



Rui de Abreu Botinas

# ESTUDO DO SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

STUDY OF THE SOIL AS A SUSTAINABLE BUILDING MATERIAL

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,  
orientada pelo Professora Doutora Maria Isabel Moita Pinto e pelo Professor Doutor Adelino Vasconcelos Lopes

Coimbra, 30 de Junho de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Rui de Abreu Botinas

# **Estudo do Solo como Material de Construção Sustentável**

## **Study of the Soil as a Sustainable Building Material**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,  
orientada pelo Professora Doutora Maria Isabel Moita Pinto e pelo Professor Doutor Adelino Vasconcelos Lopes

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

Coimbra, 30 de Junho de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostava de agradecer à minha família, em particular aos meus pais, pelo esforço e sacrifícios que fizeram, pela paciência e o apoio incondicional durante todo este percurso académico.

Quero agradecer aos meus orientadores, Professora Doutora Maria Isabel Moita Pinto e Professor Doutor Adelino Vasconcelos Lopes, pela boa orientação, pelo conhecimento transmitido, pela disponibilidade, acompanhamento e apoio que me forneceram para o desenvolvimento deste trabalho.

Um especial agradecimento ao Sr. José António, técnico do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pela enorme ajuda, disponibilidade, boa disposição e paciência no decorrer do processo laboratorial.

Aos meus amigos e colegas, que me foram apoiando durante este percurso, em especial à Sofia, Carolina, Ana e Marta, pelo apoio incondicional, disponibilidade, boa disposição, companheirismo, confiança e por terem sido fundamentais para o meu crescimento ao longo destes anos enquanto pessoa, quer seja a nível académico quer pessoal.

Por último, tenho de agradecer ao Laboratório de Geotecnia pela disponibilização das condições necessárias ao desenvolvimento da componente laboratorial, e ao Laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural pela disponibilização da prensa para os ensaios que foram realizados.

## RESUMO

A construção em terra é uma técnica milenar, utilizada por várias civilizações por todo o mundo, estimando-se que uma parte considerável da população mundial viva em casas que usam a terra como material de construção. O desenvolvimento das tecnologias construtivas aliada a um forte crescimento da população ao longo dos últimos anos, contribuiu para um abrandamento e até esquecimento das técnicas tradicionais em terra. Deste modo, pretende-se com este trabalho, e no seguimento das preocupações ambientais que têm surgido nos últimos tempos, aproveitar um recurso disponível, e adicionar-lhe um material de baixo custo ambiental que permitisse adequar as suas características, de forma a poder ser aplicado numa eco-construção.

Deste modo, o objectivo do presente trabalho consiste em caracterizar e avaliar o modo como a introdução de um material, nomeadamente as fibras de cabelo, melhoram as propriedades mecânicas intrínsecas de um solo, em termos da sua resistência ao corte, à compressão e módulo de elasticidade, com vista à sua utilização como material de construção em aplicações estruturais na edificação considerada sustentável. Foi assim efectuado um estudo de caracterização dos vários materiais em estudo, solo e solo com fibras, sob condições de secagem distintas (em ambiente controlado e em estufa), e um estudo paramétrico em que são avaliadas as propriedades mecânicas (resistência e deformabilidade), do material através de ensaios laboratoriais de compressão e de corte.

Do presente trabalho, conclui-se que a introdução das fibras de cabelo modifica o comportamento dos solos em análise, contribuindo para o aumento da sua resistência à compressão, do módulo de elasticidade e da sua ductilidade, verificando-se que em termos de deformabilidade esta melhoria foi mais perceptível para a secagem realizada em estufa. O desempenho ao corte dos solos reforçados não apresentou melhorias significativas.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade, Construção em terra, Fibras de cabelo, Resistência à compressão, Resistência ao corte

## ABSTRACT

Earth building construction is an ancient art, used by several civilizations all over the globe, and it is estimated that a considerable part of the world population still live in houses that use soil as the main building material. The improvement in constructive technologies combined with the considerable growth of the population in the recent years, has led to the decline of the traditional earth building techniques. Thereby, with the present assignment, and taking into consideration the environment concerns over the last few years, it is intended to use an available resource, and combine it with a material of low ecological cost, in order to improve his properties, so that it could be implemented in an eco-construction.

So, in this way, the objective of the present dissertation is to evaluate the way how the incorporation of this material, namely the hair fibers, improve the mechanical properties of the soil, in terms of his shear and compression strength, as well of his elastic modulus, in order to be applied as building material in sustainable structures. Therefore, it was conducted a study to characterize the materials involved, soil and fibers, under different drying conditions (in a controlled environment and in a oven), and a parametric study to evaluate the mechanical properties (in terms of strength and deformability) of the material, by carrying out compression and shear tests.

From this study, it is concluded that the addition of the hair fiber modifies the mechanical behaviour of the soils in analysis, leading to an increase of his compressive strength, elastic modulus and ductility, that in terms of deformability this improvement is more perceptible for the drying period in a oven. The shear performance of the reinforced soils didn't show significant improvement.

**Key-words:** Sustainability, Earth Building, Hair fibers, Compression strength, Shear strength

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE.....	iv
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Estrutura da Dissertação .....	2
2. CONSTRUÇÃO EM TERRA .....	3
2.1. Introdução .....	3
2.2. Construção em Terra em Portugal .....	4
2.3. Técnicas associadas .....	5
2.3.1. Taipa.....	6
2.3.2. Adobe .....	8
2.3.3. Blocos de Terra Comprimida - BTC .....	10
2.4. Vantagens e desvantagens da Construção em Terra .....	12
2.5. Patologias e Reabilitação .....	13
2.6. Análise Sísmica.....	18
2.7. Regulamentação .....	21
3. SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....	24
3.1. Introdução .....	24
3.2. Ensaios Laboratoriais e de Campo.....	25
3.2.1. Ensaios Expeditos ou de Campo .....	25
3.2.2. Ensaios Laboratoriais .....	27
3.3. Estabilização .....	29
3.3.1. Introdução.....	29
3.3.2. Compactação .....	29
3.3.3. Adição de Fibras.....	30
3.3.4. Correção Granulométrica .....	33
3.3.5. Aditivos .....	33
3.4. Sustentabilidade .....	34
3.4.1. Introdução.....	34
3.4.2. Sector da Construção.....	35
3.4.3. Solo como material de Construção Sustentável .....	37
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	40
4.1. Introdução .....	40
4.2. Materiais utilizados durante os ensaios .....	41
4.2.1. Solo.....	41

---

4.2.2. Fibras (Cabelo) .....	42
4.3. Preparação dos Provetes .....	43
4.3.1. Preparação dos Provetes sem fibras .....	44
4.3.2. Preparação dos Provetes com fibras .....	45
4.4. Equipamento utilizado e Procedimentos de ensaio .....	47
4.4.1. Ensaio de Compressão .....	47
4.4.2. Ensaio de Corte .....	47
4.5. Programa de Ensaio .....	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
5.1. Introdução .....	49
5.2. Velocidade de Secagem .....	49
5.3. Ensaio de Compressão: Resistência .....	52
5.4. Ensaio de Compressão: Deformação Vertical .....	56
5.5. Ensaio de Compressão: Comparação do Solo B vs Solo D .....	57
5.6. Ensaio de Compressão: Comparação do comportamento do solo E com a percentagem de fibras .....	59
5.7. Ensaio de Compressão: Módulo de Elasticidade .....	59
5.8. Resistência ao corte .....	60
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	66
6.1. Considerações Finais .....	66
6.2. Trabalhos Futuros .....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	68

## 1. INTRODUÇÃO

À medida que o Homem evoluiu foram também evoluindo as suas exigências em termos de construção, procurando um modelo que lhe proporcionasse um maior conforto e qualidade de vida. No decurso da sua existência, o Homem verificou que os materiais existentes na Natureza, nomeadamente a terra, pedra, madeira e fibras vegetais podiam ser utilizados na construção de habitações. A terra, devido à sua abundância, facilidade de acesso e de execução, tornou-se um recurso amplamente implementado e valorizado na construção.

O aparecimento de novos materiais na execução da estrutura do edifício, como o aço e betão, e a evolução das técnicas, permitiu o desenvolvimento de estruturas dotadas de maior qualidade, conforto e resistência. Este crescimento aliado a uma falta de conhecimentos relativamente a aspectos de resistência estrutural e processos construtivos adequados levou a que a construção em terra perdesse terreno, ficando associada a uma imagem de pobreza, própria de países em vias de desenvolvimento, sendo progressivamente abandonada em detrimento dos novos materiais.

O interesse pela construção em terra tem sido revitalizado ao longo dos últimos anos devido aos problemas energéticos, ambientais, ecológicos e económicos sentidos a nível mundial, apresentando-se este tipo de construção como uma ferramenta alternativa e de elevado potencial para contrariar estes problemas, contribuindo para um desenvolvimento sustentável da construção. Devido ao crescimento da consciência ecológica e com o desenvolvimento tecnológico da construção, o Homem tem procurado entender melhor e aprender a aperfeiçoar o comportamento deste sistema construtivo do passado de modo a encarar os desafios do presente e do futuro. A construção em terra regressa assim como uma alternativa, numa união entre tradição e modernidade (Ponte, 2012).

No sentido de aproveitar e potenciar as suas características, têm vindo a ser desenvolvidos trabalhos de investigação que permitam viabilizar e melhorar o desempenho deste tipo de material de forma a ser considerado uma alternativa viável em relação aos materiais de construção convencionais, como o betão e o aço, em termos de sustentabilidade, durabilidade, economia e conforto.

No âmbito desta tese pretende-se avaliar a evolução das características mecânicas dos provetes de solo, quer ao nível da sua resistência, quer da deformação, nos ensaios à compressão e de corte, além do seu módulo de elasticidade. Para além disso, recorrendo a um processo de estabilização do solo, com base num resíduo que não apresenta um destino útil, como é o caso das fibras de cabelo, pretende-se verificar a sua aplicabilidade enquanto material de construção. Com os ensaios de compressão, procurou-se um melhor conhecimento da influência de certos parâmetros, como o processo de secagem (em ambiente controlado e em estufa) e da percentagem de fibras, no comportamento dos solos em estudo. Para os

---

ensaios de corte avaliou-se igualmente a influência da percentagem de fibras, apenas para os teores de humidade mais elevados.

### **1.1. Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, que inclui este primeiro capítulo introdutório que tem como objectivo contextualizar a dissertação.

No Capítulo 2 é feita uma abordagem da terra como material de construção, descrevem-se as técnicas construtivas mais conhecidas e suas vantagens e desvantagens, as patologias mais comuns e exemplos de soluções de reabilitação. Procede-se ainda a uma avaliação dos efeitos dos sismos nas construções em terra, e descrevem-se exemplos de medidas que podem ser adoptadas de modo a atenuar estes efeitos. Por último, aborda-se a regulamentação específica que está associada ao tema.

No Capítulo 3 é realizado uma introdução ao conceito de solo e as suas componentes com maior relevância na construção, assim como uma descrição de alguns ensaios que permitem avaliar as suas características. Aborda-se o tema do melhoramento dos solos através da sua estabilização com diversos materiais e equipamentos, com especial ênfase na utilização de fibras de cabelo, que é o material utilizado como reforço do solo neste estudo. Neste capítulo, é ainda efectuada uma análise do solo como material de construção sustentável, apresentando as características que contribuem para a sustentabilidade deste material. Procede-se igualmente a um estudo dos impactos ambientais provocados pela poluição devida à construção civil, assim como os resíduos produzidos por esta. Por fim, refere-se a legislação associada à temática da sustentabilidade tanto em Portugal como no resto do Mundo.

No capítulo 4 é apresentado o programa experimental, onde são definidas as propriedades mais relevantes dos solos e do reforço, para o estudo em curso. Procede-se, em seguida, a uma descrição dos equipamentos e procedimentos experimentais para os diferentes ensaios realizados.

O Capítulo 5 diz respeito à apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos para o estudo laboratorial realizado. Neste capítulo é analisada a influência das fibras de cabelo e do processo de secagem no próprio tempo de secagem, na resistência e na deformação à compressão, para os provetes de solos estudados. É ainda efectuada uma análise comparativa com outros resultados, nomeadamente os expostos em Inácio (2016).

Por último, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões mais relevantes do trabalho realizado e elaboram-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2. CONSTRUÇÃO EM TERRA

### 2.1. Introdução

Desde a pré-história que o Homem sente a necessidade de procurar abrigo que lhe proporcione uma maior segurança e conforto. Inicialmente, o Homem recorria a abrigos naturais, como as grutas e as cavernas, para se proteger dos perigos envolventes e garantir a sua sobrevivência, e a materiais que a Natureza oferecia (terra, pedra, fibras vegetais, madeira), adaptando-os de forma a utilizá-los para sua defesa, aquecimento, preparação de alimentos, iluminação, etc.. À medida que foi evoluindo, o Homem procurou desenvolver técnicas que lhe permitissem adaptar as matérias-primas que tinha à sua disposição para construir habitações que satisfizessem as suas exigências em termos de segurança, resistência e durabilidade. Devido à sua abundância e facilidade de utilização, um dos materiais mais antigos e utilizados pelo Homem é a terra, estimando-se que, actualmente, cerca de 30% da população mundial viva em construções feitas em terra, sendo o continente Africano o que mais se destaca, seguindo-se a Ásia e a zona centro da América (Fig. 2.1) (Ferreira, 2012).

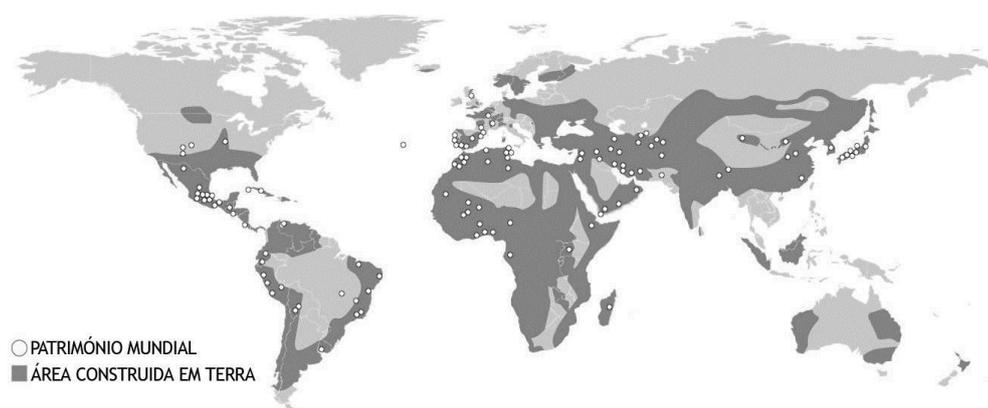


Fig. 2.1 – Distribuição mundial das construções em terra (Ferreira, 2012)

A terra foi um material de construção amplamente utilizado por diversos povos, desde os da antiga Mesopotâmia, do antigo Egipto (junto ao rio Nilo), os Fenícios (na costa Ocidental do Mar Mediterrâneo), ou as civilizações grega e romana ou os povos da América Central e Latina (Moreira, 2008). Actualmente, podem ser encontrados registos de património histórico em terra, como por exemplo, na cidade de Jerico (na Cisjordânia), construída em adobe (8.000 a.C), na Grande Muralha da China (3000 a.C), com troços em taipa, ou a cidade de Shibam, no Iémen (século III), em que a espessura das paredes exteriores em adobe se estreita gradualmente nos andares superiores para aligeirar o seu peso e melhorar a estabilidade. Os edifícios existentes são na sua maioria do século XVI (Torgal et al, 2009).



Fig. 2.2 – a) Shibam, no Iémen (Ponte, 2012); b) Grande Muralha da China (Neves, 2011)

A partir do início do séc. XX, a utilização da terra como material de construção perdeu fulgor com o aparecimento de novos materiais como o cimento, betão, aço e os tijolos cozidos, que apresentavam melhores características em termos de resistência estrutural e processos construtivos. À medida que os conhecimentos sobre estes materiais evoluíam e as exigências ao nível da resistência das construções cresciam, o Homem procurou otimizar e desenvolver soluções que permitissem obter uma maior resistência e ao mesmo tempo fossem económicas, surgindo assim o betão armado, o material de construção mais utilizado nos últimos anos (Mateus, 2004). As potencialidades e a facilidade de utilização deste material, levaram a que ao longo dos anos se negligenciasse a vertente ambiental deste tipo de construção, à qual está associada uma elevada quantidade de recursos naturais necessários e que apresenta elevados consumos energéticos ligados a operações de fabrico, de manutenção, demolição, entre outros (Berge, 2009).

Nos últimos anos, com o despertar da consciência ecológica e ambiental dos países mais desenvolvidos e aos progressos científicos que permitiram aperfeiçoar as técnicas e as propriedades dos materiais, levaram a que se assistisse ao aparecimento de novas tecnologias que promovessem um maior equilíbrio ambiental e ao ressurgimento de técnicas que tinham perdido importância e que ganharam novo fôlego, como por exemplo, a construção em terra crua, caracterizada por baixos custos do material e os reduzidos custos energéticos do processo produtivo, associados ainda a níveis de poluição relativamente baixos, entre outras vantagens que lhe permitem começar a ser visto como um material alternativo e valorizado e deixando de ser sinónimo de desconforto e pobreza (Lourenço et al, 2002).

## 2.2. Construção em Terra em Portugal

Portugal é um país que apresenta uma tradição construtiva em terra crua rica e vasta, podendo ainda ser sentida até aos dias de hoje, tanto pelo património edificado, como pela sua influência nas construções contemporâneas, tendo sido o povo muçulmano, após a invasão da Península Ibérica, em 711, o principal impulsionador deste tipo de construção no nosso território (Falcão, 2014). A construção em taipa e adobe identificam-se como as técnicas de construção em terra mais proeminentes, sendo que a taipa era a técnica mais utilizada, até

meados dos anos 50 do século XX, no Baixo Alentejo e sul do Alto Alentejo, que oferecia condições propícias e favoráveis a este tipo de construção, nomeadamente ao nível do clima, disponibilidade de solo adequado e às influências culturais dos povos que ali se estabeleceram (Duarte, 2013). A taipa foi utilizada sobretudo na construção de edifícios de habitação mas também para edificação de palácios, castelos, igrejas e fortificações, como por exemplo as muralhas dos castelos de Alcácer do Sal, Tavira ou Silves (Fig. 2.3).



Fig. 2.3 – a) Muralha Castelo de Silves; b) Três exemplos de Arte Nova: Museu da cidade, Casa do Turismo e Cooperativa Agrícola, em Aveiro (Varum et al., 2006)

A utilização do adobe como processo construtivo em Portugal, apesar da sua grande heterogeneidade de dimensões e de constituição, foi mais marcante até às décadas de 60 e 70, no Centro Litoral, nomeadamente nas regiões de grande aluvião do Vale do Tejo e do Vouga, devido à predominância de solo mais argiloso. A construção em adobe tem na região de Aveiro o seu maior expoente, encontrando-se na cidade de Aveiro, diversos exemplos desde edifícios rurais de pequenas dimensões, a edifícios urbanos de maior porte, a igrejas, a armazéns, assim como património com elevado valor histórico e cultural, construído nos finais do séc. XIX, e na primeira metade do séc. XX (Varum et al., 2006).

Nos últimos anos, com a consciencialização da necessidade de sustentabilidade na construção, tem-se assistido a uma recuperação deste processo construtivo em Portugal, sendo que o país, como referido por Castanheira e Bragança (2009), apresenta uma situação privilegiada para o uso da terra para a construção, tanto em termos climáticos e geográficos, como culturais, podendo assumir um papel de vanguarda no campo da sustentabilidade da construção e que poderia ser um motor de desenvolvimento económico do sector da construção.

### 2.3. Técnicas associadas

A terra, enquanto material de construção, é um recurso abundante e de fácil acesso, utilizada há milhares de anos, apresentando grande diversidade de técnicas construtivas, consoante a região e o tipo de terra disponível. Posto isto, a matéria-prima é assim um aspecto fundamental a ter em conta, independentemente da técnica a utilizar, devendo apresentar as características necessárias para uma adequada e eficiente construção (Lourenço et al, 2002).

Existem inúmeras técnicas de construção em terra espalhadas por todo o globo, desde as mais rudimentares às mais sofisticadas, que resultaram do aprofundamento do conhecimento do Homem nesta área, que passou a compreender melhor o comportamento de alguns sistemas construtivos do passado e a corrigi-los de forma a torná-los mais eficientes. (Neves, 2011). Entre as técnicas mais utilizadas destacam-se:

- A taipa, associada a um sistema monolítico, em que a construção funciona como um todo unitário, sem ser necessário qualquer outra estrutura (Torgal et al., 2009);
- O adobe e mais recentemente o BTC (Bloco Terra Comprimida), associados a um sistema por unidades (como alvenaria), igualmente auto-portante, onde na execução de paredes em alvenaria de terra, são utilizados diferentes tipos de unidades pré-fabricadas, cujo fabrico ocorre preferencialmente perto da zona de produção, onde os provetes são secos ao sol e posteriormente transportados (Ponte, 2012).

Os solos a utilizar nas diferentes tipologias devem ser escolhidos em função da sua natureza e propriedades, preferencialmente de locais próximos da obra, sendo necessário realizar um conjunto de ensaios que permitam detectar com algum rigor se este reúne as condições (em termos de granulometria, plasticidade, compressibilidade e coesão) necessárias para a sua aplicação em obra (Puga, 2009). A composição das misturas de solo, inerentes a cada técnica, deve ser calibrada de modo a permitir que este adquira um conjunto de características que lhe proporcionem um desempenho eficiente durante a vida útil da estrutura. Neste sentido, cada componente da mistura vai assumir funções específicas, sendo que a Areia confere rigidez, baixos níveis de retracção e porosidade, as Siltes e Argilas permitem evitar fendilhações de retracção durante a secagem e ao mesmo tempo manter a coesão da mistura, e no caso de se adicionar gravilha, esta contribui para aumento da resistência mecânica (Duarte, 2013).

### **2.3.1. Taipa**

A taipa é uma técnica construtiva monolítica que foi utilizada por diversos povos durante séculos, à qual está associada um vasto património espalhado pelos cinco continentes, que na sua grande maioria é considerado património mundial pela UNESCO. A construção em taipa requer pouca quantidade de água, apresentando assim uma maior implementação em regiões mais secas, onde a água não abunda, mas que permite obter um bom desempenho mesmo em climas mais húmidos, apresentando uma boa resistência nos períodos de chuva, devido à sua natureza porosa, e a temperaturas baixas. No entanto, em climas mais rigorosos, recorrem-se a métodos de protecção das paredes, impermeabilização da fundação, ou ainda a coberturas com um pendente (Lourenço, 2002).

A taipa caracteriza-se pela construção de paredes com aproximadamente entre 0,50 e 0,90 m de espessura, geralmente baixas (1 a 2 pisos), recorrendo a um processo de compactação de

uma mistura de agregados seleccionados, constituída aproximadamente por 40-50% de areias, 20-35% de siltes, 0-15% de gravilha, e uma percentagem de argila entre 15-25% (Moreira, 2008), que é colocada entre dois painéis de cofragem paralelos que são removidos posteriormente, após a secagem da terra. (Mateus, 2004). O desenvolvimento de uma construção em taipa de raiz engloba um conjunto de fases distintas, nomeadamente:

- Definição da área de construção e das guias que permitam definir o alinhamento das paredes, facilitar os trabalhos de cofragem e garantir o prumo das paredes (Puga, 2009), após os trabalhos de decapagem e movimentação de terras;
- Execução das fundações em alvenaria de pedra (xisto, barro, pedra seca entre outros), elevadas do chão em cerca de 0,5 m, com o objectivo de anular o fenómeno de humidade ascensional nas paredes de taipa (Puga, 2009);
- A terra húmida, é colocada nos taipais (painéis) em camadas de aproximadamente 10 cm, para facilitar a compactação. Na Figura 2.4 a), apresenta-se um taipal tradicional composto por dois taipais laterais, duas comportas (sendo estas opcionais, pois o seu uso depende do tipo de união entre blocos), e quatros costeiros que em conjunto com as agulhas fazem o travamento dos painéis (Neves, 2011).

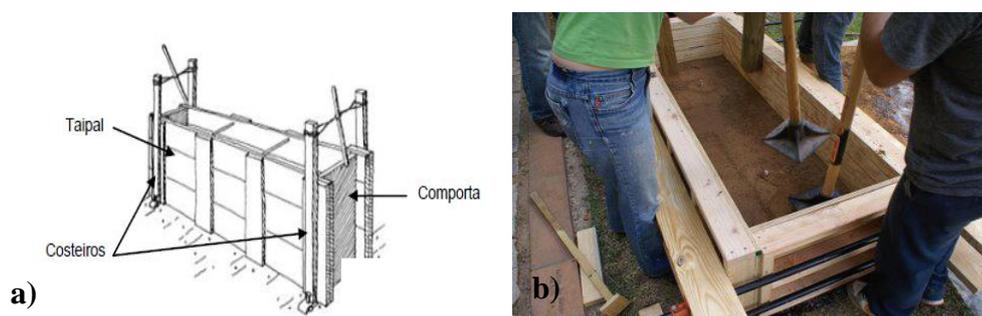


Fig. 2.4 – a) Taipal tradicional (Neves, 2011); b) Compactação manual (Torgal et al, 2009)

Antigamente os taipais eram de madeira, o que implicava prazos de execução muito longos, existindo actualmente processos que permitem acelerar este procedimento, como por exemplo, através da aplicação de cofragens metálicas deslizantes (Mateus, 2004).

- Compactação da terra com o auxílio de um pilão com cerca de 5 a 9kg, até se preencher o taipal na sua totalidade, procedendo-se posteriormente à sua remoção e recolocação para a camada seguinte, após a parede secar e obter a coesão e solidez suficiente (Puga, 2009). Habitualmente, a compactação realiza-se manualmente, (Fig. 2.4 b)) de forma rápida, permitindo que a compactação seja efectuada com o teor humidade correcto que lhe permita obter a resistência pretendida (Torgal et al, 2009);
- Execução das juntas, que podem ser verticais ou oblíquas entre troços, e horizontais entre fiadas. Tradicionalmente, recorre-se a uma argamassa de cal e areia aplicada sobre a fiada

acabada de executar, antes de se iniciar a seguinte, de forma a selar as juntas e a reforçar a ligação entre fiadas, evitando fissuras provocadas pela secagem desfasada, como referido por Minke (2006). Actualmente, devido à possibilidade de realizar cofragens ao longo de todas as paredes, estas juntas podem ser apenas horizontais entre a união de cada bloco, ou mesmo nem existirem (Ferreira, 2012).

