



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

# **Estudo do Solo enquanto material de Construção Sustentável**

Dissertação a apresentar para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

**Carlos Alberto Espírito Santo Inácio**

Orientador

**Maria Isabel Moita Pinto (DEC-FCTUC)**

**Adelino Vasconcelos Lopes (DEC-FCTUC)**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, janeiro, 2016**

*“I can’t change the direction of the wind,  
but I can adjust my sails  
to always reach my destination””*

*(Jimmy Dean)*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, tenho que agradecer aos meus pais, Carlos e Cecília, que me possibilitaram esta oportunidade de desenvolver conhecimentos, aprender e crescer enquanto pessoa, ao longo destes últimos anos, quer seja a nível académico ou pessoal. Tenho que lhes louvar o esforço e sacrifícios que fizeram para eu pudesse ter a melhor educação possível, por me ajudarem a tornar uma pessoa mais responsável e pelo apoio incondicional. Também agradecer ao meu irmão, Sérgio e à respetiva esposa Telma, que estiveram sempre disponíveis e que também contribuíram para este trajeto académico e pessoal, bem como os meus sobrinhos, Beatriz e Simão.

Em especial, agradeço à minha namorada, Sara, por todo o apoio, por toda a ajuda, por todo o companheirismo, por todas as vezes que insistiu comigo e pelo incentivo que me deu para que pudesse atingir os objetivos, tanto a nível profissional como pessoal. Foi a pessoa que mais me acompanhou neste percurso académico, aquela que mais me marcou e a que me fez crescer. Por isso e muito mais, estou inteiramente grato por ela ter feito e continuar a fazer parte da minha vida.

Agradeço a todos os meus colegas, que me acompanharam desde do princípio ou desde cedo, em especial ao Fábio Diogo, ao Nuno Novo, ao Rui Gonçalves e ao Rúben Gomes, pelo apoio e pelos momentos que passámos por este nosso percurso, que vão ser sempre recordados. Também agradeço às minhas queridas amigas Cátia e Rita, que estiveram sempre presentes quando era preciso, pelo companheirismo, amizade pura e apoio ao longo deste período académico.

Quero dizer muito obrigado aos meus orientadores, Professora Maria Isabel Moita Pinto e Professor Adelino Jorge Lopes Ferreira, pelas dúvidas, pela constante ajuda, pela disponibilidade, acompanhamento e pelo tempo que tiraram para me ajudar ao longo deste trabalho. Também, há que agradecer e muito, ao senhor José António, pela paciência, por toda a ajuda que deu e pelo tempo que passou comigo no laboratório.

De louvar, a ajuda da minha colega Natacha, que sempre se mostrou sempre disponível, que me tirou algumas dúvidas e que, sempre que fosse necessário, ajudava de alguma forma no laboratório.

Agradeço à cabeleireira Helena Gomes, pelo cabelo que foi cedido e utilizado nos ensaios deste trabalho e também pelo carinho, amizade e apoio. Da mesma forma, agradeço ao José Augusto por todo o carinho, acompanhamento e apoio.

Por último, tenho de agradecer ao laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural pela disponibilização da prensa para os ensaios que foram realizados.

## RESUMO

O solo é um material durável, que se encontra disponível em todo o mundo, por isso é económico e ecológico. Cada vez mais se torna necessário utilizar os recursos naturais (eventualmente melhorados com recurso a produtos tradicionalmente classificados como resíduos) como materiais nobres de construção. É a designada eco construção ou construção sustentável.

O desenvolvimento do trabalho proposto inicia-se com a análise das técnicas tradicionais da utilização do solo como material de construção na edificação. É levado a cabo um estudo de caracterização dos vários materiais em estudo, solo e fibras, e um estudo paramétrico em que são avaliadas as propriedades mecânicas (resistência e deformabilidade) do material através de ensaios laboratoriais de flexão e de compressão. A utilização de fibra capilar, cabelo humano, como reforço faz todo o sentido devido à sua capacidade de aumentar a resistência e a agregação do solo.

O estudo experimental tem como objetivo a análise do comportamento mecânico de um solo sob diferentes condições de ensaio: diferentes teores de humidade, com e sem adição de elementos de reforço (fibras) que lhe melhorem eventualmente o comportamento. O objetivo é contribuir para o conhecimento da influência do teor de humidade, do tipo do solo e da inclusão de diferentes tipos de elementos de reforço para no futuro permitir uma utilização mais eficiente e controlada do solo como material de construção em aplicações estruturais na edificação considerada sustentável.

Do presente estudo, conclui-se que o comportamento dos solos é efetivamente afetado pelo teor de humidade, pela velocidade de secagem dos blocos e é ainda mais influenciado, em termos de resistência e deformabilidade, quando se incorpora no solo um reforço, tal como o cabelo.

## **ABSTRACT**

Soil is a durable material, which is available worldwide, so it is economic and ecologic. Increasingly it is necessary to use natural resources (possibly improved with the use of products traditionally classified as waste) as noble building materials. It is the designated eco construction or sustainable construction.

The development of the proposed work begins with an analysis of the traditional techniques of using soil as a building material in the construction. It is carried out a study to characterize the different materials under study, fibers and soil, and a parametric study on the mechanical properties are evaluated (strength and deformation) of the material by measurement of flexural strength and compression. The use of hair fiber, human hair, as reinforcement makes sense due to its properties, namely the ability to increase the strength and the power of soil aggregation.

The experimental study aims to analyze the mechanical behavior of the soil under different test conditions: different moisture contents, with and without addition of reinforcing elements (fibers) which eventually improve his behavior. The purpose is to contribute to the knowledge of the influence of moisture content, soil type and include different kinds of reinforcing elements in the future to allow for a more efficient and controlled use of soil as a building material for structural applications in the considered sustainable building.

From this study, it is concluded that the soil behavior is indeed affected by moisture content, the drying speed of the blocks and is further influenced in terms of strength and deformability when a reinforcement is incorporated into the soil, such as hair.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE QUADROS .....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ESTADO DA ARTE .....	4
2.1 Enquadramento .....	4
2.2 Contexto histórico.....	5
2.3 Construção em Terra – Técnicas construtivas .....	8
2.3.1 Adobe .....	9
2.3.2 Blocos de Terra Comprimida (BTC).....	11
2.3.3 Taipa.....	13
2.4 Vantagens e desvantagens comuns entre as técnicas do Adobe, BTC e Taipa .....	15
2.5 Regulamentação e Legislação associada à construção em terra .....	15
2.6 Adição de fibras na construção – Cabelo Humano.....	17
3 SUSTENTABILIDADE DO SOLO.....	21
3.1 Construção sustentável .....	21
3.2 Vantagens ambientais da construção em terra.....	23
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL - MÉTODOS E MATERIAIS .....	27
4.1 Introdução .....	27
4.2 Materiais utilizados durante os ensaios .....	27
4.2.1 Solo.....	27
4.2.2 Cabelo.....	31
4.3 Equipamento utilizado .....	34
4.3.1 Molde para os blocos.....	34
4.3.2 Prensa hidráulica de compressão.....	34
4.4 Método experimental .....	35
4.4.1 Preparação dos blocos .....	36
4.4.2 Plano dos ensaios laboratoriais .....	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
5.1 Introdução.....	40

---

5.2	Método de fabrico dos blocos.....	41
5.3	Velocidade de secagem do solo.....	43
5.4	Influência do teor em água na resistência à compressão .....	45
5.5	Variação da resistência à compressão com o tempo de secagem.....	49
5.6	Relação do teor em água com a deformação do solo .....	50
5.7	Secagem e reciclabilidade do solo com reforço .....	53
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS .....	58
6.1	Considerações Finais .....	58
6.2	Trabalhos Futuros .....	60
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Evolução das exigências humanas, em relação à construção, ao longo do tempo (Sousa, 2002).....	5
Figura 2. 2 - Cidade de Arg-Bam, em Adobe, no Irão (Unesco World Heritage Centre)...	6
Figura 2. 3 - Principais técnicas de construção em Portugal (Jorge et al., 2005).....	7
Figura 2. 4 - Diferentes tipos de utilização do solo como material de construção (Houben e Guillaud, 1989).....	9
Figura 2. 5 - Diferentes tipos de moldes usados no caso do adobe (bioarquitetura@).....	11
Figura 2. 6 - Fabrico de Adobe em Sheik Zayed, Faixa de Gaza (aventar@).....	11
Figura 2. 7 - a) Blocos de terra comprimida, BTC (Moreira, 2008); b) Prensa Cinva Ran (Fernandes, 2007).....	12
Figura 2. 8 - Construção em BTC (Duarte, 2013).....	13
Figura 2. 9 - a) Prensa manual (Moreira, 2008); b) Prensa hidráulica/mecânica (Duarte, 2013).....	13
Figura 2. 10 - Elementos constituintes de uma cofragem (Doat et al., 1979).....	14
Figura 2. 11 - Número de normas vigentes (Cid et al., 2011).....	15
Figura 2. 12 – Esquema da estrutura do cabelo (Nogueira, 2003).....	18
Figura 2. 13 - Curva Tensão - Deformação do cabelo humano (entendendocosmetologia@). .....	19
Figura 2. 14 - Curva Tensão - Deformação de diferentes materiais (Figueira, 2008).....	20
Figura 3. 1 - Importância da construção sustentável para o desenvolvimento sustentável (LiderA@).....	22
Figura 3. 2 - Emissões de carbono correspondente a cada material, correntemente utilizados na construção (adaptada de Morton et al., 2005).....	24
Figura 3. 3 - Absorção da humidade de vários materiais (Arundel, 1986).....	26
Figura 4. 1 - Curvas granulométricas de cada constituinte da mistura do solo e do solo estudado.....	28
Figura 4. 2 - Dimensão e distribuição dos grãos de cada fração (constituente) do solo em estudo.....	29

---

Figura 4. 3 - Processo de sedimentação da argila.....	29
Figura 4. 4 - Curva de compactação leve do solo estudado.....	30
Figura 4. 5 - Equipamento de compactação.....	30
Figura 4. 6 - Aspeto do cabelo disponível para o reforço do solo.....	32
Figura 4. 7 - Curva granulométrica do cabelo (1ª e 2ª amostragens).....	33
Figura 4. 8 - Bloco de solo reforçado com cabelo.....	33
Figura 4. 9 - Molde para o fabrico dos blocos.....	34
Figura 4. 10 - a) – Prensa hidráulica; b) – Interface com o software, que controla os ensaios.....	35
Figura 4. 11 - Blocos submetidos a secagem, em ambiente controlado.....	36
Figura 4. 12 - Esquema ilustrativo da preparação dos blocos de solo não reforçado.....	36
Figura 4. 13 - Distribuição dos cabelos nos blocos.....	37
Figura 4. 14 - Bloco de solo a ser ensaiado na prensa hidráulica.....	39
Figura 5. 1 – Gráfico Resistência-Deformação dos provetes comp-PH.....	41
Figura 5. 2 - Compactação manual.....	42
Figura 5. 3 - Variação do teor em água (W), com e sem reforço, ao longo do tempo.....	44
Figura 5. 4 - Variação da resistência máxima, com e sem reforço, consoante W.....	45
Figura 5. 5 - Imperfeições do bloco.....	47
Figura 5. 6 - Rotura de um bloco com reforço durante o ensaio.....	48
Figura 5. 7 - Variação da resistência máxima à compressão do solo, com e sem reforço, com o tempo de secagem.....	49
Figura 5. 8 - Variação da deformação, com o teor em água presente no solo.....	51
Figura 5. 9 - Efeito de cintagem do solo com reforço.....	52
Figura 5. 10 - Secagem, em estufa, de amostras de solo com reforço.....	54
Figura 5. 11 - Efeito da temperatura nos fios de cabelo.....	55
Figura 5. 12 - Efeito das altas temperaturas no cabelo.....	57

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2. 1 - Exemplos de Regulamentos e Normas referentes à construção em terra (Cid et al., 2011 e Hall et al., 2012).....	16
Quadro 3. 1 - Energia gasta em transporte (Berge.2009).....	24
Quadro 3. 2 - Comparação de diferentes soluções construtivas (Murta et al., 2009).....	25
Quadro 4. 1 - Solo utilizado para os ensaios laboratoriais.....	27
Quadro 4. 2 - Propriedades do solo.....	31
Quadro 5. 1 - Resistência e deformação máxima do solo para cada método de fabrico dos blocos, respetivamente.....	43

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do trabalho

Os edifícios e estruturas desenvolvidas resultaram da evolução ao longo do tempo, desde a construção em terra ou solo até aos novos materiais, como o aço e o betão armado, constituintes dos nossos edifícios atuais. Estes são feitos com o propósito de providenciar abrigo e melhor qualidade de vida ao ser humano. Com a evolução das técnicas e o aparecimento de novas tecnologias, que permitem melhorar a resistência das construções devido ao aumento da exigência às condições de conforto, fez com que a construção em terra fosse progressivamente abandonada, isto porque não oferecia as mesmas condições que outros materiais.

A construção em terra tem um estigma associado, que a considera como sinal de pobreza e da existência de escassos recursos económicos, que impossibilitam a obtenção de outros materiais de construção mais modernos, como o betão ou o tijolo. No entanto, atualmente esta técnica de construção tem vindo a ganhar um novo ânimo e conseguiu uma maior visibilidade, ressurgindo novamente não só a nível nacional, mas também praticamente em todos os locais onde foi sendo esquecida. Isto acontece devido à importância do património existente e que este necessita de ser preservado mas também porque a terra/solo é visto como um material sustentável de construção.

Devido à falta de conhecimento técnico deste material para aproveitar as suas potencialidades, os estudos e investigações que têm vindo a ser desenvolvidos praticamente a nível mundial vão permitir viabilizar e melhorar o desempenho deste tipo de material. A principal preocupação tem de ser a segurança e o conforto na habitação, bem como as medidas de minimização dos danos causados pelo passar do tempo, tais como a erosão, chuvas e outras vulnerabilidades associadas a este tipo de construção.

Uma vez que, em termos habitacionais e de qualidade ambiente interior, o solo não apresenta efeitos nocivos porque não possui químicos e outros compostos, como os que são utilizados na construção corrente, é uma vantagem bastante apreciável. O melhoramento do solo, com auxílio

de reforços, permitem diminuir a permeabilidade, aumentar a resistência do solo e verificar qual o efeito na sua deformação. Isto é realizado através de processos físicos e/ou pela inclusão de materiais resistentes à tração, tal como neste trabalho em particular o cabelo humano. Do ponto de vista económico, o solo também é muito mais viável em relação a qualquer outro material utilizado na construção corrente, uma vez que a sua obtenção é muito mais fácil e está disponível praticamente em qualquer local.

Associado ainda a políticas de desenvolvimento sustentável e ao esgotamento dos recursos naturais, bem como os resíduos gerados ao nível do setor de construção, faz com que a implementação deste tipo de construção seja alvo da devida consideração e atenção. Utilizar um recurso que se encontra nas redondezas do próprio local onde se vai construir e adicionar-lhe materiais com baixo custo ambiental, que permitam adotar as suas características da melhor forma, pode vir a ser um caminho a considerar para que se fomente o desenvolvimento sustentável da construção.

Por estas e outras razões, considera-se que este tipo de construção com solo tem que ser visto como uma alternativa plausível em relação à construção corrente, visto ser ecologicamente equilibrada.

Este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento mecânico do solo quando sujeito a forças de compressão, com e sem atuação de reforço. O programa experimental passa por ensaios de compressão sobre blocos de solo com e sem reforço (cabelos humanos), com diferentes teores em água (desde o estado de teor ótimo em água até um nível mais seco), pela verificação da progressão da secagem dos blocos, em condições de ambiente controlado e ao longo do tempo, e qual o efeito que o reforço exerce sobre o solo, em termos de resistência e deformação.

## **1.2 Estrutura da Dissertação**

Em seguimento ao anterior subcapítulo introdutório que tem como objetivo contextualizar a dissertação, segue-se a descrição dos capítulos presentes neste trabalho e que detalham todo o trabalho realizado.

No Capítulo 2 é feito o enquadramento da evolução do setor da construção, um contexto histórico sobre este tipo de construção, em que consistem as técnicas e a suas vantagens e

desvantagens, qual a regulamentação específica que está associada ao tema e ainda a descrição e caracterização do reforço utilizado neste trabalho, o cabelo humano.

No Capítulo 3 aborda-se o tema da Construção Sustentável, visto que o solo é um material alternativo ao que se utiliza maioritariamente na construção corrente, passando por uma análise económica e ambiental do próprio setor de construção e evidenciando as vantagens da terra/solo, como material de construção, em relação aos materiais que constituem os edifícios.

No Capítulo 4 é feita a caracterização/descrição dos materiais utilizados na realização deste estudo, desde a caracterização geotécnica do solo escolhido para os ensaios e dos seus constituintes individualmente, bem como a caracterização do reforço utilizado. Ainda neste capítulo, são apresentados os planos dos ensaios, em que se descrevem os procedimentos experimentais (mistura do solo, com e sem reforço, preparação dos provetes e realização dos ensaios laboratoriais na prensa).

O Capítulo 5 inclui a análise e discussão completa dos resultados obtidos para cada ensaio laboratorial realizado.

Para finalizar, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões mais importantes e propostas para que se continue a dar seguimento ao trabalho desenvolvido nesta dissertação.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Enquadramento

Sabendo que para sobreviver, o Homem necessitava de abrigo e segurança, este desenvolveu técnicas de construção que recorriam ao que a própria natureza providenciava. Estes materiais utilizados eram moldados e adaptados consoante as suas necessidades. Uma vez que o solo é um dos recursos mais abundantes e com grande facilidade de aplicação, tem sido um material de construção bastante apreciado e muito utilizado outrora. Este tipo de construção pode ser observado em muitos locais espalhados pelo mundo e está presente em diferentes culturas, com variações consoante a mesma.

A técnica utilizada baseava-se simplesmente em modelar os materiais encontrados sob a forma bruta. O solo, a pedra, a madeira, os metais e as fibras vegetais eram os que se adquiriam mais facilmente, sendo por isso os mais utilizados. Com o aumento da exigência, a procura destes materiais tornou-se cada vez maior e estes tinham de apresentar as melhores características, tais como: melhor aparência, maior durabilidade e maior resistência.

Com o passar do tempo e com a evolução tecnológica, as técnicas de construção foram mudando e os materiais também. Desta forma, surgem novos materiais, capazes de conferir melhores condições, em relação a conforto, qualidade e segurança (Figura 2.1), como é o caso do tijolo cerâmico cozido, do cimento, do aço e do betão armado.

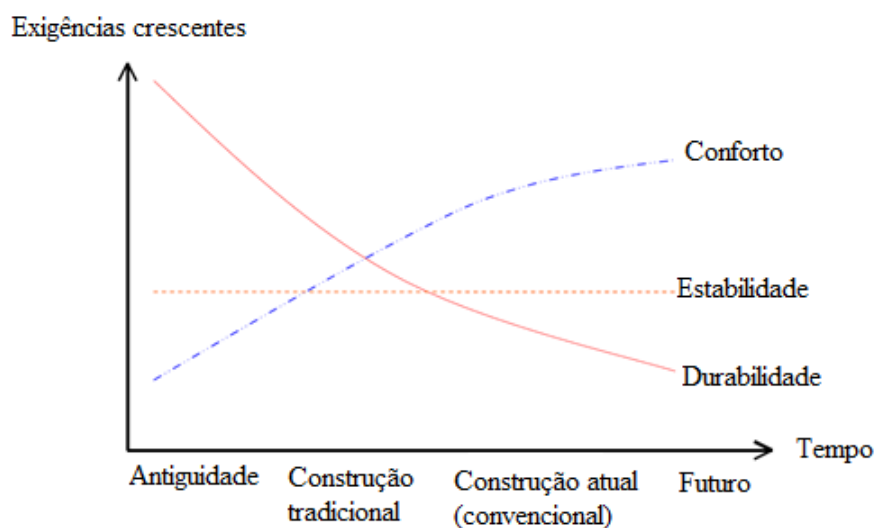


Figura 2. 1 - Evolução das exigências humanas, em relação à construção, ao longo do tempo (Sousa, 2002).

