Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rute Maria Gonçalves Eires

Construção em Terra: Desempenho melhorado com incorporação de biopolímeros

janeiro de 2012

Construção em Terra: Desempenho melhorado com incorporação de biopolímeros
Rute Maria Gonçalves Eires
UMinho | 2012

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rute Maria Gonçalves Eires

Construção em Terra: Desempenho melhorado com incorporação de biopolímeros

Tese de Doutoramento
Engenharia Civil – Materiais de Construção

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Aires Fernando F. L. Camões de Azevedo

e co-orientação do
Professor Doutor Said Jalali

janeiro de 2012

"Earth is Alchemy"

Ibn Yamin, poeta Sufi

Agradecimentos

Ao meu orientador, Aires Camões, e ao coorientador, Said Jalali, pelas suas preciosas ajudas na orientação da presente tese, desde a escolha da área de estudo e tema da tese, até à resolução e conclusão da mesma.

A todos os técnicos do Laboratório de Engenharia Civil que, de algum modo, me ajudaram na realização das amostras ou ensaios, em especial, os técnicos das áreas de materiais, geotecnia e hidráulica.

E, por último, mas certamente com a maior importância…

Com Amor,

Ao meu companheiro César Cardoso que, mais do que ninguém, me apoiou sempre e me deu força para continuar, tendo sido preciosa a sua ajuda em todos os momentos.

À minha família, que sempre me apoiou em tudo. Especialmente, aos meus pais, um imenso obrigada pela dedicação e preocupação constantes.

Resumo

Uma boa parte do património histórico do país e do mundo ainda é constituída por edificações em terra crua. As novas construções em terra, bem como a reabilitação e conservação do património existente, necessitam de conhecimentos científicos que permitam obter uma maior durabilidade. Esta durabilidade é condicionada particularmente pela erosão causada com ação da água, sobretudo em países com elevado índice de pluviosidade.

Analisando as antigas técnicas de construção, que possibilitam proteger a terra da ação da água, é possível perceber como diversos edifícios que utilizaram terra na sua construção se conservaram, durante vários séculos, resistindo às intempéries. Entre estas técnicas, encontram-se sobretudo a incorporação de biopolímeros (como óleos ou gorduras, de origem animal ou vegetal), a adição de alguns minerais e a estabilização com cal viva. Todavia, este conhecimento parece ter ficado esquecido, provavelmente pelo preconceito existente em relação à construção em terra, sendo muitas vezes associada a uma construção pobre.

Como tal, esta investigação tem por objetivo o estudo de processos de estabilização de solos com cal viva e incorporação de biopolímeros e aditivos minerais para construção em terra compactada (taipa ou bloco de terra compactado) sem revestimento adicional. Obtendo-se, assim, soluções alternativas com desempenho melhorado em termos de resistências, especialmente quando em contacto com a água, e um elevado desempenho na redução da permeabilidade à água, mantendo a permeabilidade ao vapor de água do material (uma das principais vantagens da construção em terra).

Os resultados obtidos revelam que, com uma estabilização e aditivos adequados, é possível obter-se uma construção em terra com maior durabilidade face às ações da água, uma vez que se verificaram reduções significativas na absorção de água, maiores resistências do solo no estado saturado e maior resistência à ação erosiva da chuva. Este incremento de durabilidade da construção em terra poderá contribuir para alterar a percepção desajustada e preconceituosa ainda existente sobre o material terra.

Building with earth: improved performance with biopolymers incorporation

Abstract

Quite a big part of the country and world's heritage is still made by unfired earth constructions. The new earth buildings, as well the conservation of the existent heritage, need scientific knowledge to allow higher durability. This durability is particularly conditioned by erosion caused by water action, especially in countries with high rainfall index.

Analysing the old building techniques, that allow a protection from the water action on the earth material, it is possible to understand how many earth buildings were preserved, during several centuries, resisting to harsh weather conditions. Among these techniques there are especially the incorporation of biopolymers (such as oils or fats, of animal or vegetable origin), the addition of some minerals and stabilization with lime. However, this knowledge seems to have been forgotten, probably due to the existing prejudice concerning earth building which is often associated with a poor construction.

Thus, the aim of this research is to study the processes of soil stabilization with quicklime and incorporation of biopolymers and mineral additives for construction with compressed earth (rammed earth or compressed earth block) without additional coating. This way, it is possible to obtain alternative solutions with improved performance in terms of resistance, especially when in contact with water, and a high performance by reducing the water permeability, keeping the water vapour permeability of the material (one of the main advantages of earth construction).

The results obtained show that, with the incorporation of stabilizing agents and appropriate additives, it is possible to obtain an earth construction with greater durability against water actions, once one has verified significant reductions in water absorption, increased soil resistances in saturated state and higher resistance to erosive rain action. This increase of earth building durability could help to change the inappropriate and prejudiced perception still existing about the earth material.

Índice

1. Introdução
1.1. Enquadramento…….. 3
1.2. Objetivos e metodologia…… 3
1.3. Estado da arte…… 4
1.4. Investigação…… 4
1.5. Organização do texto ……... 5
2. Terra como material de construção
2.1. Introdução…… 9
2.2. A construção em terra como betão natural…… 9
2.3. Inovação da construção em terra desde os anos 50 até à atualidade…….. 14
2.3.1. A invenção do bloco de terra compactado, BTC……... 14
2.3.2. Inovações no adobe ou adobo……. 15
2.3.3. Terra moldada……. 16
2.3.4. Terra projetada…… 16
2.3.5. Terra extrudida…… 17
2.3.6. Terra em sacos……... 17
2.3.7. Terra em placas…….. 17
2.3.8. Inovações da construção em taipa…….. 18
2.3.9. Estudos científicos do material terra e desenvolvimento de normas e guias de construção…… 19
2.4. Sustentabilidade, ecologia e bioconstrução…….. 23
2.5. Impacte ambiental da terra e outros materiais de construção…… 24
2.5.1. Consumo energético e emissões CO_2…… 24
2.5.1.1. Cal aérea…… 24
2.5.1.2. Produção de cal e tijolos cerâmicos em pequenas e médias empresas……. 25
2.5.1.3. Produção de cal em processo industrial……... 26
2.5.1.4. Cimento…….. 26
2.5.1.5. Aço…….. 27
2.5.1.6. Areias e britas…… 28
2.5.1.7. Construção em terra…… 28
2.5.2. Produção de resíduos…… 30
2.5.3. Benefícios para a saúde…… 30
2.5.4. Comportamento higrotérmico da construção em terra…… 31
2.5.5. Comportamento acústico…… 32
2.5.6. Ausência de libertação de compostos orgânicos voláteis…….. 34
2.5.7. Proteção face a campos eletromagnéticos artificiais e permeância aos naturais……... 35
2.5.8. Menor radioatividade face a alguns materiais de construção……. 37
3. Durabilidade geral e durabilidade face à ação da água
3.1. Introdução…….. 43
3.2. Durabilidade…… 43
3.2.1. Fatores inerentes ao material, sistema construtivo e arquitetura……... 43
3.2.2. Fatores externos à construção……. 44
3.3. Mecanismos da ação da água …… 45
3.4. Fatores que afetam a durabilidade face à água…… 47
3.4.1. Influência da distribuição granulométrica …….. 47
3.4.2. Influência do tipo de argila na repelência/absorção da água…….…… 48
3.4.3. Influência do tipo de estabilizante …….. 49
3.4.3.1. Cimento…… 49
3.4.3.2. Cal hidratada…….. 49
3.4.3.3. Cimento / Cal hidratada……... 50
3.4.3.4. Cal viva…… 50

3.4.3.5. Cal hidráulica……..…….. 50
3.4.3.6. Pozolanas……... 50
3.4.3.7. Gesso…….. 51
3.4.4. Influência da incorporação de aditivos……..…… 51
3.4.5. Influência do pH …… 51
3.4.6. Influência da compactação e densidade obtida……..……. 52
3.4.7. Influência do tipo de superfície …… 52
3.4.8. Influência da arquitetura e do processo construtivo……. 53
4. Métodos naturais de proteção face à ação da água
4.1. Introdução…… 57
4.2. Pormenorização da arquitetura e processo construtivo…….. 57
4.2.1. Fundações e embasamentos…….. 57
4.2.2. Paredes e cunhais ……. 58
4.2.3. Revestimento de fachadas …….. 58
4.2.4. Vãos de portas e janelas……... 59
4.2.5. Coberturas e beirados…… 60
4.2.6. Ligação entre diferentes materiais…….. 60
4.2.7. Água no interior dos edifícios……... 60
4.3. Rebocos, barramentos e pinturas como camadas de sacrifício……. 61
4.3.1. Rebocos……... 61
4.3.2. Barramentos de acabamento liso ou polido……... 62
4.3.2.1. “Tadelakt” ……. 64
4.3.2.2. “Qudad” ……. 64
4.3.3. Pinturas ……... 67
4.4. Estabilização com cal e pozolanas……. 68
4.4.1. “Sarooj” ……..……. 69
4.4.2. Reação pozolânica obtida pelas argilas do solo na presença de cal……..….. 70
4.5. Estabilização com biopolímeros naturais……... 71
4.5.1. Efeito dos biopolímeros na construção em terra……... 73
4.5.2. Técnicas antigas de utilização de biopolímeros ……..…… 73
4.5.2.1. Cal hidratada juntamente com óleos ou gorduras…… 78
4.5.2.2. Cal hidratada com outros aditivos ……. 78
4.5.2.3. Utilização de outros biopolímeros na construção em terra……. 80
4.5.3. Estudos recentes de estabilização com biopolímeros …… 83
4.6. Estabilização com aditivos minerais……... 83
4.6.1. Efeito de alguns aditivos minerais nos solos……. 83
4.6.1.1. Cloreto de sódio……. 84
4.6.1.2. Hidróxido de sódio …… 84
4.6.1.3. Outros minerais ……. 85
4.6.2. Utilização de aditivos minerais em construção à base de terra…….. 85
4.6.2.1. Cloreto de sódio……. 86
4.6.2.2. Hidróxido de sódio……. 86
4.6.2.3. Alúmen…… 87
4.6.2.4. Silicato de sódio……. 88
4.6.2.5. Borato de sódio ……..…….. 88
5. Caraterização dos materiais utilizados
5.1. Introdução…… 91
5.2. Solo de referência preparado em laboratório……..…….. 91
5.2.1. Areia…….. 93
5.2.2. Caulino……. 93
5.2.3. Água ……. 93
5.3. Solo autêntico recolhido…… 94

5.4. Biopolímeros……. 101
5.4.1. Biopolímeros em forma sólida …… 101
5.4.1.1. Amido de milho e amido de trigo (farinha)…… 101
5.4.1.2. Açúcar…….. 102
5.4.2. Biopolímeros em forma líquida……..…….. 103
5.4.2.1. Óleo de linhaça…….... 103
5.4.2.2. Óleo vegetal usado ……..... 104
5.4.2.3. Glicerol……..…. 104
5.4.2.4. Caseína……... 105
5.4.2.5. Água de celulose e água de palha……..…….. 105
5.5. Aditivos minerais…… 107
5.5.1. Aditivos ligantes…….. 107
5.5.1.1. Hidróxido de sódio……. 107
5.5.1.2. Silicato de sódio……. 107
5.5.1.3. Alúmen …….. 107
5.5.2. Aditivos religantes …… 108
5.5.2.1. Cloreto de sódio……. 108
5.5.2.2. Cloreto de cálcio…… 108
5.5.2.3. Borato de sódio…….. 108
5.6. Estabilizantes……..... 109
5.6.1. Cal viva …… 110
5.6.2. Cal hidratada …….. 111
5.6.3. Cimento…… 111
6. Metodologias, normas utilizadas e referências de estudo
6.1. Introdução……..…… 115
6.2. Processos de mistura…… 115
6.2.1. Composições de solo preparado em laboratório …… 115
6.2.2. Composições de solo real …… 117
6.3. Produção e cura de provetes……... 117
6.3.1. Provetes cilíndricos de solo sem estabilizante, com e sem adição de biopolímeros……..... 117
6.3.2. Provetes cilíndricos de solo com estabilizante, com e sem adição de biopolímeros…….. 117
6.3.3. Provetes cilíndricos de solo real ……..…….. 118
6.3.4. Provetes cilíndricos Ø 150x300 mm^3 de solo real …….. 119
6.3.5. Provetes cúbicos de solo preparado em laboratório e de solo real …….. 119
6.4. Métodos e normas de ensaio …… 120
6.4.1. Compressão uniaxial simples ……..... 120
6.4.2. Absorção de água por capilaridade……. 120
6.4.3. Absorção de água por imersão…… 121
6.4.4. Ciclos de molhagem e secagem……..…… 122
6.4.5. Absorção de gota de água …….. 123
6.4.6. Erosão acelerada por jato de água - Simulação de chuva…….. 123
6.4.7. Microscopia …… 126
6.4.7.1. Microscopia eletrónica de varrimento, MEV …… 126
6.4.7.2. Microscopia ótica …… 127
6.4.8. Permeabilidade ao vapor de água…….. 127
6.4.9. Proliferação de fungos…….. 130
6.5. Referências de estudo……... 133
6.5.1. Resistência à compressão …….. 133
6.5.2. Absorção de água por capilaridade……. 135
6.5.3. Absorção de água por imersão…… 135

6.5.4. Molhagem/secagem…… 136
6.5.5. Erosão acelerada por jacto de água …… 136
6.5.6. Permeabilidade ao vapor de água…… 136
6.5.7. Microscopia eletrónica de varrimento…… 137

7. Composições estudadas e respetivos ensaios realizados

7.1. Introdução…… 141
7.2. Composições com biopolímeros…… 141
7.2.1. Biopolímeros em forma sólida …… 141
7.2.2. Biopolímeros em forma líquida…… 142
7.3. Composições com biopolímeros e aditivos minerais…… 143
7.3.1. Composições com aditivos ligantes e religantes…… 143
7.4. Composições de solo estabilizado com cal viva e outros estabilizantes…… 144
7.5. Composições de biopolímeros e aditivos minerais em solo estabilizado…… 146
7.6. Composições de biopolímeros em solo estabilizado real…… 146
7.7. Ensaios realizados…… 147

8. Efeito da incorporação de biopolímeros e aditivos minerais no solo - Apresentação e análise de resultados

8.1. Introdução…… 151
8.2. Efeito da incorporação de biopolímeros…… 151
8.2.1. Ensaios de resistência à compressão…… 151
8.2.1.1. Biopolímeros de consistência sólida…… 151
8.2.1.2. Biopolímeros de consistência líquida …… 154
8.2.2. Ensaios de absorção de água por capilaridade …… 155
8.2.2.1. Biopolímeros de consistência sólida…… 156
8.2.2.2. Biopolímeros de consistência líquida…… 157
8.2.2.3. Comparação de todos os biopolímeros…… 159
8.3. Efeito da incorporação de aditivos minerais ligantes e religantes…… 161
8.3.1. Ensaios de resistência à compressão…… 161
8.3.1.1. Aditivos minerais ligantes …… 161
8.3.1.2. Biopolímeros com aditivo mineral ligante…… 163
8.3.1.3. Aditivos minerais religantes…… 165
8.3.2. Ensaios de absorção de água por capilaridade …… 166
8.3.2.1. Aditivos minerais ligantes …… 166
8.3.2.2. Biopolímeros com aditivo mineral ligante…… 169
8.3.2.3. Aditivos minerais religantes…… 172
8.4. Comparação e selecção de composições…… 175

9. Efeito da estabilização de solo com cal ou cimento - Apresentação e análise de resultados

9.1. Introdução…… 181
9.2. Ensaios de resistência à compressão…… 181
9.3. Ensaios de absorção de água por capilaridade …… 184
9.4. Ensaios de absorção de água por imersão…… 188
9.5. Comparação de composições…… 189

10. Efeito da incorporação de biopolímero e aditivo mineral em solo estabilizado - Apresentação e análise de resultados

10.1. Introdução…… 192
10.2. Ensaios de resistência à compressão…… 192
10.3. Ensaios de absorção de água por capilaridade …… 194
10.4. Ensaios de absorção de água por imersão…… 197
10.5. Ensaios de durabilidade - ciclos de molhagem e secagem…… 198
10.6. Ensaios de erosão acelerada por jato de água para simulação de chuva…… 202

10.7. Comparação de composições…… 207
11. Efeito das composições selecionadas em solo real – Apresentação e análise de resultados
11.1. Introdução…… 213
11.2. Ensaios de resistência à compressão…… 213
11.2.1. Comparação com os resultados de solo preparado em laboratório …… 215
11.2.2. Comparação com valores de referência e resultados de outros autores …… 215
11.3. Ensaios de absorção de água por capilaridade…… 217
11.3.1. Comparação com os resultados de solo preparado em laboratório …… 219
11.3.2. Comparação com valores de referência e resultados de outros autores …… 220
11.4. Ensaios de absorção de gota de água…… 221
11.5. Ensaios de erosão acelerada por jato de água …… 222
11.5.1. Comparação com os resultados de solo preparado em laboratório …… 226
11.5.2. Comparação resultados de outros autores …… 227
11.6. Ensaio de permeabilidade ao vapor de água…… 227
11.6.1. Comparação com valores de referência e resultados de outros autores …… 229
11.7. Comparação de composições…… 230
12. Estudo de proliferação de fungos
12.1. Introdução…… 233
12.2. Crescimento de fungos - fatores de influência e observação a olho nu…… 233
12.3. Aparecimento de fungos durante os ensaios de absorção por capilaridade…… 234
12.4. Provetes em ambiente interior e provetes expostos ao sol…… 236
12.5. Provetes em ambiente propício ao aparecimento de fungos – Teste de proliferação de fungos normalizado…… 236
12.6. Verificação da existência de fungos por microscopia eletrónica…… 238
13. Estudo de microscopia eletrónica e ótica
13.1. Introdução…… 243
13.2. Estudo das composições de solo preparado em laboratório…… 243
13.3. Estudo das composições de solo real…… 247
14. Conclusões
14.1. Conclusões sobre a parte experimental…… 258
14.2. Conclusões gerais…… 259
Recomendações para trabalhos futuros…… 261
Referências bibliográficas…… 262

Índice de figuras

Cap.2
Figura 1 – Pontes de água e argila no solo (adatado de Jaquin, 2008)……. 11
Cap.3
Figura 2 – Diferença nas ligações de argila em solos com diferente distribuição granulométrica (Hall & Djerbib, 2005)…….. 48
Figura 3 – Concentração de humidade em parede sem e com impermeabilizante…….. 53
Cap.4
Figura 4 – a - Sistema de irrigação de pedra e *qudad* (parte cortada); b - parede com camada de *qudad* de 20cm (parte cortada) (Weiss & Gerlach, 2009)…… 65
Figura 5 – chão e parede decorativa em *qudad*, Iémen (Yavuz, 2004)…….. 66
Figura 6 – Placas de argila: a - disposição face com face; b - face com borda e c – polaridade placas de caulinite (a e b - Hamer & Hamer, 1975; c – Murray, 2007)…… 72
Figura 7 – Ruinas da fortaleza de Hormuz…….. 75
Figura 8 – Local de preparação do "*banco*" (a) e aplicação do mesmo (b)…… 80
Figura 9 – Argamassa de cal com pó de tijolo: sem e com óleo (a e b respetivamente)…. 83
Cap.5
Figura 10 – Caulino sobre areia (esquerda) e solo preparado (direita)…….. 91
Figura 11 – Curvas teóricas de distribuição granulométrica para construção em taipa…. 92
Figura 12 – Curvas granulométricas da areia e do solo preparado (Areia/Caulino)……. 92
Figura 13 – Solo argiloso (esquerda) e solo arenoso (direita) …….. 94
Figura 14 – Solo de referência, REF…….. 95
Figura 15 – Curvas granulométricas dos solos analisados e do solo de referência……. 95
Figura 16 – Análise de limites de liquidez (esquerda) e de plasticidade (direita – solo argiloso e arenoso respetivamente) …….. 95
Figura 17 – Sedimentação simples (valores em mm), Carboni, 2001……. 96
Figura 18 – Sedimentação simples: a - S_arenoso, b - S_REF e c - S_Argiloso…… 96
Figura 19 – "teste do charuto": a - Solo arenoso e solo argiloso e b - solo de referência.. 98
Figura 20 – "teste da bolacha", retração: a - Solo arenoso; b - solo argiloso e c - solo de referência…….. 99
Figura 21 – "teste da bolacha", retração: respetivamente solo arenoso; solo argiloso e solo de referência…….. 99
Figura 22 – Procedimento do teste de "Emerson" (Houben & Guillaud, 1989) …… 99
Figura 23 – Macromolécula de amido com n moléculas de glicose (Almeida, 2007)…….. 102
Figura 24 – Molécula de amilose e molécula de amilopectina (Almeida, 2007)…… 103
Figura 25 – Molécula de sacarose (wikipédia) …….. 102
Figura 26 – Moléculas de: a - ácido linoleico e b - ácido linolénico (Čechová) …… 103
Figura 27 – Molécula de glicerol (Arruda, 2007) …….. 105
Figura 28 – Molécula de celulose (Wikipédia, 2011). …….. 106
Figura 29 – Soluções aquosas com celulose e respetivos materiais celulósicos de origem…….. 106
Cap.6
Figura 30 – Solo preparado em laboratório sem e com biopolímeros (a e b respetivamente) …….. 115
Figura 31 – Solo com cal viva 24h antes, solo de laboratório e solo real (a e b respetivamente) …….. 116
Figura 32 – Hidratação de cal com óleo, diversas fazes (a, b e c respetivamente)…… 116
Figura 33 – Temperatura e humidade verificadas durante a hidratação de cal juntamente com o solo…….. 116
Figura 34 – Prensa manual (a) e respetivos provetes (b) …….. 117
Figura 35 – Molde em prensa hidráulica mecânica (a) e respetivos provetes (b) …… 118

Figura 36 – Moldadem (a) e provetes cúbicos de solo preparado em laboratório (b) e solo real (c) …… 119
Figura 37 – Prensa hidráulica utilizada e provetes antes e após a rotura ……. 120
Figura 38 – Esquema de ensaio de absorção de água por capilaridade…… 121
Figura 39 – Provetes de solo real durante ensaio de absorção de água por capilaridade.. 121
Figura 40 – Esquema de ensaio (a) e provetes de solo de laboratório…….. 122
Figura 41 – Jato de água (a) e provete após ensaio (b) (Bulletin 5) e bico de pulverização de cone completo, VeeJet Nozzle, (Heathcote 2002) ……... 123
Figura 42 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água …….. 126
Figura 43 – Temperatura e humidade ambiente da solução de nitrato de potássio isolada……... 128
Figura 44 – Esquema da cápsula de teste e cápsulas de teste durante o ensaio…… 128
Figura 45 – Temperatura e humidade ambiente – caixa 1…… 129
Figura 46 – Temperatura e humidade ambiente - caixa 2…….. 129
Figura 47 – Solo orgânico com fungos…… 132
Figura 48 – Caixa com ambiente controlado (a) e provetes durante o ensaio de fungos (b) ……... 132
Figura 49 – Temperatura e humidade ambiente durante ensaio de fungos…….. 133
Figura 50 – Imagens de microscopia de solos com caulinite (a, b e c) ……. 137
Figura 55 – Imagem de microscopia (a - OMNI Laboratories, Inc, 2010) …….. 138
Figura 56 – Imagens de microscopia de solos com ilite (a, b e c) …… 138
Cap.8
Figura 57 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma sólida…… 152
Figura 58 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma sólida (14 e 180 dias) – estado saturado…… 153
Figura 59 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma líquida (14 e 180 dias) – estado seco…… 154
Figura 60 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma líquida (14 e 180 dias) – estado saturado…… 155
Figura 61 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma sólida – Absorção (14 dias) …… 156
Figura 62 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma sólida – Absorção (180 dias) …… 157
Figura 63 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma líquida – Absorção (14 dias) …… 158
Figura 64 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma líquida…….. 158
Figura 65 – Coeficiente de absorção capilar do solo com e sem biopolímeros – aos 14 e 180 dias…… 160
Figura 66 - Solo de referência e solo com aditivos minerais ligantes (14 e 180 dias) – estado seco…… 161
Figura 67 - Solo de referência e solo com aditivos minerais ligantes (14 e 180 dias) - estado saturado…… 162
Figura 68 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros e hidróxido de sódio (14 e 180 dias) – estado seco…… 164
Figura 69 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros e hidróxido de sódio (14 e 180 dias) – estado saturado…… 164
Figura 70 - Solo de referência e solo com aditivos minerais religantes (14 e 180 dias) – estado seco…… 165
Figura 71 - Solo de referência e solo com aditivos minerais religantes (14 e 180 dias) - estado saturado…… 165
Figura 72 - Solo de referência e solo com aditivos minerais ligantes – Absorção (14 dias) 167
Figura 73 - Solo de referência e solo com aditivos minerais ligantes – Absorção (180

dias) ……..……..……..……..……. 167
Figura 74 - Coeficiente de absorção capilar do solo com aditivos minerais ligantes – aos 14 e 180 dias……..……..……..…….. 168
Figura 75 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros em forma sólida e hidróxido de sódio – Absorção (14 dias) ……..…….. 169
Figura 76 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros em forma sólida e hidróxido de sódio – Absorção (180 dias)……..…….. 170
Figura 77 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros em forma líquida e hidróxido de sódio – Absorção (14 dias) ……..……. 170
Figura 78 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros em forma líquida e hidróxido de sódio – Absorção (180 dias) ……..…… 171
Figura 79 - Coeficiente de absorção capilar do solo com biopolímeros com e sem hidróxido de sódio – aos 14 e 180 dias……..……..…… 172
Figura 80 - Solo de referência e solo com aditivos minerais religantes – Absorção (14 dias) ……..……..……..……..……. 173
Figura 81 - Solo de referência e solo com aditivos minerais religantes – Absorção (180 dias) ……..……..……..……..……. 173
Figura 82 - Coeficiente de absorção capilar do solo com aditivos minerais religantes – aos 14 e 180 dias……..……..……..…….. 174
Figura 83 - Valores de absorção por capilaridade Kg/m2 (180 dias) ……. 176
Figura 84 - Valores de resistência à compressão (180 dias)…….. 176
Cap.9
Figura 85 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva (7, 14, 28, 56 e 180 dias) - estado seco…… 181
Figura 86 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva, cal hidratada ou cimento (7, 14, 28, 56 e 180 dias) - estado seco ……. 183
Figura 87 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva, cal hidratada ou cimento (56 dias) - estado saturado após imersão…… 183
Figura 88 – Solo de referência e solo estabilizado com cal viva a 2, 4 e 6 % - Absorção por capilaridade (28 dias)…….. 185
Figura 89 - Solo estabilizado com cal viva a 2, 4 e 6 % - Absorção por capilaridade (180dias)…… 185
Figura 90 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva, cal hidratada e cimento – Absorção por capilaridade (28 dias)…… 186
Figura 91 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva, cal hidratada e cimento – Absorção por capilaridade (180 dias)…….. 186
Figura 92 - Coeficiente de absorção capilar do solo com e sem estabilizantes – aos 28 e 180 dias …… 187
Figura 93 - Absorção de água por imersão do solo com cal viva, cal hidratada ou cimento – aos 14 e 56 dias …… 188
Figura 94 - Solo estabilizado com cal viva, cal hidratada ou cimento – perda de massa durante o ensaio de imersão …… 189
Cap.10
Figura 95 - Solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio (7, 14, 28, 56 e 180 dias) – estado seco……..……..……..…….. 192
Figura 96 - Solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio (56 dias) – estado saturado……..……..……..……. 193
Figura 97 - Solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio (28 dias) – absorção por capilaridade……..……..…….. 195
Figura 98 - Solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio (180 dias) – absorção por capilaridade……..……..……. 195
Figura 99 – Provetes durante ensaio de absorção de água por capilaridade (antes da

pesagem) ……..……..……..……..…… 196
Figura 100 – Coeficiente de absorção capilar de solo estabilizado com cal viva.…… 196
Figura 101 - Absorção de água por imersão de solo estabilizado com cal viva…… 197
Figura 102 – Perda de massa de solo estabilizado com diferentes composições…… 199
Figura 103 – Comparação de solo estabilizado antes e após ciclos de molhagem/secagem – absorção por capilaridade……..…… 200
Figura 104 – Comparação de solo estabilizado antes e após ciclos de molhagem/secagem – Coeficiente de absorção capilar……..…… 201
Figura 105 – Comparação de solo estabilizado antes e após ciclos de molhagem/secagem – absorção por imersão……..……... 201
Figura 106 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água……..……... 202
Figura 107 – Solo estabilizado com diferentes composições (56 dias) – erosão acelerada por jato de água durante 90 minutos……..…… 205
Figura 108 – Valores de absorção por capilaridade Kg/m2 (180 dias) …….. 208
Cap.11
Figura 109 – Resistência à compressão de solo real, sem e com estabilizantes……. 214
Figura 110 – provetes durante o ensaio de absorção de água por capilaridade: a – 1h e b –24h…… 217
Figura 111 – Absorção de água por capilaridade de solo real de solo real,……. 218
Figura 112 – Coeficiente de absorção capilar e absorção máxima de solo real, sem e com estabilizantes (aos 56 dias)…… 219
Figura 113 – Coeficiente de absorção capilar – comparação com outros materiais dos resultados obtidos em solo real…… 220
Figura 114 – Solo real estabilizado com diferentes composições (56 dias) – erosão acelerada por jato de água durante 90 minutos……. 226
Figura 115 – Permeabilidade ao vapor de água e respetivos valores de Sd……. 228
Figura 116 – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água – vários materiais de construção e composições testadas……. 229
Cap.12
Figura 117 – Provetes com fungos durante ensaio de capilaridade (composição OL)…… 235
Figura 118 – Provetes com fungos durante ensaio de capilaridade (composições CH e CV/OVU) ……..……..……..……..…… 235
Figura 119 – Provetes com fungos durante ensaio de capilaridade em solo real (CV_O.V.U_NaOH) ……..……..……..…….. 235
Figura 120– provetes expostos ao sol após dois meses de exposição…….. 236
Figura 121 – Provetes após o teste de fungos……..……..…….. 237
Figura 122 – Provetes após teste de proliferação de fungos: a – REF; b – CH; e c – Ci. 237
Figura 123 – Provetes após teste de proliferação de fungos: a – CV; b – CV_O.V.U; e c – CV_NaOH……..……..……..…… 237
Figura 124 – Provete após teste de proliferação de fungos - CV_OVU_NaOH…… 237
Figura 125 – Imagens de microscopia eletrónica a 2000x: a – REF; b – CH; c – Ci; d - CV; e – CV_O.V.U; e f – CV_NaOH……..……..……. 238
Figura 126 – Imagem de microscopia eletrónica a 2000x - CV_OVU_NaOH…… 239
Figura 127 – Imagens de microscopia eletrónica: a - 10.000x; b – 10.000x e c - 50.000x.. 239
Figura 128 – Provetes colocados ao sol após o ensaio de fungos…….. 240
Cap.13
Figura 129 – Provete de teste e respetiva área retirada para análise……... 243
Figura 130 – Imagem de microscopia, a 1000x da composição REF…… 244
Figura 131 – Imagens de microscopia, a 100x, das composições: a - REF; b - GL e c - GL_NaOH……..……..……..…….. 244
Figura 132 – Imagens de microscopia, a 1000x, das composições: a - REF; b - GL e c - GL_NaOH……..……..……..…… 245

Figura 133 – imagens de microscopia, a 100x, das composições: a - REF e b – NaCl….. 246
Figura 134 – imagens de microscopia, a 5000x, das composições: a - REF e b – NaCl… 246
Figura 135 – Imagens de microscopia de caulinite no solo real selecionado: a – 50.000x e b – imagem ampliada da zona assinalada…….……. 247
Figura 136 – a – Imagens de microscopia de montemorilonite no solo real selecionado: . 248
Figura 137 – Imagens de microscopia de ilite no solo real selecionado:..……. 248
Figura 138 – Imagens de microscopia de floco de cal na composição CV_NaOH: a - a 10.000x e b - a 50.000x……..……..……..…… 249
Figura 139 – Imagem de microscopia de floco de cal na composição CV_NaOH: ……. 249
Figura 140 – Imagens de microscopia, a 150x, das composições: a – REF e b – CV……. 249
Figura 141 – Imagens de microscopia, a 150x, das composições: a – Ci e b – CH……. 250
Figura 142 – Imagens de microscopia, a 150x, das composições: a – CV_OVU e b – CV_NaOH……..……..……..……... 250
Figura 143 – Imagens de microscopia, a 150x, da composição CV_OVU_NaOH…….. 250
Figura 144 – imagem de microscopia, a 2000x, das composições: a – REF e b – CV…… 251
Figura 145 – imagem de microscopia, a 2000x, das composições: a – Ci e b – CH…… 251
Figura 146 – imagem de microscopia, a 2000x, das composições: a – CV_OVU e b – CV_NaOH……..……..……..…….. 252
Figura 147 – imagem de microscopia, a 2000x, das composições: a – CV_OVU_NaOH.. 252
Figura 148 – imagem de microscopia, a 10.000x, das composições: a – REF e b – CV… 253
Figura 149 – imagem de microscopia, a 10.000x, das composições: a – Ci e b – CH…… 253
Figura 150 – imagem de microscopia, a 10.000x, das composições: a – CV_OVU e b – CV_NaOH……..……..……..……... 254
Figura 151 – imagem de microscopia, a 10.000x, da composição CV_OVU_NaOH……... 254
Figura 152 – Imagem da composição CV: a - 20x; b - 20x e c - 80x…….. 254
Figura 153 – Imagens a 80x das composições: a - REF; b - CV……. 255
Figura 154 – Esquemas do comportamento microscópico observado…… 255

Índice de tabelas

Cap.2

Tabela 1 – Energia incorporada de vários materiais de construção…… 29
Tabela 2 – Emissões de CO_2 de diferentes materiais de construção……. 29
Tabela 3 – Magnitude e efeitos do som…… 33
Tabela 4 – Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea…… 34
Tabela 5 – Índices de radioatividade de alguns materiais de construção em Bq/kg…… 38

Cap.3

Tabela 6 – Índices de erodibilidade do solo…… 48

Cap.4

Tabela 7 – Biopolímeros na antiga construção em terra……... 79
Tabela 8 – Biopolímeros na construção em terra – estudos recentes…… 81

Cap.5

Tabela 9 – Limite de liquidez, limite plasticidade e índice de plasticidade dos solos analisados…… 95
Tabela 10 – Sedimentação simples (percentagens em volume e em massa de solo)……. 97
Tabela 11 – Constituição granulométrica para construção em BTC (% em massa)…… 97
Tabela 12 – Constituição granulométrica para construção em taipa (% em massa)…… 97
Tabela 13 – Percentagem de humidade e matéria orgânica…… 97
Tabela 14 – Interpretação de “teste do charuto” e resultados obtidos…… 98
Tabela 15 – Comportamento das amostras de solo – teste de “Emerson”…… 100
Tabela 16 – Resultados do teste de “Emerson”…….. 101
Tabela 17 – Composição do óleo de linhaça (%) - (Čechová, 2009)…….. 103

Tabela 18 – Classificação da cal segundo vários autores…… 109
Tabela 19 – Classificação da cal segundo a normalização europeia…….. 110
Tabela 20 – Composição química da cal viva e da cal hidratada …… 110
Cap.6
Tabela 21 – Metodologias de ensaio de Molhagem/Secagem para solo compactado…… 122
Tabela 22 – Metodologias de ensaio de erosão por jatos de água – simulação de chuva 124
Tabela 23 – Pressão parcial do vapor em função da temperatura (Rodrigues, 2004)…… 130
Tabela 24 – Valores de referência de resistência à compressão…… 133
Tabela 25 – Valores de referência de resistência à compressão…… 134
Tabela 26 – Valores de referência - máximos de absorção de água por capilaridade……. 135
Tabela 27 – Valores de referência - máximos de absorção de água por imersão…… 135
Tabela 28 – Valores de referência – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água….. 137
Cap. 7
Tabela 29 – Composições com biopolímeros…….. 143
Tabela 30 – Composições com aditivos minerais ligantes…… 144
Tabela 31 – Composições com aditivos minerais religantes…… 144
Tabela 32 – Composições com biopolímeros e hidróxido de sódio…… 144
Tabela 33 – Composições de solo não estabilizado e solo estabilizado com cal viva……. 145
Tabela 34 – Composições de solo com diferentes estabilizantes…….. 145
Tabela 35 – Composições com solo estabilizado, biopolímeros e aditivo mineral…….. 146
Tabela 36 – Composições com solo estabilizado e biopolímeros…….. 146
Tabela 37 – Composições com solo real estabilizado, óleo usado e aditivos minerais….. 147
Cap.8
Tabela 38 – Valores de absorção por capilaridade e massa volúmica (180 dias) …….. 175
Tabela 39 – Solo preparado em laboratório com biopolímeros…….. 177
Tabela 40 – Solo preparado em laboratório com aditivos minerais…… 177
Tabela 41 – Solo preparado em laboratório com biopolímeros e hidróxido de sódio…….. 178
Cap.9
Tabela 42 – Valores de absorção por capilaridade e massa volúmica (180 dias) ……... 187
Tabela 43 – Solo preparado em laboratório com vários estabilizantes……. 190
Cap.10
Tabela 44 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo sem estabilizante – análise visual) ……. 203
Tabela 45 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo com estabilizantes – análise visual) ……. 203
Tabela 46 – Erosão acelerada por jato de água – resultados em mm…….. 205
Tabela 47 – Valores de absorção por capilaridade Kg/m2 (180 dias) …….. 207
Tabela 48– Solo preparado em laboratório estabilizado cal viva……..……. 208
Cap.11
Tabela 49 – Valores de absorção por capilaridade kg/m2 (56 dias)…… 218
Tabela 50 – Classificação de repelência à água …… 221
Tabela 51 – Tempo de absorção de gota de água (em segundos)…… 222
Tabela 52 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo sem estabilizante – análise visual)…….. 223
Tabela 53 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo com estabilizantes – análise visual)……... 223
Tabela 54 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água…….. 225
Tabela 55 – Erosão acelerada por jato de água – resultados em mm…… 225
Tabela 56 – Resultados das composições testadas com solo real……. 230
Cap.12
Tabela 57 – Fatores que influenciam o aparecimento e crescimento de fungos…… 233
Tabela 58 – Classes de intensidade de crescimento de fungos……. 234

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A construção em terra terá tido a sua origem no fabrico do adobe na antiga *Mesopotâmia*, uma zona do planeta de fraca pluviosidade. No entanto, este tipo de construção alargou-se a outras zonas de maior pluviosidade como a China, a Europa, a África, o Perú ou a Austrália, sobretudo na atualidade. Assim, a proteção face à Acão da água, que constitui um fator principal de degradação, apresenta-se como uma necessidade.

Existe inovação tecnológica neste tipo de construção, nomeadamente no desenvolvimento de soluções de estabilização do solo que trazem melhorias significativas em termos de durabilidade, economia, sustentabilidade e estética à construção em terra. Mas, mostra-se necessária mais investigação ao nível dos materiais e tecnologias para construção em terra em climas húmidos, onde o índice de pluviosidade é elevado e é imprescindível garantir uma boa durabilidade. Deste modo, torna-se indispensável investigar o material não só ao nível da incorporação de estabilizantes, mas sobretudo sobre a utilização de aditivos naturais, minerais ou orgânicos, que permitam melhorar a durabilidade da construção sem comprometer a sua sustentabilidade e capacidade higrotérmica.

1.2. Objetivos e metodologia

Este estudo centra-se na pesquisa de métodos de proteção face à água, antigos e recentes, e na investigação laboratorial no sentido de encontrar uma nova forma de estabilizar e simultaneamente proteger o material terra relativamente à ação água.

O objetivo geral deste estudo consiste na caracterização experimental de terra estabilizada com cal viva, sem ou com adição de biopolímeros, e/ou com aditivos minerais no sentido de avaliar o desempenho destes materiais na estabilização do solo compactado. Pretendendo-se com as novas soluções de estabilização obter um melhor desempenho face à ação da água, particularmente na redução da erosão causada pelas chuvas, sem necessidade de recorrer a um revestimento adicional como argamassas ou pinturas.

Como metodologia de trabalho para a elaboração deste estudo definiu-se o seguinte para o estado da arte e para a parte prática de investigação.

1.3. Estado da arte

Procedeu-se à realização de pesquisa, avaliação, sistematização e compilação da informação bibliográfica sobre:

- Mecanismos de ação da água que afetam a durabilidade das construções em terra;
- Métodos de proteção face à água utilizados para minimizar os efeitos prejudiciais da água neste tipo de construção;
- Conhecimentos empíricos antigos e a investigação contemporânea que tem sido desenvolvida, em Portugal e noutros países, no âmbito da estabilização de solos com cal viva e na utilização de biopolímeros e aditivos minerais na construção em terra para proteção face à ação da água; e
- Efeito dos estabilizantes, da introdução de biopolímeros e dos principais aditivos minerais utilizados nas propriedades do solo.

A pesquisa bibliográfica sobre estes temas centrou-se na procura de soluções utilizadas na construção em terra, seja para a estabilização do solo a utilizar na construção das próprias paredes, seja para utilizar na forma de revestimento à base de terra, sem ou com estabilização de cal.

Para apoio à parte laboratorial realizou-se ainda uma averiguação das normas, métodos de ensaios e valores de referência existentes para a construção em terra que serão usados como base de comparação com os resultados obtidos nos ensaios.

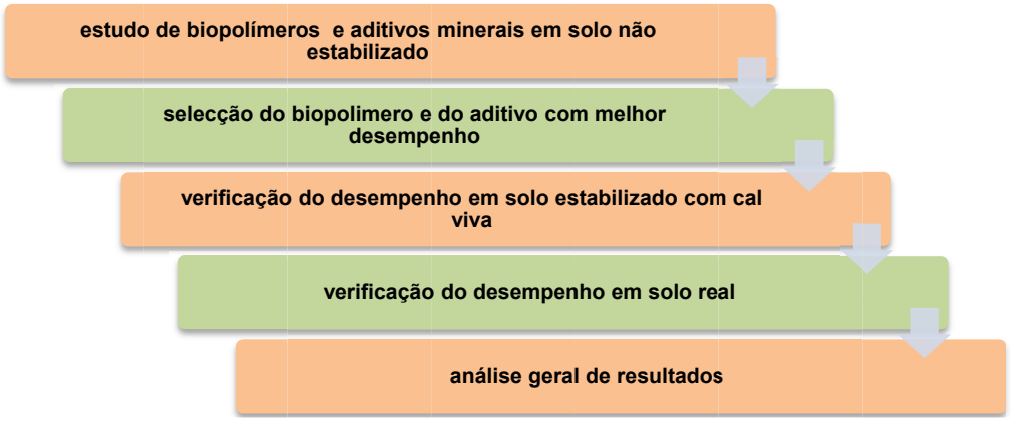
1.4. Investigação

Como material base de investigação, preparou-se um solo em laboratório que permitisse avaliar o efeito dos materiais adicionados, sem influência de qualquer matéria orgânica e sem as variações que podem ocorrer num solo natural.

Posteriormente, para verificação do desempenho das composições estudadas em solo real, selecionou-se um solo natural com quantidades de argila e areia

próximas das do solo anterior, com o mesmo tipo de argila presente na sua composição.

Procedeu-se à caracterização laboratorial dos materiais utilizados neste estudo, a nível físico e químico. Definiram-se as composições base a testar, sendo sucessivamente ajustadas em função dos resultados obtidos. Em síntese, apresentam-se as principais etapas da investigação no diagrama seguinte.



1.5. Organização do texto

Além do primeiro capítulo, que se refere à introdução, a presente tese encontra-se organizada, essencialmente, em duas partes, tal como o referido na metodologia. Uma parte de análise bibliográfica e outra parte prática de investigação laboratorial.

A primeira parte é constituída pelos capítulos 2, 3 e 4. No capítulo 2 encontra-se: uma abordagem teórica sobre o material terra enquanto material de construção; a inovação da construção em terra desde os anos 50 até à atualidade; as mais-valias deste material em termos de sustentabilidade e de benefícios para a saúde; e aspetos sobre a respetiva durabilidade do material. No capítulo 3 são referidos os mecanismos e fatores que afetam a durabilidade face à ação da água na construção em terra. O capítulo 4 refere métodos de proteção face à ação da água, desde a pormenorização da arquitetura, revestimentos, materiais de estabilização alternativos ao cimento, estabilização biopolímeros naturais e estabilização com aditivos minerais.

Aborda-se os efeitos dos biopolímeros e dos aditivos minerais nas propriedades da construção em terra, apresentando-se vários exemplos de técnicas antigas e recentes da sua utilização neste tipo de construção.

A segunda parte abrange os capítulos 5 a 13. Constando no capítulo 5 a caracterização dos materiais utilizados, no capítulo 6 as metodologias, normas e referências de estudo utilizadas para comparação de resultados e no capítulo 7 todas as composições estudadas e os respetivos ensaios realizados.

A apresentação e análise de resultados encontra-se descrita no final de cada etapa de estudo para facilitar a leitura e compreensão dos resultados. Assim, no capítulo 8 encontra-se a análise do efeito da incorporação de biopolímeros e aditivos minerais em solo simples, no capítulo 9, o efeito da estabilização com cal viva e outros estabilizantes, no capítulo 10, a avaliação do desempenho da incorporação do biopolímero e aditivo mineral selecionado em solo estabilizado e no capítulo 11, a análise do desempenho em solo real das mesmas composições.

No capítulo 12 encontra-se um estudo de proliferação de fungos sobre as mesmas composições.

No capítulo 13 encontra-se um estudo de microscopia ótica e eletrónica das melhores composições e outras composições para comparação de resultados.

Relativamente às conclusões, no capítulo 14, estas apresentam-se segundo as conclusões observadas na parte experimental e conclusões gerais da tese.

Por fim, fazem-se recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros e apresentam-se as referências bibliográficas.

2. Terra como material de construção

2.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se um enquadramento sobre a terra enquanto material de construção como alternativa aos materiais convencionais e o modo como este material é visto pela sociedade.

Aborda-se também a inovação da construção em terra desde os anos 1950 até à atualidade, mostrando como este material tem evoluído em paralelo com o desenvolvimento tecnológico. Este material tem sido estudado cientificamente à semelhança de outros materiais de construção e têm-se desenvolvido normas e guias de construção, sobretudo na recente década de 2000.

São igualmente importantes as mais-valias deste material em termos de sustentabilidade, nomeadamente em termos de consumo energético, emissões CO_2 e produção de resíduos. Bem como os benefícios para a saúde obtidos pelo comportamento higrotérmico da construção em terra, o bom comportamento acústico, ausência de libertação de compostos orgânicos voláteis, proteção face a campos eletromagnéticos artificiais e permeância aos naturais e pela menor radioatividade deste material face a alguns materiais de construção.

É no entanto a durabilidade do material, um dos principais focos desta análise bibliográfica. Abordando-se os fatores que influenciam a durabilidade das construções em terra, sejam fatores inerentes ao material, sistema construtivo e arquitetura, sejam fatores externos à construção.

2.2. A construção em terra como betão natural

Um betão é constituído por agregados de diferentes granulometrias e uma matriz ligante, como tal, a terra também pode ser considerada um betão, pois é composta por agregados de diferentes dimensões, gravilhas, areia e silte. Estes, por sua vez, são interligados por um material de características plásticas e ligantes, a argila.

As diferenças entre o betão natural terra e o betão convencional residem sobretudo no ligante utilizado, o cimento, mas também no endurecimento e nas resistências mecânicas e durabilidade obtidas.

A terra tem claramente menores resistências que o betão convencional, mas tem um processo de endurecimento diferente ao longo do tempo em relação a este. Este betão após 28 dias de cura já adquiriu boa parte da resistência final que será alcançada com o passar do tempo. No entanto, a construção em terra vai ganhando cada vez mais resistência à medida que o tempo passa, mesmo utilizando um solo não estabilizado, ou seja, sem recurso a cimento, cal ou outro material adicionado.

É referido que tal aumento de resistência dever-se-á não só à perda de humidade do solo, mas também a outros fatores que não foram completamente investigados (Maniatidis & Walker, 2003). Entre estes fatores encontram-se as forças eletrostáticas e as eletromagnéticas que atraem as partículas de argila entre si (forças de *Van der Waals*). No entanto, também ocorrem outros processos, como por exemplo, a cimentação natural ou a capilaridade.

A cimentação consiste em ligações criadas entre as partículas do solo por ciclos de precipitação e dissolução por meio de “pontes” criadas entre estas. A capilaridade reforça estas ligações, uma vez que a água impregna-se nas partículas do solo e cria “pontes líquidas” entre estas reduzindo a distância entre partículas. Este mecanismo cria uma maior coesão no solo, que atua de uma forma dinâmica, criando ciclos de maior ou menor atração entre as partículas do solo consoante a quantidade de água (Houben and Guillaud 2008).

A atração das partículas provocada pela água é também conhecida por sucção e esta é maior quando existe uma quantidade de água mínima para manter as partículas unidas, obtendo-se assim maiores resistências. Esta quantidade ótima de água, para manter esta união das partículas, é obtida após a secagem natural do material e é depois controlada pela humidade relativa do ar circundante (Jaquin, 2008). A sucção variará, também, com a humidade relativa contida nos poros da terra conforme o observado na Figura 1. Poder-se-á concluir que a coesão da terra é obtida por ligações secas e ligações húmidas.

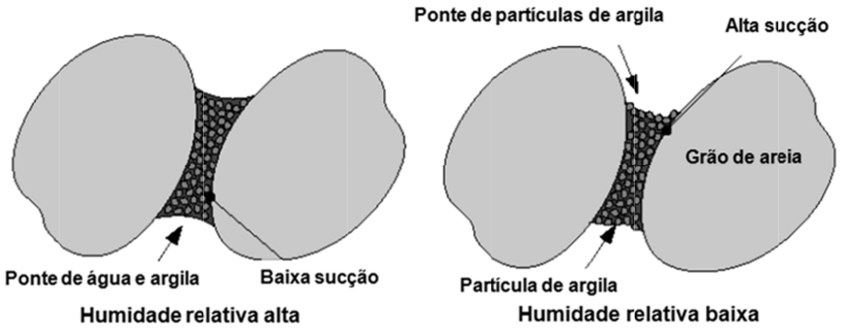


Figura 1 – Pontes de água e argila no solo (adaptado de Jaquin, 2008)

Em termos de sustentabilidade, o betão convencional, à base de cimento, embora produzido por materiais naturais (pedras calcárias e argila) foi é sujeito a um tratamento térmico com recurso a elevadas temperaturas para ser transformado em clínquer, ao qual são adicionadas pequenas quantidades de gesso e, por vezes, outros aditivos como as pozolanas. Este processo de queima consome bastante energia e é responsável por substanciais emissões de carbono com impacte ambiental. Estima-se que a produção de cimento é responsável por cerca de 5 % do total das emissões de CO_2 (Worrell, 2001).

Como tal, a utilização da terra em substituição parcial ou total do betão com cimento apresenta uma clara vantagem em termos de sustentabilidade, sendo utilizada simples ou estabilizada com cal, ou mesmo com cimento, desde que em pequenas percentagens.

A terra estabilizada, seja com cal, cimento ou outro ligante, não poderá ser devolvida à natureza no seu estado natural no fim da sua vida útil. Mas, de certo, o impacte ambiental será bem menor face ao impacte que o betão convencional apresenta.

Pela capacidade de endurecimento ao longo do tempo, a terra, se tiver a composição correta de agregados e argila, pode ser utilizada com sucesso sem estabilizante no interior das habitações e em paredes revestidas ou protegidas da chuva. Isto porque a limitação do uso de solo não estabilizado consiste na sua fragilidade à ação da chuva, sobretudo nos primeiros anos de vida útil, enquanto não atinge um endurecimento suficiente.

Assim, recomenda-se que a estabilização da terra seja executada apenas em solos que não apresentam uma composição adequada e em paredes

desprotegidas que estejam expostas a erosão ou ação da água, como é o caso das paredes exteriores e zonas húmidas no interior dos edifícios.

A terra como material de construção pode ser utilizada em obras que não exijam uma elevada resistência mecânica, como por exemplo edifícios até dois pisos ou pode ser associada a outros materiais de construção, como a madeira ou o betão convencional, no sentido de possibilitar construções de maior envergadura.

Relativamente ao reconhecimento e aceitação do material terra, existem profissionais da área da arquitetura e construção que ainda consideram a utilização da terra como material de construção um retrocesso na evolução da arquitetura ou da construção, considerando que é um material pobre e de pouca durabilidade. Preconceito que já se observava em Portugal desde a década de 1950, atendendo ao descrito em circular técnica do LNEC (Gomes e Folque, 1953):

> *"(…) Apesar destas razões de tradição a taipa e o adobo são normalmente considerados como materiais pobres e sem interesse, que não vale a pena estudar e cuja técnica se considera suficientemente evoluída.*
>
> *(…) Para o caso Português as construções em terra parecem merecer consideração. Recomendam-nas "à priori" o seu baixo preço, a independência de transportes e matérias primas estrangeiras e a simplicidade e não especialização da mão de obra que exige.*
>
> *Mas há, antes, que destruir o preconceito, de certo modo psicológico, que contra a terra como material de construção, geralmente existe, estudando e por ventura melhorando os seus processos de emprego tradicionais, para depois, enobrecido assim o material, o recomendar."* *(Gomes e Folque, 1953)*

Todavia, em oposto, também é crescente o número de profissionais que consideram a utilização da terra uma escolha mais sustentável e saudável para o habitat do ser humano. A terra proporciona um ambiente mais salubre e com maior respeito pela natureza.

Além disso, a terra está entre os materiais de construção estudados cientificamente e tem sido considerado um material bastante promissor na arquitetura atual pela sua versatilidade, uma vez que existem inúmeras técnicas construtivas e possíveis cores e texturas. Apesar do preconceito

demostrado por diversos autores, desde os anos 1950, a terra tem vindo a ser alvo de inúmeras investigações científicas que comprovam a durabilidade do material e que propõem novos processos de estabilização ou de fabrico de materiais à base de terra.

A construção em terra, cada vez mais, deixa de ser um sinónimo de pobreza ou retrocesso. Por vezes é até considerada uma construção de luxo, estando cada vez mais "na moda".

Presentemente a arquitetura em terra é procurada pelos arquitetos e donos de obra pelos seguintes motivos:

- Por ser um material alternativo face aos materiais convencionais atuais – cada vez mais utilizado por donos de obra que procuram destacar o seu edifico pela diferença, como, por exemplo, no turismo;
- Por ser um material natural que respeita o ambiente e favorece a saúde do ser humano – procurado por todos aqueles que colocam o bem estar, saúde e o respeito pelo ambiente em primeiro lugar;
- Por ser um material económico, especialmente se for utilizada terra do local da construção – tendo uma maior procura para habitação social, sobretudo em países onde a mão de obra é mais económica como em África, América latina e Índia;
- Por razões de marketing – procurado por donos de obra que pretendem rotular o seu edifício como sendo ecológico ou sustentável; e
- Por ser um material durável, desde que se tenha o conhecimento adequado sobre a seleção, estabilização e aplicação do material;

Por estas razões países como a Austrália, França, Alemanha, Brasil, Peru, Índia, entre outros, têm vindo a investigar e a aplicar cada vez mais a construção em terra, tanto em edifícios particulares como públicos (UTS, 2008, CRAterre, 2011, Minke, 2007, Bomfim de Souza, 2006, Neves, 2003, e *Auroville Earth Institute*, 2008).

O estudo científico da terra enquanto material de construção tem vindo a ser cada vez mais abrangente. Existem estudos desde o nível microscópico ao nível macro, passando por caracterização de solos, estudos químicos de solo estabilizado com diferentes materiais, avaliação do comportamento físico,

estudos de avaliação da durabilidade, estudos de processos de construção e avaliação do comportamento térmico dos edifícios construídos em terra (Houben & Guillaud, 2008, Fontaine et al, 2009, Anger et al, 2009, Heathcote, 2002, e Minke, 2007).

Tem-se assistido também a uma crescente industrialização dos sistemas construtivos à base de terra ou argila não cozida, embora ainda continuem a ser aplicadas as técnicas tradicionais.

2.3. Inovação da construção em terra desde os anos 1950 até à atualidade

2.3.1. A invenção do bloco de terra compactado, BTC

Apesar de já no século XVIII terem surgido as primeiras máquinas para compressão de terra, como a máquina de Francois Cointeraux, a que chamou "*crecise*", derivada de um prensa de vinho, e de algumas outras invenções por parte da industria cerâmica, com a prensagem de terra entre duas placas convergentes, só no século XX surgiram as prensas de fabrico de blocos de terra compactado como conhecemos hoje (Rigassi, CRATerre-EAG 1985).

Na década de 1950 o pesquisador colombiano G. Ramires teve a ideia de criar uma prensa manual para fabrico de tijolos com terra comprimida, a conhecida prensa CINVA-RAM, no International American Housing Centre (CINVA), na Colombia em 1952 e assim surgiu a invenção do BTC (Rigassi, CRATerre-EAG 1985).

Depois disso, em diversos países foram desenvolvidas e comercializadas prensas manuais, bem como prensas hidráulicas motorizadas, com consumo de combustível fóssil ou de eletricidade, mas cada vez mais sofisticadas e com capacidade para produzir um maior número de blocos por dia.

O processo de fabrico do BTC permite realizar diversos tipos de blocos, maciços ou perfurados, pequenas placas de revestimento ou mesmo telhas. A consistência da terra utilizada é de terra húmida, semelhante à da taipa, permitindo obter blocos bastante resistentes, embora mais pesados que o adobe.

Os blocos produzidos com prensas hidráulicas apresentam resistências mecânicas substancialmente superiores aos prensados em prensas manuais, tendo ainda uma maior resistência ao contacto com a água, uma vez que a ligação entre as partículas é maior e a quantidade de vazios menor.

As prensas, tanto as hidráulicas, como as manuais podem ser fixas ou móveis, o que permite a execução dos blocos no local da obra, utilizando a terra do local, com a vantagem de uma maior rapidez de fabrico.

A forma de construir é semelhante á utilização da alvenaria em tijolo comum, mas quando o BTC é intertravado ou *interlocking* permite assentar os blocos com menor uso de argamassa, podendo dispensar mesmo o seu uso nas juntas verticais. Este tipo de construção permite uma rápida execução, facilidade de montagem e uma diminuição dos resíduos de construção. Em termos de estrutura do edifício, esta pode ser uma estrutura convencional, em betão ou madeira, ou ser incorporada no próprio bloco perfurado, preenchendo com betão armado ou com canas de bambu alguns dos furos dos blocos.

O BTC, quando fabricado com perfurações, além de permitir o reforço da estrutura, também possibilita a passagem de tubagens para redes hidráulicas, de gás, de telecomunicações e de eletricidade, sem abertura de roços, minimizando assim a produção de resíduos durante a construção.

2.3.2. Inovações no adobe ou adobo

O adobe, bloco moldado com terra plástica tradicionalmente realizado à mão, passou a ser produzido por um processo mecanizado, recorrendo à tecnologia atual, o que possibilita um fabrico mecanizado e mais rápido dos blocos.

Além disso, surgiram outras técnicas para a realização de adobe, como por exemplo o "*adobeton*" (Martin, 1998).

O "*Adobeton*" é realizado com um revestimento em betão. Esta técnica foi desenvolvida em Marrocos e consiste numa tecnologia de construção de paredes exteriores em adobe com proteção à intempérie exterior em elementos de betão prefabricados, em forma de "L" invertido, aumentando a sua durabilidade e dando um aspeto mais industrial à construção em terra. Esta

construção tem a vantagem da durabilidade e satisfação pessoal humana das classes mais baixas que procuram moradias industrializadas, sem o aspeto tradicional das construções em terra. No entanto, esta solução não tem versatilidade em termos arquitetónicos, uma vez que só permite uma construção retilínea e simples, e além disso consome mais energia no seu fabrico pelo uso de cimento (Martin, 1998).

2.3.3. Terra moldada

A terra moldada ou vazada, também conhecida como betão de terra, é um processo construtivo que recorre ao uso de cofragens, à semelhança do betão convencional, sendo utilizada terra num estado plástico e sem compactação, desmoldando-se após a secagem do material. Estas paredes de terra moldada podem também ser executadas em terra armada com aço à semelhança do betão armado.

Uma variante desta técnica é o adobe "*In situ"* em que os adobes são moldados no local mediante o recurso a uma cofragem semelhante à da taipa. Os adobes podem ser desmoldados de seguida, ainda no estado fresco para poderem ser trabalhados como uma escultura, permitindo obter diversas texturas. Este ultimo método permite utilizar cofragens de maior dimensão comparativamente às dimensões típicas dos adobes tradicionais (Auckland Council, 2008).

2.3.4. Terra projetada

No final dos anos 1980 David Easton, no intuito de obter uma construção com aspeto semelhante ao da taipa, mas com um método construtivo mais rápido de executar, desenvolveu um novo processo de construção em terra que designou por *Pneumatically Impacted Stabilized Earth – PISE*, em homenagem ao tradicional *Pisé*, ou taipa em francês.

Este método de construção consiste em realizar paredes em terra projetada e armada com aço, sendo devidamente regularizada a superfície no final. Para tal é utilizado um método específico de pulverização de terra estabilizada com

cimento, com uma determinada quantidade de água, que permite uma aderência imediata da mistura ao suporte.

Este processo permite assim maior rapidez de execução e também de secagem, além de ser mais económico, uma vez que apenas precisa de cofragem apenas de um lado da parede (Easton, 2008).

