.30, pp.100-116.

Horrocks, A.R. & Anand, S.C. (2000). Handbook of Technical Textiles. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.

Ingold, T.S. (1994). Geotextiles and Geomembranes, First Edition. Oxford, UK: Elsevier Advanced Technology.

Joseph, K.; Tôledo Filho, R.D.; James, B.; Thomas, S.; Hecker de Carvalho, L. (1999). A review on sisal fiber reinforced polymer composites. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. vol.3, n.º.3, pp.367-379.

Joy, S.; Balan, K.; Jayasree, P.K. (2011). Biodegradation of coir geotextile in tropical climatic conditions. Proceedings of Indian Geotechnical Conference. paper n.º.J-341, pp.604-606.

Kuasne, A. (2008). Curso textile em malharia e confecção: 2º Módulo. Fibras têxteis. Araranguá.

Lekha, K.R. (2004). Field instrumentation and monitoring of soil erosion in coir geotextile stabilised slopes – a case study. *Geotextiles and Geomembranes*. vol.22, n°.5, pp.399-413.

Marinelli, A.L.; Monteiro, M.C.; Ambrósio, J.D.; Branciforti, M.C.; Kobayashi, M.; Nobre, A.D. (2008). Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. vol.18, n°.2, pp.92-99, São Carlos, Brasil.

Methacanon, P.; Weerawatsophon, U.; Sumransin, N.; Prahsarn, C.; Bergado, D.T. (2010). Properties and potencial applications of the selected natural fibers as limited life geotextiles. *Carbohydrate Polymers*. pp.1090-1096.

Morton, W.E. & Hearle, J.W.S. (1997). *Physical properties of textile fibers*. Manchester: The Textile Institute.

Mukkulath, G. & Thampi, S.G. (2012). Biodegradation of coir geotextiles attached media in aerobic biological wastewater treatment. *J. Bioremed Biodeg*. vol.3, n°.11.

Mukhopadhyay, S.; Figueiro, R.; Arpac, Y; Sentürk, Ü. (2008). Banana Fibers – Variability and Fracture Behaviour. *Journal of Engineering Fibers and Fabrics*. vol.3, n°.2, pp.39-45.

Müssig, J.; Fischer, H.; Graupner, N.; Drieling, A. (2010). Testing Methods for Measuring Physical and Mechanical Fibre Properties (Plant and Animal Fibres). In J. Müssig, ed. *Industrial applications of natural fibers*. UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Mwasha, A. & Petersen, A. (2010). Thinking outside the box: the time dependent behavior of a reinforced embankment on soft soil. *Materials & Design*. vol.31, n°.5, pp.2360-2367.

Mwasha, A. (2008). Potencial for the Use of Environmentally Friendly Geotextiles for Ground Strengthening. 6th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology.

NP 84:1965 Solos. Determinação do teor em água. LNEC.

NP 143:1969 Solos. Determinação dos limites de consistência. LNEC.

NP 4105:1990 Têxteis. Determinação da massa linear de um fio retirado de um tecido. IPQ.

NP EN 1049-2:1995 Têxteis. Determinação do número de fios por unidade de comprimento. IPQ.

NP EN 12127:1999 Têxteis. Determinação da massa por unidade de superfície em amostras de pequenas dimensões. IPQ.

NP EN 12226:2005 Geotêxteis e produtos relacionados. Ensaio gerais para avaliação após ensaios de durabilidade. IPQ.

NP EN ISO 5084:1999 Têxteis. Determinação da espessura de têxteis e produtos têxteis. IPQ.

NP EN ISSO 13437:2007 Geotêxteis e produtos relacionados. Método para instalação e extração de amostras no solo e preparação de provetes para ensaios em laboratório. IPQ.

NP EN ISO 13934-1:2001 Propriedades de tração dos tecidos. Parte 1: Determinação da força máxima e do alongamento à força máxima pelo método da tira. IPQ.

Prahabar, J. & Sridhar, R.S. (2002). Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behavior of soil. *Construction and Building Materials*. vol.16, n°.2, pp.123-131.

Rahman, Md. Siddiqui (2010). Jute – A Versatile Nature Fibre. Cultivation, Extraction and Processing. In J. Müssig, ed. *Industrial applications of natural fibers*. UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Rawal, A.; Shah, T.; Anand, S. (2010). Geotextiles: production, properties and performance. *Textile Progress*. vol.42, n°.3, pp.181-226.

Rowe, K. (2012). *An Official Journal of the International Geosynthetics Society*. Geotextiles and Geomembranes. 29(4), pp.1-2.

Sarsby, R.W. (2007a). Limited-life Geosynthetics. In R.W. Sarsby, ed. *Geosynthetics in civil engineering*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.

Sarsby, R.W. (2007b). Use of ‘Limited Life Geotextiles’ (LLGs) for basal reinforcement of embankments built on soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*. 25, pp.302-310.

Satyanarayana, K.G.; Guimarães, J.L.; Wypych, F. (2007). Studies on Lignocellulosic fibers of Brazil – Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites: Part A*.38, pp.1694-1709.

Savastano JR, H.; Dos Santos, S.F.; Agopyan, V. (2009). Sustainability of vegetable fibres in construction. In J.M. Khatib, ed. Sustainability of construction materials. Oxford, UK: Woodhead Publishing Limited.

Suraya, N.L. & Khalil, H.P.S. Abdul (2011). Anhydride modification of cultivated kenaf bast fibers: morphological, spectroscopic, and thermal studies. *BioResources*. vol.6, nº.2, pp. 1122-1135.

Taylor, Marjorie A. (1999). *Technology of textile properties: an introduction*, third edition. London: Forbes Publications.

Vishnudas, S.; Savenije, H.H.G.; Van der Zaag, P.; Anil, K.R. (2012). Coir geotextile for slope stabilization and cultivation – a case study in a highland region of Kerala, South India. *Physics and Chemistry of the Earth*. vol.47-48, pp.135-138.

ANEXOS

Anexo 1: Valores de controlo dos provetes de juta e sisal

Provete	Fibra Juta					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	970	13,28	0,0978	707	5,36	0,0945
Nº 2	993	13,5	0,1001	653	6,1	0,0873
Nº 3	1043	13,9	0,1052	793	6,24	0,1060
Nº 4	953	13,4	0,0961	907	5,96	0,1212
Nº 5	1154	13,7	0,1164	850	6,06	0,1136
Nº 6	993	14,3	0,1001	747	6,93	0,0998
Média	1018	13,68	0,1026	776	6,11	0,1037
Desv.P.	73,35	0,3752	0,0074	93,44	0,5053	0,0125

Provete	Fibra Sisal					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	3960	31,12	0,1348	4330	13,1	0,1631
Nº 2	4195	31,92	0,1429	4355	13,1	0,1640
Nº 3	3952	31,9	0,1346	3868	12,9	0,1457
Nº 4	3552	31,2	0,1210	3604	12	0,1357
Nº 5	4065	31	0,1384	3944	12,6	0,1485
Nº 6	4295	31,2	0,1463	3784	11,1	0,1425
Média	4003	31,39	0,1363	3981	12,47	0,1499
Desv.P.	258,39	0,4094	0,0088	302,24	0,7866	0,0114

Anexo 2: Resultados dos provetes de juta (condições ambientais)