Devido a tais desenvolvimentos, a utilização da terra crua foi sendo abandonada por não apresentar as condições pretendidas e, também, a construção de paredes em pedra e coberturas em madeira foram sendo progressivamente deixadas para trás. Atualmente em Portugal, e não só, tem voltado a reutilizar-se por ser considerada parte do património nacional, que necessita de ser preservada. Tal é devido às características de material sustentável, apesar de ser visto por muitos como sinal de pobreza.

Para competir, face ao aparecimento e desenvolvimento de novos materiais, o solo tem sido alvo de muitas intervenções e investigações para melhorar o seu desempenho. Por consequência da sobre-exploração de recursos naturais, o solo é considerado uma escolha ideal, beneficiando assim políticas de desenvolvimento sustentável.

## 2.2 Contexto histórico

É impossível identificar de forma precisa e consensual, qual foi a data em que se começou a empregar a terra como material de construção, porque vários autores identificam diferentes períodos. No entanto parece natural que tenha sido introduzida paralelamente ao aparecimento das primeiras sociedades agrícolas, entre 12000 e 7000 A.C. (Torgal e Jalali, 2009). Este tipo de construção resulta atualmente de conhecimentos milenares, passados de geração em geração, em que o Homem tira partido dos materiais disponíveis na natureza e aplica-os para construir os seus edifícios, extraindo assim as suas melhores potencialidades. As formas de aplicar a terra na construção diferem de local para local, esteticamente ou estruturalmente, assumindo a



identidade geográfica correspondente a cada região/zona. Esta identidade demonstra a relação entre a construção, o Homem e meio ambiente.

Quando a terra é referida enquanto material de construção, considera-se que é o solo não orgânico, situado entre a rocha e a terra vegetal e que varia de profundidade de local para local. É constituída maioritariamente por areia, argila, gravilha e silte, aos quais estão embutidos os cloretos, matéria orgânica, metais, nitratos, sais solúveis e sulfatos. A argila e o silte atuam como o ligante do material, conferindo poder de agregação, enquanto a areia e a brita correspondem ao inerte do material, importante para que este contraia e dilate, quer seja pela presença de água ou variação de temperatura, de modo a que não sofra fissurações (Dethier, 1982).

Estima-se que cerca de 1/3 dos habitantes do planeta vivam em habitações construídas utilizando terra/solo, sendo que é bastante eficaz em regiões com clima adverso, desde zonas frias e pluviosas, até às quentes e secas. São conhecidos vários processos de construção, sendo que os mais utilizados são: a taipa, o adobe e o BTC. No entanto a escolha do processo não depende da preferência do construtor mas sim das características do próprio solo. A cidade de Arg e Bam (Figura 2.2), no Irão, é um exemplo da utilização do adobe (tijolos de terra crua) como elemento principal na sua estrutura. Aguentou-se quase até aos dias de hoje, caso não fosse um evento natural, neste caso um terremoto em 2003, que quase assolou por completo esta cidade. No entanto, desde 2005 que se encontra num processo de renovação por fazer parte do Património Mundial da Humanidade e que se torna necessário preservar.



Figura 2. 2 - Cidade de Arg-Bam, em Adobe, no Irão (Unesco World Heritage Centre).

Em Portugal, o material mais preponderante na construção, até ao século VII, era a pedra. Contudo, com a chegada dos Árabes, considerados os mestres em construção com terra, a sua influência fez-se notar e esta passou a ser dominante. Para além disso, em Portugal, existe outra

técnica diferente das referidas anteriormente, que se trata do enchimento de uma estrutura sólida de madeira, mais conhecida como tabique. Estas técnicas têm uma forte presença no território nacional, como se pode ver pela Figura 2.3 (Jorge et al., 2005).

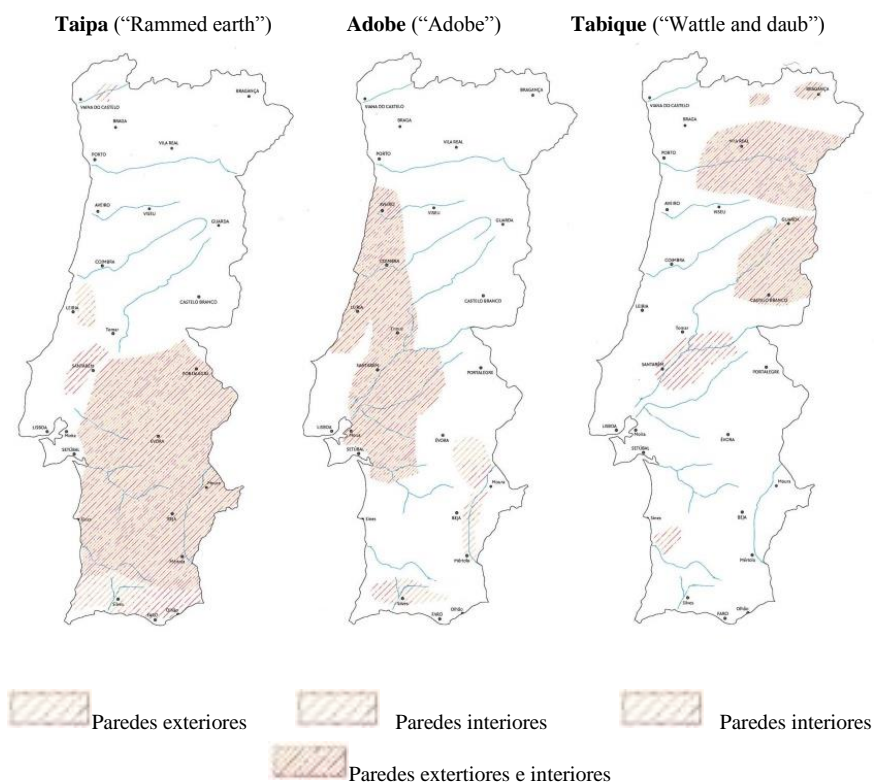


Figura 2. 3 - Principais técnicas de construção em Portugal (Jorge et al., 2005).

Em alguns países mais desenvolvidos, principalmente as potências europeias (Alemanha, Reino Unido e França), considera-se que a construção em terra é uma alternativa bastante credível em relação à construção pelo qual a maioria dos edifícios se rege. Até mesmo nos continentes Americano e Oceânia, este tipo de construção tem crescido significativamente, inerente à atualidade da temática do desenvolvimento sustentável.

Uma vez que esta técnica de construção é caracterizada por baixos consumos de energia e emissões de carbono consideravelmente reduzidas, associados ainda a níveis de poluição relativamente baixos, a construção em terra possui grandes vantagens que lhe permitem assumir um futuro bastante promissor. Ainda se torna possível afirmar que em comparação com uma habitação de construção corrente, o preço, consumo energético e custo de manutenção são muito mais reduzidos. Por consequência, o uso da terra tem vindo a ter cada vez maior influência e um maior investimento, quer em investigação, quer em aperfeiçoamento da técnica de construção (Berge, 2009).

---

Em muitos países existe legislação/regulamentação sobre este tipo de construção, reforçando a importância que este tema tem. Infelizmente, existem determinados impedimentos que não permitem o desejado desenvolvimento deste tipo de construção, tais como (Minke, 2006):

- ✓ Trabalhadores não possuem a devida qualificação para trabalharem com este tipo de material construtivo;
- ✓ Não existem entidades com a capacidade de formar profissionais de construção em terra;
- ✓ Pela própria construção ser associada a zonas ou populações com dificuldades económicas.

Hoje em dia, devido a uma maior consciencialização a nível mundial, as alternativas à utilização dos materiais maioritariamente presentes nos nossos edifícios, são vistas com bons olhos, para que se possa beneficiar o desenvolvimento sustentável, haja um menor consumo de recursos que começam a ser escassos, pela fácil combinação desta técnica de construção em terra com fontes de energia renovável e pela ligação, praticamente esquecida, entre o Homem e a natureza.

### **2.3 Construção em Terra – Técnicas construtivas**

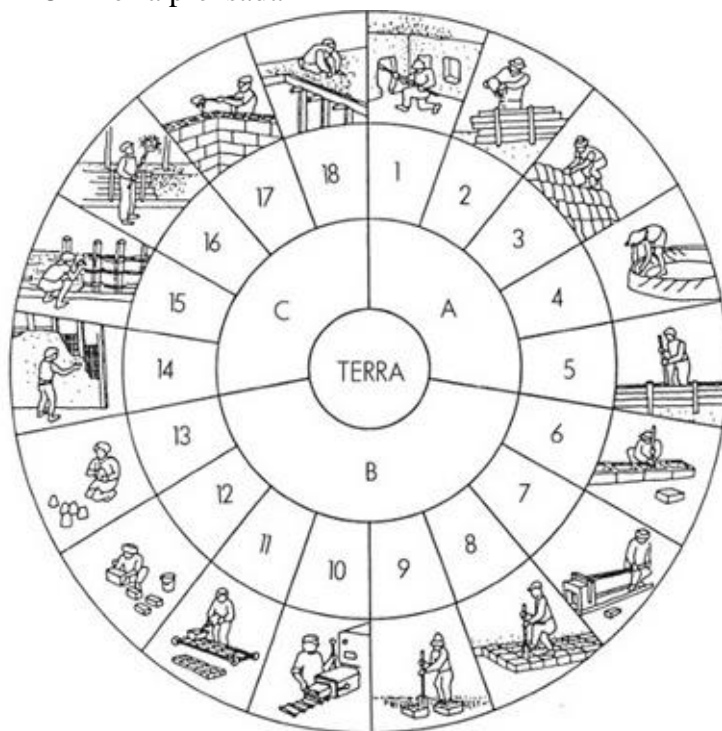
Tal como foi referido previamente, se existe material que tem grande disponibilidade de ser adquirido é o solo/terra, uma vez que naturalmente é a matéria-prima mais abundante, antiga e utilizada na construção. Atualmente existem diferentes técnicas representativas da aplicação da terra na construção. Este material pode ser utilizado sob a forma húmida, líquida, plástica ou seca e os processos mais comuns pertencem a três técnicas distintas: o adobe (blocos de terra), o BTC (blocos de terra comprimida) e a taipa (paredes de terra compactada). Apesar da existência de muitas outras formas de aplicação da terra (Figura 2.4), estas três referidas anteriormente, são as que mais facilmente se encontram presentes nas construções e as que vão ser abordadas mais pormenorizadamente (Gonzalez, F. 2006).

A - Utilização da terra crua sob a forma monolítica e portante:

1. Terra escavada
2. Terra plástica
3. Terra empilhada
4. Terra modelada
5. Terra prensada

B - Utilização da terra crua sob a forma de alvenaria portante:

6. Blocos apilados
7. Blocos prensados
8. Blocos cortados
9. Torrões de terra
10. Terra extrudida
11. Adobe mecânico
12. Adobe manual
13. Adobe moldado



C - Utilização da terra crua como enchimento de uma estrutura de suporte:

14. Terra de recobrimento
15. Terra sobre engradado
16. Terra palha
17. Terra de enchimento
18. Terra de cobertura

Figura 2. 4 - Diferentes tipos de utilização do solo como material de construção (Houben e Guillaud, 1989).

Como facilmente se pode compreender, as técnicas de construção, vão sendo substituídas por processos mais industrializados, mecanizados e sofisticados. Sendo assim, o principal fator que determina o comportamento do solo como material de construção, reside na escolha do material. É a partir desta noção, que se deve verificar a reação de determinado solo face à água e quais as suas características mecânicas (Lourenço et al., 2002).

### 2.3.1 Adobe

No que diz respeito a esta técnica, o Adobe é caracterizado pela produção de tijolos em terra crua, que formavam as paredes dos edifícios até ao século XX. Após um período de declínio, relacionado com o surgimento de novas tecnologias que vieram substituir esta técnica e, por

consequência desta evolução, os processos de fabrico dos adobes ficaram mais mecanizados e novos estabilizantes e aditivos foram aplicados para que melhorasse o comportamento destes. Desta forma o adobe voltou a ser usado e apresentando um melhor desempenho (Lourenço, 2002 e Mateus, 2004).

Existe uma granulometria, estereotipada para o caso do Adobe, que corresponde, aproximadamente, a seguinte composição (Doat et al., 1985):

- ✓ Areia – 55% a 75%;
- ✓ Argila – 15% a 18%;
- ✓ Matéria orgânica – menor que 3%;
- ✓ Silte – 10% a 28%.

A preparação do Adobe consiste em misturar a terra/solo com água, até se obter uma mistura pastosa que será colocada num molde, com dimensões que correspondem ao tamanho que se pretende que os tijolos tenham (Duarte, 2013).

A escolha do solo tem de ser feito após um estudo do terreno no local onde este vai ser extraído. No caso de o solo ser bastante arenoso, os tijolos têm a tendência a ficar pouco consistentes e desagregam-se. No caso de um solo muito argiloso, os blocos fissuram durante a secagem, devido à retração (Jalali e Eires, 2008).

A adição de fibras vem combater o problema da resistência dos adobes e melhorar o seu comportamento, mais concretamente a nível da resistência à tração. Podem ser fibras de origem natural, sintética ou metálica, como a palha, fibra de vidro ou de metal.

Os moldes a que se recorrem são normalmente de madeira ou metálicos, dividindo-se em vários compartimentos (Figura 2.5), para fazer simultaneamente vários tijolos. Depois da desmoldagem, devem passar por um processo de secagem e durante este período é necessário tomar algumas precauções, de forma a extrair todas a suas potencialidades, tais como (Duarte, 2013):

- ✓ As peças devem secar à sombra, durante o processo de cura, para que se evitem fissuras e possível desagregação;
- ✓ Posteriormente são expostos ao Sol, para que endureçam o suficiente;
- ✓ Enquanto secam, as peças devem ser viradas, para uniformizar o processo;
- ✓ O tempo médio de secagem varia entre 3 a 6 semanas, devido à variável clima.



Figura 2. 5 - Diferentes tipos de moldes usados no caso do adobe (bioarquitetura@).

A escolha do Adobe, prende-se ao facto do seu processo de produção não requerer de um grande consumo de energia, por não ser muito poluente e porque não tem grandes requisitos em termos tecnológicos. No entanto, existem razões pelas quais também pode ser considerado de aplicação limitada, o que está relacionado com a sua baixa resistência a ações sísmicas e ao processo de erosão, ficando à mercê das condições atmosféricas. Apresenta outras dificuldades, principalmente pela área que é necessária para armazenar os tijolos ter de ser extensa (Figura 2.6).



Figura 2. 6 - Fabrico de Adobe em Sheik Zayed, Faixa de Gaza (aventar@).

### 2.3.2 Blocos de Terra Comprimida (BTC)

Os BTC são um dos materiais mais frequentes na construção, em terra crua, atualmente. É possível afirmar que o BTC é proveniente do Adobe, referido anteriormente, através do aperfeiçoamento deste e melhorando o desempenho e qualidade dos blocos moldados de terra (Figura 2.7 a)). O que distingue o BTC do Adobe é o simples facto destes blocos de terra comprimida serem prensados, o que resulta num aumento da resistência. Esta técnica foi impulsionada devido a um programa de pesquisa sobre habitações rurais, na Colômbia, pelo

engenheiro Raul Ramirez e daí surgiu a primeira prensa (Figura 2.7 b)), denominada Cinva Ran (Doat et al., 1985). A compactação do solo com a prensa, faz com que as partículas fiquem mais próximas, aumentando a resistência mecânica, resultando na diminuição da porosidade e permite obter um produto mais homogêneo (Moreira, 2008 e Duarte, 2013).

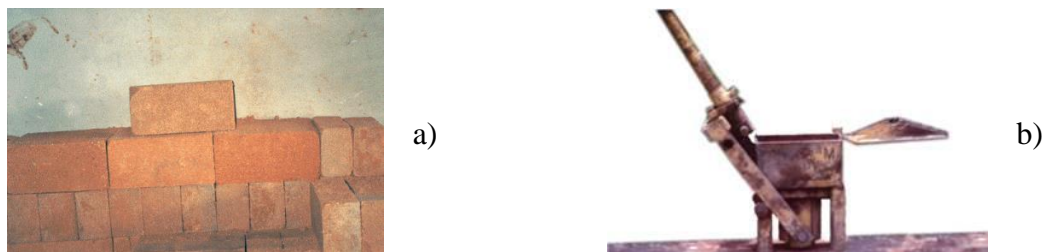


Figura 2. 7 - a) Blocos de terra comprimida, BTC (Moreira, 2008); b) Prensa Cinva Ran (Fernandes, 2007).

No momento que se escolhe o solo a ser utilizado para formar os blocos, é necessário ter noção que esta seleção é o fator que mais influencia a qualidade final do BTC. Porém, as características do solo podem ser aperfeiçoadas, desde que o solo não contenha vestígios de matéria orgânica, recorrendo à adição de um estabilizante, tal como a cal ou o cimento (Lourenço, 2002).

Esta técnica de construção (BTC) é aquela que permite ter menor período de construção, devido ao facto de não ser necessário esperar muito tempo entre o momento em que é produzido o bloco e a sua aplicação (Figura 2.8). Este processo pode recorrer a prensas manuais ou prensas mecânicas (Figura 2.9 a) e b)), sem auxílio de operador, sendo que o custo de um processo mais industrializado é mais dispendioso mas mesmo assim mais apropriado quando grandes quantidades de produto são solicitadas. Em ambos os casos, manualmente ou não, a terra é introduzida num molde e, de seguida, prensada (Guillaud e Houben, 1989). Ao serem retiradas da prensa, os blocos possuem solidez suficiente para serem manipulados, ainda que a resistência máxima pretendida só é possível após um período de contacto com um determinado ambiente, para secarem. Este período de secagem deve ser lento e gradual e depende do tipo de estabilizador que for previamente selecionado (Mateus, 2004).



Figura 2. 8 - Construção em BTC (Duarte, 2013).



a)



b)

Figura 2. 9 - a) Prensa manual (Moreira, 2008); b) Prensa hidráulica/mecânica (Duarte, 2013).

Em comparação com o Adobe, o BTC tem algumas vantagens. Os blocos de BTC conseguem ser mais regulares em formato e dimensões, evidenciam uma maior resistência à compressão, menor porosidade, permitem cumprir prazos de construção menores, e a produção pode-se estender durante o ano inteiro. Contudo, a utilização mais generalizada do BTC pode ser limitada por causa de outros fatores, como a dificuldade em adquirir terra que seja considerada apropriada, a construção em altura, a carência a nível de legislação e normas construtivas e a própria rejeição cultural (Alegria, 2003 e Lourenço, 2002).

### 2.3.3 Taipa

A Taipa é normalmente caracterizada pela utilização de terra húmida na construção de paredes, com uma espessura de cerca de 50 cm. Estas paredes são constituídas por meio da compactação deste solo húmido, em conjunto com frações selecionadas, que incluem areia, argila, gravilha e siltes. Esta compactação é concretizada entre dois moldes ou painéis de cofragem (Figura 2.10), em que o solo é colocado uniformemente em diversas camadas, para que, após secagem, se torne numa estrutura rígida/monolítica (Mateus, 2004). Apesar deste processo de construção



ser demorado quando utiliza meios tradicionais de compactação (manual), podem ser utilizados sistemas mecanizados que permitem acelerar o processo.