2.3.5. Terra extrudida

Esta tecnologia, que consiste num método de fabrico por extrusão, permite obter blocos semelhantes aos tijolos cerâmicos convencionais, mas sem recurso a queima, permitindo também a produção de blocos de maior dimensão. São exemplo os tijolos produzidos na Escócia pela Errol Brick com a mesma forma que os tijolos perfurados queimados (Morton, 2008) e blocos de argila crua e gesso reciclado (desperdícios de placas de gesso cartonado) da Akristos (Biggs, 2007).

Existe ainda o designado “Megablock” ou “Giant Compressed Earth Block (GCEB)”, criado por Larry Williamson, que consiste na extrusão de terra em grandes dimensões, permitindo criar blocos de aproximadamente três metros de comprimento. Este sistema destaca-se pela total mecanização do sistema construtivo no fabrico e montagem de paredes (Hames, 2011).

2.3.6. Terra em sacos

Nader Khalili inventou um sistema construtivo de terra ou areia confinada em sacos e posteriormente compactada, “*Earthbag*”, também designado por Superadobe, Sandbag ou Superblock. Este processo construtivo tem o propósito de poder utilizar qualquer material pulverulento, como terra ou areia. Utilizando a forma de *Dome*, construção circular, este sistema tem ainda a particularidade de poder resistir a ventos e a sismos (Cal-Earth, 2011 e Hunter & Kiffmeyer, 2004).

2.3.7. Terra em placas

Encontram-se no mercado placas à base de terra e fibras, obtidos por diversos métodos, com ou sem perfuração, para utilização em paredes interiores.

Algumas destas placas incluem tubagem para aquecimento radiante embutido (WEM Wandheizung, 2008). Este tipo de placas surge como alternativa ao sistema convencional composto por placas de gesso cartonado uma vez que é aplicada da mesma forma permitindo realizar a separação de compartimentos, revestimentos de paredes e tetos.

2.3.8. Inovações da construção em taipa

A taipa aqui mencionada refere-se ao método de construir entre taipais ou cofragem compactando o solo por camadas sucessivas, podendo-se descofrar logo que se termine a compactação da última camada. Em Portugal esta técnica era bastante utilizada no Alentejo e por isso também é conhecida como "taipa alentejana". Embora existam outros tipos de taipa como a técnica "taipa de mão".

Mais recentemente, com o uso das novas tecnologias, desenvolveu-se a taipa mecanizada. Esta é realizada segundo os mesmos moldes que a taipa tradicional, diferindo apenas na qualidade e dimensões da cofragem e no meio de compactação.

A cofragem pode ser móvel ou amovível conforme as dimensões utilizadas, recorrendo a placas e perfis à base de contraplacado de madeira ou de metal. Esta seleção de materiais de cofragem e dimensões dependem da textura que se pretende obter na parede de taipa.

A compactação é realizada através de um compactador pneumático, à semelhança dos martelos pneumáticos para perfuração, mas mais leves e com uma base de compactação adaptada. Deste modo, o tempo necessário para compactar a terra é bastante mais curto que na taipa tradicional, havendo assim uma otimização do tempo de construção.

As paredes de taipa podem ser resistentes ou não resistentes, caso se opte por utilizar uma estrutura em outro material, como o betão ou a madeira. Além disso, estas paredes podem ser reforçadas com bambu ou mesmo o aço, um pouco à semelhança do betão armado.

A mecanização da taipa permitiu, também, reduzir a espessura das paredes. O CEPED, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, realizou uma série de ensaios, entre os anos 1970 e 1990, tendo concluído que para uma mistura com aproximadamente 6% de cimento e pé direito até 2,80 metros a espessura poderá ser de 12 cm, atendendo às condições de resistência e estabilidade (Soares et al. 2004).

Existem também processos de construção que incorporam isolamento térmico nas paredes, tal como numa parede dupla, quer em taipa, quer em betão natural moldado.

2.3.9. Estudos científicos do material terra e desenvolvimento de normas e guias de construção

A par do desenvolvimento de novas técnicas construtivas, em diversos países, surgiram estudos sobre o material terra para a construção de paredes, pavimentos e argamassas no sentido de aperfeiçoar e incentivar o uso da terra na construção, promovendo uma construção em terra de qualidade.

As entidades que proporcionaram este desenvolvimento foram:

- **Centros, associações e institutos** - ligados à construção em geral ou especificamente sobre construção em terra.

  A partir de 1948 a ABCP, "*Associação Brasileira de Cimento Portland*", levou a cabo experiências de construção de habitações solo-cimento, com a construção de duas casas, verificando-se uma boa conservação destas casas após vários anos de utilização (Bomfim de Souza, 2006).

  Ainda na década de 1950 o CINVA da Colombia, "*International American Housing Centre*", publicou um guia técnico intitulado *"Suelo Cemento: su aplicación en la edificación"* (Neves, 2003).

  Em 1979 surgiu o *CRAterre,* em França, pela iniciativa de um grupo de estudantes da atualmente denominada *Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble*, ENSAG, tornando-se este centro uma referência a nível mundial sobre construção em terra. É um centro pluridisciplinar em que participam pessoas não só da área de arquitetura, mas também de áreas como a antropologia, sociologia, engenharia e arqueologia. As

principais atividades deste centro consistem na conservação e gestão do património de arquitetura em terra, na constituição de bases científicas e técnicas para a construção em terra e estudo do habitat, na formação profissional deste tipo de construção, e na procura de melhores condições de vida para a sociedade (CRAterre, 2011).

Este centro impulsionou a criação de outros centros por todo o mundo, bem como em Portugal, tendo sido criada em 2003 a Associação Centro da Terra com os objetivos de estudo, documentação e difusão da construção em terra (Centro da Terra, 2011);

- **Universidades** – Em 1975 foi fundado por Gernot Minke o Laboratório de Pesquisa Experimental para a Construção *("Forschungslabor für Experimentelles Bauen"*, FEB) na Universidade de Kassel, na Alemanha, que, desde então, tem desenvolvido pesquisas sobre construção em terra (Minke, 2007).

  Ainda na década de 1970, a *Pontificia Universidad Católica del Perú* começou a desenvolver investigação sobre construção anti-sísmica em abobe, desenvolvendo técnicas de reforço de paredes adequadas (Neves, 2003).

  Desde a criação do CRAterre a referida escola de arquitetura de Grenoble, ENSAG, na França, tem proporcionado formação na área da construção em terra, incluindo um mestrado criado em 1984, DSA "Architecture de terre" (CRAterre, 2011).

  A *University of Technology Sydney*, UTS, mais propriamente a *Faculty of Design Architecture and Building,* na Austrália, tem desenvolvido bastante pesquisa ao nível da durabilidade da construção em terra e têm divulgado informações sobre a construção em terra através do fórum criado na Web em 1999, o Earth *Building Research Forum* (UTS, 2008).

  Além disso, em diversas universidades do mundo decorrem teses de mestrado e de doutoramento na área da construção em terra.

  Em Portugal temos o exemplo da Universidade do Minho com investigação sobretudo ao nível de estudos da estabilização de solos com cal e/ou pozolanas, desde 2001, agora aplicados à construção em terra e ao nível de ensaios estruturais de análise sísmica de alvenarias de terra, desde 2005.

A Universidade de Aveiro nos últimos anos tem também estudado o comportamento mecânico da construção em adobe, bastante utilizado na construção tradicional da região.

E ainda existem estudos sobre o património de arquitetura em terra e divulgação deste tipo de construção pela Escola Superior Gallaecia (ESG), de Vila Nova de Cerveira, através do CICRA – Centro de Investigação de Construção Rural e Ambiente, criado em 1999, cujos domínios científicos são património, arquitetura, ambiente e sustentabilidade (Gallecia, 2011);

- **Redes e projetos de divulgação e apoio à construção em terra** – Surgiram diversas redes de divulgação e troca de informação sobre a construção em terra a nível internacional. São exemplo: a rede Ibero-Americana Proterra; a rede Uni-terra que promove a troca global de informação a nível académico; a UNESCO *Chair* (*United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization*) – "*Earthen Architecture - Constructive Cultures and Sustainable Development*", criada em 1998, com sede no CRAterre-ENSAG e a contribuição do *International Council on Monuments and Sites*, ICOMOS pelo *International Scientific Committee for Earthen Architecture,* ISCEAH, que pretende desenvolver melhores práticas e métodos de proteção e conservação do património mundial de arquitetura em terra (ICOMOS-ISCEAH, 2011);
- **Institutos de normalização** – Diversos países desenvolveram normas e/ou recomendações técnicas para a construção em terra.

  Um dos primeiros países a desenvolver e criar normas para a construção em terra foi a Polónia durante os anos 1960, após a segunda guerra mundial. Estas normas incluem a informação essencial sobre paredes e argamassas de terra, embora estas tenham sido esquecidas pelos técnicos atuais (Zurakowska et al, 2009).

  Em 1977 também já o *Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda*, Perú, incorporava a utilização do abobe como parte das suas "Normas Técnicas de Edificações" (Neves, 2003).

  Em 1984 a ABNT, "*Associação brasileira de normas técnicas*", publicou a primeira norma associada à utilização do solo-cimento para construção de edifícios, seguindo-se outras normas sobre este material até ano 1996.

Estas normas incluem a construção com tijolos maciços, blocos vazados e paredes monolíticas sem função estrutural (ABNT, 2011).

Na Alemanha, em 1999, criou-se a primeira regulamentação técnica europeia sobre construção em terra, "*Lehmbau Regeln",* produzida pela associação alemã para a construção com terra (*Dachverband Lehm e.V., 2008*).

No Zimbabué publicou-se em 2001 a norma SAZS-724:2001, "*Zimbabwe standard code of practice for rammed earth structures".*

No documento intitulado "*Compressed earth blocks standards"* preparado pelo CRAterre-ENSAG, CDI (*Center for the Development of Industry*) e pela ARSO apresenta as normas da *African Regional Standards Organization*, ARSO, para blocos de terra compactados, ARSO 670 a 683 de 1996, para apoio aos países da ACP (África, Caraíbas e Pacífico) e aos parceiros europeus (CDI & CRAterre-EAG, 1998).

Na França foi publicada em 2001 a norma AFNOR XP P13-901, "*Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception"* (AFNOR, 2011).

Na Austrália*,* em 2002, foi publicada uma norma de construção em terra, HB 195-2002, "*The australian earth building handbook"* (Walker & Standards Australia, 2002).

No final do ano 2008 é criada a primeira norma espanhola de construção em terra, UNE 41410:2008, emitida pelo subcomité AEN/CTN 41 SC 10 "*Edifi cación con tierra cruda*" de AENOR (Cid et al, 2011).

Outras normas são referidas por Delgado & Guerrero: a NMAC 14.7.4. 2003 "*New Mexico Earthen Building Materials Code"* pela *Construction Industries Division* (CID) do *Regulation and Licensing Department*; a "*Norma Técnica Edificación", NTE E 0.80 "Adobe",* do *Regulamento Nacional de Construcciones* de Lima, ano 2000, e normas da Nova Zelândia sobre construção em terra, *New Zealand Standard*, SNZ 4297 a 4299, de 1998 (Delgado & Guerrero, 2007).

Em Portugal não existem normas para construção em terra, apenas existe a já referida circular de informação técnica do LNEC, intitulada "O uso da terra com material de construção" publicada em 1953 (Gomes e Folque, 1953).

- **Contribuição dada pelos arqueólogos e especialistas em restauro e conservação de edifícios antigos** – conhecimento importante que permitem a observação e o estudo de edifícios em terra que sobreviveram vários séculos e que podem servir de exemplo para novos estudos sobre o material e sistemas construtivos em terra.

De forma geral verifica-se que o estudo científico e desenvolvimento de normas sobre a construção em terra surgiram de forma mais regular apenas nos anos 2000 o que mostra uma perda de conhecimento sobre a arte de bem construir em terra. De certo, resultante da generalização do uso do betão e tijolos cerâmicos na construção e da perda de interesse pelo material terra. Interesse que ressurgiu recentemente pelos aspetos já referidos no início deste capítulo.

2.4. Sustentabilidade, ecologia e bioconstrução

Nos últimos anos as palavras sustentabilidade e ecologia têm vindo a ser utilizadas de modo generalizado e abusivo. Tem-se aplicado estes termos de modo genérico e informal a todo o material que reduza um mínimo de impacte ambiental. Como por exemplo, uma tinta poder ser considerada ecológica apenas por não emitir componentes tóxicos acima dos limites estabelecidos. Mas isto não quer dizer que a produto em si seja sustentável.

Na classificação ou rotulagem ecológica de qualquer tipo de produto, deveriam ser verificados os seguintes aspetos para confirmar se este é verdadeiramente sustentável: se o material é de origem natural ou não; se é suficientemente permeável ao vapor de água para manter um ambiente saudável; a energia consumida; os custos de transporte; a radioatividade emitida; o impacte na saúde dos trabalhadores durante o fabrico ou na aplicação do produto, a emissão de compostos orgânicos voláteis, etc.

Deste modo, no sentido de se adequar melhor a classificação dos produtos sustentáveis, que tem de facto uma preocupação pelo meio ambiente e pelos seres vivos de uma forma completa e integradora de todas as problemáticas associadas, começaram a surgir novos termos. São exemplo disso, a bio-construção e a bio-arquitetura e o termo biológico aplicado a materiais de construção, como as tintas biológicas.

A terra, pelas suas vantagens em termos de salubridade e respeito pelo ambiente, tem sido o material eleito na bio-arquitetura ou bio-construção realizada, quer por arquitetos, quer por auto-construtores, sendo estes muitas vezes permacultores ou produtores de agricultura biológica ou de agricultura biodinâmica.

2.5. Impacte ambiental da terra e outros materiais de construção

2.5.1. Consumo energético e emissões CO_2

É reconhecido que a produção de diversos materiais de construção consome grande quantidade de energia, sobretudo energia não renovável, e emitem grandes quantidades de CO_2, entre outros compostos poluentes, para a atmosfera.

O Instituto IDD, *Institut Wallon*, VITO (2001) e John (2005) (in Stachera & Casagrande, 2007) afirmam que os materiais mais emissores de gases causadores do efeito estufa são: cimento; cal; aço; areia e brita (extração e transporte); e cerâmica vermelha. Assim, a construção em terra será uma boa escolha como material de construção, permitindo reduzir em grande parte a utilização destes materiais.

De seguida apresentam-se informações sobre o processo produtivo, consumo energético e emissões de CO_2 da produção de cal aérea, tijolos, cimento, aço, areias e britas e da construção em terra.

2.5.1.1. Cal aérea

A cal aérea tem a sua origem na pedra calcária. Esta matéria-prima encontra-se em depósitos sedimentares, resultantes de rochas calcárias, ou em depósitos de giz ou coral e areia, formados a partir da desintegração de conchas marinhas. Para transformar o calcário em cal, essencialmente óxido de cálcio, é necessário um processo de combustão, convencionalmente designado calcinação. Esta reação endotérmica é obtida submetendo a pedra calcária a temperaturas de 900-1200ºC, obtendo-se assim cal viva (Borge, 2000) cuja equação química é a seguinte (equação 1):

$$\mathbf{CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2} \qquad \textbf{(1)}$$

Para a cal viva poder ser utilizada na construção precisa de passar por um processo de hidratação designado por extinção da cal, formando hidróxido de cálcio, conforme a equação 2. Sendo libertada parte da energia consumida durante o processo de combustão devido à sua reação exotérmica na presença de água.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (2)$$

O hidróxido de cálcio obtido com este processo designa-se por cal hidratada. Existindo duas categorias, consoante a percentagem de cálcio, a cal cálcica e a cal dolomítica (ver tabela18, no capítulo 5).

A cal aérea ao ser aplicada na construção, como por exemplo em argamassas, reage com o CO_2 da atmosfera, passando por um processo de carbonatação, apresentado pela equação 3. Deste processo resulta a fixação do hidróxido de cálcio pela sua transformação em carbonato de cálcio (Arredondo, 1983 e Borge, 2000). Esta é uma reação lenta e que, por isso, proporciona um aumento das resistências mecânicas ao longo do tempo.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + n(H_2O) \rightarrow CaCO_3 + (n+1)\ H_2O \quad (3)$$

Este processo de carbonatação resulta na reabsorção de parte do CO_2 emitido anteriormente no fabrico da cal. A quantidade reabsorvida depende do tipo de uso da cal, mas estima-se que seja aproximadamente entre 20 a 25% das emissões produzidas durante a calcinação (National Lime Association/ Canadian Lime Institute, 2005).

2.5.1.2. Produção de cal e tijolos cerâmicos em pequenas e médias empresas

Em certos locais, como por exemplo em países africanos, a produção de cal e de tijolos cerâmicos maciços é realizada em pequenas e médias empresas, cuja principal fonte de energia é a madeira. Sabe-se que por cada 1 kg de madeira queimada, é libertado 1,8 kg de CO_2 para a atmosfera se houver uma queima completa. Este tipo de produção ocorre sobretudo em países em desenvolvimento, onde a madeira começa mesmo a escassear e os pequenos produtores tendem a desistir deste negócio “familiar”. Assim, tem-se verificado um decréscimo significativo desta produção, em pequena escala, de cal e tijolos cerâmicos em vários países. Além disso, a escassez de madeira leva

cada vez mais à desflorestação e outros problemas ambientais resultantes dessa mesma desflorestação.

Para produção de tijolos, o tipo de queima depende da localização do combustível no forno, tempo de ignição, a implantação do forno e condições climáticas. O solo argiloso utilizado pode vitrificar a altas temperaturas (cerca de 1000ºC), médias temperaturas (entre 950 e 1000ºC) ou a baixas temperaturas (abaixo de 950ºC).

A título de exemplo, segundo um estudo de impacte ambiental sobre a produção de tijolos no Zimbabwe com diferentes queimas foram obtidos os seguintes resultados em termos de emissões de dióxido de carbono. Mesmo não havendo registo do tipo de solo e qualidade dos tijolos estes dados podem ser considerados para comparação (Schilderman, 2009):

- A queima de tijolos em fornos de lenha emite cerca de 255 $kgCO_2$/t de tijolo;
- A queima de tijolos com recurso a carvão mineral emite cerca de 233 $kgCO_2$/t de tijolo; e
- A queima de tijolos recorrendo a resíduos de caldeiras emite cerca de 251 $kgCO_2$/t de tijolo.

2.5.1.3. Produção de cal em processo industrial

A produção de cal pela calcinação do calcário em processo industrial apresenta valores médios da ordem dos 800 $kgCO_2$/t para fabrico de cal cálcica e 900 $kgCO_2$/t para fabrico de cal dolomítica (GHG, 2011).

Sendo que aproximadamente 400 $KgCO_2$/t resultam apenas da transformação química, correspondendo o restante à queima de combustível (Stachera & Casagrande, 2007).

2.5.1.4. Cimento

O cimento tem um elevado consumo energético incorporado resultante da sua produção com fornos a temperaturas entre os 1450ºC e os 1600ºC (CIMPOR, 2009) e da necessidade de arrefecimento brusco do material cozido a fim de o transformar numa rocha artificial ígnea. Além disso, liberta grandes

quantidades de CO_2 durante a cozedura da matéria-prima, seja pela reação química de descarbonatação (50 % das emissões), seja pelo processo térmico com o consumo de combustíveis (40 %), seja com gastos energéticos indiretos como a energia elétrica e o transporte (10 %). A nível mundial, a indústria cimenteira contribui com 5 % para as emissões globais de CO_2 (Worrell, 2001).

As indústrias portuguesas emitem durante a produção de clínquer entre 814 a 870 kg CO_2/t, sendo a média europeia de 868 kg CO_2/t em 2008. Durante o fabrico de produtos cimentícios são emitidos entre 623 a 680 kg CO_2/t, sendo a média europeia de 644 kg CO_2/t (CIMPOR, 2009 e SECIL, 2010). Estas indústrias têm procurado reduzir as suas emissões através de medidas como a mudança do tipo de combustível para a cozedura das matérias-primas e a introdução nos produtos cimentícios de matérias-primas com menor emissão de CO_2, como por exemplo pozolanas.

A indústria cimenteira tem ainda outros problemas ambientais a controlar, a emissão de outros gases poluentes, a produção de resíduos e o impacte ambiental das pedreiras de extração das matérias-primas.

2.5.1.5. Aço

O aço é bastante utilizado na construção civil em perfis e cabos para estruturas de edifícios ou como reforço estrutural dos mesmos, em varões. Este material é produzido através de processos siderúrgicos utilizando minério de ferro acrescido de carbono em quantidades pré-estabelecidas. O ferro é encontrado na natureza em forma de óxido, presente na magnetita e na hematita (Stachera & Casagrande, 2007). O aço pode ser obtido através de dois processos, por fusão em altos-fornos, utilizando coque ou carvão de madeira, ou produzido em forno elétrico de arco. As matérias-primas utilizadas são ferro e calcário ou utiliza-se sucata, permitindo a reciclagem do aço entre 25 % a 95 % de aço.

Em termos de emissões de dióxido de carbono é referido que a produção de 1 kg de aço em alto-forno emite aproximadamente 2494 g de equivalentes de CO_2, enquanto a produção de aço em forno elétrico emite apenas cerca de 462 g de equivalente de CO_2. Ressalvando que a utilização de diferentes percentagens de aço reciclado também corresponde a diferentes quantidades de emissões de

carbono e outras partículas, tornando o processo mais eficiente, sobretudo em forno elétrico. Com este processo de reciclagem pode-se poupar por cada tonelada de aço reciclado 1,25 t de minério de ferro, 630 kg de carvão e 54 kg de calcário (de Spot, 2002, in Gervásio & Simões da Silva, 2005).

2.5.1.6. Areias e britas

Os agregados utilizados no fabrico de betão e argamassas têm também um elevado consumo energético devido aos seus processos de exploração: extração das rochas com recurso a explosivos e máquinas, transporte dentro da área de exploração, britagem e transporte até à obra. Além deste gasto com energia existe ainda um grande impacto ambiental devido à própria extração em pedreiras, produção de resíduos e emissão de gases poluentes como o CO_2. Em Portugal, são utilizados na construção mais de 50 milhões de toneladas de agregados extraídos em pedreiras, praias e leitos de rios e lagos (Cóias, 2004).

2.5.1.7. Construção em terra

O material terra em si, o solo, não requer qualquer gasto energético nem apresenta emissões de CO_2. No entanto, é preciso extrair o solo e transformá-lo em construção ou em produto para a construção. É possível realizar este passos de forma manual, contudo na atualidade, nos países ditos desenvolvidos, é necessária a mecanização destes processos para fazer face a custos de mão de obra e para obter maior rapidez de construção. Mesmo assim, a extração da terra para utilização na construção não é dispendiosa, nem tem impacto ambiental significativo, uma vez que na maioria das vezes é usado solo do local de construção e o solo a aproximadamente a 1m da superfície já é favorável para a construção em terra. E, mesmo no caso de produção industrial de blocos ou tijolos não queimados (Adobe, BTC ou tijolos extrudidos), as empresas produtoras têm princípios de sustentabilidade e cuidam do local de extração de terra, minimizando o seu impacte ambiental.

Em relação às emissões de CO_2, estas dependem do sistema construtivo ou de produção escolhido e do recurso energético selecionado para a mecanização durante a extração e transformação do solo, sendo por isso difícil de obter um

valor característico para construção em terra. No entanto, pode-se observar o exemplo da produção de tijolos de terra extrudidos, método de produção industrial com gastos energéticos durante a extração e transformação do solo de modo intensivo.

Relativamente à energia incorporada, verifica-se que a energia dos blocos de terra, produzidos industrialmente com processos mecânicos, é bastante reduzida apesar do gasto energético durante a extração e produção. A Tabela 1 mostra a diferença de energia incorporada em relação aos materiais de construção convencionais, em BTU (*British Thermal Units*) (Sustainable Sources, 2011).

Tabela 1 – Energia incorporada de vários materiais de construção (adaptado de Sustainable Sources, 2011)

Material	Quantidade	Unidade - BTU
Cimento Portland	42,6 kg saco	381,624 BTU
Cal hidratada	45,4 kg saco	440,619 BTU
Tijolo comum	1 bloco	13,570 BTU
Bloco de betão	1 bloco	29,018 BTU
Bloco de terra (Adobe) produção mecanizada	**1 bloco (10x4x14 cm)**	**2,500 BTU**

Tabela 2 – Emissões de CO_2 de diferentes materiais de construção

Material		kg/t	Referência
Tijolos cerâmicos comuns	Produção industrial	200	Morton et al., 2005 in Morton, 2008
	Produção em pequenas empresas	233 a 255	Schilderman, 2009
Tijolos de terra (extrudidos) Produção industrial		**22**	**Morton et al., 2005 in Morton, 2008**
Blocos de betão		143	Morton et al., 2005 in Morton, 2008
Cal Produção industrial	Cálcica	800	GHG, 2011
	Dolomítica	900	
Cimento		644	CIMPOR, 2009
Aço	Produção em alto-forno	2494	De Spot, 2002, in Gervásio & Simões da Silva, 2005
	Produção em forno de arco elétrico (até 95% aço reciclado)	462	

Pela Tabela 2 pode-se verificar que estes blocos, mesmo sendo produzidos por um método industrial, apresentam o menor valor de emissões relativamente aos restantes materiais de construção apresentados.

É referido ainda que a produção de blocos secos ao ar requer apenas um terço da energia necessária para produção de tijolos idênticos queimados, sendo citado um consumo de 440 kWh/m^3 (quilowatt-hora por metro cúbico) para os blocos "crus", face a 1300kWh/m^3 para os tijolos queimados (M. Westermarck, 1998, in Little & Morton, 2001).

2.5.2. Produção de resíduos

O setor da construção é responsável por mais de 50 % dos resíduos produzidos em Portugal. Estima-se que sejam produzidos no país, anualmente, mais de 5 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (Cóias, 2004). Se parte destes resíduos podem ser reciclados, uma outra parte é encaminhada para aterro e inúmeras vezes outra parcela destes resíduos são despejados de forma ilegal em matas, junto de estradas, ou mesmo em linhas de água.

A construção em terra, se aplicada sem estabilizante, pode voltar à terra uma vez que é um material natural sem qualquer transformação química. A terra estabilizada, face aos materiais convencionais, apresenta um menor impacte ambiental uma vez que a quantidade de ligante utilizada é bastante reduzida, sendo possível de reciclar ou de voltar à terra desde que se utilizem estabilizantes biodegradáveis ou sem impacte para o solo. Além disso, permite um maior controlo de desperdícios em obra, uma vez que a terra é preparada no local consoante as quantidades necessárias.

2.6. Benefícios para saúde

Quem tem a oportunidade de visitar ou viver em edifícios construídos em terra, sejam totalmente em terra ou sejam de estrutura de madeira com argamassas à base de terra, sente-se bem nestes espaços.

É descrito pelo professor Rogers da Universidade de Melbourne (Departamento de Arquitetura) que existe um sentimento de "bem-estar" e "boas vibrações" que tem sido descrito ao longo de décadas por ocupantes de edifícios construídos em terra (Rogers, in Stephen Dobson, 2000).

Existem várias razões para esta sensação de conforto neste tipo de edifícios, estando entre as razões observadas o excelente comportamento higrotérmico, eficiência acústica (se existirem espessuras de parede adequadas), a ausência de libertação de compostos orgânicos voláteis (COV) e a proteção face a redes eletromagnéticas.

2.6.1. Comportamento higrotérmico da construção em terra

A regulação da temperatura e da humidade no interior dos edifícios é de suma importância, pois a perceção do conforto térmico depende da temperatura e da humidade em conjunto. A OMS refere limites de conforto térmicos entre os 18 e os 24ºC e limites de humidade relativa do ar de 30 a 65 % (WHO, 2008). Fora destes limites o ser humano está sujeito a vários sintomas físicos. No caso da humidade podem ocorrer infeções respiratórias, alergias ou outras doenças respiratórias. No caso da temperatura são referidos sintomas para ambiências frias como constrição dos vasos sanguíneos (dedos, orelhas, nariz, pés) e hipotermia e, para ambiências quentes, sintomas como lassidão física e intelectual, transpiração excessiva, depressão e alterações dos ritmos cardíaco e respiratório (Monteiro, 1996).

A construção em terra tem o benefício de proporcionar, simultaneamente, o controlo da temperatura e da humidade no interior dos edifícios, o que mantém a presença de um ar interior salutar. Esta característica resulta sobretudo da higroscopicidade da terra, a sua permeabilidade ao vapor de água que permite que as paredes absorvam e libertem esta humidade, possibilitando o equilíbrio da humidade do ar, evitando condensações e o crescimento de fungos. Relativamente a este aspeto Tom Morton afirma que:

> *"A natureza cristalina das argilas não queimadas e a estrutura porosa dos materiais de terra têm uma capacidade de absorver e libertar vapor de água que é muito maior, tanto em velocidade e quantidade, do que a de qualquer outro material de construção. Isto tem um número de benefícios muito importantes para a construção contemporânea. Esta qualidade dos materiais de terra é de grande benefício na regulação do fluxo na humidade relativa do ar interior, permitindo-lhes absorver a humidade em condições húmidas, armazená-la e libertá-la novamente como ar seco."*
>
> *(Morton, 2008)*

Esta capacidade de regulação do vapor de água em termos físicos ocorre porque as paredes de terra conservam água no seu interior em forma de pontes. A presença desta mesma água é o que determina a resistência e firmeza das ligações dos grãos de terra. Quando ocorrem diferenças de humidade e entre o ar circundante e o ar contido nos poros da parede, parte desta água evapora ou condensa devido às diferenças de pressão criadas pelo vapor de água (Jaquin, 2009).

Em relação ao comportamento térmico, um bom isolamento pode ser obtido por três processos distintos: pela massa térmica, concebendo paredes com espessura suficiente, como por exemplo as paredes em taipa; pela introdução de materiais mais isolantes ou leves na terra utilizada, tornando-a mais leve e isolante, como por exemplo adobe com palha; ou ainda utilizando um sistema de construção misto de terra com placas de isolamento térmico.

2.6.2. Comportamento acústico

O comportamento acústico dos edifícios é bastante importante para a saúde humana. A organização mundial de saúde, OMS ou WHO (*World Health Organization*), refere que a exposição a poluição sonora pode causar não só danos diretos nos ouvidos, mas também danos indiretos para as pessoas.

São exemplo de danos indiretos o desenvolvimento de stress e efeitos somáticos como alteração da pressão arterial e espasmos musculares, efeitos psicológicos como distúrbio do sono e saúde mental e ainda efeitos cognitivos como a concentração e a memória. Podem, também, haver consequências danosas à saúde quer durante o estado de alerta, quer quando o corpo está inconsciente ou se está a dormir, sendo ainda referida a possibilidade de ocorrência de doenças cardíacas aquando da exposição a índices sonoros superiores a 70 dB (decibéis).

De acordo com a Tabela 3 pode-se observar os efeitos do som segundo a sua magnitude em decibéis com exemplos de situações em que podem ocorrer.

Tabela 3 – Magnitude e efeitos do som
(adaptado de Tamburlini G et al. EEA-WHO, 2002, In WHO, 2009)

Exemplo	dB	Efeito
Respiração	0 - 10	Limiar de audição
Conversação em casa	50	Audição normal
Tráfico (15m) ou festa barulhenta	70	Intrusivo, interfere com o uso do telefone, etc.
Fábrica média ou comboio (15m)	80	Possível dano no ouvido
Avião a levantar voo (305m) ou motociclo	100	Danos se mais de 1 minuto de exposição
Sirene ou concerto de rock	120	Limiar de dor humana
Avião a levantar voo (25m)	150	Rutura do tímpano

A construção em terra apresenta duas características que permitem obter vantagem relativamente a outros materiais. A maioria dos sistemas construtivos em terra crua possui espessura suficiente para se obter um bom isolamento ao som aéreo através da própria massa. Aliada a esta característica encontra-se outra que incrementa este isolamento sonoro, a textura rugosa do material terra. Esta particularidade permite que o som se disperse e não seja diretamente refletido como em superfícies lisas originando eco no compartimento (Dobson, 2000).

Relativamente ao som de percussão, ao se pisar um solo à base de terra ou ao bater numa parede construída em terra, a rugosidade do material, permite que esta não apresente som “a oco”, como nas construções leves, nem produza sons incomodativos como os produzidos em superfícies lisas, como por exemplo em revestimentos cerâmicos.

Dobson, 2000, refere ainda um estudo realizado na Austrália em que uma parede construída em taipa com 30 cm de espessura foi testada para avaliação de transferência acústica segundo a *Australian Standard* 1276-1979. Tendo sido obtida uma classe de transmissão de som de 57, ou seja, foram impedidos de atravessar a parede 57 dB (Dobson, 2000). Avaliando as condições definidas para “*Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras*”, pelo Decreto-Lei n.º 96/2008 - *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, RRAE,* (ver Tabela 4), verifica-se que, para a maioria das circunstâncias, este valor é superior ao isolamento exigido.

Tabela 4 – Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea (fonte: adaptado de RRAE, D.L. n.º 96/2008)

Entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos:	
• zonas mistas ou em zonas sensíveis	$D_{2\,m}, nT, w \geq 33$ dB
• zonas sensíveis	$D_{2\,m}, nT, w \geq 28$ dB
Entre compartimentos de um fogo, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar de outro fogo, como locais recetores	$DnT, w \geq 50$ dB
Entre locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores	$DnT, w \geq 48$ dB;
• se o local emissor for um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores;	$DnT, w \geq 40$ dB,
• se o local emissor for uma garagem de parqueamento automóvel	$DnT, w \geq 50$ dB
Entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais recetores	$DnT, w \geq 58$ dB

2.6.3. Ausência de libertação de compostos orgânicos voláteis

Os compostos orgânicos voláteis, conhecidos por COV, são químicos que se evaporam e circulam no ar, seja no interior ou exterior dos edifícios. Grande parte dos COV provém de materiais de construção e decoração no interior dos edifícios (pinturas, mobílias, carpetes, etc.), bem como do uso de desodorizantes e detergentes no quotidiano, levando a que a concentração de COV no interior seja significativamente superior à do exterior. Isto acontece sobretudo em edifícios construídos recentemente, reabilitados ou redecorados, pois os COV emitidos são mais elevados nos primeiros anos.

São exemplo de COV, compostos como o benzeno, tolueno ou formaldeído e na sua maioria são prejudiciais à saúde, sendo muitos deles carcinogéneos, podendo levar à leucemia. Os sintomas mais comuns nos humanos, referidos pela OMS, são: irritações nos olhos e nariz; dores de cabeça; fadiga, redução da função pulmonar; asma e outros sintomas respiratórios (WHO, 2008).

A construção em terra em si mesma não emite COV, mas é necessário ter prudência na escolha de estabilizantes ou aditivos, bem como na seleção de tintas ou vernizes e/ou revestimentos, preferindo produtos mais naturais e sem emissão de COV, normalmente designados por “biológicos”. Além disso dever-se-á ter atenção à escolha de mobiliário e decoração interior, assim como nos detergentes utilizados para limpar as superfícies. E como em qualquer edifício devera ser promovida uma correta renovação do ar interior.

2.6.4. Proteção face a campos eletromagnéticos artificiais e permeância aos naturais

Existem os campos eletromagnéticos naturais e artificiais. Os naturais são gerados pelo campo magnético terrestre e podem ainda ser influenciados por diversos fatores: a atividade solar e lunar; a existência de minerais ferromagnéticos na crosta terrestre em certos locais; a existência de linhas de água e falhas subterrâneas, condições climáticas como o vento e trovoadas e ainda pelos campos eletromagnéticos criados artificialmente. Estes são formados por redes ortogonais estáveis ou variáveis (entre outras encontram-se as redes *Hartmann,* cujo nome se deve ao autor da sua descoberta, Dr.Hartmann, médico na Universidade de Heildelberg na Alemanha (Bueno, 1992 e Dillenseger, 1986)

Estes campos não são prejudiciais, a não ser que exista uma exposição prolongada junto de campos magnéticos mais intensos, o que pode facilmente ser evitado recorrendo à sua deteção com os equipamentos adequados ou simplesmente por mudança do local de permanência (para dormir ou trabalhar) por tentativas até que se verifique conforto e ausência de sintomas causados pelo eletromagnetismo.

Bueno, 1992*,* refere que inúmeros estudos e pesquisas relacionam a permanência em campos eletromagnéticos, sejam naturais ou artificiais, com a presença de sintomas como mudanças na temperatura da pele ou do corpo, dor nas articulações, fadiga, falta de apetite, stress e diminuição de plaquetas no sangue (Bueno, 1992).

Os campos artificiais podem ser gerados no interior ou no exterior dos edifícios. Todas as instalações elétricas, eletrodomésticos ou equipamentos elétricos geram campos elétricos e eletromagnéticos, geralmente de baixa frequência, no interior dos edifícios. Contudo, existem também campos eletromagnéticos de alta frequência, produzidos sobretudo fora dos edifícios, como as linhas de alta tensão, redes de telemóveis, rádio ou televisão, que são ligações sem fios, conhecidas como *wireless*, que servem vários equipamentos como computadores, telemóveis, telefones sem fios, etc.

Relativamente aos efeitos na saúde, o eletromagnetismo artificial, tal como o natural, em si mesmo não é prejudicial, uma vez que até é utilizado em algumas terapias para curar certas doenças. No entanto, se houver uma elevada intensidade e exposição prolongada, estes campos eletromagnéticos podem causar os sintomas já referidos.

Quanto ao eletromagnetismo gerado no interior existem meios para minimizar este efeito através de uma adequada instalação elétrica que possibilite afastar do ser humano as zonas eletromagnéticas.

O electromagnetismo de alta frequência gerado fora do edifício, mas que pode atravessá-lo, pode ser controlado através da utilização de materiais de construção que minimizem ou bloqueiem esta passagem. A construção em terra é um material com capacidade de reduzir a passagem destas frequências, dependendo da espessura dos seus elementos, designadamente paredes.

Um estudo realizado na *Universidade Federal das Forças Armadas* de Munique compara a redução proporcionada por diferentes materiais face às altas frequências eletromagnéticas, utilizadas em redes de telecomunicações (2GHz). Este revela que uma parede de adobe de 24 cm de espessura, com massa volúmica de 1600 kg/m^3, gera uma redução de 24 dB enquanto uma parede com espessura idêntica de alvenaria de tijolo furado, com massa volúmica de 1200 kg/m^3, reduz 17dB e uma parede também de 24 cm de blocos silicocalcários de areia/cal reduz apenas 7 dB (Minke, 2007).

É referido ainda por Dillenseger e Dobson que os campos eletromagnéticos podem ser influenciados pelos metais utilizados na construção, nomeadamente pelas estruturas de betão armado ou construções metálicas que criam a conhecida “Gaiola de Farday” que aumenta a intensidade dos campos eletromagnéticos no edifício. No entanto, não existem estudos conclusivos sobre os seus efeitos. (Dillenseger, 1986 e Dobson, 2000).

A construção em terra não armada de certo não apresentará qualquer tipo de problema, contudo deverá ter-se cuidado na utilização de terra armada.

2.6.5. Menor radioatividade face a alguns materiais de construção

A radioatividade está em todo lado, incluindo o ar e a água, existindo no nosso planeta as radiações cósmicas, por exemplo as provenientes do sol e de outras estrelas, e as radiações terrestres, presentes nos materiais que compõem a terra e em radioatividade criada artificialmente. Como tal, a radioatividade também está presente de forma natural em qualquer material de construção. Os efeitos prejudiciais à saúde ocorrem com a presença massiva de um material radioativo ou com a conjugação de vários materiais que emitem mais radioatividade. Estes efeitos agravam-se se a ventilação ou renovação do ar interior for insuficiente.

Os efeitos na saúde resultantes da exposição à radioatividade estão relacionados com o próprio conceito de radioatividade, a propriedade que alguns elementos possuem de transformar-se de modo espontâneo em outros (Bueno, 1992), causando lesões nos tecidos celulares dos seres vivos. Estas lesões podem ser agudas (imediatas) no caso de exposição a radiações altas, como por exemplo decorrentes de tratamento de radioterapia com exposição acidental a mais radiação, ou crónicas (retardadas) no caso das baixas radiações (MSD, 2011).

As alterações celulares mais importantes estão relacionadas com o DNA e ocorrem sobretudo nos tecidos mais sensíveis como a medula óssea, os órgão genitais, o sistema digestivo e o baço, seguindo-se os órgãos de sensibilidade média como a pele e os pulmões, sendo os músculos os menos sensíveis (Oliveira, 2006). Carmen Oliveira refere que:

> *"O surgimento destes efeitos não significa uma doença. Quando a quantidade de efeitos biológicos é pequena, o organismo pode recuperar, sem que a pessoa se aperceba. Quando a quantidade ou a frequência de efeitos biológicos produzidos pela radiação começa a desequilibrar o organismo humano ou o funcionamento de um órgão, surgem sintomas clínicos da incapacidade do organismo de superar ou reparar tais danos: são as doenças."* *(Oliveira,2006)*

Entre as doenças referidas pela mesma autora destacam-se o cancro e anomalias hereditárias, decorrentes de um efeito tardio, e a radiodermite, decorrente de um efeito imediato (Oliveira, 2006).

A radioatividade nos materiais de construção encontra-se sobre a forma de radionuclídeos naturais como por exemplo os de rádio, ^{226}Ra, tório, ^{232}Th, e potássio, ^{40}K, sendo referida uma atividade média da concentração destes materiais na crosta terrestre de 35, 30 e 400 Bq/kg (bequeréis por quilograma) respetivamente (Haquin, 2008).

O conhecido radão ou radónio, ^{222}Rn, tem origem no rádio, ^{226}Ra, contido nos materiais. A quantidade de radão emitida depende da quantidade de rádio contida no material, da espessura do material e da sua capacidade de emanação (Dillenseger, 1986). No entanto, a avaliação da emissão deste gás relativa aos materiais de construção é complexa de obter, uma vez que tem de ser efetuada "*in situ"* (Haquin, 2008).

Pela Tabela 5 observa-se que a terra enquanto material de construção não apresentava valores de radioatividade significativos, embora seja conveniente verificar este aspeto durante a escolha do solo para construir. Outros materiais de construção apresentam maiores índices máximos de radioatividade, como o cimento (especialmente se tiver cinzas volantes incorporadas), alguns tijolos cerâmicos (dependendo da argila e do tipo de queima utilizadas), revestimentos cerâmicos ou graníticos e alguns subprodutos como o fosfogesso.

Tabela 5 – Índices de radioatividade de alguns materiais de construção em Bq/kg (adaptado de Haquin, 2008)

Materiais	Bq/kg		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Materiais naturais convencionalmente usados			
Areia de quartzo	**3 - 39**	**3 - 56**	**12 - 1008**
Argila	**32 - 53**	**41 - 75**	**518 - 843**
Basalto	10 - 22	10 - 21	231 - 420
Brita	10 - 33	ND - 33	14 - 9333
Calcário	ND - 24	ND - 11	ND - 205
Madeira	ND - 10	ND - 4	4 - 166
Subprodutos industriais convencionalmente usados			
Cinza volante	67 - 760	48 - 232	221 - 735
Zircão	3300 - 3900	680 - 750	45 - 56
Lama vermelha	122 - 568	219 - 496	5 - 101
Fosfogesso	600 - 1500	ND - 160	ND - 300

Tabela 6 – Índices de radioatividade de alguns materiais de construção em Bq/kg (continuação) (adaptado de Haquin, 2008)

Materiais	Bq/kg		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Materiais de construção comuns			
Betão	18 - 67	3 - 43	16 - 1100
Betão leve	10 - 60	6 - 66	51 - 870
Tijolos	7 - 140	8 - 127	227 - 1140
Gesso	1 - 67	0.5 - 190	22 - 804
Cimento	13 - 107	7 - 62	48 - 564
Alguns materiais de revestimento			
Cerâmicas	25 - 193	29 - 66	320 - 1049
Granitos	ND - 160	ND - 354	24 - 2355
Telhas	33 - 61	45 - 66	476 - 788
Mármore	1 - 63	0.4 - 142	9 - 986

Contudo, é ainda mais importante o solo onde se constrói do que os materiais utilizados na construção, uma vez que a radioatividade pode passar através dos materiais. Além disso, a qualidade e radioatividade do solo é muito variável de local para local. Assim, é necessário especial cuidado na seleção do local e do respetivo solo a utilizar na construção em terra.

3. Durabilidade geral e durabilidade face à ação da água

3.1. Introdução

A construção em terra pode ser bastante durável, desde que seja executada com solo favorável a este tipo de construção e com técnicas adequadas e de acordo com as condições do local. Caso contrário, poderão ocorrer problemas como fissuras, sobretudo em rebocos à base de terra, e erosão na superfície causada sobretudo pela ação da chuva, vento, ou outro impacto exterior.

De seguida apresentam-se os principais aspetos sobre a durabilidade das construções em terra em termos gerais, mas, também, mais especificamente sobre a durabilidade face à ação da água.

3.2. Durabilidade

Existem vários fatores que influenciam a durabilidade das construções em terra, apresentando-se de seguida os principais fatores.

3.2.1. Fatores inerentes ao material, sistema construtivo e arquitectura

Entre estes fatores encontram-se:

- **As propriedades do solo utilizado para construir** – A quantidade de argila, areia e silte contida no solo tem de ser adequada à técnica construtiva utilizada. Um solo mais arenoso será mais adequado a técnicas que recorram à compactação como o BTC ou a taipa, enquanto um solo mais argiloso e plástico é mais adequado ao fabrico de adobe ou terra moldada. Existem ainda argilas mais reativas que outras, que poderão influenciar as resistências do solo e a sua durabilidade;
- **A água utilizada** – a quantidade utilizada tem influência sobretudo em técnicas que necessitam de compactação do solo, uma vez que a água influencia a energia de compactação empregue e, consequentemente, nas resistências mecânicas e na permeabilidade do solo (Jalali, 1985);
- **A compactação caso seja utilizada** – A energia e a forma de compactação utilizada, se é estática ou dinâmica, se é de forma manual ou mecanizada, torna o solo mais ou menos denso, com mais ou menos poros e influencia diretamente as resistências e a permeabilidade do solo e, por consequência, a durabilidade (Jalali, 1985);

- **A estabilização utilizada –** O tipo de estabilizante deve ser selecionado consoante as características do solo utilizado. Um solo argiloso torna-se mais durável se estabilizado com cal, enquanto um solo arenoso obtém melhores resultados se estabilizado com cimento. No entanto, em certos solos poderá ser benéfica a estabilização com cal e cimento em conjunto. Além destes estabilizantes também poderão ser utilizados outros estabilizantes ou aditivos, sobretudo nas paredes exteriores e argamassas à base de terra para proteção face à erosão da água;
- **O material e textura da superfície** – a utilização de um material mais resistente à água, seja no próprio material, seja como argamassa de revestimento ou pintura, e uma superfície mais regular resultam numa menor erosão ao vento e á água;
- **A estrutura resistente** – deformações e fissuras provocadas pela cedência da estrutura, como em qualquer edifício, afetam a durabilidade das paredes.
- **Os detalhes construtivos –** é necessária uma arquitetura que seja desenhada para proteger determinados locais nas fachadas, sobretudo nas fachadas com maior incidência de chuva, vento e diferenças térmicas. Os locais que se devem proteger, tal como na construção convencional, são as esquinas, o embasamento e a ligação com a cobertura (beirados).

3.2.2. Fatores externos à construção

Entre estes factores encontram-se:

- **A ação da água –** A água, tal como nas construções convencionais, pode ser responsável por causar deterioração não só nas fachadas, mas também no interior dos edifícios. Como tal, na construção em terra é necessário especial cuidado com este fator;
- **A ação do vento** – O vento quando combinado com a chuva ou areias pode causar maior erosão nas fachadas, sobretudo as mais expostas ao vento;
- **A ação da temperatura –** Tanto o frio como o calor podem trazer degradação na sequência dos efeitos causados por gelo/degelo e molhagem/secagem no material;

- **Os ataques químicos** – a presença de determinados sais no ar, como os sulfatos, podem causar deterioração das argilas (Sherwood, 1962 in Heathcote, 2002);
- **A abrasão ou desgaste** – a construção em terra é sensível ao desgaste por atrito. Assim, na construção de pavimentos de terra é necessário reduzir o desgaste mediante processos de compactação, estabilização do material ou pinturas;
- **A manutenção** – sendo um material natural, os edifícios em terra requerem maior periodicidade de manutenção no sentido de evitar uma possível infestação de plantas, animais ou fungos.

3.3. Mecanismos da ação da água

A água pode propiciar a degradação de vários materiais de construção e a terra, pela sua higrospicidade, se não for convenientemente estabilizada ou protegida, está ainda mais sujeita a danos causados pelos efeitos deste elemento.

A água pode afetar a construção em terra mediantes os seguintes mecanismos de ação:

- **Chuva/vento** – A combinação da ação da chuva e do vento em simultâneo é a principal causa de degradação pela sua forte ação sobre as paredes exteriores. É referido por Heathcote que as paredes de terra que apresentam boa resistência a esta ação de erosão também resistem a outros fatores de degradação como a penetração estática da água e o calor. A severidade deste mecanismo depende da intensidade da chuva e do vento, particularmente da dimensão das gotas de chuva e da velocidade e direção do vento (Heathcote, 2002);
- **Inundação** – o excesso de chuva pode causar efeitos mais severos como as cheias ou inundações, sobretudo onde a permeabilidade do solo é insuficiente. Este aspecto pode agravar a erosão na base dos edifícios, levando mesmo à perda excessiva de material ou de unidades de construção como os blocos ou tijolos na construção em BTC ou adobe.
  Este aspeto pode ser minimizado projetando um embasamento adequado no edifício;

- **Molhagem/secagem** – a ação de ciclos repetidos de chuva seguida de períodos de secagem aumenta as tensões na superfície e leva a maior colapso do que períodos de chuva constante (Heathcote, 2002);
- **Gotejamento e escorrência** – este aspeto particular, promovido pela ação da chuva e formação de orvalho durante a noite, relaciona-se com a erosão causada pela ação da água gota a gota, em superfícies horizontais ou inclinadas, e pelo escorrer da água pelas paredes. Estes dois aspetos podem causar erosão e acumulação de líquenes;
- **Absorção de água por capilaridade** – para ocorrer a ascensão de água por capilaridade tem de existir três condições simultaneamente, a existência de água junto da parede, um caminho possível para a água percorrer e uma força para a mover (Killip, 1984 in Hall & Djerbib, 2005).

  A força intrínseca ao ingresso da água numa parede está ligada aos mecanismos de gravidade, tensão superficial e pressão hidrostática (Oliver, 1997 in Hall & Djerbib, 2005).

  A água infiltrada por capilaridade pode agravar a degradação do material de forma indireta, tornando o solo mais frágil, além de propiciar o crescimento de fungos e aumentar a humidade relativa do ar, condicionando a habitabilidade no interior do edifício;
- **Gelo/degelo –** o efeito das variações térmicas juntamente com a água existente na construção pode ocasionar o fenómeno de gelo/degelo que afeta todo o tipo de construções e a construção em terra não é exceção. Este aspeto pode igualmente levar a fissuração e posterior degradação do material.

  Todavia, existem precauções que se podem ter em projeto para evitar o gelo/degelo, como por exemplo construir as fundações com outro material mais resistente e/ou situar as fundações acima do nível de uma possível formação de gelo. Em relação às paredes, em climas propícios à formação de gelo, é necessário proceder ao revestimento adequado para proteger a terra da ação da água;
- **Condensações no interior dos edifícios –** não é comum existirem condensações na construção em terra. No entanto, quando se utilizam no

interior outro tipo de revestimento as condensações podem ocorrer e levar à infiltração desta água em paredes construídas em terra; e

- **Utilização de água no edifício (cozinhas e casas de banho)** – que de igual modo pode levar à infiltração de água por casualidade ou por rotura nas tubagens, podendo causar danos em paredes de terra.

3.4. Fatores que afetam a durabilidade face à água

Existem diversos fatores que podem condicionar o comportamento da construção em terra face à ação da água, seguindo-se vários exemplos.

3.4.1. Influência da distribuição granulométrica

A quantidade de areia, argila e silte revela-se da maior importância e ainda que as percentagens ideais de cada material devam estar de acordo com a técnica construtiva, existem referências de alguns autores em relação ao que deve conter o solo para obter boas resistências e um bom comportamento face à água. É recomendada a utilização de uma terra com pouca quantidade de elementos grossos a fim de melhorar a resistência à água ao longo do tempo (Houben & Guillaud, 1989).

Foram realizados por Minke, no BRL - *Building Research Labora*tory, Universidade de Kassel, testes de erosão acelerada por jatos de água com recurso a mangueiras, em blocos de terra. Estes revelam que solos com elevada quantidade de silte têm uma erosão de 5 mm de profundidade, com 30 % de argila tem uma erosão de 3 mm e solo com a mesma percentagem de argila, mas com menos finos e mais areia média obtém uma erosão muito pequena (Minke, 2006).

Segundo Hall e Djerbib (2005) a existência de uma menor erosão em solos com areia média, ou mesmo gravilhas, reside no facto de este tipo de solos originar uma maior distribuição das ligações de argila dificultando o percurso da água. Na Figura 2 observam-se dois solos com a mesma quantidade de argila, mas com diferente dimensão de grãos de areia. Observa-se mais coesão e menos permeabilidade no solo com grãos de areia maiores pela existência de

ligações de argila mais efetivas que bloqueiam os poros onde a água poderia passar (Hall & Djerbib, 2005).

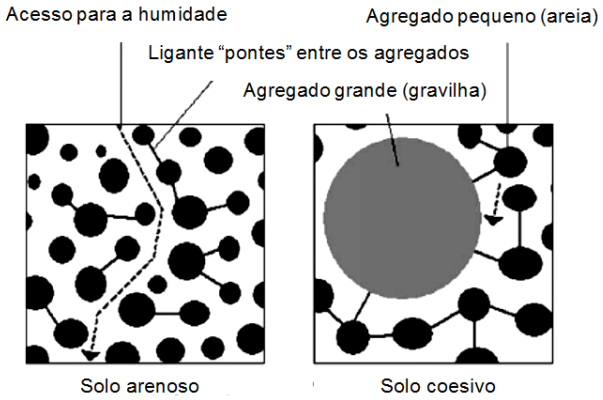


Figura 2 – Diferença nas ligações de argila em solos com diferente distribuição granulométrica (Hall & Djerbib, 2005)

Heathcote apresenta valores de erodibilidade atribuídos a diferentes tipos de solo segundo dados do *Agricultural Research Service,* ARS, dos Estados Unidos da América obtidos pela *Universal Soil Loss Equation* (USLE) considerando um fator K baseado na composição, estrutura e permeabilidade do solo. Quanto maior for este fator maior é a erosão do solo (ver Tabela 6) (Heathcote, 2002).

Tabela 6 – Índices de erodibilidade do solo (adaptado de ARS, 1975 in Heathcote, 2002)

Tipo de solo	Fator de erodibilidade (K)
Arenoso	0,05
Argilo-arenoso	0,14
Argiloso	0,13-0,29
Argilo-siltoso	0,25
Siltoso	0,60

Estes valores embora sejam relativos ao solo comum podem dar indicação do comportamento do solo na construção face à erosão causada pela água. Verifica-se que o solo com maior erosão é o siltoso, contudo, na construção em terra, também se verifica que o solo puramente arenoso também é bastante erodível. Os solos com menor erosão, em concordância com a construção em terra, serão os argilo-arenosos e os arenosos.

3.4.2. Influência do tipo de argila na repelência/absorção de água

O tipo de argilas presentes no solo leva a diferentes comportamentos em relação à presença de água. Diferentes estudos revelam que a caulinite

promove maior repelência à água, seguindo-se a ilite e por último com menor repelência a montemorilonite (McKissocka et al, 2000).

Esta característica também se observa no teste expedito para identificação do tipo de argilas, teste de *Emerson*, descrito por Houben & Guillaud (1989), uma vez que a caulinite se distingue dos restantes minerais porque não se parte nem se dissolve em água destilada. A ilite deverá apresentar uma dispersão parcial e a montemorilonite uma dispersão total na água (ver mais pormenores do teste no capítulo 6).

3.4.3. Influência do tipo de estabilizante

O material utilizado como estabilizante tem efeitos na resistência e durabilidade do solo face à ação da água, devendo ser escolhido consoante as características do solo utilizado. De seguida, apresentam-se algumas observações, referidas por diversos autores, relativas ao efeito de vários estabilizantes na durabilidade do solo.

3.4.3.1. Cimento

O cimento atua como estabilizante face à água, especialmente em solo com pouca argila (Minke, 2006).

Heathcote realizou vários testes usando diferentes solos e notou que para se obter um solo durável no clima de Sydney, Austrália, deve ser considerada uma estabilização com o mínimo de 5 % de cimento (por massa de solo), (Heathcote, 1991).

3.4.3.2. Cal hidratada

Utilizando cal hidratada em solo com argila em quantidade suficiente e existindo uma humidade adequada no solo, os iões de cálcio da cal associam-se com os iões metálicos da argila. Como resultado, ocorrem fortes aglomerações de partículas finas, dificultando a penetração da água (Minke, 2006).

A cal hidratada pode ser tão efetiva como o cimento. Sendo um estabilizante válido face à erosão das chuvas (Kawamura & Diamond, 1975).

3.4.3.3. Cimento / Cal hidratada

Num estudo de 4 anos de exposição em condições climáticas reais não se notaram diferenças entre os estabilizantes, mas de acordo com a maior durabilidade face à água apresenta a seguinte ordem: cimento/resina; cimento; cimento/cal e cal (Guettala et al, 2005).

3.4.3.4. Cal viva

Um documento sobre reabilitação urbana, da Câmara Municipal de Lisboa, refere que a taipa era realizada com saibro argiloso com cal adicionada de pequenas barras de sebo e esta possuía propriedades hidrófugas consideráveis, referindo o seguinte:

> "*A função das argilas era a de reagir com o carbonato de cálcio em fase de extinção, proporcionando elementos resistentes a humidades quer líquidas, quer sob a forma de vapor*". *(CML, 2005)*

É também referida esta extinção da cal viva em conjunto com a areia ou solo por outros autores, mas não referem as suas propriedades face á ação da água (Veiga, 2003, e Teutonico, 1993).

3.4.3.5. Cal hidraulica

Um estudo de Bui et al, mostra que uma parede de solo estabilizado com 5 % da massa seca de cal hidráulica natural (NHL), após 20 anos, não apresenta diferenças significativas de qualidade, exceto algumas fissuras que ocorreram durante a construção, após remoção da cofragem (Bui et al, 2008).

3.4.3.6. Pozolanas

As pozolanas podem ser misturadas com cal e/ou cimento para se obter um efeito cimentício.

A estabilização com pozolana-cal pode ser usada com efeito semelhante à cal hidráulica (BASIN & Pratical Action, 2008).

Estudos realizados na Universidade do Minho revelam que a adição da mistura pozolânica metacaulino/cal (5 % do solo) aumenta as resistências face ao solo

não estabilizado. A adição de 0,4 % de amido ao solo com mistura pozolânica aumenta as resistências, especialmente após saturação (Eires & Jalali, 2007).

3.4.3.7. Gesso

Isik refere que a mistura de 10 % de gesso com 2 % de cal resulta num material com reduzida absorção de água (1 %), (Isik, 1998).

Na produção de blocos de argila não queimada com adição de gesso cartonado, a Akristos realizou testes de erosão com jato de água e revela que segundo o mínimo recomendado, 60 mm/hora, o resultado obtido de 15 mm/hora é considerado satisfatório (Biggs, 2007).

Um estudo de terra estabilizada com gesso, 5 a 30 % de gesso (massa de material sólido) revela que o material obtido tem bons resultados à compressão no estado seco, mas o comportamento em condições húmidas é uma limitação ao sucesso desta aplicação. Sendo recomendada a utilização desta estabilização em climas húmidos apenas em condições restritas (Vroomen, 2007).

3.4.4. Influência da incorporação de aditivos

Na construção em terra são utilizados diferentes tipos de aditivos, em pequena quantidade, com função impermeabilizante que permite melhorar a durabilidade face à ação da água. Estes podem ser naturais ou sintéticos (sabões, betumes, impermeabilizantes comerciais, etc.), de origem mineral (sais, soda caustica, etc.), vegetal ou animal (óleos, gorduras, resinas, colas, caseína, urina, etc.). A influência destes aditivos é abordada em maior pormenor no capítulo 4, uma vez que estes são objeto de estudo da presente tese.

3.4.5. Influência do pH

O pH do solo e/ou dos estabilizantes, água e aditivos utilizados também influenciam a plasticidade, as resistências e, consequentemente, afetarão a durabilidade do solo. É referido que o solo com pH ácido é plástico, enquanto o solo com pH básico é quase líquido, já o pH natural da terra apresenta uma viscosidade intermédia (Anger et al, 2009). Deste modo, em solos muito ácidos será vantajosa a adição de materiais básicos no sentido de poder diminuir a

quantidade de água na mistura e obter uma boa trabalhabilidade e maiores resistências após a cura. Em solos muito ácidos será necessário aumentar a quantidade de estabilizante, como a cal ou o cimento, que possuem um pH básico, para, assim, evitar o efeito da acidez do solo (Kawamura & Diamond, 1975).

3.4.6. Influência da compactação e densidade obtida

Caso a técnica utilizada necessite de compactação, o modo como esta é realizada também influencia a coesão e a resistência obtida.

A compactação estática é menos efetiva que uma compactação dinâmica através do uso de compactadores, sejam manuais ou mecânicos. Considera-se que o impacto de um objeto pesado sobre o solo cria vibrações e movimento das partículas do solo, permitindo que se forme uma massa mais densa e com maior resistência (Minke, 2006).