Actualmente, além do processo manual de fabrico, existem outras técnicas para o seu desenvolvimento, como por exemplo a “Taipa mecanizada”. Nesta técnica, o processo de execução segue os pressupostos definidos para a taipa tradicional, mas em que a compactação é realizada através de compactadores mecânicos (pneumáticos ou eléctricos), que possibilitam produzir uma massa mais homogénea e um material mais compacto/denso, além de permitir uma optimização do tempo de construção, e a cofragem pode ser móvel ou amóvel em função das suas dimensões (Torgal et al, 2009).

### **2.3.2. Adobe**

O adobe é uma das técnicas mais antigas de construção em terra, bastante simples e de fácil execução, que terá sido iniciada na região fértil da Mesopotâmia, e amplamente utilizada na construção de casas e de monumentos até ao séc. XX (Moreira, 2008). É um método de construção de paredes com tijolos maciços de terra crua, preparados em moldes de madeira com diversas dimensões, o que permite obter tijolos com dimensões muito variáveis, que posteriormente são secos à temperatura ambiente. A composição da mistura deve ser escolhida em função da sua natureza e propriedades, devendo conter entre 55-75% de areia, 10-28% de silte, e 15-18% de argila (Moreira, 2008).

A preparação do adobe é realizada adicionando água à terra argilosa de forma a obter uma mistura pastosa, homogénea e que apresente uma boa plasticidade. Posteriormente, a mistura é colocada em moldes, que devem ser previamente molhados e salpicados com areia para garantir a qualidade dos provetes. Actualmente, já se recorrem a moldes de plástico ou metal, para além dos tradicionais em madeira (Moreira, 2008).

Previamente ao período de secagem, é realizada a desmoldagem dos provetes de adobe, que são transportados e dispersos no terreno. Na secagem, de forma a garantir que os provetes apresentem um comportamento adequado ao longo da vida útil da construção, devem ter-se em atenção os seguintes aspectos, de acordo com Gomes (2008) e Trindade (2008):

- As peças devem secar à sombra e expostas a temperaturas pouco elevadas, pois é nesta fase que se dá maior alteração de volume, o que pode provocar fissuras e degradação do material; em zonas com climas mais quentes e secos, as peças secam a um ritmo mais acelerado, devendo ser colocadas em locais mais frescos e arejados, sempre longe da exposição solar;

- Numa segunda fase, as peças devem ser colocadas de forma a assegurar igual exposição de ambos os lados quer pelo Sol, quer pelo vento, até endurecerem. De modo a uniformizar o processo de secagem, devem-se ir virando as peças;
- O tempo de secagem varia em função da região e respectivo clima, devendo ocorrer preferencialmente nos meses de Verão, durante um período de 3 a 6 semanas. Após a secagem devem ser empilhados, permitindo que ocorra circulação de ar entre eles.

A execução das paredes de adobe é realizada de modo semelhante às alvenarias em tijolo, sobrepondo os blocos de adobe uns por cima dos outros, até se atingir a altura que se pretende. No desenvolvimento da fiada seguinte coloca-se uma argamassa, compatível com o material em uso, que permita obter uma aderência adequada entre os blocos, de forma a prevenir a ascensão de água e humidade, evitando assim o aparecimento de fissuras ou destacamento do material. (Falcão, 2014). Actualmente, podem ser utilizadas argamassas à base de cimento natural ou de cal, que embora apresentem um custo mais elevado que a tradicional, permitem a construção de estruturas de maior porte. A última fiada, para um melhor travamento e assentamento da cobertura, deve ser executada em tijolo cozido, pedra ou cintada com uma viga de coroamento em madeira (Duarte, 2013).

Esta técnica apresenta grande potencial ecológico e sustentável, já que todo o processo incorpora níveis de energia reduzidos, pois a execução de blocos e das paredes é desenvolvido pelo trabalho humano, a cura dos blocos é efectuada através de energia solar e não ocorre produção de resíduos com efeitos nocivos para o ambiente no processo de fabrico. Actualmente, existem outras técnicas para o fabrico dos blocos, como por exemplo o adobe mecanizado, o superadobe ou o hiperadobe, que se apresentam de seguida:

- **Adobe mecanizado:** Este tipo de adobe faz uso da tecnologia actual, o que possibilita um fabrico mecanizado e mais rápido dos blocos (Torgal et al, 2009);
- **Superadobe:** processo construtivo criado na década de 1980, pelo arquitecto iraniano Nader Khalili, e consiste no preenchimento de sacos de polipropileno com terra, argilosa ou arenosa, que são moldados recorrendo a processos artesanais ou semi-industriais, e posteriormente colocados uns por cima dos outros, utilizando-se arame farpado entre as fiadas de modo a conferir maior estabilidade ao conjunto. Quando a parede atinge a altura desejada, os sacos de polipropileno são retirados, para expor o material compactado e permitir a aderência de uma argamassa do reboco (Gouveia et al, 2011);
- **Hiperadobe:** o hiperadobe resultou do aperfeiçoamento da técnica em superadobe, e em termos de execução segue as mesmas directrizes do anterior, sendo que os sacos utilizados são substituídos por sacos de Raschel que são preenchidos com terra e posteriormente compactados, recorrendo a processos manuais ou mecânicos, para depois constituírem as paredes de alvenaria. O uso do Raschel permite um maior atrito entre as

unidades, e funciona como argamassa para o reboco, não sendo necessário recorrer a arame farpado para a amarração (Librelotto, 2013).

### **2.3.3. Blocos de Terra Comprimida - BTC**

A técnica de construção em BTC é, dos métodos apresentados, o mais recente e um dos mais utilizados actualmente, e consiste na compactação mecânica de blocos de terra, através da prensagem do solo em moldes. As primeiras técnicas para a produção de blocos de terra compactados, terão surgido durante o séc. XVIII, em França, desenvolvidas pelo arquitecto François Cointreaux, que concebeu um equipamento de prensa manual para compactação do solo (Minke, 2006).

À medida que a tecnologia foi evoluindo e as técnicas foram sendo aperfeiçoadas, na década de 50 na Colômbia, o engenheiro Raúl Ramirez concebeu uma prensa manual (CINVA-RAM), prática e de pequenas dimensões, para compactar blocos de terra. Esta pesquisa, inserida no âmbito de um programa de investimento em habitação rural, tinha a finalidade de melhorar os blocos de adobe em termos de resistência mecânica e durabilidade, aumentando o contacto entre as partículas e diminuindo a porosidade (Gomes, 2008).

Actualmente, o processo de prensagem pode ser realizado de forma manual, mecânica, imprimindo pressões na ordem dos 2 MPa, ou hidráulica, com pressões ainda mais elevadas, permitindo fabricar uma grande diversidade de blocos (sólidos, ocos, perfurados, interligados), com maior rapidez e controlo de qualidade, maior eficiência na eliminação de vazios e na diminuição da porosidade do solo e maior consistência (Torgal et al., 2009). Segundo Moreira (2008), os blocos obtidos neste processo, quando comparados com os de adobe, apresentam algumas diferenças sendo mais regulares em forma e dimensões, os prazos de construção são mais reduzidos (tempo de espera entre a produção e aplicação do material mais curtos), a produção dos blocos pode ser executada durante todo o ano e apresentam maior resistência à compressão e aos fenómenos de erosão e degradação causadas pela água.

Relativamente à composição da mistura no processo de fabrico dos blocos, esta não apresenta grandes diferenças em relação à do adobe, recomendando-se, segundo alguns autores, que contenha entre 50-70% de areia, 10-20% de argila e 10-20% de silte (Torgal et al, 2009). Neste processo, como os blocos são prensados mecanicamente, a mistura a ser utilizada necessita de uma menor quantidade de água (não deve exceder 8% do volume total), o que reduz a probabilidade de ocorrerem efeitos de retracção na terra durante a secagem e o aparecimento de fissuras. No entanto, os blocos de terra comprimida, devido à reduzida quantidade de água e da energia necessária capaz de activar as forças coesivas dos minerais de argila, têm de ser estabilizados de modo a conferir-lhes a resistência necessária, através da adição de cal ou cimento. A correcta selecção do estabilizante e a preparação da terra é um factor chave para a obtenção de um bloco funcional e com qualidade (Minke, 2006).

---

O BTC é uma mistura de terra, água e uma reduzida percentagem de estabilizante, que permita dotar o bloco com os índices de resistência à compressão exigidos, e assegure a economia do produto. De modo a facilitar o processo de mistura do estabilizante com os restantes componentes, devem ser eliminados todos os agregados de maiores dimensões, como pedras e gravilha. Após misturar os materiais secos, procede-se à humedificação da mistura, através de rega ou por vaporização sobre pressão, até que se atinja o grau de humidade adequado para realizar a prensagem. A humidade adequada da mistura pode ser determinada, segundo Gomes (2008), de forma expedita, recorrendo ao seguinte processo:

- Primeiro, molda-se uma porção da mistura entre as mãos até formar uma bola pequena;
- De seguida, deixa-se cair a bola já moldada, de uma altura de aproximadamente 1m;
- Por último, determina-se de forma aproximada o teor em água da mistura, através da observação do comportamento da bola após a queda: caso a bola não se desfaça com o impacto significa que a mistura tem demasiada água; se a bola se desfaz em pedaços grandes a mistura apresenta uma humidade óptima; por outro lado, se se desfizer em pedaços pequenos, significa que a amostra tem humidade reduzida.

A mistura é colocada num molde e posteriormente prensada. A prensa utilizada para o fabrico do BTC depende das necessidades de produção, pois enquanto um equipamento manual pode produzir algumas centenas de unidades por dia, um equipamento mecanizado tem capacidade de produzir vários milhares de unidades diariamente. A prensa hidráulica, permitiu agilizar o processo de fabrico e ainda aumentar a resistência mecânica dos blocos de BTC, pois consegue aplicar pressões muito superiores em relação às outras prensas. No entanto, a este processo estão associados elevados custos de manutenção e utilização (Pereira, 2013a).

Após a prensagem, os blocos de BTC são extraídos, e já apresentam capacidade de serem manuseados e aplicados em obra. Contudo, nessa altura as suas propriedades mecânicas máximas ainda não foram alcançadas, o que iria condicionar a qualidade da obra, devendo os blocos ser sujeitos a um período de cura lenta e gradual, em ambiente quente e húmido, protegidos do sol, vento e chuva (Moreira, 2008). No caso de o clima ser muito seco, os blocos devem ser mantidos húmidos, através de molhagens sucessivas, ou evitar a sua perda de humidade recorrendo desde mantas e sacos de plástico até ao uso de folhas para cobrir os blocos, pois poderão surgir fissuras na sua superfície. O período de cura varia em função do estabilizante utilizado, verificando-se que no caso da utilização de cimento, o tempo de cura é de 4 semanas, passando para o dobro se for utilizada a cal. (Pereira, 2013a).

A simplicidade e eficácia desta técnica torna-a num dos sistemas de construção em terra mais utilizados em todo o mundo, podendo ser utilizados em qualquer tipo de construção, tanto como material estrutural como de enchimento. O processo construtivo é semelhante ao da

---

alvenaria convencional e do adobe, em que a alvenaria é composta pelos blocos e uma argamassa de assentamento (à base de cimento, cal ou lama sem palha), que vão formar as juntas horizontais e verticais. Como foi referido anteriormente, este sistema de produção permite obter grande diversidade de blocos de BTC, podendo-se obter a geometria desejada e reduzir ou até dispensar a utilização de argamassa nas juntas (Carvalho, 2015).

#### 2.4. Vantagens e desvantagens da Construção em Terra

No panorama actual, com a sensibilização dos países para questões ambientais e a consciencialização da comunidade científica das potencialidades da construção em terra, assistiu-se ao ressurgimento e modernização deste processo construtivo. Os edifícios construídos com recurso a esta tecnologia apresentam diversas vantagens, comparativamente aos métodos construtivos convencionais actuais (betão armado, tijolo cozido, entres outros), nomeadamente, ao nível:

- **Comportamento térmico:** estas soluções construtivas apresentam grande inércia térmica, devido à elevada massa e espessura dos seus elementos, pois as paredes conseguem armazenar energia durante o dia, libertando-a quando a temperatura exterior desce, atrasando o ritmo com que a temperatura interior baixa, e retardando o aquecimento dos espaços interiores quando a temperatura exterior é mais elevada, permitindo assim um melhor aproveitamento energético dos edifícios; (Ferreira, 2012)
- **Comportamento acústico:** as paredes funcionam como isolante sonoro, devido à densidade elevada e espessura, amortecendo a transmissão das ondas sonoras, permitindo um bom comportamento acústico do edifício; (Mateus, 2004)
- **Comportamento higrotérmico:** a presença de argila, aliada à porosidade dos blocos, tem a capacidade de absorver e libertar humidade no interior da habitação, permitindo que as paredes de terra consigam regular e equilibrar a humidade relativa do ar, o que promove uma boa qualidade do mesmo nos espaços interiores de um edifício e impedindo o desenvolvimento de parasitas (Falcão, 2014);
- **Disponibilidade e economia:** a matéria-prima necessária para a construção em terra é abundante, e normalmente está disponível no local de implementação da obra, o que garante grandes vantagens em termos económicos, quer ao nível da aquisição do material como dos gastos associados ao consumo de combustíveis para fabrico e transporte. A produção de blocos é um processo simples que não requer mão-de-obra especializada, não incorpora grandes gastos energéticos e a emissão de elementos poluentes na sua concepção é bastante reduzida. No entanto, com a adaptação dos sistemas de construção em terra a processos mecanizados e a incorporação de aditivos, os gastos energéticos tendem a aumentar, mas sempre numa escala inferior comparativamente aos métodos convencionais (Falcão, 2014 e Mateus, 2004).

- **Sustentabilidade:** Em termos de sustentabilidade, para além do baixo gasto energético e emissão de poluentes, a construção em terra apresenta-se como um processo reciclável, não se verificando produção de resíduos nos trabalhos de demolição, podendo o material voltar a ser reutilizado ou devolvido à natureza. Novamente, nas situações em que se recorre à utilização de estabilizantes (como o cimento ou cal), é necessário um tratamento prévio da terra antes de poder voltar a ser utilizada (Ferreira, 2012);
- **Comportamento ao fogo:** a terra é um material incombustível, o que garante a estas soluções construtivas uma boa resistência ao fogo (Ferreira, 2012).

Apesar das inúmeras potencialidades, a indústria da construção em terra ainda se encontra na fase inicial do seu desenvolvimento (Hall et al, 2012), apresentando algumas limitações relativamente aos métodos correntes, tais como:

- Comportamento deficiente na presença de água, o que leva a uma rápida degradação do material, reduzindo drasticamente a sua durabilidade e resistência mecânica, o que pode originar roturas no edifício. De modo a atenuar este efeito as construções podem ser protegidas contra a acção da água, seja com recurso a revestimentos nas paredes, impermeabilização entre a base do edifício e fundação, estabilização com ligantes, entre outros (Ferreira, 2012);
- Grande vulnerabilidade a esforços de tracção e flexão, apresentando um melhor desempenho quando sujeita a esforços de compressão, não sendo indicada para regiões de elevado risco sísmico, o que geralmente limita a altura dos edifícios em terra a um ou dois pisos (Gomes et al., 2007);
- Ocorrência de fenómenos de retracção durante o processo de secagem, que pode levar ao aparecimento de fendas, factor que também potencia a degradação das paredes (Ferreira, 2012).
- Reduzida regulamentação específica para este tipo de construção e elevada exigência de mão-de-obra nas fases de fabrico dos blocos e assentamento, o que torna esta solução do ponto de vista económico pouco apelativa, pois nos países desenvolvidos a mão-de-obra é um recurso caro (Falcão, 2014 e Mateus, 2004).

## 2.5. Patologias e Reabilitação

As construções, independentemente da sua tipologia e solução adoptada, têm sempre um grau de vulnerabilidade associado, que as tornam susceptíveis de sofrer alterações estruturais e não estruturais, que podem prejudicar o seu funcionamento e integridade. Sendo assim, torna-se importante estudar e identificar as causas e os processos que promovem a degradação das construções em terra de modo a poder actuar-se de forma mais eficaz na sua prevenção e reabilitação. As principais causas que estão na origem do aparecimento de patologias na

---

construção em terra são os assentamentos de fundações, zonas de concentração de tensões, impulsos laterais devido a sismos, a acção da água através de fenómenos de capilaridade e erosão, deterioração da cobertura, dilatação ou contracção dos materiais devido a amplitudes térmicas, para além dos problemas associados a uma concepção estrutural deficiente (Brito, 2004 e Almeida, 2015).

As fundações constituem um dos elementos mais importantes na construção de qualquer estrutura, devendo ser estáveis e sólidas, de forma a assegurar a distribuição das cargas provenientes da edificação ao terreno onde esta é construída, sem provocar esforços e assentamentos excessivos ao solo. Nas construções em terra, a fundação directa em sapata corrida é a mais aconselhada, pois permite uma distribuição uniforme das cargas a toda a fundação (Duarte, 2013).

Tradicionalmente, a fundação é executada recorrendo a um embasamento em alvenaria de pedra, e mais recentemente em betão armado, que se eleva pelo menos 0,5m em relação ao nível do solo, cuja principal função consiste em evitar que a água do solo entre em contacto com as paredes, mas também permitir criar uma base limpa e nivelada que sirva de suporte a estas (Trindade, 2008). A acção da água constitui assim um dos principais inimigos das fundações, contribuindo para a sua erosão e perda de estabilidade, principalmente devido ao arrastamento das partículas mais finas que constituem os elementos de base da estrutura e, para a ocorrência de humidades ascensionais, que afectam as alvenarias pelo processo de capilaridade, podendo atingir alturas consideráveis, se forem mal executadas (Eusébio, 2001).

Neste sentido, de forma a evitar os assentamentos que coloquem em causa a segurança da estrutura, é extremamente importante um solo bem compactado e estável, devendo-se proceder a uma consolidação do terreno se este não apresentar as condições desejáveis, de modo a dotá-lo com as capacidades mecânicas adequadas para o seu bom funcionamento, recorrendo a injeções de argamassas que preencham os vazios existentes devido aos efeitos da água (Almeida, 2015).

No sentido de prevenir que os efeitos nefastos da acção da água se tornem problemáticos para a estrutura, é necessário garantir o afastamento da água de escorrência das fundações, através de uma pendente que afaste a água da chuva da construção (localizada no pavimento imediatamente junto aos paramentos exteriores), além da colocação nas fundações de sistemas de drenagem eficazes, recorrendo a enrocamentos e geodrenos adequados (Duarte, 2013). De forma a combater a elevada susceptibilidade de ascensão da água por fenómenos de capilaridade, deve intervir-se na ligação entre o embasamento e a parede, através da criação de uma barreira impermeável que assegure que a parede não é afectada por problemas de humidade. Segundo Torgal e Jalali (2011a), estas barreiras podem ser executadas recorrendo a pinturas betuminosas, mastiques asfálticos e mesmo folhas de chumbo ou cobre. Quando

possível, outra opção prende-se com a subida da fundação acima do solo, o que vai proporcionar um aumento da rigidez da estrutura e uma melhoria da sua estabilidade mecânica.

Os assentamentos das fundações constituem também um dos motivos para o aparecimento de patologias na estrutura, independentemente do tipo de construção, sendo variadas as causas que contribuem para o seu desenvolvimento. Na grande maioria das situações, as patologias verificadas em edifícios construídos em terra devido a assentamentos de fundações estão associadas com edificação antiga, cuja fundação, como referido por Torgal e Jalali (2011a), consistia apenas num lintel de alvenaria de pedra e que se desenvolvia ao longo do comprimento da parede, sem qualquer ligante, e não apresentava um comportamento rígido, levando ao aparecimento de fissuras nas paredes.

A actuação dos agentes atmosféricos nas fachadas do edifício pode levar à sua degradação se este não se encontrar devidamente protegido ou apresentar falta de manutenção, sendo que impacto da chuva e do vento, com elementos de suspensão, assumem um papel de destaque neste processo, promovendo a alteração dos elementos exteriores dos edifícios, provocando o seu desgaste e erosão, situação que conduz ao aparecimento de anomalias similares às verificadas devido à acção da água, associadas a problemas de infiltrações, humidades ascensionais e condensações (Almeida, 2015). A condensação, à superfície ou no interior das paredes do vapor de água e a existência de vapor de água em excesso, pode provocar o humedecimento do material, o que promove um aceleração na degradação das paredes, devido ao desenvolvimento de fungos, bolores e espécies vegetais, redução de isolamento térmico, entre outros (Eusébio, 2001).

Uma das situações mais problemáticas devido à presença de água nas paredes de terra relaciona-se com a acção de sais solúveis higroscópicos (nitratos, cloretos, sulfatos), em que os sais presentes nas paredes podem ser transportados pela água existente, cristalizando à superfície ou no interior destes elementos, quando a água se evapora. A cristalização dos sais é acompanhada de um aumento de volume, o qual introduz tensões internas que condicionam o desempenho das paredes em termos de resistência mecânica, levando a uma perda progressiva da sua coesão, o que se traduz na abertura de fendas e destacamento do material de revestimento (Rodrigues e Henriques, 2006).

Um incorrecto comportamento das fundações pode influenciar o comportamento das paredes, podendo surgir problemas associados a rotações (para fora do seu plano), e fendilhações, normalmente junto a pontos mais sensíveis da estrutura (abertura de vãos, topos das paredes, etc.), devido à inexistência de elementos de reforço que permitam o travamento entre paredes ortogonais (Brito, 2004).

As zonas de concentração de tensões ocorrem principalmente nas proximidades de aberturas de vãos (portas e janelas), nas ligações entre paredes ortogonais e entre a estrutura da cobertura e as paredes, condicionando a estabilidade estrutural das paredes ao introduzir tensões excessivas que estes elementos não conseguem suportar (Minke, 2006).

A degradação das coberturas, devido ao desenvolvimento de fungos e bolores ou à entrada de água, pode contribuir para o aparecimento de anomalias nas paredes (Mateus, 2004).

No sentido de limitar ou corrigir as fragilidades descritas, podem ser tomadas um conjunto de medidas. Ao nível da fundação, por exemplo, a criação de um eficiente corte de capilaridade, boa protecção do soco das paredes exteriores, reforço da fundação com ligantes, entre outros. Relativamente às paredes, nos processos de construção ou reabilitação, os efeitos da água e agentes atmosféricos podem ser controlados recorrendo a soluções de revestimentos, tintas, argamassas para tratamento de fissuras, ou sistemas de drenagem das águas da cobertura.

Os revestimentos constituem a primeira barreira física de protecção das paredes, cuja função é garantir que os agentes agressivos a que fica sujeito não conduzem à degradação e desgaste destas, permitindo manter inalteradas as funções que desempenham (Almeida, 2015). Desta forma, e de acordo com Rodrigues (1999), o revestimento deve possuir um conjunto de características que lhe permitam satisfazer as exigências a que seja sujeito, nomeadamente ao nível de:

- **Aderência ao suporte:** de modo a evitar o descolamento devido a tracções e compressões que se desenvolvam entre suporte e revestimento, a choques, a pressões de vapor e não conduzir a concentrações de tensões em pontos localizados;
- **Impermeabilização:** tem a função de garantir que a absorção de água seja minimizada, devendo para esse efeito apresentar espessura suficiente, reduzida capilaridade e capacidade de fendilhar;
- **Permeabilidade ao vapor de água:** devem evitar a ocorrência de condensações no interior do edifício e facilitar a evaporação da água presente no interior das paredes, permitindo a sua secagem;

Os materiais dos revestimentos devem permitir uma adequada interacção com os suportes nos quais são aplicados (ao nível de resistência mecânica, deformabilidade, etc.), de forma a evitar a rotura entre eles. Deste modo, deve recorrer-se a argamassas com módulo de elasticidade igual ou menor ao do suporte (decrecendo das camadas interiores para as exteriores), resistências à compressão e flexão semelhantes às do suporte, baixo teor de sais solúveis, retracção reduzida, boa trabalhabilidade e permeabilidade, utilizando-se frequentemente argamassas à base de cal em vez das de cimento, pois a terra constitui uma base fraca que não suporta grandes retracções (Mateus, 2006), levando a que estas fiquem sujeitas a tensões

---

excessivas para as quais não foram dimensionadas e dificultem a evaporação da humidade no interior do edifício e da água existente no interior das paredes (Torgal e Jalali, 2011a).

Tradicionalmente, nas paredes de taipa o revestimento não era colocado imediatamente, ficando a sua superfície à vista durante um período de tempo, o que permitia a lavagem dos finos superficiais, proporcionando uma maior aderência do revestimento que viesse a ser aplicado (Rodrigues e Henriques, 2006). Para além das funções descritas, os revestimentos funcionavam como decoração das fachadas contribuindo para um melhoramento do aspecto estético das edificações em terra, podendo apresentar diversos estilos resultantes de diferentes técnicas. A utilização de tintas, para além de desempenhar funções estéticas, tem como principal objectivo actuar como camada protectora do revestimento, contribuindo para a sua consolidação global (Rodrigues, 1999).

O aparecimento de fendas limita o desempenho das paredes e se não for tratada convenientemente pode levar ao seu colapso. A fendilhação das paredes permite que se criem canais de acesso para a água, o que facilita a sua infiltração e absorção, resultando num enfraquecimento das paredes, devendo deste modo ser alvo de um processo cuidadoso de manutenção (controlo de fendilhação) ou de reabilitação (tratamento de fissuras). A intervenção nas zonas afectadas, contribui para diminuir a sua vulnerabilidade à formação de fendas, podendo ser utilizadas certas técnicas para esse efeito, como por exemplo:

- **Reboco Armado:** processo utilizado em paredes que se encontram em bom estado mas com elevado nível de desgaste, permitindo um aumento da sua resistência superficial à tracção e ao corte e um maior controlo da fendilhação. Consiste na aplicação, manual ou projectada com equipamento específico, de uma argamassa de revestimento (de natureza inorgânica ou sintética) e armadura de reforço (redes de fibra de vidro, fibras sintéticas, etc.) fixada por pontos, sobre a parede a ser tratada (Azevedo, 2010).
- **Selagem de fendas:** neste método, o preenchimento das fissuras pode ser feito recorrendo a argamassas à base de terra ou cal hidráulica (injectada sobre pressão), após a limpeza e selagem das fendas (Torgal e Jalali, 2011a);
- **Reparação ou substituição dos rebocos:** as zonas afectadas, devem ser reparadas ou substituídas por novos elementos que sejam compatíveis com os materiais de origem (Almeida, 2015).