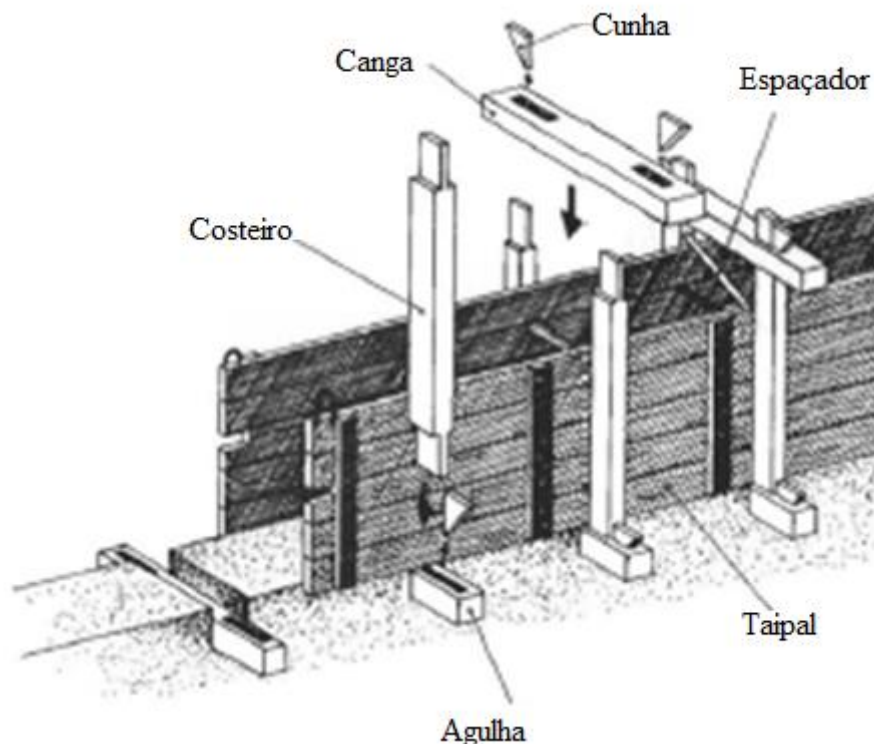


Figura 2. 10 - Elementos constituintes de uma cofragem (Doat et al., 1979).

Quanto à granulometria do solo, de acordo com Doat et al. 1985, deve ser:

- ✓ Areia – 40% a 50%
- ✓ Argila – 15% a 25%
- ✓ Cascalho – 0% a 15%
- ✓ Silte – 20% a 35%

De forma a aproveitar as potencialidades desta técnica, é necessário proceder a uma boa mistura do solo durante todo o processo. Ainda na fase de mistura, é possível corrigir-se a granulometria do solo, por adição de fibras naturais, metálicas ou sintéticas ou ainda agregados de maior dimensão com a finalidade de aumentar a resistência da própria parede (Duarte, 2013).

## 2.4 Vantagens e desvantagens comuns entre as técnicas do Adobe, BTC e Taipa

Tendo em atenção Moreira (2008) e Torgal e Jalali (2011), a utilização de qualquer uma destas técnicas referidas possui um leque de vantagens que lhes permite apresentar melhores condições que a construção corrente. Estas técnicas beneficiam a economia de energia a nível da produção, apresentam bom comportamento térmico, armazenando o calor proveniente da exposição solar e libertam-no lentamente quando a temperatura do exterior se encontra mais baixa do que o interior, e qualquer uma delas é considerada incombustível. Regulam e equilibram a qualidade do ar interior, devido à absorção e libertação rápida da humidade, impedindo o desenvolvimento de parasitas e o material usado pode ser reutilizado, sendo por isso consideradas técnicas recicláveis.

Apesar de tudo continuam a ser técnicas que estão bastante suscetíveis a ataques de roedores, possuem baixa resistência mecânica (compressão ou tração), têm um mau desempenho face a eventos de origem sísmica e podem ser continuamente degradadas pela ação da água, caso não sejam tomadas medidas de prevenção (Ferreira, 2012).

## 2.5 Regulamentação e Legislação associada à construção em terra

Cada vez mais existem países que desenvolvem regulamentação relacionada com este tema. Há que destacar alguns países onde já existe ou está a ser desenvolvida regulamentação sobre a construção em terra. Colômbia (2005) e Espanha (2008), pela publicação de novas normas; Chile, Equador, México e Nicarágua, por estarem a desenvolver futuras normas; Perú, por estar a melhorar os documentos normativos já existentes (Cid et al., 2011). Por estas e outras razões, isto demonstra a força de vontade e o interesse em fomentar a divulgação, aplicar e desenvolver este tipo de construção e formalizá-la devidamente. Através da figura seguinte (Figura 2.11), é possível observar o número de normas vigentes, em diversos países e relativas à construção em terra.

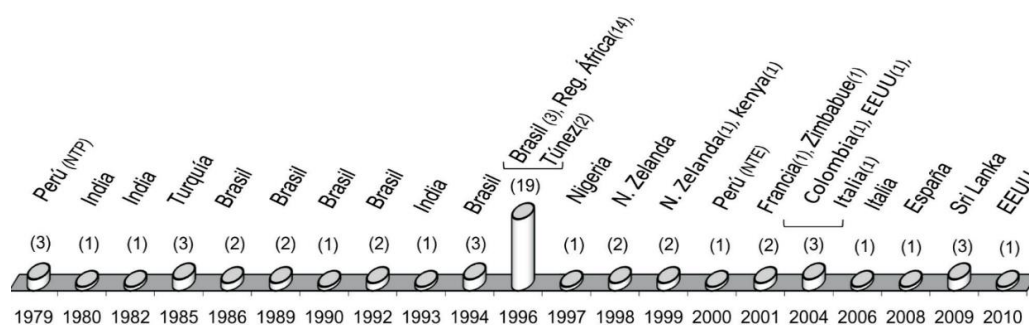


Figura 2. 11 - Número de normas vigentes (Cid et al., 2011).

No Quadro 2.1 estão listadas as normas e regulamentos internacionais de alguns países, no que se refere à construção em terra, bem como o organismo responsável pelo desenvolvimento, elaboração e publicação dos mesmos.

Quadro 2. 1 - Exemplos de Regulamentos e Normas referentes à construção em terra (Cid et al., 2011 e Hall et al., 2012).

País	Norma/Regulamento	Organismo responsável pela emissão
<b>Brasil</b>	NBR 8491, NBR 8492; 1986	Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
	NBR 10832, NBR 10833; 1989	
	NBR 10834, NBR 10835, NBR 10836; 1994	
	NBR 12023, NBR 12024; 1992	
	NBR 12025, 1990	
	NBR 13554, NBR 13555, NBR 13553; 1996	
<b>Colômbia</b>	NTC 5324, 2004	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)
<b>EUA</b>	NMAC 14.7.4, 2004	Construction Industries Division (CID)
	ASTM E2392 M-10	American Society for Testing and Materials (ASTM)
<b>França</b>	XP P13-901, 2001	Association Française de Normalisation (AFNOR)
<b>Índia</b>	IS 2110: 1980	Bureau of Indian Standards (BIS)
	IS 1725: 1982	
	IS 13827: 1993	
<b>Itália</b>	Ley nº378, 2004	
	L.R. 2/06 2 2006	
<b>Quênia</b>	KS 02-1070: 1999	Kenya Bureau of Standards (KEBS)
<b>Nigéria</b>	NIS 369: 1997	Standards Organisation of Nigeria (SON)
<b>Perú</b>	NTE E 0.80, 2000	Servicio Nacional de Capacitación para la industria de la Construcción (SENCICO)
	NTP 331.201, NTP 331.202, NTP 331.203; 1979	Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI)
<b>Região de África</b>	ARS 670, ARS 671, ARS 672, ARS 673, ARS 674, ARS 675, ARS 676, ARS 677, ARS 678, ARS 679, ARS 680, ARS 681, ARS 682, ARS 683; 1996	African Regional Organisation for Standardisation (ARSO)
<b>Sri Lanka</b>	SLS 1382-1: 2009	Sri Lanka Standards Institution (SLSI)
	SLS 1382-2: 2010	
	SLS 1382-3: 2011	

<b>Tunísia</b>	NT 21.33: 1996; NT 21.35: 1996	Institut National de la Normalisation et de la Propriété Industrielle (INNORPI)
<b>Turquia</b>	TS 537, TS 2514, TS 2515; 1985	Türk Standardlari Enstitüsü (TSU)

Para além destes todos, há que salientar a Nova Zelândia, que é o país que possui a regulamentação mais avançada, que estabelece critérios de desempenho e requisitos em termos de materiais e mão-de-obra (Maniatidis e Walker, 2003). Já a Austrália, foi dos primeiros países a desenvolver regulamentação destinada a este tipo de construção. Publicou ainda um manual sobre a construção em terra, que estabelece quais as melhores práticas e guias de dimensionamento recomendados para paredes e pavimentos em terra.

Em termos europeus, a Alemanha e a Espanha são os exemplos mais substanciais, visto que já possuem regulamentação em vigor e estabelecida nos seus quadros normativos, em que estão referidos, por exemplo, códigos de construção específicos e orientações para a projeção e construção de estruturas desenvolvidas à base de terra (Torgal et al., 2009 e Maniatidis e Walker, 2003).

É de esperar que este tipo de construção em terra seja mais económico do que os restantes. Por esta mesma razão, para os países menos desenvolvidos e que têm mais dificuldade em obter matérias-primas mais dispendiosas, esta alternativa seria bastante apreciável e os estudos já efetuados para países com um maior desenvolvimento podem servir para estes. Trata-se do caso do Zimbabué, por exemplo, em que adotou o “Code of Practice for Rammed Earth Structures” e que deu origem a uma norma em 2001, fazendo com que este fosse o primeiro país africano a elaborar regulamentação para a construção em terra.

## 2.6 Adição de fibras na construção – Cabelo Humano

O cabelo humano, proveniente do latim *capillus*, faz parte de um grupo de proteínas designadas por  $\alpha$  – queratinas e estas são formadas por cadeias polipeptídicas. Forma uma rede tridimensional de alta densidade, devido à alta presença de pontes de dissulfeto (S-S) que confere à rede uma alta resistência ao ataque químico (The Hair, 1984). Uma alteração destas ligações provoca mudanças nas propriedades mecânicas dos fios de cabelo.

O fio de cabelo é constituído por três componentes principais (Sales, 2011):

- ✓ Cutícula – 10% da fibra;
- ✓ CórTEX – 88% da fibra;
- ✓ Membrana celular – 2% da fibra.

Por vezes ainda surge um quarto elemento, a medula, apesar de não apresentar nenhuma funcionalidade, ou quase nenhuma.

A cutícula é formada por material proteico e sem forma específica, sendo a parte mais externa do fio e que é a principal responsável pela proteção das células corticais. Regula ainda a entrada e a saída de água, permitindo assim que as propriedades físicas das fibras se mantenham inalteradas. O córtex é constituído por microfibrilas de queratina e de grânulo de melanina em que o seu tipo, tamanho e quantidade dão origem à cor dos cabelos e só neste componente é que podem ocorrer alterações nas propriedades mecânicas (Nogueira, 2003). A Figura 2.12 apresenta um diagrama que ilustra a estrutura geral do cabelo.

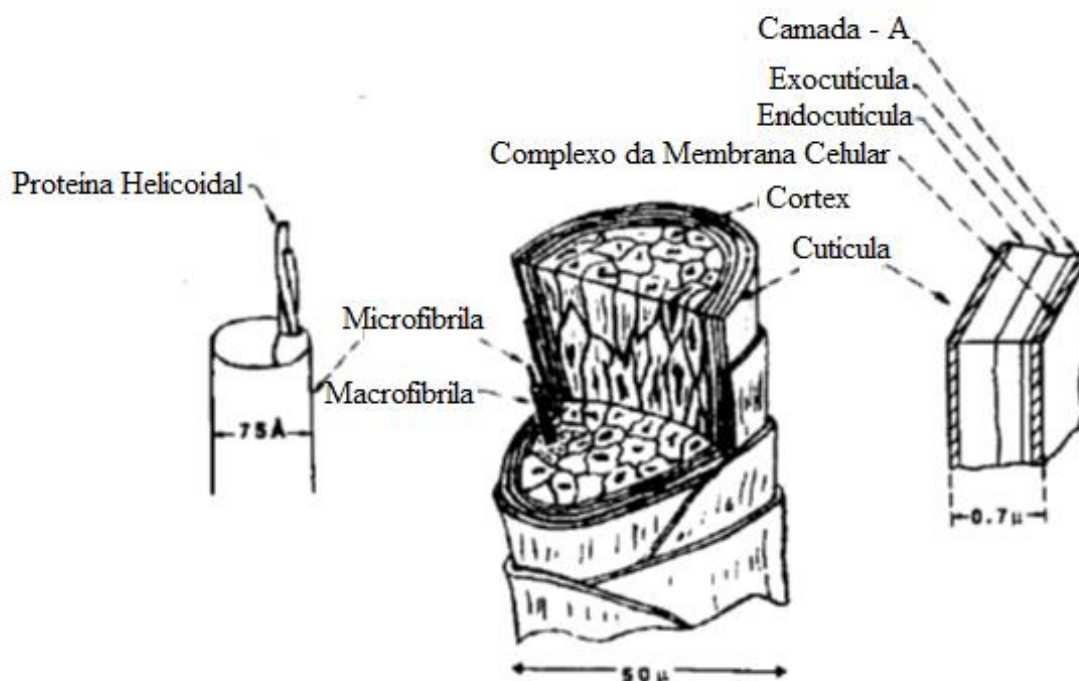


Figura 2. 12 – Esquema da estrutura do cabelo (Nogueira, 2003).

Em termos construtivos, o que interessa particularmente é a tensão-deformação do cabelo humano enquanto reforço do solo. O cabelo funciona, em parte, como uma corda elástica, uma vez que ao juntar alguns fios de cabelo e estes forem puxados, é possível de constatar que estes possuem uma certa elasticidade. Em termos práticos quer dizer que quando os fios de cabelo são sujeitos a algum tipo de tensão, estes sofrem uma deformação sem que ocorra rotura, até um determinado ponto. Desta forma, permite que o ser humano possa escovar os cabelos e aplicar diferentes penteados sem que este se quebre ou parta.

Quando sobre um cabelo natural é exercida uma tensão crescente, existem três etapas que se podem observar, como é visível na Figura 2.13 e são descritas como regiões. Pelo que se pode verificar, até 2% de deformação, descrita como região Hookeana, o cabelo consegue recuperar rapidamente a sua dimensão, i.e. comporta-se como sendo elástico perfeito. Entre 2% e 30% de

deformação, conhecida como a região de Reconstituição, o cabelo deforma e só volta a restituir totalmente a sua conformação habitual após 24h submerso em água ou então sob a ação de uma temperatura constante de 54° C (Tucci, 1989). A partir do momento que se ultrapassa esses 30% de deformação, as cadeias de queratina, que constituem o cabelo, aumentam a sua rigidez e a resistência à tração, até certo nível.

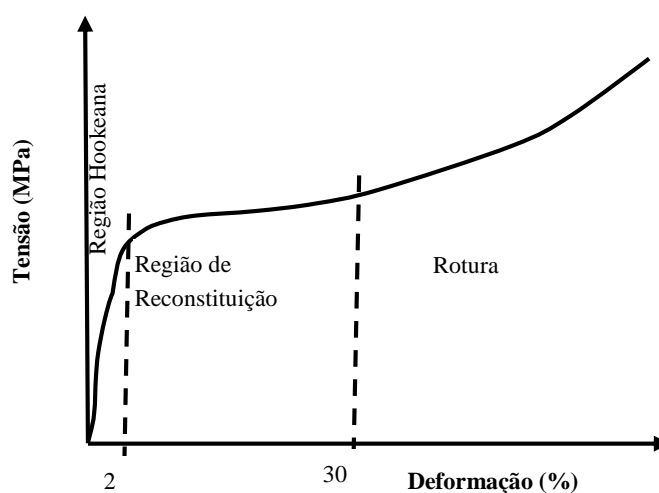


Figura 2. 13 - Curva tensão - deformação do cabelo humano (entendendocosmetologia@).

Assim, pode dizer-se que, até certo nível, o cabelo possui a capacidade de mudar a sua forma, suportando uma determinada tensão, e consegue recuperar a sua forma original. Contudo, isto depende da tensão (força) aplicada, pois a deformação pode ser irreversível e/ou resultar na rotura dos fios de cabelo.

De outro ponto de vista, em relação a outros materiais tal como o aço inoxidável, apenas até 0,5% de deformação é que é possível recuperar e voltar à forma original. Assim que essa barreira é ultrapassada, um aumento na deformação implica uma situação irreversível e é conhecida por plasticidade dos materiais (Figueira, 2008).

Desta forma e comparando com o cabelo humano, é possível afirmar que o cabelo consegue restabelecer a sua forma mais rapidamente, quando sofre uma deformação, do que o aço. No entanto, entre os dois, o aço tem maior resistência, ou seja, consegue suportar maiores tensões e daí a sua elevada presença no setor da construção (Figueira, 2008). Isto pode ser fundamentado pelas curvas tensão-deformação de alguns materiais na Figura 2.14, apesar de alguns não serem utilizados na construção, mas cujas características também foram analisadas.

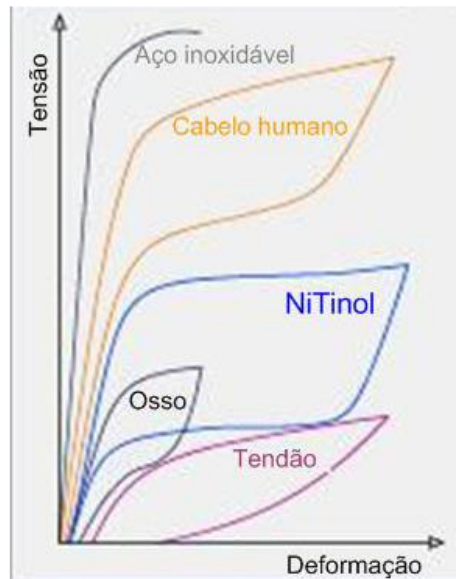


Figura 2. 14 - Curva Tensão - Deformação de diferentes materiais (Figueira, 2008).

Por essa mesma razão, torna-se bastante relevante que o estudo sobre a inserção de fibras no setor de construção, neste caso em particular o cabelo humano, seja realizado. Isto porque é um recurso em abundância e que não tem destino final, ou seja, a partir do momento que se pretender eliminá-lo, simplesmente se envia para um aterro ou é enviado para incineração, não sendo devidamente aproveitado e não tirando partido das suas potencialidades. Com esta dissertação pretende-se estudar a forma como o cabelo pode melhorar ou não as propriedades mecânicas do solo, em termos de resistência dos blocos de terra.

## 3 SUSTENTABILIDADE DO SOLO

### 3.1 Construção sustentável

Normalmente, para o desenvolvimento de uma espécie, é necessário um equilíbrio entre este e o sistema, embora isso não se tenha aplicado ao caso do ser humano. Isto acontece, visto que o Homem tende a satisfazer na totalidade as suas necessidades mesmo que isso provoque o esgotamento dos recursos e o colapso do ecossistema em que está inserido. Apesar da comunidade científica estar completamente consciente dos problemas e de ter advertido a sociedade e os decisores políticos para a urgência destes desafios ambientais que estão a afetar o planeta e cuja negligência pode conduzir ao fim da civilização, os interesses das empresas e dos próprios países mostraram ser mais relevantes que as próprias preocupações ambientais associadas. Muito relacionado com a tendência do aumento demográfico, o setor da construção constitui um dos principais e mais ativo dos setores de atividades económicas em toda a Europa.

De acordo com Torgal e Jalali (2011), a indústria da construção é responsável por 28,1% e 7,5% do emprego na indústria e na economia europeia, respetivamente. A nível ambiental, a construção representa cerca de 30% das emissões de carbono, devido à Europa ser um dos maiores exportadores do mercado e por ser o setor que detém 25% de toda a produção industrial europeia (Jorge de Brito et al., 2011). Em termos mundiais, a indústria da construção é a que mais matérias-primas consome, à volta de 3000 Mt/ano (quase 50% em massa). Partindo destes factos, é possível afirmar que este setor é insustentável, porque como cada vez mais é necessário a construção de edifícios e infraestruturas, isto vai acentuar ainda mais o consumo de recursos não renováveis e a produção de resíduos, inerente a esta atividade.

Deste modo, é aqui que entra a adoção de técnicas e materiais sustentáveis, designada por construção sustentável, que pode vir a ser uma mais-valia para a sustentabilidade da indústria da construção e para o próprio desenvolvimento sustentável (Figura3.1).