3.4.7. Influência do tipo de superfície

A superfície duma parede construída em terra crua tem sobretudo influência na durabilidade das paredes exteriores, sujeitas à ação da chuva e do vento. Assim, é necessário especial cuidado na desmoldagem em caso de técnicas de construção com terra compactada ou moldada "*in situ".* Uma superfície regular, sem cavidades onde a água comece a infiltrar-se, evita o desgaste pela ação da água. Além disso, existem diversas maneiras de se obter uma superfície protetora mais resistente à água, seja por polimento, seja por barramento ou pintura da superfície. Estas técnicas são abordadas com mais pormenor no capítulo seguinte. No entanto é necessário ter atenção aos revestimentos demasiado impermeabilizantes, uma vez que quando existe algum orifício ou fissura indesejada, pode resultar numa concentração de humidade maior do que se a parede não tivesse qualquer revestimento impermeabilizante.

A Figura 3 mostra esquematicamente que na parede sem revestimento existe uma distribuição uniforme da humidade, enquanto na parede revestida o volume de humidade entra em maior profundidade na parede (Hall, 2005).

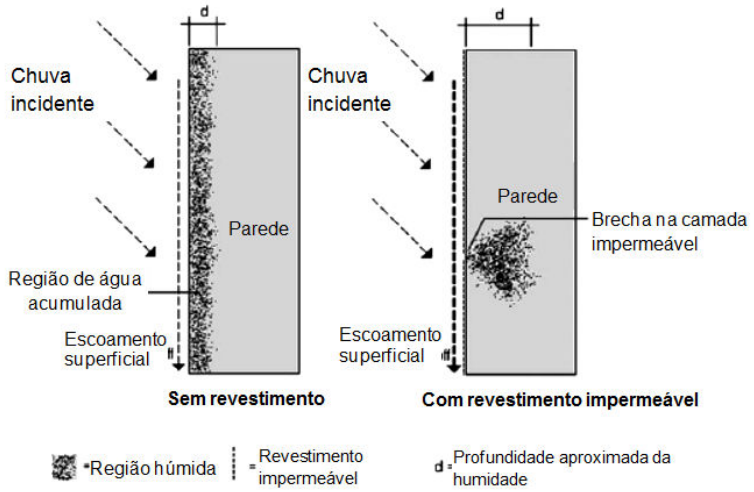


Figura 3 – Concentração de humidade em parede sem e com impermeabilizante (adaptado de Hall, 2005)

Este fenómeno relaciona-se também com o efeito do tempo na erosão do solo referido por Ellison e Morgan. Ellison (1944) observou que o respingar das gotas de chuva é reduzido com o tempo porque a superfície se torna selada. Isto acontece porque o momento de impacto das gotas no solo tem um efeito consolidante que forma uma crosta superficial que fecha os poros do solo, Morgan (1986), (Ellison e Morgan, in Heathcote 2002).

3.4.8. Influência da arquitetura e do processo construtivo

A durabilidade face ação da água é, também, influenciada pelo processo construtivo e pelas soluções arquitetónicas adotadas, sobretudo para as fundações, os embasamentos e a cobertura dos edifícios em terra, sendo referido o seguinte:

> "*Nós vemos que com um desenho apropriado, uma cobertura adequada, um embasamento que evita a ascensão capilar da água pelo solo, etc., as tradicionais casas de taipa (sem cimento ou cal) mostram uma durabilidade satisfatória*". (Bui et al, 2008)

Mariana Correia e Jacob Merten apresentaram um estudo de sistemas tradicionais de prevenção na construção em taipa, nomeadamente no Alentejo. Este estudo expõe diversas soluções empíricas de proteção, como por exemplo, o reforço de paredes, embasamento e beirados, que protegem a construção da erosão causada pela água (Correia & Merten, 2003). Algumas destas soluções são abordadas em maior pormenor no capítulo seguinte, *Métodos naturais de proteção face à ação da água*.

4. Métodos naturais de proteção face à ação da água

4.1 Introdução

É possível proteger a construção em terra da ação da água sem recorrer à impermeabilização ou estabilização do solo com produtos sintéticos.

Entre os métodos naturais que protegem a construção em terra da ação das chuvas e da absorção de água encontram-se: a pormenorização da arquitetura e processo construtivo; os revestimentos na forma de rebocos, barramentos ou pinturas e a estabilização do próprio material terra que constitui a parede.

A maioria dos estabilizantes e aditivos podem ser utilizados quer na terra da parede, quer em rebocos ou pinturas. De seguida, apresentam-se os principais métodos, materiais estabilizantes e aditivos utilizados desde a antiguidade até às inovações mais recentes.

4.2 Pormenorização da arquitetura e processo construtivo

4.2.1 Fundações e embasamentos

A humidade do solo é um dos principais problemas de infiltração de humidade na construção, logo na construção em terra este ponto merece especial atenção nos detalhes construtivos e materiais a utilizar. A seleção dos materiais e do processo construtivo das fundações dependem, sobretudo, da permeabilidade à água do terreno de implantação, devendo-se evitar terrenos onde existe risco de cheias.

Os materiais mais utilizados para as fundações são o betão ciclópico, a alvenaria de pedra e, atualmente, o betão armado.

Como detalhe construtivo é favorável elevar as fundações até uma altura superior à cota do terreno como forma de dificultar um pouco mais a ascensão da água na parede.

A principal função dos embasamentos é proteger a fachada dos salpicos de água que cai do beirado. Assim, a altura deste revestimento de proteção está também relacionada com o balanço do beirado, sendo aconselhada uma altura entre os 30 e os 60cm (Teixeira & Belém, 1998).

Para o embasamento são utilizadas as alvenarias de pedra, tijolo queimado, blocos de betão prefabricados ou blocos de terra compactados com maior quantidade de cimento ou é utilizado o betão armado como continuação das fundações. Por vezes o embasamento é ainda rebocado para maior proteção.

Na construção tradicional em taipa alentejana é referido que o embasamento nas construções em taipa era quase sempre em pedra, com mais 30 a 50 cm acima da cota do pavimento inferior, a fim de evitar a absorção de água por capilaridade (Correia & Merten, 2003).

4.2.2 Paredes e cunhais

O reforço das paredes e cunhais ainda que tenha como principal função melhorar as resistências mecânicas do material de construção e do edifício também é importante no sentido de evitar o aparecimento de fissuras e posteriores infiltrações de água ou mesmo a desagregação do material exposto às intempéries.

Na construção tradicional em taipa ou adobe, sempre que a terra utilizada para construir era demasiado arenosa e não permitia uma boa coesão eram incorporados outros materiais na mistura como por exemplo pedaços de telhas ou tijolos cerâmicos ou mesmo materiais orgânicos como bolotas ou pequenos ramos. Além disso as paredes eram também reforçadas colocando material de reforço por camadas horizontais como fiadas de pedra, pedaços de telha, ou "tijolo burro" envolvidos por argamassa à base de cal. Também era comum utilizar a própria argamassa de cal e areia em camadas como reforço da parede (Correia & Merten, 2003 e Teixeira & Belém, 1998).

4.2.3 Revestimento de fachadas

Sempre que o local de construção tenha índices de pluviosidade consideráveis é pertinente proteger as paredes construídas em terra, sobretudo se o solo utilizado não for por si mesmo resistente. Para tal, as paredes podem ser protegidas através de:

- Rebocos, barramentos ou pinturas que tem de ser renovados periodicamente, funcionando como camadas de sacrifício;

- Revestimento com outros materiais de construção, como madeira ou pedra em placas, mediante um sistema de fachada ventilada; ou
- Utilizando o sistema de parede dupla, sem ou com caixa de ar, utilizando outro material para a parede exterior, como por exemplo as alvenarias de pedra ou de tijolo cerâmico face à vista.

Relativamente à construção tradicional portuguesa encontram-se paredes com e sem reboco, dependendo das zonas climáticas e também do uso a que se destina o edifício. Em algumas regiões do Alentejo, por exemplo, encontram-se muitos edifícios de taipa sem reboco, ou com reboco apenas na fachada principal e em locais com maior fragilidade como no embasamento, no contorno de vãos ou em juntas e buracos da taipa (Correia & Merten, 2003).

No caso de se rebocar, caiar ou pintar as paredes é importante ter em conta a ação da água da própria parede. Este revestimento não deve ser aplicado simultaneamente nos dois lados da parede, mas deve-se sim revestir o lado interior, deixar secar bem e só depois revestir o lado exterior da parede (Teixeira & Belém, 1998).

4.2.4 Vãos de portas e janelas

É também necessário proceder ao correto dimensionamento e reforço estrutural dos vãos no sentido de evitar o aparecimento de fissuras que são um caminho aberto para a passagem da água. Sendo, também, importante o revestimento das laterais dos vãos, peitoris e soleiras, uma vez que estão mais expostos à ação das chuvas. Neste caso é comum a utilização de diversos materiais como madeira, pedra, tijolo queimado ou betão.

Para construção em BTC é recomendado por Guillaud et al (1985) o seguinte:

- Colocação de pingadeira sob o lintel. As projeções fora do plano da parede devem ser evitadas;
- Procurar resolver os problemas de condensação que podem surgir em pontes térmicas (o que pode ser feito através da colocação de material isolante entre o BTC e a caixilharia);
- Estabilização reforçada, rebocando, ou cobrindo juntas na fachada externa, principalmente os lados das aberturas (em regiões de alta pluviosidade);

- Impermeabilização sob o peitoril.

Na construção em taipa tradicional é referida a utilização de alvenaria de "tijolo de burro" ou de pedra em volta dos vãos numa região alentejana (Correia & Merten, 2003 e Teixeira & Belém, 1998).

4.2.5 Coberturas e beirados

Em zonas de grande pluviosidade, a parte superior das paredes é um dos pontos que poderá sofrer maior erosão pela água se não for devidamente protegido. Como tal, é comum e conveniente a utilização de coberturas inclinadas com outro material de construção com avanço além das paredes exteriores protegendo as mesmas, evitando que a água escorra.

Na construção tradicional em taipa "alentejana" é também comum a execução de beirados, utilizando-se mesmo em algumas regiões cápeas e cimalhas de tijolo cozido (Correia & Merten, 2003).

No entanto, em climas mais secos é comum a utilização de coberturas planas ou em arco revestidas em terra e, neste caso, são utilizadas argamassas de revestimento como proteção. Estas são renovadas periodicamente, sendo mesmo por vezes sobrepostas, sem remoção da camada anterior. Este procedimento é, também, utilizado no revestimento das paredes.

4.2.6 Ligação entre diferentes materiais

Na taipa "alentejana" foi também verificada a utilização de barro como elemento de proteção entre materiais de diferentes composições. Esta situação encontrou-se no envolvimento de madeiras, para evitar a degradação desta em contacto com a terra, caso haja presença de humidade, como por exemplo, na entrega das vigas no topo das paredes (Correia & Merten, 2003).

4.2.7 Água no interior dos edifícios

A proteção face à água também deve ser tida em conta no interior dos edifícios com revestimentos adequados ou com utilização de outros materiais de construção nas zonas húmidas como casas de banho e cozinhas, nomeadamente junto de lavatórios e banhos.

Deve existir, ainda, um especial cuidado com as tubagens, concentrando o traçado das mesmas ou fazendo-as passar pelo exterior das paredes se possível. Isto, porque o material terra, se não for estabilizado com materiais que reduzam a absorção de água pode causar alguma degradação da parede quando em contacto com a água. Este problema poderá ser solucionado utilizando-se um solo convenientemente estabilizado ou revestido com materiais mais hidrófugos nestas áreas específicas.

4.3 Rebocos, barramentos e pinturas como camadas de sacrifício

Desde a antiguidade, em qualquer tipo de construção, incluindo a construção em pedra ou em terra, eram utilizados revestimentos realizados por camadas que serviam de proteção à agressividade do meio ambiente. Este eram, assim, ciclicamente desgastados e repostos, com ou sem remoção da camada antiga. Como tal, estas camadas são consideradas camadas de sacrifício e são referidas por Aguiar como:

> *"(…) camadas protetoras ciclicamente reparáveis ou renováveis (como é o caso dos rebocos e pinturas com cal), funcionando como garantia da continuidade e da durabilidade da estrutura arquitetónica, ao longo dos séculos."* *(Aguiar, 1998)*

4.3.1 Rebocos

O método tradicional mais utilizado para proteção das construções em terra é a aplicação de argamassas de reboco à base de terra ou argila, variando a sua composição segundo a região, utilizando-se diferentes quantidades de solo ou argila e diferentes quantidades de estabilizante, sobretudo cal, e fibras e/ou areia para evitar a fissuração.

A argila, em si mesma, é resistente à água, uma vez que as plaquetas constituintes da argila expandem em contacto com a água formando uma barreira, contudo esta não impede totalmente a passagem da água, apenas faz com que a passagem da água através da parede retardada (Guelberth & Chiras, 2005). Como tal, a argila é utilizada no fabrico de argamassas de revestimento interior ou exterior. Contudo, estas argamassas requerem alguns cuidados no fabrico e na aplicação em camadas e na manutenção, uma vez

que a ultima camada aplicada será desgastada devendo ser considerada uma argamassa de sacrifício.

É comum a aplicação de duas camadas, à semelhança do reboco convencional, sendo que na primeira camada é necessária a introdução de areia ou palha ou outro material fibroso para evitar o aparecimento de fissuras, especialmente se existir um elevado teor em argila. A segunda camada pode conter mais argila, mas é aplicada numa camada de fina espessura.

A palha e outras fibras como crina de cavalo, por exemplo, utilizadas como reforço das resistências mecânicas na construção em terra, também apresenta um comportamento benéfico em relação à proteção face às chuvas. As fibras provocam uma dispersão da água por camadas sucessivas ao longo da superfície exposta reduzindo o impacto da água e a erosão, bem como reduz a quantidade de água que atravessa a parede (Crocker, 2000).

4.3.2 Barramentos de acabamento liso ou polido

Enquanto os rebocos tradicionais são compostos por várias camadas espessas com a função de regularização e proteção, os barramentos consistem num fino sistema de proteção e decoração aplicado em várias subcamadas, podendo ser utilizado no exterior ou interior dos edifícios. Estas finas camadas são realizadas com pastas de cal que podem ser pigmentadas, sem necessidade de pintura posterior, sendo com frequência polida a última camada em simultâneo com uma pintura fina. Esta solução permite utilizar várias técnicas de decoração como stuccos, fingidos, esgrafitos e pinturas.

O polimento é realizado com o auxílio de talochas de alisar e pedras de polir, sendo adicionados ainda alguns materiais que facilitam a tarefa de polir e permitem aumentar o brilho da superfície como o pó de talco ou pó de pedra, óleos e ceras naturais (Cenfic, 2010).

Em termos históricos, é referida a existência de barramentos lisos antes de Vitrúvio (*Marcus Vitruvius Pollio*). Por exemplo, Aguiar refere que:

> *"A necessidade de conseguir uma superfície lisa adequada à receção da cor levou a que se desenvolvessem técnicas ancestrais (referidas por Vitruvio) como os "guarnecimentos" ou "barramentos", ou seja uma camada de acabamento final feita*

fundamentalmente à base de pasta de cal, com pequena espessura de recobrimento (aproximadamente 3mm) a qual constituía uma ótima base de aplicação da cor.

Extremamente lisa e plástica, muito resistente e extremamente durável, esta camada de barramento carregava-se por vezes com pigmentos, obtendo-se uma espessa camada de cor que sobrevivia aos desgastes físicos e atmosféricos ao longo de décadas. Outras vezes incorporavam-se determinado tipo de inertes, como o pó de pedra, simulando diferentes tipos de materiais nobres, como o mármore. O expoente destas técnicas situa-se, entre nós, no período que decorre entre os finais do séc. XVIII e todo o séc. XIX, registando-se a sua continuidade até à segunda metade do século XX." *(Aguiar, 1998)*

Verifica-se, ainda, que a técnica do barramento polido esteve sempre associada aos fingidos ou à imitação de outros materiais, usualmente a imitação de pedra. Esta técnica era utilizada não apenas por mera opção estética, mas por necessidade de proteção. Aguiar refere que:

"Os gregos fingiam mármore para recobrir o mármore de muitos dos seus templos, e que os romanos fingiam tijolo para recobrir o tijolo burro de alvenarias Porquê? Certamente que não por tolice ou ignorância, mas sim porque se conseguia proteger, deste modo esses monumentos, cobrindo-os com um revestimento que assegurava duas importantes funções: a estética, e a de uma "camada sacrificial" que sofria os principais embates atmosféricos, sendo por isso ciclicamente reparada ou renovada, garantindo a continuidade futura do edifício construído em terra." *(Aguiar, 2001)*

Um estudo realizado pelo LNEC sobre a conservação e restauro de revestimentos exteriores antigos, do séc. XVIII e XIX, na zona de Lisboa refere nas suas conclusões o seguinte sobre a técnica do barramento:

"A muito comum utilização de uma ou mais camadas de barramentos, ou guarnecimentos, feitos com pasta de cal (ou pasta de cal e pó de pedra ou ainda pasta de cal e areia fina siliciosa), enquanto camadas de apresentação final da arquitetura, mais duráveis do que as pinturas de cal, com acabamento das superfícies em texturas muito finas (similares à expressão típica dos estuques) o que inibia o depósito de sujidades exteriores, facilitando a limpeza das fachadas, sendo estes barramentos deixados à cor natural ou pigmentados na própria massa com óxidos de ferro (terras)."

(Tavares et al, 2003)

A elevada proteção às intempéries que esta técnica de barramento polido propicia mostra que pode ser utilizada na construção em terra com sucesso, existindo o exemplo de técnicas antigas similares, como o *Tadelakt* oriundo de Marrocos e o *Qudad* do Iémen. Carole Crews refere também a existência de

rebocos lisos na Índia e no novo México dando o exemplo de uma antiga construção numa cave *Anasazi* nas ruínas de *Tsankawi* (Crews, 2010).

4.3.3 "*Tadelakt*"

Tadelakt é uma técnica tradicional de barramento polido proveniente de Marrocos e seu nome provem do verbo marroquino "*dellek*" que significa esmagar. Este termo tem que ver com o método de polir uma vez que se utiliza uma pedra com a qual se exerce uma compressão sobre o barramento com movimentos circulares. Deste modo obtém-se uma superfície mais compacta e resistente à água, sendo utilizada no exterior e interior dos edifícios, incluindo pavimentos, bancadas e bases de duche.

Historicamente, é referido que a técnica começou por ser utilizada para impermeabilizar cisternas de reserva de água e, posteriormente, em banhos públicos, banhos turcos e palácios, cujos métodos de aplicação foram passados de geração para geração pelos povos Berberes.

Atualmente existem diversos produtos na Europa que derivam desta marroquina sobretudo para utilização em decoração, sobretudo de luxo, devido ao elevado custo de aplicação.

Os materiais utilizados neste revestimento são a cal, areias de granulometria fina, argila, pó de mármore e sabão à base de azeite durante o polimento.

4.3.4 "*Qudad*"

O *qudad*, *qudâd ou qadhat* é um método antigo e tradicional do Iémen, situado no sul da Arábia, para proteção das construções em terra e pedra em edifícios e sistemas de irrigação de água, conforme documentado na Figura 4. É também utilizado como acabamento decorativo, pelo seu aspeto uniformemente liso, no interior ou exterior dos edifícios, sobretudo edifícios religiosos ou mais ricos (ver Figura 5). É um processo construtivo que tem vindo a ser recuperado, uma vez que caiu em desuso pela sua morosidade e cuidados de aplicação, sobretudo quando surgiu o cimento cuja aplicação é mais fácil.

Qudad é uma argamassa composta por cal (*nûra*) e um agregado fino, como areia fina, seixos pequenos ou cinzas vulcânicas, aplicada em três a cinco camadas. As cinzas vulcânicas são comuns em muitas regiões deste país e torna esta argamassa mais durável devido às suas características pozolânicas, uma vez que se produz uma substância hidráulica semelhante ao cimento.



a **b**

Figura 4 – a - Sistema de irrigação de pedra e *qudad* (parte cortada); b - parede com camada de *qudad* de 20cm (parte cortada) (Weiss & Gerlach, 2009)

As proporções utilizadas na mistura, ajustadas a cada camada, são: duas partes de agregado para uma de cal (primeira camada); uma parte de agregado para uma parte de cal (camadas intermédias) e uma parte de agregado para duas de cal (camada superficial).

A primeira camada com cerca de 5 cm de espessura é a que requer um maior cuidado, sendo aplicada sobre as paredes de terra de modo a colmatar todas as fendas e interstícios existentes. Para tal, recorre-se à ajuda de uma pedra de rio, de forma espalmada com a dimensão pouco maior que uma mão (10 a 15cm), que se bate repetidamente sobre a mistura. Este processo continua durante três ou quatro dias até se obter a espessura desejada e até que a superfície esteja húmida e lisa para que se possa aplicar a camada seguinte, pintando-se entre cada camada com água de cal.

A segunda camada e as seguintes são polidas também com uma pedra até se obter a aparência de mármore e até que desapareçam todas as fissuras.

A camada de acabamento consiste na aplicação de gordura animal que protege temporariamente o *qudad* fresco das chuvas até que este possa por si só ser resistente á água (Al-Radi, 2005).

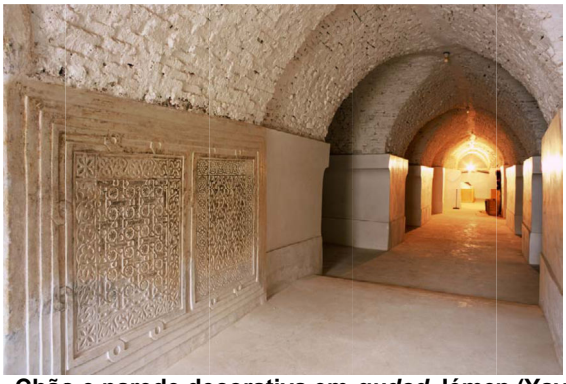


Figura 5 – Chão e parede decorativa em *qudad*, Iémen (Yavuz, 2004)

Para aplicação de *qudad* é necessário que as superfícies estejam estabilizadas, especialmente as coberturas. Deste modo, é costume esperar seis meses, passando mesmo uma estação de chuva, antes de ser aplicado o *qudad,* para prevenir o aparecimento de fissuras. (Yavuz, 2004).

4.3.5 Pinturas

Tal como os rebocos e os barramentos as pinturas também tem a função de proteção face à água além da sua função decorativa.

Na construção tradicional em terra é comum a utilização de pinturas naturais à base de cal, seja em pasta ou em pó, seja cal hidratada com óleos, gorduras ou caseína, ou mesmo de cal hidráulica. As tintas com óleos ou caseína (proteína extraída do leite ou de algumas plantas leguminosas como a soja) são mais impermeáveis à água, mas mantêm a permeabilidade ao vapor. São, de igual modo, utilizadas tintas à base de silicatos (cujo principal constituinte é o silicato de potássio) também permeáveis ao vapor (Houben & Guillaud, 2008 e Crews, 2010).

A cor conferida às tintas é obtida pela incorporação de pigmentos naturais ou sintéticos, podendo ainda ser utilizadas algumas cargas como caulino, pó de pedra, areia fina ou mesmo terras de diferentes cores (Crews, 2010).

Em relação às tintas de cal a principal vantagem, como elemento de proteção face às ações da água, é a elevada permeabilidade ao vapor de água, em simultâneo com uma elevada impermeabilidade à água (CMS, 2011).

Relativamente à durabilidade destas tintas é referido que as tintas de silicatos tem maior resistência aos agentes atmosféricos, chuva e luz solar, do que as

tintas à base de cal, existindo uma maior conservação da cor. Esta durabilidade resulta da forte adesão ao substrato e resistência da tinta e da sua estrutura microcristalina que reflete a luz e a radiação do calor, minimizando o aparecimento de fissuras na superfície (CMS, 2011).

Deve-se, no entanto, evitar a utilização de produtos sintéticos, como as atuais tintas plásticas, tintas de silicone (produzidas com resinas de silicone e acrílicas) ou tintas de pliolite (à base de polímeros acrílicos) ou outras similares, uma vez que este tipo de produtos é demasiado impermeabilizante ao vapor de água. O material terra é poroso e absorve a humidade do ar e estas tintas impedem as paredes de "respirarem" e libertarem esta humidade. Se tal acontecer é obstruído o benéfico controlo higrotérmico deste tipo de construção, podendo causar a degradação da parede há medida que a humidade se vai instalando na mesma ou provocando condensações no interior do edifício.

Num estudo comparativo de revestimentos por pinturas realizado por Vânia Brito a autora conclui o seguinte sobre a permeabilidade ao vapor das tintas testadas:

> *"Alguns revestimentos por pintura revelaram ser bastante permeáveis ao vapor de água, como é o caso das tintas de cal, cuja elevada permeabilidade está de acordo com os resultados obtidos para caiações em outros trabalhos, assim como as tintas de silicatos.*
>
> *As tintas de resinas de silicone e as tintas de resinas de hidro-pliolite não apresentam tão bons resultados no que diz respeito à permeabilidade ao vapor de água, contrariando deste modo as informações técnicas fornecidas pelos fabricantes. Na realidade, algumas destas tintas apresentam um comportamento bastante próximo do de uma tinta "plástica" ou mesmo pior, no caso do suporte húmido, não representando pois uma mais-valia neste aspeto." (Brito, 2009).*

4.4 Estabilização com cal e pozolanas

Pozolana é um material de elevada finura que por si mesmo não é cimentício, mas quando adicionado à cal se torna cimentício na presença de água. Existem pozolanas naturais, como pedras, areias ou cinzas de origem vulcânica ou terras diatomáceas, e pozolanas artificiais que resultam do

tratamento térmico a temperaturas entre os 600 e os 800ºC, como o metacaulino originário do caulino, pozolanas resultantes de desperdícios da indústria cerâmica (pó de tijolos ou telhas) ou do vidro, ou mesmo cinzas de origem orgânica.

As argamassas pozolânicas (compósitos de cal com pozolana) são conhecidas há mais de 2000 anos, utilizadas por gregos e romanos, embora tenham sido abandonadas devido ao longo período de cura necessário para uma resistência mecânica suficiente, incompatível com a atual rapidez de construção (Malhotra & Mehta 2000, in Eires, 2007). No entanto estudos realizados por Eires & Jalali mostram que existem aditivos como o cloreto de cálcio que aceleram e aumentam as resistências das argamassas com metacaulino. Além disso verificaram que a utilização do metacaulino para estabilização de solo compactado também apresenta melhores resistências do que o solo simples (Eires, 2007).

Relativamente à hidraulicidade das pozolanas já Vitrúvio referia o seguinte:

> *"Se for acrescentada à areia fluvial ou marinha uma terça parte de cerâmica moída e peneirada, a argamassa terá um melhor desempenho." (…)*
>
> *Existe uma espécie de areia que, naturalmente, possui extraordinárias qualidades. Esta é encontrada em Baiae e no território circundante do Monte Vesúvio. Se misturado com cal e cascalho, ela endurece tanto debaixo de água como em edifícios comuns."*
>
> *(Vitruvius, Séc. I a.C.)*

Esta propriedade, dada pela mistura pozolana-cal, pode ser benéfica na estabilização do próprio material terra, mas terá maior vantagem na estabilização de argamassas de revestimento à base de terra e cal, existindo mesmo um exemplo milenar de utilização de pozolana-cal na estabilização de construções e argamassas em terra, o *sarooj*.

4.4.1 "*Sarooj*"

No Irão, para proteger as construções em terra da ação da água, utilizava-se um material ligante bastante durável designado por *sarooj*, uma mistura pozolânica à base de terra argilosa (areia e argila), cal, cinzas e outros aditivos, dependendo do tipo de aplicação. Esta mistura resulta num material semelhante ao cimento hidráulico. O *sarooj* contem elevado teor de silicatos,

sendo um bom produto para o restauro de edifícios, não podendo ser substituído por argamassas de cimento, uma vez que estas são insatisfatórias para este tipo de aplicação (Hutton, 2010). No entanto, o termo *sarooj* é também utilizado para designar argamassas em que se utiliza este material como ligante.

Este material era largamente utilizado na cidade de Oman como material de construção em estruturas hidráulicas, edifícios e instalações militares (Hago et al, 2000).

Na bibliografia é referida a existência vários tipos de *sarooj.* Um de endurecimento aéreo para aplicações correntes, feito à base de cal viva e cinzas misturadas 12 horas antes da sua utilização. Para um endurecimento hidráulico é preparado um *sarooj* especial pela adição de argila queimada. Esta argila queimada é obtida dos chamados *nanaks,* discos em forma de pão feitos com argila e estrume secos ao ar e posteriormente queimados juntamente com estrume, folhas e arbustos por 12 horas, sendo depois transformados em pó (Malekzadeh, 2007).

A argamassa comum mais utilizada e conhecida como *sarooj* resulta de uma mistura de argila, cal, cinzas e vagens de plantas para evitar o aparecimento de fissuras. Esta prepara-se misturando a argila e a cal durante dois dias, sendo posteriormente adicionadas as cinzas e as sementes em cuidado e demorado processo de mistura. A argamassa é depois aplicada em paredes e tetos e polida com uma pedra (Malekzadeh, 2007).

Esta argamassa *sarooj* é utilizada como revestimento de depósitos de água típicos do Irão, designados por *āb anbār,* e de reservatórios de gelo, os *Yakhchal*. Para estas aplicações são, também, é também referida a utilização de outros aditivos, como claras de ovo e pelo de cabra (Wikipedia, 2010).

4.4.2 Reação pozolânica obtida pelas argilas do solo na presença de cal

Durante o processo de estabilização da terra com cal também ocorrem reações pozolânicas lentas e influenciadas pelas propriedades do solo, pH e temperatura. Após as primeiras trocas iónicas e floculação das argilas com a

adição da cal no solo, seguem-se reações cimentícias que são descritas do seguinte modo:

> *"As reações pozolânicas originam a formação de silicato hidratado de cálcio e/ou aluminato de cálcio através de reações entre a cal, a sílica e a alumina livres nas partículas de argilas. A interação entre a cal e a argila conduz à dissolução da sílica e da alumina das partículas do solo no ambiente de elevado pH originado pelas moléculas de $Ca(OH)_2$. Os materiais dissolvidos combinam-se com os iões de cálcio formando vários tipos de agentes cimentícios, que vão interligar as partículas argilosas. Estes materiais constituem a maior contribuição para o incremento da resistência verificada nas misturas entre o solo e a cal."* (Santos, 2010)

Estas reações são lentas também devido à reação de carbonatação, resultante da interação entre a cal e o dióxido de carbono, que forma materiais cimentícios mais fracos, como o carbonato de cálcio que também prejudica o desenvolvimento das reações pozolânicas (Santos, 2010).

4.5 Estabilização com biopolímeros naturais

Polímeros são macromoléculas ou moléculas orgânicas de elevada massa molecular relativa com unidades de repetição menores (os monómeros). Estes contêm na sua estrutura carbono e hidrogénio. As proteínas, os polissacarídeos, os carbohidratos e os ácidos nucleicos são exemplos de polímeros orgânicos. Porém, estes compostos podem ser de origem natural ou artificial, de origem biológica (vegetal ou animal) ou mineral. Deste modo, considera-se no presente estudo que os biopolímeros são polímeros orgânicos de origem natural e biológica e sem sintetização em laboratório.

A incorporação de biopolímeros na construção em terra realiza-se desde longa data e estes eram utilizados, sobretudo, com o objetivo de melhorar o comportamento da terra face à água, existindo inúmeros exemplos de biopolímeros que têm vindo a ser adicionados como estabilizantes na construção em terra. Os de origem vegetal, como as farinhas, amidos, gomas de catos, óleos, ceras ou resinas de plantas e os de origem animal, como as gorduras animais, o soro de leite ou caseína, a clara de ovo, o sangue, os excrementos e a urina (Eires et al, 2010).

4.5.1 Efeito dos biopolímeros na construção em terra

A influência da adição de biopolímeros na terra resulta dos efeitos reológicos desenvolvidos na argila que constitui o solo:

- Efeito dispersante que permite uma redução da quantidade de água para se obter a mesma viscosidade, através de moléculas de pequeno tamanho e forte densidade de carga superficial, como por exemplo, celulose, amido ou ácidos orgânicos;
- Efeito de religar as partículas de argila através de moléculas de cadeias longas de pouca carga superficial, como a celulose, o amido, a caseína e as gomas. A generalidade dos polímeros adesivos como as gelatinas, bem como diversos sais e alguns ácidos tem este efeito nas argilas.

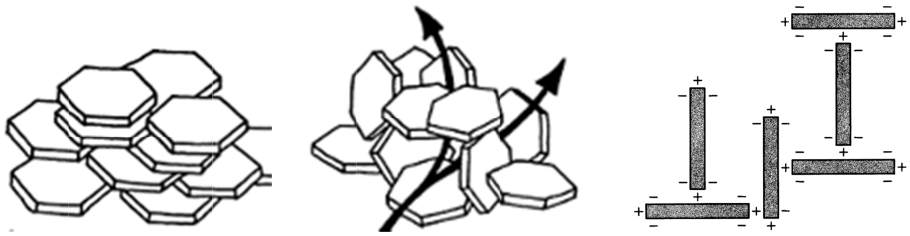
  Este efeito permite aumentar a resistência da argila através da ligação criada entre as partículas. Esta ligação resulta essencialmente de três tipos de forças de atração. A atração pela diferença polar pela existência de partículas de carga diferente (positiva e negativa). As forças de atracão *Van Der Waals,* causadas pelo movimento dos eletrões das diferente partículas e estabelecendo ligações de atração entre estas. E também a força gravítica que mantém as partículas próximas entre si (Hamer & Hamer, 1975);
- Efeito hidrofóbico (repelente de água) pode ser propiciado pelos triacilgliceróis, também conhecidos como triglicerideos (combinação do glicerol com ácidos graxos ou gordos). Estes compostos encontram-se nas gorduras, óleos, ceras, na albumina presente no leite e na clara de ovo.

  Esta característica é obtida através das suas moléculas anfifílicas (possuidoras de uma parte hidrofílica e outra hidrofóbica). A parte hidrófilica é absorvida pelas partículas de argila, enquanto a parte hidrofóbica fica na superfície destas que em contacto com o ar forma uma película que dificulta a passagem da água (Fontaine, 2009); e
- Em simultâneo, nestes compostos, verifica-se, ainda, o efeito de controlo de humidade através de moléculas de comportamento higroscópico, ou seja que absorvem humidade, permitindo trocas de vapor de água com o ambiente.

Pode-se constatar que o principal efeito em termos reológicos é a capacidade que os biopolímeros têm de alterar as cargas eletrostáticas das placas de

argila, que as mantém ligadas paralelamente entre si (*face com face*) (Figura 6 - a), originando a sua dispersão e posterior atração do tipo face com borda (Figura 6 - b).

A intensidade destes efeitos dependerá também do tipo de argilas presentes no solo, da sua distribuição granulométrica, da matéria orgânica contida no solo, do pH e das reações químicas e físicas produzidas pela introdução de um estabilizante no solo.



a b c

Figura 6 – Placas de argila: a - disposição face com face; b - face com borda e c – polaridade placas de caulinite (a e b - Hamer & Hamer, 1975; c – Murray, 2007)

Em ambientes básicos, como por exemplo em argamassas à base de cal ou em solo estabilizado com cal, os triacilgliceróis, constituintes dos óleos ou gorduras, sofrem uma hidratação resultando na formação de sais insolúveis de cálcio de ácidos gordos. Estes sais são hidrofóbicos e interligam-se bem na argamassa ou no solo estabilizado devido a interação com cálcio proporcionando a repelência à água (Čechová, 2009).

Embora neste tipo de estabilização a redução da absorção por capilaridade seja sempre eficaz, o efeito da adição de óleos ou gorduras em outras propriedades como a resistência nem sempre é benéfico, ocorrendo por vezes diminuição das resistências mecânicas. Além disso, os mecanismos ocorridos na microestrutura obtida não são claramente conhecidos (Čechová, 2009).

No caso da estabilização de solos os efeitos da adição de óleos ou gorduras dependerão, sobretudo, da composição dos próprios biopolímeros, das características dos materiais constituintes do solo e do tipo de cal utilizada para a estabilização. Todos estes componentes podem influenciar as trocas iónicas entre partículas do solo, bem como as reações de carbonatação e pozolânicas ocorridas ao longo do tempo.

4.5.2 Técnicas antigas de utilização de biopolímeros

Existem diversos exemplos de utilização de biopolímeros como adição na construção em terra a fim de melhorar a impermeabilidade à água e consequentemente a durabilidade do material face à ação das chuvas.

Seguem-se alguns exemplos de métodos tradicionais de impermeabilização com biopolímeros passados de geração em geração.

4.5.2.1 Cal hidratada juntamente com óleos ou gorduras

A incorporação de óleos ou gorduras tem sido o processo de impermeabilização da construção em terra mais utilizado em todo o mundo, incluindo Portugal. A utilização destes materiais é realizada mediante a incorporação dos mesmos no processo de hidratação da cal viva (Margalha et al, 2006). Todavia esta extinção podia ser feita seguindo dois métodos distintos:

- Por hidratação simples juntando à cal, certa quantidade de água (dependendo se era pretendido obter-se cal em pasta ou em pó) e determinada quantidade de óleos ou gorduras.

  A cal hidratada obtida era utilizada quer como estabilizante do solo para paredes ou argamassas, quer como pintura de cal ou caiação das construções em terra; e
- Por hidratação em simultâneo com o solo ou areia argilosa. Ou seja, era adicionada cal viva e óleos ou gorduras ao solo com a quantidade de água adequada à hidratação da cal e à plasticidade final desejada. Processo designado por hidratação “a quente”.

  A hidratação da cal a quente, com areia, ainda que sem a adição de óleos era muito utilizada na Europa, sobretudo na Escócia, na preparação de argamassas, mas também em Portugal. Era costume deixar a argamassa preparada com areia e cal viva antes da sua aplicação, podendo demorar até um mês, ou mais, até à data de utilização (Margalha et al, 2006).

Em termos históricos, a hidratação da cal com óleos já era referida por Vitrúvio, mencionando o autor acerca dos tubos de argila para passagem de água que “*As juntas deverão ser pintadas com uma mistura de cal viva e óleo*”. E sobre a

aplicação de ladrilhos em pavimentos o mesmo autor refere que as juntas "*são preenchidas com cal temperada com óle*o".

Um dos óleos utilizados como aditivo hidrófugo era um refugo da utilização de óleo de baleia que era usado na iluminação. Este, juntamente com a cal, formava uma pasta chamada de "*gala-gala*", muito utilizada nos Açores e no Brasil (Veiga, 2008).

É referido que desde o século XVI se usava o óleo de baleia com aditivo aglutinante e a combinação da gordura animal com cal hidratada origina oleato de cálcio, elemento que confere grande resistência às construções (Ellis, 1969, in Teixeira & Belém, 1998). Neste contexto, é mencionado o seguinte depoimento de 1770 do Marques do Lavradio, 3º Vice Rei do Brasil, sobre o cais de armação de baleias da baia de Guanabara:

> *"Caes que se acha feito ha annos, e sem embargo de o mar bater alli com muita força, (…) a achei tão forte (…); a descoberta consiste em ser amassada a cal e area com as borras do azeite de peixe, que faz uma espécie de betume dagua, contra todas as experiências que até agora se tinham feito. (…) vimos que não só o mar não tinha tirado as pedras do lugar, mas o betume tinha pegado de tal forma, que para o tirar foi necessário faze-lo com força de picareta"* *(Ellis, 1969, in Teixeira & Belém, 1998)*

Neste texto observa-se que terá sido utilizado o método de extinção da cal a quente, ou seja a cal viva juntamente com a areia e a gordura, conferindo propriedades hidráulicas à argamassa aqui designado por betume.

Existe também referência de uma outra construção no Brasil realizada com pedra e argamassa de cal com óleo de baleia, a capela de Santana, de 1743, em armação de Búzios (Dias, 2010).

Teixeira & Belém (1998) referem que o conhecimento da cal hidratada com óleo terá sido transmitido pelos árabes com possível origem na China ou na Índia e que a técnica "*galagala*" é ainda utilizada no Oriente e no Magreb. Embora a origem não esteja comprovada, encontra-se de facto referência à utilização de óleos e gorduras como repelente de água na estabilização de solo na China (Deng, 1985, in Avrami et al, 2008). E no Nepal existe também uma técnica de revestimento impermeabilizante que tem por base uma mistura de cal viva com sebo derretido e água, com adição suplementar de sal de cozinha.

Esta mistura é reservada por 24 horas e à pasta obtida por decantação adiciona-se depois areia fina de quartzo e é aplicada em camadas de 3 a 5mm de espessura na parede (Manandhar, 1983, in Minke, 2006).

O exemplo mais conhecido da utilização de cal hidratada com óleo pelos portugueses é a argamassa utilizada na construção da fortaleza "Nossa Senhora da Conceição" de Hormuz. Edificação construída por portugueses no sec. XVI na antiga Pérsia, Golfo Pérsico, Irão.

A construção do forte terá iniciado em 1507 e em 1873 Stiffe, tenente da *Majestys Indian Navy*, visitou-o e na descrição de sua viagem para o *Geographical Magazine, London*, referiu o seguinte sobre a construção observada *"A argamassa utilizada foi excelente, e muito mais durável do que as pedras"* (Stiffe, 1874, in Rowland, 2006). Observando-se este aspeto ainda hoje nas ruínas da fortaleza, como documenta a Figura 7.



Figura 7 – Ruinas da fortaleza de Hormuz
(Hessam Moosavi, fotógrafo, in Moosavi, 2011)

Teixeira & Belém (1998) mencionam que a fortaleza terá sido construída com pedra de arenito vermelho ligada com uma argamassa de cal feita à base de conchas variadas, em especial ostras, hidratada com água e uma percentagem de óleo vegetal. O arenito desapareceu com a ação do vento, mas a argamassa manteve-se quase intacta, mesmo 400 anos depois.

Os mesmos autores referem, também, que este tipo de cal confere à argamassa características como: grande trabalhabilidade, resistência e durabilidade; ausência de fissuras durante a presa e posterior endurecimento; e

hidrofugante, mas mantendo o respirar da construção. Sendo mesmo referido o seguinte:

> *"É polivalente, pois tanto pode ser aplicada como uma argamassa de cal aérea (porque faz presa em contacto com o ar) como também faz presa debaixo de água ou em ambiente húmido, tal como uma argamassa hidráulica."* *(Teixeira & Belém, 1998)*

Presumivelmente, era por estas vantagens que na construção naval portuguesa também era utilizada a técnica "*galagala*" numa das camadas de revestimento aplicadas no fundo das embarcações de madeira. Para tal aplicação é referida uma composição feita com 1,3 kg de óleo de peixe e 0.006 m^3 de cal para revestir 1 m^2 (Castanheira, 1991).

Em Portugal também era utilizada a cal viva extinta com óleos, a quente, na estabilização de paredes construídas em terra, sendo referido o seguinte relativamente à construção tradicional na baixa pombalina em Lisboa:

> *"A massa da taipa de cal utilizada era preparada previamente em obra em caldeiras. Sobrepondo camadas alternadas (20 a 30 cm de espessura) de saibro (areia argilosa amarela-avermelhada) e de cal em pedra adicionada de pequenas barras de sebo, passava-se à rega por cima de cada camada de saibro com a água necessária à extinção da cal por fusão. Obtinha-se, passados 3-4 dias, uma massa que, após curada, possuía propriedades hidrófugas consideráveis."* *(CML, 2005)*

Em resposta a um inquérito realizado em Portugal, é referida, também, a utilização cal e sebo de carneiro (15 kg : 0,5 kg) em caiações (Brito, 2009).

No entanto, Veiga refere a existência de argamassas de cal hidratada com gorduras que revelaram perda de coesão e erosão. Sobre este aspeto menciona o seguinte:

> *"(…) muito há a aprender sobre os aditivos a usar e os campos de aplicação próprios de cada uma. Por exemplo, a utilização indiscriminada da cal apagada com uma gordura tem conduzido, inevitavelmente, a maus resultados, em determinadas circunstâncias, a par de alguns casos de sucesso."* *(Veiga, 2003)*

Os maus resultados referidos por Veiga (2003) estarão, possivelmente, relacionados com a incorporação de gorduras ou óleos em excesso durante a extinção da cal. As resistências mecânicas das argamassas de cal hidratada com óleos nem sempre foram favoráveis, existindo mesmo uma descida das resistências em certos casos, sobretudo quando são adicionadas maiores

percentagens. Esta redução da resistência é justificada pela particularidade do óleo ou gordura encapsular as partículas de hidróxido de cálcio e evitar que ocorra o processo de carbonatação (Santiago & Mendonça, 1992, in Čechová, 2009).

Todavia, a utilização de uma percentagem adequada de óleos pode conduzir a maiores resistências devido à existência de uma redução da porosidade no estado endurecido (Rovnaníková, 2002, in Čechová, 2009).

Outro aspeto importante que certamente poderá ter influência nas resistências mecânicas, absorção de água e resistência à água será o procedimento utilizado para a extinção da cal com óleos ou gorduras. A extinção a quente, ou seja em conjunto com o solo ou areia argilosa parece ter maiores vantagens do que a posterior adição da cal com óleos, segundos as propriedades obtidas em taipa e argamassas obtidas deste modo na baixa pombalina em Lisboa (CML, 2005).

O processo a quente permitirá que as ligações cimentícias da cal com a argila contida no solo sejam mais fortes tornando-a numa argamassa com propriedades hidráulicas, ou seja, capaz de endurecer até debaixo de água. Propriedade já referida sobre este tipo de argamassas.

É referido por Forster (2004), sobre estudos recentes sobre argamassas de cal hidratada a quente com areia, que este processo afeta o tamanho e a interconectividade da estrutura dos poros e produz altas resistências mecânicas (Forster, 2004, in Lawrence, 2006). No entanto, estudos de argamassa de cal com diferentes processos de hidratação realizados por Lawrence revelam que estas propriedades dependem dos agregados utilizados, podendo-se mesmo obter piores resultados do que com cal apagada. Os ensaios realizados evidenciaram que menor resistência, maior porosidade e aumento da absorção de água, tendo sido verificada maior porosidade aberta neste tipo de argamassas fabricadas com cal a quente (Lawrence, 2006).

Todavia, a adição de óleos ou gorduras na extinção de cal a quente tem características diferentes, uma vez que são referidas propriedades hidrófugas

consideráveis neste tipo de mistura. Deste modo, verifica-se que será possível obter um material estabilizado com cal viva também com boas resistências, mas mais hidrofugante contornando o efeito da porosidade aberta.

4.5.2.2 Cal hidratada com outros aditivos

Um exemplo romano de utilização da cal hidratada com outros aditivos é o aqueduto de *Nîmes*, construído por volta de 50 d.C., que servia para condução de água ao longo de 50 km, sendo uma parte em construção subterrânea. A parte visível e mais conhecida é a *Pont du Gard* em *Nîmes*. A construção tem uma altura total de quase 50 metros e uma extensão superior a 275 metros e foi realizada recorrendo a arcos de pedra, cujas paredes e o canal de água (que transportou 40.000 m^3 de água por dia) estão cobertos com uma argamassa de uma cor vermelha singular (Pontdugard, 2011).

Esta argamassa terá sido preparada com a utilização de cal extinta juntamente com vinho, gordura de porco e figos. É provável que a resistência obtida tenha origem no "leite de figo" que tem propriedades de aderência semelhantes às do látex de borracha natural (Rolland, 2006).

Este revestimento terá também sido encontrado em alguns tanques antigos, existindo também a informação de que terão sido adicionados pedaços de telhas de barro à argamassa (Pont du gard, 2011).

Para além dos biopolímeros já referidos, também já foram utilizados os seguintes em argamassas à base de cal: ovos, claras de ovos, albumina animal, cola de caseína, queijo, leite, malte, soro de leite coalhado, glúten, massa de centeio, queratina, cabelo, banha de porco, cera de abelha, açúcar, melaços, sumo de fruta ou de vegetais, goma-arábica, algodão, resinas vegetais, resina animal (goma-laca), betume, sangue, urina, estrume, cerveja, fibras, cevada, casca de olmo, arroz, açafrão e tanino (Čechová, 2009).

4.5.2.3 Utilização de outros biopolímeros na construção em terra

Além das técnicas de proteção com cal e gorduras, figos ou caseína, também foram utilizadas técnicas com outros biopolímeros por todo o mundo. Na Tabela 7 encontram-se vários exemplos.

Tabela 7 – Biopolímeros na antiga construção em terra

Local/ Referência	Biopolímero (s)	Técnica/ Materiais/ Propriedades obtidas
Índia BASIN & Pratical Action, 2002	**Estrume** de vaca sem ou com adição de **urina**	***"Gohber"*** – técnica de reboco, utilizado sobretudo para preenchimento de fissuras. Composição: 1 parte de estrume de vaca e 5 partes de terra (em massa). Impermeabilizante - "*a urina atua como endurecedor e melhora a impermeabilidade e a resistência ao impacto*."
Norte do Gana Beas, 1991	**Estrume** e **vagens** de alfarrobeira	Pintura – Efeito impermeabilizante e endurecedor de paredes e pavimentos em latrite.
Egito e Sudão Hassan Fathy	**Palha e estrume com fermentação**	Adobes e rebocos - Propriedades hidrófugas e maior resistência.
México e povos pré-colombianos CPNT - *Consejo de Promocion de Nopal y Tuna*, 2009	***Nopal* –** cato *Nopalea coccinellifera* ou *Cactus cochenilliferus* ou *figueira-da-índia* –cato	Utilizado no fabrico de tintas à base de cal. O *nopal* ainda hoje é utilizado para proteção face à chuva, para permitir a inclusão de outros materiais de decoração nas paredes em terra, como impermeabilizante e, também, como aglutinante para o betão.
México e sudoeste dos EUA Beas, 1991	***Agave* –** cato Leuchtenbergia principis, Lophanta ou a variação mexicana Caeruslens e Lechuguilla	Utilizado em argamassas - a goma é fervida e o extrato é guardado por duas ou três semanas antes da mistura na argamassa de argila.
América do Sul, em especial Peru Beas, 1991	***Tuna*** – cato Opuntia Ficus Indica	Estabilizante de solo e de argamassas para revestimento. Consolidante. Mais resistente à água quando combinado com a técnica de polimento de superfície.
América do Sul e África Beas, 1991	**Látex -** Resina natural Hevea Euphorbiacex	Pinturas – Efeito impermeabilizante.
América do Sul e África Beas, 1991	**Banana** – hastes, caules e folhas	Utilização dos componentes fervidos em argamassas, mas também em pinturas (só folhas). Impermeabilizante. As fibras evitam o aparecimento de fissuras.
Malaya, Indonésia e Este da Índia Beas, 1991	**Dammar –** resina natural Árvores da família *Diopterocarpaceae*	Argamassas – Efeito impermeabilizante.
"Ásia menor" Winkler, 1956 in Beas, 1991	**Sangue de animais**	Técnica que caiu em desuso como estabilizante de solo e de argamassas com ou sem cal. Utilização em pavimentos de terra, nomeadamente em adobe. Melhora a resistência à água e a resistência à compressão. Mas apresenta elevado risco de crescimento de fungos.
"Babilónia" (sec.V a.C.) Maniatidis & Walker, 2003	**Betume natural -** resultante da decomposição natural de seres vegetais e/ou animais como o petróleo, encontrado em depósitos naturais.	Estabilizante de solo. Mais efetivo em solos com pouca argila. Formação se filme impermeabilizante que impede a entrada de água.

Sobre o reboco estabilizado com palha recorrendo ao processo de fermentação Hassan Fathy refere:

> *"No caso de reboco feito com palha seria interessante ver se as suas propriedades hidrófugas se devem a um simples efeito de ligação, se a uma alteração química como a formação de ácido láctico durante a fermentação, ou se à própria qualidade hidrófuga da palha, alguma dela exposta na superfície do reboco."* *(Fathy, 2009)*

Relativamente ao solo estabilizado com casca de arroz em fermentação, é de referir que este é ainda utilizado em toda a região do Mali, sobretudo em mesquitas.

O exemplo mais conhecido é a grande mesquita de Djenné, considerada a maior construção em adobe do mundo. Foi desenhada por Ismaila Traoré e construída entre 1906 e 1907 com adobes produzidos com lama e palha de arroz. O reboco de revestimento é a tradicional pasta de lama, "*banco*", e é renovado todos os anos. Neste costume de revestir a mesquita toda a comunidade local participa e é realizado até um festival anual próprio (Chabbi-Chemrouk, 2007 e Sacred Sites, 2011).

As imagens seguintes, Figura 8 - a e b, mostram o local junto ao rio onde se prepara o "*banco*" e a sua aplicação numa fachada onde os trabalhadores se apoiam em troncos de madeira salientes, colocados propositadamente para este procedimento anual.



a **b**

Figura 8 – Local de preparação do "*banco*" (a) e aplicação do mesmo (b) (Chabbi-Chemrouk, 2007)

4.5.3 Estudos recentes de estabilização com biopolímeros

Na atualidade, diversos investigadores têm-se debruçado sobre a incorporação de biopolímeros na estabilização de solos para construção de paredes ou

argamassas à base de terra ou argila, bem como na utilização de biopolímeros em argamassas à base de cal que podem ser utilizadas para revestir construções em terra.

Na Tabela 8 encontram-se vários exemplos de estudos desenvolvidos recentemente neste âmbito.

Tabela 8 – Biopolímeros na construção em terra – estudos recentes

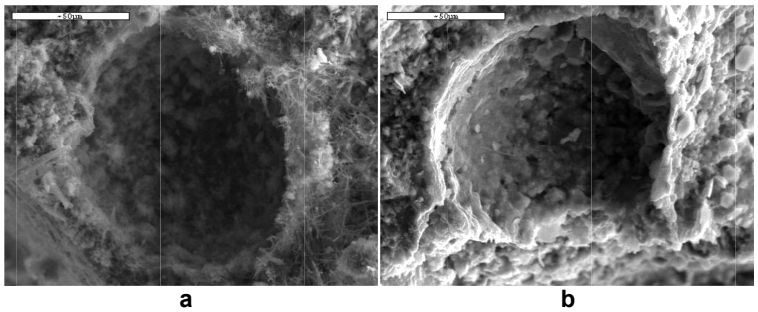
Referência	Biopolímero (s)	Técnica /Materiais/Propriedades obtidas
Minke, 2007	**Óleo de linhaça**	Incorporação de 6 % de óleo de linhaça cozido em argamassas de terra. Teste de jato de água durante 7 dias sem mostrar qualquer erosão.
Čechová, 2009		Argamassas de cal com 1 e 3% óleo de linhaça do peso da cal, com ou sem adição de pozolanas. Bons resultados em ambos na redução da absorção por capilaridade sobretudo com 3%. Contudo, com 1%, a resistência mecânica aumentou em relação à argamassa padrão enquanto com 3% apresenta menor resistência.
Santiago & Mendonca, 1992, in Čechová, 2009		Argamassas de cal com 2 e 5% de óleo de linhaça do peso da cal. A absorção de água por capilaridade foi menor do que a argamassa padrão. No teste com 4 dias de cura, a argamassa com 5% tem quase zero de absorção.
Minke, 2006	**Óleo de linhaça, amido, celulose, gelatina e soro de leite**	Estabilização de solos com: 3% de óleo de linhaça, 1 e 2% de amido, 0,5 e 0,75% de celulose e 2 e 4% de soro de leite, em solo arenoso. As melhores resistências obtidas foram com óleo de linhaça, seguindo-se as composições com amido e 0,75% de celulose.
Kamang, 1998	**Excrementos de minhocas**	BTC de solo laterítico e excrementos de minhocas transformados em pó em substituição da terra (2, 4, 6, 8, 10 e 12%). A erosão é menor com o aumento da percentagem adicionada (teste de abrasão). A resistência à compressão aumenta até aos 8% de adição, mas os resultados mostraram elevada absorção e pouca resistência água.
Silva et al, 2010 e Silva,	**Glucose de ninho de andorinhas**	Estudo sobre os ninhos de *andorinha-dos-beirais* construídos com argila e glucose produzida pela ave. Este composto é constituído sobretudo por polissacarídeos/açúcares e melhora as propriedades da argila. Estudo laboratorial de argamassas de solo argiloso com polissacarídeos/açúcares retirados de ninhos de argila. Os resultados revelam que a incorporação deste composto aumenta as propriedades mecânicas do solo, sobretudo a resistência à compressão.
Ginger Krieg Dosier Vencedora do "*2010 Metropolis Next Generation Design Prize*" in LaBarre, 2010	**Bactéria e ureia**	Desenvolvimento de tijolo de areia estabilizada com bactéria, cloreto de cálcio e ureia. É utilizado um processo conhecido como precipitação microbiana-induzida da calcite, pela utilização de micróbios na areia para ligar os grãos mediante uma corrente de reações químicas. A massa resultante assemelha-se ao calcário, mas pode reproduzir a força do tijolo cerâmico ou mesmo do mármore. Apenas ainda existe um problema a ser resolvido que é a libertação de amónia, um produto tóxico, durante este processo.
Martínez-Camacho et al, 2008	***Nopal* – cato**	Tratamento das paredes de antigo edifício em adobe com pintura, por aspersão, de *nopal* ou de etanol e *nopal,* melhorando a sua difusão no adobe pela redução da tensão superficial e promover a interação química com o adobe, tendo uma ação consolidante.

Tabela 8 – Biopolímeros na construção em terra – estudos recentes (continuação)

Referência	Biopolímero (s)	Técnica /Materiais/Propriedades obtidas
Beas, 1991	***Tuna* – cato**	Argamassas de argila, cal, gesso, argila/cal e gesso/cal. Reduzida absorção de água por capilaridade na estabilização com argila/cal. Permeabilidade ao vapor de água próximo das misturas de argila sem a goma de cato. Na resistência à água (teste da gota de água, *drop test*) não apresenta erosão nas argamassas de cal e argila/cal.
Sawitzki, 2006	***Cereus hildmaniannus* -cato**	Goma de ato utilizado em argamassas históricas de cal e areia e reproduzido em estudo laboratorial. Verificando-se o aumento da resistência mecânica (tração e compressão) e diminuição da absorção de água por capilaridade, mas um decréscimo no envelhecimento acelerado.
Achenza & Fenu, 2006	**Algas marinhas, e resíduos de beterraba e tomate**	Estudo de adobes estabilizados com fibras de algas marinhas e resíduos de beterraba e tomate transformados em polpa (10% do solo em fibras e 10% de beterraba e tomate). Estes contêm açúcares, amido e celulose, ácidos orgânicos, carbohidratos, etc. Os resultados mostram que os provetes testados são mais resistentes à imersão em água (mantendo-se firmes após 8 dias ao contrário dos não estabilizados com polímeros naturais que se desintegraram). Em teste de queda de gota de água, *Geelong test,* também mostraram menor erosão. Apresentando também maior resistência mecânica e absorção de água mais demorada (10 dias para saturar) face ao solo não estabilizado que saturou após 1 dia.
Galán-Marín et al, 2010	**Alginato de sódio** (obtido de algas castanhas marinhas), **resina** (da planta lignum vitae) e **lã de carneiro**	Solo compactado e estabilizado com alginato usado como ligante (19,5 e 19,75%), fibras de lã como reforço (0,25 e 0,5%) e resina da planta *lignum vitae*, também conhecida como guaiaco ou pau-santo, sujo composto é lignina sulfonato, para melhorar a trabalhabilidade do solo (0,5%). Os resultados verificam melhores resistências mecânicas e efeito significativo na prevenção de fissura e rapidez de cura, contudo não se encontrou à data resultados de resistência à água.
Auroville Earth Institute, 2008	**Tanino** – substância de origem vegetal	Estudo de argamassas em terra para impermeabilização de coberturas com pasta de terra, areia, cimento, cal, tanino e alúmen. Esta é aplicada em 3 camadas e a ultima sem adição de cimento. Os resultados mostram que é obtida uma excelente impermeabilização, mas apenas durante cerca de 5 anos. É referida a possibilidade de os raios UV destruam o alúmen e o tanino adicionado.
Browne, 2009	**Óleo de cozinha, óleo de motor usado, gordura animal e pelo de cabra**	Estudo de BTC de solo estabilizado com cal ou com cimento e com vários tratamentos de superfície como os biopolímeros referidos e também cinza, areia e gravilha. Mediante o teste de queda de gota de água, "*Geelong test*", os resultados mostram que no geral os solos com cimento são mais resistentes á água (com menor erosão), mas são ainda melhorados com o tratamento de qualquer dos biopolímeros testados, sobretudo com óleo de motor. Com cal obteve-se bons resultados com óleo de motor e gordura animal.

Em relação às argamassas de cal com óleo de linhaça, Čechová (ver Tabela 8) verificou nos seus estudos que os poros visíveis em argamassas com óleo apresentam uma superfície mais lisa em relação a uma argamassa idêntica

sem óleo, podendo indicar a presença de um filme hidrófugo, conforme documenta a Figura 9.



a b

Figura 9 – Argamassa de cal com pó de tijolo: sem e com óleo (a e b respetivamente) (Čechová, 2009)

4.6 Estabilização com aditivos minerais

Além dos conhecidos estabilizantes minerais como a cal, o cimento, as pozolanas ou o gesso, também têm sido utilizados na construção em terra aditivos minerais a fim de melhorar várias características dos solos, sobretudo a sua durabilidade. Entre estes encontram-se alguns sais e compostos minerais.