Provete	Teste nº.1 (2 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	917	9,6	0,0925	543	5,12	0,0726
Nº 2	937	9,3	0,0945	580	5,28	0,0775
Nº 3	973	8,84	0,0981	677	4,8	0,0905
Nº 4	880	8,85	0,0887	517	5,16	0,0691
Nº 5	837	8,4	0,0844	563	4,88	0,0752
Nº 6	903	10,2	0,0911	600	4,8	0,0802
Média	909	9,20	0,0916	580	5,01	0,0775
Desv.P.	46,90	0,6422	0,0047	55,56	0,2062	0,0074

Provete	Teste nº.2 (4 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	500	9,8	0,0504	343	3,86	0,0458
Nº 2	527	8,9	0,0531	350	4,48	0,0468
Nº 3	680	9,72	0,0686	423	4,65	0,0565
Nº 4	560	9,55	0,0565	280	4,16	0,0374
Nº 5	773	9,84	0,0780	463	5	0,0619
Nº 6	653	9,64	0,0659	393	4,25	0,0525
Média	616	9,575	0,0621	375	4,4	0,0502
Desv.P.	104,52	0,3471	0,0105	64,88	0,4001	0,0087

Provete	Teste nº.3 (6 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	203	6,28	0,0205	217	3,48	0,0290
Nº 2	147	5,58	0,0148	230	3,68	0,0307
Nº 3	167	6,04	0,0168	150	3,44	0,0200
Nº 4	193	6,8	0,0195	180	2,98	0,0241
Nº 5	173	6,1	0,0174	173	3,663	0,0231
Nº 6	143	5,84	0,0144	213	4,18	0,0285
Média	171	6,11	0,0172	194	3,57	0,0259
Desv.P.	24,03	0,4156	0,0024	30,85	0,3914	0,0041

Anexo 2 (continuação)

Teste nº.4 (8 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	170	6,7	0,0171	137	3,6	0,0183
Nº 2	207	6,63	0,0209	213	4,035	0,0285
Nº 3	153	7,13	0,0154	67	3,88	0,0090
Nº 4	137	5,92	0,0138	130	4,68	0,0174
Nº 5	280	9,56	0,0282	147	3,325	0,0196
Nº 6	90	5,25	0,0091	143	4,08	0,0191
Média	173	6,865	0,0174	140	3,93	0,0186
Desv.P.	65,11	1,4776	0,0066	46,53	0,4633	0,0062

Teste nº.5 (10 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	107	5,75	0,0111	117	3,86	0,0156
Nº 2	57	4,14	0,0059	120	4,1	0,0160
Nº 3	103	4,96	0,0107	117	3,42	0,0156
Nº 4	113	5,96	0,0117	90	3,35	0,0120
Nº 5	113	5,23	0,0117	147	3,84	0,0196
Nº 6	90	5,94	0,0093	113	3,35	0,0151
Média	97	5,33	0,0101	117	3,65	0,0157
Desv.P.	21,43	0,7083	0,0022	18,18	0,3211	0,0024

Teste nº.6 (12 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	83	5,15	0,0086	97	3,975	0,0130
Nº 2	70	5,6	0,0073	100	3,4	0,0134
Nº 3	87	5,8	0,0090	130	3,925	0,0174
Nº 4	107	6,28	0,0111	57	3,86	0,0076
Nº 5	93	5,64	0,0096	100	3,87	0,0134
Nº 6	107	6,45	0,0111	83	4,12	0,0111
Média	91	5,82	0,0095	95	3,86	0,0126
Desv.P.	14,40	0,4772	0,0015	23,94	0,2436	0,0032

Anexo 3: Resultados dos provetes de juta (condições controladas)

Provete	Teste nº.1 (2 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	853	10,08	0,0860	853	5,52	0,1140
Nº 2	893	10,5	0,0901	833	5,84	0,1113
Nº 3	1030	9,95	0,1039	807	5,78	0,1079
Nº 4	773	11,3	0,0780	777	5,56	0,1038
Nº 5	873	10,2	0,0880	657	6,52	0,0878
Nº 6	1030	10,88	0,1039	693	5,52	0,0926
Média	909	10,49	0,0916	770	5,79	0,1029
Desv.P.	102,44	0,5200	0,0103	78,71	0,3832	0,0105

Provete	Teste nº.2 (4 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	1034	8,95	0,1043	597	5,6	0,0798
Nº 2	940	8,88	0,0948	623	5,64	0,0833
Nº 3	927	8,8	0,0935	747	5,88	0,0998
Nº 4	937	9,16	0,0945	793	5,68	0,1060
Nº 5	903	9,2	0,0911	803	5,75	0,1073
Nº 6	1114	9,7	0,1123	773	5,76	0,1033
Média	976	9,115	0,0984	723	5,72	0,0966
Desv.P.	81,18	0,3265	0,0082	89,72	0,1005	0,0120

Provete	Teste nº.3 (6 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	840	10,1	0,0847	680	5,78	0,0909
Nº 2	810	10,1	0,0817	637	5,32	0,0851
Nº 3	910	10,4	0,0918	563	5,9	0,0752
Nº 4	807	8,88	0,0814	677	5,44	0,0905
Nº 5	930	10,6	0,0938	470	6,46	0,0628
Nº 6	900	9,4	0,0908	517	6,24	0,0691
Média	866	9,91	0,0874	591	5,86	0,0789
Desv.P.	53,82	0,6495	0,0054	87,56	0,4428	0,0117

Anexo 3 (continuação)

Teste nº.4 (8 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	747	9,75	0,0753	650	5,2	0,0869
Nº 2	703	9,88	0,0709	633	5,7	0,0846
Nº 3	790	10,9	0,0797	823	5,18	0,1100
Nº 4	823	10,48	0,0830	687	5,3	0,0918
Nº 5	1010	10,2	0,1019	757	5,53	0,1012
Nº 6	400	9,44	0,0403	273	5,36	0,0365
Média	746	10,11	0,0752	637	5,38	0,0852
Desv.P.	199,56	0,5292	0,0201	191,93	0,2020	0,0257

Teste nº.5 (10 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	840	12	0,0847	803	6,16	0,1073
Nº 2	880	11,4	0,0887	673	5,96	0,0899
Nº 3	860	10,08	0,0867	783	5,8	0,1046
Nº 4	923	10,6	0,0931	697	5,72	0,0932
Nº 5	853	11,2	0,0860	757	5,32	0,1012
Nº 6	1040	12,08	0,1049	727	5,2	0,0972
Média	899	11,23	0,0907	740	5,69	0,0989
Desv.P.	74,75	0,7829	0,0075	50,23	0,3698	0,0067

Teste nº.6 (12 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	813	9,75	0,0820	683	5,76	0,0913
Nº 2	787	9,51	0,0794	743	6,04	0,0993
Nº 3	873	10,8	0,0880	770	5,84	0,1029
Nº 4	817	9,7	0,0824	660	4,815	0,0882
Nº 5	873	10,8	0,0880	830	5,73	0,1109
Nº 6	887	10,2	0,0895	740	5,76	0,0989
Média	842	10,13	0,0849	738	5,66	0,0986
Desv.P.	41,08	0,5686	0,0041	61,03	0,4279	0,0082

Anexo 4: Resultados dos provetes de sisal (condições ambientais)

Provete	Teste nº.1 (2 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	2433	29,4	0,0828	2448	8,72	0,0922
Nº 2	2250	26,1	0,0766	2430	8,55	0,0915
Nº 3	2700	26,88	0,0919	2080	7,63	0,0783
Nº 4	2430	24,08	0,0827	2160	8,25	0,0814
Nº 5	2524	27,8	0,0859	2450	8,68	0,0923
Nº 6	1776	23,9	0,0605	2248	8,33	0,0847
Média	2352	26,36	0,0801	2303	8,36	0,0867
Desv.P.	317,97	2,1402	0,0108	162,46	0,4035	0,0061