A solução mais eficaz para proteger as paredes da água proveniente da cobertura passa pela colocação de beirados com protecção exterior e valas de drenagem de águas pluviais e freáticas (Ferreira, 2012).

O reforço nas zonas de abertura de vãos consiste na introdução de elementos horizontais de reforço (lintéis) de grande resistência, que se dispõem ao longo da abertura apoiando-se nas

---

suas extremidades, e que permitem redistribuir adequadamente estas tensões, utilizando-se tradicionalmente lintéis de madeira ou de pedra, e mais recentemente de betão armado (Trindade, 2008).

A ligação entre a parede e a cobertura, deve ser o mais leve possível, recorrendo-se normalmente a vigas de coroamento (em madeira, pedra ou betão armado) apoiadas nas paredes laterais, que reduz as cargas impostas nas paredes, reforçando a sua estabilidade e criando um ponto de fixação entre a cobertura e a parede. Pode ser efectuado com a massa utilizada no assentamento e as telhas devem estar dispostas de tal forma que evitem a entrada de água e permitam que ocorra a ventilação da sua superfície interior, para que haja uma secagem rápida e eficaz. O beirado deve ser prolongado, de forma a evitar ao máximo que a água das chuvas entre em contacto com as paredes (Trindade, 2008).

## **2.6. Análise Sísmica**

As estruturas, independentemente do processo construtivo que lhe está associado, estão sujeitas durante o seu ciclo de vida a um conjunto de solicitações, sendo que em certos casos, originam instabilidades que podem comprometer o desempenho futuro, e em último caso, provocar a ruptura da estrutura. Estas solicitações podem ter várias origens, em que uma das mais imprevisíveis e com maior poder de devastação, acontece devido à ocorrência de sismos.

Os sismos constituem movimentos oscilatórios, que ocorrem na superfície terrestre, originados pela libertação brusca de energia, e que vão introduzir esforços e tensões nas estruturas, influenciando o seu comportamento. Este comportamento vai depender não apenas da intensidade e magnitude do sismo, como também da tipologia da edificação (em termos de resistência, qualidade de construção ou aspectos relacionados com a distribuição de massa, a altura, entre outros), a profundidade e distância do epicentro, e do comportamento geológico e geotécnico do terreno (Gomes et al., 2007).

Ao longo da História, têm sido registados episódios que demonstram a devastação criada pelos sismos, como o que ocorreu na cidade de Bam, no Irão, em Dezembro de 2003, de magnitude 6,3 na escala de Richter, e que provocou mais de 26.000 mortos e arrasou praticamente todo o seu território (cerca de 70%), onde a maioria das construções eram em adobe. Em Portugal, o sismo de maior dimensão destrutiva aconteceu no dia 1 de Novembro de 1755, em que a cidade de Lisboa foi a mais afectada, estimando-se que tenha atingido a magnitude 9 na escala de Richter, tendo sido responsável por ter causado mais de 40.000 mortos e danos muitos elevados (Gomes, 2008).

A ocorrência de sismos e a sua interacção com as construções em terra tem sido observada ao longo da história, com consequências e um grau de devastação mais graves, quando comparadas com as construções com materiais convencionais, constatando-se igualmente que

apesar de apresentarem grandes vulnerabilidades a estas acções, as edificações em terra estão localizadas em zonas de actividade sísmica intensa (Neumann et al., 2013), o que contribui para um aumento da probabilidade de ocorrência de um sismo, que podem conduzir à degradação progressiva das propriedades resistentes dos seus elementos, e consequente colapso, parcial ou total, da estrutura (Blondet et al., 2004).

As oscilações, verticais e horizontais, induzidas pelas ondas sísmicas na edificação, têm um efeito variável na estabilidade dos seus elementos, onde o comportamento das paredes assume um papel decisivo (Neumann et al., 2013). A componente horizontal das forças de inércia actuantes é, geralmente a mais condicionante e a causa de danos severos, devido à fragilidade e fraca aptidão dos materiais para resistir a esforços de tracção e de corte, revelando no entanto um comportamento mais satisfatório quando sujeita a esforços verticais (de compressão), visto as paredes de terra serem muito espessas (Gomes, 2008), e em geral, estas edificações serem baixas. Deste modo, as estruturas quando sujeitas a estas solicitações, e dependendo da sua intensidade e tempo de actuação, vão sofrer alterações na sua geometria, sendo exemplos de danos e modos de rotura conhecidos representados no quadro abaixo.

No sentido de melhorar o desempenho sísmico das construções em terra, devem ser introduzidas medidas de reforço e adoptados critérios no dimensionamento, que permitam controlar a fissuração e impedir o colapso dos elementos estruturais, melhorando a sua resistência e permitindo uma redistribuição eficiente dos esforços pelos elementos estruturais, de forma a evitar a concentração de tensões nas zonas mais sensíveis. Sendo o comportamento das paredes fundamental para garantir a estabilidade da estrutura, podem ser tomados certos cuidados de modo a melhorar o seu comportamento, nomeadamente:

- Ao nível da disposição e ligações entre paredes, que devem ser dispostas em mais do que uma direcção e ser ortogonais entre si, evitando assimetria e irregularidades, podendo a sua ligação ser efectuada recorrendo a elementos em pedra ou pregagens (Gomes, 2008);
- Aumento da espessura das paredes ou utilizando contrafortes, que permitem o travamento das paredes, impedindo a sua rotação para fora do plano (Neumann et al., 2013);
- Alterando as propriedades mecânicas dos materiais, recorrendo a elementos que aumentem a sua capacidade resistente e de deformação, como ligantes ou fibras (Oliveira et al., 2010);
- Introduzindo uma viga de coroamento, que confira um aumento de rigidez das paredes a esforços de flexão que conduzem à sua rotura, e permita uma ligação eficiente entre estas e a cobertura, de modo a ocorrer uma distribuição uniforme das cargas (Pereira, 2013b)
- Optando por um sistema de reforço vertical interno (bambu, madeira, aço, etc.), que segundo Minke (2006), proporciona uma maior resistência às paredes e permite controlar

a fendilhação, diminuindo assim a probabilidade de separação entre estas, devendo ocorrer uma correcta ligação entre a fundação e a viga de bordadura, que permita um comportamento adequado deste sistema;

- Ao nível das aberturas, que constituem uma das áreas mais críticas, principalmente nos cantos, onde ocorrem as maiores concentrações de tensões e de onde surgem geralmente as fendas, o que contribui para uma diminuição de rigidez das paredes. De modo a melhorar o comportamento nestas zonas podem ser introduzidos lintéis (de aço, madeira, etc.), que segundo Minke (2006), devem estar embutidos pelo menos 40 cm nas paredes, de modo a serem eficientes;
- Ao nível das fendas, que são descontinuidades que enfraquecem os elementos estruturais, afectando o seu desempenho quando sujeitos a esforços externos, sendo necessário minimizar o seu impacto. Neste sentido, existem métodos que permitem reparar e preencher estas fendas, através da introdução de elementos pontuais, como argamassas de terra, telhas ou adobe, distribuídos ao longo destas, ou recorrendo a uma injeção de caldas, devendo esta ser efectuada utilizando um material de calda compatível com o material a intervir, de forma a actuar eficazmente (Oliveira et al., 2010).

Existem outras considerações a ter na idealização de uma estrutura em terra resistente a sismos, como a construção em altura, que deve ser limitada ao piso térreo. Na eventualidade de se proceder à construção de um segundo piso, este deve ser realizado recorrendo a materiais leves, que não imponham um aumento de peso na estrutura (Minke, 2006), pois as forças de inércia aumentam com a massa da estrutura. Relativamente à cobertura, deve ser seguido um raciocínio idêntico, em que as coberturas devem ser o mais leve possível (Ferreira, 2012). Ao nível das fundações é necessário ter em conta certos aspectos, como as propriedades do solo e o modo como este se distribui ao longo das camadas do terreno, a profundidade do nível freático ou a interacção solo-fundação-estrutura, devendo-se adoptar um sistema que permita facilitar a dissipação de energia durante um sismo (Azevedo, 2010).

Deste modo, procurou-se de forma simples apresentar um conjunto de boas práticas e critérios que funcionem como uma ferramenta na limitação dos danos provocados pelos fenómenos sísmicos, contribuindo para uma maior segurança das edificações em terra e das pessoas que nelas habitam. Actualmente existem inúmeras soluções para além das referidas que permitem minimizar os efeitos destas acções, recorrendo principalmente a materiais ditos convencionais (aço, betão, etc.), o que se afasta um pouco da temática pretendida no presente trabalho, da sustentabilidade nas construções.

Quadro 2.1 – Tipos de rotura associados a acções sísmicas (Oliveira et al, 2010)

Modo de Rotura/Dano	Esquema
<p>Rotura por flexão para fora do plano da parede. Fendilhação horizontal na base ou numa altura intermédia da parede. Adicionalmente formam-se fendas verticais intermédias.</p>	
<p>Rotura por flexão para fora do plano da parede. Formação de uma fenda vertical a meio da parede. Posterior formação de mecanismo de colapso por fendilhação diagonal e desprendimento da parede por fendilhação da parte superior dos cunhais.</p>	
<p>Rotura por flexão para fora do plano de paredes isoladas ou de paredes contraventadas com ligação deficiente às paredes de contraventamento e com ausência de contrafortes.</p>	
<p>Rotura por corte no plano da parede, associada a impulsos horizontais elevados. Fendilhação diagonal através dos blocos e juntas, amplificada por pavimentos e coberturas pesadas e pelas aberturas.</p>	
<p>Colapso da cobertura para o interior da construção devido a um suporte deficiente na parede. O colapso é geralmente devido à rotura da zona superior das paredes.</p>	
<p>Colapso generalizado da cobertura devido a um suporte deficiente na parede e a adopção de uma solução estrutural desadequada para a cobertura.</p>	
<p>Rotura por má ligação das paredes do segundo piso com as do primeiro. Formação de uma fenda horizontal generalizada por desprendimento das paredes, que resulta na instabilidade generalizada do segundo piso.</p>	

## 2.7. Regulamentação

No âmbito da construção em terra, como em qualquer outro tipo de construção, a legislação específica é uma ferramenta importante para as partes intervenientes no processo de idealização e execução de uma estrutura. Nos últimos anos, a nível internacional, diversos países como a Alemanha, a Nova Zelândia, a Austrália, o Perú ou o Zimbábwe, têm apostado no desenvolvimento e melhoramento de regulamentos sobre este tipo de construção, o que realça a importância e atenção que está a ser direccionada para este tema.

A nível nacional, apesar de Portugal possuir um vasto património em edifícios de terra, não existe qualquer tipo de regulamentação para a elaboração de projectos deste tipo de construção, sendo o procedimento actual nestas situações recorrer a uma estrutura corrente que respeite e cumpra as exigências a nível estrutural, térmico, acústico e de segurança, deixando as alvenarias de terra para um papel secundário, o de preenchimento (Gomes, 2015).

Outro aspecto que contribuiu para a lenta afirmação da construção em terra foi a falta de intervenientes qualificados (arquitectos, engenheiros, mão de obra especializada, etc.). Neste âmbito, começaram a surgir entidades com o objectivo de alargar a vocação pedagógica e especializada, assegurando ao mesmo tempo a coordenação óptima de esforços de pesquisa tecnológica e uma estratégia de informação (Dethier et al., 1993), sendo o grupo CRAterre um dos mais reconhecidos a nível internacional.

A Alemanha foi um dos países europeus pioneiro na elaboração de regulamentação da construção em terra (Earth Building Code), em 1944, que passou a ser incorporada nas Normas Alemãs (DIN 18951), em 1951. Em 1970, esta regulamentação foi descontinuada, surgindo apenas em 1999, com a publicação de um novo conjunto de disposições regulamentares, conhecido como “Lehmbau Regeln”. Em 2008, foi aprovada uma nova versão deste documento, pelos organismos europeus. Mais recentemente, em 2013, foram publicados três documentos DIN 18945, DIN18946 e DIN18947, que definem os termos, requisitos e métodos de ensaio para blocos de terra, argamassas de alvenarias e rebocos de terra, respectivamente (Torgal et al., 2009 e Gomes, 2015).

Em termos de legislação para construção em terra, a Nova Zelândia é um dos países com maior expressão a nível mundial. Os regulamentos abordam as técnicas construtivas em taipa, adobe e BTC, apresentando uma descrição detalhada de todas as fases do processo de execução destas técnicas e dos procedimentos de ensaio. Foi desenvolvido, com base nos princípios de estado limite, pela “Standards New Zealand” em conjunto com elementos da “Earth Building Association of New Zealand” (EBANZ), tendo sido publicado em 1998, e consiste em três normas distintas: NZS 4297 (Engineering Design of Earth Buildings), a NZS 4298 (Material and Workmanship for Earth Buildings) e a NZS 4299 (Earth Buildings not Requiring Specific Design (Maniatidis e Walker, 2003 e Gomes, 2015).

A Austrália foi um dos primeiros países a desenvolver regulamentação para a construção em terra, tendo sido publicado em 1952, pela Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), o primeiro documento referente a este assunto. O “Bulletin 5” foi desenvolvido para as técnicas de construção em taipa, adobe e BTC, estabelecendo os seus requisitos e capacidades, tendo sido submetido a sucessivas actualizações. Mais recentemente, o “Bulletin 5” foi substituído por um manual mais completo e moderno, o “The Australian Earth Building Handbook”, publicado em 2002 pela Standards Australia (Pereira, 2013a e Maniatidis e Walker, 2003).

No Perú, a primeira Norma de construção em terra foi publicada em 1985, como parte integrante do Código Nacional de Construção. Devido ao elevado risco sísmico que se verifica nesta região, foi necessário desenvolver directrizes que permitissem ter em conta estas solicitações, surgindo em 2000, a “Norma Técnica de Edificación E.080 Adobe”,

actualmente em vigor, que se foca apenas na utilização dos blocos de adobe, estabilizados ou não, para construções de alvenarias de terra, assim como as suas características mecânicas, comportamento e dimensionamento (Cid et al., 2011).

Em 2001, foi lançado o primeiro documento para este tipo de construção no Zimbabwe, intitulado “Zimbabwe Standard Code of Practice for Rammed Earth Structures” (SAZS 724), fazendo deste o único país africano com regulamentação nesta área na altura. Este código, baseado em grande parte nos princípios estabelecidos no “Code of Practice for Rammed Earth Structures”, fornece orientações relativamente a especificações de materiais a utilizar, elementos de cofragem adequados, dimensionamento de fundações, resistências à compressão, estabilidade estrutural, pormenorização e acabamentos em paredes de terra, entre outros (SAZS 724, 2001).

Ao longo dos últimos anos, tem-se verificado um aumento gradual da regulamentação específica para a construção em terra, procurando-se desenvolver normativas que permitam uma adequada avaliação relativamente a tópicos como as propriedades dos materiais, sistemas de construção, dimensionamento de elementos estruturais, durabilidade ou economia, e ao mesmo tempo tenham em conta as preocupações ambientais. No entanto, constata-se que a legislação existente ainda é escassa, estabelecendo critérios para apenas uma ou duas técnicas, e que há uma grande disparidade de critérios, terminologia e informação técnica entre as normas vigentes dos diferentes países, como por exemplo, ao nível dos resultados obtidos para um mesmo material utilizando o mesmo procedimento de ensaio definido em cada norma (Silva, 2015). Deste modo, pode afirmar-se que a regulamentação para a construção em terra ainda tem um longo caminho a percorrer, sendo necessária uma cooperação entre os diversos países e um investimento em estudos e projectos que permitam a criação e revisão de normas, contribuindo assim para uma homogeneização dos requisitos para a construção em terra.

### 3. SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

#### 3.1. Introdução

O solo é um recurso natural que cobre grande parte da superfície da terra, e que ao longo da História tem sido utilizado para os mais diversos fins construtivos pelas diferentes civilizações. Este recurso pode definir-se como todo o material da crosta terrestre composto por elementos minerais e orgânicos, resultantes de processos de decomposição física e química das rochas devido à acção de uma grande diversidade de factores associados a agentes de degradação como o clima do local, estrutura da rocha-mãe, elevadas temperaturas e pressões no interior da crosta terrestre, entre outros (Falcão, 2014 e Fernandes, 2006).

Os solos, na sua essência, são constituídos por matéria gasosa e líquida que vão preencher os vazios, designados por poros, e matéria sólida proveniente dos fenómenos de decomposição da matéria orgânica e mineral referida anteriormente. No âmbito desta tese, a fracção do solo em maior evidência é a mineral, pois é esta a parte integrante do material utilizado na construção, sendo constituída em proporções variáveis de areia, silte e argila, que dependendo dessa proporção e do teor em água, apresentam diferentes comportamentos. A matéria orgânica não se enquadra neste panorama, devendo o seu uso ser evitado, pois contribui para uma redução das capacidades do solo enquanto material construtivo (Gomes, 2015).

As argilas resultam da alteração de rochas ricas em silicatos de alumínio, e correspondem à fracção mais fina do solo, com uma estrutura lamelar, sendo a responsável pela sua coesão, devido às elevadas forças de atracção existentes entre as partículas, e plasticidade, que permite dotar o solo de uma maior capacidade de ser trabalhado e modelado, sob certas condições de humidade. A proporção de argila e o teor em água devem ser bem calibrados, permitindo obter uma mistura que promova a agregação entre os diferentes elementos e facilite a sua preparação, e ao mesmo tempo evite ou retarde os fenómenos de fendilhação durante a secagem (Eusébio, 2001).

As areias são partículas inertes, devido à presença de minerais quartzo, que quimicamente são muito estáveis (Fernandes, 2006), e mais grossas que a argila, com dimensões de 0,06 a 2 mm, e que vão conferir resistência e diminuir a fendilhação por retracção do produto final. Os siltes são fracções de areia muito finas, com dimensões entre 0,002 e 0,06 mm, com boa coesão quando húmido, devido à sua elevada capacidade de retenção de água (Falcão, 2014).

O solo é constituído por diversas camadas, de diferentes propriedades. Na escolha do solo para utilizar em fins construtivos, deve-se optar por uma composição sem matéria orgânica, que apresenta uma natureza extremamente instável e afecta a resistência de uma construção, devendo para esse efeito realizar-se a extracção do solo abaixo dessa camada. Idealmente, o

solo a utilizar deve ser aquele que se encontra nas proximidades do local da obra, sendo necessário submetê-lo a uma série de ensaios que permitam analisar as suas propriedades, e avaliar a técnica construtiva que melhor se adequa. Na eventualidade de o solo não corresponder aos requisitos exigidos, este pode ser melhorado ou ainda optar-se pela utilização de um solo proveniente de outro local, dependendo das propriedades desejadas e dos custos de operação associados (Falcão, 2014).

Na preparação do solo, este deve ser submetido a um processo de triagem, moagem e peneiração, de forma a separar os elementos indesejáveis, reduzir os grumos de argila e garantir a sua homogeneidade. Procede-se depois à sua mistura com os restantes elementos (agregados, estabilizantes, etc.), sendo que este processo era realizado tradicionalmente de forma manual. Actualmente, pode ser efectuado por processos mecânicos, que garantem um maior controlo da consistência e qualidade da mistura. Em ambos os processos, é adicionada água até se atingir o teor de humidade pretendido, o que permite tornar a mistura mais maleável, trabalhável e fácil de aplicar (Falcão, 2014).

O conhecimento das características do solo para a construção em terra reveste-se de grande importância, devendo ser realizado um estudo e análise que permita a sua caracterização, com recurso a ensaios específicos para o efeito.

### **3.2. Ensaios Laboratoriais e de Campo**

Na construção em terra, a estabilidade e o bom desempenho da estrutura durante a sua vida útil depende essencialmente das qualidades do solo enquanto matéria-prima. Sendo assim, a sua escolha assume-se como um factor de importância elevada, devendo-se proceder a uma análise das suas características, de modo a verificar a sua aptidão como material de construção e o processo construtivo a que melhor se adequa. Neste sentido, são realizados ensaios no local da obra ou em laboratório, que permitem identificar e classificar o solo em estudo, em função de propriedades como a granulometria, a plasticidade, compressibilidade e a coesão.

#### **3.2.1. Ensaios Expeditos ou de Campo**

Os ensaios expeditos ou de campo permitem avaliar, de uma forma fácil e rápida, se um solo disponível no local é apropriado para construção, dispensando eventualmente a necessidade de análise em laboratório, que são dispendiosas (Falcão, 2014). Alguns dos processos utilizados nesta avaliação são os seguintes:

- **Observação de cor:** a cor de um solo é dos primeiros indícios da sua eventual composição, e que mais se destaca. Sendo assim, se um solo apresenta uma cor escura significa que é constituído por matéria orgânica; solos vermelhos, amarelos e pardos indicam a presença de óxidos; e uma cor pálida pode ser provocada por areias quartzosas ou feldspáticas (Gomes, 2008);

- **Teste do Cheiro:** é realizado no momento de extracção do solo, e permite a identificação da presença de matéria orgânica, através do cheiro que o solo emana, que se intensifica com o aumento de temperatura (Ferreira, 2012);
- **Teste ao tacto:** esfrega-se amostra de terra entre os dedos e a palma da mão, após serem removidas as partículas de maiores dimensões. Se a sensação for áspera e rugosa e a amostra não apresentar coesão, então é um solo arenoso; se apresenta alguma rugosidade e fica plástica com a adição de água, é um solo siltoso; se quando humedecida ficar plástica e pegajosa, resistindo ao esmagamento quando seco, o solo é argiloso (Gomes, 2008 e Moreira, 2008);
- **Teste da Aderência:** Se o solo apresenta resistência e adere à faca ou espátula, a fracção argilosa é alta; Caso o material usado penetre facilmente então este é essencialmente saibroso (Moreira, 2008);
- **Teste de Sedimentação:** permite distinguir os diferentes componentes do solo e consiste na colocação de uma porção de terra num frasco, ao qual se adiciona água. Agita-se o frasco com a solução, deixando-o a repousar. Finda esta fase, as partículas começam a assentar, verificando-se uma definição inicial das diferentes camadas, em que as partículas que estão depositadas no fundo do frasco correspondem a saibros, aos quais se seguem as de silte e de argila. Posteriormente, medem-se as respectivas alturas e avaliam-se as diferentes camadas (Gomes, 2008 e Ferreira, 2012);
- **Teste Visual por Peneiração Expedita:** neste ensaio recorre-se à utilização de peneiros, correspondentes ao nº200 e nº10 da série ASTM, e o solo avaliado deve estar seco e completamente solto. Inicialmente o solo é passado no nº200, e posteriormente pelo nº10, as partículas que ficaram retidas no anterior. No caso de o material retido no peneiro nº200 ser menor que o passado, o solo é argiloso, caso contrário é arenoso ou pedregoso. No material que passa pelo peneiro nº10, se a fracção que ficou retida é superior à que passa, o solo será pedregoso. Caso contrário, o solo apresenta-se como arenoso (Ferreira, 2012 e Gomes, 2008);
- **Teste de Retenção de Água:** molda-se uma bola de solo do tamanho de um ovo, adicionando-lhe água suficiente que a mantenha coesa e sem ser pegajosa. Em seguida, a bola deve ser sujeita a golpes fortes, até se verificar a presença de água à superfície. Se aparecer após 5 a 10 golpes, estamos na presença de uma areia fina ou um silte grosso; no caso de a água desaparecer após 20 ou 30 golpes, e a bola apresentar relativa maleabilidade, o solo é um silte ligeiramente plástico ou uma argila. Por fim, se após 30 golpes não se verificar qualquer reacção, significa que o solo tem um elevado teor de argila (Gomes, 2008);

- **Teste de Resistência à secagem:** recorre-se a porções do material peneirado no ensaio anterior, e procede-se à sua humidificação, moldando-os com um formato cilíndrico, com cerca de 1 cm de espessura e 5 cm de diâmetro, e seca-se ao sol ou em estufa. Após a secagem, e comprimindo cada cilindro entre o polegar e o indicador, avalia-se a sua dureza, e se a amostra não se desfizer, o solo em estudo é uma argila praticamente pura; se for necessário um grande esforço para a desfazer, o solo será uma argila arenosa ou siltosa. Por fim, se desfizer com relativa facilidade, o solo será uma areia ou silte com baixo teor de argila (Moreira, 2008 e Ferreira, 2012).
- **Teste do Rolinho:** neste ensaio, uma fracção de solo é humedecida com água, de maneira a formar uma bola do tamanho de uma azeitona, que é alisada sobre uma tábua, até quebrar com exactamente 3mm de diâmetro. Atingido este patamar, restitui-se a bola, pressionando-a em seguida entre o polegar e o indicador. Se o esmagamento for de difícil execução, e esta não fissurar, então o solo apresenta um elevado teor de argila; caso contrário, o solo contém uma quantidade reduzida de argila; se romper antes de se formar novamente a bola, o solo apresenta um elevado teor em silte ou areia; se a bola apresentar um carácter esponjoso e suave, então trata-se de um solo orgânico (Gomes, 2008 e Moreira, 2008).

### 3.2.2. Ensaio Laboratoriais

Os ensaios de laboratório são realizados em função dos resultados observados nos ensaios de campo, permitindo quantificar de forma mais rigorosa e fiável o solo, e reunir informação complementar sobre as suas propriedades. Pode recorrer-se aos seguintes ensaios:

**Análise Granulométrica:** A granulometria define a natureza e a quantidade de agregados de um solo, sendo necessário estudar a proporção com que estes se distribuem de forma a identificar a composição de um determinado solo. Em laboratório, a análise da composição granulométrica é realizada para agregados com dimensões superiores a 0,074 mm, recorrendo-se a ensaios de peneiração, com peneiros da série ASTM, através de ensaios de sedimentação, para partículas com dimensões inferiores a 0,074 mm, em que estes agregados são colocados à superfície de uma solução de água destilada, analisando-se a velocidade a que se desenvolve o processo de sedimentação para as diferentes partículas (Torgal et al, 2009).