4.6.1 Efeito de alguns aditivos minerais nos solos

4.6.1.1 Cloreto de sódio

O cloreto de sódio, ou sal comum, é utilizado atualmente como aditivo em argamassas e betões cimentícios, com o propósito de acelerar a presa ou o processo de cura dos mesmos (Komar, 1974). Este sal é também aplicado em solos para evitar a suspensão de partículas de pó nas estradas não pavimentadas, uma vez que, devido à sua alta capacidade higroscópica mantém o solo humedecido (Bastos, 2009).

É conhecido o efeito do sal na viscosidade da argila e na sua consolidação através da floculação das partículas de argila, religando-as por atração, dependendo da quantidade de sal contida no solo ou adicionada. A plasticidade da argila irá variar consoante o pH do solo e a quantidade de cloreto de sódio, existindo um efeito de ligação ótimo aquando da utilização de uma quantidade de sal reduzida, sobretudo em solos alcalinos. Este controlo da plasticidade é importante, uma vez que tem influência nas propriedades mecânicas finais, e

consequentemente pode-se reduzir o teor de água e a porosidade do solo, obtendo-se um solo mais resistente (Anger et al, 2009).

Segundo Houben & Guillaud (1989) este efeito do sal e as resistências obtidas dependem dos movimentos de humidade no solo estabilizado, podendo os sais serem dissolvidos pela água e condicionar a resistência do material.

4.6.1.2 Hidróxido de sódio

Aditivos à base de soda como o hidróxido de sódio, conhecido por soda cáustica, melhoram a reatividade do solo, desenvolvendo reações de cimentação. Assim, este processo pode complementar a estabilização dos solos com cimento ou com cal melhorando as resistências (Houben & Guillaud, 1989).

O hidróxido de sódio é também utilizado na produção de geopolímeros. Estes consistem em moléculas minerais interligadas em longas cadeias ou redes e os minerais utilizados podem ser argilas, areias, rochas, pozolanas ou solo argiloso com areia, minerais designados por aluminosilicatos.

A geopolimerização, inventada e desenvolvida por Joseph Davidovits, é obtida através da reação de aluminosilicatos com hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, podendo utilizar-se também outros compostos adicionais como silicato de sódio ou potássio. Com este método obtém-se um material com propriedades semelhantes a uma rocha natural e por isso resistente à água. É possível produzir materiais de utilização industrial com excelentes características de resistência química e de resistência ao fogo, recorrendo à geopolimeração a quente, mas utilizando temperaturas não muito altas, inferiores às utilizadas para produzir produtos cerâmicos (Davidovits, 2008).

4.6.1.3 Outros minerais

São também utilizados outros aditivos minerais no solo a fim de melhorar a sua trabalhabilidade. São exemplo o silicato de sódio, o hexametafosfato de sódio ou o policrilato de sódio, utilizados como dispersantes das argilas do solo (Murray, 2007).

É referida ainda a utilização de silicatos de sódio ou de potássio como consolidante das argilas e com efeito impermeabilizante (Beas, 1991 e Houben & Guillaud, 1989).

Compostos minerais como cloretos, hidróxidos ou sulfatos de cálcio também têm um efeito floculante nas argilas (Hamer & Hamer, 1975).

O alúmen, sulfato de alumínio e potássio, é utilizado pelos seus efeitos de impermeabilização, aumento de trabalhabilidade e endurecimento de superfícies (CIMIL, 2011 e Beas, 1991).

4.6.2 Utilização de aditivos minerais em construção à base de terra

4.6.2.1 Cloreto de sódio

Desde a antiguidade que o sal ou cloreto de sódio foi empregue como acelerador de presa em argamassas à base de cal, sendo referido o seu possível uso em argamassas na Sé Catedral de Évora (Adriano & Santos Silva, 2006).

No Nepal a técnica de revestimento impermeabilizante já referida, feita com mistura de cal viva e sebo, também utiliza uma adição suplementar de sal de cozinha (Manandhar, 1983, in Minke, 2006).

No Egito existe um exemplo de uma técnica construtiva pouco conhecida, utilizada na construção de uma fortaleza do século XII, situada no oásis de Siwa no deserto egípcio ocidental. Esta técnica foi utilizada também em edifícios do oásis e ainda é utilizada no presente. Esta consiste numa alvenaria realizada com blocos de lama rica em sal, ligados com argamassa de argilito, material resultante de rocha argilosa, designado por *tiin*. Fratini et al caracterizaram este material referindo que:

> *"Os blocos de sal, chamados karshif, são feitos de cristais de NaCl com uma pequena quantidade de argila e areia e são retirados da margem de lagos salgados. Estes são rochas evaporitas que incluem impurezas como quartzo, feldspatos, calcite e minerais de argila depositados depois das tempestades, durante o processo de precipitação."*
>
> *(Fratini et al, 2009)*

Segundo os seus resultados a argamassa utilizada quando exposta a ciclos termo higrométricos e fortes chuvas degrada-se. Contudo, a utilização conjunta

dos blocos *karshif* com a argamassa aumenta as suas propriedades mecânicas, verificando-se o benefício da utilização da lama com sal (Fratini et al, 2009).

Existe ainda referência a um estudo recente respeitante a uma nova técnica russa de fabrico de blocos de construção com areia e água do mar, sendo referido que a tecnologia pode ser usada em regiões quentes ou frias e que os blocos têm uma boa precisão, como as peças "*Lego"* (Kozharnovich, in Jackson, 2007). Encontra-se ainda informação que os blocos podem, também, ser obtidos recorrendo a sal produzido em centrais de dessalinização (subproduto) e que os blocos de construção tem alta resistência, podendo mesmo tornar-se impermeáveis com um processo de fabrico adequado (Startsev, 2011).

4.6.2.2 Hidróxido de sódio

Na Universidade do Minho estudou-se a adição de diversos compostos minerais como o cloreto de sódio, o bicarbonato de sódio, o cloreto de cálcio, o silicato de sódio, o hidróxido de sódio e um composto de silicato e hidróxido de sódio em solo estabilizado com 6 % de cimento (Santos da Cruz, 2004). Os resultados obtidos mostram que a adição de hidróxido de sódio e do composto de silicato e hidróxido melhoram significativamente a resistência à compressão. Em testes de absorção não se verificaram diferenças significativas, mas as misturas de hidróxido mostraram-se menos eficientes, obtendo-se melhor desempenho com cloreto de cálcio. Em ensaios de molhagem-secagem e gelo-degelo nenhum aditivo analisado permitiu melhores resultados relativamente à mistura de controlo, embora as diferenças tenham sido diminutas. No estudo geral verificou-se que a adição de hidróxido de sódio em solo com 6% de cal permitiu resultados comparáveis a uma composição de solo estabilizado com 10% de cimento sem aditivos. Nesta perspetiva, pode considerar-se que a adição de hidróxido de sódio permitirá, eventualmente, reduzir a quantidade de cimento para estabilização de solos (Santos da Cruz, 2004).

Boutterin & Davidovits (1982) estudaram a geopolimeração com solos lateriticos em solos africanos, recorrendo a uma tecnologia designada por "*LTGS brick*", patenteada em 1980 por *CORDI-Géopolymère* que decidiu

revelar a mesma tornando-a uma tecnologia livre. A geopolimerização é realizada neste estudo pela ativação dos solos lateriticos com hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, sem recurso a qualquer outro estabilizante como cimento ou cal.

A caulinite presente nas argilas é transformada numa rede tridimensional estável na presença de água e com uma elevada resistência mecânica, que pode ser mais ou menos elevada consoante a quantidade de ativadores e temperatura utilizada durante o processo de geopolimerização. Os resultados mostram ser possível obter com esta técnica tijolos ou blocos estáveis em água e com resistências médias mesmo recorrendo à geopilmerização simples, à temperatura ambiente. Recorrendo a temperaturas entre os 85ºC e os 450ºC pode-se obter tijolos semelhantes aos tijolos cerâmicos. Este processo pode ser utilizado em várias técnicas de construção em terra como o BTC, o adobe, a taipa, em fundações, pavimentos ou mesmo em revestimentos e pinturas. Além das propriedades já referidas, estes métodos têm ainda a mais-valia de manter o comportamento higrotérmico característico da construção em terra, permitindo aos edifícios respirarem. Uma desvantagem é a complexidade no acerto da fórmula a utilizar para produzir as reações poliméricas, uma vez que depende sobretudo da quantidade de argila contida no solo e existe uma grande variabilidade de solos em todo o mundo, incluindo entre solos do mesmo local. Por isso, não é uma tecnologia fácil de utilizar com sucesso, sem que haja um estudo do solo e da respetiva fórmula a utilizar (Boutterin & Davidovits, 1982).

4.6.2.3 Alúmen

A utilização de alúmen foi estudada em argamassas de impermeabilização pelo instituto indiano *Auroville Earth* em argamassas à base de terra, areia, cimento, cal e tanino, como já foi referido na Tabela . Os resultados mostram que é obtida uma excelente impermeabilização, mas apenas durante cerca de 5 anos. É referida a possibilidade de os raios UV destruam o alúmen e o tanino adicionado (Auroville Earth Institute, 2008).

4.6.2.4 Silicato de sódio

A adição de silicato de sódio também tem sido estudada. Como exemplo existe um estudo de estabilização de solo com cimento ou cal e adição de silicato de sódio para fabrico de BTC. Os resultados apresentam ganhos consideráveis de resistência à compressão, mas sem efeito benéfico na absorção de água (Ferreira, & Freire, 2005).

4.6.2.5 Borato de sódio

Estudou-se também na Universidade do Minho a adição de pequenas quantidades de borato de sódio, também conhecido por bórax, e de ácido bórico em solo estabilizado com metacaulino/cal (5 %) e pequena percentagem de amido (0,4 %). Os resultados indicam que a adição, em separado, dos dois aditivos aumenta as resistências à compressão (Eires et al, 2009).

5. Caraterização dos materiais utilizados

5.1. Introdução

Para a realização deste estudo foram utilizados dois tipos de solo, um solo preparado em laboratório para o estudo de diferentes composições com biopolímeros e um solo autêntico para verificação de resultados das melhores composições estudadas.

Na seleção de estabilizantes e aditivos procurou-se utilizar materiais acessíveis ou fáceis de conseguir, entre os materiais utilizados no quotidiano.

De seguida apresenta-se a caracterização dos materiais utilizados neste estudo em termos de caracterização visual, física e química dos materiais.

5.2. Solo de referência preparado em laboratório

Para uma avaliação mais precisa do efeito dos biopolímeros, mantendo as melhores condições de neutralidade do solo, sem interferência de matéria orgânica, foi preparado um solo arenoso em laboratório com 80% de areia e 20% de caulino, garantindo quantidades exatas de argila e areia. O solo obtido é designado por Areia Argilosa (SC), segundo a classificação da norma ASTM D2487-93, *Standard classification of soils for engineering purposes* (ASTM, 1993).

O componente silte não foi introduzido, uma vez que é difícil a sua obtenção e não era relevante a sua utilização neste estudo, porque a resistência obtida deve-se sobretudo à reação do estabilizante, a cal, com a argila contida no solo. Na Figura 10 observa-se a areia com caulino e o solo preparado com consistência de terra húmida, antes da moldagem de provetes.



Figura 10 – Caulino sobre areia (esquerda) e solo preparado (direita)

No sentido de verificar a distribuição granulométrica do solo preparado, procurou-se obter referências teóricas sobre a granulometria ideal de solo para construção com solo compactado, mais concretamente no fabrico da taipa.

O gráfico da Figura 11 mostra duas curvas de referência, uma apresentada por Houben & Guillaud (1989) no livro Earth Construction e outra por MOPT (1992, in Delgado & Guerrero, 2005). Não se verificam diferenças significativas entre os limites mínimos de ambas as curvas, apenas se verifica maior diferença entre os limites máximos.

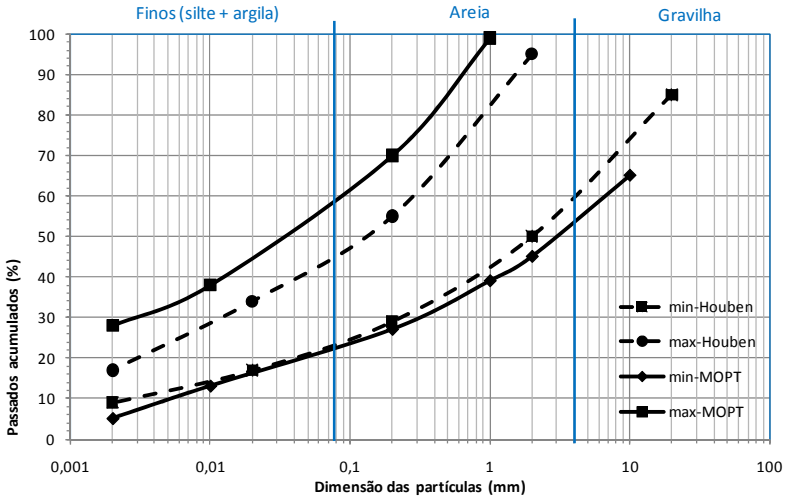


Figura 11 – Curvas teóricas de distribuição granulométrica para construção em taipa

A Figura 12 mostra a distribuição granulométrica (a seco, segundo a norma ASTM D2487-93) do solo preparado e da areia selecionada em comparação com a curva teórica mais recente (MOPT) e com maior área de abrangência. Deste modo, verifica-se que o solo obtido, embora esteja sobre os limites mínimos de referência, se adequa à construção em taipa.

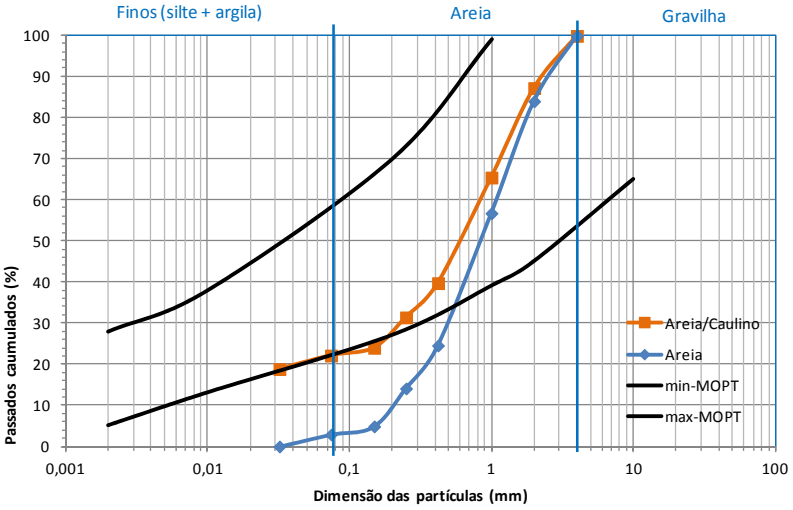


Figura 12 – Curvas granulométricas da areia e do solo preparado (Areia/Caulino)

5.2.1. Areia

Foi utilizada uma areia comercial, natural rolada, de tamanho médio, designada vulgarmente por meia areia. Esta areia, cuja granulometria (a seco, segundo a norma ASTM D2487-93) se encontra na Figura é constituída maioritariamente por quartzo, resultante dos granitos da região norte do país.

De modo a eliminara uma variável, o teor de humidade da areia, para a sua utilização no estudo desta tese, a areia foi sujeita a secagem em estufa, a 100ºC por 24 horas, e usada depois de arrefecida.

5.2.2. Caulino

O caulino é uma argila mineral tradicionalmente utilizada no fabrico de produtos cerâmicos, cujo nome deriva do termo chinês Kaoling, montanha onde se extraíam os primeiros caulinos que eram enviados para a Europa. Esta argila é constituída sobretudo por caulinite, também designada por disilicato de alumínio hidratado $Al_2\ Si_2O_5(OH)_4$, sendo formada a partir de rochas ricas em sílica e alumina como, por exemplo, as graníticas ou feldespáticas. A caulinite é, pela sua constituição, um material mais refratário do que outro tipo de argilas.

O caulino usado foi um caulino branco amarelado, Mibal-A, de origem sedimentar que é moído, lavado com hidrociclone e posteriormente seco na própria fábrica. Este material é proveniente da empresa Mibal, uma mina de extração de caulino e agregados como areia e brita. Estes caulinos destinam-se sobretudo à produção de cerâmicos e agro-químicos.

5.2.3. Água

Foi utilizada água da rede pública de abastecimento de Guimarães. A água apresentava um pH entre 7,5 e 8,2 e cloro livre entre 0.21 a 0.87 mg/l durante os meses em que foram preparadas as amostras de solo, segundo os dados apresentados, em relatórios mensais e por zona, pela empresa de abastecimento de águas da cidade, Vimágua.

5.3. Solo autêntico recolhido

Analisaram-se dois solos recolhidos na Figueira da Foz, cujos locais de recolha distanciavam entre si cerca de 3 metros. Um solo é tendencialmente arenoso e o outro solo, também arenoso, mas significativamente com mais argila (ver Figura 13).



Figura 13 – Solo argiloso (esquerda) e solo arenoso (direita)

Através da análise da análise granulométrica (a seco, segundo a norma ASTM D2487-93) e dos respetivos índices de plasticidade obteve-se a seguinte classificação dos solos, segundo a mesma norma, através do *Unified Soil Classification System*:

- Solo arenoso - SP-SC - Areia mal graduada com argila
- Solo mais argiloso - SC - Areia argilosa

Procurava-se obter um solo arenoso, apenas com a argila suficiente para ser compactado, para ser melhorado com o estabilizante e aditivos estudados. No entanto, com o solo arenoso não era possível compactar sem ocorrerem fissuras nos provetes e o solo com mais argila tinha argila excedente à necessária. Assim, optou-se pela mistura dos dois solos, duas partes de solo "arenoso" com uma parte de solo "argiloso", obtendo-se deste modo o solo de referência, designado por REF, ver Figura 14. No gráfico da Figura 15 observam-se as curvas granulométricas dos solos analisados e do solo de referência obtido.



Figura 14 – Solo de referência, REF

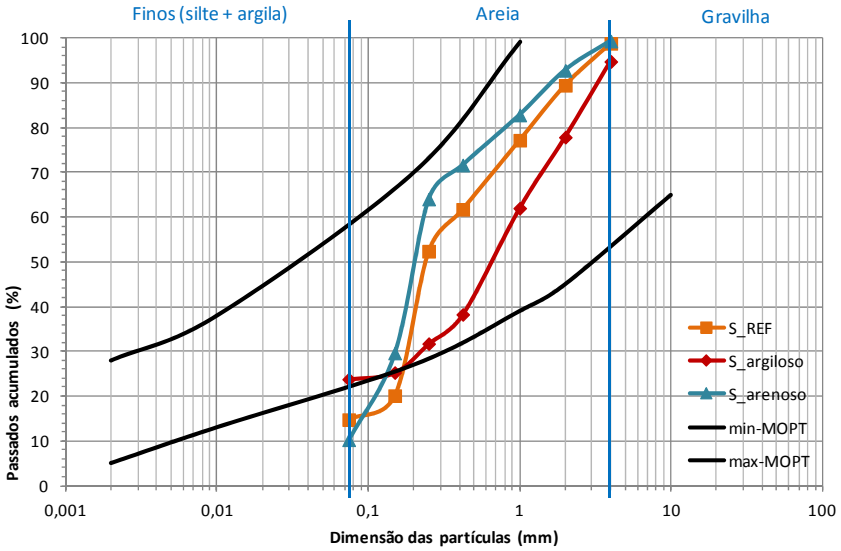


Figura 15 – Curvas granulométricas dos solos analisados e do solo de referência

No sentido de averiguar a plasticidade dos solos realizaram-se ensaios de limites liquidez e plasticidade (segundo a norma ASTM D2487-93). A Figura 16 mostra o ensaio de limite de liquidez e os "fios" de argila obtidos no ensaio de limite de plasticidade.



Figura 16 – Análise de limites de liquidez (esquerda) e de plasticidade (direita – solo argiloso e arenoso respetivamente)

Tabela 9 – Limite de liquidez, limite plasticidade e índice de plasticidade dos solos analisados

	S_arenoso	S_argiloso	S_REF	**Taipa** Houben and Guillaud (1994)	**BTC** Houben and Guillaud (1994)
LL	26	35	30	25 a 46	25 a 51
PL	14	22	18	-	-
PI	12	13	12	2 a 30	2 a 31

Conforme a Tabela 9 permite constatar, verifica-se que todos os solos se adequam à construção em taipa. No entanto, observa-se que o limite de liquidez do solo arenoso (S_arenoso) se encontra muito próximo do valor mínimo de referência.

Para verificação da quantidade de areia, argila e silte realizou-se um teste de sedimentação simples segundo o método descrito por Carboni (2001). Para tal, colocaram-se três partes de água e uma parte de solo em um frasco de vidro, agitou-se vigorosamente o frasco durante 5 minutos e registou-se a espessura de sedimento em várias etapas, após 40 segundos (A), 30 minutos (B) e 24 horas (C). Por subtração determinaram-se as seguintes camadas: C – B = camada de argila, B – A = camada de silte e a camada de areia é a designada por A (ver Figura 17).

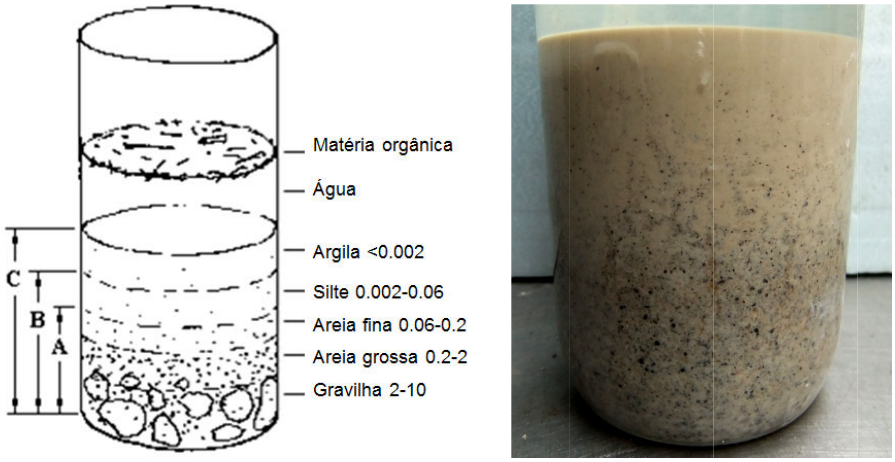
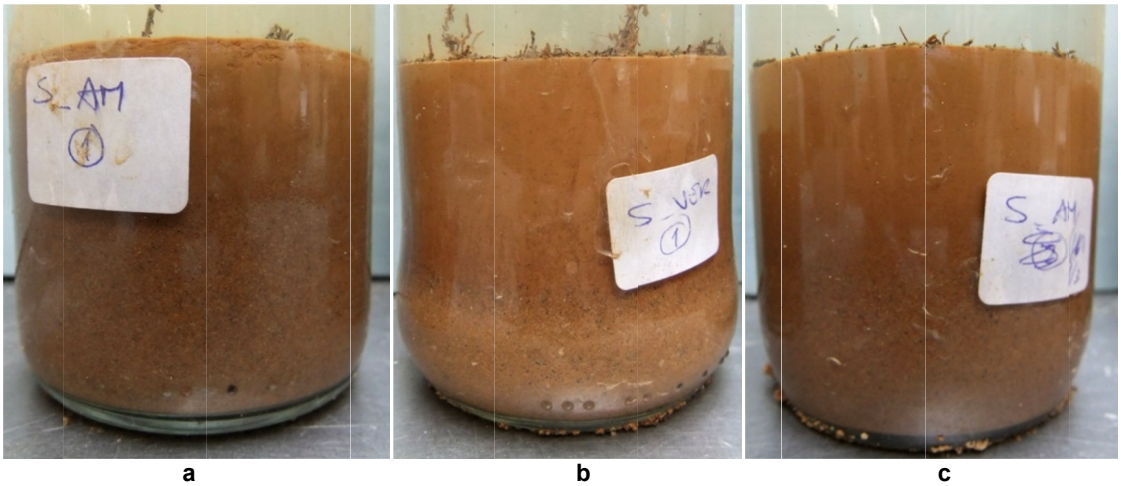


Figura 17 – Sedimentação simples (valores em mm), Carboni, 2001, e respetivo teste em solo de laboratório

A Figura 18 mostra a sedimentação ocorrida nos solos reais estudados, especificamente no solo arenoso, no solo argiloso e no solo de referência, em que se observa visualmente as diferentes quantidades de areia, argila e silte contidas nos solos.



a **b** **c**

Figura 18 – Sedimentação simples: a - S_Arenoso, b - S_Argiloso e c - S_REF

Os resultados obtidos, em termos de percentagem de material em volume e em massa de solo, encontram-se presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Sedimentação simples (percentagens em volume e em massa de solo)

	% em volume			% em massa		
	Areia	**Silte**	**Argila**	**Areia**	**Silte**	**Argila**
S_Laboratório	**52**	**-**	**48**	**80**	**-**	**20**
S_REF	**59**	**17**	**24**	**85**	**6**	**9**
S_Arenoso	72	14	14	90	5	5
S_Argiloso	44	24	32	76	10	14

Em comparação com as Tabelas 11 e 12, com referências de outros autores em relação os constituintes do solo para construção em BTC ou em taipa, verifica-se que a argila contida no solo de referência, REF, encontra-se conforme o pretendido, com pouca argila, mas ainda dentro dos valores mínimos de referência. Contudo, verifica-se que a quantidade de areia se encontra um pouco acima dos valores referenciados e a quantidade de silte se encontra abaixo dos valores de referência.

Tabela 11 – Constituição granulométrica para construção em BTC (% em massa)

BTC	**Norma Australiana** HB-195 (2002)	**Houben and Guillaud** (1994)	**Ragassi** CRATerre-EAG (1985)	**FAO** (acedido em 2010)
Areia + brita fina	45 a 80 %	-	25 a 80 %	60 a 80 %
Silte	10 a 30 %	-	10 a 25 %	15 a 35 %
Argila	5 a 25 %	6 a 22 %	8 a 30 %	5 a 25 %

Tabela 12 – Constituição granulométrica para construção em taipa (% em massa)

Taipa	**Norma Australiana** HB-195 (2002)	**Houben and Guillaud** (1994)	**Norma Zimbabué,** SAZS-724 (2001)	**FAO** (acedido em 2010)
Areia + brita fina	45 a 75 %	-	50 a 70 %	50 a 80 %
Silte	10 a 30 %	-	15 a 30 %	10 a 30 %
Argila	0 a 20 %	8 a 16 %	5 a 15 %	5 a 20 %

Avaliaram-se, também, as percentagens de humidade e matéria orgânica contidas no solo atendendo à norma ASTM D2974. Deste modo, foram colocadas amostras de solo em estufa a 105ºC durante 24 horas para retirar a humidade do solo e, posteriormente, as mesmas amostras foram colocadas a 440ºC para queimar a matéria orgânica contida. A Tabela 13 mostra os resultados obtidos.

Tabela 13 – Percentagem de humidade e matéria orgânica

	S_Arenoso	**S_Argiloso**	**S_REF**
Humidade	1,62	5,14	2,42
Matéria Orgânica	1,11	2,25	1,26

Segundo as indicações referidas por Houben & Guillaud (1989) a quantidade de matéria orgânica contida no solo de referência utilizado, S_REF, é inferior ao valor limite de 2 %, contudo no artigo *"Earth as building material"* (FAO, 2010) é referido o valor de 0.3 % como limite para a construção em terra.

Realizaram-se, ainda, testes expeditos nas amostras de solo real, normalmente utilizados no terreno, para avaliar a plasticidade e a rigidez do solo. Realizando-se o chamado "teste do charuto" e ainda o designado teste da "bolacha".

O primeiro teste consiste na moldagem de rolos, de aproximadamente 3 cm de diâmetro, que posteriormente se fazem deslizar para fora do plano da mesa de trabalho até se partirem. Após este procedimento mede-se o tamanho dos rolos (ver Figura 19).

O segundo teste consiste na moldagem de uma bolacha, com diâmetro de 3 cm e 1 cm de espessura, que se deixa secar por 24 horas, verificando-se a retração ocorrida e se quebra com as mãos, verificando-se o grau de dificuldade ao partir.



a **b**

Figura 19 – "Teste do charuto": a - Solo arenoso e solo argiloso e b - solo de referência

Pela Tabela 14 verifica-se que todos os solos se consideram aptos para a construção em terra, com comprimentos entre 5 e 15 cm. No entanto, os solos arenoso e argiloso encontram-se perto dos valores limite.

Tabela 14 – Interpretação de "teste do charuto" e resultados obtidos

Comprimento	Condição do solo	Solo	Comprimento
0-5 cm	Contém muita areia	**S_REF**	6,5 a 9,5 cm
5-15 cm	É bom	S_Arenoso	5 a 6,5 cm
Maior que 15 cm	Contém muita argila	S_Argiloso	11 a 14,5 cm

No “teste da bolacha”, tal como o esperado, verificou-se maior retração no solo argiloso (ver Figura 20 - b). Em relação à rigidez, verificou-se que o solo arenoso apresentava pouca dificuldade ao partir, o solo argiloso mais dificuldade e o solo de referência uma dificuldade média (ver Figura 21).



Figura 20 – “Teste da bolacha”, retração: a - Solo arenoso; b - solo argiloso e c - solo de referência



Figura 21 – “Teste da bolacha”, retração: respetivamente solo arenoso; solo argiloso e solo de referência

No sentido de confirmar o tipo de argilas presentes no solo recolhido foi realizado o teste de *“Emerson”,* descrito por Houben & Guillaud (1989). Este, consiste na imersão em água destilada de 4 amostras de cada tipo de solo, analisando-se o solo arenoso e o solo mais argiloso. Para interpretação dos resultados seguiram-se as indicações da Figura 22 (Houben & Guillaud, 1989).

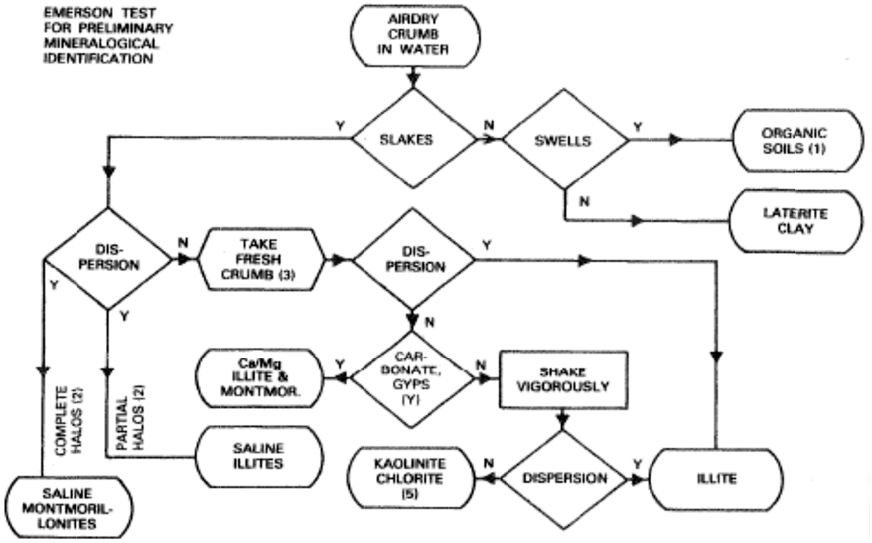
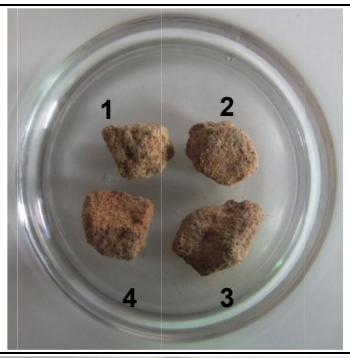
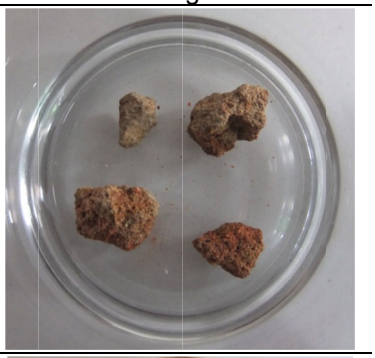
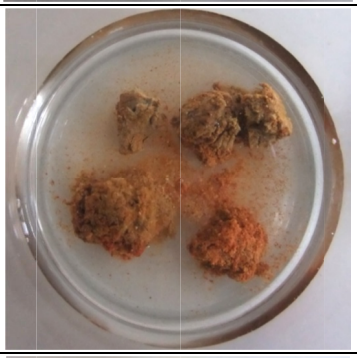
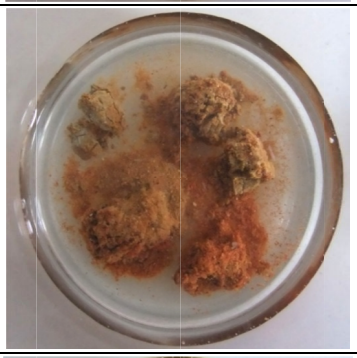
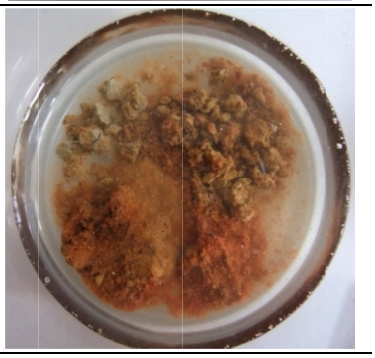


Figura 22 – Procedimento do teste de “*Emerson*” (Houben & Guillaud, 1989)

A Tabela 15 mostra o comportamento das amostras de solo durante o teste em que se destacam 3 amostras de solo arenoso que não se desfizeram, mesmo agitando vigorosamente. Outras amostras desfizeram-se parcialmente e outras totalmente.

Tabela 15 – Comportamento das amostras de solo – teste de "*Emerson*"

	Solo arenoso	Solo argiloso
Antes do teste		
Após 5 minutos		
Após remexer ligeiramente		
Após remexer vigorosamente		

Analisando os resultados obtidos, expostos na Tabela 16, verifica-se que o solo arenoso contém, essencialmente, caulinite e pequena quantidade de ilite. O

solo argiloso contem maiores quantidade de ilite e/ou montemorilonite. Uma vez que o solo de referência é composto por duas partes de solo arenoso e uma parte de solo argiloso considera-se que a maioria do solo conterá caulino e menor quantidade de montemorilonite e/ou ilite.

Tabela 16 – Resultados do teste de "*Emerson*"

Amostra	Após 5 minutos sem mexer	Após remexer ligeiramente		Após remexer vigorosamente	Tipo de argila provável
Solo Arenoso					
1	Não dispersa	Dispersa		-	ilite
2	Não dispersa	Não dispersa		Não dispersa	caulinite
3	Não dispersa	Não dispersa		Não dispersa	caulinite
4	Não dispersa	Não dispersa		Não dispersa	caulinite
Solo Argiloso					
1	Não dispersa	Não dispersa (apenas parte)		Dispersa parcialmente	ilite
2	Não dispersa (apenas parte)	Dispersa parcialmente	(com libertação de algumas bolhas de ar)	-	ilite ou montemorilonite
3	Não dispersa	Dispersa		-	ilite ou montemorilonite
4	Não dispersa	Dispersa		-	ilite ou montemorilonite

5.4. Biopolímeros

Os biopolímeros selecionados dividem-se em duas categorias: os que estão em forma sólida, em pó, e os que estão em forma líquida.

5.4.1. Biopolímeros em forma sólida

5.4.1.1. Amido de milho e amido de trigo (farinha)

Utilizaram-se os seguintes produtos de uso culinário: amido de milho e amido de trigo sob a forma de farinha, tendo sido usada farinha de trigo comum sem fermento.

O amido, Figura 23, consiste na mistura de dois polissacarídeos, amilose (moléculas de cadeias longas) e amilopectina (moléculas de cadeias curtas), como se observa na Figura 24, que são polímeros de glicose (Almeida, 2007). Pela sua composição o amido tem dois efeitos nas moléculas de argila: a amilopectina atua como dispersante, permitindo uma redução da quantidade de

água para se obter a mesma viscosidade; por outro lado, a amilose tem a capacidade de religar as partículas de argila.

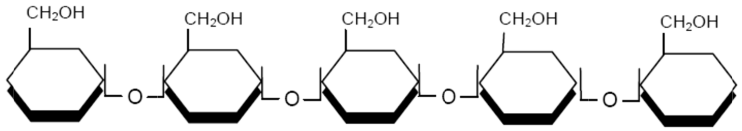


Figura 23 – Macromolécula de amido com n moléculas de glicose (Almeida, 2007)

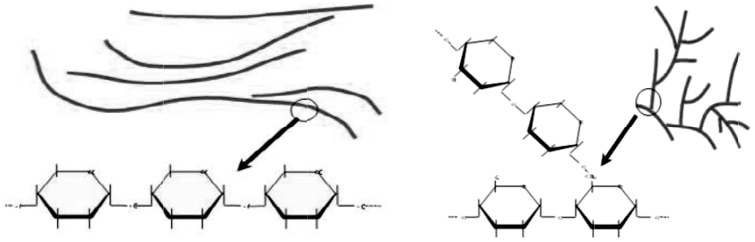


Figura 24 – Molécula de amilose e molécula de amilopectina (Almeida, 2007)

5.4.1.2. Açúcar

Utilizou-se o açúcar comum, branco e refinado, cujo nome científico é sacarose e que pertence ao grupo de glícidos ou hidratos de carbono. A sua obtenção resulta do sumo de beterraba açucareira (*Beta vulgaris*), da cana-de-açúcar (*Sacharum officinarum*) ou de outras plantas e frutas que contenham açúcar.

A molécula de sacarose, Figura 25, é composta por uma molécula de glicose e outra de frutose, unidas por um átomo de oxigénio e a sua fórmula molecular é $C_{12}H_{22}O_{11}$ (Diciopédia e wikipédia, 2010).

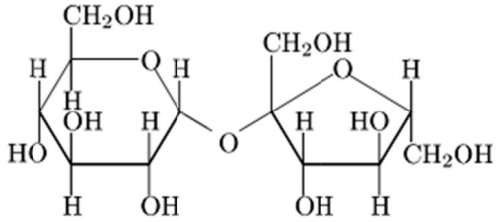


Figura 25 – Molécula de sacarose (wikipédia)

Em relação ao efeito específico da sacarose nas argilas não se encontram referências, contudo é referido que produtos naturais como melaços ou resinas que contêm açucares obtêm um efeito aglutinante nas partículas de solo.

5.4.2. Biopolímeros em forma líquida

5.4.2.1. Óleo de linhaça

O óleo de linhaça é um produto derivado do linho, podendo ser extraído a frio para fins alimentares ou através de solventes para outras aplicações, com fins industriais em geral, fabrico de tintas, pintura, tratamento de madeiras exteriores, etc. Como tal, o óleo utilizado é o óleo de linhaça normalmente vendido em drogarias e em comércio de materiais de construção, extraído por solventes e foi usado no seu estado original, em cru.

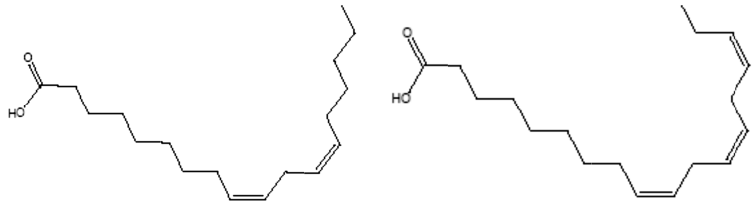
Relativamente à origem do óleo de linhaça, não foi possível saber a sua origem, mas verificou-se que não existe produção deste óleo em Portugal, sendo este importado.

Quimicamente, o óleo de linhaça é constituído por ácidos graxos (ou gordos) que se apresentam na Tabela 17, observando-se que o principal constituinte é o ácido linolénico.

Tabela 17 – Composição do óleo de linhaça (%) - (Čechová, 2009)

Ácidos gordos	Óleo de linhaça
Palmítico	6-7
Esteárico	3-6
Oleico	14-24
Linoleico	14-19
Linolénico	48-60

Estes ácidos gordos, Figura 26, possuem moléculas de cadeias longas que ajudam a religar as partículas da argila. Além disso, como todas as gorduras, óleos, e ceras, possuem moléculas anfifílicas (com uma parte hidrofílica e outra hidrofóbica) que potenciam o seu efeito hidrófugo ou de repelência de água.



a **b**

Figura 26 – Moléculas de: a - ácido linoleico e b - ácido linolénico (Čechová)

5.4.2.2. Óleo vegetal usado

O óleo vegetal usado consiste em óleo de cozinha ou alimentar, que, apesar de ser possível o seu reaproveitamento para fabrico de sabões ou utilizado como combustível alternativo, existe em abundância e é fácil de arranjar em qualquer lar. A sua utilização como aditivo na construção em terra será mais uma aplicação de valorização deste resíduo.

Utilizou-se para este estudo um óleo de soja comum decantado após a sua utilização em culinária para que não existam resíduos no óleo.

Por ser um óleo usado, surgiu a preocupação em averiguar a sua toxicidade. Pela bibliografia observada verificou-se que não apresenta libertação de compostos orgânicos voláteis, COV´s, verificando-se apenas alguma inibição no crescimento de plantas, devido a subprodutos da sua biodegradação e também do seu efeito hidrófugo que limita a passagem de água para as plantas (Tamada, 2009).

Como esta é uma aplicação para a construção de edifícios, esta característica do óleo usado passa a ser uma mais-valia na prevenção da absorção de água no solo aplicado nas paredes exteriores.

5.4.2.3. Glicerol

O glicerol é um poliálcool, de fórmula estrutural apresentada na Figura 27, é um produto higroscópico, não tóxico, viscoso, sem cor e odor produzido a partir de gorduras de origem animal ou vegetal. O termo glicerina é utilizado para compostos com 95 % ou mais de glicerol (Arruda, 2007).

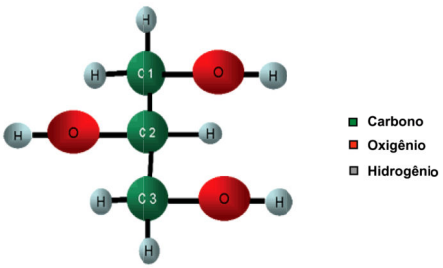


Figura 27 – Molécula de glicerol (Arruda, 2007)

Tradicionalmente, o glicerol era um subproduto da produção de sabão, contudo, esta produção tem diminuído. Por outro lado, o processamento de gorduras vegetais tem aumentado com a produção de biodiesel. Deste modo, o

glicerol tem sido obtido por este processo, sendo, por isso, um subproduto cuja produção tem vindo a aumentar.

Sendo o glicerol uma substância higroscópica, a particularidade de reter água pode ser benéfica nas argilas, na medida em que será possível reter água quando esta começa a ser absorvida, demorando mais tempo o processo de absorção através de uma parede. Além disso, permite o controlo da humidade do ar devido à sua capacidade de absorção de vapor de água.

Para este estudo foi utilizado um glicerol de origem vegetal com 99 % de pureza.

5.4.2.4. Caseína

Caseína é uma proteína que se encontra no leite e pode ser extraída deste por precipitação ou coalho utilizando um meio ácido, enzimas ou fermentos, tal como na produção de queijo. A palavra caseína deriva da palavra queijo em latim "*caseu*". Esta proteína pode também ser extraída de algumas plantas, a caseína vegetal. Este produto é usado para a produção industrial de colas, pinturas, plásticos e fibras têxteis (Porto Editora, 2011). É referido que a caseína é uma fosfoproteína que possui regiões hidrofílicas e hidrofóbicas, tal como as gorduras e os óleos. No leite existem vários tipos de caseínas e a conformação das moléculas expõe consideravelmente as regiões hidrofóbicas, resultando em forte associação entre as caseínas e torna-as insolúveis em água (Goff, 2006, in Oliveira & Timm, 2007).

Na construção em terra este material tem vindo a ser utilizado como aditivo, para ajudar na estabilização do material, ou como aditivo em argamassas à base de terra e em pinturas à base de cal.

Neste estudo a caseína foi obtida pelo processo mais simples, recorrendo à mistura de leite com vinagre, obtendo-se assim uma "caseína ácida" que consiste num gel branco e fácil de misturar com o solo.

5.4.2.5. Água de celulose e água de palha

A água de celulose e água de palha utilizaram-se no sentido de averiguar o efeito da celulose em solução aquosa, resultante da imersão prolongada de

palha ou de fibras de papel. Isto porque se verifica ser comum a utilização de palha como reforço de solos para construção, utilizando a palha após imersão da mesma durante algumas horas em água. Esta água saturada com compostos libertos pela palha (biopolímeros à base de celulose e legnina) é também utilizada durante a construção com a finalidade de melhorar a resistência do solo (Fathy, 2009). A utilização das fibras de papel prende-se com o facto de ser um resíduo industrial ainda sem reutilização possível e poder substituir a palha como reforço de solos para a construção.

A celulose $(C_6H_{10}0_5)n$ é um polímero de cadeia longa, Figura 28, composto de um só monómero (glicose), classificado como polissacarídeo ou carbohidrato, com um valor mínimo de n=200 (tipicamente 300 a 700, podendo passar de 7000).

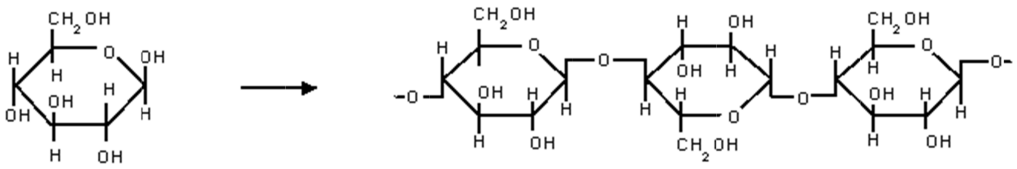


Figura 28 – Molécula de celulose (Wikipédia, 2011)

O efeito da celulose é o de religar as partículas de argila, através das moléculas de cadeias longas de pouca carga superficial, tal como o amido, a caseína e as gomas.

As soluções aquosas utilizadas neste estudo foram preparadas pela imersão de palha e de fibras de papel (resíduos da industria de papel) em água durante 48 horas (ver Figura 29).



a **b**

Figura 29 – Soluções aquosas com celulose e respetivos materiais celulósicos de origem: a – água de celulose (fibras de papel) e b – água de palha (palha de arroz)

A palha utilizada foi palha de arroz, uma vez que é um tipo de palha rica em sílica na sua constituição e as fibras de papel utilizadas são oriundas de

desperdícios da indústria de papel, provenientes da Soporcel, de Viana do Castelo.

5.5. Aditivos minerais

Foram utilizadas duas categorias de aditivos minerais para distintas funcionalidades: aditivos ligantes que incrementam a ligação entre as partículas do solo e aditivos religantes que podem religar as partículas da argila. Para tal, selecionaram-se como aditivos minerais ligantes o hidróxido de sódio, o silicato de sódio e o alúmen. E como aditivos religantes o cloreto de sódio, o cloreto de cálcio e o borato de sódio.

5.5.1. Aditivos ligantes

5.5.1.1. Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio, conhecido como soda cáustica, é um composto sódico, NaOH, obtido por hidrólise de uma solução de cloreto de sódio em água. É um material que se apresenta em estado sólido e é solúvel em água, sendo fortemente alcalino. Este material tem aplicações em diversos produtos como o sabão e o papel bem como na indústria química. Para este estudo foi utilizado um hidróxido de sódio comercial.

5.5.1.2. Silicato de sódio

Este é um material sólido, branco e solúvel em água, produzindo uma solução alcalina de fórmula Na_2SiO_3. É fabricado a partir de carbonato de sódio (Na_2CO3) e areia siliciosa (SiO_2). Existem vários tipos de silicato de sódio, mas o mais utilizado é o metasilicato de sódio. Este tem propriedades alcalinas e adesivas e tem a sua maior aplicação em detergentes, na indústria cerâmica e na metalurgia. Para este estudo foi utilizada uma solução comercial de silicato de sódio a 10 %.

5.5.1.3. Alúmen

O alúmen, quimicamente designado por sulfato de alumínio e potássio $KAl(SO_4)_2.12\ H_2O$, tem aplicação em diversas áreas, como por exemplo, nas indústrias químicas, de curtumes, alimentícias, farmacêuticas, tintas, etc. Os

seus principais efeitos são a impermeabilização, aumento de trabalhabilidade e endurecimento de superfícies (CIMIL, 2011 e Beas, 1991). Foi utilizado um alúmen comercial com a fórmula $KAl(SO_4)_2.12\ H_2O$.

5.5.2. Aditivos religantes

5.5.2.1. Cloreto de sódio

O cloreto de sódio é um mineral de origem natural, vulgarmente conhecido como sal de cozinha e é obtido a partir da água do mar. É solúvel em água e a sua fórmula química é NaCl. Os efeitos do cloreto de sódio em argilas estão descritos no capítulo 4, em 4.6.1.. Para este estudo foi utilizado sal marinho.

5.5.2.2. Cloreto de cálcio

O cloreto de cálcio é um composto químico formado por cálcio e cloro. É extremamente solúvel em água e a sua fórmula química é $CaCl_2$. É caracterizado pela sua propriedade higroscópica, sendo muito utilizado para controlo do pó na superfície das estradas, mantendo uma camada superficial húmida (Wikipédia, 2008). Este material é utilizado na construção para acelerar a presa do betão e argamassas cimentícias e aumentar as resistências mecânicas. Para este estudo foi utilizado um cloreto de cálcio comercial.

5.5.2.3. Borato de sódio

Borato de sódio, também designado por bórax, é um mineral existente em depósitos de sais, como o borato “kernite” ou o tical, formados em lagos temporários através do cíclico processo de evaporação. A designação química é tetraborato de sódio hexahidratado, cuja fórmula é $Na_2B_4O_710H_2O$. O bórax tem inúmeras aplicações. É usado como fungicida e retardante ao fogo em isolamentos à base de fibras de celulose e em impregnação de madeiras. Utilizado desde o século 10 d.C. no vidrado cerâmico é ainda hoje empregue na indústria cerâmica e do vidro para aumentar a durabilidade dos produtos obtidos. Os boratos modificam a estrutura do vidro, tornando-o mais resistente a altas temperaturas, choques térmicos e a ataques químicos. Por isso, tem sido cada vez mais usado na produção do vidro, fibra de vidro e cerâmica, sobretudo como redutor do consumo de energia necessário para a produção

destes materiais. Entre as múltiplas propriedades e aplicações estão ainda as suas funções de desinfetante, inseticida, herbicida, agente dispersor, regulador e controlador de viscosidade (AZoM, 2004). Neste trabalho foi utilizado bórax em pó convencionalmente comercializado.

5.1. Estabilizantes

Foram utilizados os estabilizantes mais comuns da construção em terra, a cal e o cimento. Relativamente à cal utilizaram-se dois tipos de cal, a cal aérea hidratada, designada por hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, e a cal aérea viva, designada por óxido de cálcio, CaO.

A cal tem a sua origem na pedra calcária. Esta matéria-prima encontra-se em depósitos sedimentares, resultantes de rochas calcárias, ou como depósitos de giz ou coral e areia, formados a partir da desintegração de conchas marinhas. A cal viva é obtida através de um processo de combustão, convencionalmente designado por calcinação. Esta reação endotérmica é obtida submetendo a pedra calcária a temperaturas de 900-1200ºC (Borge, 2000). A cal hidratada é obtida através da hidratação da cal viva. As cais podem ser classificadas atendendo a diversos fatores como a pureza do calcário, o teor de óxido de magnésio e o teor de óxido de cálcio. A Tabela 18 mostra uma síntese dos tipos de cal que existem e a Tabela 19 mostra a classificação segundo a norma NP EN 459-1 (2002).

Tabela 18 – Classificação da cal segundo vários autores

Tipo de Cal em função de:			Referências
Composição do calcário de base			Neves, 1993 (in Cristelo, 2001)
Cal Aérea		Quase puro	
Cal Hidráulica		8 a 20 % de argila	
Teor de óxido de magnésio			Fossberg (in Cristelo, 2001)
Cal Aérea	Cálcica	MgO entre 0 e 5 %	
	Magnesiana	MgO entre 5 e 20 %	
	Dolomítica	MgO entre 20 e 30 %	
Teor de óxido de Cálcio			Choquet, 1972 (in Cristelo, 2001)
Cal Aérea	Pura	CaO superior a 97 %	
	Gorda	CaO entre 85 % e 97 %	
	Magra	CaO inferior a 85 %	

Tabela 19 – Classificação da cal segundo a normalização europeia

Tipo de Cal em função da composição química
Norma Europeia NP EN 459-1 (2002) (valores em % de massa)

		Tipo	CaO +MgO	MgO	CO_2	SO_3	Cal livre
Cal Aérea - L	**Calcítica**	CL 90	≥ 90	≤ 5 [2)]	≤ 4	≤ 2	-
		CL 80	≥ 80	≤ 5 [2)]	≤ 7	≤ 2	-
		CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	-
	Dolomítica	DL 85	≥ 85	≥ 30	≤ 7	≤ 2	-
		DL 80	≥ 80	≥ 5	≤ 7	≤ 2	-
Cal Hidráulica		HL	-	-	-	≤ 3 [2)]	≥ 8
		HL	-	-	-	≤ 3 [2)]	≥ 6
		HL	-	-	-	≤ 3 [2)]	≥ 3
Cal Hidráulica Natural		NHL	-	-	-	≤ 3 [1)]	≥ 15
		NHL	-	-	-	≤ 3 [1)]	≥ 9
		NHL	-	-	-	≤ 3 [1)]	≥ 3

1) Teores de SO_3 superiores a 3 % e até 7 % são tolerados, se a expansibilidade for confirmada aos 28 dias com cura em água seguindo o ensaio preconizado na EN 196-2;
2) Teores de MgO até 7 % são tolerados, se a cal satisfizer o ensaio de expansibilidade indicado na EN 459-2.

Nota: A cal aérea, *L*, pode apresentar-se ainda em duas categorias, a cal viva, designada pela sigla *Q* e a cal hidratada, designada pela sigla *S*.

A Tabela 20 mostra a composição química, obtida por fluorescência de raios X, FRX, das cais utilizadas neste estudo.

Tabela 20 – Composição química da cal viva e da cal hidratada

Composto	Cal viva %	Cal hidratada %
CaO	**98,68**	**90,24**
SiO_2	0,14	6,28
MgO	0,81	0,86
Al_2O_3	0,10	1,26
K_2O	0,01	0,67
Fe_2O_3	0,16	0,48
Na_2O	-	0,12
P_2O_5	0,01	-
SO_3	0,03	-
SrO	0,06	-

5.1.1. Cal viva

A cal viva utilizada foi uma cal micronizada, ou em pó, comercial, da zona de Cantanhede. Esta cal apresenta na sua constituição 98.68 % de óxido de cálcio, segundo a Tabela 20.

Segundo a Tabela 18 a cal utilizada é classificada como uma cal aérea calcítica, com óxido de magnésio entre 0 e 5 % (0,81 %), pura, com óxido de cálcio superior a 97 % (98,68 %). Segundo a norma NP EN 459-1 (2002), ver a Tabela 19, a cal utilizada é, de igual modo, uma cal calcítica, com a designação CL 90.

5.1.2. Cal hidratada

Neste estudo foi utilizada cal hidratada em pó comercial da zona de Alcanede com 90 % de óxido de cálcio, como se pode verificar na Tabela 20 em que consta a sua composição química.

Segundo os dados técnicos fornecidos pela empresa fornecedora (Lusical, 2006) a cal hidratada apresenta 96,5 % de hidróxido de cálcio e um teor em água inferior a 1 %. O diâmetro máximo das partículas é de 0,2 mm. Esta cal apresenta uma densidade aparente na ordem de 500 kg/m^3. Segundo a Tabela a cal utilizada é classificada como uma cal aérea calcítica, com óxido de magnésio entre 0 e 5 % (0,86 %), gorda, com óxido de cálcio entre 85 % e 97 % (90,24 %). Este material, apresenta, também, uma percentagem considerável de sílica e óxido de alumínio (6,28 e 1,26 %). Segundo a norma NP EN 459-1 (2002), ver a Tabela , a cal utilizada é, de igual modo, uma cal calcítica, com a designação CL 90.

5.1.3. Cimento

Foi utilizado o cimento com maior uso em obras de construção civil, um cimento portland de calcário, CEM II/B-L 32.5N, respeitando a norma NP EN 197-1. Os seus constituintes são: clínquer, entre 65 e 79%; calcário, entre 21 e 35% e sulfato de cálcio como regularizador de presa. Na referida ficha técnica consta como utilização recomendada a aplicação em solo/cimento (CIMPOR, 2008).

6. Metodologias, normas utilizadas e referências de estudo

6.1. Introdução

De seguida apresentam-se os processos de mistura, as metodologias de produção de provetes, os métodos e normas de ensaio utilizados e, ainda, referências de estudo bibliográficas que servem de apoio à comparação de resultados obtidos nos ensaios realizados.

6.2. Processos de mistura

6.2.1. Composições de solo preparado em laboratório

O solo base preparou-se com a mistura de 80 % de areia seca e 20 % de caulino com posterior adição da respetiva percentagem de água.

A adição de biopolímeros foi realizada mediante a diluição destes compostos na água, antes de esta ser adicionada à mistura.



a b

Figura 30 – Solo preparado em laboratório sem e com biopolímeros (a e b respetivamente)

O solo com cimento ou cal hidratada preparou-se com adição dos mesmos à areia e caulino, sendo a água adicionada posteriormente.

O solo estabilizado com cal viva foi preparado segundo diferentes processos de mistura:

- Mistura de todos os componentes 24 horas antes, com a água necessária para hidratação da cal viva. Sendo esta mistura reservada dentro de recipiente fechado com saco plástico. Após as 24 horas de hidratação o preparado era de novo misturado para desfazer grumos existentes no solo (ver Figura 31);
- Mistura de cal viva com óleo 24 horas antes, com a água necessária para hidratação da cal viva, obtendo-se cal hidratada com óleo (ver Figura 32). Seguindo-se, no dia seguinte, a mistura desta cal já hidratada com o solo preparado.

- Mistura de cal viva com solo 24 horas antes, com a água necessária para hidratação da cal viva. Misturando-se no dia seguinte este solo já com estabilizante com mais água e óleo usado.



a b

Figura 31 – Solo com cal viva 24h antes, solo de laboratório e solo real (a e b respetivamente)



a b c

Figura 32 – Hidratação de cal com óleo, diversas fazes (a, b e c respetivamente)

Durante o processo de mistura de todos os componentes 24 horas antes, com a água necessária para hidratação da cal viva, registou-se um pico de temperatura de 53ºC, durante a fase exotérmica de hidratação da cal, e uma humidade relativa média de 97 % durante as 24 horas de hidratação como se observa no gráfico da Figura 33.

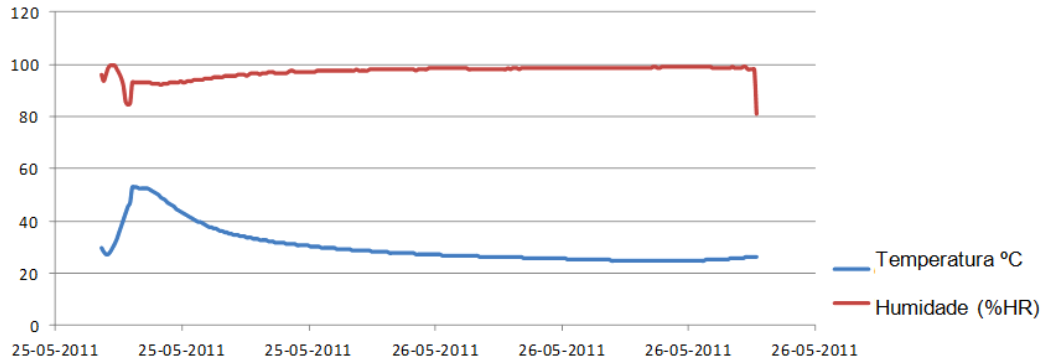


Figura 33 – Temperatura e humidade verificadas durante a hidratação de cal juntamente com o solo

6.2.2. Composições de solo real

Para preparar o solo de referência para as composições a estudar, utilizaram-se dois solos reais (duas partes de solo “arenoso” com uma parte de solo “argiloso”), previamente passados no peneiro de 4 mm de abertura de malha.

As composições com estabilizante, com ou sem biopolímeros, foram preparadas seguindo o mesmo procedimento do solo preparado em laboratório.

6.3. Produção e cura de provetes

6.3.1. Provetes cilíndricos de solo sem estabilizante, com e sem adição de biopolímeros

Com o solo preparado em laboratório, moldaram-se provetes de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura, prensados em prensa hidráulica manual (Figura 34), com uma carga aplicada média de 3500 psi ou 24 MPa, obtendo-se uma compactação estática. Estes provetes foram mantidos em laboratório à temperatura e humidade ambiente até à data de ensaio, verificando-se que a temperatura variou entre os 15 e os 25ºC.



a b

Figura 34 – Prensa manual (a) e respetivos provetes (b)

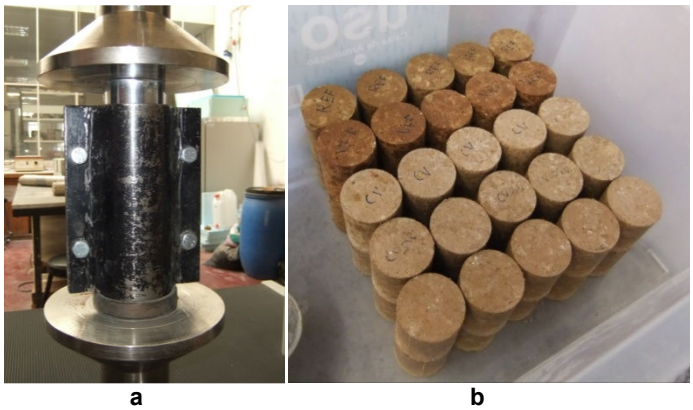
6.3.2. Provetes cilíndricos de solo com estabilizante, com e sem adição de biopolímeros

Com o solo preparado em laboratório e com incorporação estabilizante prepararam-se provetes iguais aos anteriormente descritos. No entanto, uma vez que este solo foi estabilizado, necessita de humidade durante o processo de cura, como tal, estes provetes foram mantidos em caixa hermeticamente fechada, durante 28 dias, à temperatura ambiente, que variou entre os 15 e os 25ºC.