Provete	Teste nº.2 (4 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	1317	27,4	0,0448	1894	8,45	0,0713
Nº 2	1301	20,72	0,0443	1030	6,35	0,0388
Nº 3	2536	32,4	0,0864	1034	6,36	0,0389
Nº 4	1374	23,78	0,0468	1550	7,52	0,0584
Nº 5	2133	29,3	0,0726	1566	7,72	0,0590
Nº 6	2118	29,6	0,0721	1756	8,32	0,0661
Média	1797	27,2	0,0612	1472	7,45	0,0554
Desv.P.	532,43	4,2647	0,0181	363,56	0,9201	0,0137

Provete	Teste nº.3 (6 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	1684	25,12	0,0573	860	5,78	0,0324
Nº 2	707	19,1	0,0241	610	6,32	0,0230
Nº 3	1614	23,1	0,0550	880	5,71	0,0331
Nº 4	1326	22,72	0,0452	733	6,15	0,0276
Nº 5	687	17,4	0,0234	913	5,57	0,0344
Nº 6	1407	24,28	0,0479	1290	6,28	0,0486
Média	1238	21,95	0,0421	881	5,97	0,0332
Desv.P.	438,67	3,0403	0,0149	229,82	0,3208	0,0087

Anexo 4 (continuação)

Teste nº.4 (8 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	843	20,32	0,0287	1040	6,72	0,0392
Nº 2	1066	23,72	0,0363	160	3,25	0,0060
Nº 3	1000	20,6	0,0341	590	5,42	0,0222
Nº 4	440	16,9	0,0150	1014	6,63	0,0382
Nº 5	433	17,8	0,0147	1030	7,01	0,0388
Nº 6	1154	22,4	0,0393	327	5,43	0,0123
Média	823	20,29	0,0280	694	5,74	0,0261
Desv.P.	315,95	2,6079	0,0108	391,32	1,3974	0,0147

Teste nº.5 (10 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	433	18,3	0,0147	257	4,68	0,0097
Nº 2	347	17,2	0,0118	277	4,725	0,0104
Nº 3	410	17,4	0,0140	347	4,325	0,0131
Nº 4	173	14,2	0,0059	367	4,775	0,0138
Nº 5	173	14	0,0059	270	4,485	0,0102
Nº 6	413	17,2	0,0141	457	5,45	0,0172
Média	325	16,38	0,0111	329	4,74	0,0124
Desv.P.	121,10	1,8159	0,0041	76,84	0,3864	0,0029

Teste nº.6 (12 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	180	15	0,0061	380	4,925	0,0143
Nº 2	113	12,6	0,0038	257	4,38	0,0097
Nº 3	393	17,4	0,0134	163	3,64	0,0061
Nº 4	520	17,8	0,0177	420	5,13	0,0158
Nº 5	507	18,7	0,0173	317	5,79	0,0119
Nº 6	430	17,7	0,0146	313	4,83	0,0118
Média	357	16,53	0,0122	308	4,78	0,0116
Desv.P.	171,21	2,2906	0,0058	91,06	0,7247	0,0034

Anexo 5: Resultados dos provetes de sisal (condições controladas)

Provete	Teste nº.1 (2 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	3576	30,72	0,1218	3436	10,08	0,1294
Nº 2	3088	31	0,1052	2812	10,08	0,1059
Nº 3	3048	28,2	0,1038	2876	9,95	0,1083
Nº 4	3272	29,28	0,1114	2912	9,8	0,1097
Nº 5	2936	28,32	0,1000	3088	10,2	0,1163
Nº 6	2924	29,2	0,0996	2792	10,7	0,1052
Média	3141	29,45	0,1069	2986	10,14	0,1125
Desv.P.	247,77	1,1787	0,0084	244,29	0,3085	0,0092

Provete	Teste nº.2 (4 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	2884	26	0,0982	2816	8,22	0,1061
Nº 2	2380	25,72	0,0810	2313	7,95	0,0871
Nº 3	2048	26	0,0697	2612	8,98	0,0984
Nº 4	2712	26,88	0,0924	2358	8,8	0,0888
Nº 5	2200	27,12	0,0749	2748	8,74	0,1035
Nº 6	2013	23,8	0,0685	2340	8,19	0,0881
Média	2373	25,92	0,0808	2531	8,48	0,0953
Desv.P.	358,12	1,1755	0,0122	223,07	0,4129	0,0084

Provete	Teste nº.3 (6 semanas)					
	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	2150	25,8	0,0732	2063	8,13	0,0777
Nº 2	2512	29,6	0,0855	2193	9,04	0,0826
Nº 3	2488	26,4	0,0847	2270	9,15	0,0855
Nº 4	2010	23,6	0,0684	2400	9,21	0,0904
Nº 5	2692	28,7	0,0917	2928	9,46	0,1103
Nº 6	2520	27,6	0,0858	2700	9,11	0,1017
Média	2395	26,95	0,0816	2426	9,02	0,0914
Desv.P.	258,62	2,1612	0,0088	328,07	0,4576	0,0124

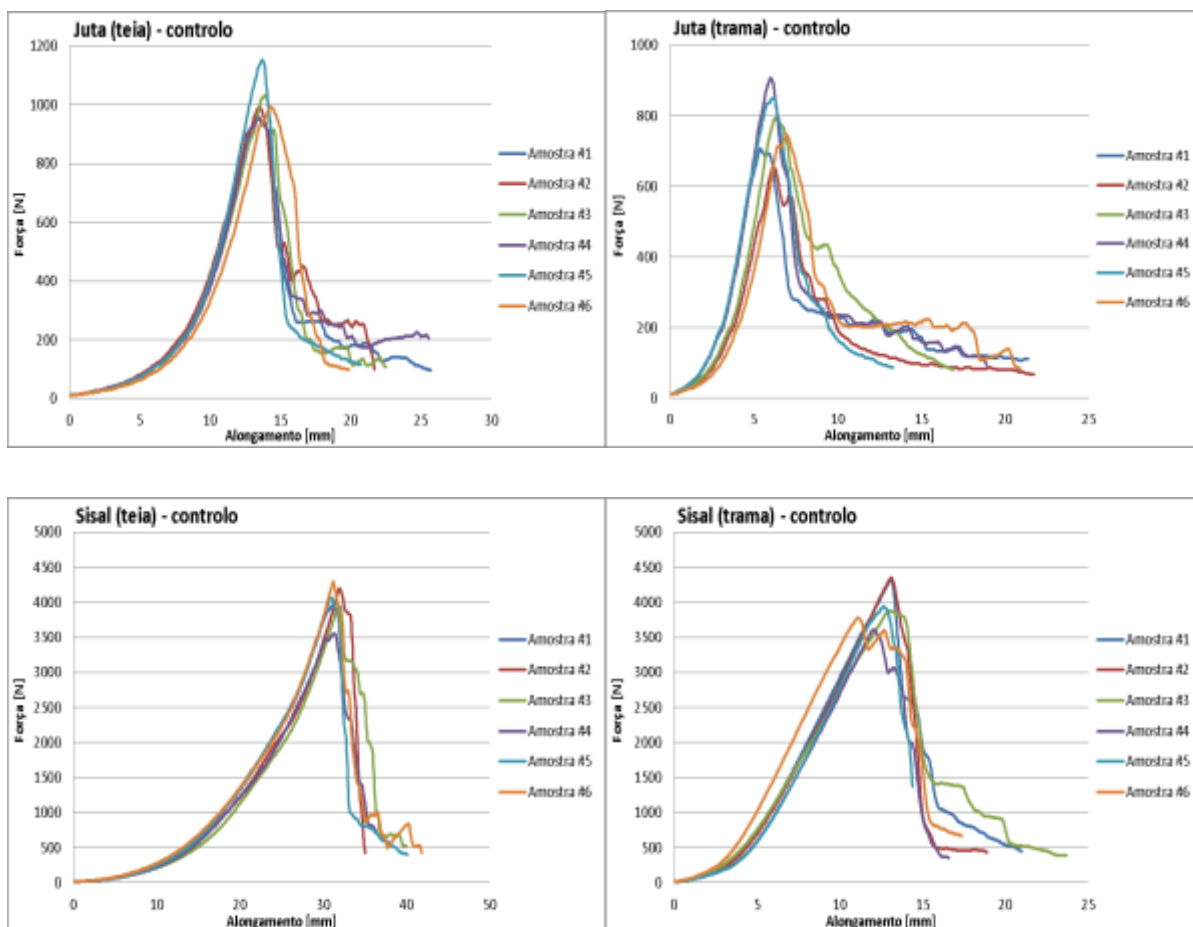
Anexo 5 (continuação)