**Limites de Consistência:** Os limites de consistência permitem avaliar o comportamento de solos finos quando sujeitos a diferentes teores em água, sendo possível definir de forma aproximada a plasticidade e consistência do solo. Este estudo reveste-se de grande importância, na medida em que as argilas, consoante o seu teor em água, podem sofrer variações volumétricas, o que condiciona a estabilidade de um solo. Os diferentes estados do solo em função da quantidade de água, são definidos segundo os limites de liquidez (LL), de plasticidade (LP) e de retracção (LR), como se verifica na Figura 3.1.

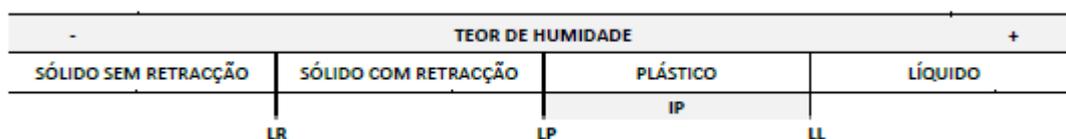


Fig. 3.1 – Limites de Consistência (Falcão, 2014)

O índice de plasticidade (IP), representa a capacidade de absorção de água do solo e a sua consistência. No Quadro 3.1 apresenta-se uma classificação do solo em função deste parâmetro.

Quadro 3.1 – Classificação dos solos em função do Índice de Plasticidade (baseado em Minke, 2006)

TIPO DE SOLO	IP = LL - LP
Arenoso	<5
Siltoso	5-15
Argiloso	15-95

Também é recorrente a avaliação de outras propriedades, como a actividade da argila (Ac), que exprime a maior ou menor retracção do solo, e a retracção relativa (RR) que define a amplitude de variação volumétrica para cada solo (Gomes, 2008). Estas classificações podem ser observadas nos seguintes quadros:

Quadro 3.2 – a) Actividade da Argila; b) Retracção Relativa do solo (baseado em Torgal et al., 2009)

Tipo de Argila	Ac = IP / (% argila < 0,002 mm)
Pouco Activa	Ac < 0,75
Normalmente Activa	0,75 < Ac < 1,25
Activa	1,25 < Ac < 2
Muito activa	Ac > 2

a)

Classificação do Solo	RR (%)
Susceptível a forte retracção	>70
Retráctil	50-70
Retracção fraca	<50

b)

**Compactação (Proctor):** Os ensaios de Proctor permitem determinar a quantidade de água ideal a adicionar à mistura de solo de forma a promover uma compactação adequada deste em obra, sendo esta quantidade ideal definida como “teor em água óptimo”, ao qual se encontra associado um peso volúmico seco máximo. O ensaio de Proctor, de acordo com Fernandes (2011), assume assim grande importância, pois permite definir qual o tipo e a energia de compactação adequada a aplicar a um certo solo nas construções em terra, permitindo assim melhorar as suas qualidades e o seu desempenho. Dependendo da energia de compactação e

do molde utilizado, podem definir-se dois tipos de compactação: Proctor Normal (Compactação leve) e Proctor Modificado (Compactação pesada).

### 3.3. Estabilização

#### 3.3.1. Introdução

Os ensaios (expeditos e laboratoriais) descritos permitem verificar se o solo em estudo possui as características adequadas para a sua utilização em obra. No entanto, em determinadas situações, o solo apresenta limitações quer ao nível da resistência mecânica, da coesão ou da retracção, sendo necessário recorrer a métodos que permitam melhorar o seu desempenho, designados de estabilização, que segundo Moreira (2008), podem ser de origem:

- **Mecânica:** permite melhorar as características dos solos através da densificação por compactação e da adição de fibras;
- **Física:** em que o solo é melhorado procedendo-se a uma correcção granulométrica, alterando a sua composição;
- **Química:** consiste na introdução de aditivos (cal, cimento, activação alcalina, etc.) que alteram as propriedades do solo através de reacções químicas.

Estes 3 tipos de estabilização focam-se essencialmente no aumento da resistência mecânica, à erosão e da coesão, e na redução da porosidade e consequentemente das variações volumétricas (retracção e expansão) dos solos.

#### 3.3.2. Compactação

A compactação é um processo mecânico, que envolve a redefinição da estrutura do solo, onde o ar existente nos vazios é expulso, sem variação significativa do teor em água, promovendo o aumento da área de contacto entre as partículas sólidas, tornando-o mais denso, o que se traduz num aumento da sua resistência e na diminuição da sua deformabilidade e permeabilidade. A estabilização mecânica pode ser realizada recorrendo a diversos métodos de compactação, nomeadamente: Estática, Dinâmica ou de impacto ou por vibração (Moreira, 2008 e Santos, 2008).

Em geral, para uma mesma energia de compactação, os solos arenosos com granulometria mais extensa, atingem densidades secas mais elevadas para teores de água óptimos mais reduzidos, do que os solos argilosos, de carácter mais plástico. Em solos granulares sem finos (areias e cascalhos), a sua elevada permeabilidade leva a que a influência do teor em água seja reduzida, verificando-se que a densidade máxima do solo atingida é semelhante, quer na situação em que o solo está completamente seco ou próximo da saturação. Este efeito pode ser

explicado pela acção de tensões capilares que se desenvolvem entre as partículas para reduzidos teores de água, o que dificulta o reajustamento destas (Fernandes, 2011).

### **3.3.3. Adição de Fibras**

A aplicação de fibras no reforço de solos é uma técnica ancestral, encontrando-se indícios do seu uso em construções como a Grande Muralha da China, as muralhas da Mesopotâmia ou em estradas construídas pelos Incas, no Perú (Sales, 2011). As fibras podem ser de origem natural ou sintética, e a sua incorporação no solo permite a criação de uma malha estrutural de reforço, que lhe confere um conjunto de capacidades que melhoram o seu desempenho, quer ao nível de resistência mecânica, quer a fenómenos de retracção que ocorrem durante a secagem. Permite igualmente uma redistribuição de tensões pela massa do solo, o que reduz a probabilidade de abertura de fendas (Falcão, 2014).

As fibras naturais foram as primeiras a ser utilizadas no reforço de solos, e podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. Actualmente, com as preocupações crescentes com o meio ambiente, o interesse na sua aplicação tem crescido, pois apresenta-se como um recurso abundante, biodegradável e facilmente reciclável. No entanto, degradam-se facilmente quando expostas a ambientes húmidos, por longos períodos de tempo. As fibras correntemente mais utilizadas são a palha, madeira ou bambu, sendo que a utilização de outras fibras naturais tem vindo a ser investigada, como é o caso do aproveitamento de desperdícios decorrentes do processo de fabrico de lãs ou de cabelos (Duarte, 2013).

Relativamente às fibras sintéticas, estas foram desenvolvidas com o objectivo de melhorar certas características, como a capacidade mecânica ou a estabilidade térmica, em relação às fibras naturais, podendo ser divididas em poliméricas (polipropileno, polietileno, etc.), inorgânicas (de carbono, vidro, etc.) e metálicas. As fibras sintéticas são normalmente produzidas através de processos químicos, sendo possível fabricar uma vasta gama de materiais com diferentes configurações de resistência (Fibrenamics@, 2016).

No processo de estabilização, as fibras devem ser adicionadas durante a preparação da terra, distribuindo-as aleatoriamente. Pretende-se reforçar a estrutura, i.e., aumentar a resistência à compressão e tracção, e diminuir a possibilidade de propagação de fendas. Para além disso, as fibras permitem melhorar o comportamento térmico e acústico do solo (Duarte, 2013).

A fibra de cabelo é composta por um grupo de proteínas cuja componente principal é a queratina, uma proteína estrutural, e formada por longas cadeias de aminoácidos interligadas numa disposição helicoidal. Destes aminoácidos, o mais importante é a cistina, que confere aos cabelos as suas propriedades mecânicas (resistência, elasticidade, etc.), devido à rede complexa e de elevada densidade desenvolvida pelas interacções de pontes de dissulfeto (ligações S-S), o seu principal constituinte (The Hair, 1984).

Um fio de cabelo é composto essencialmente pela camada mais externa, a cutícula (representa cerca de 10%), o córtex, região que apresenta a maior massa (88%) e a membrana celular (2%), como ilustrado na Figura 3.2, podendo em certas situações, incluir-se uma outra componente na região central do interior da fibra, a medula.

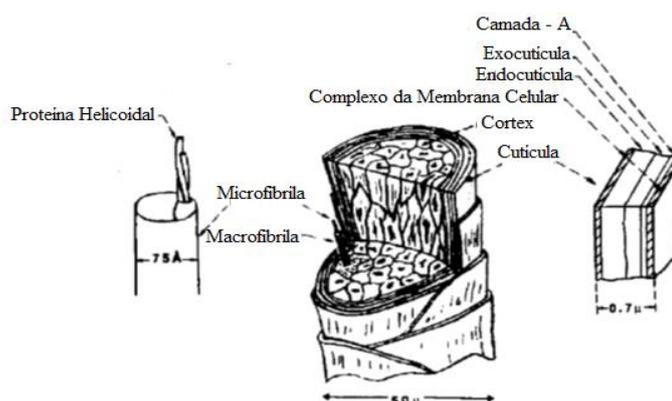


Fig. 3.2 – Estrutura da fibra de cabelo (Inácio, 2016)

A cutícula é constituída por uma sobreposição de camadas de base proteica, e funciona como principal barreira de protecção do fio de cabelo, limitando a acção de agentes exteriores, como os raios UV ou a humidade, permitindo manter as suas propriedades inalteradas. O córtex é formado por feixes de queratina e de grânulos de melanina, sendo responsável pelas propriedades mecânicas demonstradas pelos cabelos, além de contribuir para a sua cor e fotoprotecção. A membrana celular é responsável pela ligação entre as células cuticulares e as pertencentes ao córtex (Sales, 2011).

A fibra de cabelo é muito variável, apresenta secção transversal ligeiramente elíptica, podendo apresentar características intrínsecas distintas, de região para região, e de acordo com as etnias, podendo distinguir-se três tipos (Maciel, 2011): Caucasiano (diâmetro é da ordem dos 29 a 96  $\mu\text{m}$ ), Africano (diâmetros entre 46 e 120  $\mu\text{m}$ ) e Asiático (diâmetros entre 36 e 125  $\mu\text{m}$ ).

O estudo das fibras de cabelo como material de reforço é recente, não existindo ainda uma avaliação concreta sobre as suas potencialidades efectivas na melhoria dos materiais para construção em terra, sendo este o principal objectivo desta dissertação. Neste sentido, torna-se importante conhecer o comportamento de um material, enquanto elemento de reforço, quando sujeito a solicitações externas, podendo este ser descrito pelo seu diagrama tensão-extensão (Fig. 3.3). Observando o diagrama podem definir-se três regiões características: a Hookeana, de Reconstituição e de Rotura. A região Hookeana, até 2% de deformação (A-B), apresenta

um comportamento praticamente linear e elástico. Neste intervalo é possível avaliar o módulo de elasticidade (E) da fibra de cabelo através da inclinação da curva (Sales, 2011). Na região de reconstituição, entre 2% - 30% (B-C), a deformação aumenta para uma pequena variação de tensão. Nesta fase, os fios de cabelo podem recuperar das deformações sofridas após um intervalo de 24 h, onde se encontra submerso em água, ou sob a acção de uma temperatura de 54° C, durante uma hora (Tucci, 1989). A partir dos 30% de deformação (D), verifica-se um endurecimento das cadeias de queratina constituintes das fibras, até à rotura (E).

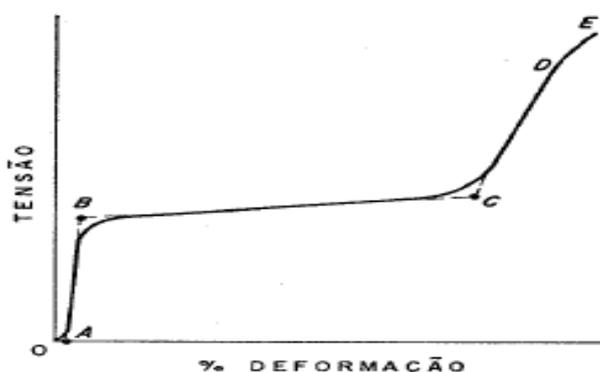


Fig. 3.3 - Curva tensão-extensão (Sales, 2011)

De um modo geral, pode afirmar-se que o cabelo apresenta bons índices de elasticidade, sendo capaz de recuperar as deformações sofridas até determinado nível, podendo estas propriedades ser influenciadas por factores como o tipo e forma do cabelo, o tamanho, o comprimento ou o grau de desgaste destes, visto ser um tipo de fibras com características muito variáveis, e que não se encontra devidamente normalizada.

Em termos de resistência à tracção, segundo um estudo realizado por Sales (2011), a fibra de cabelo atingiu valores a variar entre os 130 e os 317 MPa. Desta forma, e comparando com outros estudos para diferentes materiais, como a fibra de coco, que apresenta uma resistência entre 65-250 MPa, o sisal com cerca de 350 MPa (Silva, 2010), ou as fibras de aço comercial que oscilam entre 370 e 520 MPa (Sales, 2011), verifica-se que os fios de cabelo apresentam valores interessantes de resistência à tracção, suportando níveis de tensão similares aos elementos de reforço naturais correntemente utilizados, mas ainda assim inferiores à resistência evidenciada pelo aço comercial.

Deste modo, pode afirmar-se que as fibras de cabelo possuem um conjunto interessante de características que justificam o seu estudo como elemento de reforço, para além de constituir um recurso abundante e actualmente sem destino final, inserindo-se na temática de sustentabilidade abordada no presente trabalho, o que nos dias de hoje assume um papel de destaque.

### 3.3.4. Correção Granulométrica

A estabilização do solo através de uma correção granulométrica é realizada alterando a distribuição das suas partículas, procedendo a uma correção na sua proporção, tendo em conta a sua curva granulométrica e adequando-a às exigências específicas associadas a cada técnica de construção, de modo a criar um conjunto mais denso e estável. Os solos que apresentam excesso de partículas de argila, ou reduzida quantidade de areia, podem ser corrigidos recorrendo à mistura de diferentes tipos de solos, à adição de inertes como a areia, gravilha ou outros agregados de maiores dimensões (a percentagem a utilizar depende da granulometria pretendida) ou à lavagem dos finos. Este método é utilizado apenas em solos muito ricos em finos, como as argilas, pois no caso das areias este método provoca a remoção de agregados mais finos, necessários para preencher os vazios entre os agregados de maiores dimensões.

Em solos que apresentam areia em excesso, deve-se recorrer a processos que promovam a união entre as partículas, como a estabilização química ou adicionando argila. No caso de o solo conter elevada quantidade de agregados grossos, a sua remoção pode ser realizada através de peneiração (Falcão, 2014).

### 3.3.5. Aditivos

A introdução de aditivos no solo, conhecida como estabilização química, permite ultrapassar situações associadas a um fraco desempenho do solo, e consiste na cimentação das partículas de solo entre si, através de reacções químicas, melhorando as suas propriedades resistentes (Duarte, 2013). Neste tipo de estabilização podem ser utilizados vários tipos de aditivos, sendo os mais comuns a cal, o cimento ou o betume.

A cal é um dos ligantes mais antigos (empregue por Gregos e Romanos) e mais utilizados na construção, até ao aparecimento do cimento. Pode ser classificada em cal hidráulica ou aérea, quando o teor em carbonato de cálcio é superior a 95 %. Embora menos eficaz, a cal apresenta um carácter mais sustentável, pois as exigências energéticas e a poluição originada na produção de cimento são superiores (Gomes, 2015).

Independentemente do tipo de cal utilizado, o processo de formação é idêntico, resultando da cozedura de calcários a altas temperaturas (entre 800 e 900°C), em que ocorrem variações dos teores de carbonato de cálcio (Falcão, 2014). Quando a cal é incorporada num solo, com um certo teor de humidade e de partículas de argila, vão ocorrer reacções químicas que desencadeiam um conjunto de processos que permitem a interligação entre as partículas do solo, aumentando a sua resistência. Na estabilização com cal ocorrem essencialmente três tipos de reacções: permuta iónica e floculação, cimentação (ou reacção pozolânica) e carbonatação (Pereira, 2013a).

O cimento é o ligante mais utilizado actualmente, sendo o do tipo Portland o mais usual no processo de estabilização. Resulta da cozedura de uma marga calcária, a temperaturas entre 1300-1500°C. A presa do cimento ocorre por reacções de hidratação, mesmo em ambientes húmidos, conferindo elevadas resistências aos elementos com que interage (Gomes, 2015).

O processo de estabilização com cimento consiste essencialmente na elaboração de uma mistura de solo pulverizado com cimento e água, devidamente calibrada, sendo que em função do teor utilizado deste ligante, este processo pode conduzir a diferentes tipos de comportamento. Se os teores de cimento são reduzidos, verifica-se uma diminuição da sua plasticidade, devido a alterações na fracção argilosa, que podem eventualmente ser acompanhadas pelo aumento da resistência mecânica. Para teores superiores, vai ocorrer a formação de núcleos que se interligam ao longo da massa de solo, permitindo a sua cimentação, que se traduz num aumento da sua resistência. Após a mistura, os blocos de terra produzidos devem ser mantidos húmidos e a acção do sol deve ser limitada pelo menos durante 7 dias, de modo a ocorrer uma correcta hidratação do cimento (Torgal et al, 2009).

O mesmo autor refere que neste procedimento, tal como na estabilização com cal, o teor de cimento a adicionar depende do tipo de solo, sendo normalmente obtidos bons resultados com valores entre 6-10% de estabilizante. A quantidade de água a utilizar na mistura deve corresponder ao teor em água óptimo para a compactação, obtido através de ensaios (Torgal et al, 2009). Normalmente, o uso de cimento como estabilizante é o mais indicado para solos de maior granulometria, facilitando o processo de cimentação, e solos com reduzidos teores em argila, pois a acção do cimento fica limitada, devido à formação de grumos, que dificultam a criação de uma mistura homogénea. A incorporação deste ligante no solo permite aumentar consideravelmente a sua resistência e durabilidade, assim como reduzir os efeitos das variações de volume a que o solo está sujeito (Falcão, 2014).

Segundo Lourenço et al. (2002), outros materiais podem ser utilizados para a estabilização de solos, como o betume, tendo surgido nos últimos anos o estudo de soluções alternativas aos métodos já existentes, como é o caso da utilização de geopolímeros, de produtos naturais (à base de óleos e gorduras, cabelos, etc.) e sintéticos (gesso, latéx, etc.).

### **3.4. Sustentabilidade**

#### **3.4.1. Introdução**

A dependência pelos recursos naturais manifestou-se em maior escala na época da Revolução Industrial com o desenvolvimento económico e o intenso crescimento populacional. Verificou-se uma administração e consumo destes recursos sem contemplações, relegando

para segundo plano as preocupações ecológicas e de equilíbrio ambiental (Pereira e Vieira, 2013).

Esta tendência manteve-se ao longo de décadas, onde a total falta de preocupação e consciência ambiental levou ao aparecimento de grandes desequilíbrios no Planeta. Contudo, nos últimos anos, tem-se verificado um despertar ecológico para esta problemática, numa tentativa de inverter esta tendência através da definição e implementação de políticas e sistemas que permitam proteger o ambiente e promover um desenvolvimento sustentável.

Este conceito tem vindo a ganhar uma maior dimensão e acreditação nos últimos tempos por parte da sociedade, que considera este o caminho para a resolução das questões ambientais, sociais e económicas mundiais, tendo sido mencionado pela primeira vez no Relatório Brundtland – Our Common Future – em 1987, que resultou do trabalho de investigação iniciado pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente da ONU, em 1984. Neste relatório, o desenvolvimento sustentável é definido como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades actuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras para satisfazerem as suas próprias necessidades” (Mateus, 2004).

Desde então, têm sido realizadas outras cimeiras e conferências que promovem um debate e definição de novas medidas e metas a serem legisladas e cumpridas, a nível internacional e nacional, e que permitam uma mudança nas políticas e atitudes perante o meio ambiente. Em Portugal, em 2002, iniciou-se a elaboração e coordenação de um plano designado de Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (ENDS), tendo sido publicado em 2007, com várias actualizações, sendo a última de 2015. Este documento define um conjunto de planos de acção, envolvendo organismos, serviços e entidades portuguesas, para assegurar um desenvolvimento económico, social e ambiental equilibrado (Mota et al., 2002).

Resumindo, o desenvolvimento sustentável pretende promover um equilíbrio saudável entre o crescimento económico, protecção do ambiente e de equidade social no presente, para que as gerações futuras possam usufruir e desfrutar das mesmas oportunidades e qualidade de vida actuais, sendo estes os três pilares em que assenta este modelo de desenvolvimento: económico, social e ambiental (Neves, 2011).

#### **3.4.2. Sector da Construção**

Como referido anteriormente, ao longo das últimas décadas o equilíbrio do Planeta Terra tem vindo a sofrer perturbações decorrentes das políticas adoptadas pelas sociedades, nomeadamente ao nível do consumo de recursos naturais. Devido ao aumento do nível de vida e crescimento da população, a necessidade destes recursos aumentou exponencialmente, assim como os efeitos nocivos para o meio ambiente, devido ao aumento de emissões de CO<sub>2</sub> ou à desflorestação, provocados pela sua exploração desenfreada.

Os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera têm vindo a aumentar a um elevado ritmo, principalmente devido à combustão de combustíveis fósseis (petróleo, carvão, etc.). As previsões estimam que estas emissões atinjam 40.200 milhões de toneladas em 2030, enquanto no início da Revolução Industrial eram praticamente nulas (Mália, 2010).

Neste contexto, o sector da construção, um dos maiores e mais activos sectores, responsável pelo desenvolvimento económico e social dos países (representando cerca de 28,1% do emprego na indústria e 7,5% em toda a economia europeia), assume um papel relevante na degradação do meio ambiente, devido aos elevados níveis de CO<sub>2</sub> emitidos nos processos utilizados, do consumo de matérias-primas (em média 3000 ton/ano) e a produção de resíduos (cerca de 450 milhões ton/ano na UE) associados a este ramo (Torgal e Jalali, 2011b).

Esta indústria representa aproximadamente 10 % das emissões totais de CO<sub>2</sub>, verificando-se que uma grande quota-parte se encontra associada à produção de betão, o material de construção mais utilizado no mundo desenvolvido. O betão, produzido com cimento, surgiu nos finais do séc. XIX e era considerado a resposta às cada vez maiores exigências funcionais dos materiais em termos de economia, resistência e durabilidade. Ao longo dos tempos, verificou-se que este material apresentava certas limitações, nomeadamente ao nível ambiental, devido ao elevado consumo energético necessário para o seu fabrico, de recursos naturais (cerca de 1.000 milhões toneladas de água, 1500 milhões de toneladas de cimento e 10.000 milhões de toneladas de agregados à escala mundial, a cada ano) e de fraca aptidão para voltar a ser reutilizado (Mateus, 2004). Das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da sua produção, estima-se que cerca de 85% resultam do fornecimento de cimento (devido às actividades ligadas aos processos de extracção, processamento e produção), e os restantes 15% resultam dos processos associados à utilização de agregados (Mália, 2010).

Durante o seu ciclo de vida os edifícios englobam diferentes fases, nomeadamente: Concepção, Construção, Operação e de Fim de Vida. Os resíduos produzidos em cada fase constituem uma parcela importante dos problemas ambientais relacionados com o sector da construção, sendo designados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Na UE a produção dos RCD podem atingir milhões de toneladas por ano, sendo que Portugal contribui com aproximadamente 7,5 milhões de toneladas para este fluxo, que constitui cerca de 20% do total de resíduos produzidos no país (Mália, 2010).

Um dos grandes problemas relacionados com a produção destes resíduos é a sua gestão, pois na maior parte dos casos estes não podem ser reaproveitados, sendo depositados em aterros ou lixeiras, sem serem alvo de qualquer tipo de tratamento ou aproveitamento, o que coloca em causa não apenas o ambiente, mas também a saúde pública, devido à sua enorme toxicidade que pode causar a contaminação de solos, lençóis de água e do ar. Actualmente, já existe uma

consciencialização das empresas e governos para a necessidade de gestão destes resíduos, tendo sido estabelecidas directrizes que permitem a sua “correcta” gestão (APA@, 2017).

Da análise do que foi mencionado, podemos afirmar que o sector da construção revela-se como uma das actividades mais prejudiciais à manutenção de um equilíbrio ambiental saudável. Neste sentido, o sector tem, nos últimos anos, sido alvo de uma tentativa de remodelação destas políticas, de modo a enquadrar-se nas linhas de pensamento actuais, que defendem uma maior sustentabilidade do sector nas operações de concepção, construção, operação e demolição, através de um dimensionamento de infra-estruturas auto-suficientes e uma construção que implique uma menor quantidade de recursos naturais e emissão de poluentes, e tentando um reaproveitamento dos RCD (Mália, 2010).

Esta tipologia de construção é designada de construção sustentável, e tem por base os princípios defendidos pelo desenvolvimento sustentável, sendo que a sua linha de actuação deve abranger as suas três frentes de acção: económica, social e ambiental. Este conceito, foi definido pela primeira vez por Charles Kibert em 1994, na 1ª Conferência Internacional sobre construção sustentável patrocinada pela CIB, em Tampa, na Florida, como “a criação e gestão responsável de um ambiente construído saudável, tendo em consideração os princípios ecológicos e a utilização eficiente dos recursos” (Neves, 2011).

Este modelo deve assentar num conjunto de princípios e acções que devem ser aplicados, ao nível dos materiais de construção, dos produtos utilizados ou dos processos construtivos ou de desmantelamento, a todas as fases do ciclo de vida de uma estrutura, devendo igualmente permitir manter as tradições construtivas onde as estruturas se inserem, contribuindo para a preservação dos valores culturais, sociais e arquitectónicos da zona (Inácio, 2016). Actualmente, já existem normativas e sistemas informáticos, a nível nacional e internacional, que têm vindo a ser desenvolvidas e adaptadas ao sector da construção, tendo em conta as bases do crescimento sustentável (APA@, 2017).