Na caixa de armazenamento do provete, quando fechada, foi ainda colocado um recipiente com solução salina de cloreto de sódio saturada a fim de manter uma humidade relativa constante. Segundo a bibliografia observada (Medeiros, 2006), esta solução de cloreto de sódio permite obter uma humidade relativa entre 76 e 75 %, dependendo da temperatura a que está sujeita a solução (5 ou 25ºC respetivamente). Logo, pode-se considerar que a humidade relativa no interior das caixas de armazenamento dos provetes esteve a uma média de 75 %. Posteriormente, foram mantidos os provetes em caixas abertas à temperatura e humidade ambiente normais para que se possam desenvolver as reações de carbonatação.

6.3.3. Provetes cilíndricos de solo real

Com o solo real selecionado, com estabilizante e sem estabilizante e com e sem adição de biopolímeros, preparam-se provetes cilíndricos com uma dimensão diferente, uma vez que a prensa utilizada anteriormente deixou de estar disponível, tendo sido irremediavelmente danificada num incêndio. Assim, preparam-se provetes de 50 mm de diâmetro e 55 mm de altura, prensados em prensa hidráulica mecânica (Figura 35), com uma carga aplicada de 2 MPa (a força normalmente aplicada pelas prensas manuais de BTC).



a b

Figura 35 – Molde em prensa hidráulica mecânica (a) e respetivos provetes (b)

Os provetes para realização de testes à compressão e absorção de água por capilaridade foram armazenados em caixas fechadas com humidade relativa constante e à temperatura ambiente, tal como os provetes anteriores.

Os provetes para estudo de proliferação de fungos (teste de proliferação de fungos normalizado) foram armazenados em caixas com humidade constante

durante duas semanas para cura húmida e posteriormente foram sujeitos a diferentes ambientes. Alguns provetes ficaram em ambiente interior com humidade e temperatura comuns e outros foram expostos ao sol.

6.3.4. Provetes cilíndricos Ø 150x300 mm^3 de solo real

Para realização do ensaio de permeabilidade ao vapor de água prepararam-se provetes de 150 mm de diâmetro e 30 mm de altura, dimensão referida pela norma NP EN 1015-19: 2000. Estes foram produzidos com auxílio de molde metálico realizado para este efeito, através de compactação dinâmica com recurso a martelo pneumático, de base redonda com 100 mm de diâmetro, para simular a construção em taipa. Atendendo à mesma norma, os provetes foram mantidos em humidade relativa de 95 %, à temperatura de 20ºC, durante 5 dias para cura húmida e, posteriormente, foram mantidos durante 23 dias em câmara condicionada, com 50 % de humidade relativa, à temperatura de 20ºC.

6.3.5. Provetes cúbicos de solo preparado em laboratório e de solo real

Para realização de testes de erosão acelerada por jato de água, segundo adaptação da norma australiana HB-195 (2002), realizaram-se provetes de 200x200x200 mm^3, em moldes metálicos, compactados com martelo pneumático, de base redonda com 100 mm de diâmetro, para simular a construção em taipa. Tendo sido reforçada a prensagem nos cantos com uma peça metálica de base quadrangular. Estes provetes foram mantidos em laboratório, submetidos à temperatura e humidade ambiente até à data de ensaio. No fabrico dos provetes com solo preparado em laboratório realizou-se um provete por cada composição. No entanto, ao produzir os provetes com solo real, para otimização de material e tempo, optou-se por se juntar duas composições num mesmo provete como se observa na Figura 36 - c.



a b c

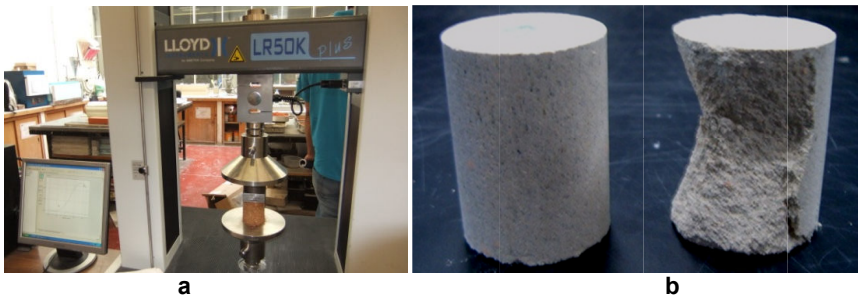
Figura 36 – Moldagem (a) e provetes cúbicos de solo preparado em laboratório (b) e solo real (c)

6.4. Métodos e normas de ensaio

Os métodos de ensaio utilizados basearam-se em normas existentes, nacionais ou estrangeiras, tendo em consideração vários fatores: as características dos provetes realizados, os meios técnicos disponíveis em laboratório e o paralelismo em relação ao que acontece "*in situ*" na construção em terra. É de referir que os provetes antes da realização de alguns ensaios foram submetidos a uma estabilização de humidade, em estufa a 40ºC, para manter todos os provetes com o mesmo grau de humidade, à exceção dos provetes para ensaio em estado saturado. Os ensaios em questão foram: compressão em estado seco; absorção de água por capilaridade ou por imersão; ciclos de molhagem e secagem; absorção de gota de água e erosão acelerada por jato de água.

6.4.1. Compressão uniaxial simples

Os testes de resistência à compressão realizaram-se em prensa hidráulica de precisão com uma carga aplicada a 1 mm/min (Figura 37), segundo a norma ASTM D1633, utilizando adicionalmente uma rótula entre o provete e êmbolo da máquina de teste. Para cada ensaio utilizaram-se três provetes por composição, utilizando mais provetes em resultados com maior dispersão de valores.



a b

Figura 37 – Prensa hidráulica utilizada e provetes antes e após a rotura

6.4.2. Absorção de água por capilaridade

Para avaliar a absorção de água por capilaridade optou-se por se utilizar um método semelhante ao utilizado para avaliar a altura de ascensão capilar em paredes. Este método, descrito numa antiga circular de informação técnica do LNEC (Gomes e Folque, 1953), consiste em colocar provetes sobre um leito de areia mantido permanentemente húmido. Neste caso acrescentou-se um tecido

de linho cru também humedecido para manter a superfície de ensaio mais plana e limpa. A Figura 38 apresenta um esquema do método de ensaio utilizado e a Figura 39 mostra provetes de solo real durante o teste.

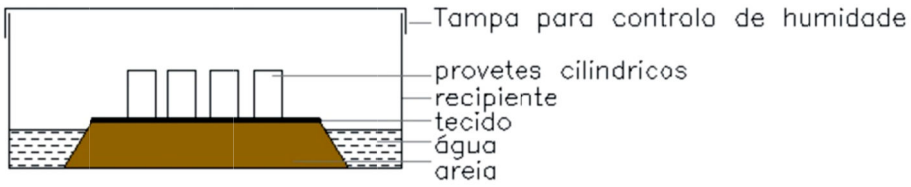


Figura 38 – Esquema de ensaio de absorção de água por capilaridade

Para o ensaio utilizaram-se dois provetes de cada composição e a absorção de água foi obtida mediante a diferença de massas dos provetes, registadas em diversos tempos até haver uma estabilização do valor de água absorvida. Apurou-se, como resultado do ensaio, o respetivo valor médio.

Este ensaio realizou-se tanto com provetes de solo preparado em laboratório de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura, como com provetes de solo real de 50 mm de diâmetro e 55 mm de altura.

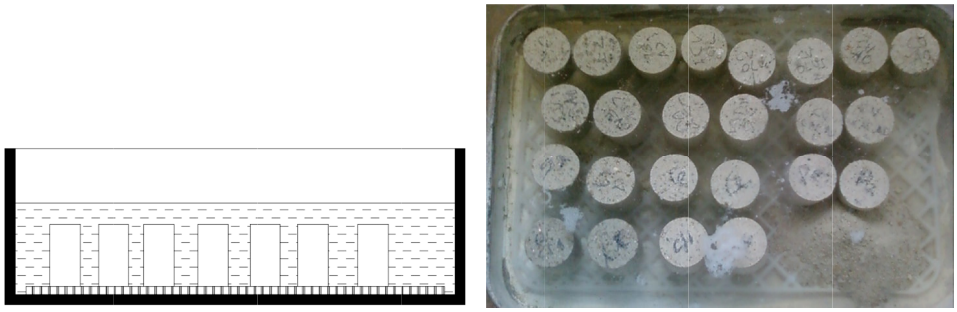


Figura 39 – Provetes de solo real durante ensaio de absorção de água por capilaridade

6.4.3. Absorção de água por imersão

Para realização deste ensaio os provetes foram imersos em água, obtendo-se o valor da água absorvida pela diferença de massas dos provetes em diversos tempos até ocorrer a estabilização deste valor.

A Figura 40 mostra um esquema do método de ensaio utilizado (Figura 40 - a) e provetes de solo preparado em laboratório durante o ensaio de imersão (Figura 40 – b).



a b

Figura 40 – Esquema de ensaio (a) e provetes de solo de laboratório durante ensaio de absorção de água por imersão (b)

6.4.4. Ciclos de molhagem e secagem

Para realização deste ensaio, procurou-se conhecer normas existentes para construção em terra compactada e adotou-se uma metodologia mais adequada à dimensão dos provetes cilíndricos realizados, uma vez que estes apresentam menor dimensão, 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura. A Tabela 21 mostra as normas analisadas e a metodologia adotada.

Tabela 21 – Metodologias de ensaio de Molhagem/Secagem para solo compactado

Metodologia	Dimensão dos provetes	Molhagem	Secagem	Nº de ciclos
ASTM D559-2003 Solo-cimento	Diâmetro – 101,6 mm Altura – 116,43 mm	Imersão em água – 5h Temperatura ambiente	71ºC – 42 h	12
NBR 13554-1996 Solo-cimento	Diâmetro – 100 mm Altura – 127,3 mm			6
LNEC E263-1972 Solo-cimento	Diâmetro – 102 mm Altura – 110 mm			12
Método utilizado	Diâmetro – 30 mm Altura – 40 mm		50ºC – 19 h	15

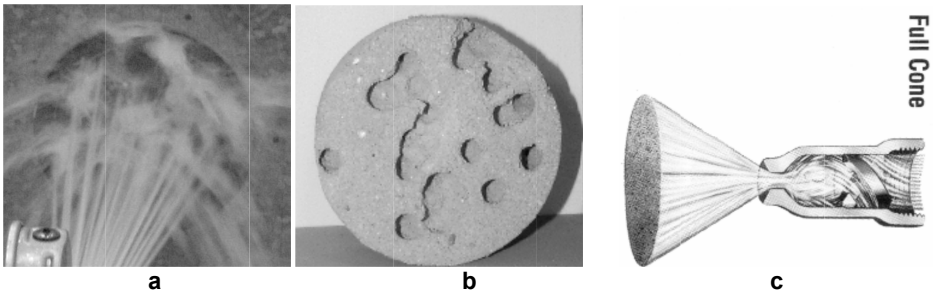
Assim, procedeu-se previamente à colocação dos provetes em estufa, um provete de cada composição, a 40ºC por 24 horas para estabilização da humidade e utilizou-se o seguinte procedimento para realização de 15 ciclos de molhagem e secagem: imersão dos provetes em água à temperatura ambiente durante 5 horas; posterior colocação dos provetes em estufa a 50ºC durante 19 horas e registo da massa dos provetes. Estes ciclos foram interrompidos durante os fins de semana, após 3 ciclos, mantendo-se os provetes em estufa a 40ºC a fim de estes secarem completamente, registando-se a perda de massa dos provetes.

6.4.5. Absorção de gota de água

Realizou-se um teste de absorção de gota de água que permite avaliar a repelência à água do solo designado por "*water drop penetration time test*, *WDPT test*". Este teste realizou-se seguindo o procedimento do "*Soil survey standard test method - Water repellency"* (OEH, 2011). O procedimento de teste consiste em deixar cair uma gota de água destilada, através de conta gotas, a 15 mm de altura do provete, registando o tempo que o solo demora a absorver a gota de água. Este procedimento foi repetido 3 vezes em dois provetes diferentes. Para interpretação de resultados consideraram-se as classes de repelência determinadas por Dekker & Ritsema (Dekker & Ritsema, 1994, in Orfánus et al, 2008).

6.4.6. Erosão acelerada por jato de água – Simulação de chuva

Para realização deste ensaio analisaram-se metodologias e normas existentes para ensaios de simulação de chuva, de erosão normal ou acelerada, aplicável à construção em terra (ver Tabela 22). Deste modo, verificou-se que os ensaios realizados com chuveiro ou mesmo com "*spray*" com dimensão controlada de gotas são demasiado agressivos, provocando cavidades isoladas nos provestes. Este desgaste pontual acontece porque o chuveiro ou "*spray*" normais formam jatos de água individuais em vez de formarem um único jato mais difusor. Facto este já observado por Heathcote (2002) que apresenta imagens de um provete com erosão excessiva (ver Figura 41 – a e b). Como solução, o autor utilizou um bico de pulverização alternativo, de cone completo, com maior capacidade de difusão de gotas (ver Figura 41 – c). Os métodos com utilização de mangueiras, para ensaio de vários provetes em simultâneo, também utilizam um jato pontual de água, seja com velocidade lenta ou acelerada (Minke, 2006 e Hall, 2005).



a b c

Figura 41 – Jato de água (a) e provete após ensaio (b) (Bulletin 5) e bico de pulverização de cone completo, *VeeJet Nozzle,* (Heathcote 2002)

Tabela 22 – Metodologias de ensaio de erosão por jatos de água – simulação de chuva

Metodologias	Distância (mm)	Pressão (kPa)	Caudal ou Velocidade	Jato	Nº de provetes	Orientação do jato	Tempo
(Cytryn, 1956) In Heathcote (2002)	250	50	4 L/min	Spray	1	Vertical	33 min
Wolfskill et al. (1970) In Heathcote (2002)	175	140	-	Spray	1	Horizontal	120 min
Kawamura & Diamond (1975)	-	-	-	Chuveiro		Vertical Provetes a 5º	2 Ciclos de 1h
Dad (1985) In Heathcote (2002)	2.450	42	Variável	Spray *Veejet nozzle*	Vários	Vertical Provetes a 30º	Variável (de algumas horas a dias)
Reddy & Jagadish (1987) In Heathcote (2002)	175	70	9 L/min	Chuveiro	1	Horizontal	120 a 240 min
Bulletin 5 Middleton & Schneider (1987)	470	50	29,6 L/min	Spray *special nozzle*	1	Horizontal	60 min
Houben & Guillaud (1989) In Maniatidis, Walker, 2000	200	140	-	Chuveiro	-	Horizontal	120 min
Ola & Mbata (1990) In Heathcote (2002)	140	Variável (de 40 a 450)	Variável (de 4,6 a 46,3L/min	Chuveiro	1	Vertical	180 min
Ogunye (1997) Baseado em Dad (1985) In Heathcote (2002)	2000	50	2,3 L/min	Spray *Veejet nozzle*	8	Vertical Provetes a 30º	120 horas
Dep. Housing Washington In Maniatidis, Walker, 2000	175	137	-	Chuveiro	-	Horizontal	120 min
Norton In Maniatidis, Walker, 2000	180	137	-	Chuveiro	-	Horizontal	120 min
Houben & Guillaud (1989) In In Maniatidis, Walker, 2000	200	140	-	Chuveiro	-	Horizontal	120 min
Norma Australiana HB 195-2002 (baseado no Bulletin 5)	470	50	29,6 L/min	Spray *special nozzle*	1	Horizontal	60 min
Heathcote (2002)	340	Variável (de 50 a 130)	Variável	*Veejet nozzle*	1	Horizontal	Variável (de 30 a 120 min)
Hall (2005) SHU climatic simulation chamber Simulação lenta e acelerada	-	- / 896	0,2 / 0,65 L/min	Mangueiras	Vários (paredes)	Diagonal 120º Provetes na vertical	5 dias
Minke (2006) BRL - Building Research Laboratory, Universidade de Kassel, in Minke 2006	-	-	3,24 m/sec	Mangueiras	6	Diagonal 45º	-
Método utilizado	**300**	**50**	**16,3L/min**	**Spray** *Veejet nozzle*	**1**	**horizontal**	**90 min**

Assim, optou-se por adotar uma metodologia semelhante à utilizada por Heathcote, utilizando um bico de difusão completa que permite obter uma maior distribuição das gotas de água em todo o diâmetro de impacto do jato, simulando de um modo mais natural a ação da chuva. Foi utilizado um bico difusor "*fulljet spray nozzle*" de 6,4 mm de diâmetro da *Sraying Systems Co*.

Optou-se, ainda, por não se limitar a zona de impacto da água no provete, mas sim deixar o provete a descoberto, podendo-se assim observar a erosão em zonas mais frágeis, como as esquinas e o embasamento. Isto porque o provete durante o ensaio por jato de água ficava também sujeito a uma espécie de inundação, com água corrente na base do provete.

Na Figura 42 observa-se o esquema de ensaio da norma australiana HB 195-2002 e o esquema do ensaio realizado neste estudo, bem como imagens dos dois métodos de ensaio.

O tempo de ensaio foi alargado de 60 para 90 minutos, uma vez que se queria observar as composições com biopolímeros, mais resistentes à água, por um maior período de tempo a fim de avaliar melhor a durabilidade do efeito hidrófugo dos biopolímeros.

Para realização do ensaio foram utilizados provetes previamente secos em estufa a 40ºC até obtenção de massa constante.

Depois da incidência do jato de água, durante 90 minutos ou até à erosão máxima do provete (desgaste que percorre todo o provete), mediu-se a profundidade das cavidades escavadas pela ação da água, em vários pontos na área de incidência do jato de água (média de 3 a 6 pontos, consoante o aumento do número de cavidades). Tendo-se o cuidado de registar qualquer buraco existente antes da realização deste teste. A erosão considerada para avaliação e comparação de resultados corresponde à média dos valores registados nas várias cavidades.

A precipitação simulada com este ensaio de erosão acelerada apresenta uma intensidade de 2898 L/min.m^2 ou mm/min. Assim, os 90 minutos de teste correspondem, aproximadamente, a 87 anos de chuva na região do Minho, cuja média anual de precipitação é a maior de Portugal, atingindo 3000 mm por ano (IM, 2005).

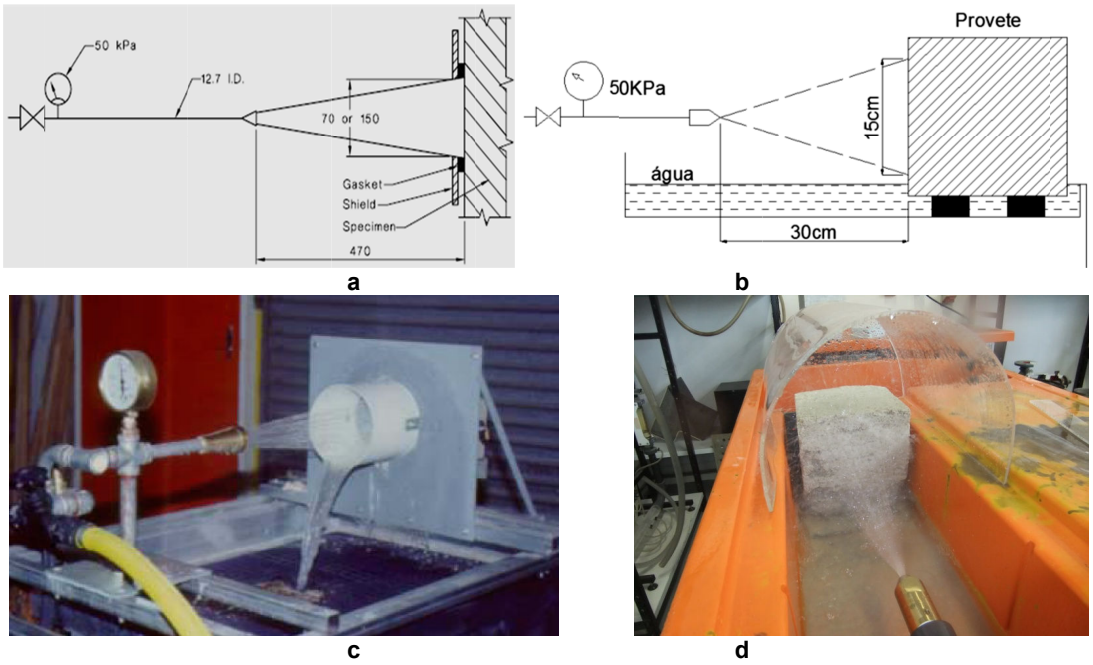


Figura 42 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água:
a e c – norma HB 195-2002 e b e d – método utilizado

6.4.7. Microscopia

6.4.7.1. Microscopia eletrónica de varrimento, MEV

Este estudo foi realizado no Laboratório de Serviços de Caracterização de Materiais da Universidade do Minho (SEMAT/UM) em Microscópio Eletrónico de Varrimento de Ultra alta resolução com emissão de campo utilizado para caracterização de nanomateriais. Possuindo este equipamento um sistema integrado de microanálise por raios-X (EDS - energy dispersive spectrometer) e analise de padrões de difração de eletrões retrodifundidos (EBSD - Electron Backscatter Diffraction), (SEMAT, 2011).

As amostras utilizadas, previamente secas, foram preparadas com um fino recobrimento por deposição de íons metálicos de liga de ouro-paládio (Au-Pd). Este recobrimento permite que a amostra se torne mais condutora possibilitando uma melhor visualização com o microscópio.

Estas amostras foram analisadas em diversas escalas microscópicas. As composições de solo preparado em laboratório, sem estabilizante, mas com adição de biopolímeros foram ampliadas 100 e 5.000 vezes. As composições de solo real, sem e com estabilizante e com as melhores composições de biopolímeros foram ampliadas a 150, 2000, 10.000 e 50.000 vezes. Foram,

também, obtidas algumas imagens EBSD e a respetiva análise de raios-x para verificar a composição dos minerais encontrados.

6.4.7.2. Microscopia ótica

Este estudo foi realizado com recurso a um microscópio ótico com ampliação de 20, 80 e 350 vezes.

Este microscópio tem a vantagem de com ele se poder obter imagens a cores e uma escala intermédia entre o que é observado a olho nu e a escala micro do microscópico eletrónico de varrimento. Além disso, permite observar amostras ainda húmidas, sem ser necessário secá-las.

6.4.8. Permeabilidade ao vapor de água

Este teste realizou-se mediante adaptação da norma de ensaio NP EN 1015 19:2000 (Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas) utilizando-se provetes específicos para o efeito (de Ø150x300 mm^3 e descritos em 6.2), utilizando-se, neste caso, um provete por composição.

O teste consiste na colocação de provetes em cápsulas de ensaio próprias que permitem manter os provetes em contacto com dois ambientes distintos: o ambiente criado por uma solução salina no interior da cápsula de teste com humidade e pressão constantes e o ambiente exterior ao provete que pela norma também deverá ser um ambiente controlado, mas com uma humidade diferente da proporcionada pela solução salina.

A metodologia de ensaio adotada, atendendo ao que foi possível obter em laboratório, foi a seguinte:

- O primeiro passo foi selecionar um espaço o mais encerrado possível em laboratório e para isso utilizou-se um pequeno compartimento como sala de teste;
- Foi preparada uma solução salina de nitrato de potássio (KNO_3) que pela norma fornece uma humidade relativa de 93,2 % a 20ºC, mas considerando que a temperatura da sala de teste é diferente mediu-se a temperatura e humidade com um sensor, apropriado colocado próximo da solução,

fechando o conjunto com um saco plástico; Registando-se valores médios de humidade relativa de 95 % e 24ºC (ver Figura 43);

- Nas cápsulas de teste, concebidas de acordo com a norma, foi colocada a solução salina, mantendo cerca de 10 mm de espaço de ar entre esta e o provete, sendo seladas com silicone (ver Figura 44);
- As cápsulas preparadas com as composições a testar foram pesadas e colocadas em duas caixas isolantes para manter a humidade ambiente, mas com uma pequena abertura para evitar a saturação. A temperatura e humidade foram monitorizadas em cada caixa;
- Por último, realizaram-se a pesagens das cápsulas em períodos curtos na fase inicial do ensaio (após 1, 2, 4 e 6 horas) e em períodos consecutivos de 24 horas, até à estabilização dos valores obtidos.

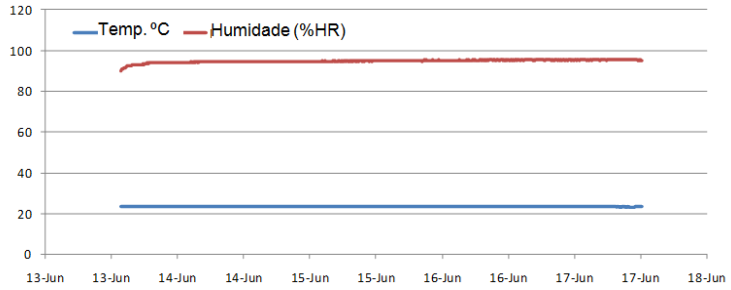


Figura 43 – Temperatura e humidade ambiente da solução de nitrato de potássio isolada

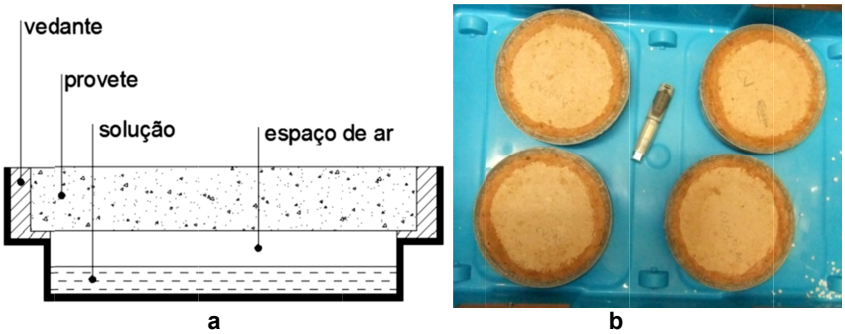


Figura 44 – Esquema da cápsula de teste e cápsulas de teste durante o ensaio

Os sensores colocados no interior das caixas de armazenamento registaram níveis de temperatura e humidade instáveis, resultantes da modificação do ambiente na sala de teste (como abertura da porta e variação da iluminação do espaço), conforme se verifica nas Figuras 45 e 46. Deste modo, optou-se por se considerar uma média ponderada da humidade relativa, considerando o valor de humidade verificado durante o maior número de dias. Resultando em

valores de 71 %, numa caixa (caixa 1) e 76 % noutra caixa utilizada (caixa 2), mantendo-se 25ºC de temperatura em ambas as caixas.

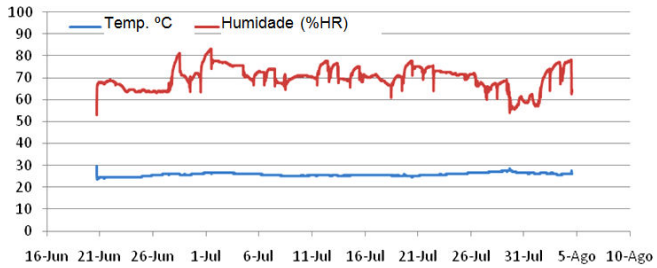


Figura 45 – Temperatura e humidade ambiente – caixa 1

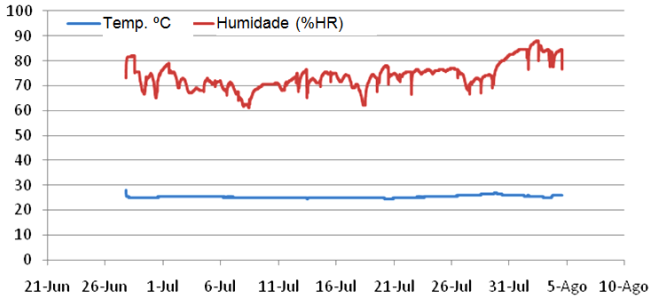


Figura 46 – Temperatura e humidade ambiente - caixa 2

Para calcular a permeabilidade ao vapor de água seguiu-se o procedimento da norma calculando-se:

- O fluxo de vapor de água, $\Delta G/\Delta t$, para o intervalo higroscópico em estudo, obtido a partir do gráfico que exprime a relação entre a massa da cápsula de ensaio e o tempo; e
- A permeância ao vapor de água ($\wedge$), "fluxo de vapor de água que passa por uma área sob condições de equilíbrio por unidade de diferença na pressão de vapor de água entre dois lados do mesmo material", sendo determinada pela equação 4:

$$\wedge = \frac{1}{A\Delta_p/(\Delta G/\Delta t) - R_A} \quad \text{(em kg/m}^2\text{.s.Pa)} \qquad \textbf{(4)}$$

Em que:

- A = área da abertura do copo de ensaio (m^2);
- Δ_p = diferença de pressão do vapor de água entre ar ambiente e a solução salina saturada, calculado em quadros adequados (Pa);
- $\Delta G/\Delta t$ = fluxo do vapor de água (kg/s);
- $\wedge$ = permeância ao vapor de água (kg/m^2.s.Pa); e

- R_A = resistência ao vapor de água da folga de ar entre o provete e a solução salina ($0{,}048 \times 10^9$ Pa m^2 s/kg por 10 mm de folga).

O parâmetro Δ_p, diferença de pressão de vapor de água, é calculado pela diferença de pressão entre os dois ambientes. Para cada ambiente (P) determina-se pela equação 5:

$$P = P_s \times \frac{HR}{100} \quad \text{(em Pa)} \qquad \textbf{(5)}$$

O parâmetro P_s, pressão parcial de saturação (P_s), foi obtido através da Tabela 23 (Rodrigues, 2004). Considerando que a temperatura média durante o ensaio foi de 25ºC a pressão parcial corresponde a 3164 Pa.

Tabela 23 – Pressão parcial do vapor em função da temperatura (Rodrigues, 2004)

Temperatura (ºC)	Ps (Pa)
18	2060
19	2195
20	2336
21	2483
22	2640
23	2806
24	2980
25	3164

Obtendo-se diferenças de pressão do vapor de água, Δ_p, de 759,36 Pa (caixa com 71 %HR) e de 601,16 Pa (caixa com 76% HR).

A permeabilidade ao vapor de água obtêm-se multiplicando o valor da permeância pela espessura do provete, equação 6:

$$\pi = \Lambda \times e \quad \text{(em kg / m.s.Pa)} \qquad \textbf{(6)}$$

A espessura da camada de ar de difusão equivalente, Sd, é determinada a partir da permeabilidade ao vapor de água, equação 7, (Rodrigues, 2004).

$$S_d = 1{,}95 \times 10^{-10} . e / \pi \quad \text{(em m)} \qquad \textbf{(7)}$$

6.4.9. Proliferação de fungos

Para este estudo foram colocados provetes em distintas situações para observação do crescimento de fungos:

- Provetes em ambiente interior com humidade e temperatura comuns, sujeitos a uma média de 22ºC de temperatura e 50 % de humidade relativa durante um mês;

- Provetes expostos ao sol, ou seja, em ambiente exterior durante dois meses, não tendo ocorrido períodos de chuva e com a maioria dos dias com céu limpo e com sol; e
- Parte destes mesmos provetes (de ambiente interior e expostos ao sol) posteriormente colocados em ambiente propício ao aparecimento de fungos, segundo teste de proliferação de fungos normalizado.

O teste normalizado foi realizado segundo adaptação da norma ASTM, D 3273 – 00, *Standard Test Method for Resistance to Growth of Mold on the Surface of Interior Coatings in an Environmental Chamber*. Esta norma refere um método de teste que pressupõe um estudo acelerado de resistência ao desenvolvimento de fungos para pinturas interiores.

Assim, considerou-se que seria um método útil e viável para averiguar o aparecimento de fungos nas composições estudadas, nomeadamente nas composições com óleo, em ambientes com uma humidade relativa superior.

Para este ensaio a norma prevê a utilização de uma câmara com ambiente controlado, preparada para o efeito, através da utilização de um tanque com uma resistência imersa que mantém o ambiente com uma humidade relativa de 95 a 98% e uma temperatura de 32,5 ± 1ºC. Colocando-se dentro desta câmara um recipiente com solo orgânico com culturas de fungos de determinadas espécies que ficam em crescimento por duas semanas. Posteriormente, são colocadas as amostras de material a testar, na vertical e afastadas do solo aproximadamente 75 mm, permanecendo na caixa para observação do crescimento de fungos nas mesmas, fungos estes, que deverão surgir nas amostras padrão, sem resistência a fungos, entre duas a três semanas.

O procedimento utilizado para este teste foi mais simplificado em relação à norma atendendo ao que foi possível preparar em laboratório, adotando os seguintes passos:

- Em laboratório testou-se um procedimento semelhante para preparação da câmara com ambiente controlado, mas a utilização da resistência imersa não gerou o efeito esperado. Deste modo, preparou-se a câmara de ensaio utilizando uma caixa isolante apenas com água no fundo e com pequena

abertura na tampa da caixa para não ocorrer uma saturação de humidade (ver Figura – a) e obteve-se uma humidade relativa média de 94, % e temperatura média de 28,7ºC;

- Preparou-se um recipiente com solo orgânico com fungos existentes em zonas húmidas (casas de banho e cozinha) recolhidos em papel, sendo este conjunto polvilhado com um pouco de amido de milho, para agilizar o crescimento destes fungos pelo solo, colocando-se na caixa de ambiente controlado (ver Figura 47);
- Após duas semanas, em cima do recipiente preparado com solo e fungos, colocou-se uma rede a aproximadamente 75 mm do solo; e
- Colocaram-se os provetes com as composições a testar, na vertical e devidamente separados entre si, seguindo-se a observação dos provetes durante dois meses (ver Figura 48 – b).



Figura 47 – Solo orgânico com fungos



a **b**

Figura 48 – Caixa com ambiente controlado (a) e provetes durante o ensaio de fungos (b)

Durante o ensaio verificou-se uma temperatura média de 27,2ºC e uma humidade relativa média de 98 %, havendo registo a partir de certa altura de 100% HR devido à queda de água, por condensação, sobre o sensor utilizado (Figura 49).

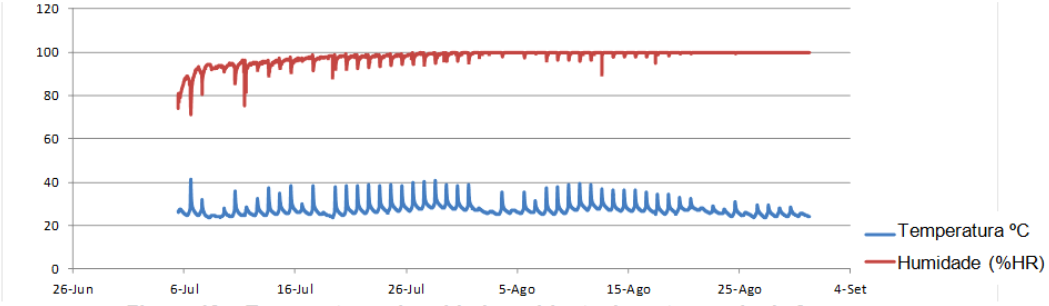


Figura 49 – Temperatura e humidade ambiente durante ensaio de fungos

6.4. Referências de estudo

Os valores de referência de resultados obtidos em ensaios com solo compactado (Taipa e BTC) encontrados na revisão bibliográfica apresentam-se de seguida de forma sintética em tabelas. Estes valores permitirão uma análise comparativa de resultados, ainda que, praticamente, não tenham sido encontrados valores de referência para solo estabilizado com cal viva, com adição de biopolímeros ou incorporação de aditivos minerais. As referências sobre estes tipos estabilização encontram-se de forma escassa e apenas em estudos sobre argamassas ou adobe (já referidas no capítulo 4) e não permitem uma comparação direta de resultados.

6.4.1. Resistência à compressão

Na Tabela 24 observam-se os valores de referência encontrados de resistência à compressão de solo compactado, com 28 dias de idade, ou sem referência à idade dos provetes de teste, em estado seco ou saturado (sat.).

Tabela 24 – Valores de referência de resistência à compressão

Composição		Taipa	BTC	Referência
Não definida		1 a 15 MPa	1 a 25 MPa	**Norma australiana HB 195-2002 - Walker & Standards Australia, 2002**
Solo não estabilizado		Mínimo de 2 MPa	-	***New Mexico Code* -Tibbets, 2001, in Maniatidis & Walker, 2003)**
		2,20 MPa 0,76 MPa (Sat.)	-	**HUD - PD&R, 2005**
Solo com cal hidratada ou cimento		3 – 5 Mpa	2 a 4 Mpa	***Lehmbau Regeln* Dachverband Lehm e.V. , 2008**
Solo/cimento (5%)	Estado seco	-	15,4 Mpa	**Guettala et al, 2005** BTC - Força de prensagem 15 MPa
	Estado saturado	-	9 Mpa (-42 %)	
Solo/cal (8%)	Estado seco	-	15,9 Mpa	
	Estado saturado	-	10,1 Mpa (-36 %)	

Tabela 24 – Valores de referência de resistência à compressão (continuação)

Composição		Taipa	BTC	Referência
Solo/cimento (4%)			≈ 2 a 7,5 Mpa	**Houben & Guillaud, 2008**
Solo/cal (4%)			≈ 2 a 4 Mpa	
Solo/cimento (6%)			3,52 MPa	**Bomfim de Souza, 2006** Provetes cilíndricos (Ø = 10 cm)
Solo estabilizado com cal viva (1,4 a 2,6%) e subproduto da indústria do aço (ligante hidráulico) (5,6 a 10,5%)		-	3 a 4 (28 dias) 5 a 7,4 (90dias) (dependendo do método de prensagem)	**Oti et al, 2009 e Oti et al, 2010** (BTC – 21,5×10,25×6,5 cm)
Solo com alginato de sódio sem ou com resina	Alginato de sódio (19,75%)	-	2,23 MPa	**Galán-Marín et al, 2010** (Provetes compactados de 4x4x16cm)
	Alginato de sódio (19,75%) e resina (0,5%)	-	3,77 MPa	
Solo laterítico com excrementos de minhocas	Solo simples	-	0,85 MPa	**Kamang, 1998** (BTC – 24×14×9 cm)
	Solo com excrementos (8%)		2,32 MPa (seco) 0,58 MPa (sat.) (-75 %)	
Solo não estabilizado			1 MPa	**Santos da Cruz, 2004** (Solo - 70% de areia e 30% de caulino e Provetes cilindricos de solo compactado - Ø = 3 cm, altura = 4,5 cm)
Solo/cimento (6%)			5 MPa e 3,2 MPa (sat.) (-36 %)	
Solo/cimento com aditivos minerais	Cloreto de sódio		5 MPa e 3,3 MPa (sat.)	
	Cloreto de cálcio		5 MPa e 3,3 MPa (sat.)	
	Hidróxido de sódio		6,2 MPa e 4,8 MPa (sat.)	
	Silicato de sódio		5,3 MPa e 3,9 MPa (sat.)	
	Hidróxido com silicato de sódio		6 MPa e 4,3 MPa (sat.)	

Uma vez que o ligante selecionado para o estudo laboratorial foi a cal procurou-se informação sobre a reatividade da cal e verificou-se que a reatividade da cal pode ser determinada pelo aumento na resistência à compressão, aos 7 dias de idade a 23ºC, pelos resultados da Tabela 25 (Thompson, 1964, in Houben & Guillaud, 2008).

Tabela 25 – Valores de referência de resistência à compressão Adaptado de (Houben & Guillaud, 2008)

Grupo	Aumento da resistência (MPa)	Reatividade
1	0,1	Não reativa
2	0,1 a 0,35	
3	0,35 a 0,7	Reativa
4	0,7 a 1,05	
5	1,05 e mais	

6.4.2. Absorção de água por capilaridade

É referido para os materiais de construção à base de terra o coeficiente de absorção capilar típico de 6 a 13,4 Kg/(m^2.√h), podendo ocorrer um mínimo de 1,2 (Rohlen & Ziegert, 2011).

Relativamente à terra compactada (taipa ou btc) são referidos valores para solo/cimento, solo/cal e solo com aditivos minerais (Tabela 26). Ainda que sejam apresentados apenas os valores máximos de absorção e com unidades diferentes (em percentagem ou em g/cm^2), estes são uma referência comparativa da absorção por capilaridade segundo o tipo de estabilizante e segundo os aditivos minerais utilizados.

Relativamente à adição de biopolímeros não foram encontrados valores de absorção de água.

Tabela 26 – Valores de referência - máximos de absorção de água por capilaridade

Composição	Taipa	BTC	Referência
Solo / cimento (5%)	-	2,35 %	**Guettala et al, 2005** BTC - Força de prensagem 15 MPa
Solo / cal (8%)	-	3,7 %	
Solo/cimento (6%)	0,80 g/cm^2		**Santos da Cruz, 2004** (Solo - 70% de areia e 30% de caulino e Provetes cilindricos Ø = 3 cm, altura = 4,5 cm)
Solo/cimento com aditivos minerais	Cloreto de sódio - 0,80 g/cm^2 Cloreto de cálcio - 0,79 g/cm^2 Hidróxido de sódio – 0,77 g/cm^2 Silicato de sódio - 0,79 g/cm^2 Hidróxido com silicato de sódio - 0,77 g/cm^2		

6.4.3. Absorção de água por imersão

Apenas foram encontrados valores de absorção de água por imersão para BTC, ver Tabela 27. Não se encontrando valores para a construção em taipa, nem para solo com adição de biopolímeros ou aditivos minerais.

Tabela 27 – Valores de referência - máximos de absorção de água por imersão

Composição	BTC	Referência
Solo não estabilizado ou com estabilizante convencional (Cal hidratada ou cimento)	10 a 25 %	**Norma australiana HB 195-2002 - Walker & Standards Australia, 2002**
Solo / cimento (5%)	8 %	**Guettala et al, 2005** BTC - Força de prensagem 15 MPa
Solo / cal (8%)	10 %	
Solo / cimento (6%)	18 %	**Bomfim de Souza, 2006** Provetes cilíndricos (Ø = 10 cm)

6.4.4. Molhagem/secagem

Apenas foram encontrados valores de perda de massa após ensaio de ciclos de molhagem/secagem para solo estabilizado com cimento ou cal.

Um estudo de outro autor sobre BTC revela que com solo/cimento (5 %) existe uma perda de massa de 1 % e com solo/cal (8 %) existe uma perda de massa de 2 % (Guettala et al, 2005).

6.4.5. Erosão acelerada por jato de água

Para a construção em taipa ou em BTC é referido que para o ensaio de erosão acelerada (teste "*Bulletin 5*" de jato horizontal a 47cm de distância ao chuveiro e pressão de 50 KPa, durante 1 hora), a erosão, medida pela profundidade das cavidades formadas, não deve exceder 1mm/minuto (Middleton & Schneider, 1987).

Os resultados obtidos no estudo sobre BTC de Guettala et al, com um ensaio de erosão acelerada (jato horizontal a 17 cm de distância ao chuveiro e com pressão de 1,6 Kg/m^2, durante duas horas), revelam que em solo/cimento (5 %) se obtém uma erosão de 1,0 mm e com solo/cal (8 %) 2,2 mm (Guettala et al, 2005).

6.4.6. Permeabilidade ao vapor de água

Não foram encontradas referências de resultados de ensaios de permeabilidade ao vapor de água sobre construção em taipa ou BTC. Existem estudos sobre argamassas, mas estes não serão comparáveis uma vez que a massa volúmica é diferente em relação ao solo compactado, e como tal, a permeabilidade também será diferente. Contudo, é possível estabelecer uma comparação de resultados com valores médios do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, C.P., de vários materiais de construção, conforme documentado na Tabela 28.

Poder-se-á estabelecer, ainda, uma comparação qualitativa com os estudos de Čechová sobre argamassas de cal hidratada com óleo de linhaça (Čechová, 2009). Contudo, pelas razões já referidas, não é possível estabelecer uma comparação quantitativa dos resultados.

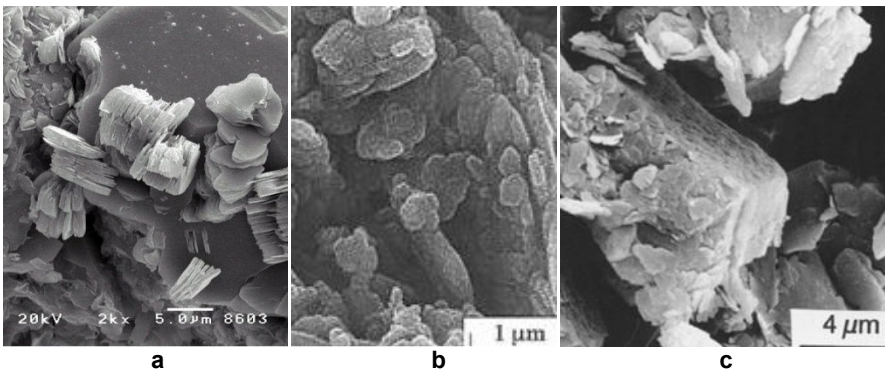
Tabela 28 – Valores de referência – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (adaptado de Pinto, 2002)

Materiais de construção	Valores médios C. P. π (kg/m.s.Pa)*10^{12}
Argamassa à base de cal	16,75
Argamassa à base de cimento	9,75
Produtos cerâmicos	23
Cerâmicos vitrificados	1,25
Gesso cartonado	25,5
Pedra calcária 2000kg/m3	9,4
Pedra Calcária 2500kg/m3	2,1
Reboco de gesso	27,5
Tijolo silico-calcário	13,5
Alv - blocos betão vazados	68
Alv - granito	22
Alv - tijolo maciço	94
Alv -tijolo vazado	52
Betão convencional	6,86
Pinho	5,75
Aglomerado de cortiça expandida	22
Lã de rocha	155
Poliestireno expandido	5,6
Poliestireno extrudido	1,45

6.4.7. Microscopia eletrónica de varrimento

Para que seja realizar a identificação do tipo de argilas existentes no solo real utilizado, procuraram-se imagens de microscopia eletrónica de varrimento que mostrem a forma e a disposição típica dos três tipos de argila que se encontram com maior frequência nos solos, caulinite, montemorilonite e ilite.

A Figura 50 mostra imagens microscópicas de caulinite identificada por vários autores, OMNI Laboratories, Inc, 2010, Ma & Pierre, 1999, e Pruett & Murray, 1991.



a **b** **c**

Figura 50 – Imagens de microscopia de solos com caulinite (a, b e c) (a - OMNI Laboratories, Inc, 2010; b - Ma & Pierre, 1999 e c – Pruett & Murray,1991)

A Figura 51 mostra uma imagem microscópicas de montemorilonite identificada por OMNI Laboratories, Inc, 2010.

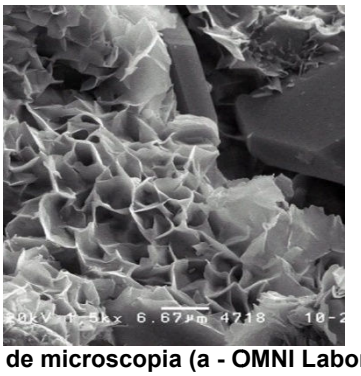
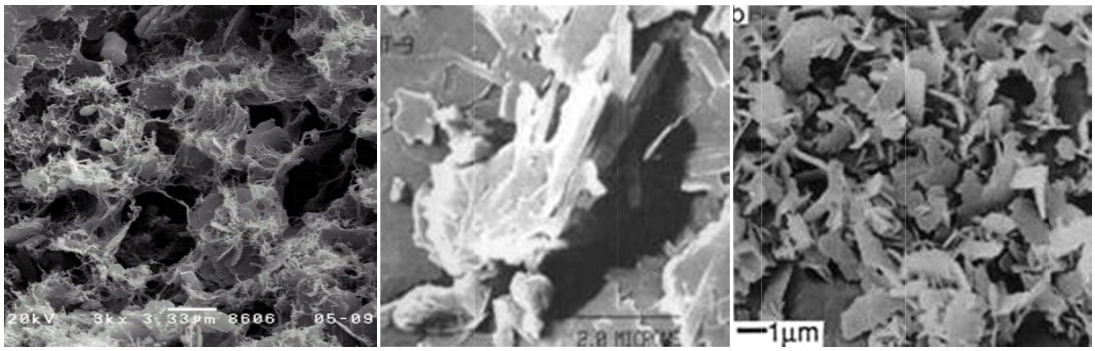


Figura 51 – Imagem de microscopia (a - OMNI Laboratories, Inc, 2010)

A Figura 52 mostra imagens microscópicas de ilite identificada por vários autores, OMNI Laboratories, Inc, 2010, Güven, 2001, e Small, 1993.



a **b** **c**

Figura 52 – Imagens de microscopia de solos com ilite (a, b e c)
(a - OMNI Laboratories, Inc, 2010; b – Güven, 2001 e c – Small, 1993)

7. Composições estudadas e respetivos ensaios realizados

7.1. Introdução

O objetivo deste estudo laboratorial consiste na análise do desempenho de diversos biopolímeros utilizados como aditivo para melhorar o comportamento dos solos perante a presença de água.

Assim, após revisão bibliográfica, selecionaram-se diferentes biopolímeros e aditivos minerais de efeitos complementares para aferir o seu desempenho quando adicionados ao solo simples, preparado em laboratório e obtido pela mistura de 80 % de areia média e 20 % de caulino branco, sem estabilizante.

Simultaneamente, realizou-se uma comparação da estabilização com cal viva face aos estabilizantes convencionalmente utilizados na construção, o cimento e a cal hidratada. Testando-se ainda a estabilização do solo com diferentes percentagens de cal.

Após a análise dos biopolímeros e aditivos em solo simples e da seleção dos biopolímeros e aditivos com melhor desempenho, procedeu-se à análise do desempenho destes incorporando-os num solo estabilizado com 4 % de cal viva.

Por último, a fim de verificar a exequibilidade na prática construtiva destas misturas, analisou-se o desempenho das melhores composições utilizando um solo real de origem portuguesa com 59 % de areia, 17 % de silte e 24 % de argila (percentagem em volume).

7.2. Composições com biopolímeros

Os biopolímeros selecionados para utilizar neste estudo dividem-se em duas categorias: os de forma sólida, em pó, e os de forma líquida. Procurou-se utilizar materiais acessíveis, usados no quotidiano ou facilmente encontrados. São, no entanto, exceção a caseína e a água de celulose, resultantes de resíduos industriais.

7.2.1. Biopolímeros de forma sólida

Utilizaram-se biopolímeros à base de glicose na forma de pó ou granulado. Selecionando-se o amido de milho, a farinha e o açúcar, com base em estudos anteriores e segundo a bibliografia estudada (Eires, 2009).

7.2.2. Biopolímeros de forma líquida

Utilizaram-se biopolímeros à base de gorduras ou com gorduras na sua constituição. Selecionando-se o óleo de linhaça, o glicerol e a caseína, segundo os biopolímeros utilizados por outros autores na bibliografia observada. Os novos biopolímeros testados foram: o óleo vegetal usado, a água de celulose e água de palha pelas razões a seguir indicadas.

O óleo vegetal usado, vulgarmente conhecido como óleo de cozinha utilizado, é resíduo alimentar e como tal é um material acessível e sem custos.

A água de celulose e água de palha utilizaram-se no sentido de averiguar o efeito da água com celulose resultante da imersão prolongada de palha ou de fibras de papel (resíduos da industria de papel). Isto porque se verifica ser comum a utilização de palha como reforço de solos para construção, utilizando a palha após imersão da mesma durante algumas horas em água. Esta água saturada com compostos libertos pela palha (biopolímeros à base de celulose e legnina) é também utilizada durante a construção com a finalidade de melhorar a resistência do solo (Fathy, 2009). A utilização das fibras de papel prende-se com o facto de ser um resíduo industrial ainda sem reutilização possível e poder substituir a palha como reforço de solos para a construção.

Na bibliografia observada encontrou-se referência à utilização de outros biopolímeros, como por exemplo o cato (*nopal* ou *aloé*), óleo de palma, ou o óleo de motor usado, mas no geral são materiais de difícil acesso em Portugal e o óleo de motor usado é tóxico segundo o estudo de Avaliação toxicológica durante a biodegradação de óleos e biodiesel de Tamada (Tamada, 2009).

As percentagens utilizadas dos diferentes biopolímeros resultam de uma procura de economia de utilização dos materiais. No entanto verificou-se a utilização de diferentes percentagens na bibliografia revista. A generalidade dos autores apresenta valores de adição de amido entre 1 e 2 % do peso do solo e adição de óleos entre 3 % do peso do solo ou 1 a 5 % do peso da cal. Neste caso, optou-se pela utilização de 0,4 % (do peso do solo) de amido, óleo de linhaça e glicerol, tendo-se recorrido a esta menor quantidade com base em estudos anteriormente realizados (Eires, 2009). Os restantes biopolímeros

foram utilizados com a percentagem de 1 % com base na bibliografia consultada.

Realizaram-se provetes cilíndricos de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura, seguindo a metodologia adotada (ver capitulo 6), de solo fabricado em laboratório com incorporação dos diferentes biopolímeros. Foram realizadas as composições que se apresentam na Tabela 29.

Tabela 29 – Composições com biopolímeros

Composição	Solo base	Biopolímeros	
REF	80 % de Areia 20 % de Caulino		-
AM		**Sólidos**	Amido 0,4 %
FA			Farinha 1 %
AÇ			Açúcar 1 %
O.L		**Líquidos**	Óleo de linhaça 0,4 %
GL			Glicerol 0,4 %
CAS			Caseína 1 %
O.V.U			Óleo vegetal usado 1 %
A.C			Água de Celulose 1 %
A.P			Água de Palha 1 %

7.3. Composições com biopolímeros e aditivos minerais

7.3.1. Composições com aditivos ligantes e religantes

Foram testadas, essencialmente, duas categorias de aditivos minerais para distintas funcionalidades, embora o objetivo seja sempre melhorar o comportamento face à água. Uma funcionalidade é a de incrementar a ligação entre as partículas do solo, aumentando assim a aderência entre todos os materiais componentes, sendo a outra funcionalidade, a de religar as partículas da argila, dificultando deste modo o caminho da água em direção ao interior do provete durante a absorção de água. Para tal, selecionaram-se como aditivos minerais ligantes o hidróxido de sódio, o silicato de sódio e o alúmen. E como aditivos religantes o cloreto de sódio, o cloreto de cálcio e o borato de sódio, também conhecido por bórax.

Assim, realizaram-se as composições da Tabela 30 com aditivos ligantes e as composições da Tabela 31 com aditivos com função religante. Os provetes foram realizados de modo idêntico aos provetes anteriores com biopolímeros.

Tabela 30 – Composições com aditivos minerais ligantes

Composição	Solo base	Aditivos Minerais Ligantes
REF	80 % de Areia 20 % de Caulino	-
NaOH		Hidróxido de sódio 0,1 %
Na_2SiO_3		Silicato de sódio 0,1 %
NaOH + Na_2SiO_3		Hidróxido 0,05% + Silicato de sódio 0,05 %
Al ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$)		Alúmen 0,1 %

Tabela 31 – Composições com aditivos minerais religantes

Composição	Solo base	Aditivos Minerais Religantes
REF	80 % de Areia 20 % de Caulino	-
NaCl		Cloreto de sódio 0,1 %
CaCl		Cloreto de cálcio 0,1 %
Bórax		Borato de sódio 0,1 %

Realizaram-se, ainda, as seguintes composições com hidróxido e os biopolímeros testados, à exceção da água de celulose e de palha, pelos seus resultados na incorporação em solo simples, sem estabilizante, não terem sido satisfatórios (ver Tabela 32).

Tabela 32 – Composições com biopolímeros e hidróxido de sódio

Composição	Solo base	Biopolímeros		NaOH
REF	80% de Areia 20% de Caulino	-		-
NaOH		-		0,1 %
AM_NaOH		**Sólidos**	Amido 0,4 %	0,1 %
FA_NaOH			Farinha 1 %	0,1 %
AÇ_NaOH			Açúcar 1 %	0,1 %
O.L_NaOH		**Líquidos**	Óleo de linhaça 0,4 %	0,1 %
GL_NaOH			Glicerol 0,4 %	0,1 %
CAS_NaOH			Caseína 1 %	0,1 %
O.V.U_NaOH			Óleo vegetal usado 1 %	0,1 %

7.4. Composições de solo estabilizado com cal viva e outros estabilizantes

No sentido de avaliar o desempenho das composições com biopolímeros e aditivos selecionadas anteriormente, procedeu-se à realização de composições de solo estabilizado com cal viva e com incorporação de diferentes estabilizantes para comparação de resultados. Deste modo, foi possível fixar uma composição de solo com estabilizante para o estudo da incorporação de biopolímeros em solo estabilizado.

A opção pela cal viva como estabilizante neste estudo surgiu como resultado da revisão bibliográfica realizada relativamente a métodos de proteção face à ação da água (ver capítulo 4). Verificando-se que em Portugal e noutros países era prática comum a utilização da cal viva recorrendo a um processo de hidratação em simultâneo com a terra em estado húmido. Sendo ainda, por vezes, adicionada gordura de origem animal ou vegetal durante este processo. Só depois da hidratação da cal o solo era utilizado para construir, através de compactação, no caso da taipa, ou pela adição de mais água para fabrico de argamassas.

Este método permitia obter um material mais resistente e durável. Tal, pode ser atribuído à formação de ligações físico-químicas mais fortes entre o solo e o estabilizante resultante da hidratação da cal juntamente com o solo, acrescentando-lhe ainda propriedades hidrófobas através da incorporação de gorduras, tornando este material mais resistente às ações da água. Como tal, pretende-se neste capítulo estabelecer uma comparação da utilização deste método de estabilização com cal viva face aos outros estabilizantes convencionalmente utilizados na construção corrente, o cimento e a cal hidratada.

Para tal, seguindo o método de mistura referido no capítulo 6, produziram-se provetes, semelhantes, com diferentes percentagens de cal, em função da massa do solo, para fixação da percentagem ótima de estabilizante a utilizar nas composições seguintes. Estas composições encontram-se na Tabela 33.

De igual modo, prepararam-se provetes com os diferentes estabilizantes mediante as composições da Tabela 34. Tendo sido preparado um novo solo não estabilizado, de referência, REF-2, a fim de manter as mesmas condições de temperatura que as composições em comparação nesta segunda etapa.

Tabela 33 – Composições de solo não estabilizado e solo estabilizado com cal viva

Composição	Solo base	Estabilizante
REF-2	80 % Areia 20 % Caulino	-
CV2%		Cal viva 2 %
CV4%		Cal viva 4 %
CV6%		Cal viva 6 %

Tabela 34 – Composições de solo com diferentes estabilizantes

Composição	Solo base	Estabilizante
REF-2	80 % Areia 20 % Caulino	-
CV		Cal viva 4 %
CH		Cal hidratada 4 %
Ci		Cimento 4 %

7.5. Composições de biopolímero e aditivo mineral em solo estabilizado

Após a análise dos resultados, realizaram-se composições com cal viva, o biopolímero selecionado, o óleo vegetal usado e, como aditivo mineral, o hidróxido de sódio, ver Tabela 35. Preparam-se provetes idênticos aos anteriores, seguindo a metodologia de mistura referida no capítulo 6.

Tabela 35 – Composições com solo estabilizado, biopolímeros e aditivo mineral

Composição	Solo base	Estabilizante	Aditivo	Biopolímeros
CV	80 % de Areia 20 % de Caulino	Cal viva 4%	-	-
CV_NaOH			NaOH 0.1 %	-
CV_O.V.U			-	Óleo vegetal usado 1 %
CV_O.V.U_NaOH			NaOH 0.1 %	Óleo vegetal usado 1 %

Realizaram-se ainda provetes de 200x200x200 mm^3 para ensaios de erosão acelerada por simulação de chuva por jato de água (ver metodologia de ensaio no capítulo 6), com a composição de cal viva com e sem o óleo selecionado, tendo em maior consideração o comportamento face à absorção de água por capilaridade. De igual modo, prepararam-se composições com os restantes estabilizantes para comparação de resultados (ver Tabela 36).

Tabela 36 – Composições com solo estabilizado e biopolímeros

Composição	Solo base	Estabilizante	Biopolímeros
REF	80 % de Areia 20 % de Caulino	-	-
CH		Cal hidratada 4 %	-
Ci		Cimento 4 %	-
CV		Cal viva 4 %	-
CV_O.V.U			Óleo vegetal usado 1 %

7.6. Composições de biopolímeros em solo estabilizado real

No sentido de verificar o potencial efeito da cal viva e do óleo vegetal usado, sem e com hidróxido de sódio, em solo real em comparação com os outros estabilizantes, realizaram-se as composições da Tabela 37.