Teste nº.4 (8 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	1876	24,72	0,0639	1836	7,65	0,0692
Nº 2	1726	26,1	0,0588	2596	10,32	0,0978
Nº 3	2490	28,5	0,0848	2704	8,64	0,1018
Nº 4	1764	24,1	0,0601	2836	8,3	0,1068
Nº 5	1820	25,2	0,0620	2463	9,48	0,0928
Nº 6	2792	30,36	0,0951	1990	8,12	0,0750
Média	2078	26,50	0,0708	2404	8,75	0,0905
Desv.P.	449,31	2,4363	0,0153	402,74	0,9818	0,0152

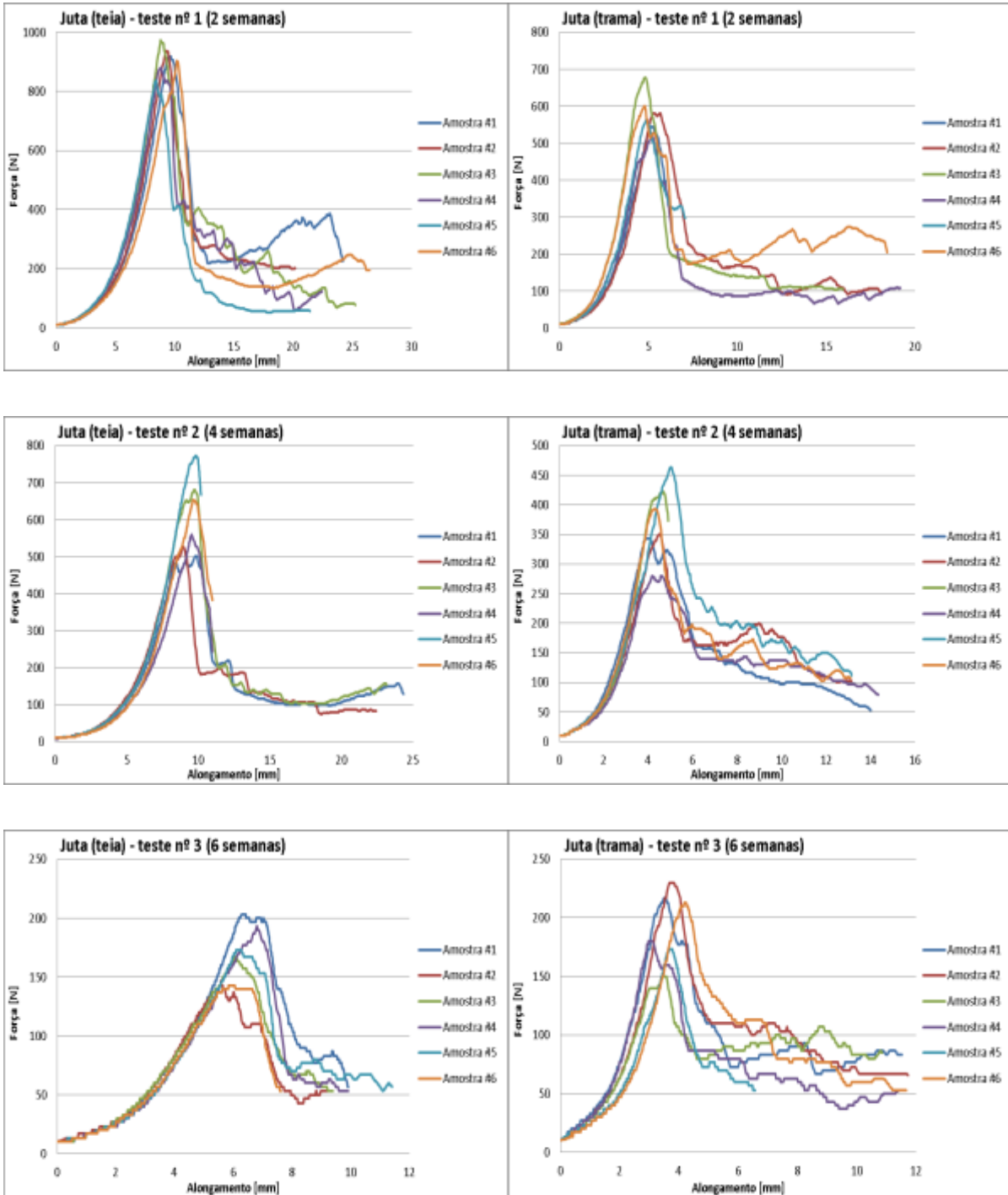
Teste nº.5 (10 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	2228	28,13	0,0759	2290	9,6	0,0862
Nº 2	1684	27,7	0,0573	2473	9,36	0,0931
Nº 3	2268	27,8	0,0772	2400	8,65	0,0904
Nº 4	2163	26,7	0,0737	2596	9,56	0,0978
Nº 5	2293	28,3	0,0781	2168	9,84	0,0817
Nº 6	1293	25,12	0,0440	2616	10,13	0,0985
Média	1988	27,29	0,0677	2424	9,52	0,0913
Desv.P.	408,68	1,2009	0,0139	174,88	0,5030	0,0066

Teste nº.6 (12 semanas)						
Provete	Sentido Teia			Sentido Trama		
	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)	Força (N)	Alongamento (%)	Tenacidade (N/tex)
Nº 1	417	19,8	0,0142	1614	7,78	0,0608
Nº 2	2020	30,6	0,0688	2363	9,47	0,0890
Nº 3	2528	27,88	0,0861	2130	8,94	0,0802
Nº 4	2213	28,4	0,0754	1970	8,99	0,0742
Nº 5	1676	25,7	0,0571	2420	9,99	0,0911
Nº 6	2608	32,8	0,0888	2073	8,87	0,0781
Média	1910	27,53	0,0651	2095	9,01	0,0789
Desv.P.	807,07	4,4984	0,0275	291,94	0,7362	0,0110