Resumindo, o sector da construção deve adoptar certas medidas, como a utilização de tecnologias e materiais de construção, que lhe permitam ser mais compatíveis, nomeadamente do ponto de vista do equilíbrio ambiental, em relação às metodologias convencionais. É nesta vertente que se enquadra a utilização do solo como material de construção, cujas propriedades e grande versatilidade de utilização, o tornam competitivo em relações aos materiais e técnicas de construção convencionais (Pereira, 2013a).

### **3.4.3. Solo como material de Construção Sustentável**

Um dos grandes problemas associados ao sector construtivo são os consumos energéticos nas diferentes fases de ciclo de vida de uma estrutura, que contribuem de forma decisiva para a degradação ambiental. A utilização do solo enquanto material de construção apresenta um

conjunto de virtudes, que o tornam um recurso com elevado potencial na resposta às necessidades ambientais e energéticas actuais.

Na construção em terra, e assumindo que o solo é extraído no local ou nas proximidades da obra, verifica-se que os gastos energéticos associados aos processos de extracção de solo e produção de blocos são muito reduzidos, em relação a soluções em betão ou tijolo, pois não implicam elevadas necessidades de transporte e o seu processamento é tradicionalmente manual, apesar de actualmente já se recorrer a processos mecânicos, onde os gastos energéticos também são inferiores aos dos processos usuais.

Outro factor que contribui para um baixo consumo de energia é o processo de cura, em que a energia utilizada na maioria dos casos é a solar, o que contribui também para uma diminuição das emissões poluentes de CO<sub>2</sub>. Na Figura 3.4, apresenta-se uma comparação entre as diferentes metodologias, relativamente a estes consumos.

Outro aspecto relevante, é a capacidade do solo em contribuir para a melhoria da qualidade do ar interior, pois não se encontra associado a agentes nocivos, responsáveis pela contaminação do ar com compostos orgânicos voláteis (VOC's). Este tipo de construção permite igualmente controlar o nível de humidade relativa e regular a variação temperatura, o que contribui para um conforto térmico adequado (Torgal e Jalali, 2011b).

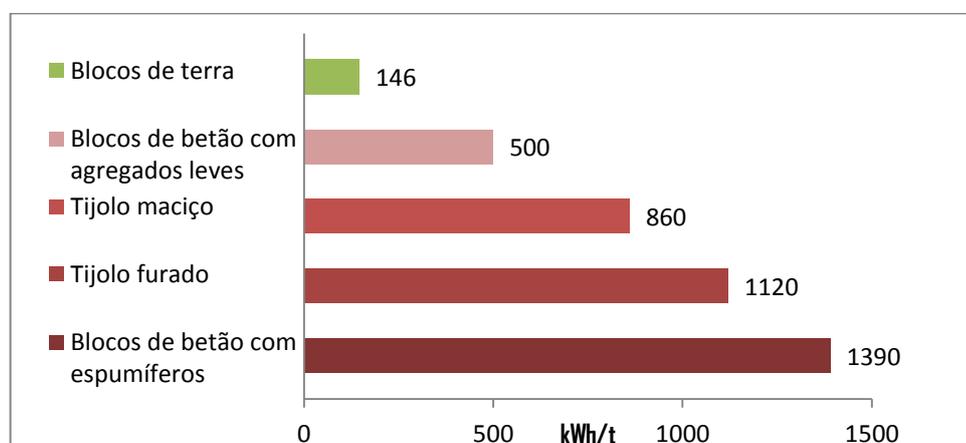


Fig. 3.4 – Energia incorporada em materiais para alvenaria (baseado em Morton et al, 2005)

Relativamente à produção de RCD de uma construção em terra, verifica-se que mesmo na situação em que o solo necessite de ser estabilizado com outros materiais, este pode ser reaproveitado, diminuindo os efeitos nocivos verificados nesta fase em relação aos materiais usuais, o que lhe possibilita ser sucessivamente reutilizada sem perder as suas características e qualidades (Inácio, 2016).

A sua simplicidade e rapidez de construção permite reduzir nos gastos energéticos e económicos, além de facilitar o cumprimento de prazos. Deste modo, podemos afirmar que o solo e as técnicas associadas a este, se assumem como uma alternativa viável aos sistemas construtivos convencionais, com um conjunto de potencialidades interessantes, começando a reunir os requisitos necessários que permitem sonhar com um futuro promissor (Torgal e Jalali, 2011b). No entanto, a transição do sector de construção para este modelo sustentável não se afigura uma tarefa fácil, apesar dos avanços da tecnologia em termos de materiais ou técnicas construtivas, ou de uma maior sensibilização dos países nestas questões, pois ainda existe uma grande desacreditação social e económica para os benefícios e viabilidade da sustentabilidade, um elevado enraizamento das soluções tradicionais, falta de apoio político e incentivos, ou ainda devido ao facto de existir legislação e normas específicas onde a passagem da teoria à prática se encontra revestida de grande complexidade.

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1. Introdução

O presente trabalho visa o estudo do comportamento de diferentes tipos de solos, com e sem reforço, com a finalidade de avaliar a sua adequabilidade como material de construção em estruturas de terra crua.

Neste âmbito, foram realizados ensaios de compressão não confinada e de corte, de provetes de terra com solo natural e com adição de fibras (cabelos), de forma a identificar o efeito que estas produzem no desempenho global destes provetes, em termos de resistência e deformabilidade. Esta avaliação destina-se a conhecer a resistência e deformabilidade dos provetes até à fase de rotura, para permitir a previsão da resistência e deformação, de modo a assegurar que não ultrapasse um valor considerado limite para a funcionalidade da estrutura, durante o seu período de vida útil. A resistência ao corte representa um dos parâmetros mais importantes dos solos, sendo neste sentido realizado um curto estudo neste campo, visto que no contexto da presente tese esta revela-se uma propriedade com certo relevo, pois as construções em terra apresentam baixos níveis de resistência a esforços horizontais. Foi ainda avaliada a influência do aumento de percentagem de fibras de 0,3% para 0,6% e o efeito que o reforço dos solos em análise representava em termos de módulo de elasticidade (E).

Complementarmente, analisaram-se diferentes condições de secagem dos provetes, sendo, numa primeira fase do estudo, a secagem efectuada em ambiente controlado (temperatura entre 20-25° C e humidade entre 50-60%). Com o objectivo de acelerar este processo, realizou-se um segundo estudo em que os provetes eram submetidos, nas primeiras 24 h, às condições referidas, e em seguida sujeitas a uma secagem em estufa, com temperaturas a variar entre os 38,5-55° C.

Uma das principais razões de enveredar por um processo de secagem distinto, e que permitisse diminuir o tempo de cura dos provetes, foi avaliar a forma como este interferia na resistência à compressão dos provetes, pois este passo é essencial na sua eficiência e qualidade, uma vez que a terra retrai quando seca, e teoricamente uma secagem mais acelerada pode promover fenómenos que afectem a sua resistência, como por exemplo, o aumento da retracção, e conseqüente aparecimento de fissuras nos provetes, o que coloca em causa a sua capacidade estrutural (Minke, 2006).

## 4.2. Materiais utilizados durante os ensaios

### 4.2.1. Solo

Os ensaios foram realizados recorrendo a dois tipos de solos com diferente composição, permitindo assim estudar a sua influência no resultado final. Os solos escolhidos foram o solo designado por E, composto por cerca de 44 % areia, 52 % silte e 4 % argila, recolhido na zona de Taveiro, e o designado por solo D, que resulta de uma mistura de solo E (50%) e Areia Siltosa (50%), recolhida na zona de Rios Frios, Coimbra, composto por cerca de 65 % areia, 32 % silte e 3 % de argila.

Os solos utilizados foram submetidos a procedimentos normativos, para a sua caracterização e classificação, sendo os mais relevantes para o presente estudo os relativos à composição granulométrica, a densidade das partículas (G), os limites de consistência e a compactação (Proctor).

O estudo granulométrico inclui a peneiração e a análise por sedimentação, e seguiu a Especificação LNEC E 196-1966, a partir de amostras de solo seco em estufa. A curva granulométrica de cada solo pode ser observada na Figura 4.1, onde se encontra também representado o solo B, analisado por Inácio (2016), e que fará parte da análise efectuada neste trabalho numa fase posterior (Secção 5.5). O solo B resultou de uma mistura prévia de 25 % de solo E, 50 % de Areia Siltosa e 25 % de Areia, e é composto por cerca de 75 % de Areia, 21 % de Silte e 4 % de Argila.

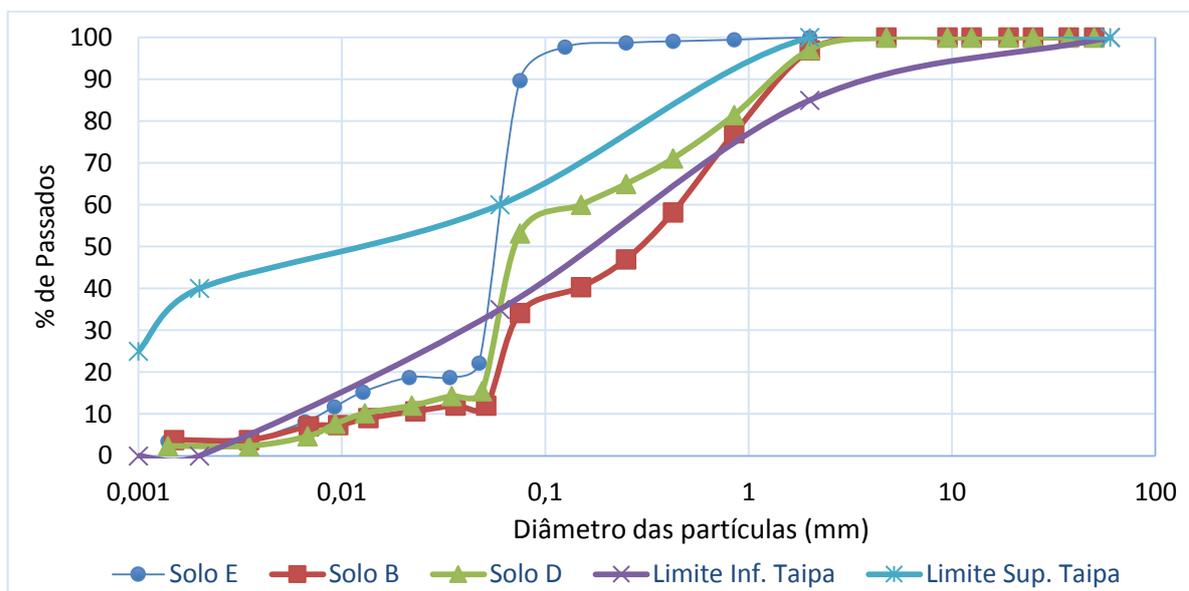


Fig. 4.1 – Curvas Granulométricas solos em estudo (B, D e E) e limites recomendados para técnica de Taipa

Pela observação da figura percebe-se que o solo E tem uma fracção fina superior ao solo D, que apresenta uma percentagem de material grosso mais significativa. Observam-se ainda os limites indicados na literatura à técnica de taipa, que define uma envolvente onde, idealmente, se deve situar a curva granulométrica do solo a utilizar. No entanto, verifica-se que nenhum dos solos estudados se enquadra no espectro considerado, apesar do solo D ser o que mais se aproxima.

A densidade das partículas (G) foi determinada segundo a NP-83-1965, tendo-se adoptado um valor de 2,76, enquanto os limites de consistência foram determinados segundo a Norma NP-143-1969. Para o solo D, LL = 22,01 % e LP = 21,58 %, enquanto para o solo E a Norma não é aplicável, uma vez que o solo sendo plástico, tem uma plasticidade demasiado baixa para que seja possível realizar o ensaio de limite de liquidez em condições adequadas.

Para o estudo do processo de compactação foi realizado o ensaio de Proctor-Leve em molde pequeno, segundo a Norma Portuguesa NP-84-1965 e a especificação LNEC E 197-1966. Deste procedimento resultaram duas curvas de compactação, ilustradas na Figura 4.2. O teor em água utilizado para o Solo E foi de  $w=14\%$ , e para o Solo D foi de  $w=9,5\%$ .

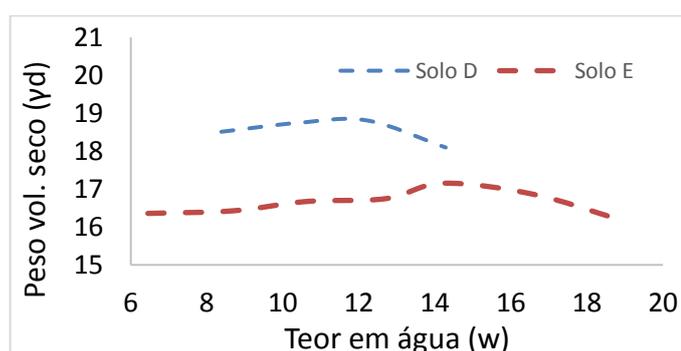


Fig. 4.2 - Curva de compactação leve do solo D e E

Estes solos foram classificados pela Norma ASTM, concluindo-se que o Solo E e o solo D correspondem ambos a Siltes Arenosos, enquanto o solo B corresponde a uma Areia Siltosa.

#### 4.2.2. Fibras (Cabelo)

No desenvolvimento deste trabalho, o material escolhido como elemento de reforço dos solos foi o cabelo, na medida em que constitui uma matéria-prima com elevada disponibilidade e potencial sustentável, sendo ainda os seus efeitos relativamente desconhecidos no âmbito deste tema. Este material foi recolhido em cabeleireiros locais, e procurou-se utilizá-lo no seu estado natural, ou seja, sem ter sofrido qualquer tipo de modificação que alterasse a sua composição e propriedades (por exemplo lacas, tintas, etc.).

Em termos de características físicas (comprimento e diâmetro), este é um material com propriedades muito variáveis. No entanto, tendo em conta a dimensão da amostra a preparar, os cabelos foram peneirados, para retirar aqueles cujo comprimento foi considerado demasiado curto ( $< 1$  cm) ou excessivamente longo ( $> 6$  cm). Os cabelos demasiado curtos foram retirados através de um processo de peneiração improvisado, e os cabelos demasiado compridos, encontrando-se em “tufos”, foram simplesmente rejeitados. Definiu-se uma curva com a variação dos comprimentos, a partir de uma amostragem de 300 cabelos, para permitir caracterizar o material de reforço utilizado na campanha de ensaios (Fig.4.3).

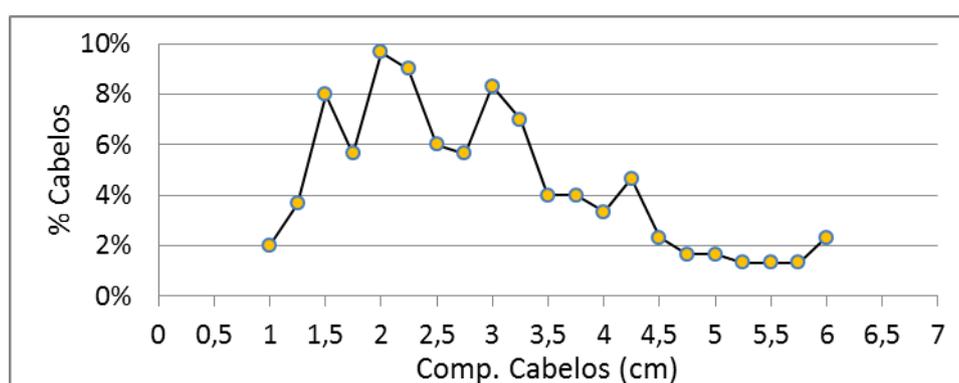


Fig. 4.3 – Distribuição dos cabelos para os ensaios de corte

O tamanho dos provetes teve influência na gama de comprimentos adoptados, visto que, como referido por Falorca (2002), fibras demasiado curtas não são eficientes como reforço, pois não chegam a ser solicitados quando sujeitos às deformações aplicadas, e para comprimentos muito longos a mistura é dificultada, o que afecta a homogeneidade do material reforçado (Dias, 2013).

### 4.3. Preparação dos Provetes

Neste ponto serão abordados os processos utilizados na preparação e compactação dos solos estudados, tendo estes um papel chave na qualidade dos ensaios, principalmente com a introdução de fibras no solo.

O teor em água utilizado para a compactação dos provetes foi escolhido tendo em consideração o ensaio de Proctor-Leve. Os solos em estudo foram assim preparados com os teores definidos em 4.2.1, sendo deixados a repousar na câmara de humidade, pelo menos 24h antes de serem compactados, de modo a estabilizar e homogeneizar a amostra.

Tendo em consideração o conceito de Construção Sustentável, ao longo de todo o processo laboratorial procurou-se, sempre que possível, reaproveitar o solo para os ensaios seguintes. Esta metodologia revelou-se exequível e de fácil aplicação para as amostras de solo natural, verificando-se que a adição de fibras ao solo dificultava a sua reutilização após ser ensaiado.

#### 4.3.1. Preparação dos Provetes sem fibras

Nesta fase, antes de se iniciarem os procedimentos de colocação do solo e compactação, determinou-se a quantidade de solo necessária para cada provete, tendo em conta o volume dos moldes, densidades (G) e índice de vazios (e) de cada solo. Relativamente aos ensaios de compressão o processo preparação dos provetes contemplou as seguintes fases:

- Os solos eram retirados da câmara húmida e remexidos, de forma a minimizar os grumos entretanto formados;
- O solo remexido era colocado nos moldes em três camadas iguais, e à medida que cada camada ia sendo adicionada procedia-se à sua compactação manualmente, recorrendo ao pilão leve (utilizado no ensaio de Proctor-Leve) e a um calço de madeira, que permitisse uma distribuição uniforme de energia pela camada, nomeadamente nos cantos do molde. Esta energia de compactação foi definida tendo em conta o volume do molde utilizado no ensaio, o que correspondia a 88 pancadas por camada, num total de 264 pancadas/cubo;
- Após a compactação, os provetes eram desmoldados e deixados a repousar em ambiente controlado ou em estufa, nas condições definidas em 4.1, até atingirem os teores em água requeridos. Para cada teor foram produzidos três cubos, de forma a obterem-se resultados mais fiáveis. Os valores apresentados no Cap. 5 são, em geral, o valor médio dos 3 ensaios realizados para o mesmo teor de humidade;

O controlo da variação dos teores de água das amostras, com e sem reforço, foi realizado procedendo à sua pesagem periódica, até atingirem o peso requerido,  $P_{seco}$ . Neste sentido, e sabendo previamente o peso de cada molde,  $P_{base}$  utilizou-se a seguinte relação:

$$P_{seco} = \frac{P_c - P_{base}}{1 + w}$$

Em que  $P_c$  corresponde ao peso do conjunto num dado momento, e  $w$  indica a percentagem do peso de água presente no cubo.

Quando os provetes alcançavam os valores pretendidos, ou muito próximo destes, o processo de cura era interrompido e procedia-se ao seu transporte (de forma cuidada e com o mínimo de interferências, para manter a sua qualidade) até à prensa. No caso dos provetes secos com a ajuda da estufa, eram deixados a repousar durante cerca de 1 hora até serem ensaiados, o que permitia a sua estabilização, pois os provetes eram retirados a temperaturas elevadas.

O procedimento de compactação para os ensaios de corte foi realizado igualmente em 3 camadas, tentando-se ajustar a energia de compactação de modo a atingir-se o peso volúmico

---

pretendido para cada provete. Cada solo foi compactado recorrendo a um martelo e calço de madeira. Nos ensaios ao corte, os provetes foram ensaiados imediatamente após a sua preparação.

#### **4.3.2. Preparação dos Provetes com fibras**

Nos solos reforçados a quantidade de reforço é correspondente a 0,3% e 0,6% da massa total do solo seco necessário para a preparação do provete. Como referido por Falorca (2002), devido à maior facilidade em utilizar medidas de peso ao invés de em volume na sua preparação, admite-se que as fibras são parte integrante dos provetes produzidos, apesar de exibirem diferentes densidades.

Com a introdução das fibras, o processo de preparação e fabrico dos provetes sofreu certas alterações. Deste modo, para ambos os tipos de ensaios foi adoptado um processo de mistura solo+fibras manual, que permitisse uma distribuição uniforme do elemento de reforço no solo, de modo a que na fase de compactação se minimizasse a acumulação de fibras tanto nas paredes laterais dos moldes, como no seu interior. Seguindo este princípio e adoptando o método utilizado por Inácio (2016), o número de camadas foi incrementado de 3 para 5, mantendo-se o mesmo número de pancadas por provete definido anteriormente, mas distribuídas pelas 5 camadas, resultando em cerca de 53 pancadas/camada na compactação dos cubos para os ensaios de compressão. Metodologia idêntica foi adoptada para os provetes submetidos a ensaios de corte.

Relativamente ao método de mistura solo+fibras, este seguiu os pressupostos defendidos por Falorca (2002). Assim, camada a camada de cada provete, a mistura foi efectuada em 2 fases. Numa 1ª fase, foram sucessivamente colocadas faixas de solo e de fibras alternadamente (Fig.4.4 a) e b)). Posteriormente, procedeu-se à mistura do conjunto de forma manual, procurando minimizar ao máximo as interferências inerentes a este processo de manuseamento, de forma a obter um conjunto uniforme, em que não ocorresse a aglomeração dos cabelos, e manter a distribuição das fibras com orientação aleatória.

Com o solo devidamente homogeneizado com as fibras foi realizado o processo de compactação, idêntico ao descrito para os provetes sem reforço, mas repartindo o solo e a energia de compactação por 5 camadas iguais. Com a compactação concluída, os provetes eram desmoldados e deixados a secar até atingir os teores de humidade definidos, no caso dos ensaios de compressão. Nos ensaios ao corte, os provetes foram ensaiados imediatamente após a sua preparação.

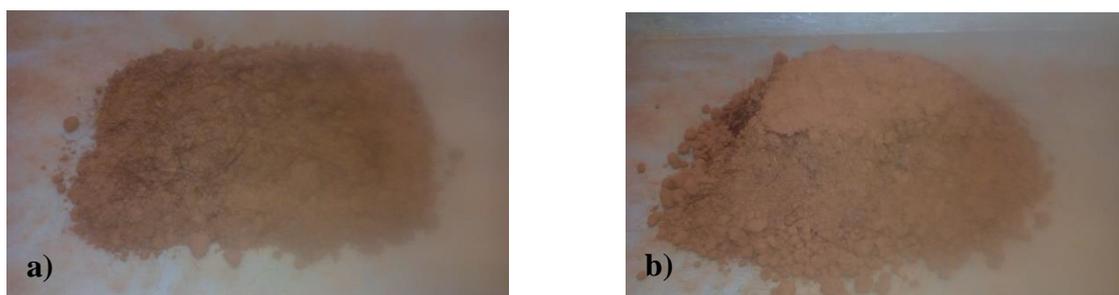


Fig 4.4 – a) Preparação da mistura solo + fibras; b) Conjunto solo+fibras misturado

Para além da quantidade 0,3% em massa de fibras de cabelo, foi estudada, ainda que de forma apenas indicativa, a adição de 0,6% de fibras de cabelo. Constatou-se que para esta percentagem tornava-se muito difícil preparar os provetes, principalmente para os ensaios ao corte, devido à elevada quantidade de cabelos para o pouco solo disponível (Fig. 4.5 a)) e tamanho reduzido do provete.

Nos ensaios de compressão, o processo de preparação dos cubos foi alterado em relação ao utilizado para as amostras com 0,3% de fibras. De modo a minimizar a segregação de cabelos ao longo dos provetes, foi necessário incrementar de 5 para 10 o número de camadas, sendo que a cada duas camadas introduzidas procedia-se à sua compactação, o que correspondia às mesmas 53 pancadas dos provetes com 0,3% de fibras. Este processo permitia que a mistura homogénea solo+fibras fosse alcançável, na medida em que utilizava metade da quantidade de solo de cada vez. Na Figura 4.5 b) é possível observar um provete preparado com solo E e 0,6% de fibras. A preparação dos provetes com 0,6 % de fibras foi muito morosa, tendo demorado, em média, cada um cerca de 4 h, enquanto para cada provete com 0,3 % demorava cerca de 2 h.

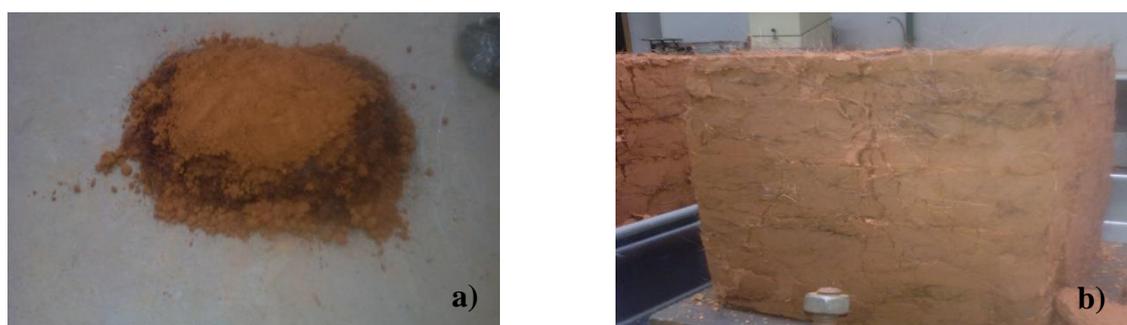


Fig. 4.5 – a) Pormenor de camadas alternadas de solo + fibra; b) Distribuição dos cabelos num provete com 0,6 % de fibras

## 4.4. Equipamento utilizado e Procedimentos de ensaio

### 4.4.1. Ensaio de Compressão:

Os provetes a ensaiar à compressão foram preparados em moldes metálicos  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$  (Fig.4.6 a)). A base metálica foi previamente pesada de modo a conhecer o conteúdo líquido do provete em análise. As paredes laterais dos moldes foram revestidas de película aderente, para evitar que o solo aderisse a estas. Numa primeira tentativa, aplicou-se óleo descofrante mas verificou-se uma aderência excessiva entre o solo e as superfícies do molde (Fig. 4.6 b)).