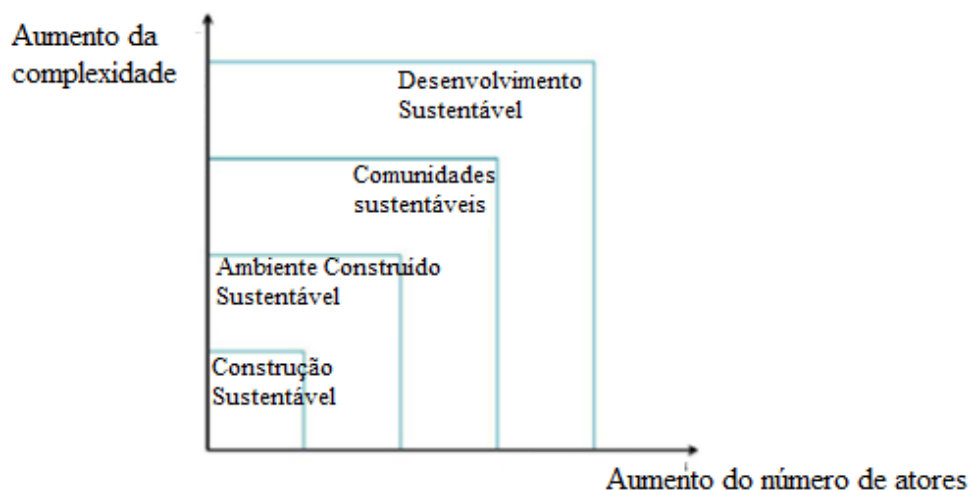


Figura 3. 1 - Importância da construção sustentável para o desenvolvimento sustentável (LiderA@).

A designação de construção sustentável segue sempre a mesma linha, que, para o caso dos edifícios, resulta num equilíbrio entre a construção dos edifícios que satisfaçam as necessidades dos habitantes e o ambiente e os recursos naturais presentes no planeta. Ainda é importante que a par com a construção sustentável se mantenham as tradições construtivas da região onde o edifício se insere, de forma a preservar os valores culturais, arquitetónicos e sociais (UNEP@, 2006).

No momento de escolha dos materiais, que deverão estar presentes na construção, deve-se optar por materiais regionais, diminuindo a energia fornecida para a extração, fabrico e transporte deste, e assim promovendo a economia local ou regional. Incentiva-se a baixos consumos energéticos (de preferência que a sua origem seja de uma fonte renovável) e de água, e em simultâneo providenciar o máximo conforto aos seus utilizadores (Pinheiro, 2006). No que toca a resíduos, a gestão destes resíduos gerados durante a construção dos edifícios, o seu tratamento e o seu destino são bastante importantes, uma vez que é na altura da construção do edifício que se produz uma maior quantidade de resíduos.

No caso particular de Portugal, no que diz respeito a este tema, e no seguimento dos compromissos que foram estabelecidos no âmbito da Agenda 21, em 2002 surgiu um documento denominado por Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável (ENDS), atualizado até ao ano de 2015. Este documento enuncia vários objetivos assentes sobre o conceito de desenvolvimento sustentável, em que se pretende privilegiar um crescimento que não se baseie em grandes consumos energéticos e recursos naturais, de forma a aproveitar e

estimular as possibilidades que o país tem para oferecer, e em que a proteção do ambiente seja feita através de prevenção e valorização do património natural existente.

### **3.2 Vantagens ambientais da construção em terra**

O solo para construção encontra-se logo abaixo da vegetação superficial, não podendo dizer-se que possui impactos normais provenientes da atividade extrativa, pela facilidade com que se obtém. Caso a construção seja efetuada na zona onde o solo também é retirado, não está sequer envolvida poluição originada pelo transporte do material. No que toca à utilização de alvenaria de tijolo cerâmico ou betão, a produção destes raramente se encontra nas imediações das zonas de construção, o que obriga a grandes deslocações para transporte e conseqüentemente maior emissão de poluentes gasosos.

Outro aspeto relevante, relativo à deposição dos desperdícios da construção em terra, caso não tenham sido alvos de estabilização (adição de fibras, estabilizantes químicos, etc), estes podem ser colocados no local de onde foram extraídos, não tendo assim qualquer preocupação quanto à contaminação ambiental (Torgal e Jalali, 2011). Apesar de que, mesmo adicionando cal ou cimento, o solo pode ser reaproveitado neste mesmo tipo de construção e, deste modo, não gera praticamente resíduos. Comparativamente, a construção corrente normalmente utiliza alvenaria de tijolo furado que resulta na produção de muitos resíduos, sendo que a maior parte advém da execução das paredes divisórias dos edifícios.

Face à incessante procura de energia, em termos globais, esta pode ser a principal causa pela qual se chega a um desenvolvimento insustentável. Sabendo que a produção de energia que chega ao cidadão comum é proveniente da queima de combustíveis fósseis e associado às emissões provocadas, estes são os fatores que mais contribuem para o agravamento das condições em que se encontra o nosso planeta. No caso específico de Portugal, a energia que se consome é proveniente de outros países, cerca de 80% é importada, estando externamente dependente. Visto que 40% da energia consumida diz respeito ao setor residencial, de forma simples se conclui que a poupança energética deve vir a acompanhar este subsector e que isso pode alterar as emissões na globalidade, demonstrando assim o grande potencial inerente à construção com solo (Torgal e Jalali, 2011). Caso a poupança de energia seja implementada, certos autores afirmam que se conseguiria diminuir consideravelmente as emissões e conseqüentemente a energia que a construção do edifício exige, mas se forem bem ponderadas as escolhas dos materiais construtivos também contribuem para uma redução das emissões. No Quadro 3.1, pode-se observar a energia associada ao transporte dos materiais, um dos maiores causadores de um mau desempenho ambiental (Berge, 2009).

Quadro 3. 1 - Energia gasta em transporte (Berge.2009).

Transporte	MJ/ton/km
Avião	33 - 36
Rodovia (gasóleo)	0,8 - 2,2
Rodovia (gasolina)	0,6 - 0,9
Ferrovia (eletricidade)	0,2 - 0,4
Barco	0,3 - 0,9

Partindo do princípio que, até mesmo antigamente se tratava de um processo manual que não implicava grande consumo energético, a utilização do solo para a construção não tem impacto significativo em termos energéticos. Então, por essa mesma razão, deveria privilegiar-se a utilização de materiais que se encontrem no local de construção. Esta afirmação pode ser fundamentada pela Figura 3.2, comparando as diferentes soluções construtivas.

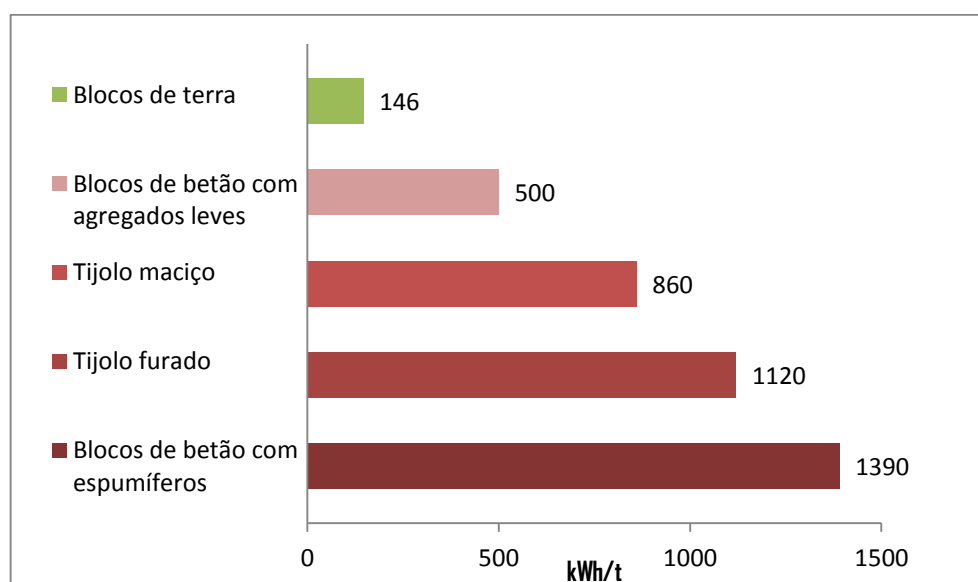


Figura 3. 2 - Emissões de carbono correspondente a cada material, correntemente utilizados na construção (adaptada de Morton et al., 2005).

Pode então concluir-se que a escolha dos blocos de terra é uma boa solução porque mostra um potencial para que tenha um desempenho ambiental favorável. Em termos habitacionais, as vantagens da utilização do solo como material principal de construção, resumidamente, são o seu desempenho térmico razoável (ótimo para climas com amplitudes térmicas consideráveis), um desempenho acústico suficiente, elevada sustentabilidade, devido ao reduzido impacto ambiental e inexistência de produção de resíduos, uma boa resistência ao fogo e pela simplicidade de aplicação das diferentes técnicas. Muitos autores, afirmam que as soluções em

construção corrente provocam um gasto de energia muito mais elevado do que soluções que adotem técnicas construtivas com terra, como por exemplo o Adobe, a Taipa ou o BTC (Oliveira e Silva, 2012).

Murta et al. (2009) conseguiram avaliar o impacto ambiental comparando duas soluções diferentes para uma habitação familiar, sendo uma delas constituída por betão armado e a outra por uma alvenaria de adobe e pavimento em madeira. No fim chegaram à conclusão, depois de ponderados todos os parâmetros globais, que a solução que adota características da construção em terra e o pavimento em madeira é a alternativa que tem menos impacto ambiental, como é possível de constatar no Quadro 3.2.

Quadro 3. 2 - Comparação de diferentes soluções construtivas (Murta et al., 2009).

	<b>Betão armado</b>	<b>Adobe e Madeira</b>	<b>Redução (%)</b>	<b>Melhor solução</b>
<b>Gasto energético (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	1624	623	61,6	Adobe e Madeira
<b>Emissão de CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>)</b>	136	48	64,7	Adobe e Madeira

Uma das razões mais evidentes para que se deva escolher a construção em terra, prende-se ao facto de não estar ligada a agentes nocivos, provenientes da utilização de materiais sintéticos, que são responsáveis por destabilizar a qualidade do ambiente interior em habitações. Os VOCs, mais conhecidos por compostos orgânicos voláteis, são os maiores responsáveis por irritações de pele, olhos e vias respiratórias, dores de cabeça, perturbações do sistema hormonal, stress, ansiedade, distúrbios cardíacos, digestivos e entre outros problemas (Salasar, 2007). A construção em terra, não possuindo revestimento, tem um maior controlo em relação aos níveis de humidade pois os blocos de terra, por exemplo, têm a capacidade de absorver 10 vezes mais humidade que os tijolos cerâmicos normais, como pode ser visto na Figura 3.3.

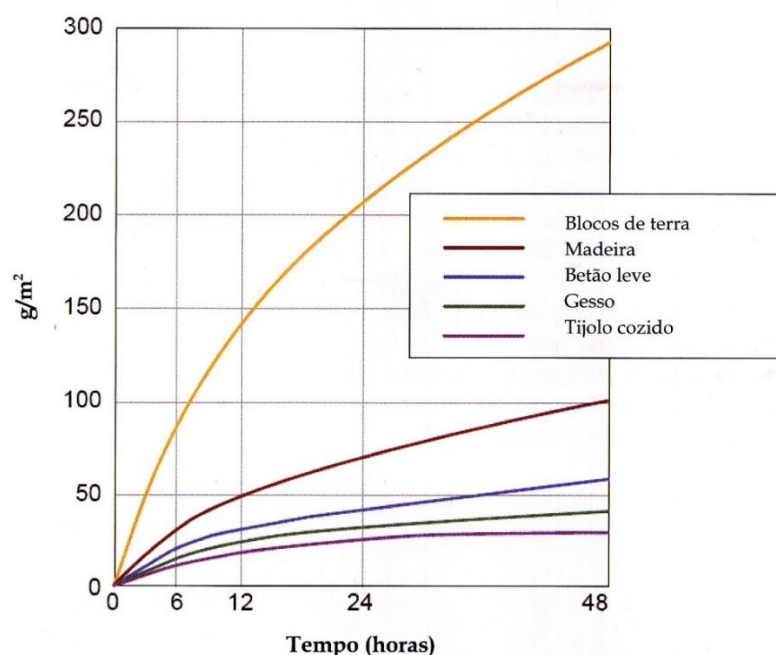


Figura 3. 3 - Absorção da humidade de vários materiais (Arundel, 1986).

Olhando para a vertente económica deste tipo de construção é possível afirmar que é consideravelmente mais “barata” que a habitual construção pela qual os edifícios se regem. Isto vai ao encontro de tudo o que foi referido anteriormente: obtenção de material mais facilitado, diminuição das emissões relativas à origem dos materiais e transporte, apresentam fatores de habitabilidade melhores e assim sendo mais “limpas”.

Outro aspeto importante neste tipo de construção é a rapidez de construção, com ou sem adição de fibras, e de ter uma secagem bastante eficaz. Não é necessário muito tempo para construir a estrutura utilizando solo e os seus reforços, caso necessário, evitando maiores gastos económico e energéticos, finalizando rapidamente de maneira a cumprir prazos mais eficientemente. Assim, tudo o que foi referido tem maior importância para os países que não possuam a capacidade financeira dos países desenvolvidos e assim não consigam obter matérias-primas com a mesma facilidade.

Assim sendo, a construção em terra está na rota de um futuro promissor, uma vez que para qualquer ser humano, o mais importante é o bem-estar. Ainda existe muito por estudar, mas que pelo que já foi feito no que toca a este tipo de construção, prevê-se que entre no setor de construção com relativa facilidade, sendo no entanto de grande utilidade a criação de regulamentação específica.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL - MÉTODOS E MATERIAIS

### 4.1 Introdução

Os solos normalmente utilizados na construção apresentam comportamentos geotécnicos distintos, consoante as suas características físico-químicas e mineralógicas. Desta forma, neste capítulo vão ser evidenciadas as características dos materiais que foram utilizados nos ensaios laboratoriais realizados, com o objetivo de avaliar o comportamento dos blocos de terra crua para construção de edifícios.

Para o presente trabalho foram feitos ensaios, para o estudo do modo de formação do bloco, e ensaios de compressão, com a finalidade de estudar as propriedades mecânicas e estruturais dos blocos de terra. Foi levado a cabo um estudo com blocos construídos com solo apenas e blocos com solo misturado com cabelos, pelo que ambos os materiais tiveram de ser estudados e caracterizados.

### 4.2 Materiais utilizados durante os ensaios

#### 4.2.1 Solo

O tipo de solo utilizado no decorrer do estudo laboratorial, resultou de uma mistura prévia de solos, classificados como argila, areia e areia siltosa, existentes no laboratório de geotecnia. As diferentes frações destes solos, em percentagem, na mistura estudada estão representadas no Quadro 4.1.

Quadro 4. 1 - Solo utilizado para os ensaios laboratoriais.

<b>Solos utilizados na mistura</b>		
<b>Argila</b>	<b>Areia Siltosa</b>	<b>Areia</b>
25%	50%	25%

O solo estudado encontrava-se seco, sendo que para a preparação dos ensaios foi necessário misturar previamente com água, adicionando-a até atingir o teor ótimo do solo. Este teor ótimo foi obtido através do ensaio de compactação Proctor – Leve.

Quando se pretende caracterizar os solos que são utilizados na construção, são realizados ensaios específicos de acordo com procedimentos normalizados, tais como: granulometria, compactação, plasticidade, etc. Para este caso específico foram feitas ensaios para a determinação da composição granulométrica, para cada constituinte do solo e para o solo em estudo (Figura 4.1), da densidade de partículas sólidas (G) e ensaios de compactação, com vista a determinar o valor do teor de humidade ótimo.

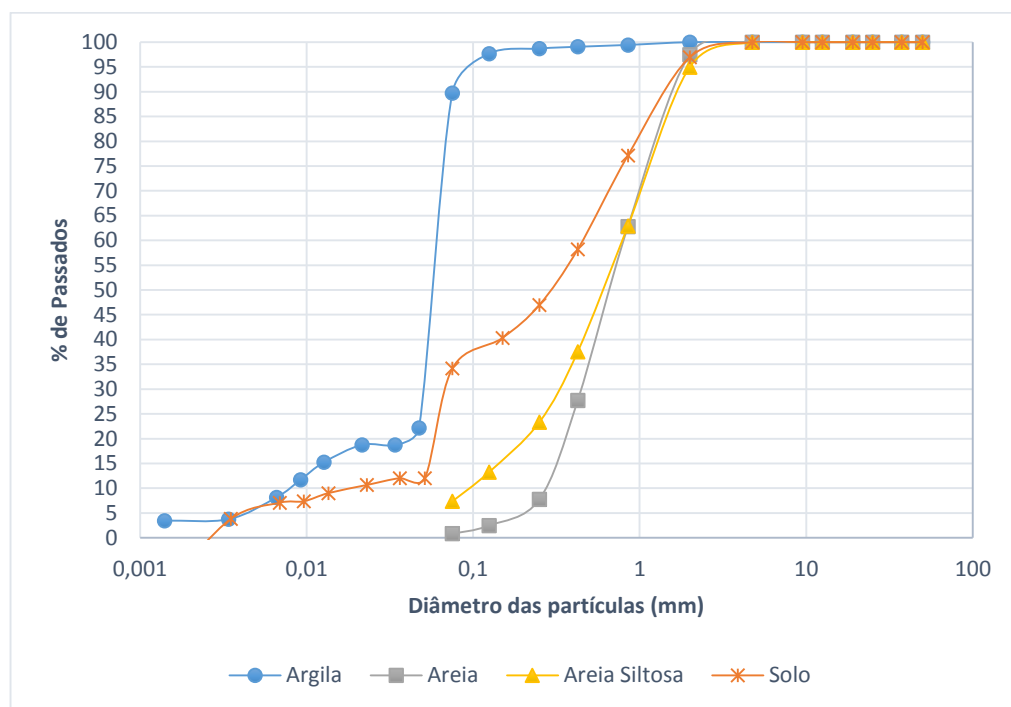


Figura 4. 1 - Curvas granulométricas de cada constituinte da mistura do solo e do solo estudado.

A análise granulométrica (Figura 4.1) foi efetuada de acordo com a Especificação LNEC E 196 (1966), partindo de uma amostra de solo que foi previamente seca em estufa. Esta análise granulométrica tem o objetivo de determinar qual o tamanho das partículas presentes no solo e qual a sua distribuição, em peso, que cada fração possui em relação à massa total da amostra de solo, recorrendo à peneiração e à sedimentação (esta última para o caso de solos finos). Nas Figuras 4.2 a), b) e c) é possível observar a fração de cada constituinte do solo, por dimensão dos grãos, e ainda a Figura 4.3 onde se pode observar a sedimentação.

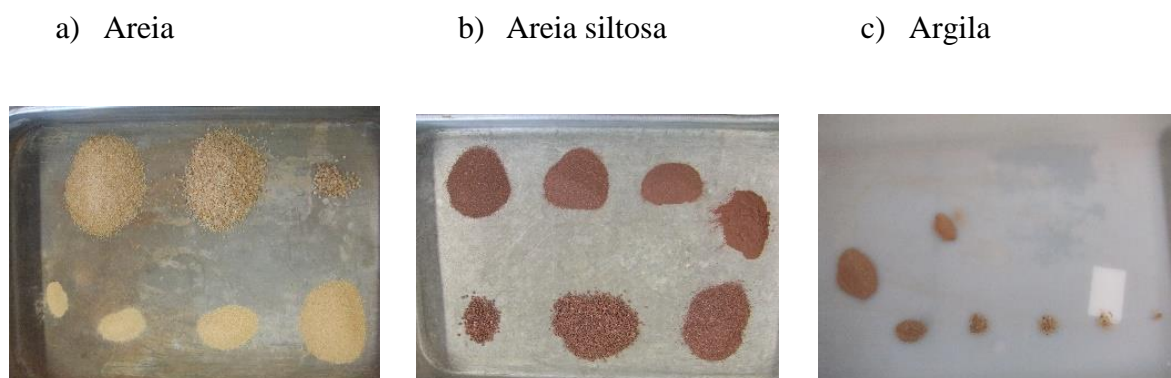


Figura 4. 2 - Dimensão e distribuição dos grãos de cada fração (constituente) do solo em estudo.