Assim, realizaram-se provetes cilíndricos (50 mm de diâmetro e 57 mm de altura) para ensaios de resistência, absorção de água e desenvolvimento de fungos; provetes cúbicos de 200x200x200 mm^3 para testes de erosão à água; e provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 30 mm de altura para ensaios

de permeabilidade ao vapor de água, conforme as metodologias descritas no capítulo 6.

Tabela 37 – Composições com solo real estabilizado, óleo usado e aditivos minerais

Composição	Solo base	Estabilizante	Biopolímeros	Aditivo
REF	85 % Areia 9 % argila 6 % silte	-	-	-
CH		Cal hidratada 4 %	-	-
Ci		Cimento 4 %	-	-
CV		Cal viva 4 %	-	-
CV_O.V.U			Óleo vegetal usado 1 %	-
CV_NaOH			-	NaOH 0.1 %
CV_O.V.U_NaOH			Óleo vegetal usado 1 %	NaOH 0.1 %

Nota - Percentagens em massa de solo

7.7. Ensaios realizados

As composições apresentadas em 7.1 e 7.2, composições com biopolímeros e composições com biopolímeros e aditivos minerais, foram sujeitas aos seguintes ensaios:

- Teste de compressão simples – realizado aos 14 e 180 dias;
- Teste de absorção de água por capilaridade – realizado aos 14 e 180 dias;
- Teste de compressão com provetes em estado saturado (ensaio em provete saturado após o ensaio de absorção de água por capilaridade) – realizado aos 14 e 180 dias; e
- Estudo de microscopia eletrónica – realizado aos 90 dias;

As composições apresentadas em 7.3 e 7.4, composições de solo estabilizado com cal viva e outros estabilizantes e composições de biopolímeros e aditivos minerais em solo estabilizado, foram sujeitas aos seguintes ensaios:

- Teste de compressão simples – realizado aos 7, 14, 28, 56 e 180 dias;
- Teste de absorção de água por capilaridade – realizado aos 28 e 180 dias;
- Teste de absorção de água por imersão – realizado aos 56 dias;
- Teste de compressão com provetes em estado saturado (ensaio em provete saturado após o ensaio de absorção de água por imersão) – realizado aos 56 dias;
- Teste de perda de efeito hidrófugo por ciclos de molhagem e secagem e posteriores ensaios de absorção de água, por capilaridade e por imersão;

- Teste de erosão acelerada por jato de água para simulação de chuva – realizado aos 56 dias.

As composições apresentadas em 7.5, composições de biopolímeros em solo estabilizado real, foram sujeitas aos seguintes ensaios:

- Teste de compressão simples – realizado aos 56 dias;
- Teste de absorção de água por capilaridade – realizado aos 56 dias;
- Teste de compressão com provetes em estado saturado (ensaio em provete saturado após o ensaio de absorção de água por capilaridade e posterior imersão por 24 horas);
- Teste de erosão acelerada por jato de água para simulação de chuva – realizado aos 56 dias;
- Teste de absorção de gota – realizado aos 90 dias;
- Teste de permeabilidade ao vapor de água – realizado a partir 28 dias;
- Teste de proliferação de fungos – realizado dos 28 aos 90 dias; e
- Estudo de microscopia eletrónica – realizado aos 90 dias.

8. Apresentação e análise de resultados - Efeito da incorporação de biopolímeros e aditivos minerais em solo simples

8.1. Introdução

Neste capítulo e nos seguintes apresentam-se os resultados obtidos no estudo laboratorial de forma parcelar, correspondendo cada capítulo a uma etapa de estudo. Esta primeira etapa responde ao estudo de biopolímeros e aditivos minerais em solo não estabilizado, em que foram utilizados provetes cilíndricos de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura.

8.2. Efeito da incorporação de biopolímeros

Para facilitar a análise e compreensão dos resultados, estes são apresentados separando os biopolímeros segundo a seu aspeto físico. Assim, tem-se: o solo de referência sem qualquer adição, REF; solo com os biopolímeros em forma sólida (amido de milho, AM, farinha, F, e açúcar, Aç); e solo com os biopolímeros em forma líquida (óleo de linhaça, OL, óleo vegetal usado, OVU, glicerol, GL, caseína, Cas, água de celulose, Ag.Ce., e água de palha, Ag.Pa.).

8.2.1. Ensaios de resistência à compressão

Apresentam-se os resultados de resistência à compressão simples de provetes no estado seco e no estado saturado (após ensaio teste de absorção de água por capilaridade), conforme a metodologia descrita no capítulo 6.

8.2.1.1. Biopolímeros em forma sólida

A Figura 57 mostra os resultados de resistência à compressão simples, aos 14 e 180 dias, no estado seco, cujo ensaio foi realizado com três provetes de teste, apresentando-se o coeficiente de variação em percentagem junto do valor da resistência. Verificando-se os seguintes resultados face ao solo de referência:

- A incorporação de amido, AM, não apresenta diferenças significativas, diminui ligeiramente a resistência aos 14 dias e melhora ligeiramente aos 180 dias;
- A incorporação de farinha, F, aumentou a resistência em 32% aos 14 dias, mas no entanto diminuiu ligeiramente aos 180 dias; e
- A incorporação de açúcar, Aç, aumentou significativamente a resistência aos 14 dias, 50%, mas reduziu ligeiramente aos 180 dias.

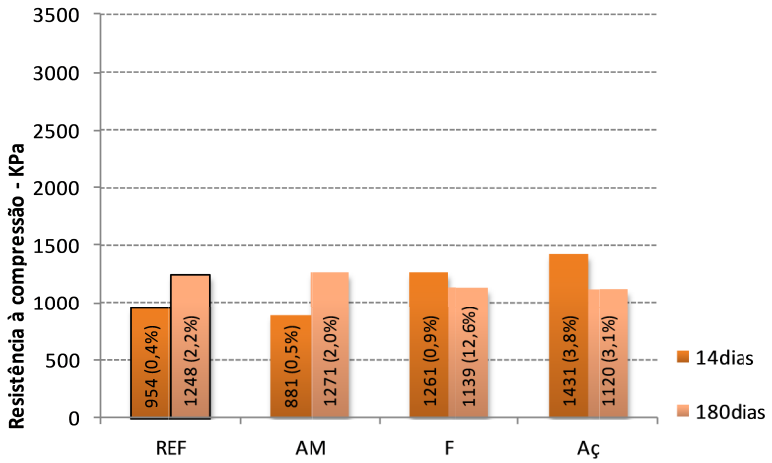


Figura 57 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma sólida (14 e 180 dias) – estado seco

Observa-se ainda que a resistência do solo de referência, REF, aumentou 32 % dos 14 para os 180 dias. O aumento da resistência à compressão em solo não estabilizado e compactado com o decorrer do tempo foi igualmente registado por Patty e Keable (Patty, 1936, Keable, 1994, in Maniatidis & Walker, 2003). Este aumento dever-se-á não só à perda de humidade do solo, mas também a outros fatores como já foi referido no capítulo 2, páginas 11 e 12.

Relativamente ao valor de resistência obtido, aproximadamente 1250 kPa aos 180 dias, este valor encontra-se acima do valor mínimo de referência de 1000 kPa para a construção em taipa ou em BTC, da norma australiana HB 195-2002 (Walker & Standards Australia, 2002). No entanto, é um valor inferior ao referido pelo *New Mexico Code* que refere um mínimo de 2000 kPa para a construção em taipa (Tibbets, 2001, in Maniatidis & Walker, 2003).

Em relação à adição dos biopolímeros, os valores de referência não permitem uma comparação direta de resultados, uma vez que nos estudos de referência os biopolímeros foram utilizados como estabilizante (Solo estabilizado com alginato de sódio sem ou com resina e solo laterítico estabilizado com excrementos de minhocas, ver Tabela 24, capítulo 6), enquanto neste estudo os biopolímeros foram incorporados como aditivos. Além disso, os provetes têm dimensões diferentes. De qualquer modo, verifica-se que o aumento de resistência obtida com estes biopolímeros em forma sólida em relação ao solo de referência, REF, foi bastante reduzido face às aos estudos em comparação.

A Figura 58 mostra os resultados de resistência à compressão simples, aos 14 e 180 dias, no estado saturado (resultado de um único provete de teste).

Em comparação com o solo de referência, REF, verificou-se o seguinte:

- A incorporação de amido, AM, melhorou as resistências aos 14 e aos 180 dias, em 17% e 60%, respetivamente;
- A incorporação de farinha, F, diminuiu a resistência quer aos 14, quer aos 180 dias, tendo havido rotura antes do ensaio aos 180 dias; e
- A incorporação de açúcar, Aç, reduziu a resistência aos 14 dias em 50%, mas aumentou em 20% aos 180 dias face às resistências do solo de referência.

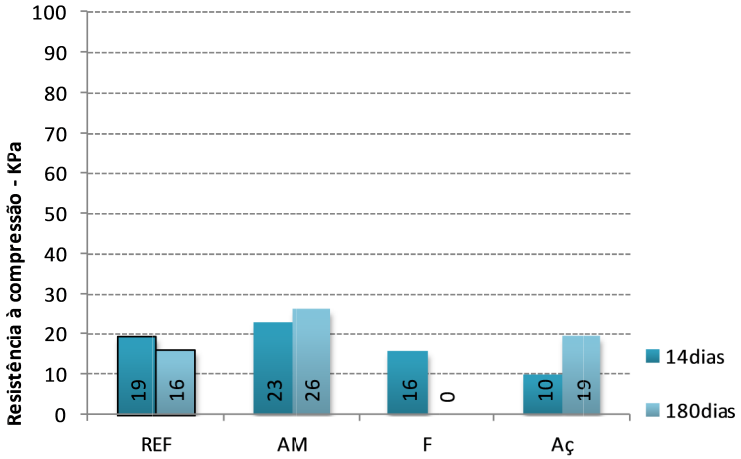


Figura 58 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma sólida (14 e 180 dias) – estado saturado

Considerando as resistências aos 180 dias mais representativas das resistências do solo a longo prazo, verifica-se que a adição de amido tem um desempenho melhor em relação ao solo de referência e às restantes composições, quer no estado seco, quer no estado saturado.

Comparando com valores obtidos por outros autores, verifica-se que a adição de amido teve um aumento da resistência no estado saturado próximo do aumento de resistência obtido em solo laterítico estabilizado com excrementos de minhocas. Obteve-se um aumento de 60% no solo com adição de 0,4% de amido e 68% no solo estabilizado com 8% de excrementos, ver Tabela 24, capítulo 6 (Kamang, 1998).

8.2.1.2. Biopolímeros em forma líquida

A Figura 59 mostra os resultados referentes ao solo com biopolímeros em forma líquida aos 14 e aos 180 dias, no estado seco, cujo ensaio foi realizado com três provetes de teste, apresentando-se o coeficiente de variação em percentagem junto do valor da resistência.

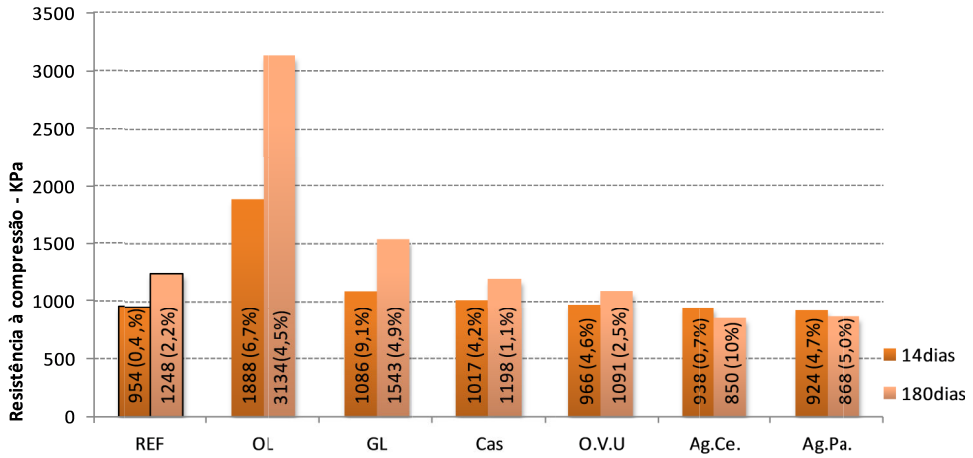


Figura 59 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma líquida (14 e 180 dias) – estado seco

Analisando os resultados obtidos verifica-se que:

- Apenas a incorporação do óleo de linhaça, OL, aumenta significativamente a resistência no estado seco em relação ao solo de referência, REF, em 98% aos 14 dias e em 151% aos 180 dias;
- A incorporação de glicerol, GL, aumentou ligeiramente as resistências, 14% aos 14 dias e 24% aos 180 dias; e
- As composições de caseína, óleo usado, água de palha ou de celulose, Cas, O.V.U, Ag.Ce. e Ag.Pa., não apresentam vantagens na resistência à compressão em relação ao solo de referência, existindo mesmo uma redução dos valores, sobretudo aos 180 dias.

Em comparação com o estudo referido de solo estabilizado com 8% de excrementos de minhocas que apresenta um aumento de resistência à compressão, no estado seco, de aproximadamente 172% (Kamang, 1998), verifica-se que a composição com óleo de linhaça, OL, obteve um aumento de resistência relativamente próximo deste, 151%.

A Figura 60 mostra os resultados referentes ao solo com biopolímeros em forma líquida, aos 14 e aos 180 dias, no estado saturado, recorrendo-se a um

provete de teste por composição. Não tendo sido possível a realização do ensaio para as composições O.V.U, Ag.Ce. e Ag.Pa aos 180 dias por rotura prematura do provete.

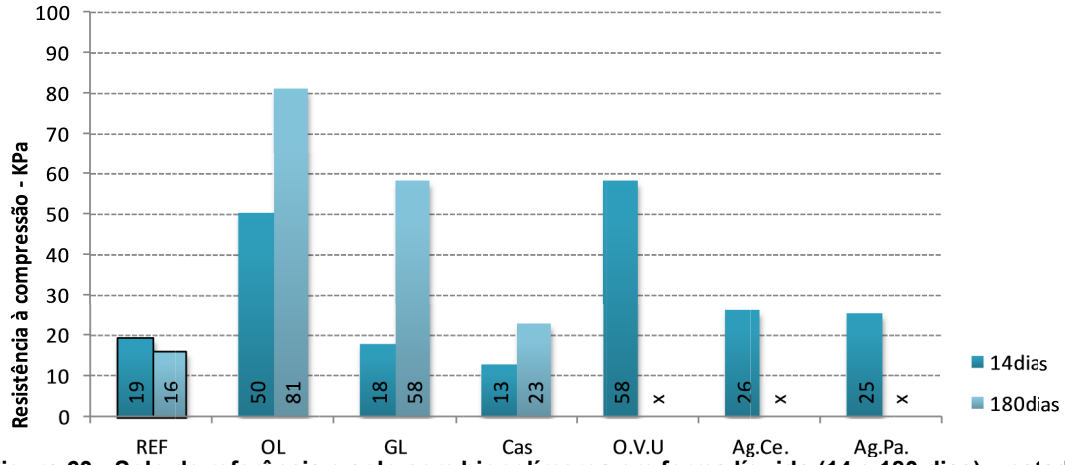


Figura 60 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma líquida (14 e 180 dias) – estado saturado

Os resultados obtidos mostram que:

- Também na resistência à compressão em solo saturado o óleo de linhaça, OL, apresenta maiores resistências que o solo de referência, REF, aumentando 163% aos 14 dias e 406% aos 180 dias;
- A composição com glicerol, GL, e com caseína, Cas, apresentam um aumento das resistências apenas aos 180 dias, GL aumenta em 262% e Cas em 44%; e
- A incorporação de óleo usado, O.V.U, aumentou a resistência em 205% aos 14 dias e composições de água de palha e celulose, Ag.Ce. e Ag.Pa., aumentaram em 37 % e 32 % respetivamente. No entanto estes valores não serão conclusivos uma vez que não foi possível obter as resistências aos 180 dias.

Todavia, em termos gerais, todos os biopolímeros em forma líquida apresentam melhores resultados no estado saturado relativamente ao solo de referência, embora se destaquem com melhor resultado as composições com OL, GL e O.V.U.

8.2.2. Ensaios de absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção foram realizados segundo a metodologia descrita no capítulo 6. Foram utilizados dois provetes, de 30 mm de diâmetro e 40 mm de

altura, por composição, considerando-se a média dos valores obtidos para os gráficos de absorção. De forma a promover uma melhor compreensão dos resultados, estes são apresentados utilizando gráficos que mostram a relação entre a quantidade de água absorvida, em kg/m^2, e o tempo de absorção, em √t (min). Mas, também, apresentando gráficos comparativos com os valores do coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade das composições em análise em kg/(m^2.√h).

8.2.2.1. Biopolímeros em forma sólida

A Figura 61 mostra os resultados dos ensaios de absorção de água referentes aos biopolímeros em forma sólida, realizados durante 24 horas, aos 14 dias. Verificando-se um desvio padrão médio de 0,1 com valores limite também de 0,1.

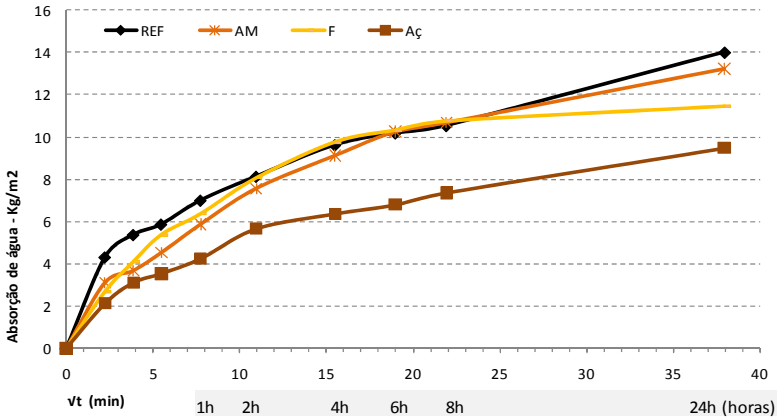


Figura 61 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma sólida – Absorção (14 dias)

Os resultados obtidos mostram em relação ao solo simples, REF, o seguinte:

- Com a incorporação de amido, AM, existe apenas uma ligeira redução dos valores de absorção de água ao longo das várias horas de ensaio;
- A incorporação de farinha, F, apresenta também uma ligeira redução dos valores de absorção nas primeiras horas e uma estabilização mais rápida do nível de absorção, que se observa pela diferente curva de valores; e
- A incorporação de açúcar, Aç, reduz significativamente os valores de absorção, mas estes parecem continuar a subir após as 24 horas de ensaio.

A Figura 62 mostra os resultados dos ensaios de absorção de água referentes ao solo com biopolímeros em forma sólida, realizados durante 12 dias, aos 180

dias. Verificando-se um desvio padrão médio de 0,6 com valores limite também de 0,4 e 0,7.

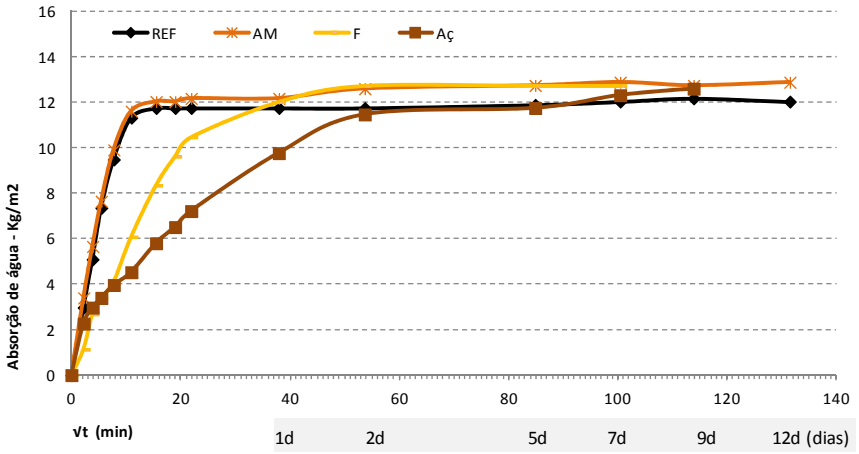


Figura 62 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma sólida – Absorção (180 dias)

Verificando-se em relação ao solo simples, REF, que a incorporação de amido, AM, e farinha, F, tem uma absorção similar ao solo de referência nas primeiras horas, mas posteriormente apresentam valores de absorção semelhantes às do solo de referência, REF. A incorporação de açúcar, Aç, reduz significativamente a absorção até 24horas, mas após este período absorção passa a ser a semelhante à do solo de referência, REF.

Observa-se, ainda, que a partir dos dois dias de teste todas as composições adquirem um valor de água absorvida semelhante ao solo de referência, REF.

Comparando os resultados aos 14 e aos 180 dias, verifica-se que para as composições de referência, REF, e com amido, AM, a absorção de água por capilaridade é ligeiramente menor aos 180 dias, estando em concordância com o ligeiro aumento da resistência à compressão no estado seco em provetes com o mesmo tempo de cura ou endurecimento.

8.2.2.2. Biopolímeros em forma líquida

A Figura 63 mostra os resultados dos ensaios de absorção de água referentes ao solo com biopolímeros em forma líquida, realizados durante 24horas, aos 14 dias. Verificando-se um desvio padrão médio de 0,3 com valores limite também de 0,1 e 0,4. Verificando-se os seguintes resultados face ao solo de referência, REF:

- A incorporação de glicerol, GL, apresenta uma curva de valores de absorção semelhante à do solo de referência, REF, mas com uma menor absorção de água;
- As incorporações de óleo de linhaça, OL, óleo vegetal usado, O.V.U, e caseína apresentam uma curva de valores distinta em que se verifica uma estabilização dos valores, abaixo do solo de referência, REF; e
- A incorporação de água de palha ou de celulose apresentam maiores valores de absorção do intermédio do ensaio, estabilizando no entanto ligeiramente abaixo do solo de referência.

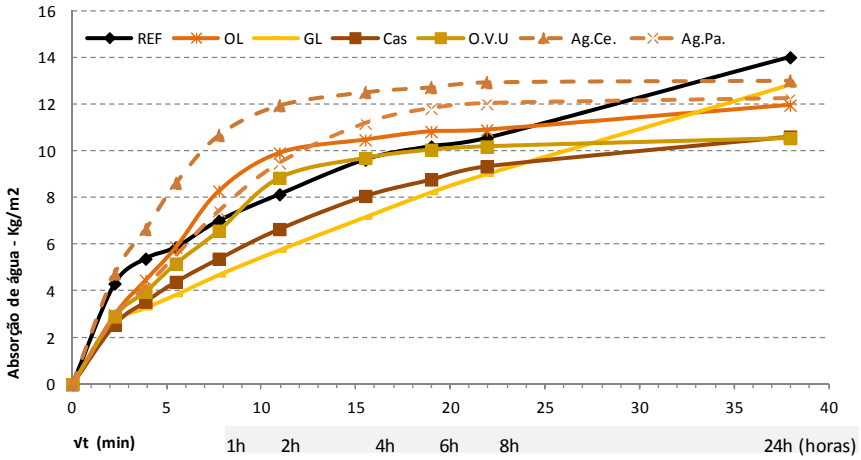


Figura 63 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma líquida – Absorção (14 dias)

A Figura 64 mostra os resultados dos ensaios de absorção de água referentes ao solo com biopolímeros em forma líquida, realizados durante 24 horas, aos 180 dias. Verificando-se um desvio padrão médio de 0,4 com valores limite também de 0,3 e 0,5.

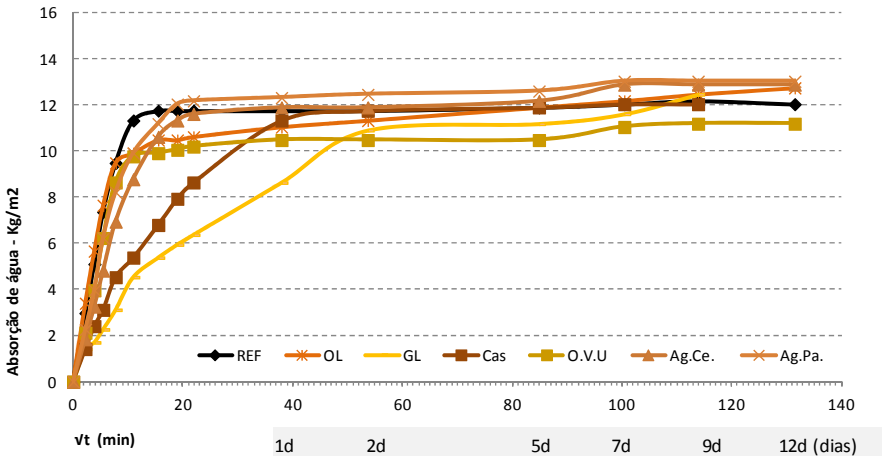


Figura 64 - Solo de referência e solo com biopolímeros em forma líquida – Absorção (180 dias)

Observando-se os seguintes resultados em relação ao solo simples, REF:

- As composições com caseína e glicerol, Cas e GL, são as que apresentam uma menor absorção inicial de água, mas posteriormente, a partir das 24 e 48 horas, respetivamente, os valores de absorção são semelhantes ao solo de referência;
- A incorporação de óleo vegetal usado, O.V.U, apresenta uma estabilização da absorção de água ligeiramente abaixo das restantes composições, ainda que próximo do solo de referência;
- A adição de óleo de linhaça, OL, apresenta uma curva de absorção semelhante à do O.V.U, mas apenas tem valores inferiores ao solo de referência até aos dois dias de absorção; e
- A incorporação de água de palha ou de celulose ao fim das primeiras horas de ensaio ultrapassam os valores de referência.

Comparando os resultados aos 14 e aos 180 dias, verifica-se que as composições de referência, REF, de óleo de linhaça, OL, e de glicerol, GL, reduziram ligeiramente a absorção de água. No entanto, as composições de óleo usado, O.V.U, água de palha, Ag.Pa., e água de celulose, Ag.Ce., obtiveram uma absorção semelhante e a composição de caseína aumentou ligeiramente.

Observa-se, ainda, que a partir dos dois dias de teste todas as composições adquirem um valor de água absorvida semelhante ao solo de referência, REF.

8.2.2.3. Comparação de todos os biopolímeros

A Figura 65 mostra o coeficiente de absorção capilar, em kg/(m^2.√h), obtido no solo de referência e no solo com os diferentes tipos de biopolímeros adicionados. Este valor é obtido através da equação correspondente ao primeiro troço linear reto da curva de absorção de água por capilaridade. Para os valores de absorção inicial em análise obteve-se aos 14 dias um desvio padrão médio de 0,4 com o valor mínimo de 0,1 e o valor máximo 0,8 e aos 180 dias um desvio padrão médio também de 0,4, mas com valores mínimos entre 0 e 0,7.

Em relação à variação da absorção ao longo do tempo de cura ou endurecimento, os resultados obtidos mostram que não ocorreu uma redução do coeficiente de absorção capilar em todas as composições como seria esperado, uma vez que as resistências à compressão no estado seco aumentaram na maioria das composições. Existe, pelo contrário, um aumento significativo do coeficiente na composição de referência, REF, e nas composições AM e O.V.U.

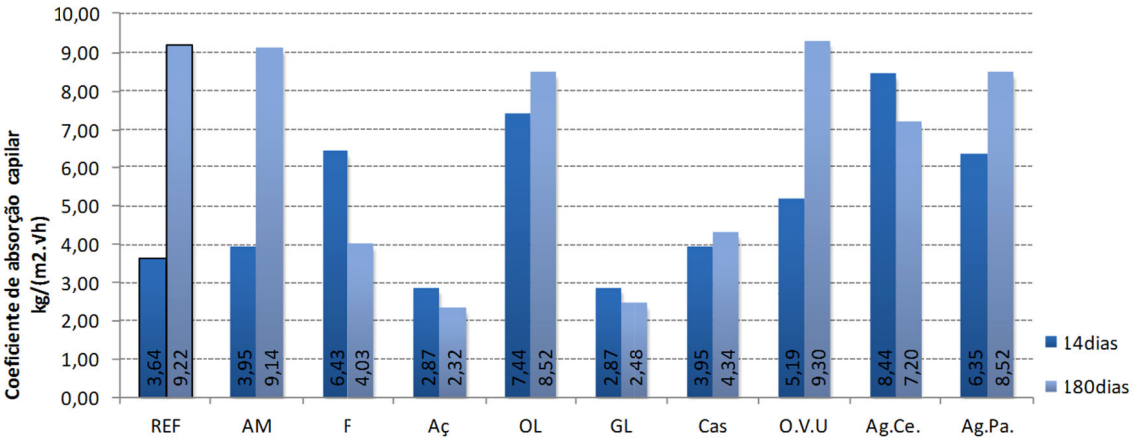


Figura 65 – Coeficiente de absorção capilar do solo com e sem biopolímeros – aos 14 e 180 dias

Relativamente à comparação dos resultados entre composições e privilegiando os resultados obtidos aos 180 dias, mais representativos da situação real do solo já endurecido, verifica-se que as composições que se destacam em relação ao solo de referência, REF, com menor absorção capilar, são as de adição de farinha, F, açúcar, Aç, glicerol, GL, e caseína, Cas.

No entanto, relacionando com as curvas de absorção nos gráficos anteriores, verifica-se que não existe uma correspondência direta de resultados em todas as composições. Nas curvas de absorção, a menor absorção de água ao longo do tempo, em relação ao solo de referência, REF, verificou-se nas composições GL, CAS, O.V.U e OL. Enquanto a maior absorção de água se verificou nas composições Ag.Ce. e Ag.Pa. Assim, optou-se por não se considerar estas ultimas composições nas fases seguintes deste estudo.

Em relação aos valores de referência relativos à absorção de água por capilaridade, presentes no capítulo 6, apenas é possível comparar os resultados com o coeficiente de absorção capilar referido para os materiais de construção à base de terra. Assim, verifica-se que os valores obtidos, entre 2,3

e 9,3 kg/(m^2.√h), encontram-se entre os valores referidos (valor típico de 6 a 13,4 kg/(m^2.√h), podendo ocorrer um mínimo de 1,2, in Rohlen & Ziegert, 2011).

8.3. Efeito da incorporação de aditivos minerais ligantes e religantes

Para uma melhor análise e compreensão dos resultados, estes são apresentados separando os aditivos minerais segundo o seu efeito nas partículas do solo. Assim, têm-se: o solo de referência sem qualquer adição, REF; os aditivos de efeito ligante (hidróxido de sódio, NaOH, silicato de sódio, Na_2SiO_3, hidróxido de sódio com silicato de sódio, NaOH + Na_2SiO_3, e alúmen, KAl) e os aditivos de efeito floculante (cloreto de sódio, NaCl, cloreto de cálcio, CaCl, e borato de sódio ou bórax, Bórax).

8.3.1. Ensaios de resistência à compressão

Apresentam-se os resultados de resistência à compressão simples de provetes no estado seco e no estado saturado (após ensaio teste de absorção de água por capilaridade), conforme a metodologia descrita no capítulo 6.

8.3.1.1. Aditivos minerais ligantes

Na Figura 66 observam-se as resistências à compressão simples, no estado seco, aos 14 e 180 dias, cujo ensaio foi realizado com três provetes de teste, apresentando-se o coeficiente de variação em percentagem junto do valor da resistência.

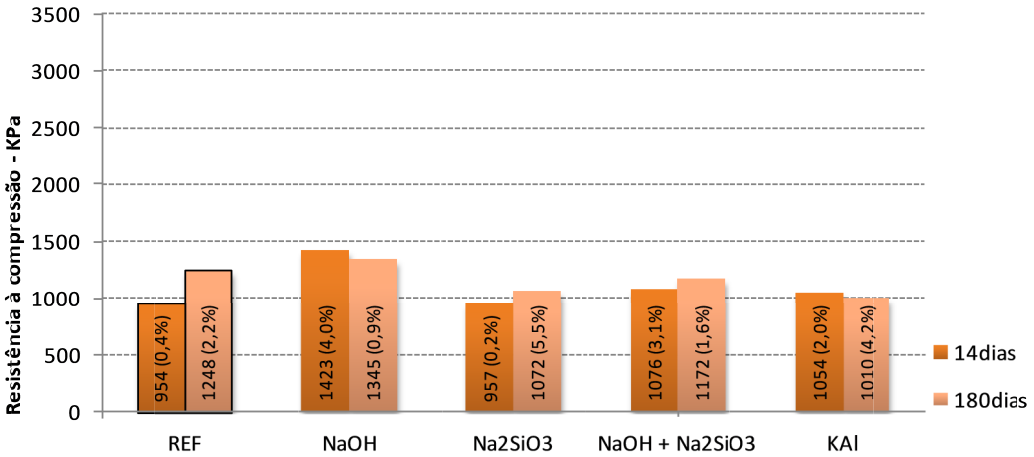


Figura 66 - Solo de referência e solo com aditivos minerais ligantes (14 e 180 dias) – estado seco

Analisando os resultados verifica-se que apenas a adição de hidróxido de sódio, NaOH, apresenta um aumento das resistências à compressão face ao solo de referência, REF, 49 % aos 14 dias e 8 % aos 180 dias. As restantes composições apresentam apenas um ligeiro aumento da resistência à compressão aos 14 dias e aos 180 dias os resultados são inferiores ao solo de referência.

Na Figura 67 observam-se as resistências dos ensaios à compressão simples, no estado saturado, aos 14 e 180 dias, recorrendo-se a um provete de teste por composição. Não tendo sido possível a realização do ensaio para a composição NaOH + Na_2SiO_3 por rotura do provete. Os resultados obtidos mostram que:

- Tal como no estado seco, também a composição com hidróxido de sódio tem um aumento da resistência significativo, 163 % aos 14 dias e 344 % aos 180 dias;
- Considera-se que a adição de silicato terá reduzido a resistência uma vez que se quebrou antes do ensaio; e
- As composições de hidróxido com silicato reduziram as resistências aos 14 dias, mas aumentaram aos 180 dias, em 43 % e 63 % respetivamente.

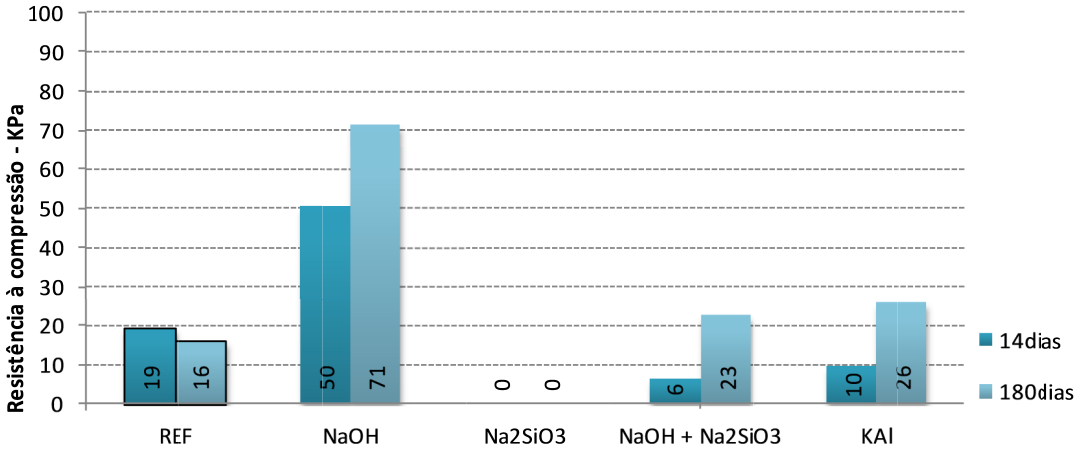


Figura 67 - Solo de referência e solo com aditivos minerais ligantes (14 e 180 dias) - estado saturado

Considerando os resultados gerais, estado seco e saturado, constata-se que, em relação ao solo de referência, REF, a incorporação de hidróxido de sódio, NaOH, apresenta vantagens na sua adição, sobretudo no estado saturado. Entre as restantes composições, pode considerar-se que a adição de alúmen apresenta a vantagem de propiciar uma maior resistência no estado saturado,

mas a adição de silicato, simples ou em conjunto com o hidróxido de sódio, não apresenta vantagens.

Estes resultados vêm ao encontro da informação bibliográfica em que o hidróxido de sódio é apresentado como um aditivo que melhora a reatividade do solo, desenvolvendo reações de cimentação. E o alúmen é utilizado em argamassas de solo-cimento para proteger o solo da ação da água, mas apenas com sucesso durante alguns anos de aplicação tendo de ser substituída a argamassa periodicamente. Justificando-se, deste modo, as elevadas resistências com adição de hidróxido e os melhores resultados do alúmen no estado saturado.

Comparando os resultados obtidos com o estudo de referência de solo/cimento com aditivos minerais, presente no capítulo 6, verifica-se que, também neste estudo, o hidróxido de sódio obteve os melhores resultados entre os aditivos estudados, não existindo vantagem na adição conjunta de hidróxido com silicato de sódio.

8.3.1.2. Biopolímeros com aditivo mineral ligante

Na Figura 68 observam-se os resultados dos ensaios à compressão em estado seco, aos 14 e 180 dias, das composições com biopolímeros e hidróxido de sódio, o aditivo mineral selecionado pelos resultados mais satisfatórios em relação aos restantes aditivos testados. O ensaio foi realizado com três provetes de teste, apresentando-se o coeficiente de variação em percentagem junto do valor da resistência. Não tendo sido realizado o ensaio aos 180 dias para a composição como óleo usado e hidróxido de sódio por perda de provetes de teste.

Pelos resultados obtidos verifica-se que entre as composições de biopolímeros com hidróxido de sódio adicionado, este teve maior efeito no aumento das resistências, pela sua capacidade ligante, nas composições de amido, AM_NaOH, farinha, F_NaOH, e caseína, Cas_NaOH. Nas composições de açúcar, Aç__NaOH, e de óleo usado, O.V.U_NaOH, obtiveram-se resistências semelhantes às composições sem hidróxido e nas composições de óleo de

linhaça, OL_NaOH, e glicerol, GL_NaOH, verificou-se um decréscimo das resistências.

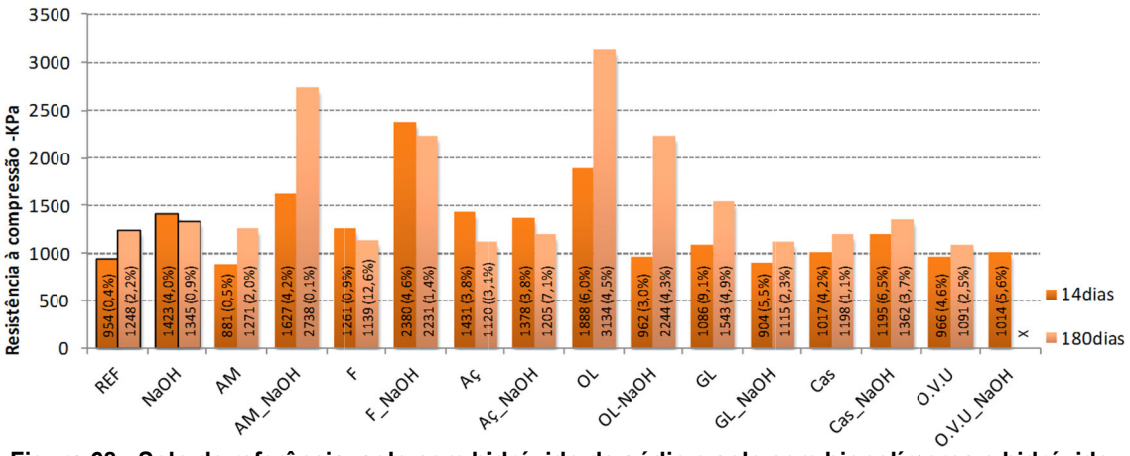


Figura 68 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros e hidróxido de sódio (14 e 180 dias) – estado seco

Na Figura 69 observam-se os resultados dos ensaios à compressão em estado saturado, aos 14 e 180 dias, das composições com biopolímeros e hidróxido de sódio, recorrendo-se a um provete de teste por composição.

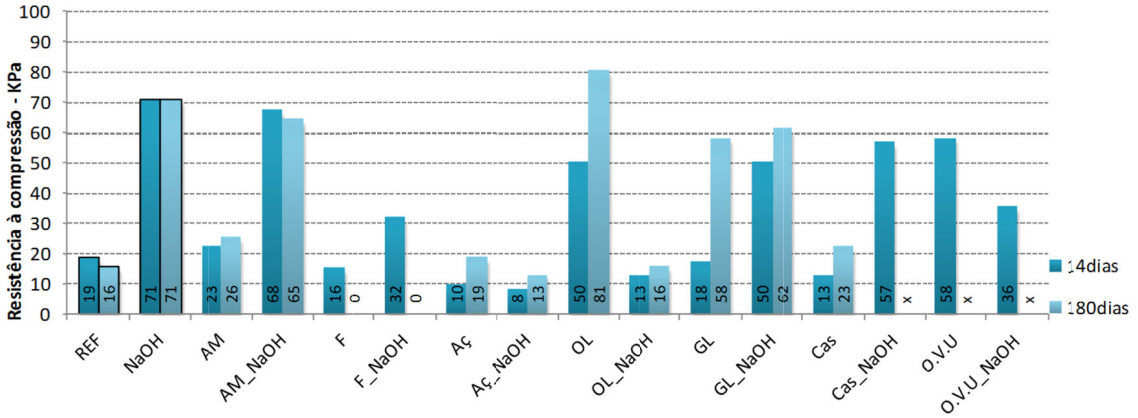


Figura 69 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros e hidróxido de sódio (14 e 180 dias) – estado saturado

Os resultados revelam que em relação ao solo de referência e à composição apenas com adição de hidróxido de sódio, REF e NaOH, nenhuma das composições de biopolímeros com hidróxido obteve melhores resistências no estado saturado. No entanto, a redução das resistências das composições de amido com hidróxido, AM_NaOH, glicerol, GL_NaOH, e caseína, Cas_NaOH, não tenham sido signigifativas em relação ao solo com hidróxido, NaOH.

Entre as restantes composições de biopolímeros a adição de hidróxido melhorou as resistências no estado saturado das composições de farinha,

F_NaOH, glicerol, GL_NaOH, e caseína, Cas_NaOH, ainda que as resistências sejam inferiores ao solo com hidróxido, NaOH.

8.3.1.3. Aditivos minerais religantes

A Figura 70 mostra as resistências dos ensaios à compressão simples, aos 14 e 180 dias, das composições com incorporação de aditivos minerais de função floculante. O ensaio foi realizado com três provetes de teste, apresentando-se o coeficiente de variação em percentagem junto do valor da resistência.

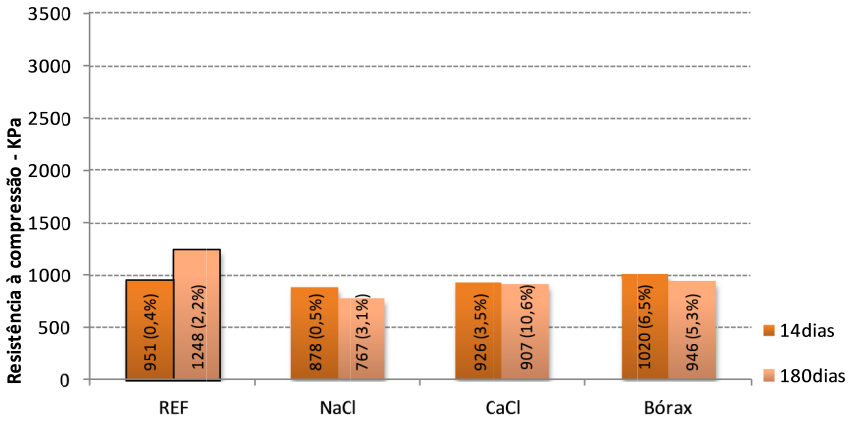


Figura 70 - Solo de referência e solo com aditivos minerais religantes (14 e 180 dias) – estado seco

Os resultados obtidos mostram que a incorporação destes aditivos não apresenta melhores resistências em relação ao solo simples, REF, à exceção de uma ligeira melhoria aos 14 dias da composição com borato de sódio ou bórax.

Na Figura 71 observam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão no estado saturado das mesmas composições, aos 14 e 180 dias, recorrendo-se a um provete de teste por composição.

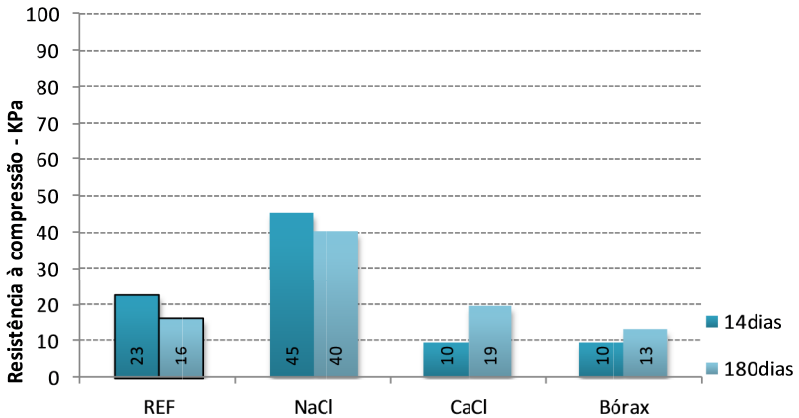


Figura 71 - Solo de referência e solo com aditivos minerais religantes (14 e 180 dias) - estado saturado

Verifica-se que se destaca com melhores resultados relativamente ao solo de referência, REF, a composição com cloreto de sódio, NaCl, tendo aumentado em 95 e 150 % as resistências aos 14 e aos 180 dias respetivamente. As restantes composições não apresentam vantagens na utilização destes aditivos.

Em comparação com o estudo de referência de solo/cimento com aditivos minerais, presente no capítulo 6, verifica-se que a autora não obteve resultados de resistência à compressão (estado seco e saturado) com vantagens devido à adição de cloreto de sódio ou cloreto de cálcio face ao solo/cimento sem aditivos (Santos da Cruz, 2004). No entanto, os presentes resultados mostram que com a adição de cloreto de cálcio obteve-se melhores resistências no estado saturado face ao solo de referência, REF, tanto aos 14 como aos 180 dias.

8.3.2. Ensaios de absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção foram realizados segundo a metodologia descrita no capítulo 6, em provetes iguais aos anteriores, de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura.

De forma a promover uma melhor compreensão dos resultados, estes são apresentados utilizando gráficos que mostram a relação entre a quantidade de água absorvida, em kg/m^2, e o tempo de absorção, em √t(min). Mas, também, apresentando gráficos comparativos com os valores do coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade das composições em análise.

8.3.2.1. Aditivos minerais ligantes

A Figura 72 mostra os resultados de absorção de água por capilaridade, aos 14 dias, das composições com aditivos minerais ligantes. Neste ensaio foi utilizado apenas um provete por composição.

Os resultados obtidos mostram que as composições com menor absorção de água são as que incorporam hidróxido de sódio, NaOH, e simultaneamente hidróxido com silicato de sódio, NaOH+Na2SiO3, seguindo-se a composição com silicato de sódio, Na2SiO3.

A incorporação de alúmen, KAl, tem um comportamento diferente das demais composições, apresentando maiores valores de absorção de água entre a primeira e a oitava hora de absorção, mas, no entanto, este valor estabiliza enquanto nas restantes composições a absorção parece continuar a crescer após as 24 horas de ensaio.

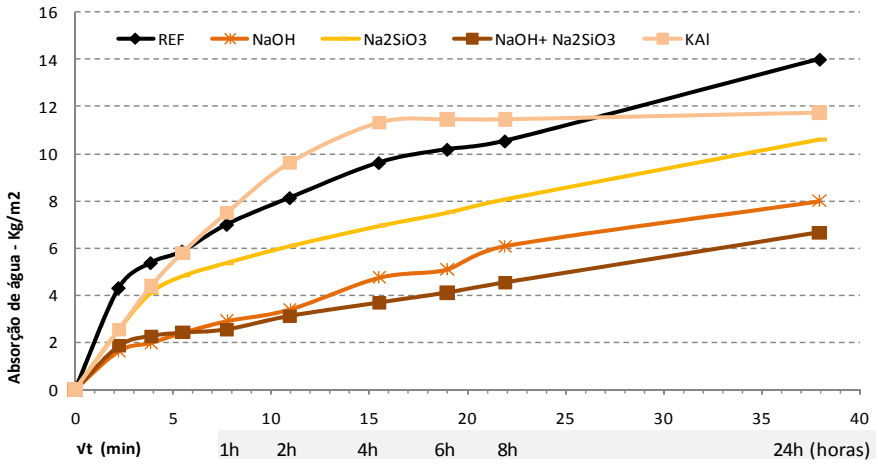


Figura 72 - Solo de referência e solo com aditivos minerais ligantes – Absorção (14 dias)

Na Figura 73 observam-se os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, aos 180 dias, das mesmas composições.

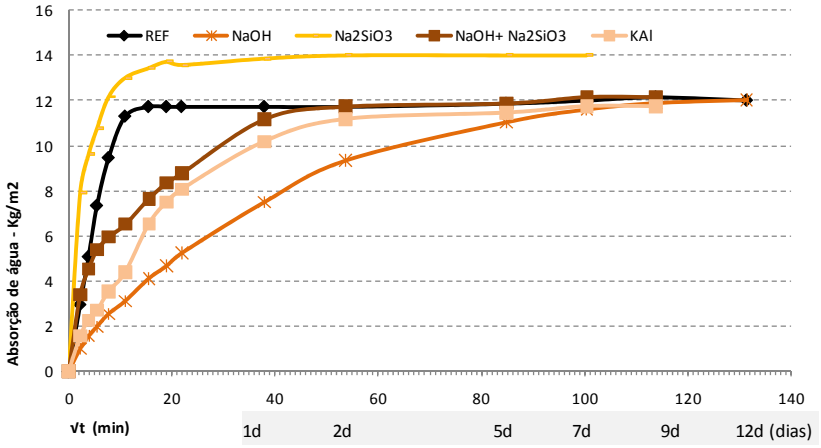


Figura 73 - Solo de referência e solo com aditivos minerais ligantes – Absorção (180 dias)

Os resultados obtidos mostram que aos 180 dias apresentam-se valores diferentes dos obtidos aos 14 dias, verificando-se que a composição com menor absorção de água ao longo dos 12 dias de ensaio é a que incorpora hidróxido de sódio, NaOH, seguindo-se as composições de alúmen e hidróxido com silicato de sódio, NaOH+Na_2SiO_3, com menor absorção inicial em relação do solo de referência, REF.

Todavia, a composição com silicato de sódio, Na_2SiO_3, ao contrário dos resultados aos 14 dias, apresenta valores de absorção ao longo do tempo maiores do que o solo de referência, REF. A fim de verificar este valor obtido repetiu-se o ensaio aos 300 dias de cura e obtiveram-se valores semelhantes.

Observa-se, ainda, que a partir dos cinco dias de teste todas as composições, exceto a de silicato de sódio, adquirem um valor de água absorvida semelhante ao solo de referência, REF.

A Figura 74 mostra o coeficiente de absorção capilar, em kg/(m^2.√h), obtido no solo de referência e no solo com os diferentes tipos de aditivos minerais ligantes adicionados. Este valor é obtido através da equação correspondente ao primeiro troço linear reto da curva de absorção de água por capilaridade.

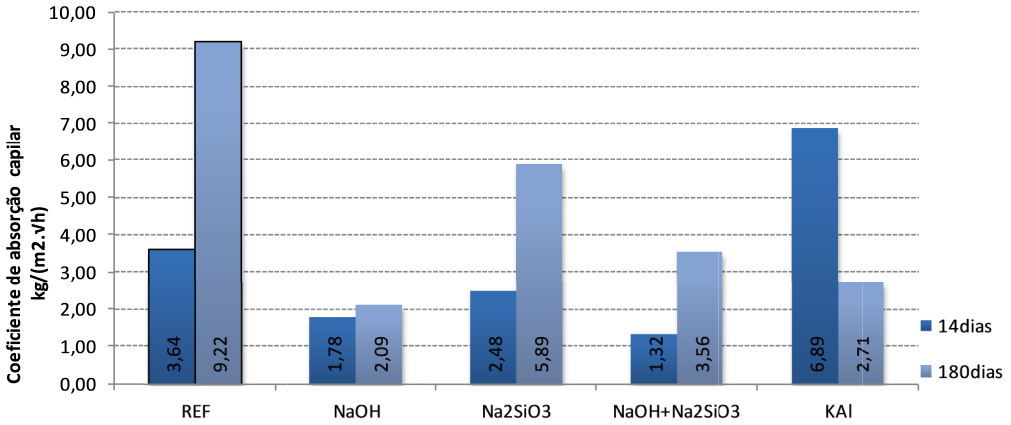


Figura 74 - Coeficiente de absorção capilar do solo com aditivos minerais ligantes – aos 14 e 180 dias

Verifica-se, assim, que os resultados obtidos estão de acordo com as curvas de absorção de água já analisadas e que apenas a composição com alúmen reduziu a absorção de água dos 14 para os 180 dias.

Atendendo aos resultados de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade pode considerar-se que existe uma maior vantagem na adição de hidróxido de sódio, uma vez que esta composição se destaca das restantes composições com uma resistência superior e uma menor absorção de água.

Em comparação com outros autores, verifica-se que os coeficientes de absorção encontram-se entre os valores típicos para materiais de construção à base de terra, 6 a 13,4 kg/(m^2.√h), mas ainda acima do valor mínimo de 1,2 referido (Rohlen & Ziegert, 2011).

Verifica-se, ainda, que no estudo de referência de solo/cimento com aditivos minerais, presente no capítulo 6 (Santos da Cruz, 2004), também se verificou uma menor redução da absorção de água no solo como hidróxido de sódio face ao solo/cimento simples. Verificando-se, também, que não houve vantagem na utilização conjunta de hidróxido com silicato de sódio. E a adição de silicato de sódio obteve uma absorção de água semelhante ao solo/cimento simples. Por sua vez, no presente estudo, houve um aumento da absorção de água com a adição de silicato de sódio face ao solo de referência.

8.3.2.2. Biopolímeros com aditivo mineral ligante

Apresentam-se de seguida os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade das composições de biopolímeros com hidróxido de sódio. Para uma melhor compreensão destes resultados estes são apresentados separadamente segundo a sua forma física, tal como nos resultados anteriores com biopolímeros. Neste ensaio foram utilizados dois provetes por composição, considerando-se a média dos valores obtidos para os gráficos de absorção.

A Figura 75 mostra os resultados dos ensaios aos 14 dias de solo com biopolímeros em forma sólida e hidróxido de sódio.

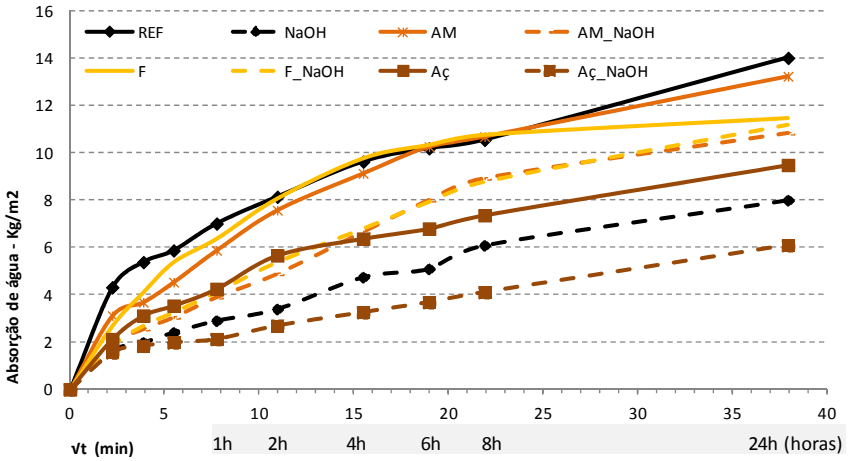


Figura 75 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros em forma sólida e hidróxido de sódio – Absorção (14 dias)

Verifica-se pelos resultados obtidos que a adição de hidróxido de sódio propicia uma maior redução da absorção de água se adicionado ao solo simples, NaOH. No entanto também se mostra favorável a conjugação do açúcar com hidróxido de sódio, Aç_NaOH, obtendo-se a menor absorção de água face ao solo de referência, REF.

Na Figura 76 observam-se os resultados aos 180 dias as mesmas composições com biopolímeros em forma sólida.

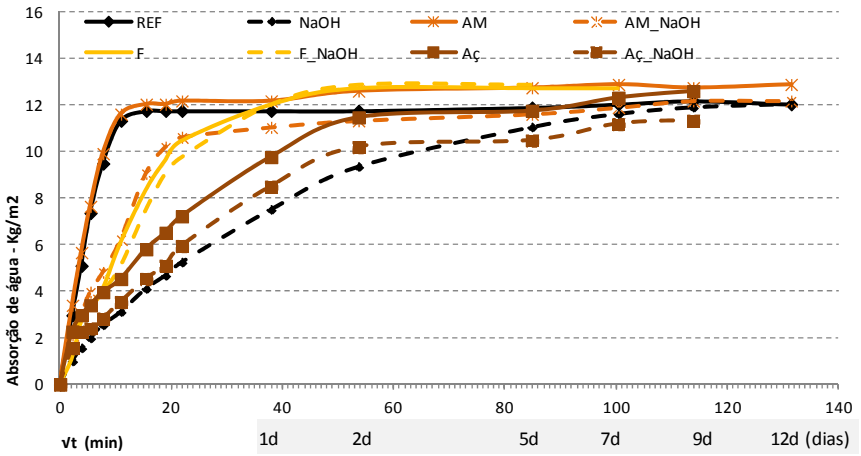


Figura 76 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros em forma sólida e hidróxido de sódio – Absorção (180 dias)

Verifica-se pelos resultados obtidos que existe um comportamento idêntico ao observado aos 14 dias em que as composições com menor absorção são as com hidróxido simples, NaOH, e açúcar com hidróxido, Aç_NaOH, embora a absorção de água seja semelhante entre estas. Como tal, deixa de existir vantagem da utilização conjunta de açúcar com hidróxido de sódio, uma vez que se obtém o mesmo efeito apenas com hidróxido.

Observa-se, ainda, que a partir dos cinco dias de teste todas as composições adquirem um valor de água absorvida semelhante ao solo de referência, REF.

A Figura 77 mostra os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, aos 14 dias, de solo com biopolímeros em forma líquida e hidróxido de sódio.

Analisando o gráfico observa-se que apenas não existe uma redução da absorção com a adição de hidróxido de sódio na composição com óleo de linhaça, OL_NaOH.

Verificando-se, ainda, que as composições com menor absorção foram as de hidróxido de sódio em solo simples, NaOH, glicerol e caseína com hidróxido, GL_NaOH e CAS_NaOH, com ligeira diferença de valores entre estas três composições. A composição de óleo vegetal usado com hidróxido de sódio, O.V.U_NaOH, apresenta uma absorção também reduzida, mas ligeiramente

superior às de NaOH, GL_NaOH e CAS_NaOH e apenas durante algum tempo, porque a absorção inicial e final é bastante semelhante.

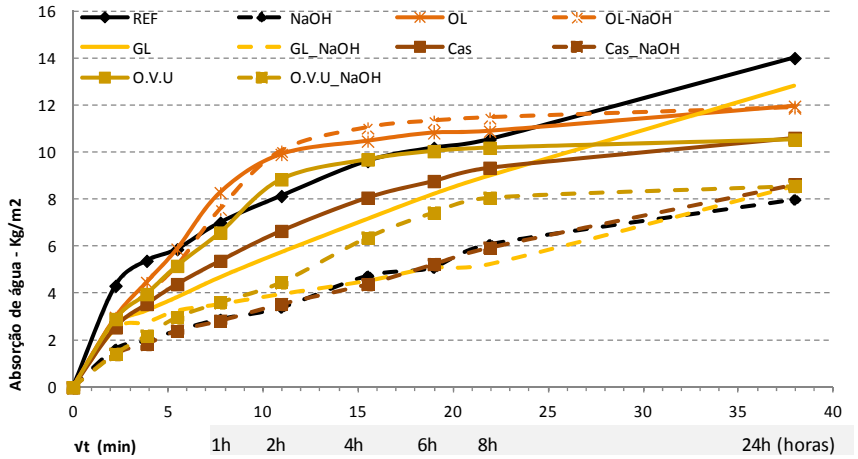


Figura 77 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros em forma líquida e hidróxido de sódio – Absorção (14 dias)

Na Figura 78 observam-se os resultados obtidos aos 180 dias para as mesmas composições, à exceção da composição O.V.U_NaOH devido à perda dos provetes de ensaio.

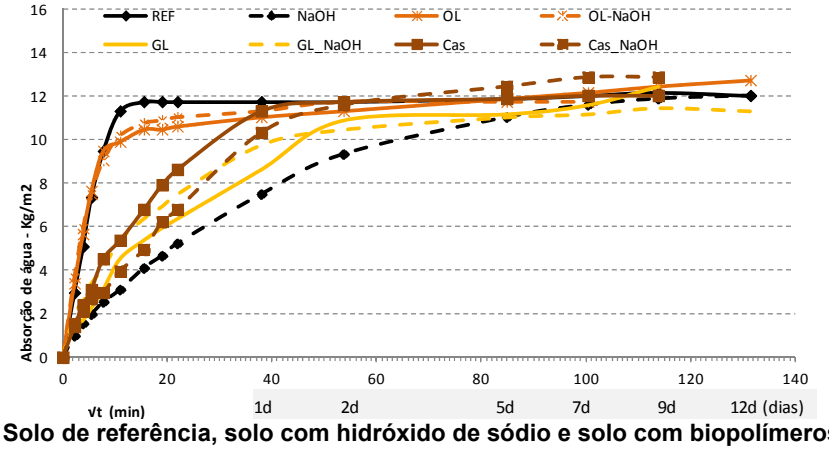


Figura 78 - Solo de referência, solo com hidróxido de sódio e solo com biopolímeros em forma líquida e hidróxido de sódio – Absorção (180 dias)

Conforme os resultados obtidos verifica-se a mesma tendência de absorção de água observada aos 14 dias. No entanto, destaca-se com menor absorção de água o solo simples com hidróxido de sódio, NaOH.