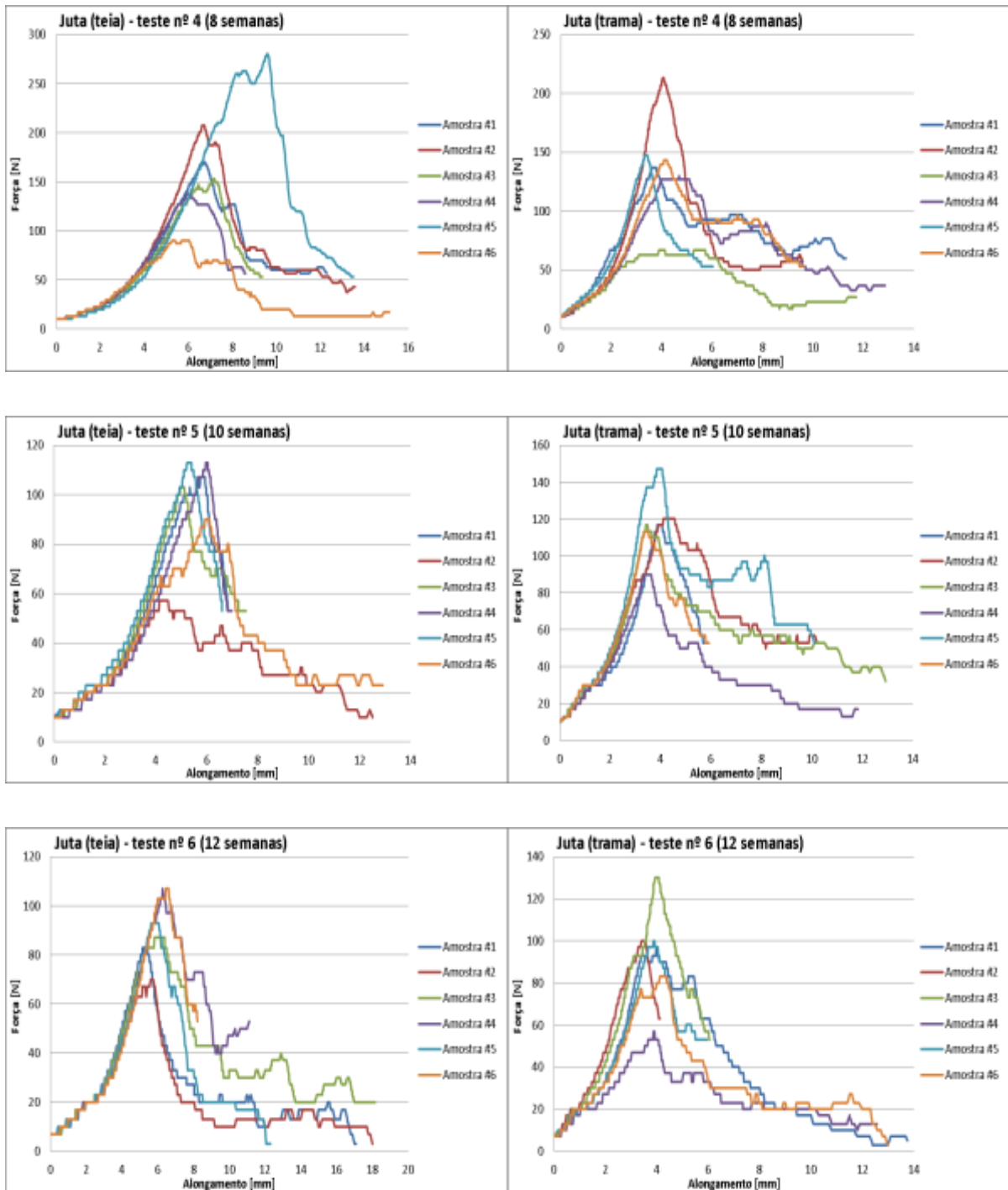
Anexo 6: Curvas força - alongamento para os provetes de controlo



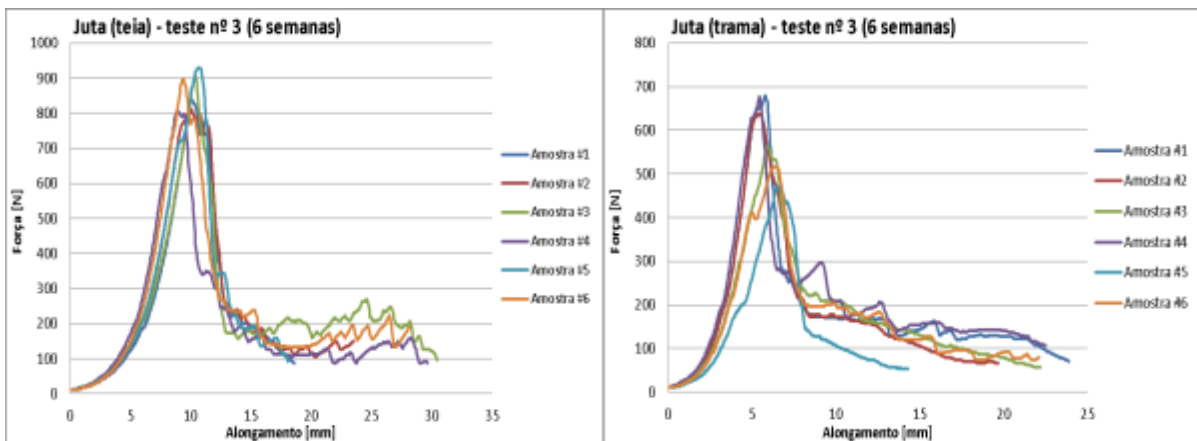
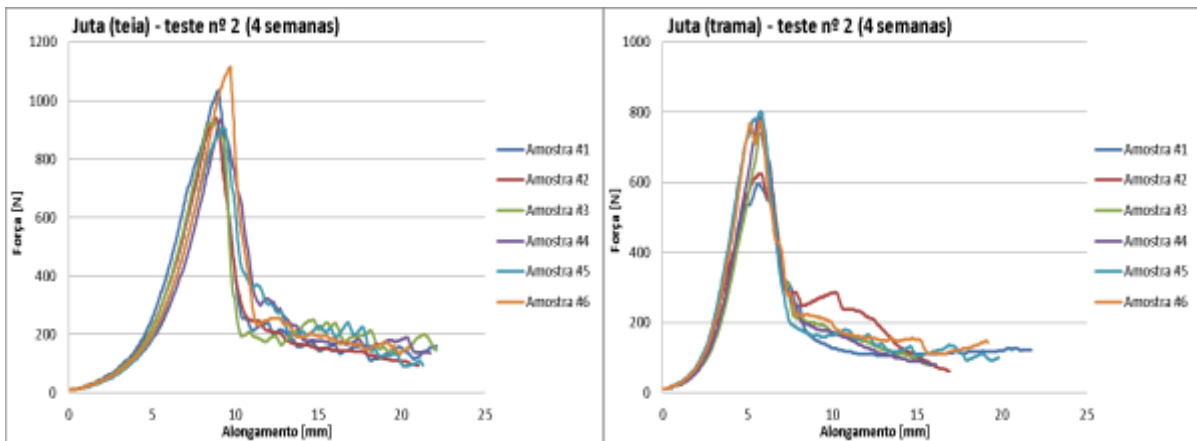
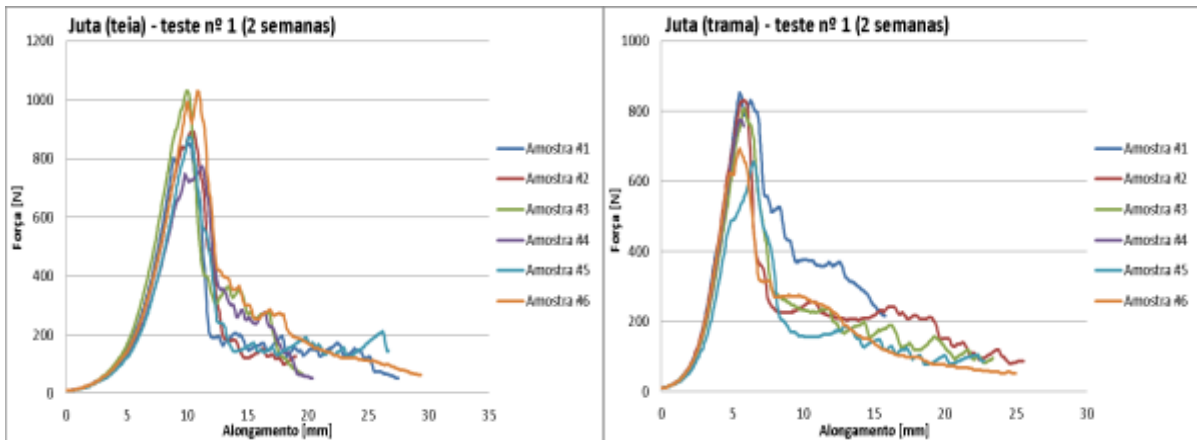
Anexo 7: Curvas força - alongamento dos provetes de juta (condições ambientais)