Figura 4. 3 - Processo de sedimentação da argila.

Uma vez que o processo de compactação, para a técnica do adobe, tem uma importância significativa, foi realizado o ensaio de compactação de Proctor – Leve, de acordo com a norma portuguesa NP – 84 (1995) e a Especificação LNEC E 197 (1966). É levado a cabo este procedimento, pois o objetivo principal é obter o valor para o teor em água que mais se adequa à compactação ( $W_{opt}$ ), tendo resultado na curva de compactação que se encontra na Figura 4.4. Também interessa referir que se utilizou o Proctor-Leve, através de um pilão de compactação (Figura 4.5) porque a energia corresponde, mais ou menos, à queda de um peso de 8,7kg de uma altura de 1 metro, tal como a metodologia recomenda para a construção da taipa/adobe.



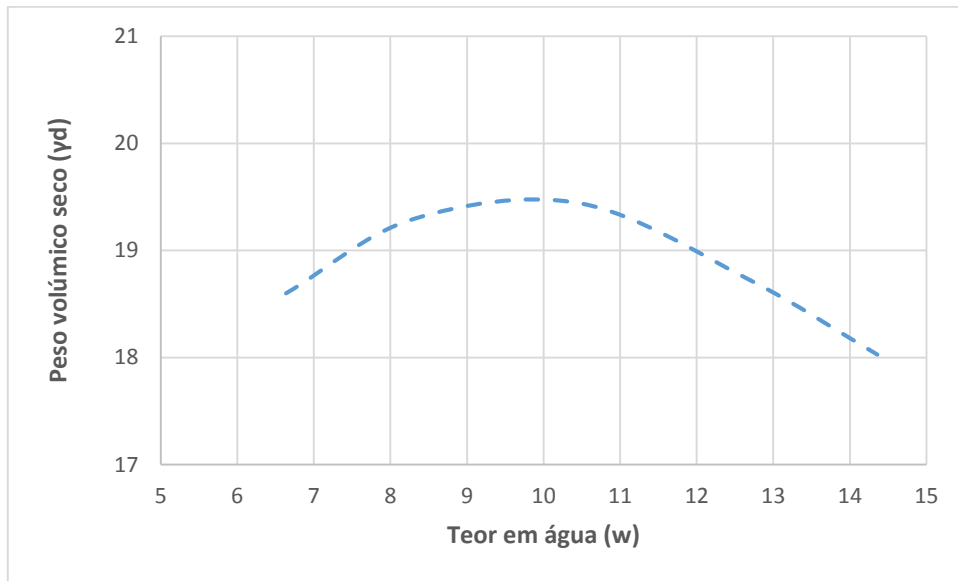


Figura 4. 4 - Curva de compactação leve do solo estudado.



Figura 4. 5 - Equipamento de compactação.

Partindo da análise da figura anterior, pode-se afirmar que o teor ótimo se situa entre no intervalo entre 9-10%, podendo admitir-se 9,5% de água, sendo este o valor adotado na preparação dos provetes do estudo.

Quanto à densidade das partículas sólidas, o procedimento utilizado seguiu a norma portuguesa NP- 83 (1965) e teve como base de utilização de um picnómetro.

O Quadro 4.2 apresenta os valores de algumas das propriedades do solo.

Quadro 4. 2 - Propriedades do solo.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Densidade das partículas sólidas (t/m <sup>3</sup> )	2,76
Teor ótimo em água (%)	9,5%
Peso volúmico seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	19,5

Desta forma, com base nos resultados obtidos, é possível identificar e classificar este solo, sendo que este passo é um dos mais importantes na maioria de todos os estudos geotécnicos. Atendendo à classificação granulométrica, mais especificamente o Triângulo de Feret e a classificação unificada de solo (ASTM d 2487 – 85), o solo utilizado no estudo é classificado como Areia Siltosa.

#### 4.2.2 Cabelo

Para este trabalho decidiu-se escolher, como elemento de reforço do solo, o cabelo de origem humana (do latim *capillus*). Para obter este material, recorreu-se a um estabelecimento de cabeleireiro, uma vez que só aí era possível ter acesso a uma quantidade significativa de cabelo que ainda estivesse no seu estado natural. Quando se refere ao estado natural, quer dizer que ao longo do seu crescimento não sofreu qualquer tipo de alteração química, que pudesse efetuar transformações a nível da sua composição. Tal pode acontecer nos casos p.ex. em que o cabelo é pintado (normalmente de uma cor diferente à cor original) ou sofreu algum tipo de tratamento químico, ao nível da raiz do cabelo, que modifique as suas propriedades iniciais e assim faça variar o seu comportamento enquanto reforço do solo. O fator ambiente e poluição também foi decisivo para a escolha dos cabelos sem tratamentos.

A cor dos cabelos depende muito do lote que foi fornecido para o presente trabalho e da quantidade diminuta de pessoas que possuem o cabelo ainda no seu estado natural e que também possuam um comprimento que seja favorável à utilização para este trabalho. Isto porque os cabelos mais curtos que não se esperam que tenham capacidade relevante de reforço, são assim separados dos restantes e postos de parte. Pela Figura 4.6 pode-se ver qual o aspeto do cabelo que foi utilizado para este trabalho, bem como a quantidade que foi disponibilizada.



Figura 4. 6 - Aspeto do cabelo disponível para o reforço do solo.

A quantidade que se decidiu utilizar em cada bloco foi cerca de 0,3% da massa total do solo seco utilizado para fabricar o bloco. Pelo valor em si, parece que é pequeno, no entanto o cabelo é muito pouco denso e o seu peso não é significativo, logo é preciso uma grande quantidade de fios de cabelo, para perfazer essa percentagem. Em massa é igual a cerca de 23 gramas de cabelo, sendo que essa quantidade é separada pelo número de camadas definido para os blocos com cabelo, que vai ser diferente do número de camadas para os bloco sem este reforço, como vai ser descrito mais à frente.

É necessário saber qual o tamanho médio dos fios de cabelo utilizado, o seu comprimento e o seu diâmetro, para que se possa analisar e assim prever qual o seu comportamento enquanto fibra. Assim, foi preciso efetuar uma “curva granulométrica dos cabelos”, como aparece na Figura 4.7, recolhendo uma pequena amostra do que havia disponível e assim é possível observar qual o seu comprimento médio. Para conseguir separar os cabelos de maior comprimento e de menor comprimento, recorreu-se a uma pistola de compressão de ar, pondo o cabelo dentro de um garrafão de água, fazendo um corte no fundo deste e um furo na tampa. Assim, o ar entrava com alguma pressão e com a ajuda de um peneiro de malha muito fina (#200, que só deixa passar partículas com diâmetro menor que 0,075 mm) separaram-se os cabelos mais finos e os maiores dos de menores dimensões que não serviam para ser aplicados (menores que 2,5 cm eram postos de parte).

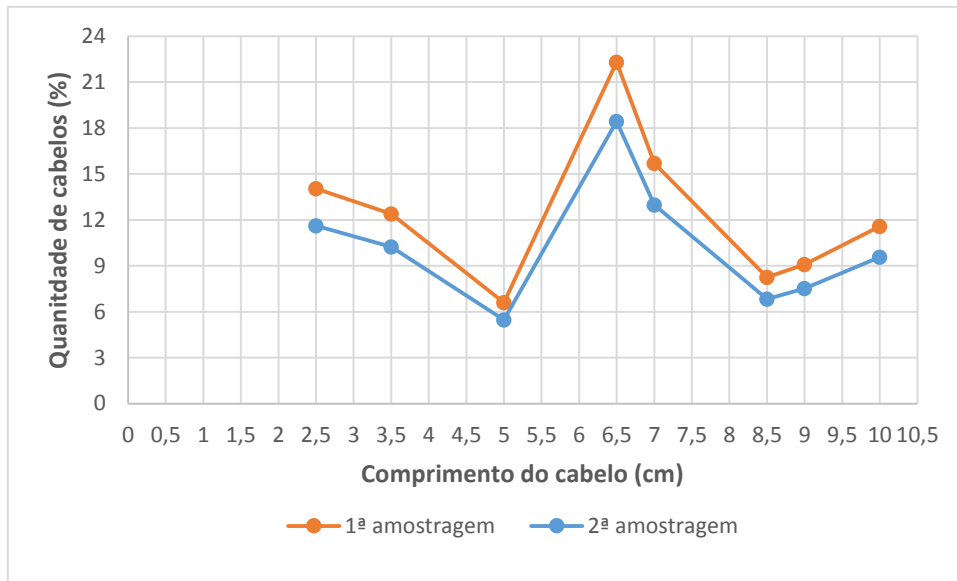


Figura 4. 7 - Curva granulométrica do cabelo (1ª e 2ª amostragens).

As diferentes cores e diâmetros existentes não foram controlados, existindo praticamente todas as cores naturais possíveis bem como os diâmetros que variam com o tipo de cabelo, tal como foi referido em 2.7.

Para o presente trabalho, o cabelo é misturado com o solo e de seguida é colocado dentro do molde e compactado, da mesma forma que foi feito para o bloco somente com solo. A Figura 4.9 mostra o aspeto de um bloco com mistura de solo e cabelos.



Figura 4. 8 - Bloco de solo reforçado com cabelo.

### 4.3 Equipamento utilizado

#### 4.3.1 Molde para os blocos

De forma a ser possível avaliar o comportamento mecânico do solo, com ou sem adição de fibras, foram realizados diversos conjuntos de provetes. Para esse efeito utilizaram-se moldes de 15cm x 15cm x 15cm (Figura 4.10). Previamente à montagem destes moldes, a base e as suas paredes laterais foram limpas e aplicou-se um pouco de vaselina, de modo a evitar que o solo aderisse à superfície destas. Foi feita ainda a pesagem das bases dos moldes. No fim de colocado e compactado o solo dentro do molde, as paredes laterais que serviram para dar a forma ao bloco eram retiradas.



Figura 4. 9 - Molde para o fabrico dos blocos.

#### 4.3.2 Prensa hidráulica de compressão

Inicialmente, foram produzidos os blocos de duas formas distintas, compressão do solo através de uma prensa hidráulica e compactação manual, através de um pilão de compactação leve usado no ensaio Proctor. Optou-se por este caminho de forma a averiguar que método de preparação conduzia a melhores resultados em termos de resistência. Após ensaiados o primeiro conjunto de blocos, comprovou-se que pela compactação manual os resultados seriam consideravelmente melhores, pois estes apresentavam-se mais compactados e com resistências superiores, como se vai demonstrar no capítulo dos resultados.

No entanto, para caracterizar os provetes (resistência e deformação dos blocos), foi utilizada a mesma prensa hidráulica usada para a preparação dos blocos. A prensa hidráulica SERVOSIS Modelo ME – 402E, nº de série 140, ano 2000 e com capacidade de 20 toneladas (Figura 4.11 a) e b)).



a)



b)

Figura 4. 10 - a) – Prensa hidráulica; b) – Interface com o software, que controla os ensaios.

Com a prensa a preparação dos provetes seria mais fácil. A preparação por compactação é mais demorada e exige mais esforço, devido ao número de pancadas que se teria de aplicar a cada camada de solo (mais especificamente 272 pancadas, divididas por 3 camadas, ou seja, 91 pancadas por camada de solo). Apesar do esforço acrescido, e mesmo tendo em atenção o elevado número de blocos a preparar, a compactação manual foi a técnica escolhida, em favor de uma melhor qualidade dos blocos. Também há que ter em conta que os países que não têm acesso a tecnologias, teriam de recorrer necessariamente à compactação manual para construir os blocos, e assim os resultados que se vão obter serão mais próximos da realidade desses países.

#### 4.4 Método experimental

O estudo tem como objetivo analisar o comportamento mecânico do solo em condições de ensaio diferentes, ou seja, avaliar o contributo da variação do teor em água, tempo de secagem e inclusão de diferentes elementos de reforço (cabelo) no comportamento mecânico do solo. Com estudos como este, pretende dar-se um contributo para uma utilização mais eficaz e controlada do solo como material de construção, especialmente para estruturas de edificação considerada sustentável.

#### 4.4.1 Preparação dos blocos

Todos os blocos foram compactados com  $W_{op}$  determinado através do ensaio Proctor – Leve. Os blocos eram deixados a secar em ambiente controlado, com temperatura a 20-25° C e humidade de 50-60% (Figura 4.12), até atingirem os teores em água pré definidos (9,5%; 7,5%; 5,5%; 3,5%; 1,5%) para o estudo. Os blocos eram então ensaiados, sempre em conjuntos de três para o mesmo teor de água, para obterem resultados mais fiáveis.



Figura 4. 11 - Blocos submetidos a secagem, em ambiente controlado.

O solo utilizado para cada bloco era previamente preparado, ou seja, era adicionada água, como já foi referido anteriormente, até atingir o teor ótimo em água. Eram necessários sensivelmente 7,7kg de solo húmido para formar cada bloco e o solo era colocado em 3 camadas sensivelmente com a mesma espessura, tal como se pode ver pela Figura 4.12.

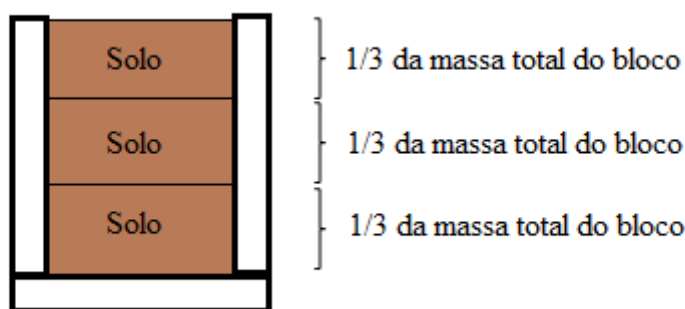


Figura 4. 12 - Esquema ilustrativo da preparação dos blocos de solo não reforçado.

Nos blocos compactados manualmente, cada camada era sujeita à mesma energia de compactação (leve), o que correspondia a 91 pancadas, resultando num total para cada bloco de 272 pancadas.

Nos blocos compactados por recurso à prensa hidráulica, cada camada foi sujeita a uma força de 10 kN durante 120s, para que fosse semelhante à energia de compactação correspondente ao proctor-leve.

Para o fabrico dos blocos com solo reforçado (fios de cabelo), o procedimento foi um pouco diferente. Nesta situação, pretendia-se efetuar uma mistura homogénea entre fios de cabelo e o solo húmido, evitando mexer muito porque os cabelos tinham a tendência por se aglomerarem. Contudo pretendia-se seguir o mesmo procedimento utilizado para os blocos sem reforço. No entanto, assim que foi desmoldado o bloco, verificou-se que durante a compactação, o cabelo migrava para as laterais do bloco e não tinha uma distribuição uniforme como se pretendia.

Devido à fuga dos cabelos para os bordos do molde, o plano de preparação dos blocos teve de sofrer alterações, pelo que se decidiu aumentar para 5 o número de camadas. A quantidade de solo e a quantidade de cabelo foi repartida de igual forma para cada uma destas 5 camadas. O número de pancadas total manteve-se em 272 pancadas, mas subdivididas pelas 5 camadas, ou seja aproximadamente 55 pancadas por camada. Desta forma a distribuição do cabelo mostrou-se mais uniforme (Figura 4.14). De salientar que na construção destes blocos sobrava um pouco (100 a 200g) da quantidade de solo previsto (7,7Kg). Em princípio, nestes provetes, o volume de vazios seria superior, ou seja, a porosidade seria também superior.



Figura 4. 13 - Distribuição dos cabelos nos blocos.

#### 4.4.2 Plano dos ensaios laboratoriais

No presente trabalho foram efetuados 39 ensaios de compressão sobre os correspondentes 39 blocos, sendo que seis destes são repetições resultantes da escolha dos métodos de compactação, de confirmação de resultados e compactações imperfeitas. É o caso dos três primeiros blocos em que se utilizou a prensa para compactar o solo, nos blocos em que se introduziu o cabelo pela primeira vez, uma vez que o cabelo migrava para junto das laterais do próprio molde, e dos últimos ensaios para os teores de água mais secos com elemento de reforço



(aproximadamente 1,5%) que inicialmente geraram resultados contraditórios. Para cada teor de humidade pretendido (9,5%; 7,5%; 5,5%; 3,5%; 1,5%) foram fabricados 3 blocos, de forma a proporcionar maior credibilidade e precisão nos resultados obtidos.

Uma vez que o tema da dissertação diz respeito à Construção Sustentável, foi feito o reaproveitamento do solo sempre que não foi usado qualquer tipo de reforço, o solo de cada conjunto de três blocos e para cada teor de água foi sempre reaproveitado para os blocos seguintes. Sempre que se terminou de ensaiar um bloco, este era analisado para determinar qual o valor do teor de água que se encontrava e daí conseguia-se determinar quanto era necessário adicionar de água para voltar ao teor ótimo, patamar onde sempre se iniciava a compactação e a secagem do bloco.

Um dos objetivos principais era fazer um controlo da variação do teor em água dos blocos, com e sem adição de reforço, em relação ao tempo e depois verificar como isso afetava a resistência dos blocos, havendo a previsão de que uma secagem demasiado rápida degrada a qualidade dos blocos, por exemplo.

De forma a controlar quando o solo atingia tal teor em água, os blocos, com ou sem reforço, eram pesados periodicamente durante o período de cura ou secagem. Para saber, com alguma precisão, quando o solo atingia o teor em água pretendido, utilizou-se a seguinte equação (1):

$$P_{seco} = \frac{P_i - P_{base}}{1+w} \quad (1)$$

Em que o  $P_{seco}$  é o peso do solo seco,  $P_{base}$  é o peso da base do molde,  $P_i$  é o peso do solo com o teor em água  $w$ .

Assim que se chegasse ao peso pretendido ou próximo disso, os blocos eram devidamente transportados até à prensa hidráulica e ensaiados. No final de cada ensaio o valor real do teor em água era determinado, tendo-se verificado que o valor era sistematicamente semelhante ao previsto através da equação.

Os blocos com solo reforçado com 0,3% de fios de cabelo (cerca de 23 gramas de cabelo por cada bloco) também passavam por um processo de cura e de controlo da variação do teor em água antes de serem ensaiados.

Durante o ensaio propriamente dito, o bloco era colocado na prensa hidráulica para ser comprimido e avaliar o comportamento mecânico, em termos de resistência e deformação (Figura 4.15). Sobre o bloco era exercida uma deformação com uma velocidade de compressão equivalente a 0,05 mm/s, deixando que o bloco atingisse o ponto de rotura, de forma a ver a

resistência máxima deste, e permitindo que este estabilizasse. O comportamento do material após rotura é bastante importante pois dá a indicação da severidade das consequências de rotura.



Figura 4. 14 - Bloco de solo a ser ensaiado na prensa hidráulica.

Por último, procedeu-se a um estudo específico do cabelo, de forma a perceber de que forma o cabelo se comporta sob ação da temperatura, numa estufa e a diferentes temperaturas – desde a temperatura ambiente até aos 280° C. Inicialmente, tentou-se avaliar esse comportamento com fios de cabelo mais solo (dentro de 3 cápsulas que vão para a estufa), uma amostra proveniente de um dos blocos que foram ensaiados. Por suspeita que o peso que se estava a perder estaria relacionado com alguma água remanescente que pertenceria ao solo, resolveu-se realizar o mesmo procedimento mas apenas para uma amostra de fios de cabelo sem solo.

---

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Introdução

Na presente secção vão ser apresentados e analisados os resultados que se obtiveram nos ensaios que decorreram durante este trabalho. Este estudo está dividido em 6 fases.

A primeira parte do estudo é relativa à escolha do método para o fabrico do bloco que se deve utilizar, utilização da prensa/compactação manual, uma vez que cada um dos métodos pode proporcionar resultados distintos, e é determinante qual a mais adequado para obter blocos de solo com o melhor comportamento.

Numa segunda fase é estudado como o teor de água tende a variar com o tempo de secagem do solo (horas), com e sem reforço. Desta forma possibilita comparar ambas as soluções, verificando qual é a melhor opção e qual a influência do reforço no tempo de secagem. Este ponto é muito relevante para este trabalho, uma vez que influencia a velocidade de construção e é algo que está bastante inexplorado, existindo pouca informação disponível.