Observa-se, ainda, que a partir dos cinco dias de teste todas as composições adquirem um valor de água absorvida semelhante ao solo de referência, REF.

A Figura 79 mostra o coeficiente de absorção capilar, em kg/(m^2.√h), obtido no solo de referência e no solo com os diferentes tipos de aditivos minerais ligantes adicionados. Este valor é obtido através da equação correspondente

ao primeiro troço linear reto da curva de absorção de água por capilaridade. Para os valores de absorção inicial em análise obteve-se aos 14 e aos 180 dias um desvio padrão médio de 0,2, com o valor mínimo de 0,1 e o valor máximo 0,3. Não se obtendo o coeficiente aos 180 dias para a composição O.V.U_NaOH por perda de provetes de ensaio como já foi referido.

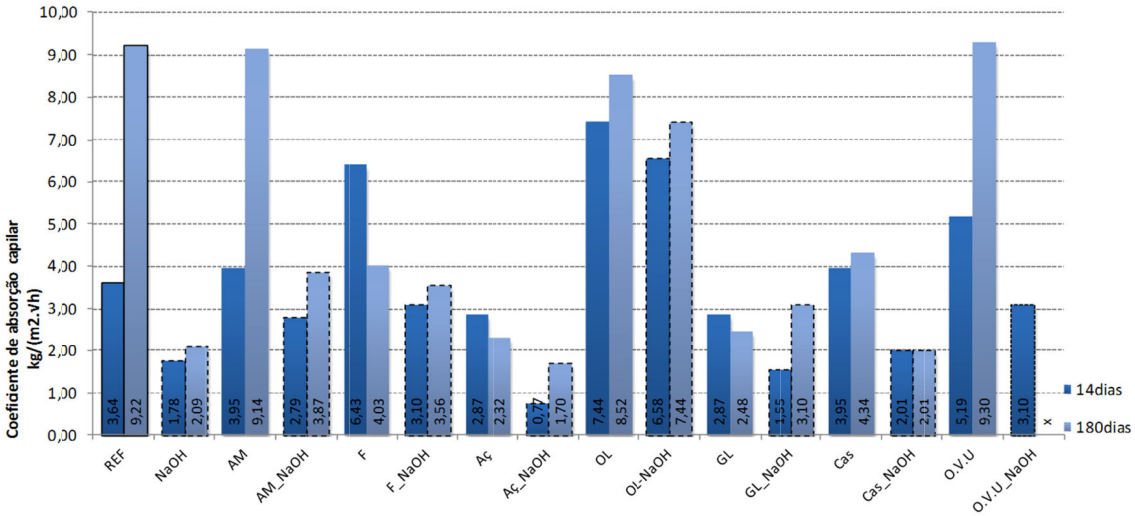


Figura 79 - Coeficiente de absorção capilar do solo com biopolímeros com e sem hidróxido de sódio – aos 14 e 180 dias

Verifica-se que não existe uma total correspondência dos valores do coeficiente com as curvas de absorção. Pelo coeficiente existiria vantagem na adição de açúcar com NaOH, mas no entanto, pela curva da Figura 78, observa-se que a absorção do solo apenas com NaOH é menor até aos dois de absorção e a partir deste tempo não existem diferenças significativas, quer entre estas duas composições quer entre as restantes. Assim, não existirá vantagem na conjugação de hidróxido de sódio com os biopolímeros. No entanto, desconhece-se o resultado de O.V.U_NaOH aos 180 dias.

8.3.2.3. Aditivos minerais religantes

Apresentam-se de seguida os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade das composições de biopolímeros com os aditivos minerais religantes selecionados para este estudo. Neste ensaio foi utilizado apenas um provete por composição.

Na Figura 80 apresentam-se os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade aos 14 dias.

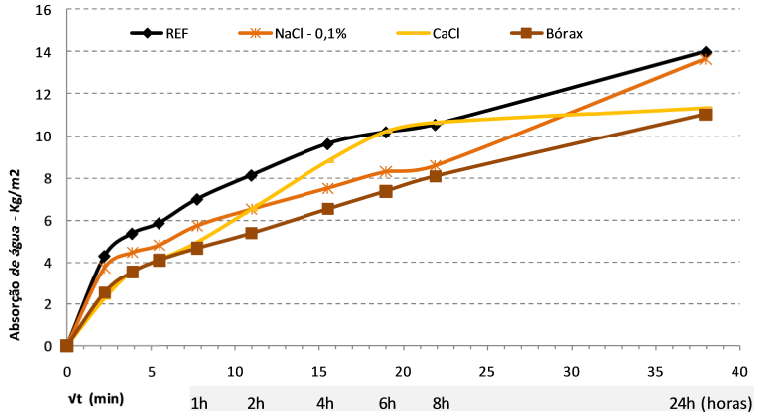


Figura 80 - Solo de referência e solo com aditivos minerais religantes – Absorção (14 dias)

Analisando os resultados verifica-se que, embora a absorção de água seja menor com a utilização de qualquer dos aditivos, não existe uma diferença significativa nos valores de água absorvida, sobretudo com o cloreto de sódio, NaCl, que atinge um valor muito semelhante.

Na Figura 81 apresentam-se os resultados de absorção por capilaridade aos 180 dias das mesmas composições.

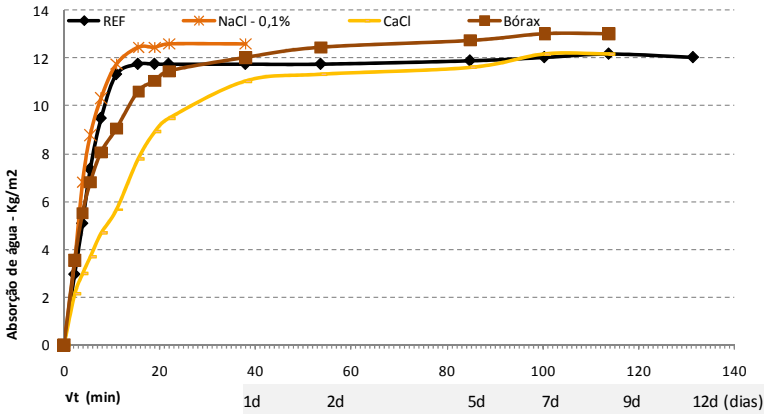


Figura 81 - Solo de referência e solo com aditivos minerais religantes – Absorção (180 dias)

Os resultados obtidos mostram que, também neste ensaio, não se verificam diferenças significativas entre as composições na redução da absorção de água em relação ao solo de referência. Embora a composição de cloreto de cálcio, CaCl, apresente uma absorção de água ligeiramente menor até às 24 horas de teste.

Verificando-se também que, contrariamente ao esperado, as composições com cloreto de sódio, NaCl, e com bórax obtiveram um aumento ligeiramente superior ao solo de referência.

A Figura 82 mostra o coeficiente de absorção capilar, em kg/(m^2.√h), obtido no solo de referência e no solo com os diferentes tipos de aditivos minerais ligantes adicionados. Este valor é obtido através da equação correspondente ao primeiro troço linear reto da curva de absorção de água por capilaridade.

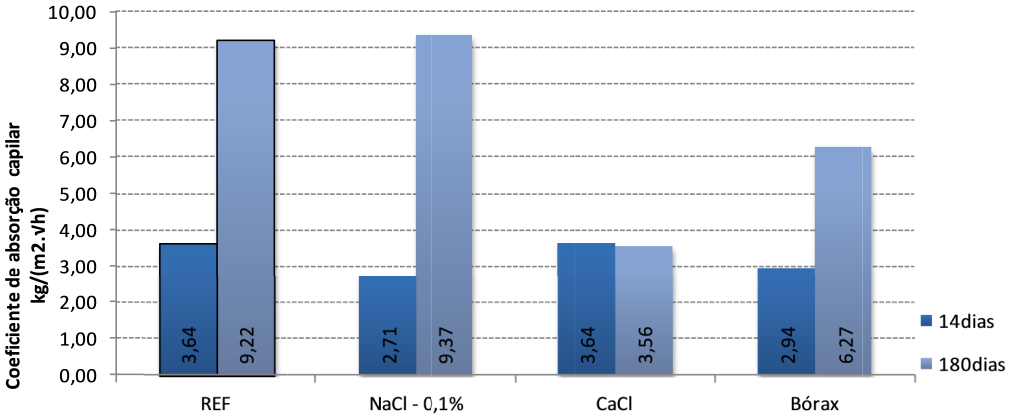


Figura 82 - Coeficiente de absorção capilar do solo com aditivos minerais religantes – aos 14 e 180 dias

Segundo os coeficientes obtidos, verifica-se que existe uma maior redução dos valores face ao solo de referência do que nas curvas de absorção dos gráficos anteriores. No entanto, existe coerência relativamente à comparação entre composições, verificando-se que existe uma absorção mais lenta com a adição de cloreto de cálcio, CaCl, e na adição de bórax pela menor absorção face ao solo de referência. Mas, a partir das 24 horas de tempo de absorção, não existem diferenças significativas entre as composições, pelo que não existe vantagem na utilização destes aditivos.

Comparando os resultados de absorção de água com as resistências à compressão obtidas, verifica-se no geral que a utilização destes aditivos reduziu as resistências no estado seco e no estado saturado. Existindo, no entanto, a exceção do aumento das resistências no estado saturado da composição de cloreto de sódio, NaCl, o que não se traduziu nos valores de absorção de água.

Em relação ao estudo de referência de solo/cimento com aditivos minerais, presente no capítulo 6 (Santos da Cruz, 2004), verifica-se que, também, se obtiveram valores de absorção semelhante entre o solo de referência (neste caso solo/cimento) e solo com adição de cloreto de sódio ou de cálcio, não se verificando vantagens na adição dos mesmos relativamente à absorção.

8.4. Comparação e seleção de composições

No sentido de estabelecer uma comparação entre todas as composições realizadas optou-se por se fazer uma análise geral de todos os resultados obtidos. Assim, compararam-se as composições em relação ao seu comportamento relativamente à absorção de água por capilaridade, aos 180 dias (exceto a composição O.V.U_NaOH em que não foi possível obter resultados nesta idade, utilizando-se os valores dos 14 dias). Para tal, consideraram-se o coeficiente de absorção capilar (Co. Ab.) e os valores de absorção absoluta, isto é, o valor máximo de absorção obtido por capilaridade (máximo).

Estes valores encontram-se expostos na Tabela 38 e simultaneamente na Figura 83 para que se possam comparar com maior facilidade os valores obtidos nas diferentes composições.

Tabela 38 – Valores de absorção por capilaridade e massa volúmica (180 dias)

Composição	Massa volúmica kg/m3	Coeficiente absorção capilar kg/(m2.√h)	Absorção absoluta (máximo - kg/m2)
REF	1920	9,22	12,03
NaOH	1935	**2,09**	**12,03**
NaOH+ Na2SiO3	1931	3,56	12,17
NaCl - 0,1%	1938	9,37	12,59
Na2SiO3	1935	5,89	14,00
KAl	1935	**2,71**	**11,74**
CaCl	1942	3,56	12,17
Bórax	1917	6,27	13,02
AM	1920	9,14	12,87
AM_NaOH	1899	3,87	12,17
F	1959	4,03	12,73
F_NaOH	1952	3,56	15,14
Aç	1920	2,32	12,59
Aç_NaOH	1942	**1,70**	**11,32**
OL	1942	8,52	12,73
OL-NaOH	1935	7,44	11,74
GL	1952	2,48	12,45
GL_NaOH	1945	**3,10**	**9,76**
CAS	1928	4,34	12,03
CAS_NaOH	1935	**2,01**	**11,32**
O.V.U	1935	**9,30**	**11,18**
O.V.U_NaOH *	1926	**3,10***	**9.62***
A.C	1935	7,20	12,87
A.P	1920	8,52	13,02

Nota - a composição com (*) corresponde ao ensaio realizado aos 14 dias

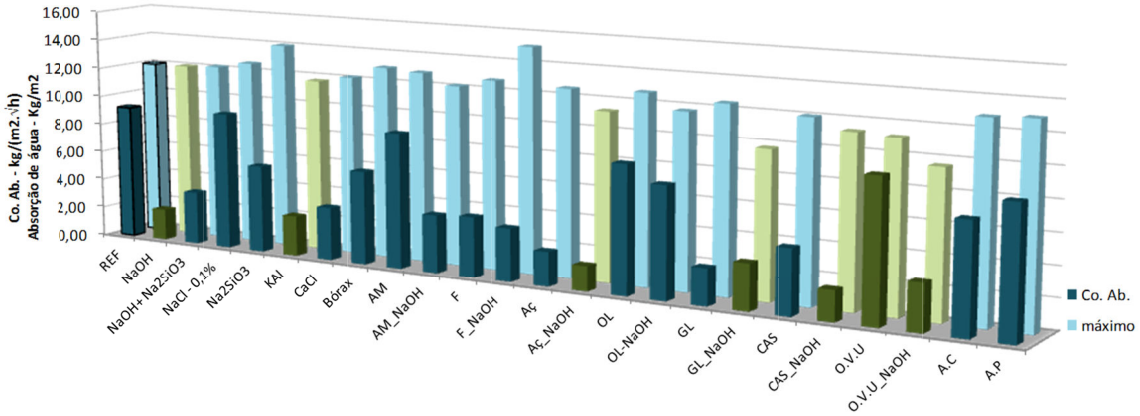


Figura 83 - Valores de absorção por capilaridade kg/m2 (180 dias)

Observando-se os resultados, verifica-se que as composições que se destacam, pelos menores valores de absorção absoluta e/ou menor coeficiente de absorção por capilaridade, são os solos com:

- Hidróxido de sódio, NaOH;
- Alúmen, KAl;
- Açúcar, Aç_NaOH;
- Glicerol com hidróxido de sódio, GL_NaOH;
- Caseína, CAS_NaOH; e
- Óleo vegetal usado, sem ou com hidróxido de sódio, O.V.U e O.V.U_NaOH.

Todavia, observa-se que os valores máximos de absorção de água são semelhantes, o que indica que a porosidade também é semelhante e deste modo, os aditivos apenas atrasam a absorção de água, mas não a evitam.

Para complemento desta avaliação, compararam-se, também, os resultados obtidos nas resistências à compressão no estado seco (comp_S) e saturado (comp_Sat) de todas as composições, aos 180 dias (exceto a composição O.V.U_NaOH em que não foi possível obter resultados nesta idade, utilizando-se os valores dos 14 dias), conforme a Figura 84.

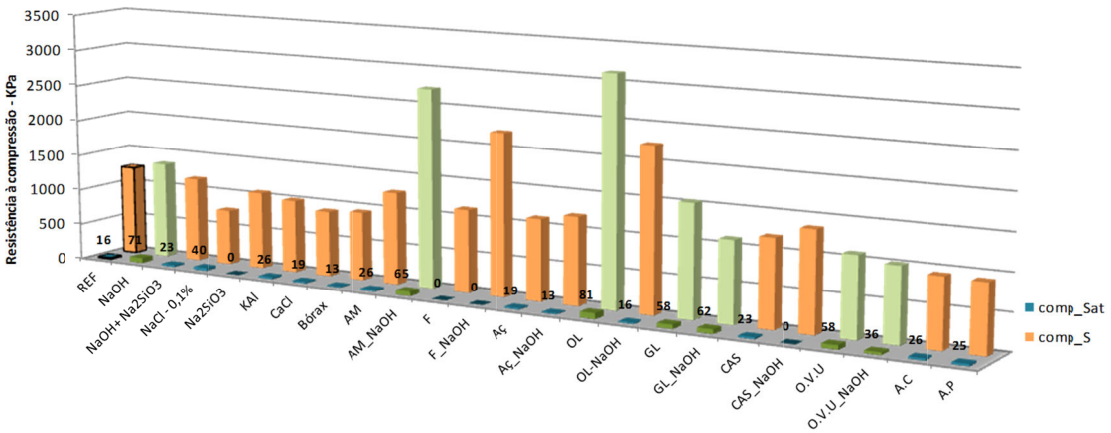


Figura 84 - Valores de resistência à compressão (180 dias)

Os resultados mostram que as composições que se destacam com maiores resistências no estado saturado, face ao solo de referência, mostrando uma maior resistência à água, ainda que com alguma redução da resistência no estado seco em algumas composições, são:

- Hidróxido de sódio, NaOH;
- Amido com hidróxido de sódio, AM_NaOH;
- Óleo de linhaça, OL;
- Glicerol, GL;
- Glicerol com hidróxido de sódio, GL_NaOH;
- Óleo vegetal usado, O.V.U; e
- Óleo vegetal usado com hidróxido de sódio, O.V.U_NaOH.

Para complemento e melhor compreensão desta análise, apresentam-se as seguintes tabelas, 39 a 41, com a seguinte classificação em relação ao comportamento obtido em cada composição face ao solo de referência, REF:

(--) – Mau – obtenção de valores piores do que REF;

(-) – Insatisfatório – obtenção de valores ligeiramente piores do que REF;

(+-) – Sem influência - obtenção de valores iguais aos de REF;

(+) – Satisfatório – obtenção de valores ligeiramente melhores do que REF;

(++) – Bom – obtenção de valores melhores do que REF; e

(+++) – Excelente – obtenção de valores muito melhores do que REF.

Tabela 39 – Solo preparado em laboratório com biopolímeros

Composições	**Biopolímeros Sólidos**			**Biopolímeros Líquidos**					
Testes	AM	FA	AÇ	O.L	GL	CAS	OVU	A.C	A.P
Resistência à compressão (Estado seco)	+	+-	+-	+++	+	+-	+-	-	-
Resistência à compressão (Estado saturado)	+	--	+-	+++	+++	+-	+++	+	+
Absorção de água por capilaridade	+-	+	+	+	++	++	++	+-	+-

Tabela 40 – Solo preparado em laboratório com aditivos minerais

Composições	**Aditivos minerais Ligantes**				**Aditivos minerais Religantes**		
Testes	NaOH	Na_2SiO_3	NaOH + Na_2SiO_3	Alumén	NaCl	CaCl	Bórax
Resistência à compressão (Estado seco)	+	-	-	-	-	-	-
Resistência à compressão (Estado saturado)	+++	--	+	+	++	-	-
Absorção de água por capilaridade	++	--	+	+	-	+	+-

Tabela 41 – Solo preparado em laboratório com biopolímeros e hidróxido de sódio

Composições / Testes	NaOH	AM_ NaOH	FA_ NaOH	AÇ_ NaOH	O.L_ NaOH	GL_ NaOH	CAS_ NaOH	O.V.U_ NaOH
Resistência à compressão (Estado seco)	+	+++	+++	-	+++	-	+	+
Resistência à compressão (Estado saturado)	+++	+++	++	-	-	+++	+++	++
Absorção de água por capilaridade	++	+	+-	++	+-	+	+	+

Para seleção de um biopolímero e um aditivo mineral para a etapa seguinte deste estudo, optou-se por se dar preferência aos melhores resultados obtidos no comportamento face à ação da água, seja pela absorção de água por capilaridade, seja pela redução da resistência à compressão em provetes saturados com água.

Assim, analisando as tabelas apresentadas considera-se que:

- Os biopolímeros com melhor resultado são: OL; GL; O.V.U. Optando-se pela seleção do O.V.U por manter bons resultados em relação à absorção de água (ao longo de todo o tempo de absorção) e uma boa resistência no estado saturado, mas, também, por este ter um custo monetário mais reduzido e uma maior sustentabilidade inerente à sua obtenção;
- Os aditivos minerais com melhor resultado são: NaOH e NaCl, embora a adição de NaCl tenha apenas bom efeito nas resistências à compressão em provetes saturados. Como tal, optou-se pela seleção do hidróxido de sódio como aditivo; e
- Na utilização simultânea de biopolímeros com hidróxido de sódio, à exceção de uma melhor resistência à compressão no estado seco de algumas composições, não se verificam vantagens em relação à utilização de hidróxido de sódio simples no caso do comportamento face à água (resistência e absorção).

9. Efeito da estabilização de solo com cal ou cimento – Apresentação e análise de resultados

9.1. Introdução

Os resultados apresentados referem-se às composições apresentadas nas Tabelas 33 e 34, capítulo 6, de que consta: o solo não estabilizado, de referência, REF-2 (nova mistura, a fim de manter as mesmas condições de temperatura que as composições em comparação, nesta segunda etapa do estudo); solo estabilizado com cal viva em percentagens de 2, 4 e 6 %, referido como CV2%, CV4%, CV6% ou apenas com 4 %, referido como CV; solo com 4 % de cal hidratada, CH; e solo com 4 % de cimento, Ci.

Os ensaios de resistência à compressão realizaram-se aos 7, 14, 28, 56 e 180 dias, a absorção de água por capilaridade aos 28 e 180 dias e a absorção de água por imersão aos 14 e 56 dias, tendo-se utilizado provetes cilíndricos de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura.

9.2. Ensaios de resistência à compressão

Apresentam-se, de seguida, os resultados de resistência à compressão simples de provetes no estado seco e no estado saturado (após ensaio teste de absorção de água por capilaridade), conforme a metodologia descrita no capítulo 6. O ensaio, no estado seco, foi realizado com três provetes de teste, apresentando-se o coeficiente de variação em percentagem junto do valor da resistência, enquanto o ensaio no estado saturado foi realizado em apenas um provete de teste.

A Figura 85 mostra os resultados de resistência à compressão simples de solo estabilizado com cal viva em percentagens de 2, 4 e 6 %, no estado seco.

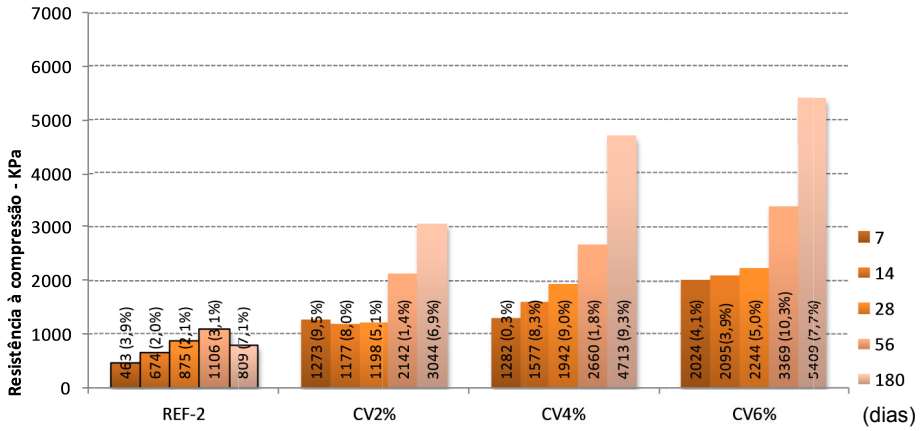


Figura 85 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva (7, 14, 28, 56 e 180 dias) - estado seco

Os resultados mostram que existem diferenças significativas entre o solo estabilizado e não estabilizado. As resistências à compressão do solo estabilizado com cal viva aumentam com o acréscimo da incorporação de cal viva. No entanto, parece não existir uma diferença significativa entre a adição de 4 ou 6 % de cal viva no solo, sendo por esta razão mais económico optar pela adição de 4 %. Deste modo, nas composições seguintes, utilizou-se sempre a incorporação de 4% de cal viva, passando esta composição a ser designada apenas por CV.

Relativamente aos valores de referência da revisão bibliográfica, verifica-se que a resistência obtida aos 180 dias com a composição CV, aproximadamente 4,7 MPa, encontra-se entre os valores referidos na norma alemã *Lehmbau Regeln* para solo com cal hidratada ou com cimento, sob a forma de taipa, 3 a 5 Mpa. E encontra-se ligeiramente acima do valor referido para BTC, 2 a 4 Mpa (Dachverband Lehm e.V., 2008).

Comparando com o estudo de Oti et al sobre solo estabilizado com cal viva (1,4 a 2,6 %) e subproduto da indústria do aço (ligante hidráulico) (5,6 a 10,5 %), verifica-se que a resistência aos 28 dias, 1,9 MPa encontra-se abaixo dos 3 MPa de resistência mínima referida neste estudo. No entanto, salienta-se que na presente tese é utilizada apenas cal viva como estabilizante, sem qualquer outro material ligante e por isso as resistências serão menores face a este estudo, Oti et al, 2009 e Oti et al, 2010.

Verifica-se, ainda, que a cal utilizada é considerada reativa, pertencendo ao grupo de maior reatividade, com um aumento de resistência, face ao solo de referência (REF-2), maior que 1,05 MPa (Thompson, 1964, in Houben & Guillaud, 2008).

Na Figura 86 observam-se os resultados de resistência à compressão, no estado seco, de solo não estabilizado, REF-2, e solo estabilizado com 4% de cal viva, CV, cal hidratada, CH, ou cimento, Ci.

Os resultados obtidos mostram que a adição destes estabilizantes origina distintas resistências até aos 56 dias, contudo, aos 180 dias não se verificam diferenças significativas entre as resistências de CV, CH ou Ci.

Observa-se, também, que, em relação à cal viva, o cimento permite obter resistências maiores dos 7 aos 56 dias e as resistências com cal hidratada são sempre ligeiramente maiores em todas as idades.

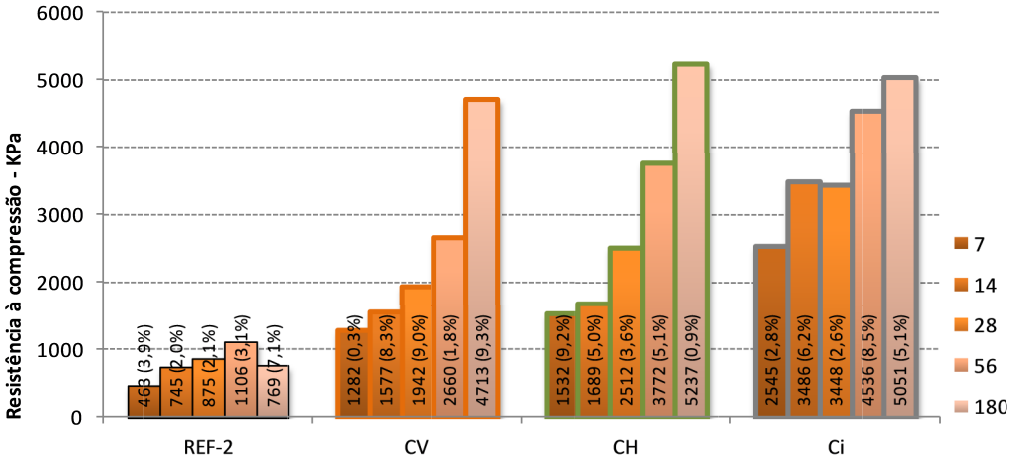


Figura 86 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva, cal hidratada ou cimento (7, 14, 28, 56 e 180 dias) - estado seco

Relativamente aos valores de referência, verifica-se que o solo com cal hidratada ou com cimento se encontram com aproximadamente 5 MPa, o valor máximo referido para a construção em taipa (Dachverband Lehm e.V., 2008). Verifica-se, ainda, que também cal hidratada tem uma reatividade semelhante à da cal viva.

Na Figura 87 encontram-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão, aos 56 dias, no estado saturado (após o ensaio de imersão, utilizando um provete de teste), do solo estabilizado com 4 % de cal viva, CV, cal hidratada, CH, ou cimento, Ci.

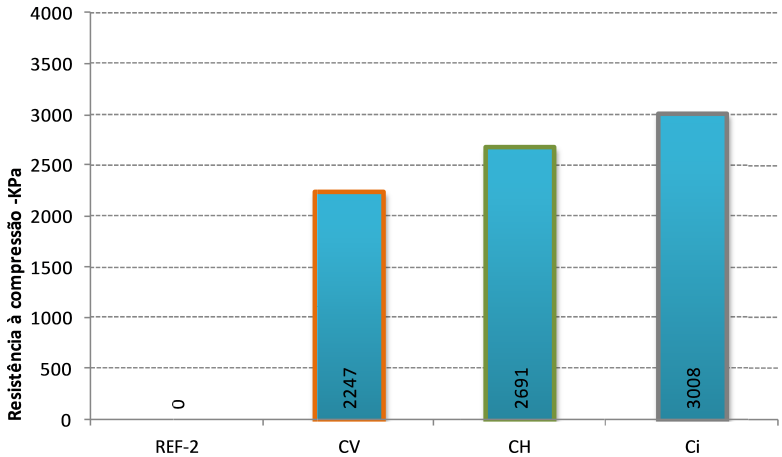


Figura 87 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva, cal hidratada ou cimento (56 dias) - estado saturado após imersão

As resistências à compressão no estado saturado mostram que o efeito dos vários estabilizantes é similar ao das resistências no estado seco aos 56 dias de cura. Assim, o cimento apresenta melhor resistência, seguindo-se a cal hidratada e a cal viva, com menor resistência. Contudo, verifica-se uma menor redução da resistência do estado seco para o estado saturado, aos 56 dias, na composição com cal viva em comparação com a cal hidratada ou o cimento. Constata-se uma redução de apenas 16 % em CV, enquanto a redução em CH é de 29 % e em Ci 34 %.

Em comparação com estudos de outros autores, verifica-se que a percentagem de redução de resistência do solo com cal viva, CV, é menor face à redução de 36 % obtida em BTC de solo/cal (8 %) por Guettala et al, 2005. Relativamente à adição de cimento, o mesmo autor registou uma redução de 42 % na resistência em BTC de solo/cimento (5 %), enquanto no presente tese se obteve uma redução de 34 % com 4 % de cimento. As reduções obtidas nos testes de saturação mostram-se, assim, satisfatórios, embora esta redução também possa estar relacionada com uma maior força de prensagem na produção dos provetes da presente tese (aproximadamente mais 9 MPa).

Todavia, o estudo de Santos da Cruz, em que foram utilizados provetes idênticos e com a mesma força de prensagem, refere uma redução de 36 % em solo/cimento (6 %) (Santos da Cruz, 2004). É uma percentagem ligeiramente maior face à redução obtida com a adição de apenas 4 % de cimento, Ci, 34 %.

9.3. Ensaios de absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção foram realizados segundo a metodologia descrita no capítulo 6. Foram utilizados dois provetes, de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura, por composição, considerando-se a média dos valores obtidos para os gráficos de absorção. De forma a promover uma melhor compreensão dos resultados, estes são apresentados utilizando gráficos que mostram a relação entre a quantidade de água absorvida, em kg/m^2, e o tempo de absorção, em $\sqrt{t}$ (min). Mas, também, apresentando gráficos comparativos com os valores do coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade das composições em análise em $kg/(m^2.\sqrt{h})$.

Nas Figuras 88 e 89 observam-se os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, aos 28 e aos 180 dias respetivamente, de solo não estabilizado, REF-2, e de solo estabilizado com cal viva em percentagens de 2, 4 e 6 %, com a respetiva designação de CV2%, CV4% e CV6%.

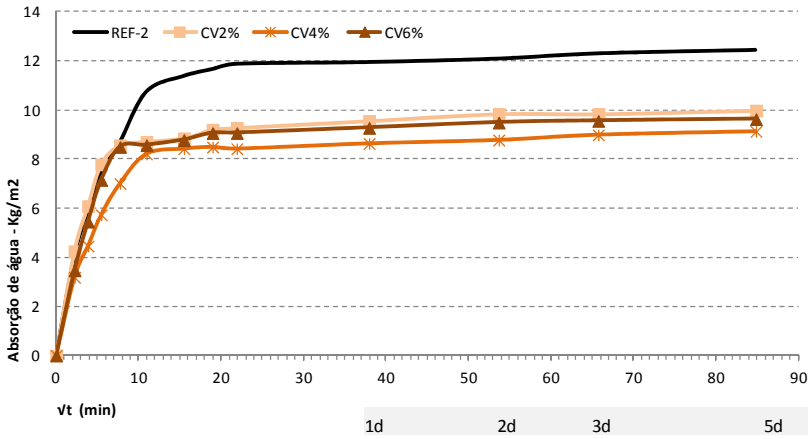


Figura 88 – Solo de referência e solo estabilizado com cal viva a 2, 4 e 6 % - Absorção por capilaridade (28 dias)

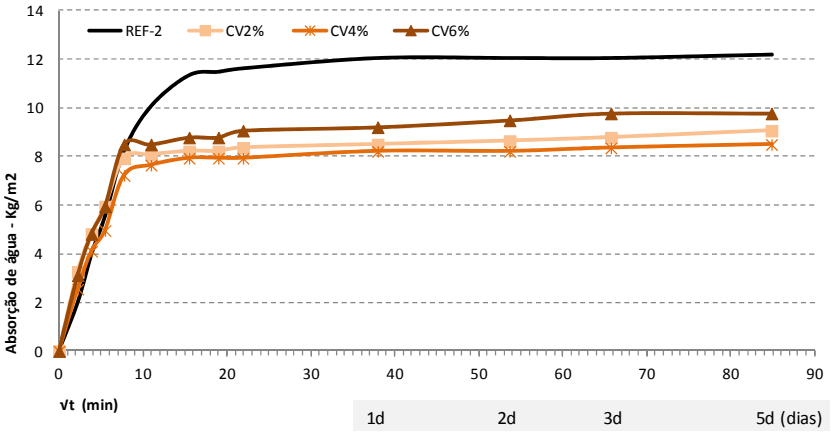


Figura 89 - Solo estabilizado com cal viva a 2, 4 e 6 % - Absorção por capilaridade (180dias)

Estes resultados mostram que aos 28 dias não existe uma diferença significativa entre a adição de 2, 4 ou 6 % de cal viva no solo, apenas com uma ligeira redução da absorção de água na composição com 4 % de cal. No entanto, aos 180 dias, na Figura , o gráfico mostra uma dispersão de valores ligeiramente maior, verificando-se que a adição de 6% de cal deu origem a um valor de absorção ligeiramente maior, enquanto a adição de 4 % de cal alcançou os menores valores de absorção.

Nas Figuras 90 e 91 observa-se a absorção de água por capilaridade, aos 28 e aos 180 dias, das composições de solo não estabilizado, REF-2, e solo estabilizado, a 4 %, com cal viva, CV, cal hidratada, CH, ou cimento, Ci.

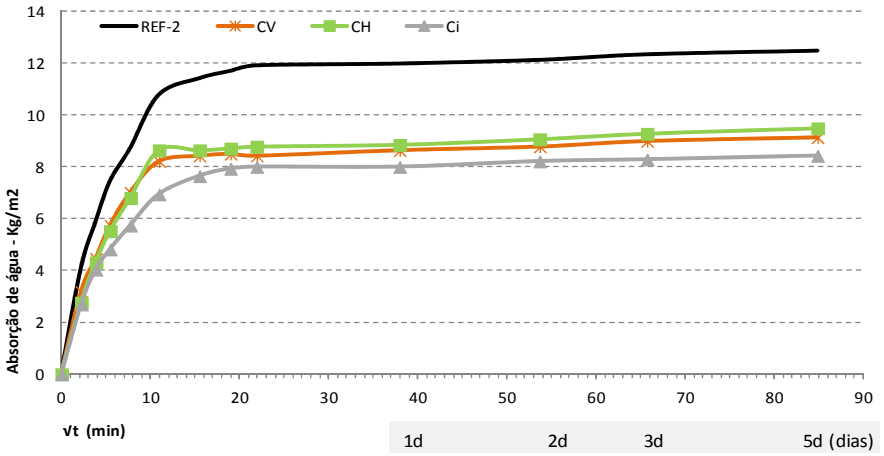


Figura 90 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva, cal hidratada e cimento – Absorção por capilaridade (28 dias)

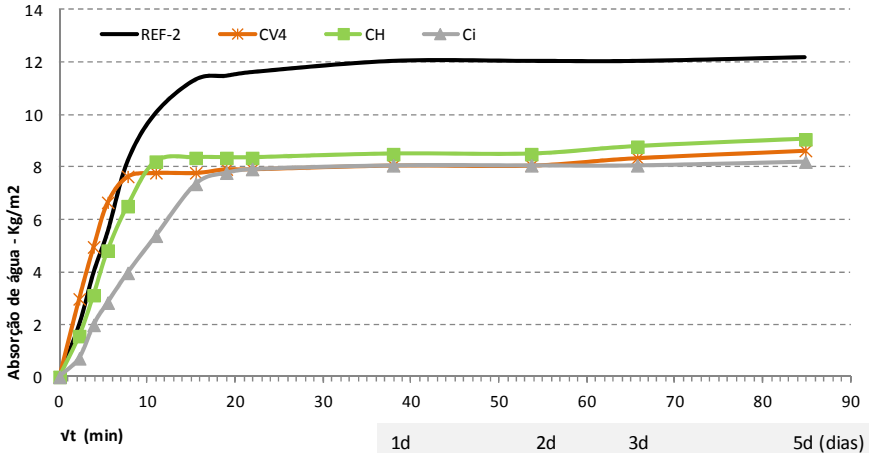


Figura 91 - Solo de referência e solo estabilizado com cal viva, cal hidratada e cimento – Absorção por capilaridade (180 dias)

Os resultados mostram que não existem diferenças significativas entre a absorção de água com a utilização dos diferentes estabilizantes, quer aos 28, quer aos 180 dias. Verificando-se valores semelhantes em ambas as idades. Todavia, observa-se nas primeiras uma menor absorção de água com a utilização de cimento, o que indica que existe um atraso na absorção de água nos primeiros instantes de absorção.

Encontram-se na Figura 92 o coeficiente de absorção capilar, em kg/(m^2.√h), respetivo aos ensaios de absorção de água por capilaridade, aos 28 e 180 dias, das composições testadas com as diferentes percentagens de cal viva, cal hidratada ou cimento. Para os valores de absorção em análise obteve-se um desvio padrão médio de 6,2 com o valor mínimo de 2,9 e o valor máximo 10,3.

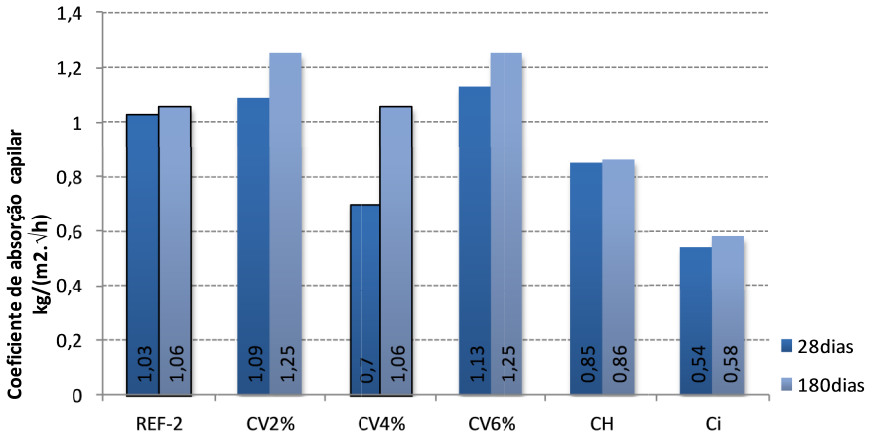


Figura 92 - Coeficiente de absorção capilar do solo com e sem estabilizantes – aos 28 e 180 dias

Os resultados mostram que a adição de 4 % de cal viva, CV4%, apresenta um coeficiente de absorção menor em relação à adição 2 ou 6 % de cal viva, CV2% ou CV6%, tal como nas curvas de absorção de água já apresentadas na Figura e na Figura . No entanto, em comparação com o coeficiente de absorção da cal hidratada ou cimento, verifica-se que aos 180 dias o coeficiente é o mais elevado, o que não se traduz nas curvas de absorção de água apresentadas na Figura .

Em relação aos valores de referência relativos à absorção de água por capilaridade, presentes no capítulo 6, apenas é possível comparar os resultados com o coeficiente de absorção capilar referido para os materiais de construção à base de terra. Assim, verifica-se que os valores obtidos, entre 0,54 e 1,25 Kg/(m^2.√h), encontram-se maioritariamente abaixo dos valores referidos (valor típico de 6 a 13,4 Kg/(m^2.√h), podendo ocorrer um mínimo de 1,2, in Rohlen & Ziegert, 2011).

Na Tabela 42 encontra-se o coeficiente de absorção capilar, o valor máximo de absorção e a respetiva massa volúmica aos 180 dias.

Tabela 42 – Valores de absorção por capilaridade e massa volúmica (180 dias)

Composição	Massa Volúmica kg/m^3	Coeficiente absorção capilar kg/(m^2.√h)	Absorção absoluta (máximo - kg/m^2)
REF-2	1942	1,06	12,17
CV2%	1977	1,25	9,05
CV4%	1974	1,06	8,63
CV6%	209	1,25	9,76
CH	1975	0,86	9,05
Ci	2016	0,58	8,21

Os valores de absorção absoluta mostram que a adição de 4 % de cal viva, CV4%, e a adição de cimento na mesma percentagem, Ci, apresentam uma menor absorção de água no final do ensaio (após 5 dias de absorção).

Comparando com os estudos de Guettala et al de BTC com solo/cimento (5 %) e solo/cal (8 %), que apresenta uma redução de absorção de água absoluta de 1,35 % no solo/cimento face ao solo/cal (Guettala et al, 2005), neste estudo com 4 % cal viva a redução obtida com solo/cimento foi um pouco maior, aproximadamente 5 %. Podendo justificar-se pela menor percentagem de cal utilizada, menos 4 % face aos 8 % utilizados por Guettala.

9.4. Ensaios de absorção de água por imersão

Os ensaios de absorção de água por imersão realizaram-se aos 14 e 56 dias, durante 14 dias de imersão em água, conforme a metodologia descrita no capítulo 6, utilizando-se dois provetes de teste, sendo considerada a média dos valores obtidos para cálculo dos resultados.

Os resultados são apresentados pelo teor máximo de água absorvida, em percentagem, segundo a equação número 8 que relaciona a massa de água que preenche os vazios e a massa seca da amostra.

$$\text{Abs (\%)} = \frac{M3-M1}{M1} \times 100 \qquad (\%) \qquad (8)$$

Na Figura 93 observam-se os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão do solo estabilizado a 4 % com cal viva, CV, cal hidratada, CH, e cimento, Ci. Para estes valores de absorção em análise obteve-se um desvio padrão médio de 4,3 com o valor mínimo de 1,3 e o valor máximo 9,5.

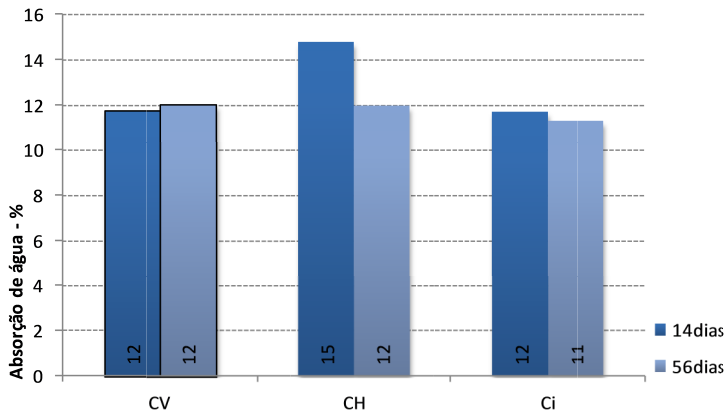


Figura 93 - Absorção de água por imersão do solo com cal viva, cal hidratada ou cimento – aos 14 e 56 dias

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão mostram que não existem diferenças significativas entre os estabilizantes. Embora se tenha registado uma absorção de água um pouco superior (+ 3 %) com cal hidratada aos 14 dias.

Durante o ensaio de imersão aos 14 dias verificou-se, ainda, perda de massa em todas as composições, mas registou-se uma perda de massa maior nos provetes de cal hidratada, conforme se observa na Figura 94.

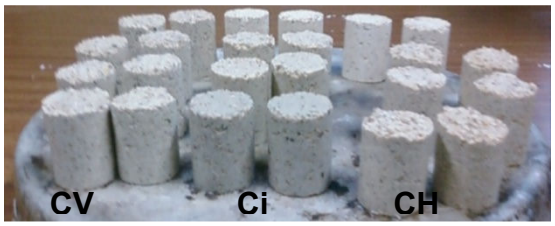


Figura 94 - Solo estabilizado com cal viva, cal hidratada ou cimento – perda de massa durante o ensaio de imersão

Em comparação com os valores de referência da revisão bibliográfica, constata-se que estes valores, de 11 a 15 %, se encontram dentro dos valores de referência para BTC dados pela norma australiana HB 195-2002 (Walker & Standards Australia, 2002).

Comparativamente a estudos de outros autores, verifica-se que a absorção de Ci foi superior aos resultados de 8 % de absorção em solo/cimento (5 %) obtidos por Guettala et al, 2005. Mas, foi inferior aos 18 % de absorção obtidos em solo/cimento (6 %) por Bomfim de Souza, 2006.

Em relação à adição de cal, não se encontraram valores de referência para cal viva, apenas para cal hidratada. De qualquer modo, verificou-se que a absorção de CV e CH foi superior aos 10% de absorção em solo/cal (8 %) obtidos por Guettala et al, 2005 para BTC.

9.5. Comparação de composições

Para complemento e melhor compreensão desta análise apresenta-se a Tabela 43, com a seguinte classificação em relação ao comportamento obtido em cada composição em comparação com o solo de referência, REF-2:

(--) – Mau – obtenção de valores piores do que REF-2;

(-) – Insatisfatório – obtenção de valores ligeiramente piores do que REF-2;

(+-) – Sem influência - obtenção de valores iguais aos de REF-2;

(+) – Satisfatório – obtenção de valores ligeiramente melhores do que REF-2;

(++) – Bom – obtenção de valores melhores do que REF-2; e

(+++) – Excelente – obtenção de valores muito melhores do que REF-2.

Os resultados mostram que não existem diferenças entre as composições estudadas e verifica-se que em todas as composições o comportamento em relação à absorção de água, não é muito melhor em relação ao solo de referência, REF-2, justificando-se a necessidade de incorporação de aditivos para reduzir a absorção de água.

Tabela 43 – Solo preparado em laboratório com vários estabilizantes

Composições / **Testes**	CV2%	CV4%	CV6%	CH	Ci
Resistência à compressão (Estado seco)	++	++	++	++	++
Resistência à compressão (Estado saturado)	x	++	x	++	++
Absorção de água por capilaridade	+	+	+	+	+
Absorção de água por imersão	x	++	x	++	++

10. Efeito da incorporação de biopolímero e aditivo mineral em solo estabilizado - Apresentação e análise de resultados

10.1. Introdução

Os resultados apresentados referem-se às composições apresentadas nas Tabelas 35 e 36, referentes a solo estabilizado sem e com adição do biopolímero e aditivo mineral selecionados.

Os ensaios de resistência à compressão realizaram-se aos 7, 14, 28, 56 e 180 dias, a absorção de água por capilaridade aos 28 e 180 dias e a absorção de água por imersão aos 14 e 56 dias, tendo-se utilizado provetes cilíndricos de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura.

10.2. Ensaios de resistência à compressão

Apresentam-se, de seguida, os resultados de resistência à compressão simples de provetes no estado seco e no estado saturado (após ensaio teste de absorção de água por imersão), conforme a metodologia descrita no capítulo 6. O ensaio, no estado seco, foi realizado com três provetes de teste, apresentando-se o coeficiente de variação, em percentagem, junto do valor da resistência, enquanto o ensaio no estado saturado foi realizado em apenas um provete de teste.

Na Figura 95 apresentam-se os resultados das seguintes composições de solo estabilizado com cal viva: solo apenas com o estabilizante, CV; solo com adição de hidróxido de sódio, CV_NaOH; solo com adição de óleo vegetal usado, CV_O.V.U; e solo com a adição conjunta de óleo com hidróxido de sódio, CV_ O.V.U_NaOH.

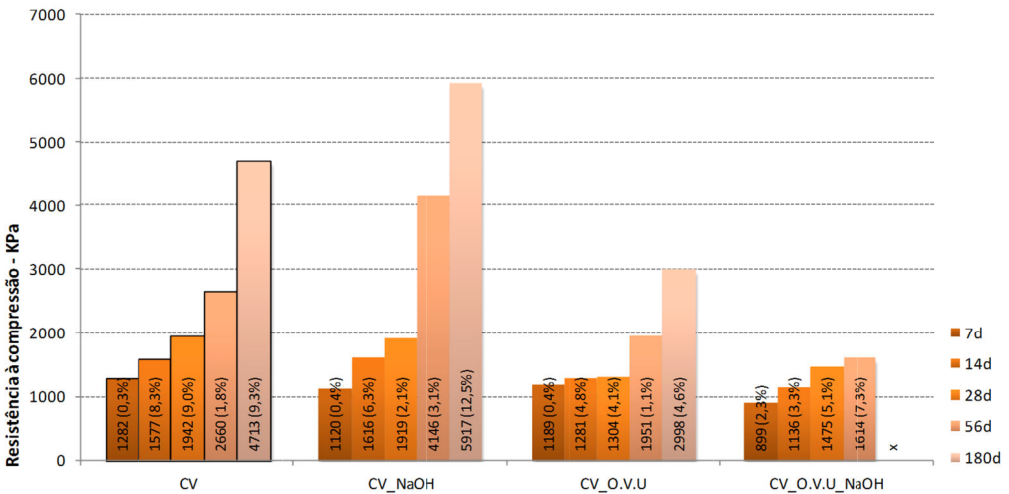


Figura 95 - Solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio (7, 14, 28, 56 e 180 dias) – estado seco

Os resultados obtidos mostram que até aos 14 dias a composição com maior resistência é a composição base com cal viva, CV. A partir dos 56 dias a composição CV_NaOH adquire a maior resistência. No entanto, a adição e óleo ou de óleo com hidróxido de sódio reduziu as resistências. Em termos gerais, verifica-se que em termos de resistências à compressão parece existir vantagem em adicionar hidróxido de sódio.

Na Figura 96 observam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão em estado saturado, aos 56 dias, das mesmas composições. Não tendo sido possível obter a resistência da composição CV_ O.V.U_NaOH.

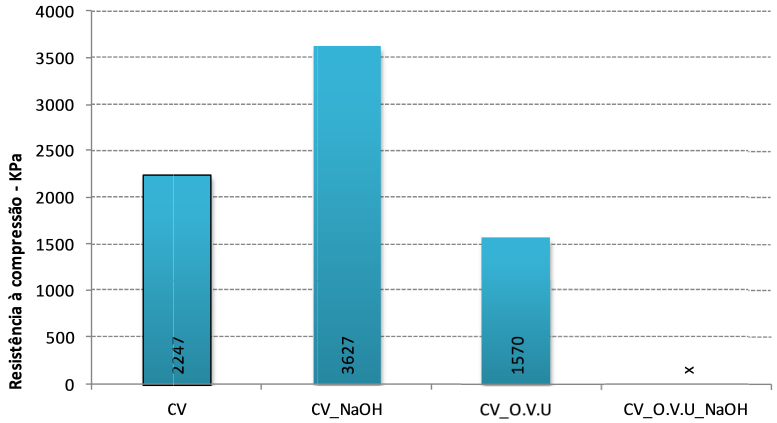


Figura 96 - Solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio (56 dias) – estado saturado

Os resultados obtidos mostram que a composição com resistência superior à composição base CV é a composição CV_NaOH e a composição CV_O.V.U apresenta uma redução da resistência, tal como na resistência à compressão em estado seco.

Comparando com os valores de referência normativos para taipa ou BTC, observa-se que em relação à norma australiana HB 195-2002 (Walker & Standards Australia, 2002) as composições com óleo ainda se encontram acima do valor mínimo de 1MPa. Todavia, segundo os valores referidos na norma alemã *Lehmbau Regeln* para taipa, 3 a 5 Mpa, e para BTC, 2 a 4 Mpa (Dachverband Lehm e.V., 2008), apenas as composições CV_NaOH e CV_O.V.U cumprem os valores mínimos.

Para comparação dos resultados obtidos com estudos de outros autores sobre cal com óleos, apenas se encontrou referência de estudos realizados sobre argamassas de cal hidratada com óleo de linhaça (1 e 3%) por Čechová. Os

seus estudos mostram que os resultados relativamente às resistências mecânicas nem são sempre favoráveis, existindo mesmo uma descida das resistências em certos casos, sobretudo quando são adicionadas maiores percentagens de óleo (Čechová, 2009).

Também se verificou nos resultados obtidos, da presente tese, uma descida da resistência à compressão nas composições com cal viva e adição de óleo vegetal usado também reduziram a resistência à compressão, embora a percentagem de óleo adicionada tenha sido reduzida (1 %).

A redução da resistência, no caso das argamassas com óleo de linhaça, é justificada pela particularidade do óleo encapsular as partículas de hidróxido de cálcio e evitar que ocorra o processo de carbonatação (Santiago & Mendonça, 1992, in Čechová, 2009). Esta situação também poderá ter ocorrido com no solo em estudo com cal viva e óleo vegetal usado.

10.3. Ensaios de absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção foram realizados segundo a metodologia descrita no capítulo 6, em provetes iguais aos anteriores, de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura.

De forma a promover uma melhor compreensão dos resultados, estes são apresentados utilizando gráficos que mostram a relação entre a quantidade de água absorvida, em kg/m^2, e o tempo de absorção, em $\sqrt{t}$(min). Mas, também, apresentando gráficos comparativos com os valores do coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade das composições em análise, em $kg/(m^2.\sqrt{h})$.

Nos gráficos seguintes, Figuras 97 e 98, apresentam-se os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, aos 28 e 180 dias, das seguintes composições de solo estabilizado com cal viva: solo apenas com o estabilizante, CV; solo com adição de hidróxido de sódio, CV_NaOH; solo com adição de óleo vegetal usado, CV_O.V.U; e solo com a adição conjunta de óleo com hidróxido de sódio, CV_ O.V.U_NaOH. Não tendo sido possível realizar o ensaio, aos 180 dias, em provetes de CV_O.V.U_NaOH.

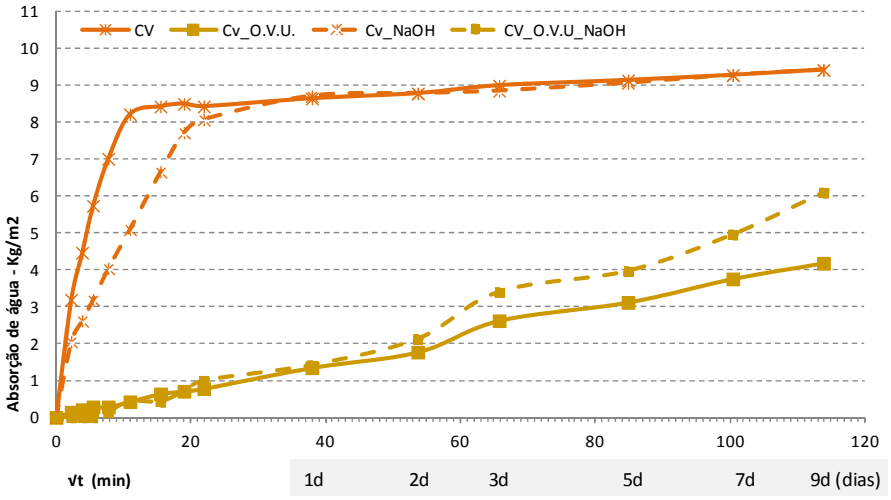


Figura 97 - Solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio (28 dias) – absorção por capilaridade

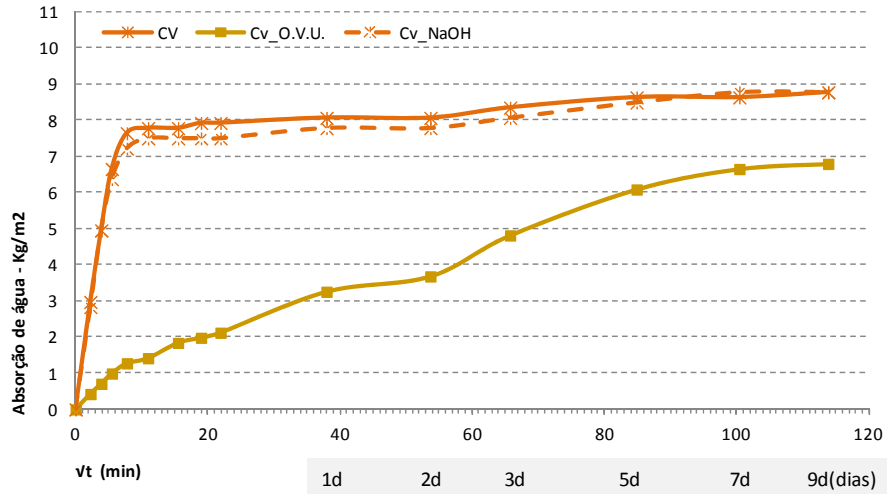


Figura 98 - Solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio (180 dias) – absorção por capilaridade

Os resultados apresentados mostram que a adição de hidróxido de sódio ao solo com cal viva, CV_NaOH, apresenta uma absorção de água semelhante à do solo apenas com cal viva, CV. Já a adição de óleo vegetal usado, CV_O.V.U, apresenta a maior redução de absorção de água, sobretudo nas primeiras 48 horas de absorção. Este comportamento, verifica-se quer aos 28, quer aos 180 dias, embora a absorção tenha sido maior aos 180 dias, contrariamente ao esperado, uma vez que a resistência à compressão aumentou significativamente dos 28 para os 180 dias.

A Figura 99 mostra a diferença entre a altura de absorção capilar, em kg/(m^2.√h), nos provetes das composições com óleo, CV_O.V.U, face aos restantes, observando-se que se mantêm praticamente secos durante as primeiras 24 horas.

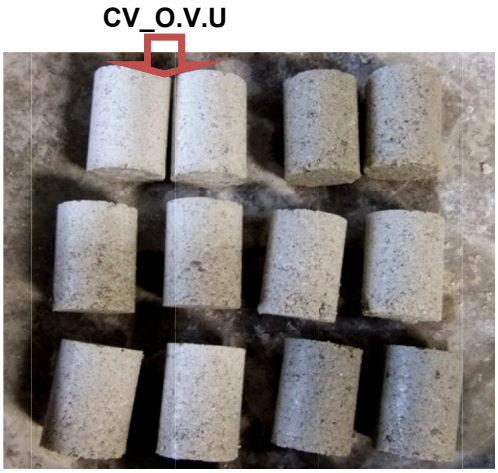


Figura 99 – Provetes durante ensaio de absorção de água por capilaridade (antes da pesagem)

No geral, verifica-se que não existe uma correspondência entre os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e nos ensaios de resistência à compressão. Constata-se que a composição com menor absorção de água, CV_O.V.U, apresenta menor resistência à compressão, no estado seco e saturado, em relação à composição apenas com cal viva, CV. Enquanto a composição com maior resistência à compressão, CV_NaOH, apresenta valores de absorção idênticos aos do solo com cal viva sem aditivos, CV.

Encontra-se na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Figura 100 o coeficiente de absorção capilar, respetivo aos ensaios de absorção de água por capilaridade, aos 28 e 180 dias, das composições testadas. Para os valores de absorção em análise obteve-se um desvio padrão médio de 7,1 com o valor mínimo de 5,7 e o valor máximo 9,3.

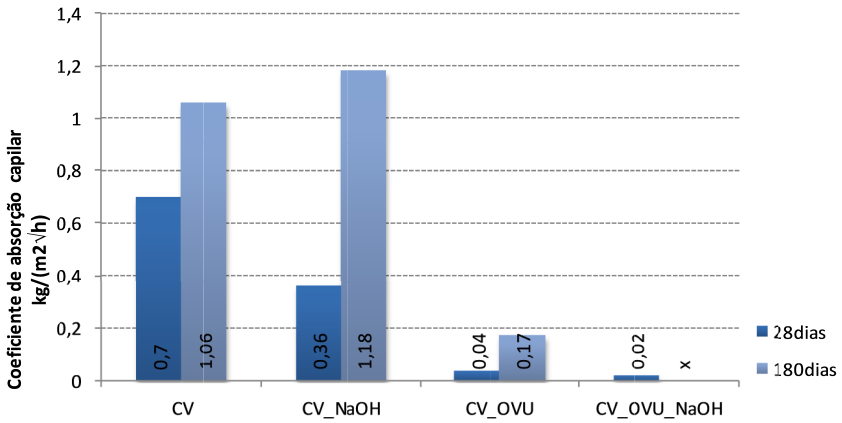


Figura 100 – Coeficiente de absorção capilar de solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio – aos 28 e 180 dias

Os resultados obtidos mostram que o coeficiente de absorção capilar é análogo às curvas de absorção de água apresentadas na Figura e na Figura ,

salientando-se uma menor absorção de água nas composições com óleo vegetal usado, CV_O.V.U e CV_O.V.U_NaOH.

Comparando com os valores de referência da revisão bibliográfica, verifica-se que todas as composições apresentam um coeficiente de absorção capilar abaixo do valor mínimo de 1,2 referido para os materiais de construção à base de terra (Rohlen & Ziegert, 2011). Resultado, que vem ao encontro da redução de absorção de água pretendida.