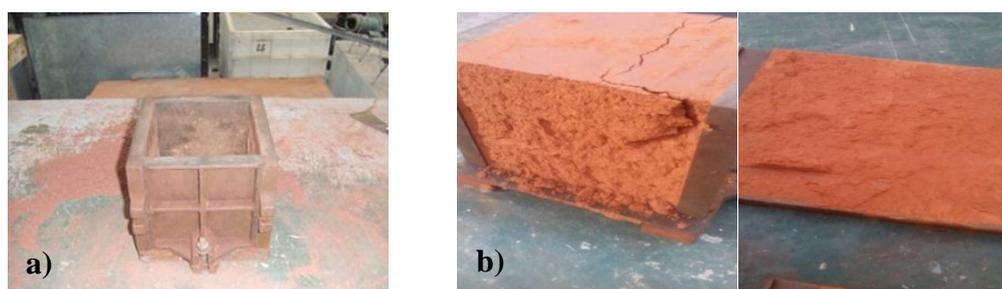


Fig. 4.6 – a) Molde utilizado na preparação dos provetes; b) Pormenor da aderência solo às paredes laterais

Os ensaios de compressão foram realizados com controlo de deformação numa prensa electromecânica, SERVOSIS MUF 404, de 100 toneladas. Aos provetes foi aplicada uma deformação a uma velocidade constante ao longo do ensaio, registando-se o seu comportamento pela interface do programa.

Em seguida, os provetes foram ensaiados, individualmente, através da aplicação de uma deformação a velocidade constante, que comprimia o cubo. Cada ensaio decorreu com uma velocidade de compressão equivalente a  $0.05 \text{ mm/s}$ , sendo registado pelo controlador da prensa o seu comportamento até ao ponto de resistência máxima, e pós-rotura, que possibilita avaliar como o solo se comporta após romper. No final do ensaio eram retiradas pequenas quantidades de solo em dois pontos do provete (perto do topo e a meio, sensivelmente), de modo a determinar o seu teor em água efectivo,  $w$ .

### 4.4.2. Ensaio de Corte

Os ensaios de corte foram realizados no aparelho de corte directo, numa caixa com as seguintes dimensões:  $9,78 \times 9,78 \times 2,81 \text{ cm}^3$ . Durante os ensaios, os solos estiveram submetidos a diferentes tensões normais ( $\sigma_N = 25, 50 \text{ e } 200 \text{ kPa}$ ), que permanecem constantes ao longo de cada ensaio, sendo registadas as tensões de corte e as deformações verticais e horizontais ao longo do ensaio. Os ensaios de corte realizaram-se a uma velocidade constante de  $0.61 \text{ mm/min}$ , tendo-se determinado ser esta a velocidade adequada para o ensaio ser considerado drenado. Atingida a resistência máxima, os ensaios continuaram até estabilizar ou atingir o limite de

percurso permitido pelo equipamento (14 mm), de modo a avaliar o comportamento dos solos após a rotura.

#### 4.5. Programa de Ensaios

Ao longo do processo laboratorial foram efectuados 30 ensaios de compressão para cada solo, num total de 60 ensaios (Quadro 4.1 a)), que permitissem avaliar a resistência dos provetes a esforços desta natureza, uma vez que estes são utilizados, maioritariamente, em construções autoportantes, como referido igualmente por Gomes (2015). Para os diferentes solos, os provetes foram ensaiados no seu estado natural e com a introdução dos cabelos, para cada teor de humidade pretendido (9,5%, 5,5% e 1,5% para solo D, e 14%, 8%, e 1,5% para o solo E), sendo preparados três provetes para cada teor, de forma a se obterem resultados fiáveis. Foram ainda ensaiados dois provetes com 0,6 % de fibras para o solo E, um com teor de humidade de  $w = 14\%$  e outro no seu nível mais seco.

No processo de secagem, os provetes foram submetidos a dois processos distintos, um em ambiente controlado e outro em estufa, que simulasse as condições características dos países em desenvolvimento.

Adicionalmente, foram efectuados um total de 24 ensaios de corte directo (Quadro 4.1 b)) para os diferentes solos (E e D), com o objectivo de avaliar a influência do reforço na resistência a esforços de corte. Neste sentido, prepararam-se provetes com solo natural e com o reforço para diferentes percentagens de cabelo, nomeadamente, 0,15%, 0,3%, 0,45% e 0,6%, sendo estas em seguida ensaiadas com o teor em água com que foram preparados, e sob o efeito de diferentes cargas de confinamento ( $\sigma_N = 25, 50$  e  $200$  kPa).

Quadro 4.1 – Programa de Ensaios: a) Compressão; b) Corte

Solo D				Solo E			
w	Fibras (%)			w	Fibras (%)		
(%)	0	0,3	0,6	(%)	0	0,3	0,6
9,5	√	√	-	14	√	√	√
5,5	√	√	-	8	√	√	-
1,5	√	√	-	1,5	√	√	√
Nº Ensaios	15	15	0	Nº Ensaios	15	15	2

a)

Solo D						Solo E		
$\sigma_N$	Fibras (%)					Fibras (%)		
(kPa)	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0	0,3	0,6
25	√	√	√	√	√	√	√	√
50	√	√	√	√	√	√	√	√
200	√	√	√	√	√	√	√	√
Nº Ensaios	3	3	3	3	3	3	3	3

b)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados para os solos estudados. Numa primeira fase, são abordados os resultados dos ensaios de compressão, em que é apresentada uma análise comparativa entre os comportamentos observados nos dois tipos de solos, nomeadamente ao nível da velocidade de secagem (com e sem reforço), para os diferentes processos estudados. Esta abordagem, permite comparar as soluções e encontrar a que melhor se enquadra ao cumprimento dos prazos de execução de obra.

Nesta vertente associada aos diferentes procedimentos de secagem, é igualmente analisado o peso que esta variável representa na resistência à compressão dos provetes, e a forma como o reforço influencia o comportamento dos solos, em termos de resistência e deformação para os teores em água definidos.

Procede-se em seguida à comparação de um dos solos ensaiados no presente trabalho (solo D) e o solo B, estudado por Inácio (2016). Neste ponto, são apenas analisados e comparados os comportamentos dos diferentes solos em termos de resistência à compressão, sob as mesmas condições de carregamento, o que possibilitará definir aquele que apresenta um melhor comportamento a esforços de compressão.

Faz-se uma análise comparativa para conhecer a influência do aumento da percentagem de fibras na resistência à compressão do solo E. Por fim é analisado e determinado o módulo de elasticidade dos solos, com e sem reforço.

Na análise dos resultados referentes aos ensaios de corte, é avaliada a influência da adição de fibras no comportamento mecânico dos diferentes solos estudados.

### 5.2. Velocidade de Secagem

Neste ponto analisa-se a variação temporal do teor em água dos provetes,  $w$  (%), com e sem esforço, ao longo dos processos de secagem considerados. Inicialmente serão apresentados os resultados referentes ao procedimento em ambiente controlado, seguindo-se os resultados obtidos durante o estudo com utilização da estufa. Desta análise será possível avaliar o impacto da introdução de reforço na aceleração destes processos.

Nas figuras seguintes pode verificar-se a variação de humidade dos provetes produzidos para os diferentes solos em estudo, com e sem reforço, durante o seu período de cura em ambiente com humidade e temperatura controladas.

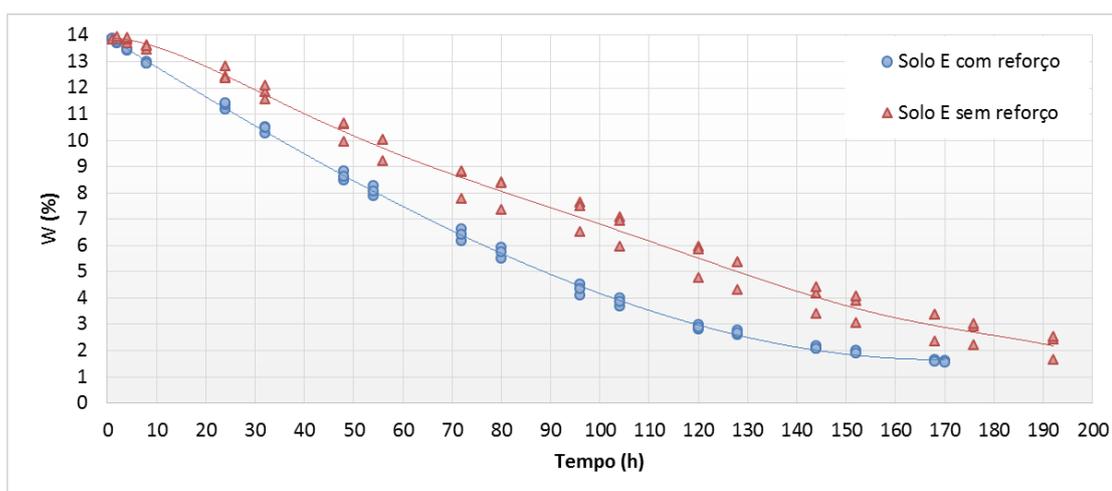


Fig. 5.1 – Secagem do solo E em ambiente controlado

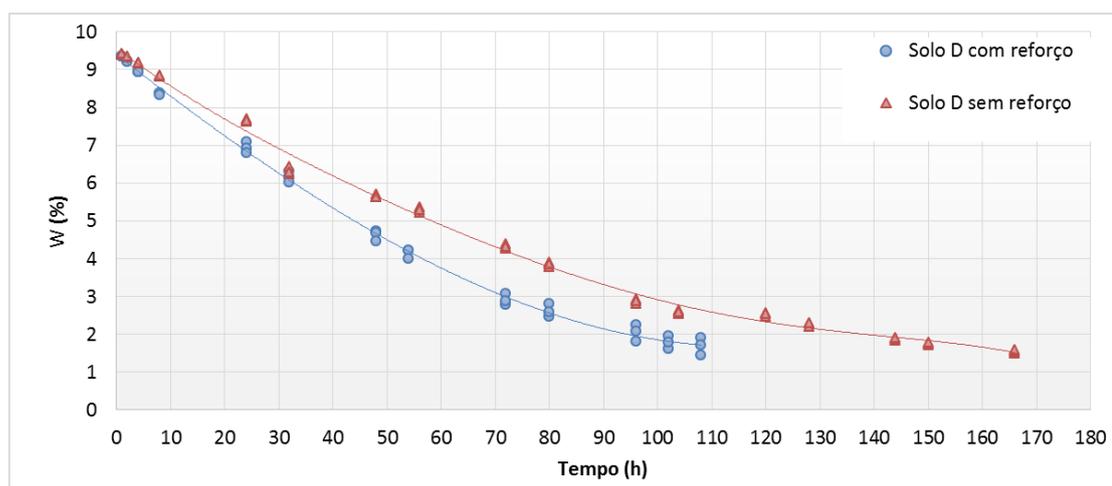


Fig. 5.2 – Secagem do solo D em ambiente controlado

Os provetes, de ambos os tipos de solos, apresentaram perdas de humidade mais elevada no início do processo, ocorrendo uma desaceleração até atingir os teores mais secos. Este resultado seria o expectável, uma vez que nesta fase inicial a secagem ocorre essencialmente nas zonas superficiais dos provetes. À medida que o tempo passa, a água presente nos provetes é essencialmente a da parte mais interior dos mesmos, que por este motivo leva cada vez mais tempo a atingir a superfície e, subsequentemente, a secar até ao valor pretendido.

Observando o comportamento do solo E e D sem reforço, e realizando uma análise em termos relativos, verifica-se uma clara diferença no período de secagem: o solo D precisa de menos tempo até atingir 50 % do teor de humidade correspondente ( $\approx 65h$ ), evidenciando assim um período mais curto do que o E ( $\approx 100h$ ). Esta diferença, pode ser explicada pelo facto de o solo

E ter uma maior componente fina que o solo D, tornando-o menos permeável, dificultando assim a sua secagem.

Da análise dos solos com reforço, constatou-se que a sua presença influencia positivamente o tempo de secagem, reduzindo-o em cerca de 22 horas para o solo E, e 58 em horas para o solo D. Tal diferença pode ser atribuída ao facto das fibras de cabelo oferecerem maior resistência na fase de compactação, contribuindo para um índice de vazios mais elevado, como referido por Hoare (1979), o que conduz a um aumento da porosidade do provete, sendo por isso facilitada a migração da água presente no interior dos provetes.

Com o intuito de acelerar a secagem dos provetes recorreu-se a uma estufa, e os resultados podem ser observados nas Figuras 5.3 e 5.4.

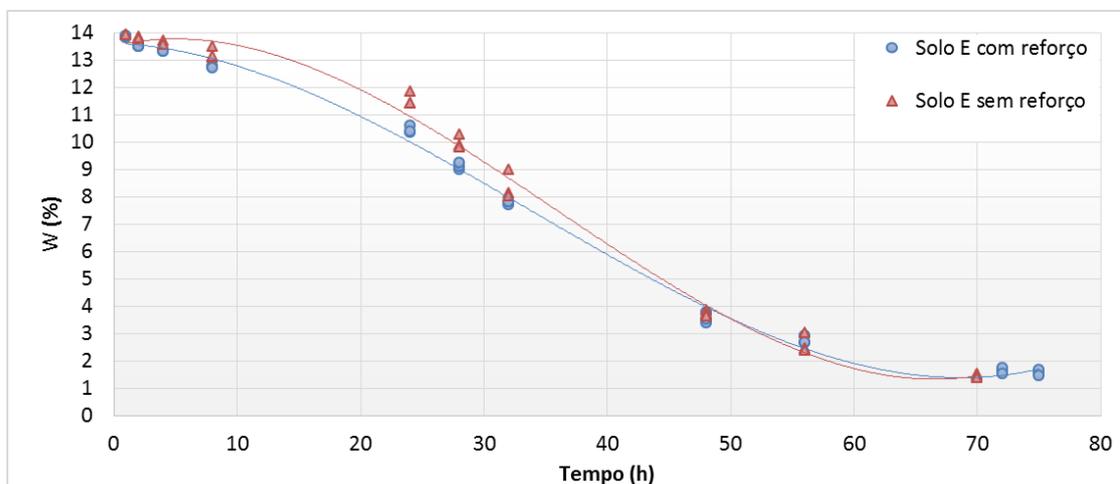


Fig. 5.3 – Secagem do solo E em estufa

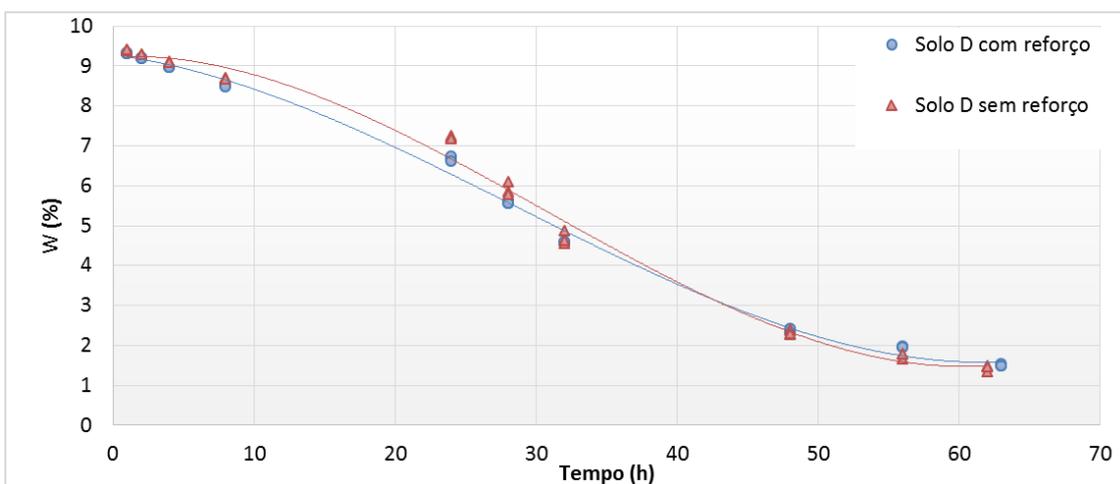


Fig. 5.4 – Secagem do solo D em estufa

Analisando as figuras, verifica-se que os provetes reforçados e não reforçados tenderam a perder a sua humidade a uma velocidade muito semelhante até à conclusão do processo, para os diferentes solos. Nesta caso, a incorporação das fibras não representou uma mais-valia na redução do período de cura dos provetes. No entanto, verifica-se que o processo em estufa acelera significativamente o período de cura dos provetes, o qual é mais curto.

### 5.3. Ensaios de Compressão: Resistência

Nesta secção é avaliada, numa fase inicial, o impacto da secagem na resistência à compressão dos provetes e, posteriormente, a influência do reforço na mesma, tendo em consideração os teores em água definidos para cada um dos solos.

Os resultados que relacionam as resistências obtidas para cada solo e os processos de secagem estão representados nas Figuras 5.5 e 5.6, tendo sido determinados após os ensaios o valor máximo do teor em água dos provetes, verificando-se, que para alguns, este valor não correspondia ao teor estimado antes de serem ensaiados. Esta diferença pode estar relacionada com o facto de o método utilizado para a determinação dos teores durante a secagem apenas permitir obter valores médios globais. Outro factor pode estar relacionado com as condições do dia de realização e o tempo entre a preparação, ensaio e recolha dos provetes a ensaiar.

Relativamente aos valores de resistência obtidos, verificou-se que em certas situações não acompanhavam a tendência, desvios que podem ser atribuídos a imperfeições dos provetes (arestas deformadas, etc.) ou a eventuais deficiências no processo de mistura e compactação, uma vez que as fibras se distribuem aleatoriamente no solo, e quando compactado o conjunto solo+fibras pode não ser semelhante para todos os provetes, o que altera o seu desempenho.

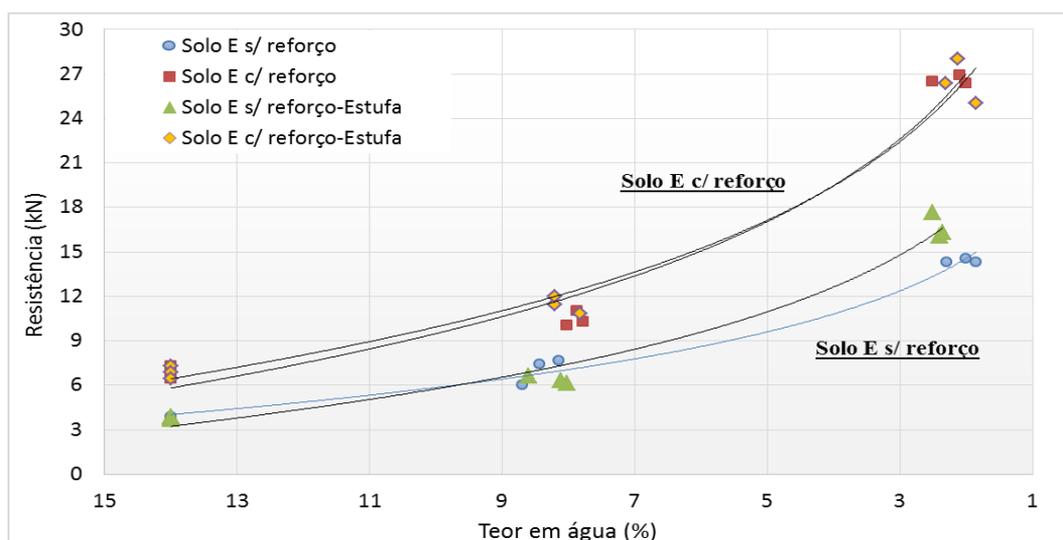


Fig. 5.5 – Resistência à compressão do solo E para diferentes métodos de secagem

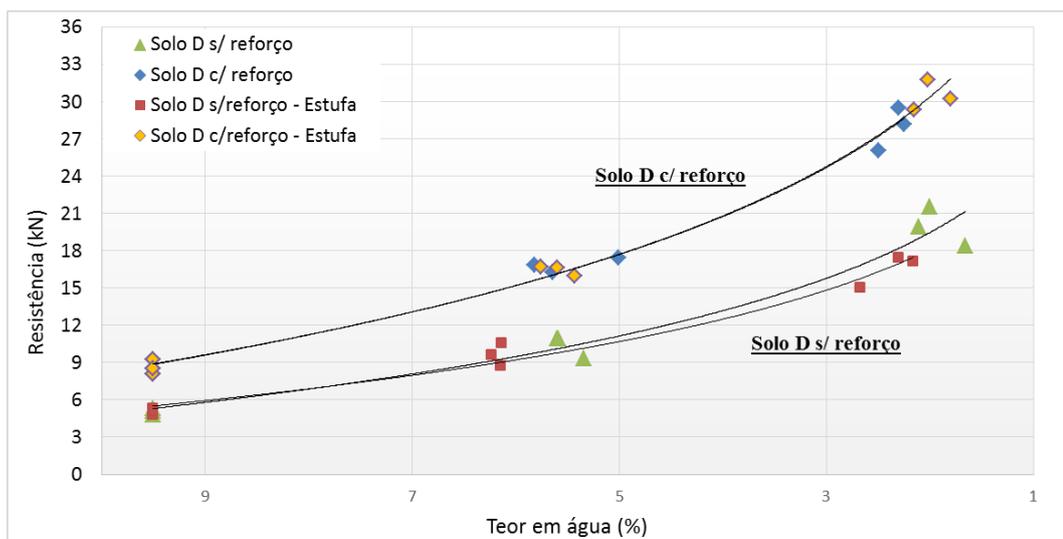


Fig. 5.6 – Resistência à compressão do solo D para diferentes métodos de secagem

Analisando as figuras verifica-se que a opção por um processo de secagem com ajuda da estufa não alterou significativamente a resistência à compressão dos provetes, em especial nos solos reforçados. No solo D, comparando os teores de água secos médios, de 2,3% para secagem em ambiente controlado e de 2% em estufa, os valores de resistência obtidos são de 28,9 kN e de 30,5 kN, respectivamente, o que se traduz num desvio de apenas 2,7 %. Relativamente aos provetes de solo E reforçados, estes seguem um comportamento semelhante ao observado atrás, verificando-se que nos teores de cerca de 2% em ambiente controlado e em estufa, a resistência dada é de 26,6 kN e 26,5 kN, respectivamente, o que corresponde a uma variação de apenas 0,4%.

Nos solos não reforçados, constata-se que os provetes de solo E com secagem em estufa apresentaram melhores resultados em termos de resistência, tendo-se obtido uma resistência de 16,7 kN ( $w=2,4\%$ ), em comparação com o procedimento em condições controladas, onde atingiu os 14,4 kN ( $w=2,1\%$ ), o que representa um aumento de 16 %. Este acréscimo de resistência não se verificou para o de Solo D sem reforço quando seco em estufa, tendo havido uma diminuição de 16,8 %, em que os valores obtidos foram de 20,8 kN (amb. controlado) e 17,3 kN (estufa), para teores de 2,1% e 2,2%, respectivamente.

Em relação ao impacto da introdução das fibras de cabelo nos solos, constata-se que este é positivo, conferindo um aumento de resistência, ao longo de todo o processo de secagem. No Quadro 5.1 apresentam-se resumidamente os valores de resistência alcançados para os teores de água secos mais próximos, em ambos os procedimentos.

Analisando separadamente cada solo e modo de secagem, verificou-se que pelo reforço do solo E, com cura em ambiente controlado, se atingiu um acréscimo de resistência da ordem

dos 84,7%, enquanto para o método em estufa este aumento foi de 58,7%. Por sua vez, o solo D quando seco em amb. controlado e em estufa, para os teores apresentados, mostrou melhorias de 38,9% e de 76,3%, respectivamente. Estes resultados confirmam que o reforço dos solos com fibras de cabelo melhora significativamente a capacidade resistente.

Quadro 5.1 – Resistências e Tensões à compressão dos provetes para os diferentes modos de secagem e nos níveis mais secos

Solo	Modo Secagem	s/ fibras			c/ 0,3 % fibras		
		w (%)	Res. (kN)	Tensão (MPa)	w (%)	Res. (kN)	Tensão (MPa)
E	Amb. Cont.	2,1	14,4	0,64	2,2	26,6	1,18
	Estufa	2,4	16,7	0,74	2,1	26,5	1,18
D	Amb. Cont.	2,1	20,8	0,92	2,3	28,9	1,28
	Estufa	2,2	17,3	0,77	2,0	30,5	1,35

Maniatidis & Walker (2003) citam valores para a resistência à compressão não confinada. São recomendados valores de 0,7 MPa, de acordo com Middleton (1992), e de 0,4 – 0,6 MPa, de acordo com a Standards Australia (2002). Analisando o Quadro 5.1, verifica-se que, independentemente do processo de secagem escolhido, os valores obtidos enquadram-se nos recomendados. Segundo a NZS 4298 (1998), para um provete com uma relação altura/espessura de 1, como é o caso, o valor recomendado é de 1,3 MPa. Já para Silveira et al. (2012), a média dos resultados obtidos para a resistência à compressão foi de 1,13 MPa. Observando novamente o Quadro 5.1, constata-se que os provetes com a presença de reforço são os que se aproximam mais destes valores.

O tijolo é um dos elementos de alvenaria mais antigos e mais utilizado nas construções correntes. No Quadro 5.2 é possível observar as resistências obtidas para as diferentes classes de tijolo cerâmico. Da análise do quadro e tendo em consideração os valores de resistência obtidos para os provetes ensaiados, com e sem reforço, verifica-se que apenas os provetes com fibras de cabelo se aproximam da classe C, enquanto para as restantes classes os valores se encontram afastados.

Quadro 5.2 – Classes de resistência mecânica dos tijolos (baseado em Dias, 2002)

Classe	Tijolos Furados [MPa]
A	4,5
B	3
C	1,5

Um dos aspectos importantes a ter em consideração quando os materiais estão sujeitos a solicitações externas, como é o caso das forças de compressão impostas durante o ensaio, é a forma como estes se comportam após o pico de resistência. Neste sentido, apresentam-se na

Figura 5.7 dois diagramas de comportamento avaliados ao longo do trabalho laboratorial para os provetes de solo D com e sem reforço, em ambiente controlado. Este comportamento é comum ao observado na situação em que os provetes de solo D são secos com a ajuda da estufa, assim como pelo solo E para os diferentes modos de secagem.