A terceira fase do estudo tem como objetivo verificar como a resistência varia consoante o teor de água presente nos blocos, com e sem reforço, e de que forma o reforço vem melhorar, ou não, o comportamento mecânico do solo.

Ainda relativamente à resistência, a quarta fase vai mostrar como a resistência do solo vai variando com o tempo de secagem dos blocos (dias).

Na quinta fase observa-se a forma como o teor de humidade faz variar a deformação. Dentro deste ponto, descreve-se qual o efeito do reforço na deformação, principalmente para teores em água mais elevados, no caso em que se introduz o reforço.

A sexta e última fase passa por estudar de que forma o cabelo reage às temperaturas, em estufa, de forma a analisar se é possível reaproveitar o solo com reforço. Isto porque quando o reforço é introduzido, o solo não voltava a ser utilizado e era assim desperdiçada uma grande quantidade de solo. Assim, procura-se uma forma possível de eliminar o cabelo do solo e aproveitar este para outros ensaios que necessitem do mesmo tipo de solo que foi utilizado neste estudo,

contribuindo para o conceito de Sustentabilidade. Por outro lado, dá informação sobre a possibilidade de secar os blocos do solo com cabelo em estufa para aumentar a velocidade de construção.

No setup utilizado na prensa hidráulica existem deformações que não foram contabilizadas separadamente. De qualquer modo, pode garantir-se que a deformação sofrida pelo solo é de ordem de grandeza muito superior às partes metálicas da prensa. Quanto à resistência, esta corresponde à força de compressão diretamente aplicada no provete.

## 5.2 Método de fabrico dos blocos

Neste ponto, o objetivo consiste em escolher a melhor forma de compactar o solo e comparar os dois métodos distintos de fabrico de blocos, com o respetivo teor ótimo de humidade (9,5%). Neste caso, ou a compactação manual com proctor-leve, designada por comp-M, ou a compactação por recurso à prensa hidráulica, designada por comp-PH.

A Figura 5.1 mostra a resistência face à deformação dos blocos utilizando a comp-PH, enquanto a Figura 5.2 mostra a sua alternativa, a comp-M. Para cada um dos métodos foram ensaiados 3 provetes.

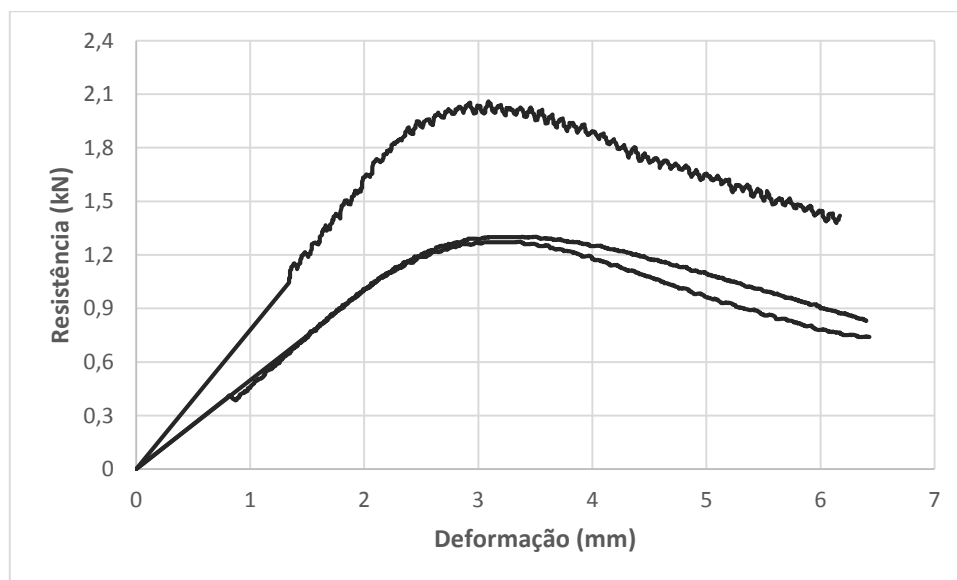


Figura 5. 1 – Gráfico Resistência-Deformação dos provetes comp-PH.

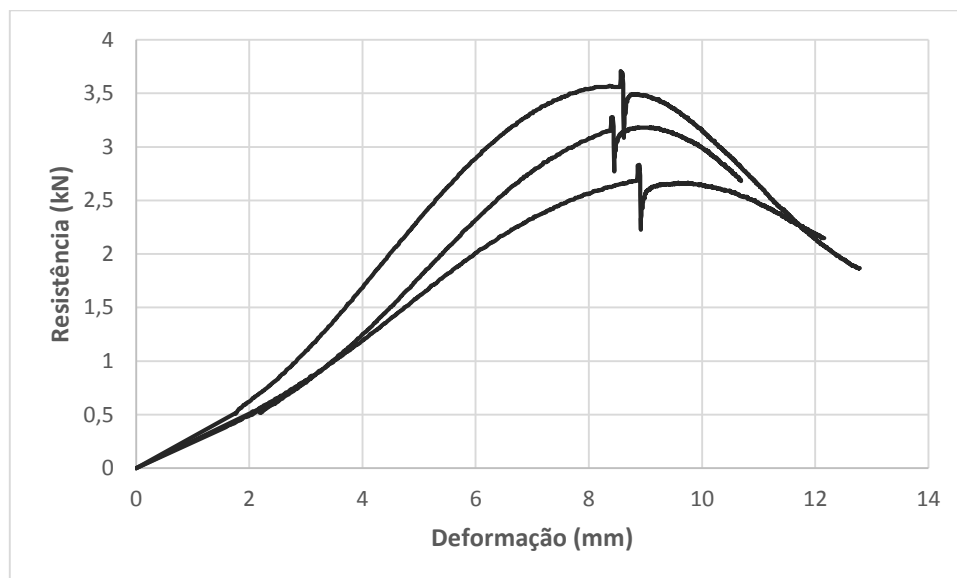


Figura 5. 2 - Compactação manual.

É possível observar que através da comp-PH, o solo apresenta valores de resistência menores relativamente aos blocos que utilizam a comp-M, bem como a sua deformação, no ponto de resistência máxima, também ser bastante menor. Isto pode-se dever ao facto da chapa utilizada na comp-PH, o solo central ficou mais bem compactado, e o solo juntos aos vértices verticais ficou defeituosamente compactado. Com a comp-M, o bloco apresentou um comportamento significativamente melhor, em termos de resistência. Nestes ensaios importa ainda referir que durante o ensaio, a prensa detetou uma quebra de carga abrupta e parou. Esta é a razão de nas curvas destes ensaios existir uma queda acentuada. Após o sucedido, reiniciou-se o ensaio para obter a parte final do gráfico, que permite às partículas do solo estabilizarem. As resistências máximas e deformações correspondentes obtidas em cada ensaio são descritas no Quadro 5.1. Verificou-se que os provetes comp-M resistiram mais 112%, em média, relativamente aos correspondentes à comp-PH, ou seja, a sua resistência aumentou ainda mais que o dobro.

Quadro 5. 1 - Resistência e deformação máxima do solo para cada método de fabrico dos blocos, respetivamente.

	<b>Proвете</b>	<b>Resistência máxima (kN)</b>	<b>Deformação (mm)</b>
<b>Comp-PH</b>	<b>P00</b>	2,06	3,1
	<b>P01</b>	1,30	3,5
	<b>P02</b>	1,27	3,4
<b>Comp-M</b>	<b>P03</b>	2,83	8,9
	<b>P04</b>	3,71	8,5
	<b>P05</b>	3,28	8,4

De acordo com o obtido, o método de compactação do solo escolhido para os ensaios seguintes foi a compactação manual porque é o que apresenta os melhores resultados, ou seja, proporciona ao solo uma maior resistência, apesar de sofrer maior deformação para atingir essa maior resistência.

Convém ainda frisar, até pelo que foi dito anteriormente, que a compactação manual é a escolha mais adequada, uma vez que é nos países com menor poder económico que se encontra uma maior presença deste tipo de construção (com solo) e que poucas possibilidades têm para efetuar compactações utilizando meios mecânicos.

### 5.3 Velocidade de secagem do solo

No âmbito da técnica de construção em terra, um dos aspetos menos estudado é a forma como o teor em água varia com o passar do tempo. Neste sentido, vão ser comparadas 2 soluções diferentes de solo, com e sem reforço, para ver qual a influência do reforço no tempo de secagem. Na Figura 5.3 apresentam-se os gráficos  $w - t$  (horas). O  $W$  foi avaliado a partir da equação (1) indicada em 4.4.2 e todos os provetes foram secos em ambiente controlado.

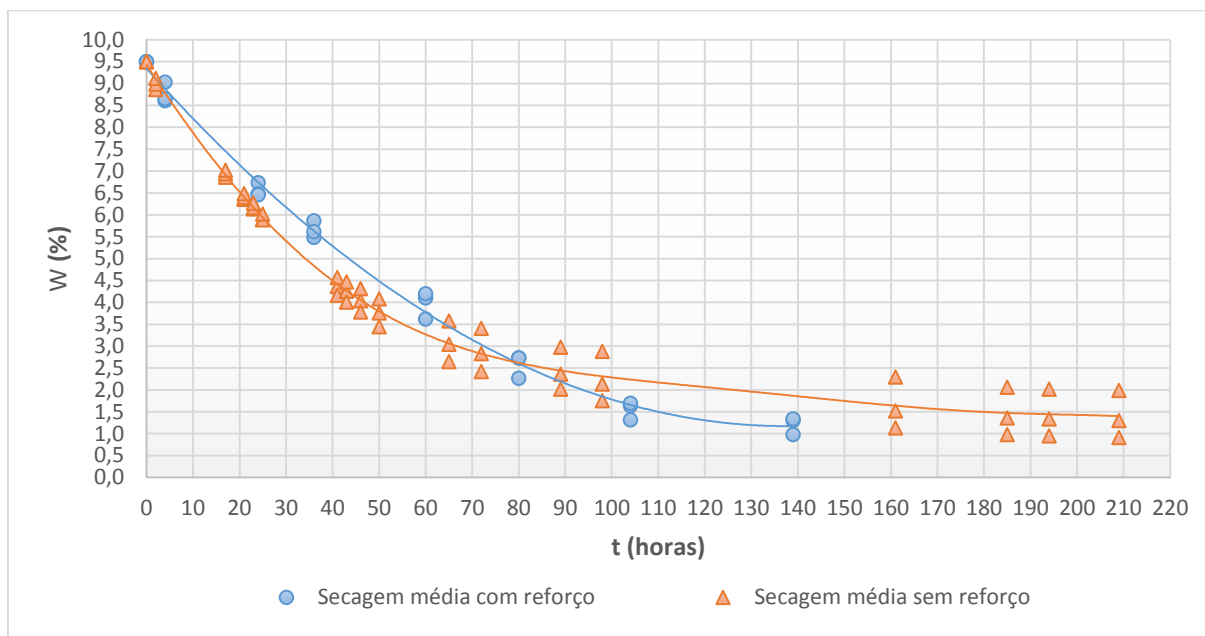


Figura 5. 3 - Variação do teor em água (w), com e sem reforço, ao longo do tempo.

Como seria de esperar, verifica-se que o processo de secagem é mais rápido no início para ambos os tipos de blocos (com e sem reforço) e que a velocidade vai diminuindo com o passar do tempo. No início, a secagem é fundamentalmente na zona mais superficial, que está mais em contacto com o ambiente, e conforme o processo de secagem vai caminhando progressivamente para o interior do bloco, torna-se também progressivamente mais lento.

Comparando as curvas de secagem obtidas, conclui-se que a variação do teor em água em ambas as soluções é semelhante, ou seja, não existe grande diferença no tempo de secagem, com ou sem reforço. Contudo no período 100-140h parece que os blocos fabricados com solo com reforço evidenciam valores inferiores de w. Seriam necessários mais dados para esta curva, nos períodos subsequentes para se poder auferir definitivamente desta conclusão. Mesmo assim, nota-se que no início os blocos com solo apenas secam ligeiramente mais rápido, mas este comportamento inverte-se a partir das 80h, em que parece estabilizar. No início a secagem deve ocorrer mais à superfície e com o passar do tempo caminha para o interior bloco onde é mais fácil secar se tiver cabelos devido ao facto da porosidade ser maior.

Deste modo, o solo com reforço consegue atingir os teores de humidade pretendidos ( $w \leq 1,5\%$ ) de forma mais rápida e assim requer um período de secagem bem mais curto, aproximadamente 140h, o que resulta numa maior capacidade de cumprir prazos de construção.

Para o caso do solo sem reforço, este necessita de um período de secagem mais alargado, de aproximadamente 210h. É possível verificar que o solo sem reforço demora praticamente 90h

a atingir a marca dos 2,5% de água presente no solo, momento em que a curva de secagem média começa a estabilizar. Isto permite demonstrar que a secagem, desde o ponto inicial até  $w$  igual a 2,5% é relativamente rápida. Depois disso para os níveis mais secos, até  $w$  igual a 1,5%, é necessário muito mais tempo, ou seja precisa de intervalo de tempo de cerca de 110h.

Tendo em conta estes resultados, é possível afirmar que neste processo de secagem, a fase final é a mais demorada, visto que a presença da água já é reduzida e a sua remoção é ainda mais difícil, seja para o caso de solo com ou sem reforço.

#### 5.4 Influência do teor em água na resistência à compressão

Após verificar como a secagem variava ao longo do tempo, pretende-se agora verificar em que medida  $W$  influencia a resistência dos provetes. Os ensaios foram realizados de forma a estudar como a resistência máxima à compressão varia de acordo com o teor em água associado e para ver se era benéfico (ou não) a introdução do reforço utilizado neste trabalho, os fios de cabelo. Os valores do teor em água,  $w$ , efetivos são ligeiramente distintos aos previstos (9,5%; 7,5%; 5,5%; 3,5%; 1,5%) por ensaio, uma vez que não era possível prever quando o bloco atingia o valor pretendido, apenas se podia fazer uma estimativa. Na Figura 5.4 são indicados os resultados apurados.

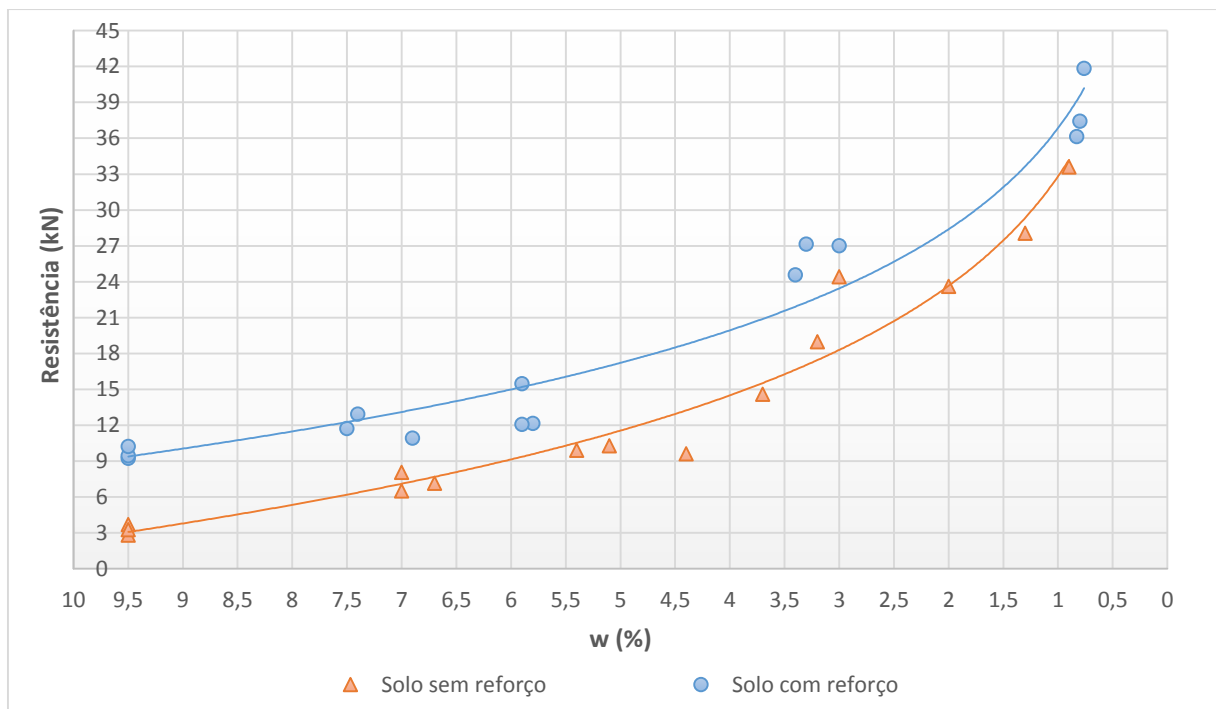


Figura 5. 4 - Variação da resistência máxima, com e sem reforço, consoante  $w$ .



Como se pode observar pelos resultados obtidos a diferença inicial, entre o solo com e sem reforço, de cerca de 6 kN vai-se reduzindo e concluiu-se que com a presença do reforço no solo há uma melhoria, neste caso em termos de resistência à compressão. Ou seja, a diferença da curva, entre o solo sem reforço e com reforço diminui conforme vão secando os provetes.

Nos ensaios realizados no intervalo  $w$  igual a 4,5-5,5% sem reforço, nota-se que existe uma diferença maior, porque foi nestes ensaios que a compactação não ficou tão uniforme e a própria secagem foi afetada, principalmente porque um dos blocos ficou mais exposto à radiação solar direta. Por consequência, um dos blocos apresenta uma resistência menor apesar de estar mais seco, aproximadamente para  $w$  igual a 4,5%, e que por isso conduziu a um resultado menos bom. Este desempenho pode estar relacionado provavelmente com a secagem excessiva das faces exteriores relativamente ao interior. Ainda, num dos blocos com  $w$  igual a 3% de água que, por estar mais seco que os outros provetes desse grupo, apresentou um valor superior e que fica muito próximo dos ensaios com cabelo para o mesmo teor em água. Para os solos que já se encontravam mais secos e sem reforço, para valores de  $w$  próximos de 1,5%, durante o transporte dos blocos para o local dos ensaios num carrinho já envelhecido, foram provocadas fissuras, afetando principalmente um dos blocos. Isto fez com que nesse ensaio, o valor obtido em relação à resistência máxima à compressão fosse menor.

Tal como aconteceu para o solo sem reforço, num dos ensaios de solo com reforço para  $w$  igual a 7,5%, um dos vértices de um dos blocos ficou imperfeito e desintegrou-se durante o ensaio, determinando um valor inferior na resistência máxima à compressão, apesar de se encontrar mais seco. Inicialmente os resultados obtidos para o solo com reforço no seu nível mais seco, com  $w$  menor ou igual a 1,5%, não foram os esperados. Desta forma forma, estes ensaios tiveram de ser repetidos. Mesmo sabendo que em condições normais, em ambiente controlado (como foi referido no subcapítulo 4.4.1), ao fim de aproximadamente 140h os blocos já estariam no nível de teor em água pretendido para se ensaiar, como se pode ver pela Figura 5.3, isto não se verificou. Não foi possível porque as condições de ambiente controlado onde se realizava a secagem tiveram de ser alteradas, por decorrerem outros ensaios neste mesmo local e também porque a própria sala de ensaios não se encontrava disponível, aumentando o período de secagem destes blocos.

Em alguns dos ensaios verificou-se que, dentro do mesmo nível de teor em água, foram gerados melhores resultados e outros menos bons. Em alguns casos, nomeadamente para  $w$  igual 1,5% e 3,5% no solo sem reforço, os resultados em termos de resistência foram algo dispersos. Isto resultou dos diferentes períodos de secagem e de alguns acontecimentos que já foram referidos anteriormente, relativamente às fissuras, imperfeições e nivelamento da superfície do bloco, como se pode visualizar pela Figura 5.5. Concluiu-se ainda que, relativamente ao teor em água, é imperativo que se utilize o valor real e não aquele que se é esperado obter, definido na programação dos ensaios, para evitar alguma divergência nos resultados.