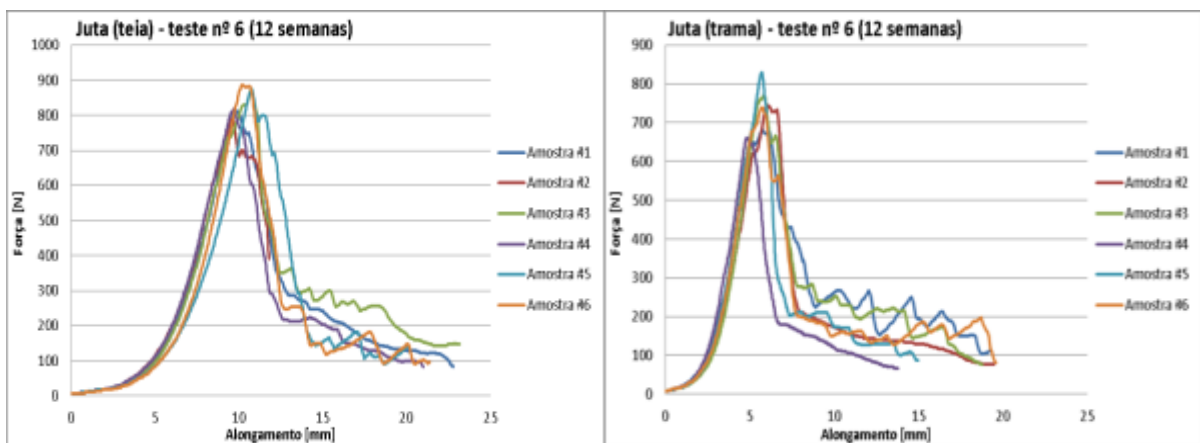
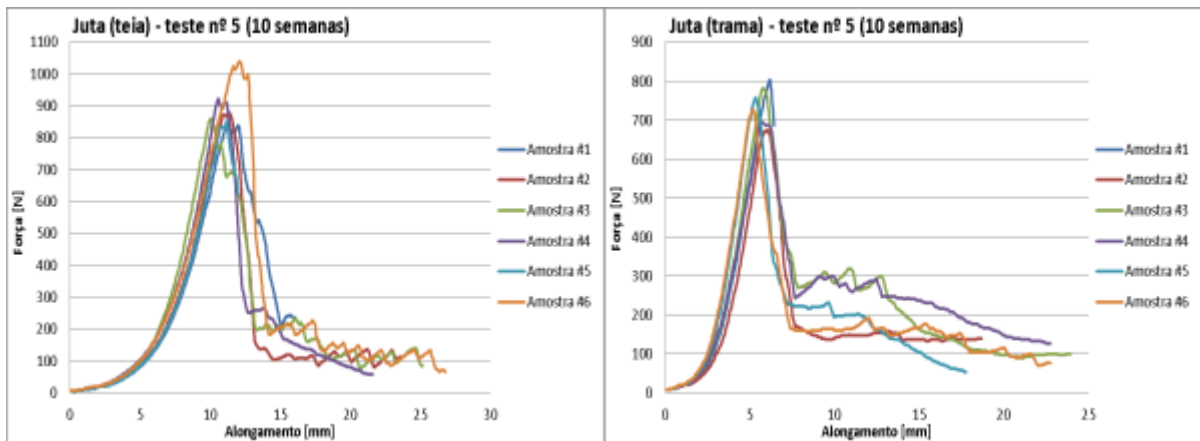
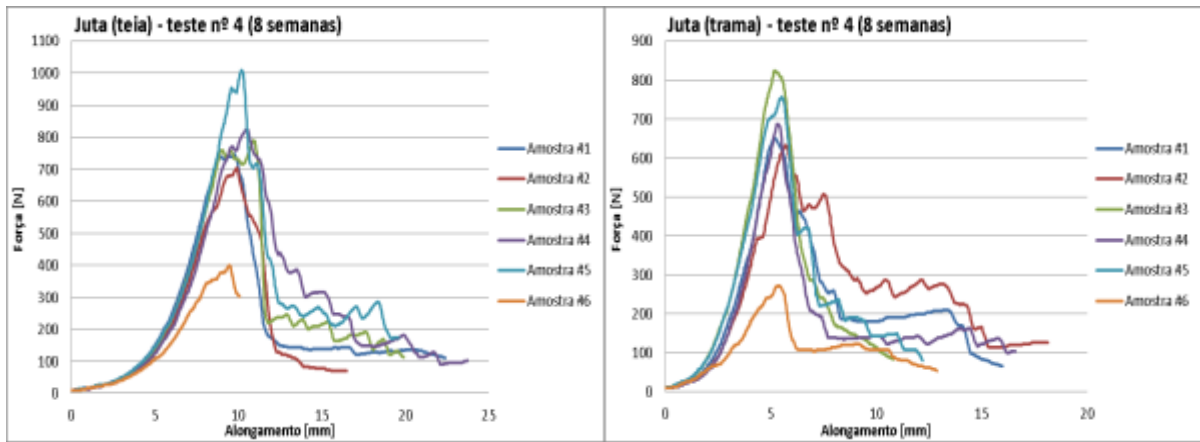
Anexo 7 (continuação)