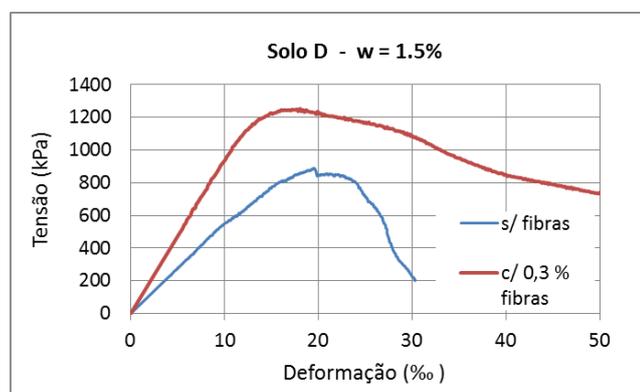


Fig. 5.7 – Diagrama de comportamento para solo D

Da análise da figura, observa-se que a presença das fibras promoveu, não apenas, um aumento da resistência dos provetes, mas muito importante, alterou o seu comportamento na rotura: após um intervalo de deformação em que a resistência dos provetes aumentou, ao ser atingido o seu ponto de resistência máximo, verificou-se uma queda abrupta da resistência do solo não reforçado, característico de um comportamento frágil. O solo reforçado sofreu uma redução de resistência mais suave, não tendo ocorrido a sua desintegração imediata (Fig. 5.8b) O seu comportamento é assim mais dúctil, uma vez que a resistência decresce de um modo mais progressivo ao longo da deformação.

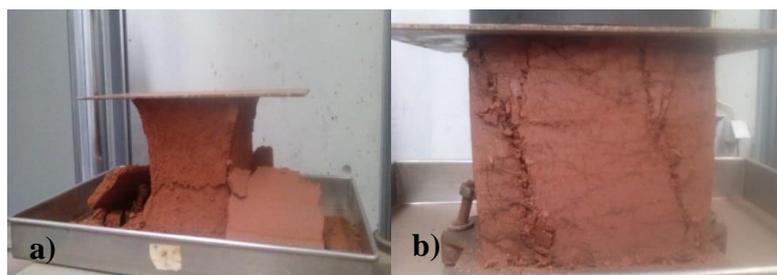


Fig. 5.8 – Diferentes modos de rotura de solo D, a) sem fibras e b) com fibras

Estas diferenças de comportamento entre os solos com e sem reforço podem ser explicados pelo facto da incorporação das fibras de cabelos funcionar como uma armação interna dos provetes, promovendo um maior introsamento entre o solo e as fibras que se traduz numa maior coesão. Consequentemente, verifica-se um aumento da resistência, à medida que vai sendo mobilizada a resistência das fibras, o que impede o seu colapso repentino, como o ilustrado na Fig. 5.8 a), contribuindo assim para a melhoria do seu comportamento mecânico.

Comportamento idêntico foi observado por outros autores, como Montardo (1999) e Feuerharmel (2000), que concluíram que a introdução de fibras na matriz de solo reduzia a sua fragilidade.

#### 5.4. Ensaios de Compressão: Deformação Vertical

Nesta secção é analisada a influência do processo de secagem e o efeito da inclusão das fibras de cabelo nos provetes, desta vez no campo das deformações experimentadas, para os teores em água estudados. Nas figuras seguintes estão representados os valores de deformação vertical dos provetes nos picos de resistência para cada solo em estudo, e para os diferentes modos de secagem.

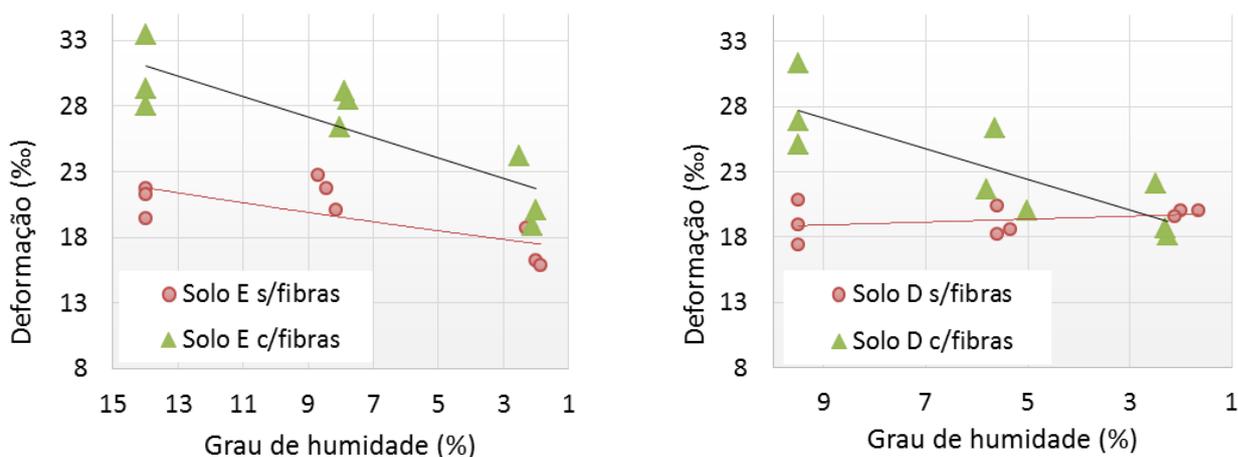


Fig. 5.9 – Variação da deformação do solo E e D com o teor em água, em ambiente controlado

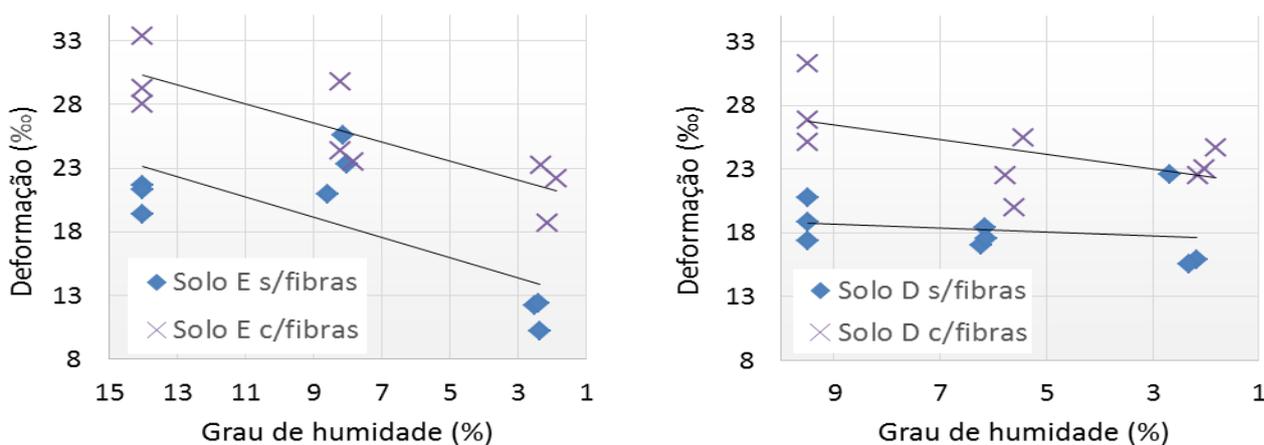


Fig. 5.10 – Variação da deformação do solo E e D com o teor em água, em estufa

Analisando as figuras verifica-se que, de um modo geral, os solos evidenciaram uma diminuição de deformação com o decréscimo do teor de humidade, resultados que vão de encontro ao comportamento esperado, ou seja, que o solo humedecido seja mais “flexível”, suportando deformações superiores sem romper, quando comparado com um solo cujo teor de humidade é inferior, que apresenta um comportamento mais rígido.

Relativamente aos solos sem reforço, e para os valores médios obtidos para os diferentes processos de secagem, nos níveis mais secos, verificou-se que o solo E em ambiente controlado atinge uma deformação superior em relação ao processo em estufa. No solo D, os provetes em condições controladas revelam igualmente uma maior deformação relativamente à verificada em estufa.

No caso em que o reforço é adicionado aos solos, e para os modos de secagem adoptados, verificou-se que, de um modo geral, as fibras de cabelo, para os teores mais húmidos e secos, contribuíram para um aumento da deformação em ambos os processos.

A partir dos resultados apresentados é possível concluir que, para ambos os métodos de secagem adoptados, a resistência nos diferentes solos sofreu alterações consideráveis devido à introdução do reforço, que promoveu o seu aumento em relação aos solos não reforçados. Em termos de deformação, verificou-se igualmente que os solos reforçados apresentaram níveis de deformação superiores. A introdução do reforço nos provetes de terra mostrou-se assim positiva, melhorando as suas capacidade de resistência e de deformação.

Em termos globais, o solo D apresentou as melhores propriedades, em termos de resistência e deformação, sendo este o solo escolhido na análise que será efectuada no ponto seguinte.

### **5.5. Ensaio de Compressão: Comparação do Solo B vs Solo D**

Nesta secção, pretende-se realizar um estudo comparativo entre o solo D e outro, analisado por Inácio (2016), designado por solo B, relativamente à variação de resistência à compressão, com e sem reforço, bem como avaliar o que oferece melhores garantias neste campo, sob as mesmas condições de solicitação.

Os resultados apresentados na Figura 5.11 são referentes ao solo D e solo B para o modo de secagem em ambiente controlado, tendo sido este o único a ser abordado por Inácio (2016).

Inicialmente ( $w \approx 9,5\%$ ), e para os solos sem reforço, verifica-se que o solo D apresentou melhores resultados que o solo B, com um aumento de 54,5 % (3,3 vs 5,1 kN). No entanto, à medida que os provetes foram secando, esta tendência inverteu-se, constatando-se que para teores mais secos, a rondar os 2%, a resistência do solo B foi superior, em cerca de 9,3% (21,6 vs 23,6 kN).

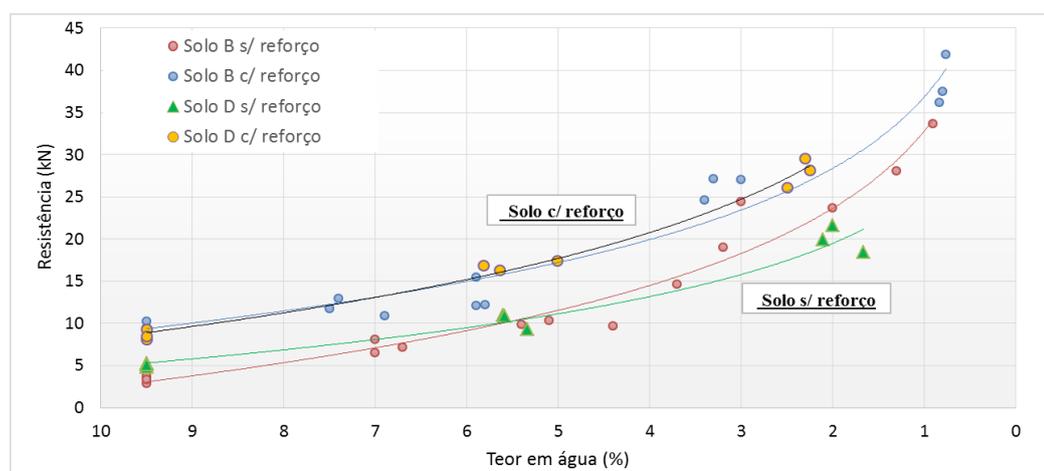


Fig. 5.11 – Resistência à compressão do solo B e D (em amb. controlado) com e sem reforço

Em termos práticos, estes valores têm maior relevância que os mencionados anteriormente, uma vez que quando aplicados em obra, os provetes estarão praticamente secos.

Com a incorporação do reforço, confirma-se novamente a melhoria na resistência dos solos, em que para o estado mais húmido, os resultados obtidos para as resistências estão próximos, variando 12% entre si, em benefício do solo B. Até se finalizar o período de cura definido, os dois solos tenderam a comportar-se de forma similar, sendo que nesta fase a quantificação e comparação dos valores de resistência alcançados para estes, não são de fácil interpretação, dada a dispersão dos valores. Deste modo, é apenas possível deduzir uma estimativa com base no comportamento evidenciado pelos solos até esse ponto, estimando-se que se os provetes de solo D prosseguissem o seu processo de secagem até os teores atingidos para o solo B, a sua resistência seria próxima da que se verificou neste solo.

A nível global, o reforço com cabelos mostrou-se mais eficiente para o solo D, contribuindo para um acréscimo de resistência na ordem dos 38,9%, como referido em 5.3, enquanto para o solo B esta diferença foi diminuindo à medida que o processo de secagem evoluiu, verificando-se ganhos de resistência, para os teores mais secos, de apenas 14,5%. Esta variação nos valores obtidos pode ser devida ao facto de os processos de preparação dos provetes terem sido desenvolvidos por diferentes operadores, o que influencia o produto final.

De um modo geral, e tendo em consideração que os provetes são utilizados no estado mais seco, podemos concluir que o solo B e o D apresentam um comportamento muito similar em termos de resistência à compressão. Caso o projecto contemple a utilização de fibras de cabelo, estas vão permitir obter um conjunto que apresenta atributos mais apelativos, em termos de capacidade resistente e deformabilidade. Comparando as curvas granulométricas dos dois solos, B e D (Fig. 4.1), verifica-se que apesar do solo D ser o que está mais perto do

fuso definido como sendo o mais adequado à construção em terra, os resultados obtidos mostram que os solos apresentam resistências bastante semelhantes.

### 5.6. Ensaio de Compressão: Comparação do comportamento do solo E com a percentagem de fibras

Nesta secção é apresentada uma análise comparativa entre os provetes ensaiados sem reforço e com a adição de 0,3% e 0,6% de fibras de cabelo, para os patamares de humidade mais húmidos e secos, no sentido de aferir qual a influência da sua percentagem na resistência à compressão. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 5.12.

Da análise da Figura 5.12 a) observa-se que à medida que a percentagem de fibras aumenta, os valores de resistência também aumentam. No entanto, nos níveis mais secos (Fig. 5.12 b)), ao utilizar uma quantidade superior, de 0,6%, os resultados não foram tão efectivos. De facto, atinge-se a resistência de 28 kN (1,24 MPa), para um  $w = 1,7 \%$ , o que representa apenas um pequeno aumento de resistência em relação ao teor de 0,3%, onde se obteve 26,9 kN (1,2 MPa), para um  $w = 2,1 \%$ .

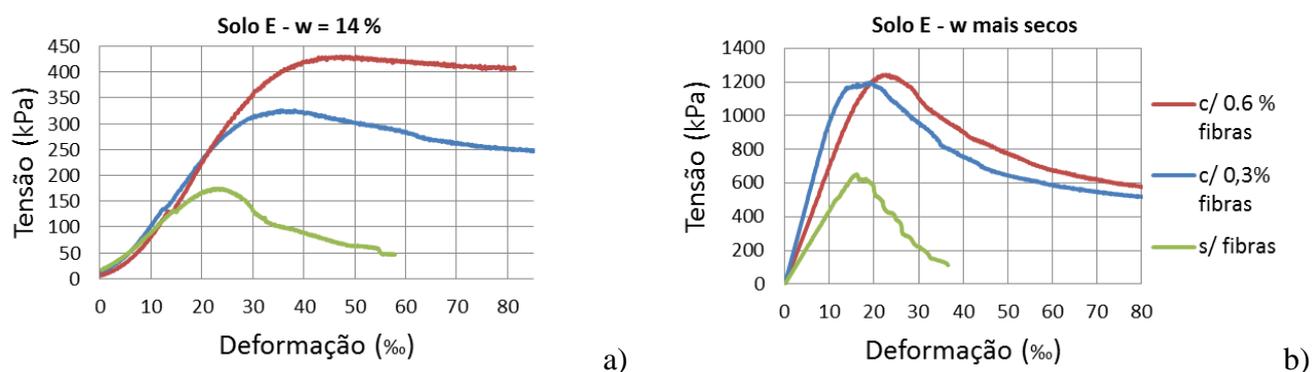


Fig. 5. 12 – Influência da percentagem de fibras na resistência à compressão do solo E, a)  $w = 14 \%$ , b)  $w$  mais secos

Desta forma, é possível concluir que um aumento da quantidade de fibras de cabelo de 0,3 % para 0,6 % não melhora significativamente o desempenho dos provetes em termos de resistência à compressão.

### 5.7. Ensaio de Compressão: Módulo de Elasticidade

Nesta secção são apresentados os resultados para o módulo de elasticidade obtidos para os provetes com e sem reforço, nos níveis de humidade mais secos, para ambiente controlado. O módulo de elasticidade (Quadro 5.3) do material resultou da variação máxima da tensão  $\sigma$  no diagrama tensões – extensões. Estes valores foram recolhidos durante o ensaio, e correspondem à média global dos três provetes ensaiados para cada mistura.

Quadro 5.3 – Módulo de Elasticidade dos solos E e D, com e sem reforço

Solo	E [MPa] sem fibras	E [MPa] com 0,3 % fibras
E	43,4	87,7
D	58,3	83,6

Da análise do Quadro 5.3, conclui-se que a introdução do reforço nos solos conduz a um significativo aumento do módulo de elasticidade. No entanto, os valores obtidos são de ordem de grandeza inferior ao estipulado por outros autores para a construção em terra, os quais rondam os 200 MPa para a terra utilizada em taipa. Relativamente a outros materiais, estes valores também são inferiores, sendo que elementos como a madeira apresentam módulos de elasticidade de cerca de 10 GPa, ou o betão C20/25, que atinge os 30 GPa (Ramos, 2012). Sendo assim, pensa-se que os valores de módulo de elasticidade apresentados são baixos, e portanto não podem deixar de ser equacionados para aplicações estruturais.

### 5.8. Resistência ao corte

Nesta secção, são analisados os solos E e D, com e sem reforço, e apenas para o teor de humidade de preparação dos provetes. O objectivo é avaliar se o seu comportamento ao corte é afectado, ou não, pela inclusão do reforço.

Numa primeira abordagem, é efectuado um estudo recorrendo a amostras de solo D reforçadas com diferentes teores de fibras, submetidas às cargas normais definidas ( $\sigma_N = 25, 50$  e  $200$  kPa), como se pode observar nas Figuras 5.13 a), b) e c), com o objectivo de estudar a sua influência ao nível da resistência ao corte do solo.

As figuras mostram que, de um modo geral, o teor em fibras de 0,6% apresenta os resultados mais satisfatórios na resistência ao corte do solo D, sendo que as restantes opções denotam uma certa flutuação para os diferentes níveis de carga normal. É ainda possível verificar que a quantidade de reforço incorporada nos provetes é cada vez menos importante à medida que o nível de carga normal aumenta.

No sentido de poder ser realizado um estudo comparativo, que permitisse comparar o comportamento dos solos ao corte e à compressão, considerou-se ainda para este estudo o teor de 0,3% de fibras.

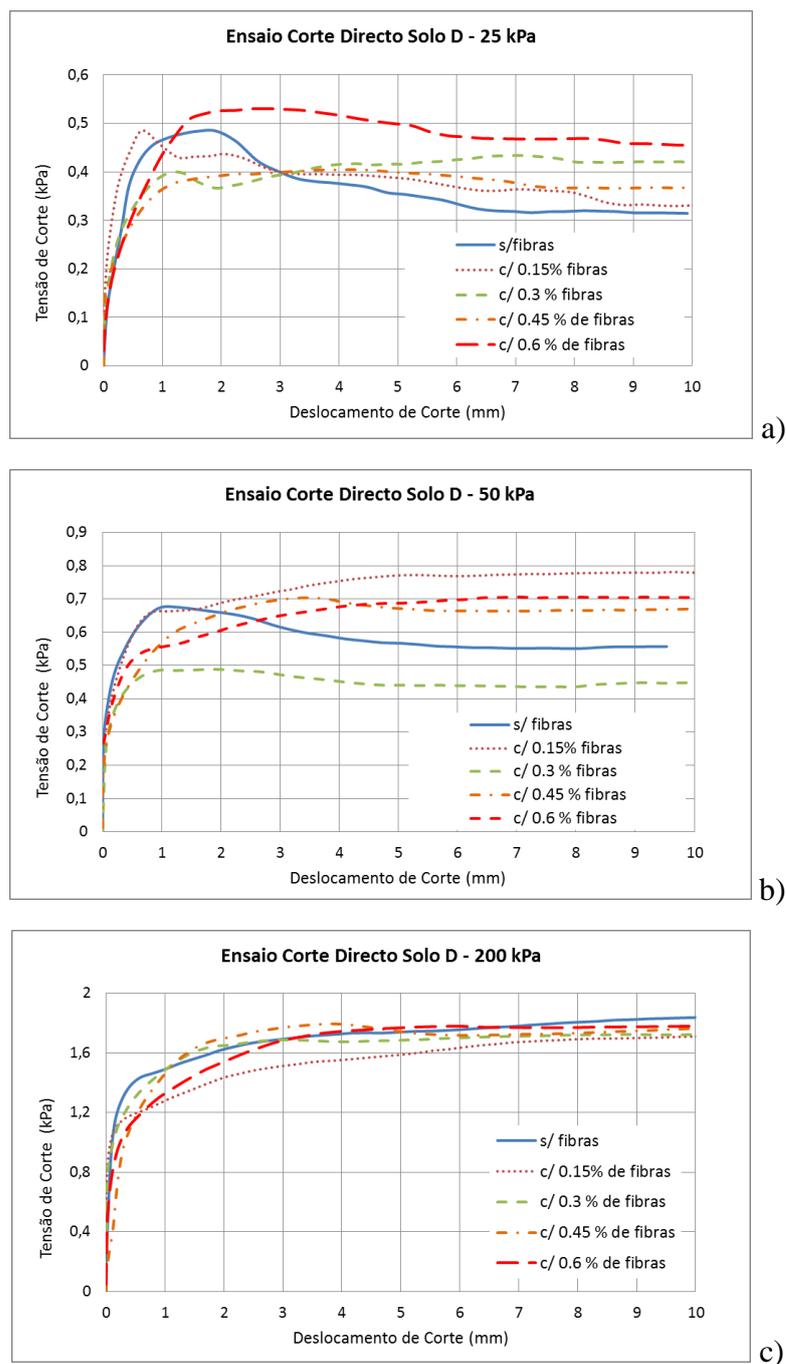


Fig. 5.13 – Influência da percentagem de fibras na tensão ao corte para os diferentes níveis de carga normal, a)  $\sigma_N = 25$  kPa, b)  $\sigma_N = 50$  kPa e c)  $\sigma_N = 200$  kPa

Nas Figuras 5.14 a) e b), apresentam-se os resultados da tensão de corte em função do deslocamento ao corte para o solo D, sob os diferentes níveis de tensão vertical.

Observando a curva dos provetes com 0,3% de fibras, constatou-se que a sua inclusão não produz melhorias significativas na resistência ao corte do solo, independentemente do nível de carga considerado, sendo até inferiores ao solo não reforçado. Esta situação pode estar

relacionada com diferentes aspectos ligados ao processo de mistura e de compactação, em que eventualmente pode ter ocorrido uma distribuição não uniforme das fibras no solo, havendo a formação de tufos, e a aderência do conjunto solo+fibras não tenha sido totalmente alcançado.

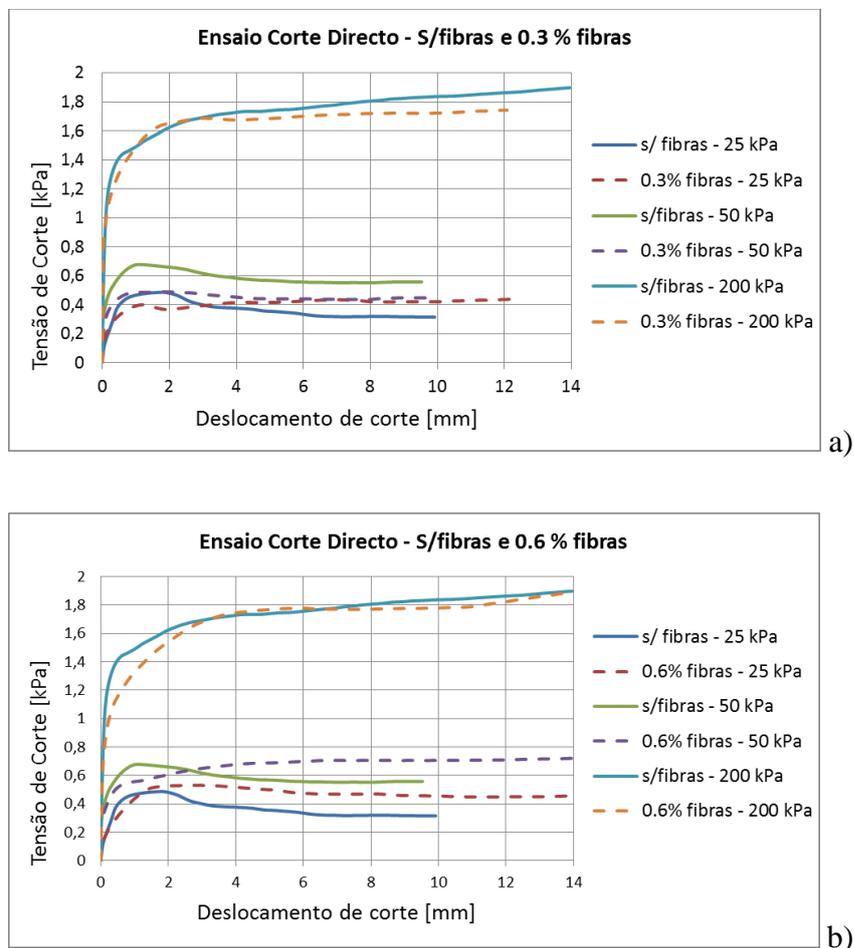


Fig. 5.14 – Variação da tensão ao corte do solo D com a percentagem de fibras (PF); a) PF = 0,3 %; b) PF = 0,6 %

Para além disso, durante a preparação dos provetes, o solo comportava-se como uma espécie de esponja, recuperando o seu volume após a compactação da camada. Este fenómeno pode estar relacionado com o facto de o provete conter água a mais, ou ainda que a energia de compactação não tenha sido eficazmente aplicada. Deste modo, não era integralmente mobilizada a resistência à tracção das fibras, o que influenciou o desempenho dos provetes.