Figura 5. 5 - Imperfeições do bloco.

As curvas de resistências para ambas as situações, com e sem reforço, são mais ou menos paralelas e, como seria de esperar, a influência do reforço é positiva. O solo com reforço, no seu nível mais seco, tem uma resistência máxima à compressão entre 36 a 42 kN, enquanto no caso do solo sem reforço, esta se situa entre 23 a 33 kN, evidenciando a capacidade que o reforço tem em fortalecer o solo. Com os cabelos, a resistência máxima à compressão dos blocos aumentou 35,4%, relativamente ao solo sem este reforço. Apesar de tudo, estes últimos provetes com reforço evidenciam valores de  $w$  inferiores a 1,5%, o que não se verifica no caso de solo sem reforço. Esta melhoria está associada principalmente a um maior poder de agregação das partículas do solo com a presença do reforço, como se pode ver pela Figura 5.6, que previne com maior eficácia as roturas e confere maior segurança em termos estruturais.



Figura 5. 6 - Rotura de um bloco com reforço durante o ensaio.

Como é visível pela figura anterior, apenas as partículas de solo com menor poder de agregação deslizam. No entanto, na superfície da rotura, os fios de cabelo são os principais responsáveis por manterem alguma resistência, contribuindo assim para o esforço resultante da compressão a que o bloco está sujeito, impedindo a desagregação imediata do solo.

A utilização deste tipo de reforço pode ser bem-vinda nos dias de hoje, porque para além de representar uma atitude ecologicamente correta e por conferir uma deposição final deste resíduo, permite que os custos de uma obra possam vir a ser reduzidos, na medida que aumenta a capacidade de carga da estrutura construída pelos blocos. Importa ainda mais, quando este tipo de construção tem maior presença em países com menor capacidade económica, onde é difícil obter reforços que possam conferir uma maior resistência aos blocos e que a sua aplicação é feita normalmente quando estes se encontram secos.

As condições onde a secagem é feita também contribuem para a resistência, daí ser importante que o processo não seja acelerado pois pode condicionar a resistência dos blocos e pode colocar em causa a própria integridade estrutural. Também neste caso, o recurso aos cabelos pode garantir uma maior uniformidade da secagem ao facilitar o escoamento da humidade interior.

## 5.5 Variação da resistência à compressão com o tempo de secagem

Uma das características menos analisadas neste tipo de construção corresponde à evolução da resistência com o tempo, ou seja, à medida que vai secando. Neste caso, é necessário saber analisar cada uma das soluções do solo, com e sem reforço. Desta forma, do estudo realizado obteve-se os seguintes resultados, indicado na Figura 5.7.

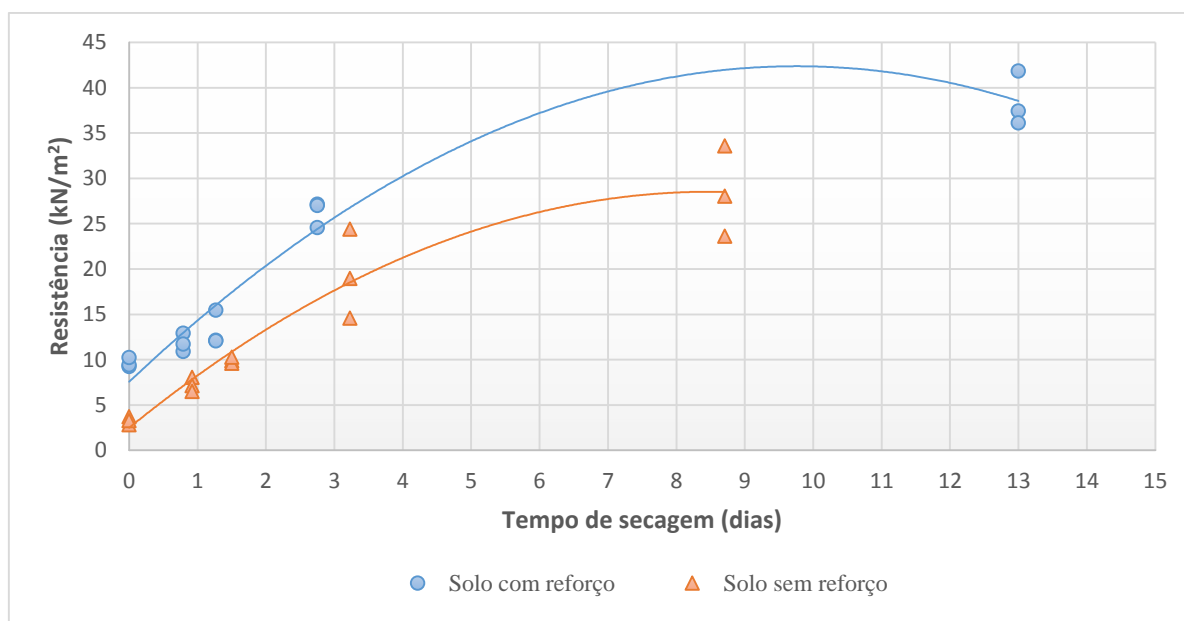


Figura 5. 7 - Variação da resistência máxima à compressão do solo, com e sem reforço, com o tempo de secagem.

Tal como anteriormente, é possível verificar na Figura 5.7 que quando o reforço é incorporado, a resistência máxima do solo à compressão é sempre superior, em relação ao solo sem reforço. Importa salientar que, por questões logísticas, os provetes com reforço de cabelo que conduziram aos valores mais elevados da resistência, só puderam ser ensaiados muito para além das 140h, com valores de  $w$  aproximadamente iguais a 0,8%. Apesar de o tempo de secagem ser mais longo nos blocos com a introdução do reforço, permitiu ainda assim verificar que a sua capacidade de resistência foi melhorada e quanto maior for o seu tempo de secagem, provavelmente, se torna mais vantajoso, ou seja, a influência que o reforço tem no solo permite resolver o problema do tempo de secagem e a forma como este afeta a resistência do solo.

É importante referir que, para cada uma das 5 camadas do solo com reforço, efetua-se uma mistura entre o solo e os fios de cabelo previamente e que depois se procede à compactação manual.

No caso do solo com reforço, a dispersão que acontece aos valores de resistência, resulta da não uniformidade da distribuição do reforço, apesar de todo o cuidado na fase construtiva, sendo que não é possível garantir a uniformidade na distribuição dos cabelos em cada camada. Isto ocorre pois apenas se controla a quantidade que se coloca para produzir o bloco e não a forma como estes se distribuem pelas camadas de solo, bem como as próprias características dos fios de cabelo (comprimento, diâmetro, tipo de cabelo, etc.). Apesar de ser um ponto importante a considerar, para este trabalho, não foi analisada a forma como o cabelo tende a distribuir-se em cada camada, visto que, como foi referido no subcapítulo 4.4.1, o cabelo tinha a tendência em migrar para as laterais do bloco e os procedimentos adotados tiveram que ser alterados relativamente aos que se utilizaram no caso do solo sem reforço.

Uma das principais razões porque o tempo de secagem é importante está associado à forma como este afeta a resistência do bloco. Este tempo de secagem pode variar consoante determinados fatores, como humidade, temperatura, tamanho da amostra de ensaios e até o próprio reforço. Tal como já foi referido, as condições do ambiente em que decorria a secagem, dos últimos provetes de solo com reforço, foram alteradas e por isso o intervalo de tempo de secagem foi mais longo. Devido a esse facto, os resultados obtidos em termos de resistência para este caso foram influenciados, mas seria de esperar que, mesmo assim, as resistências fossem melhores, tal como aconteceu para os teores em água superiores.

## **5.6 Relação do teor em água com a deformação do solo**

O valor da deformação medida no ponto de rotura dos provetes, tal como a resistência, pode ser afetada pela quantidade de água presente no solo. Como é do conhecimento geral, o solo no seu estado mais seco evidencia uma rigidez superior, ou seja, tem maior resistência por unidade de deformação, enquanto que o solo com teor de humidade mais elevada é mais flexível, i.e. maior deformação por unidade de carga suportada. Neste sentido, para este estudo tornou-se pertinente avaliar a deformação no ponto de rotura dos provetes e qual o efeito do reforço neste parâmetro. Assim, é possível comparar as duas soluções de solo com e sem reforço, a partir da Figura 5.8.

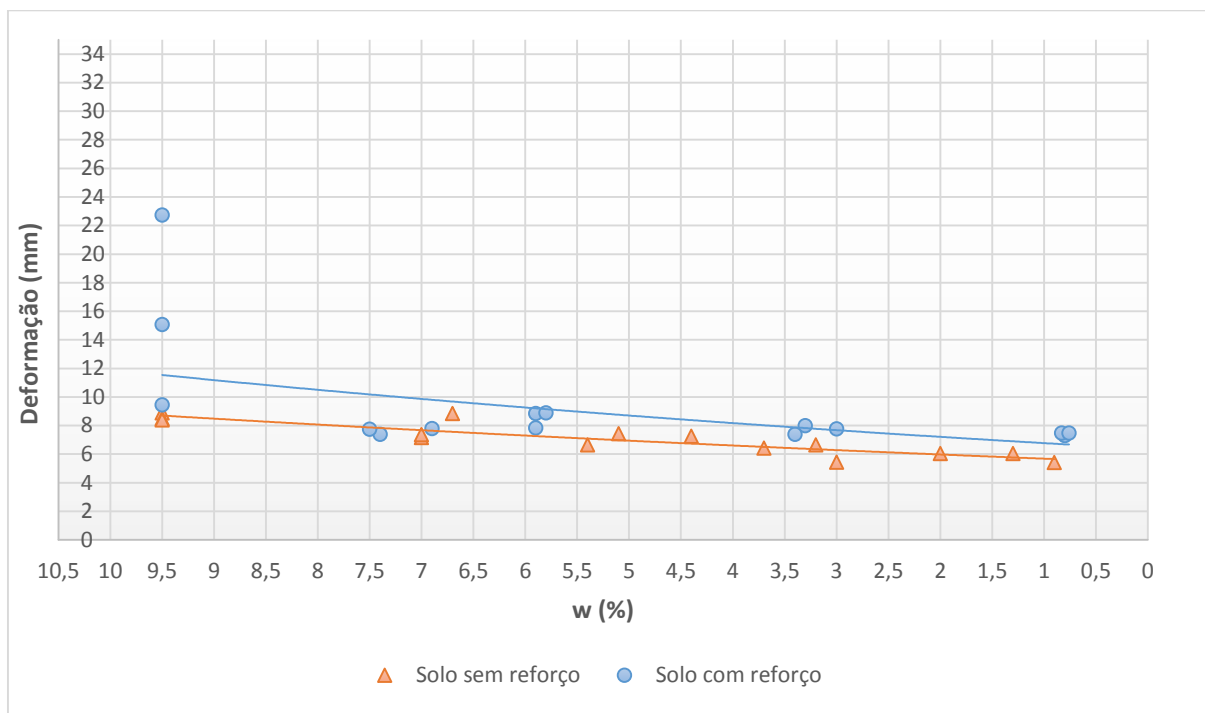


Figura 5. 8 - Variação da deformação, com o teor em água presente no solo.

No solo sem reforço, a deformação tende a decrescer linearmente com a evolução do teor em água, ou seja, quanto menor for o teor em água presente no solo, menor será a sua deformação. Inicialmente, quando o seu teor em água é igual a 9,5%, apresenta um valor de deformação situado entre 8,4-8,9 mm. Como seria de esperar a deformação é menor quando há menos água presente no solo, tomando valores entre 5,42-6,06 mm de deformação, no ponto de resistência máxima e numa situação mais seca. De qualquer modo, não é significativa a variação em termos globais mas em termos relativos significa uma diminuição de cerca de 33%, o que já é muito relevante.

Para a solução de solo com reforço, os resultados mostram uma variação algo afastada do comportamento linear. Alguns resultados iniciais ( $w=9,5\%$ ), pouco consistentes, poderão estar a contribuir para esse facto. Neste ponto verificou-se um efeito de cintagem, abordado adiante. De qualquer modo, a deformação tem tendência a ser sempre superior com a introdução do reforço. Seria expectável que apresentasse um comportamento semelhante ao do solo sem reforço, eventualmente mais rígido, na medida em que esta deformação, que depende essencialmente da coesão do solo, deveria melhorar com a introdução do cabelo. Importa salientar que, no que diz respeito aos valores de deformação do solo com reforço, para  $w$  aproximadamente igual a 7,5%, o reforço pode não ter tido uma distribuição semelhante ao dos outros casos, em virtude dos cabelos serem provenientes de uma 2ª amostragem, onde existiam mais tipos diferentes de cabelo.

No teor ótimo de compactação ocorreu o designado efeito de cintagem, o qual deve ser tido em consideração para este estudo, somente para o caso do solo com reforço, como se pode observar na Figura 5.9.



a)



b)

Figura 5. 9 - Efeito de cintagem do solo com reforço.

Este fenômeno, denominado como efeito de cintagem, aconteceu somente nos ensaios com reforço. Neste caso, o bloco tende a expandir-se horizontalmente muito para além das laterais do molde, tal como é visível nas figuras anteriores. Refira-se que as dimensões iniciais do molde onde o bloco é produzido são de 15x15x15 cm e passa a ter dimensões de 22x22 cm, no plano

horizontal, e decresce em altura. Após compressão, o bloco tem um efeito “balão”. Este efeito ocorre quando, por exemplo, se comprime um balão numa só direção: esta compressão origina que as outras duas direções verifiquem expansões significativas. No caso do solo, isto é possível graças à elevada deformação verticalmente imposta. Nestes provetes a deformação vertical atingiu valores bastante elevados, entre 9,46 e 22,75 mm, para  $w$  igual a 9,5%. A dispersão verificada é muito superior relativamente aos restantes casos. De salientar ainda a proporcionalidade das dimensões horizontais, deve-se à forma como os cabelos ficaram distribuídos.

A diferença de deformação entre o solo com e sem reforço, tende a decrescer com o grau de humidade presente. Inicialmente ( $w = 9,5\%$ ) a diferença vale cerca de 4mm, mas à medida que o valor de  $W$  diminui, a diferença reduz-se para cerca de 2mm. Neste caso, a diferença entre a deformação do solo com cabelos, em relação ao solo sem cabelos, no teor ótimo ( $w = 9,5\%$ ) é superior em cerca de 83%.

Os valores da deformação para o solo com reforço são superiores aos que são obtidos no solo sem reforço. No entanto, esta comparação deveria ter-se em conta o valor da resistência e não o considerado ponto de rotura. Ou seja, dever-se-ia comparar as deformações para um igual valor de resistência, quer seja com ou sem reforço, por forma a verificar em que situação o valor de deformação é superior. Como no caso do solo com cabelo, a resistência é algo superior, tal como se mostrou em 5.4, estas conclusões poderiam ser alteradas.

Intui-se que os efeitos da deformação não são prejudiciais, mas também deve-se ter em conta que o adobe quando é aplicado se encontra quase seco e, portanto, limita-se consideravelmente estes prejuízos. Contudo é importante avaliar o contributo do reforço, uma vez que na construção a deformação deve ser limitada. Em relação à deformação e à correspondente importância, é definido nos Eurocódigos, o denominado Estado Limite de Serviço/Utilização. Isto significa que uma determinada edificação até pode estar em segurança, relativamente à rotura, mas, para além disso importa que tenha uma deformação limitada de modo que as pessoas não se sintam inseguras e não altere o normal funcionamento da obra/estrutura.

Por outro lado, a deformação também pode ser considerada uma vantagem, no sentido em que revela os problemas da estrutura, porque evidenciam a existência de deformações/roturas e outros problemas estruturais.

## 5.7 Secagem e reciclabilidade do solo com reforço

Numa tentativa de adotar o conceito de Construção Sustentável e a própria Sustentabilidade, este estudo permitiu avaliar a possibilidade de aproveitar o solo quando o reforço foi



introduzido. Neste trabalho, depois de incorporado o reforço, o solo não voltou a ser utilizado, uma vez que seria difícil controlar a quantidade de reforço utilizado num próximo ensaio. Desta forma é importante saber se existe uma alternativa, para que isso não aconteça, se bem que em muitos casos os reforços não são de origem orgânica, o qual não acontece aqui por se tratar de fios de cabelo.

Este estudo tinha como objetivo ver se os blocos podiam ser secos na estufa sem inutilizar ou danificar o reforço. Inicialmente, levou-se à estufa solo com reforço de cabelo, a diferentes temperaturas mas permanecendo o mesmo intervalo de tempo no interior da estufa, cerca de 1h. Começou-se com temperaturas mais baixas, desde a temperatura ambiente, 22°, e foi se progressivamente subindo, até um máximo de 40°C, para avaliar o seu efeito. Na figura 5.10 apresentam-se os resultados obtidos para a evolução do peso de solo com reforço de cabelo em 3 amostras, em função da temperatura a que foi submetida durante o intervalo de tempo referido anteriormente.

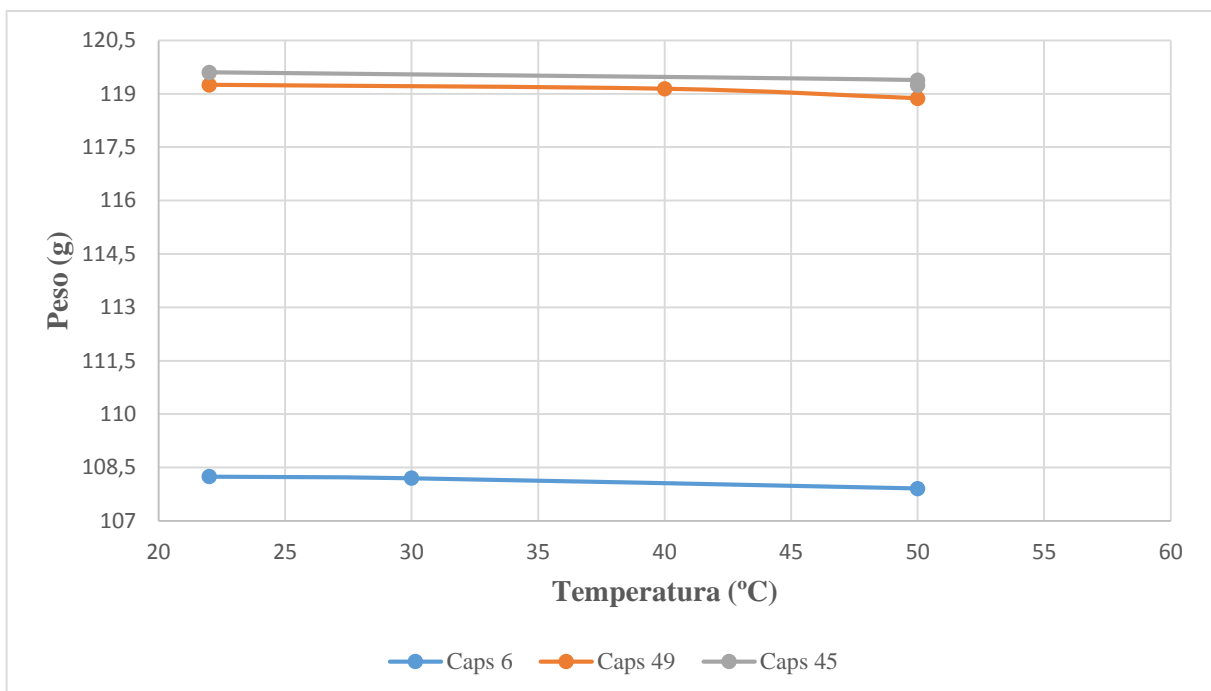


Figura 5. 10 - Secagem, em estufa, de amostras de solo com reforço, durante 1h.