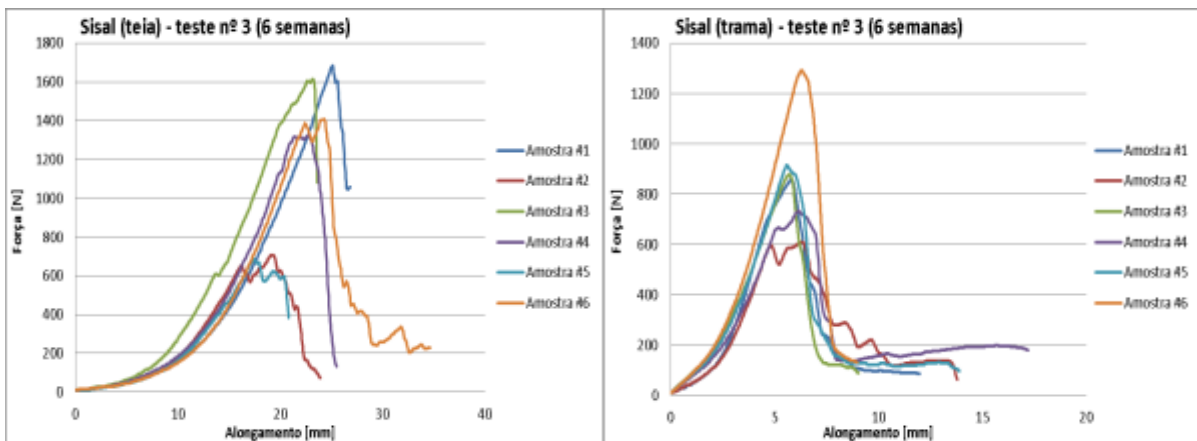
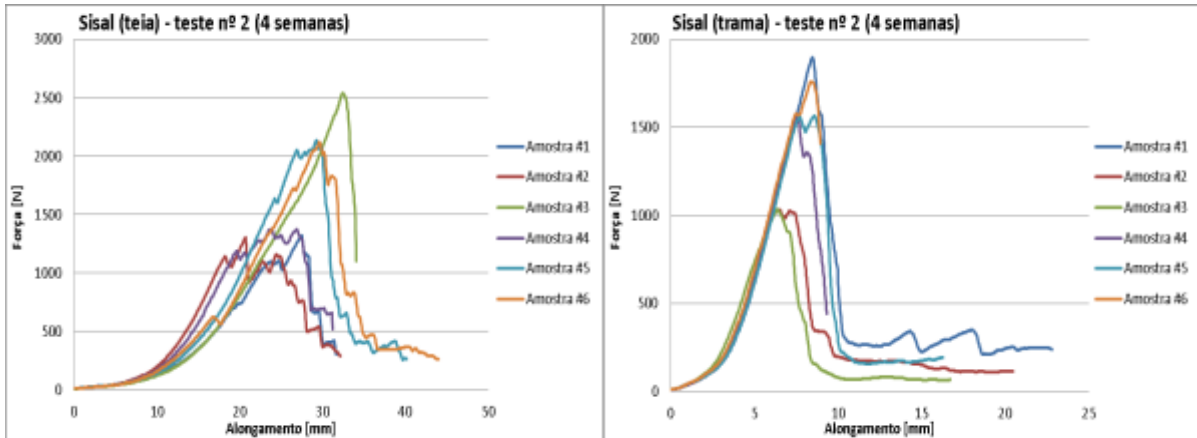
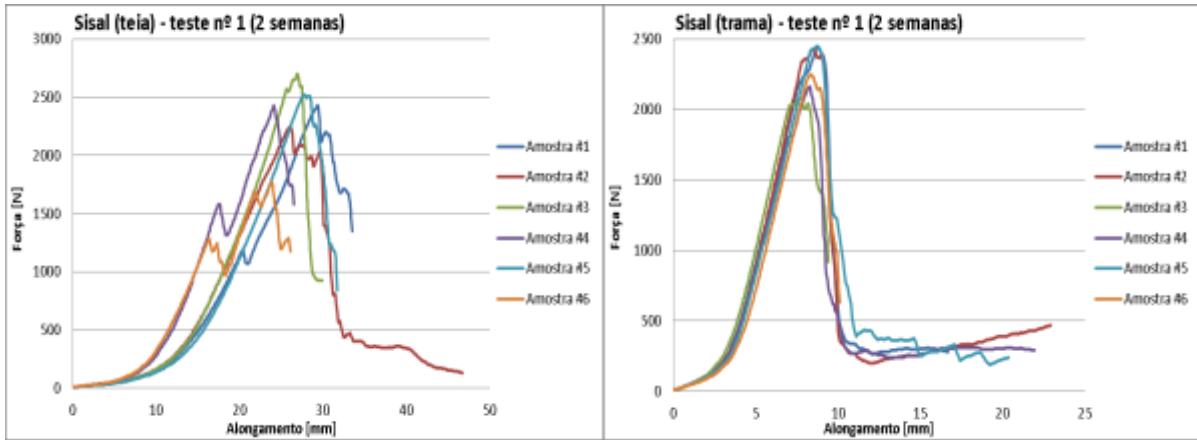
Anexo 8: Curvas força - alongamento dos provetes de juta (condições controladas)



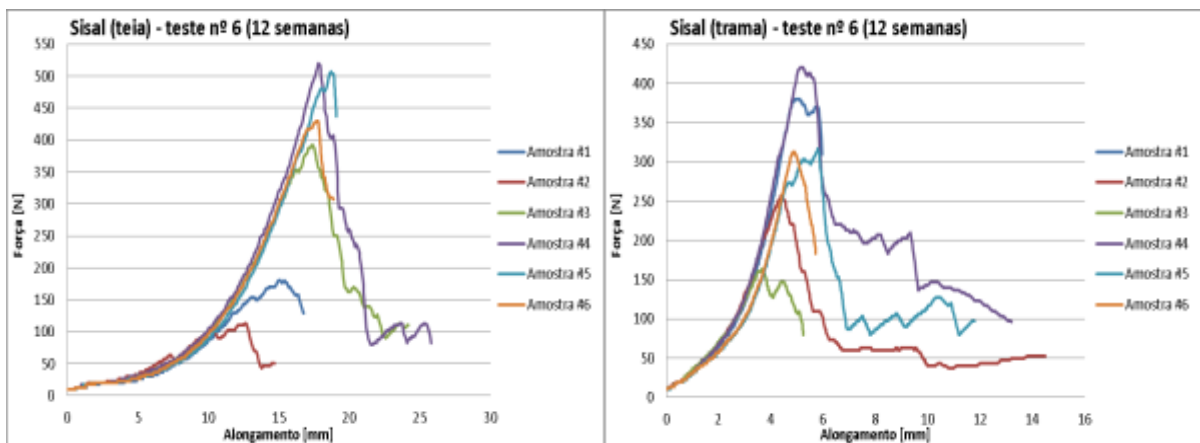
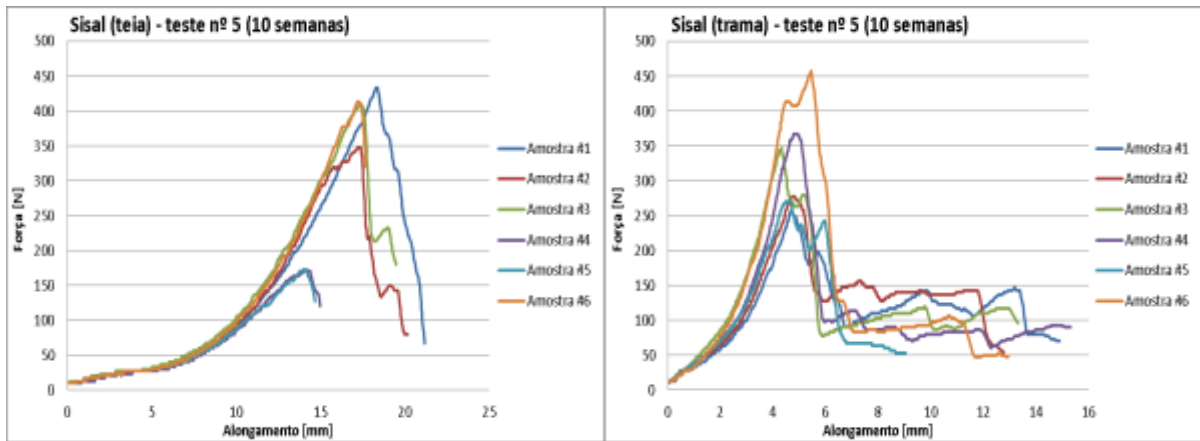
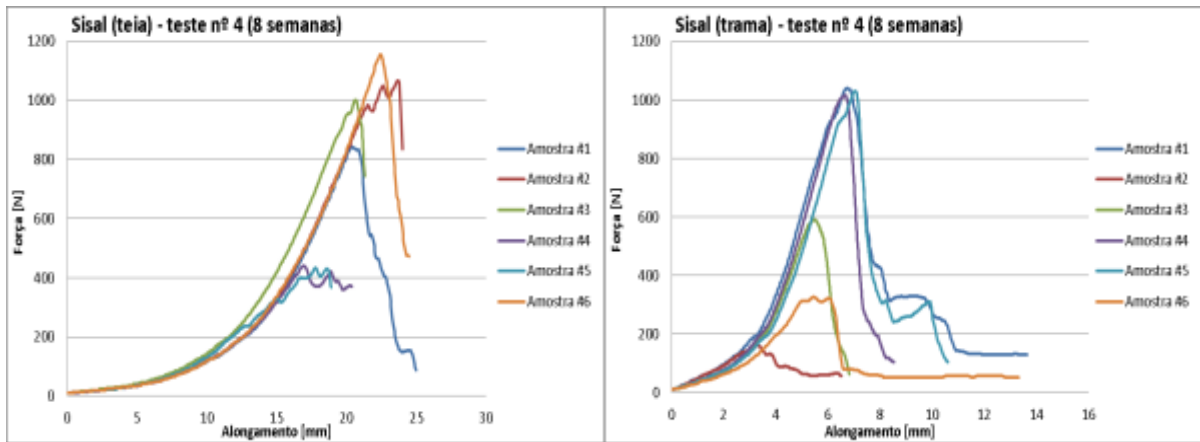
Anexo 8 (continuação)