Relativamente ao solo sem reforço, verificou-se que este segue um comportamento comum quando sujeito a esforços de corte, em que a tensão de corte foi aumentando até atingir o seu valor máximo, denominada resistência de pico, e em seguida decresceu até estabilizar num valor constante. Para cargas normais mais elevadas, constatou-se que a tensão de corte aumentou continuamente até à conclusão do ensaio, sucedendo o mesmo para o solo

reforçado, mas para todos os níveis de carga considerados. A inexistência de pico verificada para o solo sem reforço pode ser explicado pelo facto de a energia de compactação utilizada ser inferior à carga aplicada no provete durante o ensaio, e sendo os solos granulares, apresentaram um comportamento típico de um solo solto.

Analisando a Figura 5.14 b), verifica-se que enquanto na situação anterior a adição das fibras não contribuiu para a melhoria das propriedades resistentes da amostra, neste caso um teor de 0,6% produziu um maior efeito neste parâmetro, principalmente para os níveis de carga normal inferiores. Para o nível de carga mais elevado, o solo, com e sem reforço, apresentou um comportamento semelhante. Deste modo, para os níveis de carga normal mais baixos, constatou-se que o solo sem fibras e o reforçado descrevem um comportamento idêntico ao evidenciado para um teor de 0,3%. Em termos de tensão de corte, os resultados obtidos para um teor de 0,6% são superiores, sendo que a variação mais pronunciada ocorreu para a carga de 25 kPa, em que se verifica um aumento de 9,5%, em relação ao solo sem reforço.

O acréscimo de tensão de corte nos solos reforçados, embora de modo mais expressivo, foi igualmente observado por Falorca (2002), e depende essencialmente da aderência do conjunto solo+fibras, e o modo como estes se complementam para que a resistência das fibras possa ser mobilizada. Assim, à medida que a deformação por corte aumenta e o solo vai perdendo a capacidade para suportar carga, ocorre uma redistribuição de esforços, e a resistência à tracção das fibras é progressivamente accionada, o que se traduz num ganho de capacidade resistente do solo em estudo.

Da análise das figuras é ainda possível observar que para pequenas deformações de corte, a tensão de corte do solo reforçado nunca ultrapassou a correspondente ao solo sem reforço, sendo que este comportamento foi também observado por outros investigadores, como Falorca (2002) e Morel e Gourc (1997), cuja interpretação assenta no facto de ser necessário uma ligeira deformação no sentido de activar a contribuição das fibras. De facto, numa fase inicial, a porosidade do provete reforçado tende a ser superior em relação ao do sem reforço, fenómeno que se vai invertendo à medida que o deslocamento vai aumentando, devido ao melhoramento da interligação das partículas, o que permite melhorar a resistência.

Relativamente ao solo E, os resultados obtidos estão representados nas Figuras 5.15 a) e b).

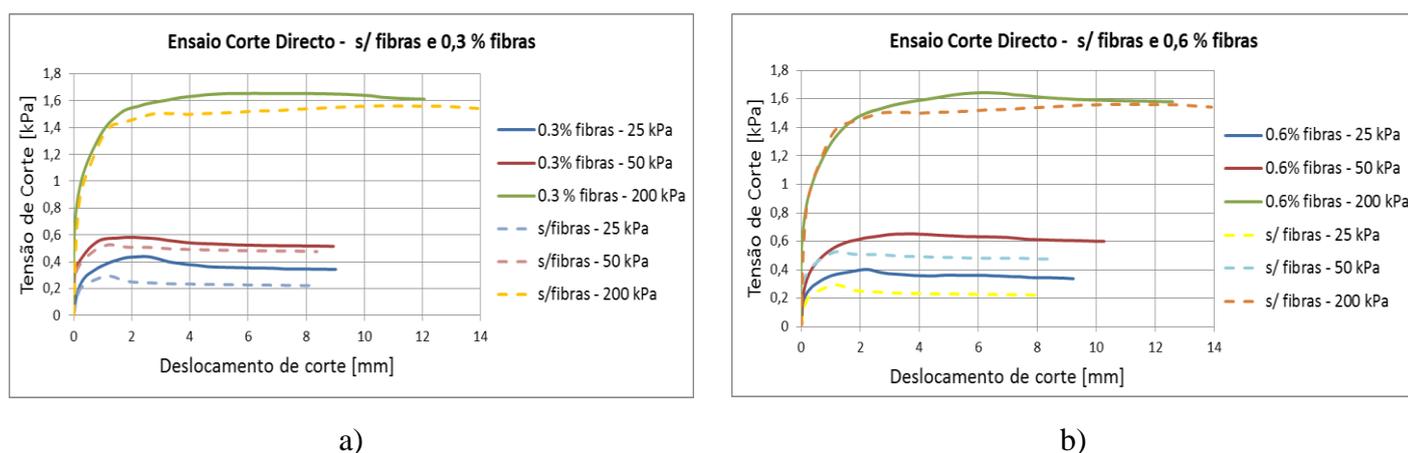


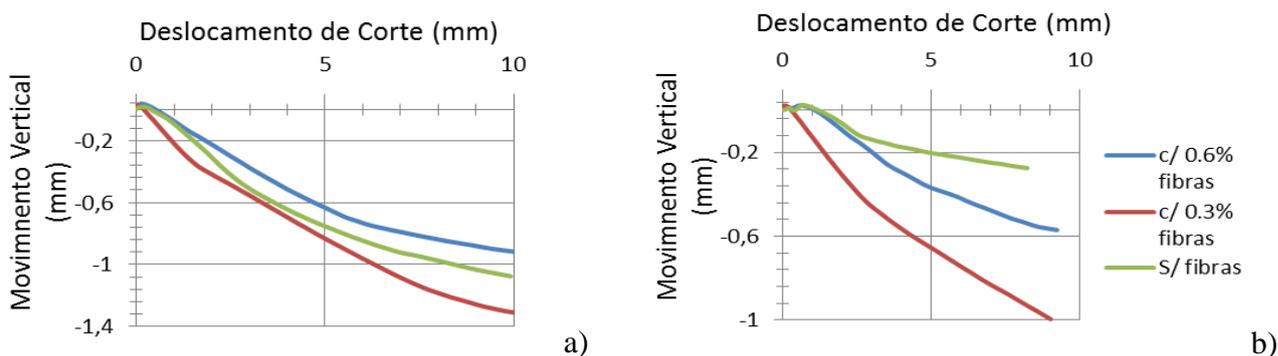
Fig. 5.15 - Variação da tensão ao corte do solo E com a percentagem de fibras (PF); a) PF = 0,3 %; b) PF = 0,6 %

De um modo geral, pode afirmar-se que a introdução das fibras, para ambas as percentagens, promove um aumento da sua resistência, para todos os níveis de carga normal aplicada, observando-se que à medida que se aumentava a carga, o incremento de resistência tornava-se cada vez mais reduzido. O acréscimo mais acentuado está associado à menor carga (25kPa), verificando-se um aumento de 48,9% e de 36,1%, para as amostras de 0,3% e 0,6%, respectivamente, em relação ao solo não reforçado.

Analisando o comportamento dos solos ao longo do ensaio, verificou-se que o solo reforçado parece apresentar uma resistência de pico, ao longo de um certo patamar, praticamente constante até ao final do ensaio. Neste caso, os provetes de solo E reforçado não apresentam o comportamento verificado para o de solo D, em que as fibras contribuía para um aumento contínuo da resistência, verificando-se ainda, que mesmo ao nível das pequenas deformações de corte, as amostras de solo reforçado atingem valores de resistência superiores às de solo natural, o que pode ser devido ao facto de no solo E ter-se conseguido aplicar uma energia de compactação de modo mais eficaz, o que permitiu obter um conjunto com uma densidade inicial superior, sendo a resistência mobilizada mais rapidamente.

Em termos de deformações, é analisada a deformação vertical dos solos D e E, com e sem a presença do reforço, para os teores definidos. Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 5.16 a) e b), e são referentes ao nível de carga mais baixo (25 kPa).

Da observação das figuras pode-se verificar um aumento de volume para os solos reforçados com 0.3% de fibras, atingindo as deformações mais significativas para o solo D. Relativamente ao teor de 0.6% de fibras, nota-se que apenas no solo E ocorre uma maior dilatação da amostra, em relação ao solo não reforçado.



A expansão volumétrica é comum a solos que se encontrem num estado mais compacto, pois os deslocamentos interpartículas destroem progressivamente a estrutura do solo, que inicialmente se encontra imbricada. Um maior aumento do volume nos solos reforçados pode ser explicado pela intervenção das fibras, que encontrando-se interligadas com o solo, ao serem traccionadas vão promover a quebra das ligações entre as partículas, conduzindo a esse aumento, como referido por Falorca (2002) e Coelho (2008). Como referido, para um teor de 0.6% não se verificou este pressuposto, podendo esta situação estar relacionada com o facto de esta percentagem já ser elevada para o tamanho do provete em estudo, o que leva a que em certos pontos a quantidade de fibras seja superior à de solo, criando tufo de cabelo, em que não existindo partículas envolvidas, não ocorre mobilização de solo, e consequente dilatação da amostra.

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. Considerações Finais

O objectivo principal da presente dissertação consistiu em avaliar as características mecânicas, através do estudo da resistência e da deformação à compressão e ao corte, além do módulo de elasticidade, de diferentes solos com a presença de fibras de cabelo, de modo a tirar conclusões sobre a potencialidade destes materiais no sector da construção sustentável, como elementos estruturais. Neste estudo, foi igualmente estudada qual a influência do processo de secagem (em ambiente controlado ou em estufa) e da quantidade de fibras na avaliação das características mecânicas. Os resultados obtidos permitiram formular as seguintes conclusões:

Na preparação dos provetes, concluiu-se que uma das fases mais importantes consiste no processo de mistura e compactação. A mistura de fibras com o solo é um processo delicado e deve ser conduzido de modo a garantir a homogeneidade do conjunto, por forma a não promover uma aglomeração das fibras de cabelos que podem pôr em causa a qualidade e capacidade dos provetes.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de compressão, verificou-se que a introdução das fibras contribui, de um modo geral, para uma melhoria das propriedades mecânicas em análise (resistência e deformação), independentemente do processo de secagem considerado, em relação aos provetes não reforçados. Esta melhoria pode ser explicada pela capacidade que as fibras de cabelo possuem para suportar os esforços impostos e ainda por permitir uma “maior agregação” entre as partículas do conjunto. Relativamente aos ensaios com diferentes percentagens de fibras, e para os níveis mais secos, verificou-se que com o seu aumento o melhoramento da resistência à compressão dos provetes deixa de ser tão efectivo.

Em termos de rotura, constatou-se que a presença das fibras altera o comportamento dos provetes, uma vez que permite aumentar a sua ductilidade e reduzir a propagação das fissuras.

Relativamente aos processos de secagem estudados, concluiu-se que independentemente da presença, ou não, de reforço, estes processos não tiveram grande influência no desempenho mecânico final dos provetes.

O módulo de elasticidade dos provetes foi igualmente influenciado pela presença das fibras, que promoveram uma melhoria deste parâmetro.

No que respeita à velocidade de secagem dos provetes, constata-se que as fibras contribuem para uma aceleração do procedimento, quando este ocorre em ambiente controlado, o que significa que os provetes atingem o teor pretendido mais rapidamente, o que se traduz numa

economia de tempo, bastante importante, pois deste modo é possível reduzir o tempo de construção. No processo em estufa, verifica-se que a presença do reforço não acelera a secagem dos provetes.

Nos ensaios ao corte realizados, verificou-se igualmente que as fibras de cabelo, em geral, modificam o comportamento dos solos, mas numa ordem de grandeza muito inferior ao registado nos ensaios de compressão. Em termos de resistência, concluiu-se que à medida que se aumenta a tensão normal, a contribuição das fibras de cabelo para o acréscimo da tensão ao corte vai diminuindo, sendo que o maior aumento corresponde ao nível de tensão mais baixo. Ao nível da deformação, verificou-se um aumento da dilatação em ambos os solos com a introdução das fibras.

Deste modo, espera-se que o presente trabalho tenha permitido consolidar um pouco mais o conhecimento das propriedades mecânicas dos solos reforçados com fibras de cabelo, de modo a aferir se este se enquadra nos requisitos pretendidos para uma solução construtiva em terra, em alternativa à construção corrente, pois permite reduzir custos de construção e minimizar os impactos ambientais associados ao sector de construção.

## **6.2. Trabalhos Futuros**

Com o objectivo de prosseguir o conhecimento acerca da estabilização de solos com a incorporação de fibras para utilização em construções em terra, propõem-se vários trabalhos para futura investigação, com o intuito de otimizar o processo de fabrico e viabilizar a sua utilização. Neste sentido, podem ser analisados os seguintes aspectos:

- Estudar a influência de outras fibras naturais nas propriedades mecânicas do conjunto, tendo em conta a sua implementação e facilidade de acesso em países menos desenvolvidos;
- Utilizar solos que se enquadrem nos limites definidos para as diferentes técnicas (fuso);
- Desenvolver um procedimento expedito que permita reduzir o tempo de preparação e compactação dos solos com a presença de fibras.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, V. M. C. (2015). “Arquitetura de Terra na Região de Aveiro: Reabilitação de Construções em Adobe”. Tese de Mestrado, Universidade Lusíada do Porto, Porto.

APA@ <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>. Agência Portuguesa do Ambiente (página Internet oficial), Portugal. Data de Acesso: Abril, 2017

Azevedo, H. D. S. (2010). “Reforço de Estruturas de Alvenaria de Pedra, Taipa e Adobe com Elementos de Madeira Maciça”. Tese de Mestrado em Construções, FEUP, Porto.

Berge, B. (2009). “The Ecology of Building Materials. Second Edition”. Architectural Press, Elsevier Science.

Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N. (2004). “Reflexiones Sobre la Normatividad para la Construcción SismoResistente de Edificaciones de Adobe”. PUCP, Lima

Brito, J. (2004). “Patologia e Reabilitação de Construção em Terra”. Apontamentos da Cadeira de Reabilitação de Edifícios na Licenciatura em Arquitectura, IST, Lisboa.

Carvalho, M. A. B. (2015). “Desenvolvimento e Validação de uma Solução Construtiva em BTC”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.

Castanheira, C., Bragança, L. (2009). “Benefícios Energéticos da Construção em Terra para Habitações Populares de Portugal”. Seminário Reabilitação Energética de Edifícios Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Cid, J., Mazarrón, F. R., Cañas, I. (2011). “Las normativas de construcción com tierra en el mundo”. Informes de la Construcción, Vol. 63, Issue 523, pp. 159-169.

Coelho, E. F. F., (2008). “Estudo do Comportamento Mecânico de Rejeitos de Minério de Ferro Reforçados com Fibras Sintéticas”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Dethier, J., Julien, C., Ribeiro, J. S. (1993). “Arquiteturas de Terra: Ou o futuro de uma tradição milenar”. Fundação Calouste Gulbenkian, 1993.

Dias, A. B. (2002). “Construção em Tijolo Cerâmico: Das Exigências Normativas do Produto à Prática de Aplicação”. Seminário sobre Paredes de Alvenaria, P.B. Lourenço & H. Sousa (Eds.), Porto, 2002

Dias, M. V. P. (2013). “Utilização de Fibras de Polipropileno na Melhoria do Comportamento de Solos Coesivos”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real

- DIN 18951 – 1951. “German Earth Building Code”. Germany. Referido por Gomes (2015)
- DIN 18945 – 2013. “Blocos de Terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio”. German Earth Building Code, Germany. Referido por Gomes (2015)
- DIN 18946 – 2013. “Argamassas de Assentamento de Terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio”. German Earth Building Code, Germany. Referido por Gomes (2015)
- DIN 18947 – 2013. “Rebocos de Terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio”. German Earth Building Code, Germany. Referido por Gomes (2015)
- Duarte, S. R. (2013). “Construir com a Terra - Uma proposta de intervenção no bairro do Barruncho, Odivelas”. Faculdade de Arquitetura, Lisboa, Portugal.
- E 196 - 1966. “Análise granulométrica”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- E 197 - 1966. “Ensaio de compactação”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- Eusébio, A. P. J. (2001). “Reabilitação e Melhoramento de Paredes de Terra Crua – Taipa”. Tese de Mestrado em Construção, IST, Lisboa.
- Falcão, J.M.F.V.N (2014), “Arquitetura Contemporânea em Terra”. Tese de Mestrado em Construção e Reabilitação, IST, Portugal.
- Falorca, I. (2002). “Comportamento do solo microreforçado com fibras sintéticas de pequeno comprimento”. Dissertação de mestrado, FCTUC, Coimbra.
- Fernandes, M. M. (2006). “Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais”. FEUP Edições, Porto
- Fernandes, M. M. (2011). “Mecânica dos Solos: Introdução à Engenharia Geotécnica”. FEUP Edições, Porto
- Ferreira, C. C. (2012). “A sustentabilidade do sistema construtivo em terra: um projeto de reabilitação”. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- Feuerharmel, M. R. (2000). “Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Fibrenamics@ <http://www.web.fibrenamics.com/pt/conhecimento/areas-de-aplicacao/construcao-civil/> Fibrenamics - Plataforma Internacional da Universidade do Minho, Portugal. Data de Acesso: Outubro, 2016
- Gomes, M. I. S. (2008). “Construção Sismo-Resistente em Terra Crua”. Tese de Mestrado em Construção, IST, Lisboa

- Gomes, M. I., Brito, J., Lopes, M. (2007). “Comportamento das Construções em Terra quando Sujeitas a um Sismo”. 5º Seminário de Arquitectura de Terra em Portugal, At Aveiro, Portugal.
- Gomes, N. D. B. (2015). “Caracterização de Blocos de Terra para Construção de Alvenarias Ecoeficientes”. Tese de Mestrado em Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Gouveia, D., Villela, F., Damásio L., Remiro, R. (2011). “SuperAdobe: Construindo com o terreno”. *Arquitectura e Urbanismo*, Universidade Federal Fluminense, Brasil
- Hall M. R., Lindsay R, Krayenhoff M. (2012). “Modern earth buildings: materials, engineering, construction and applications”. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- Hoare, D. J., 1979, "Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres". *Proceedings of the First International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and other Techniques*, Paris, France, Vol. 1, pp.47-52. Referido por Falorca (2002)
- Inácio, C. A. E. S. (2016). “Estudo do Solo enquanto Material de Construção Sustentável”. Tese de Mestrado na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Librelotto, L. I. (2013). “Tecnologias, Sistemas Construtivos e Tipologias para Habitação de Interesse Social em Reassentamentos”. Ficha Catalográfica – 24, Universidade Federal de Santa Catarina, ARQ Universidade Federal de Santa Catarina, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brasil
- Lourenço, P. (2002). “Arquitectura de Terra: uma visão de futuro”. Companhia de Arquitectura e Design, Portugal.
- Lourenço, P., Brito, J., Branco, F. (2002). “Novas Tecnologias de Aplicação de Terra Crua na Construção”. Companhia de Arquitectura e Design, Portugal.
- Maciel, I. P. (2011). “O Cabelo Humano como Matéria-Prima para Malha”. Tese de Mestrado de Design de Moda, Faculdade de Arquitectura Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa
- Mália, M. A. B. (2010). “Indicadores de Resíduos de Construção e Demolição”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST, Lisboa.
- Maniatidis V, Walker P. (2003). “A review of rammed earth construction”. Department of Architecture & Civil Engineering, University of Bath.
- Mateus, L. P. M. (2006). “Caracterização de Revestimentos usados em Construção de Taipa no Barlavento Algarvio”. Tese de Mestrado em Construção, IST, Lisboa

- Mateus, R., (2004). “Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.
- Middleton, G. F. (1992). “Bulletin 5: Earth Wall Construction”. Fourth Edition, CSIRO Division of Building, Construction and Engineering, North Ryde, Australia
- Minke, G. (2006). “Building with earth, design and technology of a sustainable architecture”. Birkhauser – Publishers of Architecture, Basel-Berlin-Boston.
- Montardo, J.P. (1999). “Comportamento Mecânico de Compósitos de Solo-Cimento-Fibras: Estudo do Efeito das Propriedades dos Materiais Constituintes”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Referido por Feuerharmel, (2000).
- Moreira, A. M. (2008). “Materiais de construção I – Terra Crua”. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Tecnologia de Tomar, Portugal.
- Morel, J. C. e Gourc, J. P., 1997, "Mechanical behaviour of sand reinforced with mesh elements", *Geosynthetics International*, Vol. 4, N°5, pp. 481-508. Referido por Falorca (2002)
- Morton, T., Stevenson, F., Taylor, B., Smith, C. (2005). “Low Cost Earth Brick Construction: monitoring and evaluation. Arc. Architects. Referido por Pereira (2013a)
- Mota, I. A., Pinto, M., Sá, J. V., Marques, V. S., Ribeiro, J. F. (2002). “- Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável – ENDS 2005-2015”. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente/Instituto do Ambiente.
- Neumann, J. V., Blondet, M., Iwaki, C. (2013). “La Intervención Del Patrimonio Edificado En Tierra En Áreas Sísmicas y Las Cartas de Conservación”. *digitAR*, nº. 1, pp. 53-61.
- Neves, S. C. M. (2011). “Estudo da aplicabilidade de sistemas construtivos no desempenho da sustentabilidade na Engenharia Civil”. Tese de Mestrado em Construção, IST, Lisboa.
- NP – 83:1965. “Determinação da densidade das partículas”. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, Portugal.
- NP – 84:1965. “Determinação do teor em água”. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, Portugal.
- NP – 143:1969. “Determinação dos limites de consistência”. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, Portugal.
- NZS 4297:1998. “Engineering Design of Earth Buildings”. Standards New Zealand e Earth Building Association of New Zealand, New Zealand
- NZS 4298:1998. “Material and Workmanship for Earth Buildings”. Standards New Zealand e Earth Building Association of New Zealand, New Zealand

NZS 4299:1998. “Earth Buildings not Requiring Specific Design”. Standards New Zealand e Earth Building Association of New Zealand, New Zealand

Oliveira, D. V., Silva, R. A., Schueremans, L., Lourenço, P. B. (2010). “Construção em Taipa e os Sismos”. 8º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Pereira, J. M. N. (2013a). “Estudo do Solo enquanto Material de Construção Sustentável”. Tese de Mestrado na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente, DEC - UC, Coimbra.

Pereira, J. P. B. (2013b). “Análise do Comportamento Térmico de Paredes de Taipa”. Tese de Mestrado em Construções, Escola de Ciências e Tecnologias da Universidade de Évora, Évora.

Pereira, P. M., Vieira, C. S. (2013). “Resíduos de Construção e Demolição. Um Estado de Arte visando a sua Valorização em Trabalhos Geotécnicos”. Relatório de Investigação no âmbito do projecto “Aplicação sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em estruturas reforçadas com geossintéticos – RCD-VALOR”, FEUP, Porto.

Ponte, M. M. C. C. (2012). “Arquitetura de Terra: o desenho para a durabilidade das construções”. Tese de Mestrado em Arquitetura, FCTUC, Dep. de Arquitetura, Coimbra

Puga, A. B. V. C. (2009). “Estudo Experimental de Aplicação Combinada de Processos Construtivos Tradicionais na Construção Contemporânea”. Tese de Mestrado em Construções, FEUP, Porto.

Ramos, J. (2002). “Análise Experimental e Numérica de Estruturas Históricas de Alvenaria”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil, Minho.

Rodrigues, P. F., (1999). “A Problemática dos Revestimentos de Paredes em Construções de Terra Crua”. Jornada sobre Construções com Terra Aditivada, FunDEC, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Rodrigues, P. F., Henriques F. M. A. (2006). “Construções em Terra: Conservação do Património Existente e Perspectivas Futuras”. 2.º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios - PATORREB, Porto, FEUP, p.273-282.

Sales, K. (2011). “Melhoria de solo por inclusão de fibras naturais”. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasil

Santos, J. A. (2008). “Obras Geotécnicas: Compactação – Elementos Teóricos”. Apontamentos Mestrado em Engenharia Civil, IST, Lisboa.

SAZS 724 (2001). “Zimbabwe Standard Code of Practice for Rammed Earth Structures”. STANDARDS ASSOCIATION OF ZIMBABWE, Zimbabwe

- Silva, A. G. C. DA (2010). “Biodeterioração da Fibra de Sisal em Compósitos à Base de Cimento”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana-BA. Referido por Sales (2011)
- Silva, M. F. C. G. (2015). “Blocos de Terra Compactada com e sem Materiais Cimentícios”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST, Lisboa
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins T., Pereira, H., Almeida, J. (2012). “Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions”. *Construction and Building Materials*, Vol. 28, Issue 1, pp. 36-44.
- Standards Australia (2002). “The Australian Earth Building Handbook”. Australia. Referido por Maniatidis e Walker (2003)
- The Hair (1984). *Harry’s Cosmetology*, 23, pp. 396-426. Referido por Sales (2011)
- Torgal F., Jalali, S. (2011a). “Patologias e Reabilitação de Construções em Terra”. *Construção Magazine*, nº 43, pp. 32-34.
- Torgal F., Jalali, S. (2011b). “Vantagens ambientais da construção em terra”. *Construção Magazine*, nº 43, pp. 32-34.
- Torgal, F., Eires, R., Jalali, S. (2009). “A Construção em Terra”. TecMinho, Guimarães, Portugal
- Trindade, V. R. N. N. (2008). “Construção Tradicional do Algarve: caracterização construtiva, análise de anomalias e propostas de intervenção.” Tese de Mestrado na especialidade de Reabilitação de Edifícios, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Tucci, A. M. F. (1989). “Propriedades Físico-Químicas do Cabelo: Desenvolvimento de Métodos de Avaliação de Alterações Estruturais Induzidas por Radiação”. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. Referido por Sales (2011)
- Varum, H., Costa, A., Pereira, H., Almeida, J. (2006). “Comportamento Estrutural De Elementos Resistentes em Alvenaria De Adobe”, III Congresso Internacional de Arquitectura de Tierra, Valladolid, Espanha