Como se pode ver, é mínima a diminuição do peso que se verifica nas curvas das amostras da figura anterior. Pode concluir-se que, a baixas temperaturas não existem alterações de peso, e que o parâmetro responsável por esta diminuição poderia ser a quantidade de água do solo. Mesmo a temperaturas mais altas, após um ensaio, viu-se que a diminuição do peso não era significativa. Portanto as temperaturas não afetavam diretamente os fios de cabelo, uma vez que estavam misturados com o solo. Para remover totalmente os fios de cabelo do solo, e

portanto poder-se reaproveitar o solo, poder-se-ia eventualmente proceder à queima, levando as amostras a altas temperaturas (400°C) como é feito para retirar a matéria orgânica do solo. Torna-se difícil separar os cabelos da mistura, mas pode ser aproveitado o solo com cabelo para ensaios que utilizem este tipo de solo e este reforço.

Neste sentido, decidiu-se prosseguir para a avaliação do comportamento usando somente fios de cabelo sob o efeito de diferentes amplitudes de temperatura, desde a temperatura ambiente até aos 280° C, obtendo-se os resultados representados na Figura 5.11. A metodologia do ensaio é descrita de seguida.

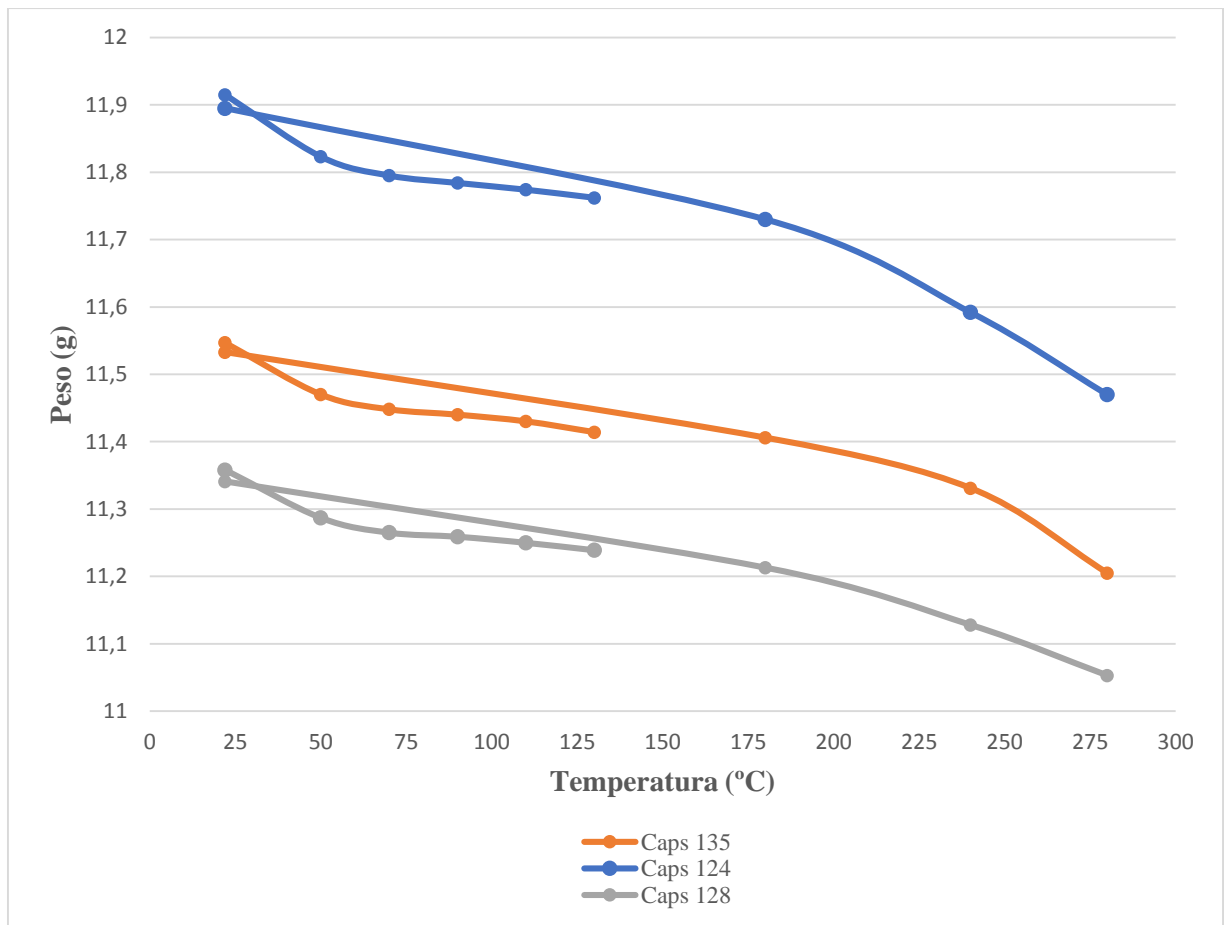


Figura 5. 11 - Efeito da temperatura nos fios de cabelo.

Numa primeira parte do ensaio, as cápsulas com os fios de cabelo foram colocadas dentro de uma estufa sob a ação de temperaturas mais baixas (até aos 130°), durante cerca de 2 h. Para cada temperatura (50°; 70°; 90°; 110°;130°), as cápsulas com cabelo foram retiradas da estufa, pesadas e repousaram dentro de um exsiccador para evitar ganhos de humidade, volume e peso, para depois serem submetidas a temperaturas mais altas. Isto foi feito de modo a que os fios de

cabelo não voltassem à sua condição inicial, de forma a controlar as condições deste tipo de ensaios. Nesta gama de temperaturas, os fios de cabelo perdem pouco do seu peso, estando relacionado com as baixas temperaturas que não provocam perdas significativas. Isto pode ser relacionado como o que acontece no caso dos secadores, que quando usados para secar o cabelo, trabalham dentro desta amplitude de temperaturas e o cabelo não é queimado e serve apenas para expelir a humidade aderente.

Na segunda parte do ensaio, esperou-se até que os fios de cabelo voltassem praticamente ao seu peso inicial. Para tal foram deixados a repousar durante dois dias. Posteriormente foram ensaiados sob temperaturas (180°, 230° e 280°). Isto demonstra a capacidade que os fios de cabelo possuem para conseguirem restabelecer a sua forma e peso ao repousarem durante um período de tempo alargado, mesmo depois de terem sido colocados sob o efeito contínuo de diferentes temperaturas.

Posteriormente, sob o efeito destas altas temperaturas, existe uma queda mais acentuada no peso dos fios de cabelo. Paralelamente à perda do seu peso, notou-se também, a partir dos 240° C, um cheiro a queimado, como se o cabelo se estivesse a incendiar na estufa, o que não aconteceu. Contudo, o cheiro não voltou a reaparecer para a temperatura seguinte (280° C). Quando as cápsulas foram retiradas da estufa verificou-se que os fios de cabelo tinham perdido grande parte do seu volume e tinham-se moldado à própria cápsula, como se pode ver na Figura 5.13 a) e b).



a)



b)

Figura 5. 12 - Efeito das altas temperaturas no cabelo.

O que acontece com o cabelo é semelhante ao trabalho das chapinhas de cabelo, feito por Mustafá et al (2011), e é devido à constituição do próprio cabelo. A molécula mais preponderante no cabelo é a queratina, uma proteína. Quando esta proteína é submetida a temperaturas mais elevadas pode ocorrer a desnaturação proteica, um fenómeno associado ao cabelo e às proteínas que o constituem. Com temperaturas iguais ou inferiores a 100° C, ocorre a evaporação da água que está fracamente ligada ao cabelo. A partir dos 135° C, a água que faz parte da constituição do fio capilar também evapora, o que pode originar a desnaturação da queratina. A partir daí, a temperaturas mais elevadas, como se fez para este trabalho, são quebradas as pontes que ligam as proteínas que fazem parte da fibra capilar, conduzindo desta forma a uma maior perda de peso dos fios de cabelo. Quando se chega a temperaturas na gama dos 240° C a 280° C, o cabelo pode ficar excessivamente seco, quebrar ou até mesmo incendiar-se. Esta última condição, nem deveria ocorrer, pois de acordo com alguns estudos, o cabelo consegue suportar temperaturas de até 350° C antes de ficar completamente queimado, sendo que acima desta temperatura ocorreriam danos totais nos fios de cabelo.

---

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Considerações Finais

Este trabalho foi o seguimento de uma proposta de trabalhos futuros, mencionado numa dissertação que englobava o mesmo tema.

O estudo realizado e aqui apresentado tinha como objetivo estudar qual o melhor método de fabrico dos blocos, comparando a densificação, através da prensa hidráulica, com a compactação manual do solo e verificar de que forma variava a velocidade de secagem dos blocos desde o seu teor ótimo até aos níveis quase secos, bem como os fatores que influenciam este período. Ainda, pretendia-se averiguar como a resistência varia com o teor em água presente nos blocos e com o próprio período de secagem, com e sem reforço, como a deformação reagia face ao teor em água presente nos blocos, também com e sem reforço, e por último ver qual era o comportamento dos cabelos (reforço) sob o efeito de diferentes temperaturas, de forma a poder reutilizar o solo com cabelos que foi necessária no fabrico destes blocos.

Em primeiro lugar, foi possível concluir que o método que mais se adequa para o fabrico deste tipo de blocos de solo é a compactação manual, por duas razões. A primeira é que fica mais próximo da realidade de fabrico deste tipo de blocos, que se pratica em países onde esta técnica é mais predominante e não possui tecnologia mais avançada para o fazer de outra forma. A segunda razão é porque se conseguem obter melhores resultados, pois adotando a compactação manual e através de sucessivas cargas de impacto, a energia de compactação fica mais bem distribuída e assim obtém-se um valor de resistência maior. Mesmo que a deformação para este caso seja maior, tem de se ter em conta que a resistência gerada para essa deformação também é consideravelmente superior.

De seguida, verificou-se que, quer para o caso do solo com reforço ou sem reforço, a velocidade de secagem dos blocos é bastante semelhante, apesar de que, quando se pretende alcançar os níveis mais secos, a opção dos blocos com reforço é melhor porque demora menos tempo em relação aos blocos sem reforço, 140h em comparação com 210h, respetivamente. Isto confere uma vantagem no sentido de se conseguir construir relativamente mais rápido utilizando este

---

tipo de blocos e este reforço e ainda, em relação a custos, este material é bastante fácil de se adquirir e não tem grande valor econômico, tanto o reforço como o próprio solo. No entanto, se o ambiente onde se realiza a secagem dos blocos não for estável, ou seja, se as condições forem variáveis, em termos de humidade e temperatura, isso pode alterar o período de secagem que é necessário para que o bloco fique praticamente seco.

No que diz respeito à resistência, estes ensaios pretendem confirmar que o comportamento mecânico do solo é afetado pelo grau de secagem em que se encontra o próprio bloco e a rapidez do período de secagem também influencia os resultados porque pode condicionar o estado do bloco. Também, as condições do ambiente sobre as quais os blocos estão a secar, se não forem sempre as mesmas, implicam um período de secagem mais ou menos longo e isso provoca valores diferente em termos de resistência. Ainda, o próprio transporte dos blocos para o local dos ensaios tem uma certa influência, porque pode danificar os blocos com a vibração e com o movimento de um sítio para o outro e assim obterem-se resultados que não seriam os esperados. No caso da inclusão do reforço no solo (cabelos), a resistência destes é maior do que sem reforço, devido ao poder que os cabelos possuem para suportar o esforço resultante da compressão a que o bloco fica sujeito e ainda por providenciar um maior poder de agregação às partículas do solo. Assim, conseguimos eliminar um resíduo que não possui deposição final e representa uma medida ecologicamente correta e contribui para o desenvolvimento sustentável, aproveitando a potencialidade destes resíduos para servirem de recurso para outro propósito.

Relativamente à deformação, a mistura dos cabelos com o solo apresentou valores superiores de deformação do que sem a presença deste reforço. Contudo é necessário tomar em atenção que, para os valores de deformação obtidos, o valor de resistência associado é consideravelmente superior no caso do solo com reforço, ou seja, para uma deformação maior está associada uma carga também maior. Constatou-se que o solo no seu teor ótimo tem uma deformação muito mais visível quando os cabelos estão incluídos no bloco, em que acontece um efeito balão e o bloco fica de certa forma achatado e se expande nas laterais, ultrapassando os limites do próprio molde onde foi fabricado. Apesar de a deformação não ser uma coisa boa, porque as pessoas podem não se sentir seguras, pode ser considerado uma mais-valia porque deteta os problemas estruturais de uma obra/edifício/parede e assim proceder-se à implementação de medidas para evitar acidentes e para a devida recuperação, se possível.

Por último, durante os ensaios percebeu-se que era difícil a separação dos cabelos do solo, assim que já tivessem sido ensaiados os blocos. Inicialmente levou-se solo com cabelo à estufa, mas mesmo a uma temperatura bastante elevada, dificilmente se conseguia remover o cabelo, sendo que se estaria a retirar apenas alguma água remanescente do solo. Neste sentido, prosseguiu-se os ensaios utilizando apenas o cabelo e ver até que temperaturas o cabelo não perde as suas

propriedades de reforço. Verificou-se que aos 240° se evidenciou um cheiro como se o cabelo se estivesse a incendiar e concluiu-se, através do auxílio de um estudo já realizado, que entre as temperatura de 240° C e até a um máximo de 350° C, este seria o limite a que se poderia levar o cabelo na estufa. Deste modo, se o cabelo aguenta mais ou menos até estas temperaturas, sem colocar em risco as suas propriedades, então o solo com cabelo pode ir à estufa até esse limite e assim pode ser reaproveitado para outros ensaios que utilizem este tipo de solo e reforço.

Tendo em conta toda esta análise dos resultados, a construção em terra tem de ser vista como alternativa à construção corrente, seja do ponto de vista ambiental ou económico, porque permite reduzir custos de construção e minimiza os impactes ambientais associados ao setor de construção.

## 6.2 Trabalhos Futuros

O presente estudo constitui um trabalho quase pioneiro nesta área, devido a inexistência de alguma informação. Contudo, durante a realização deste trabalho levantaram-se algumas dúvidas. No sentido de dar continuidade a este trabalho e tendo em conta tudo o que já foi estudado, alguns dos trabalhos que se podem realizar futuramente são:

- ✓ Fazer os mesmos ensaios, mas agora para outros tipos de solo, de forma a comparar os solos entre si;
- ✓ Inclusão de outras fibras, de origem natural, que sejam abundantes em países com menor poder económico, tal como o cisal, que é particularmente abundante em África;
- ✓ Verificar a velocidade de secagem, para diferentes condições de secagem (temperaturas mais altas/mais baixas e maior/menor grau de humidade ambiente) e qual a sua influência em termos de resistência e deformação;
- ✓ Averiguar a dispersão dos cabelos quando se procede à compactação e razão pela qual, com a energia de compactação, migram para as laterais;
- ✓ Avaliar os pontos de rotura dos fios de cabelo, para diferentes tipos de cabelo;
- ✓ Construir uma estrutura que possibilite e facilite o transporte deste tipo de blocos, devido ao seu peso e tamanho, e qual a melhor forma de os transportar para que isso não afete os resultados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEGRIA, José A. (2000) – “José Alegria: da paixão..., da terra..., da arquitectura...”, Edição Darquiterra – Arquitectura e Construção, Albufeira, Portugal.

Arquitectura de terra, [aventar.eu/2012/03/23/arquitectura-da-terra/](http://aventar.eu/2012/03/23/arquitectura-da-terra/). (acedido em Março, 2015).

ARUNDEL, A.; STERLING, E.; BIGGIN, J.; STERLING, T. (1986) – “Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments”. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 65, pp.351-361.

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

Bestraten, S., Hormías, E., Altemir, A. (2011). “Construcción con tierra en el siglo XXI”. *Informes de la Construcción*, Vol. 63, Issue 523, pp. 5-20.

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

DETHIER, Jean. (1982) “Le Génie de la Terre” in “Des Architectures de Terre”. Centre Georges Pompidou, Paris.

Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., Vitoux, F. (1985). “Building with earth”. The mud village society, CraTerre, França.

Duarte, S. R.. (2013). “Construir com a Terra - Uma proposta de intervenção no bairro do Barruncho, Odivelas”. Faculdade de Arquitectura, 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.

Fernandes, M. (2007). “Património da Terra: Universidade das Técnicas”. 6º Curso de Mestrado em Reabilitação de Arquitectura e Núcleos Urbanos, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.



Ferreira, C. C. (2012). “A sustentabilidade do sistema construtivo em terra: um projeto de reabilitação”. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

González, F. (2006). “Geometrias da Arquitetura de Terra, A Sustentabilidade Geométrica das Construções em Terra Crua”. Universidade Lusíada Editora, Lisboa.

Guillaud, H., Houben, H. (1989). “Traité de Construction en Terre”. Editora Parenthèses, Marseille.

Hall M. R., Lindsay R, Krayenhoff M. (2012). “Modern earth buildings: materials, engineering, construction and applications”. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.

Jalali, S., Eires, R. (2008). “Inovações Científicas da construção em Terra Crua”. Conferência Internacional – Angola: Ensino, Investigação e Desenvolvimento (EIDAO 08), Braga, Portugal.

Jorge, F., Fernandes, M., Correia, M. (2005). “Arquitetura de Terra em Portugal”. Argumentum, Lisboa, Portugal.

Ferreira, V. M., Bragança, L., Dias, A. B., Afonso, A. S., Brito, J. (2011). ”Inovações na construção sustentável”. Cincos’ 2012 – Conferência de inovação na construção sustentável, Portugal.

LiderA – Sistema de Avaliação Sustentável (página oficial). <http://www.lidera.info/Portugal> (Acedido em Março 2015).

Lourenço, P (2002). “Construções em terra, os materiais naturais como contributo à sustentabilidade na construção”. Tese de Mestrado em Construção, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal.

Lourenço, P. (2005). “Construção em Terra – Viabilidade Económica”. *Arquitetura de Terra em Portugal*, Argumentum, pp. 198 – 201.

Lourenço, P., Brito, J., Branco, F. (2002). “Novas Tecnologias de Aplicação de Terra Crua na Construção”. *Companhia de Arquitectura e Design*, Portugal.

Maniatidis V, Walker P. (2003). “A review of rammed earth construction”. University of Bath.

Mateus, R., (2004). “Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.

- 
- Minke, G. (2006). “Building with earth, design and technology of a sustainable architecture”. Birkhauser – Publishers of Architecture, Basel-Berlin-Boston.
- Moreia, A. M. (2008). “Materiais de construção I – Terra Crua”. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Tecnologia de Tomar, Portugal.
- Morton, T., Stevenson, F., Taylor, B., Smith, C. (2005). “Low Cost Earth Brick Construction: monitoring and evaluation. Arc. Architects.
- Murta, A., Teixeira, C., Varum, H., Bentes, I., Pinto, J. (2009). “Avaliação do impacto ambiental de duas soluções estruturais diferentes associado à construção de uma habitação unifamiliar”. 5.<sup>a</sup> Conferência de Engenharia "Engenharia' 2009 - Inovação e Desenvolvimento", Covilhã, Portugal.
- Mustafá, L., Rocha, K., Silva, R., Gonzaga, L., Costa, H. (2011). “Influência da temperatura da chapinha na fibra capilar”. Departamento de Engenharia de Produção, Faculdade de Pitágoras, São Luís, Brasil.
- NP – 84:1965. “Determinação do teor em água”. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, Portugal.
- Oliveira, D., Silva, R. (2012). “Construir em Terra ainda faz sentido?”. Construção Magazine, Revista Técnico-Científica Engenharia Civil, nº 48, pp. 40-41, Portugal.
- Pinheiro, M. D. (2006). “Ambiente e construção sustentável”. Instituto do Ambiente, Amadora, Portugal.
- Torgal F., Jalali, S. (2011). “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.
- Torgal, F., Jalali, S. (2009). “Construção sustentável – o caso dos materiais de construção”. IPCB, Universidade do Minho, Portugal.
- SALASAR, C. (2007) – “Estudo sobre Emissão de Compostos Orgânicos Voláteis COVS em Tintas Imobiliárias á Base de Solvente e Água”. Dissertação de Mestrado em Química, Universidade Estadual de Londrina, Brasil.
-

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.

UNEP. (2006) – Página oficial: [search/sustainable buildings and construction programme/](#). (Acedido em Abril, 2015).