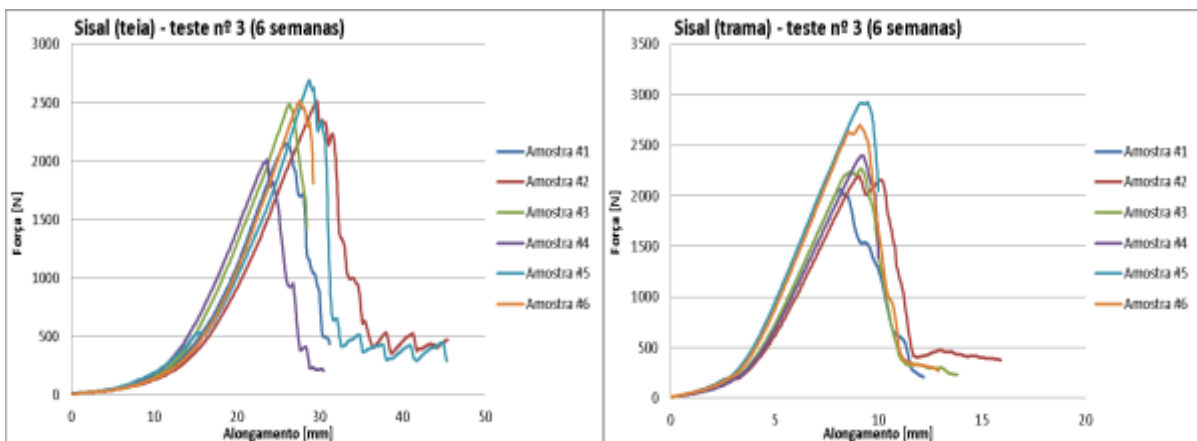
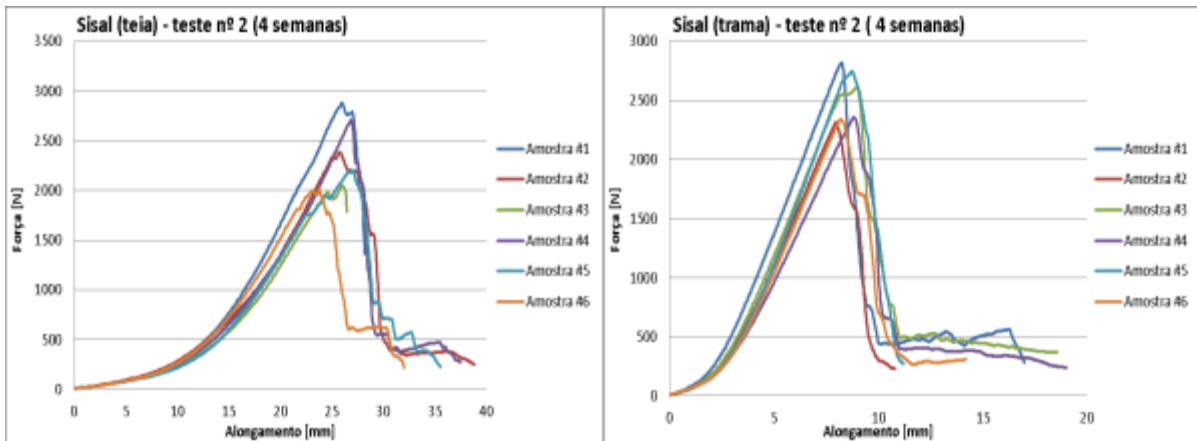
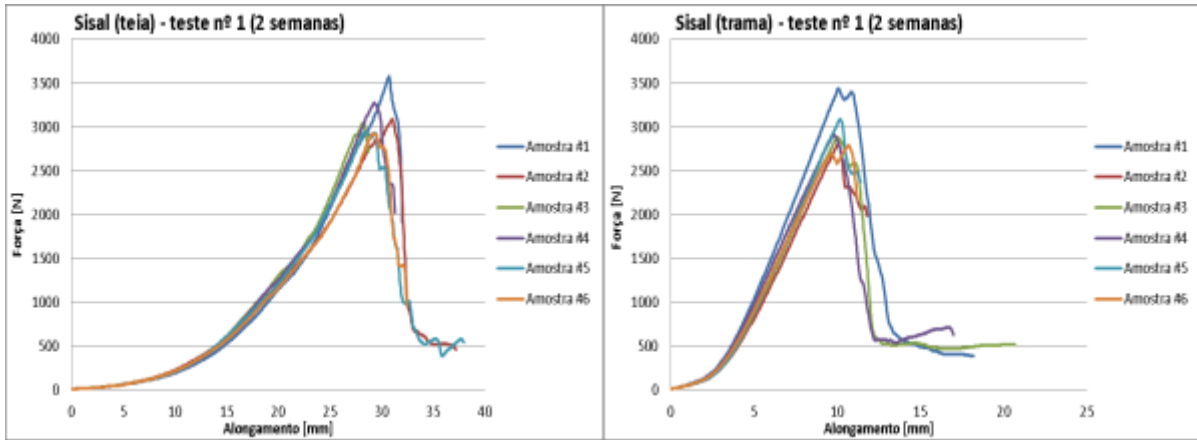
Anexo 9: Curvas força - alongamento dos provetes de sisal (condições ambientais)



Anexo 9 (continuação)



Anexo 10: Curvas força - alongamento dos provetes de sisal (condições controladas)



Anexo 10 (continuação)