10.4. Ensaios de absorção de água por imersão

Os ensaios de absorção de água por imersão realizaram-se aos 14 e 56 dias, durante 14 dias de imersão em água, conforme a metodologia descrita no capítulo 6, utilizando-se dois provetes de teste, sendo considerada a média dos valores obtidos para cálculo dos resultados. Os resultados são apresentados pelo teor máximo de água absorvida, em percentagem, segundo a equação número 8.

Na Figura 101 observam-se os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão das seguintes composições de solo estabilizado com cal viva: solo apenas com o estabilizante, CV; solo com adição de hidróxido de sódio, CV_NaOH; solo com adição de óleo vegetal usado, CV_O.V.U; e solo com a adição conjunta de óleo com hidróxido de sódio, CV_ O.V.U_NaOH. Não tendo sido possível realizar o ensaio, aos 56 dias, em provetes de CV_O.V.U_NaOH. Para estes valores de absorção em análise obteve-se um desvio padrão médio de 4,3 com o valor mínimo de 2,2 e o valor máximo 7,4.

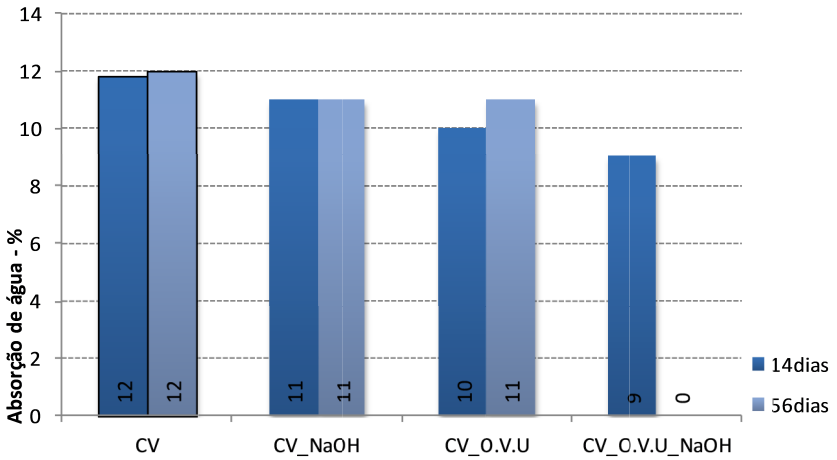


Figura 101 - Absorção de água por imersão de solo estabilizado com cal viva, óleo e/ou hidróxido de sódio – aos 14 e 56 dias

Os resultados obtidos mostram que as composições com hidróxido de sódio, CV_NaOH, com óleo vegetal usado, CV_O.V.U, e a adição em simultâneo dos dois aditivos, CV_O.V.U_NaOH, apresentam uma menor absorção de água, sobretudo a composição CV_O.V.U_NaOH. No entanto, as diferenças não são muito significativas, tendo ocorrido uma diminuição da absorção apenas na ordem dos 3 %.

Comparando com os valores de referência da revisão bibliográfica, verifica-se todas as composições testadas, de solo com cal viva, apresentam percentagens de absorção de água por imersão próximas ao valor mínimo de referência para construção em BTC. Isto, segundo a norma australiana HB 195-2002 (Walker & Standards Australia, 2002) que refere valores de 10 a 25 %. Verificando-se mesmo que a composição CV_O.V.U_NaOH, aos 14 dias apresentou uma absorção de água ligeiramente inferior, 9 %.

10.5. Ensaios de durabilidade - ciclos de molhagem e secagem

Os ensaios para avaliação da durabilidade face a ações de molhagem/secagem realizaram-se com as seguintes composições: solo estabilizado com cal, CV; solo com cal e óleo vegetal usado, CV_O.V.U, (que à data de ensaio apresentava melhores resultados de absorção de água por capilaridade); e com solo estabilizado com cal hidratada, CH, ou cimento, Ci, para comparação de resultados.

Realizaram-se quinze ciclos de molhagem/secagem seguindo a metodologia presente no capítulo 6, em provetes cilíndricos de 30 mm de diâmetro e 40 mm de altura, com 90 dias de idade, verificando-se a perda de massa dos provetes testados após cada ciclo, pesando os provetes secos. Posteriormente, efetuaram-se novos ensaios de absorção de água por capilaridade e por imersão.

Durante o processo de molhagem/secagem observou-se que os provetes não ficavam completamente saturados após a fase de imersão em água. Comparando com o ensaio de imersão, anteriormente realizado, registou-se, em média, menos 1 % de absorção de água em CV, menos 4 % em OVU, menos 2 % em CH e menos 3 % em Ci. Observou-se, ainda, durante este

ensaio que no final do 3º ciclo a presença de óleo na superfície da água após a fase de imersão dos provetes.

Na Figura 102 observam-se os resultados obtidos relativamente à percentagem de perda de massa das composições em análise, ao final de cada 3 ciclos.

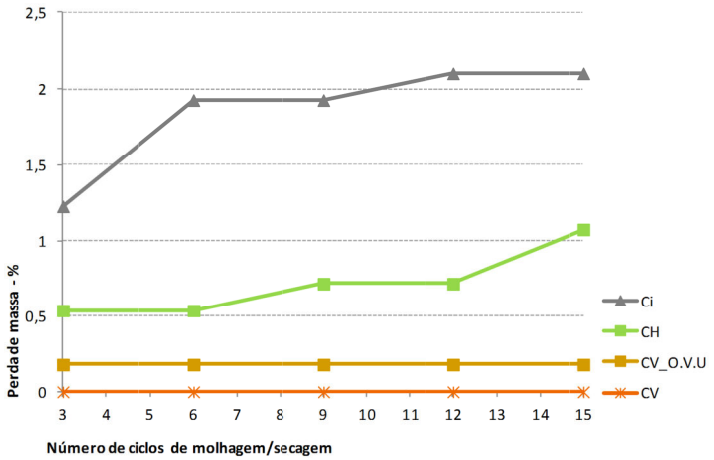


Figura 102 – Perda de massa de solo estabilizado com diferentes composições sujeito a ciclos de molhagem/secagem

Verifica-se pelos resultados obtidos que as composições analisadas neste estudo apresentam diferentes perdas de massa, ainda que numa ordem de grandeza relativamente próxima (de 0 a 2 %), durante os ciclos de molhagem/secagem. Salienta-se que as composições com menor perda de massa são as de cal viva, CV e CV_O.V.U, e com maior perda de massa as composições com cal hidratada ou cimento, CH e Ci. A composição com cimento destaca-se pela maior perda de massa em relação às restantes composições.

Em comparação com resultados de outro autor observa-se que os resultados obtidos são contraditórios, ainda que com valores na mesma ordem de grandeza (até 2 % de perda de massa). Guettala et al, num estudo sobre BTC, revelam que com solo/cimento (5 %) existe uma perda de massa de 1 % e com solo/cal (8 %) existe uma perda de massa maior, de 2 % (Guettala et al, 2005). No entanto, os presentes resultados apresentam uma perda de massa em solo/cimento (4 %) na ordem dos 2 % e uma perda de massa em solo/cal (4 %) menor, de 1 %.

A Figura 103 mostra os resultados do ensaio de absorção por capilaridade após os ciclos molhagem/secagem, em que os resultados dos provetes

submetidos aos ciclos de teste estão designados por “M/S_composição testada” e são comparados com os resultados de absorção de água por capilaridade obtidos 28 dias.

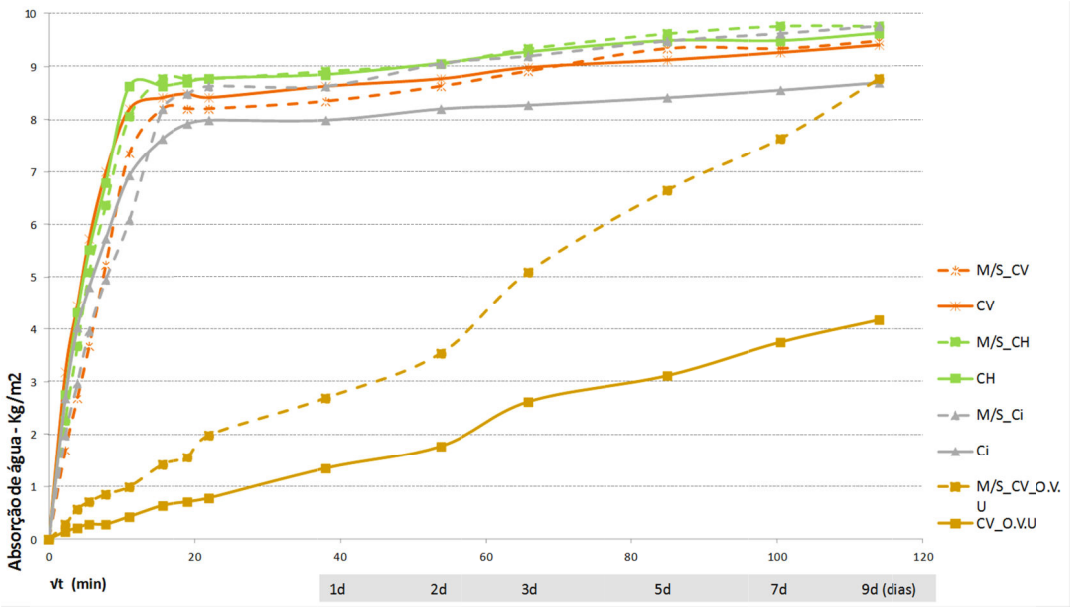


Figura 103 – Comparação de solo estabilizado antes e após ciclos de molhagem/secagem – absorção por capilaridade

Comparando os resultados, antes e após este processo, verifica-se que todas as composições sofrem degradação devido aos ciclos molhagem/secagem, uma vez que a quantidade de água absorvida aumentou. As composições com menor perda de efeito hidrófugo são as de cal viva, CV, cal hidratada CH, e cimento, Ci. A cal com óleo, CV_O.V.U, apresenta um aumento de absorção maior, sobretudo nos últimos dias de absorção, indicando uma diminuição maior no seu desempenho como material hidrófugo.

Este acréscimo de absorção pode justificar a ligeira perda de massa registada em CV_O.V.U, no entanto, nas composições CH e Ci não se verificou um aumento de absorção de água proporcional ao aumento de massa registado.

Na Figura 104 observa-se o coeficiente de absorção capilar, a fim de comparar a absorção inicial das composições submetidas aos ciclos molhagem/secagem, antes e após estes ciclos.

Os resultados obtidos mostram que não existem diferenças significativas relativamente ao coeficiente de absorção capilar, comparando as composições antes e depois dos ciclos molhagem/secagem. Verificando-se, contrariamente

ao esperado, uma ligeira diminuição da absorção nas composições com cal viva, CV, e com cimento, Ci.

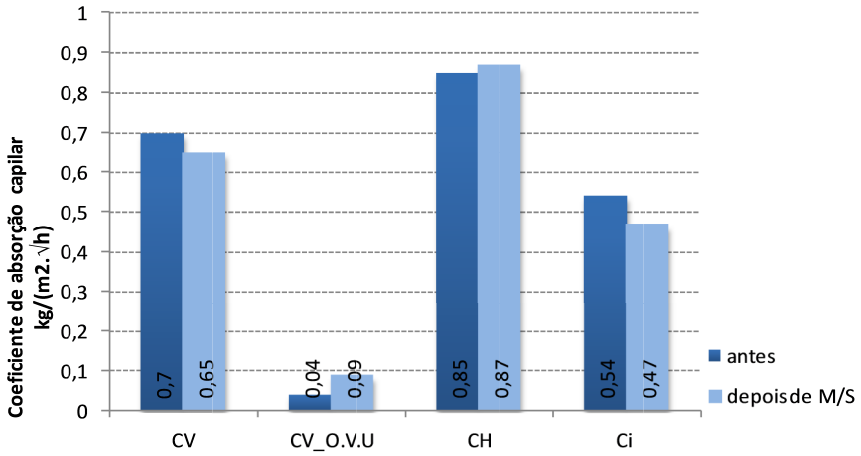


Figura 104 – Comparação de solo estabilizado antes e após ciclos de molhagem/secagem – Coeficiente de absorção capilar

Na Figura 105 apresentam-se os resultados do ensaio de absorção de água por imersão, durante 12 dias de absorção, a fim de comparar a absorção total das composições submetidas aos ciclos molhagem/secagem, antes e após estes ciclos.

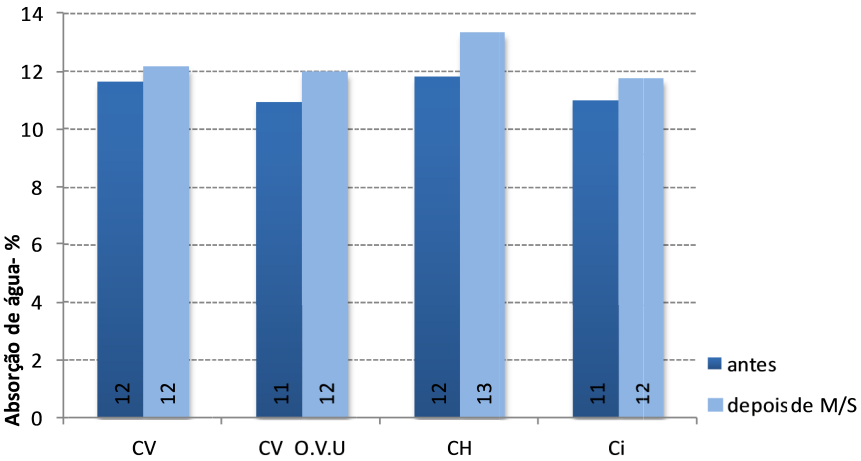


Figura 105 – Comparação de solo estabilizado antes e após ciclos de molhagem/secagem – absorção por imersão

Os resultados indicam que em todas as composições testadas se registou um aumento da absorção de água total, por imersão, mas não existem diferenças significativas entre os resultados realizados antes e após os ciclos de molhagem/secagem, nem mesmo entre composições. Existem apenas diferenças na ordem de 1 %.

No geral, salienta-se que em relação à adição de óleo, em CV_O.V.U, parece existir maior influência na absorção de água por capilaridade, o que indica que

o óleo parece não afetar significativamente a porosidade aberta (relacionando-se com os resultados de absorção de água total por imersão), mas sim a tenção superficial da água que está relacionada com a absorção capilar.

10.6. Ensaios de erosão acelerada por jato de água para simulação de chuva

A fim de avaliar a durabilidade das composições estudadas face à intempérie realizou-se um ensaio de erosão acelerada por jato de água para simulação de chuva.

Este ensaio foi realizado mediante adaptação da norma australiana HB-195 (Peter & Standards Australia, 2002), segundo a metodologia descrita no capítulo 6, em provetes de 200x200x200 mm^3, previamente secos.



Figura 106 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água

Depois da incidência do jato de água, tal como observado na Figura 106, durante 90 minutos ou até à erosão máxima do provete, mediu-se a profundidade dos buracos escavados pela ação da água, em vários pontos na área de incidência do jato de água, considerando a média dos valores registados para avaliação e comparação de resultados.

Testaram-se, deste modo, as seguintes composições: solo não estabilizado, REF, solo estabilizado com cal viva, CV; solo com cal e óleo vegetal usado, CV_O.V.U, que à data do ensaio apresentava a menor absorção de água por capilaridade; e solo estabilizado com cal hidratada, CH, ou com cimento, Ci, para comparação de resultados.

A intensidade de precipitação simulada corresponde a 2898 L/min.m^2 ou mm/min, pelo que os 90 minutos de teste correspondem a, aproximadamente,

87 anos de chuva na região do Minho, cuja média anual de precipitação é a maior de Portugal, 3000 mm por ano. A região do país com menor precipitação anual é o interior do Alentejo, com valores inferiores a 600 mm, e a média global de precipitação no nosso país é de 900 mm por ano (IM, 2005).

As Tabelas 44 e 45 mostram, mediante registo fotográfico, os provetes antes, durante e após o ensaio por jato de água, com destaque da zona abrangida pelo jato de água.

Tabela 44 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo sem estabilizante – análise visual)

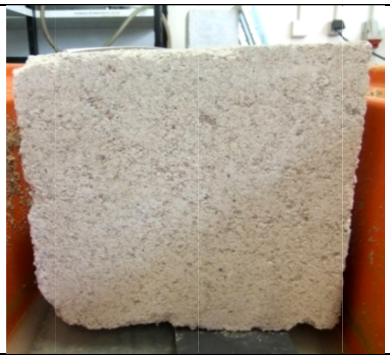
Antes do ensaio	Após 5 min.	Após o ensaio
REF		
		

Tabela 45 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo com estabilizantes – análise visual)

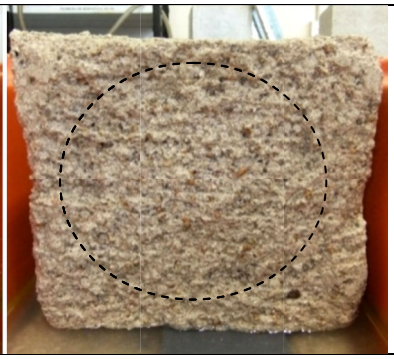
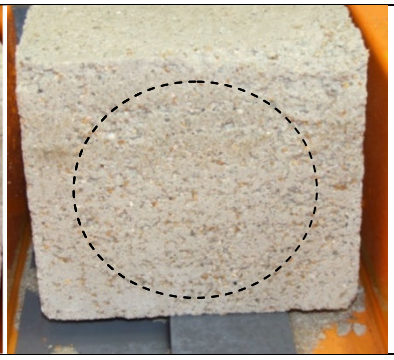
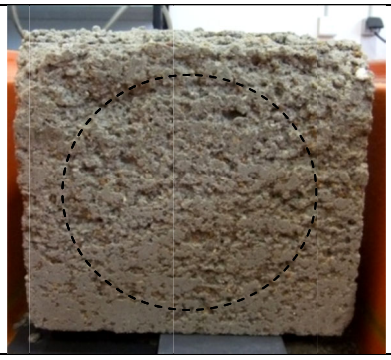
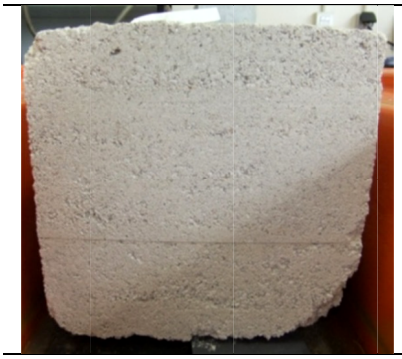
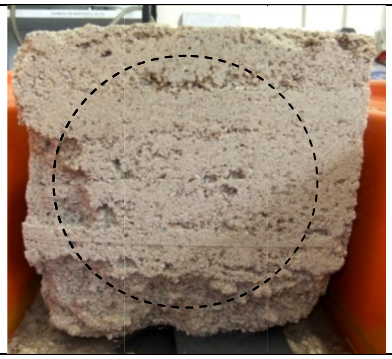
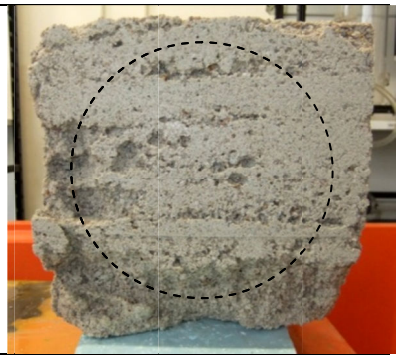
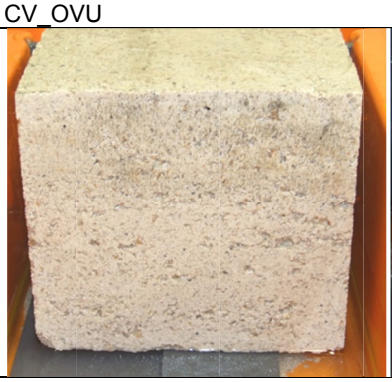
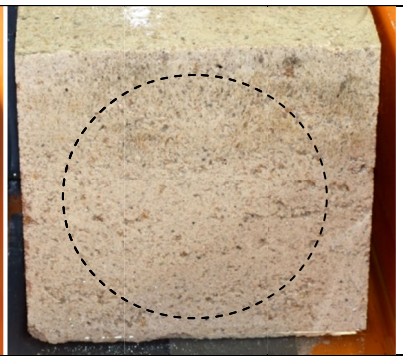
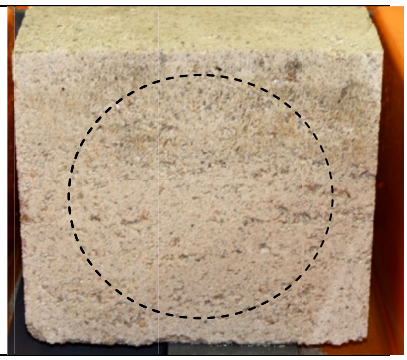
Antes do ensaio	Após 15 min.	Após o ensaio (90minutos)
CH		
		
Ci		
		

Tabela 45 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (continuação)

Antes do ensaio	Após 15 min.	Após o ensaio (90minutos)
CV		
		
CV_OVU		
		

Analisando as imagens obtidas verifica-se que:

- O solo de referência, sem estabilizante, REF, tem pouca resistência à ação da água, demorando cerca de 5 minutos para erosão provocada pelo jato de água percorrer todo o provete;
- Os solos estabilizados com cimento ou cal hidratada, Ci e CH, apresentam um desgaste homogéneo em toda a superfície do provete, verificando-se que o solo estabilizado com cal hidratada apresenta maior desgaste geral e também em algumas zonas pontuais;
- O solo estabilizado com cal viva, CV, apresenta um desgaste pontual, com maior profundidade em zonas onde existia fragilidade do provete, provavelmente devido ao processo de compactação. Não considerando este desgaste pontual, verifica-se uma menor erosão face às composições com cal hidratada ou cimento, Ci e CH; e
- A composição com cal viva e óleo vegetal usado, CV_O.V.U apresenta claramente um menor desgaste superficial em toda a área do provete.

A fim de quantificar e avaliar a erosão obtida em cada provete, decidiu-se utilizar como critério de avaliação, o critério da erosão acelerada por jato de

água do "*Bulletin 5*" (Middleton e Schneider, 1987) que consiste em considerar satisfatória apenas a erosão que não exceda 1 mm/minuto.

Assim, verifica-se pela Tabela 46 que apenas o solo de referência, sem estabilizante, REF, apresenta um valor superior a 1 mm/minuto, logo as restantes composições apresentam valores satisfatórios. Destacando-se a composição de solo com cal viva e óleo vegetal usado, CV_O.V.U, se pela sua reduzida erosão, demonstrando, claramente, um melhor desempenho.

Tabela 46 – Erosão acelerada por jato de água – resultados em mm

Composição	Dimensões (cm)	Massa volúmica (a seco) kg/m^3	Tempo - minutos (Erosão média - mm)						Erosão máxima mm	Erosão por minuto mm/min
			15	30	45	60	75	90		
REF	20x20x17.5	1829	200	-	-	-	-	-	200	13,33
CH	20x20x17.2	1693	11	15	20	21	21,5	22	43,9	**0,35**
CV	20x20x19	1705	6,4	8	8	8,5	8,7	9,4	33	**0,14**
Ci	20x20x17.6	1896	5,1	6,5	7	7,9	8,9	8,9	8,9	**0,13**
CV_O.V.U	20x20x18.1	1854	2,8	3,3	4,2	5	5,2	5,6	5,6	**0,08**

De igual modo, a Figura 107, onde se observa a erosão ao longo do tempo das diferentes composições, mostra que não existe uma diferença significativa entre as composições á exceção do solo de referência, REF, claramente com a maior erosão, e do solo com cal hidratada, CH, com uma erosão um pouco superior às restantes composições. De qualquer modo, a composição com óleo destaca-se com menor erosão, seguindo-se as composições de solo estabilizado com cimento ou com cal viva, Ci e CV, com níveis de erosão semelhantes e ligeiramente superior a CV_O.V.U.

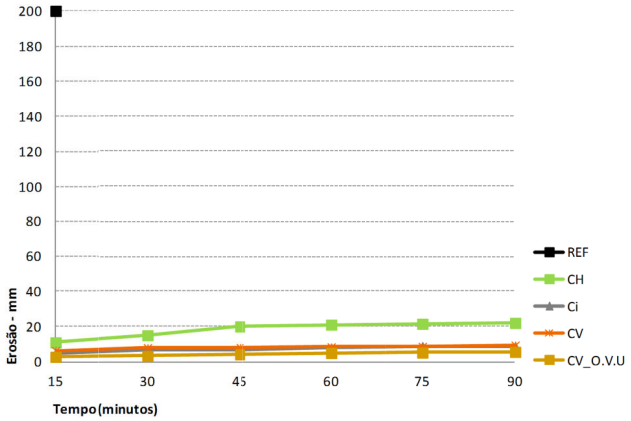


Figura 107 – Solo estabilizado com diferentes composições (56 dias) – erosão acelerada por jato de água durante 90 minutos

Para comparação dos resultados obtidos no ensaio de erosão acelerada com os resultados obtidos por outros autores em ensaios semelhantes, estabeleceu-se uma comparação com os estudos de Guettala et al, Heathcote e Minke.

Guettala et al realizaram um estudo com blocos de terra, estabilizados com cimento ou cal, testados em laboratório com ensaio de erosão acelerada por jato de água (jato horizontal a 17cm de distância ao chuveiro e com pressão de 1,6 Kg/m2, durante duas horas). Os resultados obtidos neste ensaio de erosão, revelam que em solo/cimento (5%) se obtém uma erosão de 1,0 mm e com solo/cal 2,2 mm (Guettala et al, 2005).

Nos ensaios erosão acelerada realizados na presente tese verifica-se que as composições com cimento ou cal hidratada apresentam uma maior diferença na erosão destas composições e maior profundidade de erosão, 8,9 mm em solo/cimento e 22 mm em solo/cal.

Heathcote, nos seus estudos sobre taipa face à ação da água, refere que a erosão por jato de água (ensaio realizado segundo a metodologia presente na Tabela 22, capítulo 6) reduz com o aumento de cimento. Referindo que com estabilização de 3% de cimento, o teste de jato de água teve de ser parado após 2 minutos devido à severa erosão sobre o provete, contrariamente à adição de 7 e 8 % de cimento que permitiu concluir o teste (Heathcote, 2002).

Durante a parte experimental da tese verificou-se um comportamento idêntico no solo com 4% de cimento, uma vez que também foi necessário parar o teste muito antes do tempo definido, neste caso parou-se aos 15 minutos, sendo o teste de 90 minutos.

Heathcote refere ainda que na maioria dos solos não existe uma relação simples entre a resistência e a durabilidade, o que também se verificou neste estudo (Heathcote, 2002).

Relativamente à utilização testes semelhantes, realizados com adição de óleos, apenas se encontrou referência a um estudo de Minke. Em seus testes de erosão acelerada por jatos de água (ensaio realizado segundo a metodologia presente na tabela 22 capítulo 6) refere que uma argamassa de solo

estabilizado com 6 % de óleo de linhaça cozido esteve sob a ação da água, durante 7 dias, sem apresentar nenhuma erosão (Minke, 2007).

Na presente tese, apesar de se ter optado pela adição do óleo vegetal usado, em vez da adição de óleo de linhaça, no solo com cal viva, verificou-se um melhor comportamento de resistência à ação da água face às restantes composições, apresentando uma erosão de apenas 5,6 mm, correspondente a 87 anos de chuva na região do Minho. Salientando que se utilizou apenas 1 % de óleo, enquanto Minke utilizou 6 %.

10.7. Comparação de composições

No sentido de estabelecer uma comparação entre todas as composições realizadas optou-se por se fazer uma análise geral de todos os resultados obtidos.

Assim, compararam-se as composições em relação ao seu comportamento relativamente à absorção de água por capilaridade (aos 180 dias) e por imersão (aos 56 dias), (exceto a composição CV_O.V.U_NaOH em que não foi possível obter resultados nestas idades, utilizando-se os valores dos resultados aos 28 e 14 dias respetivamente). Para tal, consideraram-se o coeficiente de absorção capilar (Co. Ab.) e os valores de absorção absoluta, isto é, o valor máximo de absorção obtido por capilaridade e por imersão (máximo Cap. e máximo Im.).

Estes valores encontram-se expostos na Tabela Tabela 47 e simultaneamente na Figura 108 para que se possam comparar com maior facilidade os valores obtidos nas diferentes composições.

Tabela 47 – Valores de absorção por capilaridade Kg/m2 (180 dias)

Composição	Massa volúmica kg/m3	Coeficiente absorção capilar kg/(m^2.√h)	Absorção por imersão (máximo - %)	Absorção absoluta (máximo - kg/m^2)
REF-2	1942	1,06	-	12,17
CH	1975	0,86	12	9,05
Ci	2016	0,58	11	8,21
CV4%	1974	1,06	12	8,63
CV_NaOH	1975	1,18	11	8,13
CV_O.V.U.	1991	0,17	11	2,90
CV_O.V.U_NaOH*	1940	0,02	9	4,60

Nota - a composição com (*) corresponde ao ensaio realizado aos 28 dias (capilaridade) e 14 dias (imersão)

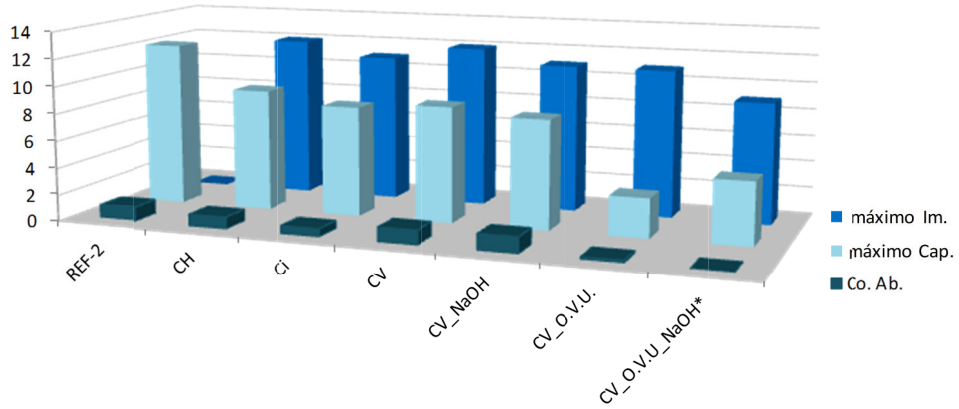


Figura 108 – Valores de absorção por capilaridade Kg/m^2 (180 dias)

Observa-se que as composições com menor coeficiente de absorção (valores de absorção inicial) e menor absorção máxima são as que incorporam óleo vegetal usado sem ou com hidróxido de sódio, CV_O.V.U e CV_O.V.U_NaOH. As restantes composições apresentam valores relativamente semelhantes.

Para complemento e melhor compreensão desta análise apresenta-se a Tabela 48, com a seguinte classificação em relação ao comportamento obtido em cada composição em comparação com o solo estabilizado com cal viva, CV:

(--) – Mau – obtenção de valores piores do que CV;

(-) – Insatisfatório – obtenção de valores ligeiramente piores do que CV;

(+-) – Sem influência - obtenção de valores iguais aos de CV;

(+) – Satisfatório – obtenção de valores ligeiramente melhores do que CV;

(++) – Bom – obtenção de valores melhores do que CV; e

(+++) – Excelente – obtenção de valores muito melhores do que CV.

Tabela 48 – Solo preparado em laboratório estabilizado cal viva e óleo vegetal usado e/ou hidróxido de sódio

Composições / **Testes**	CV_NaOH	CV_O.V.U	CV_O.V.U_NaOH	CH	Ci
Resistência à compressão (Estado seco)	++	-	--	+-	+-
Resistência à compressão (Estado saturado)	++	-	x	+-	+-
Absorção de água por capilaridade	+-	++	++	+-	+-
Absorção de água por imersão	+	+	++	+-	+-
Durabilidade Secagem/molhagem	x	+-	x	-	--
Erosão acelerada por jato de água	x	+	x	-	+-

Analisando os resultados obtidos verifica-se que em termos de resistência face à ação da água, seja por absorção de água por capilaridade, seja por erosão

acelerada por jato de água, parece existir maior vantagem na utilização das composições com óleo vegetal usado, sem e com hidróxido de sódio, CV_OVU e CV_OVU_NaOH. Todavia, não foi realizado o teste de erosão acelerada em CV_OVU_NaOH e o seu comportamento de resistência à compressão é pior face à composição CV.

Deste modo, utilizam-se as mesmas composições na etapa seguinte do estudo, utilizando solo real em vez de solo preparado em laboratório.

11. Efeito das composições selecionadas em solo real - Apresentação e análise de resultados

11.1. Introdução

Uma vez que o solo preparado em laboratório não é idêntico ao solo real, que contem areia, argila e silte, avaliou-se o desempenho do biopolímero e aditivo mineral selecionado em solo real estabilizado com cal viva. Isto, porque a composição química do solo real contem outros minerais que não apenas o quartzo da areia e caulinite como o solo de laboratório, mas contem também montemorilonite e ilite. Este é um fator, entre outros, como por exemplo o pH do solo ou a matéria orgânica, que pode alterar o desempenho das composições em estudo.

Assim, realizaram-se provetes de teste, com 50 mm de diâmetro e 55 mm de altura, prensados em prensa hidráulica mecânica. Aplicando, uma carga de 2 MPa, equivalente à utilização de uma prensa manual de BTC, em vez dos 24 MPa utilizados no fabrico dos provetes anteriores. Assim, é possível avaliar o desempenho das composições, simulando uma situação real de construção com BTC (técnica manual, a mais comum) ou com taipa em que se utiliza uma compactação semelhante, ainda que seja mecânica e não estática.

Todavia, a comparação dos resultados obtidos com os resultados alcançados em solo preparado em laboratório não poderá ser ao nível quantitativo, mas apenas qualitativo, comparando a variação de resultados entre composições. Isto, porque os provetes foram preparados com diferentes condições de prensagem e dimensão.

Testaram-se as seguintes composições, presentes na Tabela 37, capítulo 6: solo não estabilizado, REF; solo estabilizado com cimento ou com cal hidratada (para comparação de resultados), Ci e CH; solo estabilizado com cal viva, CV; solo com cal viva e óleo usado, CV_O.V.U; solo com cal viva e hidróxido de sódio, CV_NaOH; e solo com cal viva, óleo e hidróxido de sódio, CV_O.V.U_NaOH.

11.2. Ensaios de resistência à compressão

Apresentam-se, de seguida, os resultados de resistência à compressão simples de provetes, aos 56 dias, no estado seco e no estado saturado (após imersão de provetes em água), conforme a metodologia descrita no capítulo 6. O

ensaio, no estado seco, foi realizado com três provetes, enquanto o ensaio no estado saturado foi realizado com dois provetes de teste. O coeficiente de variação, em percentagem, apresenta-se junto do valor da resistência.

Observam-se na Figura 109 os resultados obtidos com as referidas composições.

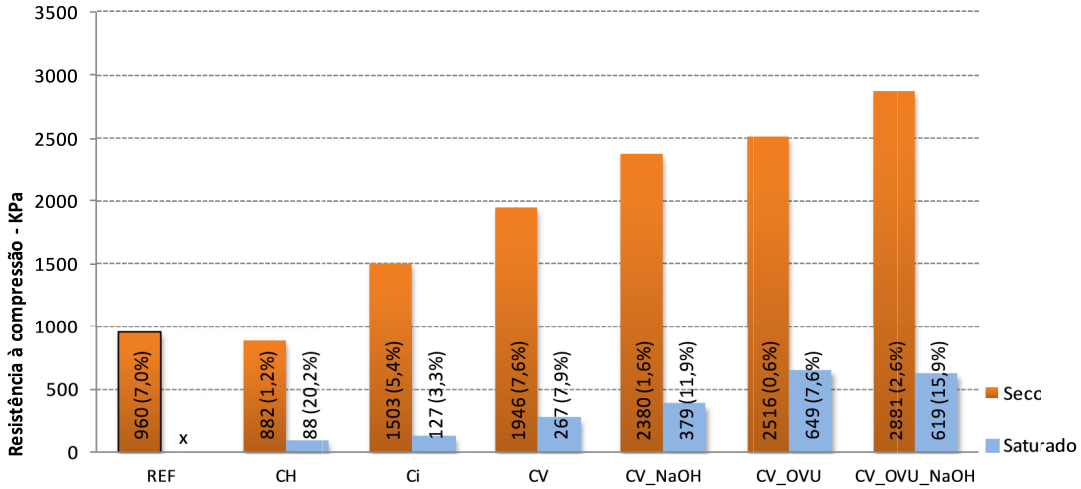


Figura 109 – Resistência à compressão de solo real, sem e com estabilizantes (aos 56 dias) – estado seco e saturado

Verifica-se, assim, que com o solo real obtém-se maior resistência à compressão utilizando a cal viva como estabilizante, CV, superando a resistência obtida com cimento. Na estabilização com cal hidratada, CH, verifica-se uma ligeira redução da resistência obtida face ao solo de referência, REF.

Analisando os resultados das restantes composições face à composição CV, parece existir vantagem na incorporação de óleo e de hidróxido de sódio, em separado ou em simultâneo, CV_ NaOH, CV_O.V.U e CV_O.V.U_NaOH, uma vez que todas estas composições apresentam maiores resistências.

Em relação às resistências em provetes no estado saturado verifica-se, no geral, que existe uma correspondência com as resistências no estado seco. Todavia, não parece existir vantagem, no estado saturado, na adição simultânea de óleo e hidróxido, considerando que a composição CV_O.V.U, apenas com adição de óleo, obteve resultados ligeiramente superiores aos da composição CV_O.V.U_NaOH.

11.2.1. Comparação com os resultados de solo preparado em laboratório

Em relação ao solo com diferentes estabilizantes verificam-se comportamentos mecânicos diferentes, uma vez que no solo de laboratório existem maiores aumentos de resistência, com a utilização de estabilizantes, em relação ao solo de referência, do que no solo real.

Verifica-se, no solo de laboratório, que a composição com resistências mais elevadas à compressão é a que inclui cimento, seguindo-se as composições com cal hidratada e por último com cal viva. Tendo-se verificado aumentos de resistência, face ao solo de referência, em aproximadamente 310 % com cimento, 241 % com cal hidratada e 140 % com cal viva. Já no solo real, a composição com cal viva apresenta melhor resistência à compressão face ao solo de referência (mais 102 %), seguindo-se o solo com cimento (mais 57%) e por último, com uma ligeira de redução de resistência o solo com cal hidratada (menos 8 %).

Em relação ao solo com hidróxido de sódio, esta composição obteve melhores resistências à compressão do que o solo apenas com cal em ambos os solos, real e de laboratório, com aumentos de resistência de 22 e 56 %, respetivamente.

Relativamente às composições de solo estabilizado com cal e adição de óleo vegetal usado, com ou sem hidróxido de sódio, verifica-se que no solo de laboratório houve, inclusive, uma diminuição da resistência à compressão em relação ao solo apenas com cal, verificando-se uma redução de 27 % com cal viva com óleo e uma redução de 39 % com cal viva com óleo e hidróxido de sódio. Por sua vez, no solo real obtiveram maiores resistências à compressão, face ao solo apenas com cal, do que no solo de laboratório. Obtendo-se aumentos de resistência, face ao solo com cal viva, de 29 % com cal viva com óleo e 48 % com cal viva com óleo e hidróxido de sódio.

11.2.2. Comparação com valores de referência e resultados de outros autores

Comparativamente aos valores de referência da revisão bibliográfica, observa-se o valor obtido no solo de referência, não estabilizado, aproximadamente 1

MPa encontra-se ligeiramente abaixo do mínimo, de 1MPa, referido pela norma australiana HB 195-2002 (Walker & Standards Australia, 2002) e mais baixo ainda em relação ao mínimo, de 2MPa, referido pelo *New Mexico Code* (Tibbets, 2001, in Maniatidis & Walker, 2003). Um valor similar também se obteve com cal hidratada.

Tanto no solo com cal hidratada, como com cimento ou com cal viva, considerando que é um solo estabilizado as resistências deveriam estar entre os 2 e os 4 MPa para construção em BTC e entre os 3 e os 5 MPa para construção em taipa, segundo a norma alemã *Lehmbau Regeln* (Dachverband Lehm e.V., 2008). No entanto, apenas o solo com cal viva atinge uma resistência próxima dos 2 MPa.

As restantes composições, com resistências entre os 2,3 e os 2,8 MPa, também apenas se encontra entre os valores definidos para construção em BTC pela a norma alemã *Lehmbau Regeln* (Dachverband Lehm e.V., 2008).

Verifica-se, ainda, que a reatividade da cal é ligeiramente menor no solo real, em relação à reatividade observada no solo preparado em laboratório. No solo real, o aumento de resistência, face ao solo de referência, foi de aproximadamente 1 MPa, enquanto no solo de laboratório, o aumento de resistência foi maior que 1,05 MPa. Todavia, é analogamente uma boa reatividade segundo os valores referidos por Thompson, 1964, adaptado por Houben & Guillaud, 2008, ver Tabela 25, capítulo 6.

Comparativamente a estudos de outros autores, observa-se que os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza do estudo de Kamang (1998) sobre Solo laterítico com excrementos de minhocas. Isto, porque o solo não estabilizado também teve uma resistência próxima de 1 MPa e solo com adição de biopolímero (excrementos de minhocas a 8%) teve uma resistência de 2,3 MPa, próxima dos 2,5 MPa obtidos com cal viva (4%) e óleo usado (1%). Na resistência à compressão no estado saturado, Kamang verificou uma redução de 75%, relativamente ao estado seco, no solo com excrementos. Neste estudo, verificou-se uma redução muito semelhante no solo com cal viva e óleo usado, uma redução 74 %.

11.3. Ensaios de absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção foram realizados segundo a metodologia descrita no capítulo 6, em provetes iguais, 50 mm de diâmetro e 55 mm de altura. As composições foram testadas aos 56 dias, tal como nos ensaios de resistência à compressão, no sentido de se obter resultados com a maior idade possível.

De forma a promover uma melhor compreensão dos resultados, estes são apresentados utilizando gráficos que mostram a relação entre a quantidade de água absorvida, em kg/m^2, e o tempo de absorção, em √t(min). Mas, também, apresentando gráficos comparativos com os valores máximos de absorção (absorção absoluta) e valores do coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade das composições em análise, em kg/(m^2.√h).

Observando os provetes durante o ensaio de absorção de água por capilaridade, Figura 110 (a) com 1hora e (b) com 24 horas absorção, observa-se que os provetes com cal viva se distinguem dos restantes pela menor altura de absorção capilar (pela coloração mais clara), sobretudo os provetes com cal viva e óleo.



Figura 110 – provetes durante o ensaio de absorção de água por capilaridade: a – 1h e b – 24h

Na Figura 111 observam-se a absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, durante 7 dias de teste.

Os resultados obtidos mostram que, entre os estabilizantes testados no solo real, o solo com cal viva, CV, apresenta a menor absorção de água, seguindo-se o solo com cimento, Ci, e por último a cal hidratada, CH. O solo de referência, REF, é o que apresenta a maior absorção de água.

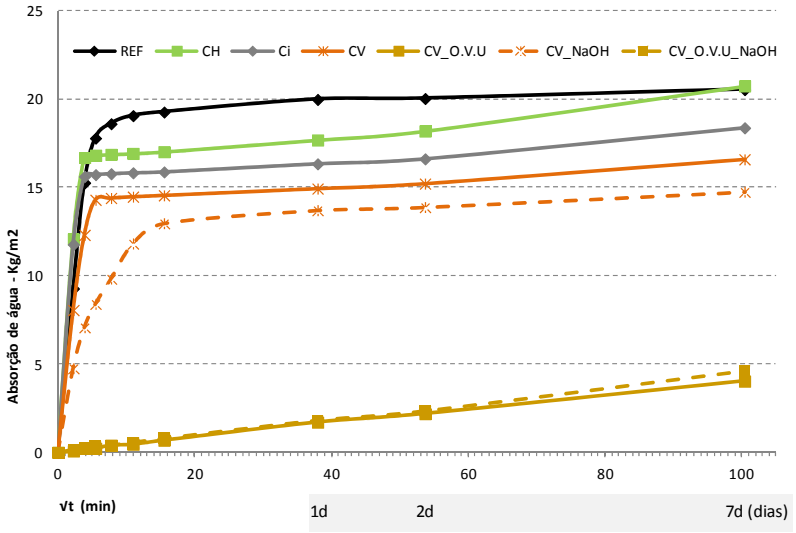


Figura 111 – Absorção de água por capilaridade de solo real de solo real, sem e com estabilizantes (aos 56 dias)

Relativamente às composições de solo estabilizado com cal viva com incorporação de aditivos verifica-se que a adição de hidróxido de sódio, CV_NaOH, reduz ligeiramente a absorção de água em relação a CV. Já, as composições com óleo vegetal usado e hidróxido de sódio, CV_O.V.U e CV_O.V.U_NaOH, apresentam uma redução da absorção de água bastante significativa.

Encontram-se na Tabela 49 os valores obtidos de massa volúmica (provetes secos), a absorção absoluta, em kg/m^2, e o coeficiente de absorção capilar das composições testadas, em kg/(m^2.√h), também presente na Figura 112.

Para os valores de absorção em análise obteve-se um desvio padrão médio de 6,4, com o valor mínimo de 1,5 e o valor máximo 9,9.

Tabela 49 – Valores de absorção por capilaridade kg/m2 (56 dias)

Composição	Massa volúmica kg/m^3	Coeficiente absorção capilar kg/(m^2.√h)	Absorção absoluta (máximo- Kg/m^2)
REF	1816	3,95	20,54
CH	1822	5,4	20,74
Ci	1830	5,26	18,37
CV	1795	3,2	16,59
CV_NaOH	1781	1,85	14,75
CV_O.V.U	1768	0,05	4,03
CV_O.V.U_NaOH	1768	0,07	4,61

Os resultados obtidos mostram que parece existir vantagem com a utilização da cal viva como estabilizante, face aos restantes estabilizantes e uma significativa vantagem com a adição complementar de óleo vegetal usado.

No entanto, os valores das composições CV_O.V.U e CV_O.V.U_NaOH são semelhantes, pelo que não parece existir vantagem na utilização dos aditivos em simultâneo.

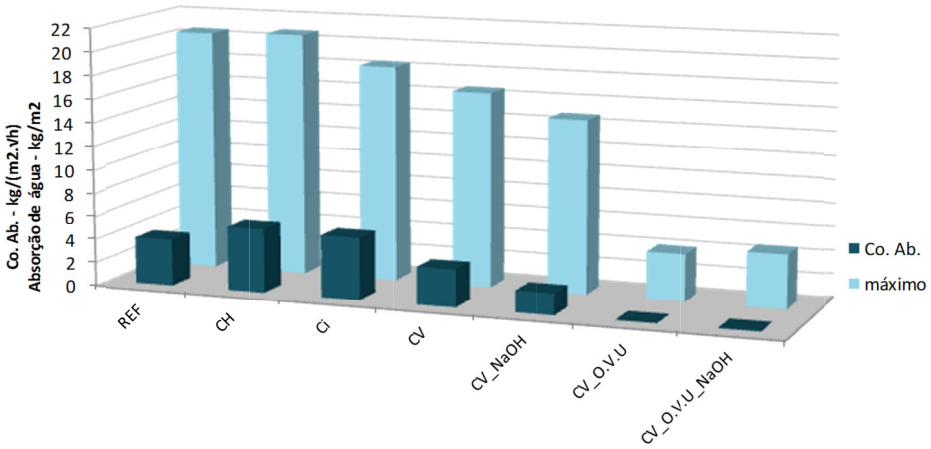


Figura 112 – Coeficiente de absorção capilar e absorção máxima de solo real, sem e com estabilizantes (aos 56 dias)

11.3.1. Comparação com os resultados de solo preparado em laboratório

Em relação ao efeito dos diferentes estabilizantes, observou-se no solo real uma menor redução da absorção de água absoluta, face ao solo de referência, relativamente aos valores obtido no solo de laboratório. Verificando-se uma redução da absorção de 19 % com cal viva, 12 % com cimento e uma absorção idêntica com cal hidratada. No solo de laboratório, registou-se uma redução da absorção absoluta com cal viva de 29 %, 33 % com cimento, e 26 % com cal hidratada. Comparativamente, em termos qualitativos (uma vez que não é possível comparar diretamente as percentagens obtidas, porque os provetes foram produzidos em condições diferentes de prensagem), a cal viva teve um maior efeito hidrófugo, em comparação com os restantes estabilizantes, no solo real.

Relativamente ao efeito do óleo vegetal usado e do hidróxido de sódio, estes obtêm resultados semelhantes em ambos os solos, verificando-se uma redução da absorção maior nas composições com óleo, com ou sem hidróxido de sódio.

No solo real verifica-se uma redução da absorção, face ao solo estabilizado com cal viva, de 11 % com adição de hidróxido de sódio, de 76 % com adição de óleo e de 72 % com a adição simultânea dos dois aditivos.

No solo preparado em laboratório verifica-se uma redução da absorção, face ao solo estabilizado com cal viva, de 6 % com adição de hidróxido de sódio, de 66 % com adição de óleo e de 47 % com a adição simultânea dos dois aditivos.

Assim, verifica-se que no solo real os valores obtidos com óleo, com ou sem hidróxido adicionado, são semelhantes.

11.3.2. Comparação com valores de referência e resultados de outros autores

Na Figura 113 podem-se comparar os resultados obtidos com o coeficiente capilar de outros materiais de construção (Rohlen & Ziegert, 2011, e Minke, 2006).

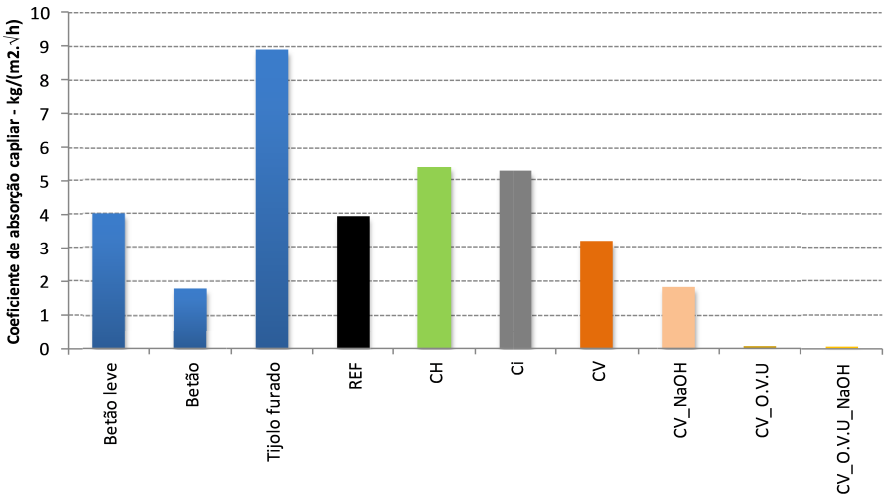


Figura 113 – Coeficiente de absorção capilar – comparação com outros materiais dos resultados obtidos em solo real

Observa-se que, em termos gerais, o solo não estabilizado, ou estabilizado apenas com cal hidratada, cimento, ou cal viva, apresenta uma ordem de grandeza de coeficiente de absorção capilar semelhante à do betão leve. Enquanto o solo com cal viva e hidróxido de sódio apresenta um coeficiente próximo do betão convencional e as composições com adição de óleo apresentam um coeficiente mais baixo do que qualquer material aqui em comparação.

É referido para os materiais de construção à base de terra o coeficiente de absorção capilar típico de 6 a 13,4 Kg/(m^2.√h), podendo ocorrer um mínimo de 1,2 (Rohlen & Ziegert, 2011). No entanto, os resultados obtidos em solo real indicam valores abaixo do valor típico, menor que 6, e os coeficientes de

capilaridade obtidos em solo com adição de óleo encontram-se substancialmente abaixo do mínimo de 1,2 referido (com 0,04 e 0,05).

11.4. Ensaios de absorção de gota de água

No sentido de avaliar a repelência à água das composições com adição de óleo realizou-se um teste de absorção de gota de água. Este teste foi realizado segundo a metodologia descrita no capítulo 6, à semelhança do teste para avaliação da repelência de água em solos, o "*water drop penetration time test, WDPT test*". O tempo de absorção de água obtido pode ser avaliado segundo as classes de repelência de água determinadas por Dekker e Ritsema, presentes na Tabela 50 (Dekker & Ritsema, 1994, in Orfánus et al, 2008).

Tabela 50 – Classificação de repelência à água

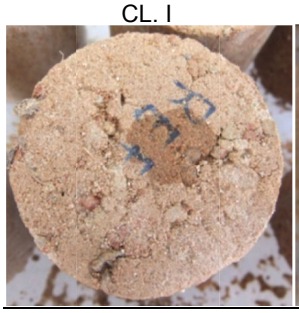
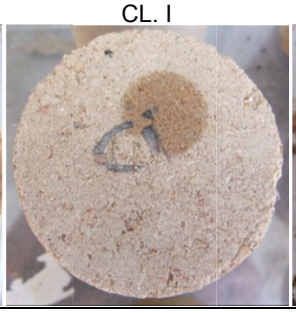
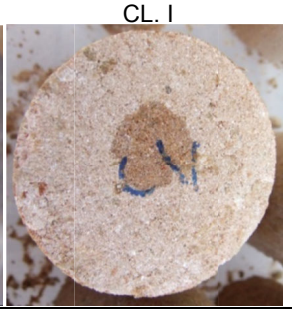
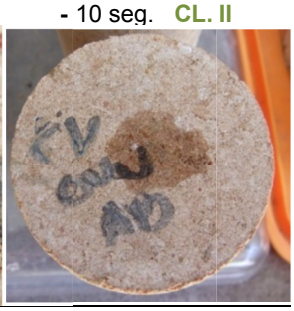
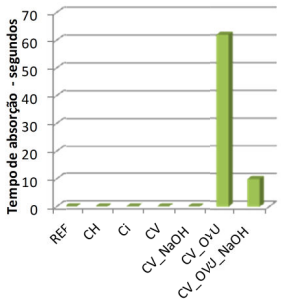
Tempo de absorção	Classificação		Abreviatura
Menos de 5 seg.	Classe I	Não repelente	CL. I
Entre 6 e 60 seg.	Classe II	Ligeiramente repelente	CL. II
Entre 61 e 600seg.	Classe III	Fortemente repelente	CL. III
Entre 600 e 3600seg.	Classe IV	Severamente repelente	CL. IV
Entre 1 a 2 horas	Classe V	Extremamente repelente	CL. V
Entre 2 a 3 horas	Classe VI		CL. VI
Entre 3 a 4 horas	Classe VII		CL. VII
Mais de 4 horas	Classe VIII		CL. VIII

Na Tabela 51 apresentam-se os resultados obtidos, com o respetivo valor do tempo de absorção da gota, a respetiva classe de repelência obtida e um gráfico para melhor compreensão dos resultados.

Os resultados apresentados mostram que as composições testadas em solo real têm as seguintes classe de repelência à água:

- A composição de solo estabilizado com cal viva e óleo, CV_O.V.U, é considerada fortemente repelente, pertencente à classe CL. III;
- A composição de solo estabilizado com cal viva, óleo e hidróxido de sódio, CV_O.V.U_NaOH, é considerada ligeiramente repelente, pertencente à classe II; e
- As restantes composições, REF, CH, Ci, CV e CV_NaOH, são consideradas não repelentes, pertencentes à classe I.

Tabela 51 – Tempo de absorção de gota de água (em segundos)

REF - 0 seg. CL. I	**CH -** 0 seg. CL. I	**Ci -** 0 seg. CL. I	**CV -** 0 seg. CL. I
			
CV_NaOH - 0 seg. CL. I	**CV_OVU –** 62 seg. **CL. III**	**CV_OVU_NaOH -** 10 seg. **CL. II**	
			

Deste modo, a composição com óleo usado, CV_O.V.U, destaca-se entre as restantes composições, com uma repelência à água claramente superior. Salientando-se, mais uma vez, que não existirá vantagem na utilização simultânea de óleo com hidróxido de sódio, uma vez que, neste caso, a repelência à água é bastante inferior.

11.5. Ensaios de erosão acelerada por jato de água

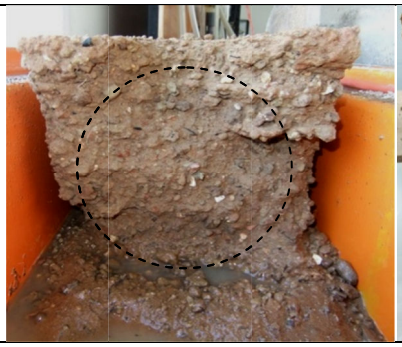
Tal como no solo preparado em laboratório, realizaram-se ensaios para avaliar a durabilidade das composições estudadas face à intempérie, através da simulação de chuva por meio de erosão acelerada por jato de água.

Estes ensaios foram realizados segundo a metodologia descrita no capítulo 6, em provetes de 200x100x200 mm^3 (previamente secos).

Depois da incidência do jato de água, durante 90 minutos ou até à erosão máxima do provete, mediu-se a profundidade das cavidades escavadas pela ação da água, em vários pontos na área de incidência do jato de água, considerando a média dos valores registados para avaliação e comparação de resultados.

Nas tabelas seguintes, 52 a 54 observam-se, mediante registo fotográfico, os provetes antes, durante e após o ensaio por jato de água, com destaque da zona abrangida pelo jato de água.

Tabela 52 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo sem estabilizante – análise visual)

Solo de referência, REF – tempo total 2 minutos		
		
Antes do ensaio	Após 2 minutos	Após o ensaio

Tal como se observa na Tabela 52, o solo de referência, sem estabilizante, sofreu uma elevada erosão. Em poucos minutos o provete de teste alcançou a erosão limite considerada para este ensaio, sofrendo uma erosão superior a 1 mm/minuto.

Tabela 53 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo com estabilizantes – análise visual)

Antes do ensaio	**Após 15 minutos**	**Após o ensaio**
Solo com cimento, Ci - tempo total 15 minutos		
		
Solo com cal hidratada, CH - tempo total 90 minutos		
		

Tabela 53 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo com estabilizantes – análise visual) - continuação

Antes do ensaio	Após 15 minutos	Após o ensaio
Solo com cal viva, CV - tempo total 90minutos		
		

Conforme a Tabela 53, a erosão em solo estabilizado com os diferentes estabilizantes, cimento, cal hidratada e cal viva, mostra diferentes resultados:

- O solo estabilizado com cimento, Ci, sofreu a maior erosão, verificando-se que no final dos primeiros 15 minutos já tinha atingido a erosão limite considerada (1 mm/minuto), conforme documenta a na Tabela 55;
- As composições com cal viva, CV, ou cal hidratada, CH, apresentam um desgaste bastante menor que o solo com cimento, Ci. Observa-se que é um desgaste mais pontual e não tão generalizado como no solo com cimento; e
- A composição que mostrou menor desgaste foi a de solo estabilizado com cal viva, CV.

Conforme a Tabela 54, relativa às composições de solo estabilizado com cal viva e adição de óleo vegetal usado ou hidróxido de sódio, observa-se que existe um maior desgaste na composição apenas com óleo, CV_O.V.U. Verificando-se, ainda, que as composições com hidróxido de sódio apresentam menor erosão que as anteriores, CV_NaOH e CV_OVU_NaOH.

Salientando-se no entanto que, nestas composições, antes do ensaio já existia alguma erosão superficial provocada ao remover o provete do molde durante o processo de fabrico do mesmo, sobretudo na composição CV_O.V.U. Esta particularidade poderá ter propiciado um ligeiro aumento da erosão, ainda que a erosão em mm/min seja semelhante para estas composições, conforme documenta a Tabela 55.

Tabela 54 – Ensaio de erosão acelerada por jato de água (solo com estabilizantes e aditivos – análise visual)

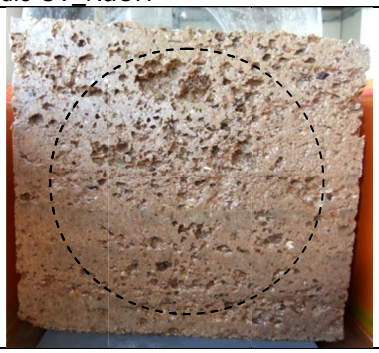
Antes do ensaio	Após 15 minutos	Após o ensaio – 90 minutos
Solo com cal viva e óleo usado, CV_OVU		
		
Solo com cal viva e hidróxido de sódio CV_NaOH		
		
Solo com cal viva, hidróxido de sódio e óleo usado, CV_OVU_NaOH		
		

Tabela 55 – Erosão acelerada por jato de água – resultados em mm

Composição	Dimensões (cm)	Massa volúmica (a seco) kg/m^3	Tempo - minutos (Erosão média - mm)					Erosão máxima	Erosão por minuto
			2	15	30	60	90	mm	mm/min
REF	20x20x18	1842	64,3	-	-	-	-	64,3	32,14
CH	20x20x19	1782	-	9,0	14,1	16,4	18,3	25,53	**0,27**
Ci	20x20x18,5	1757	-	20,1	-	-	-	70	1,34
CV	20x20x19	1782	-	3,6	3,8	5,1	5,7	5,7	**0,08**
CV_O.V.U	20x20x20	1718	-	6,3	9,2	11,2	11,2	11,2	**0,19**
CV_NaOH	20x20x18	1837	-	4,7	5,6	6,7	7,4	7,4	**0,11**
CV_OVU_NaOH	20x20x18	1837	-	3,9	4,7	5,5	6,6	6,6	**0,09**

Na Figura 114 observa-se a erosão ao longo do tempo de ensaio, das composições testadas, durante os 90 minutos definidos para o ensaio, ou até atingir uma erosão superior a 1 mm/min.

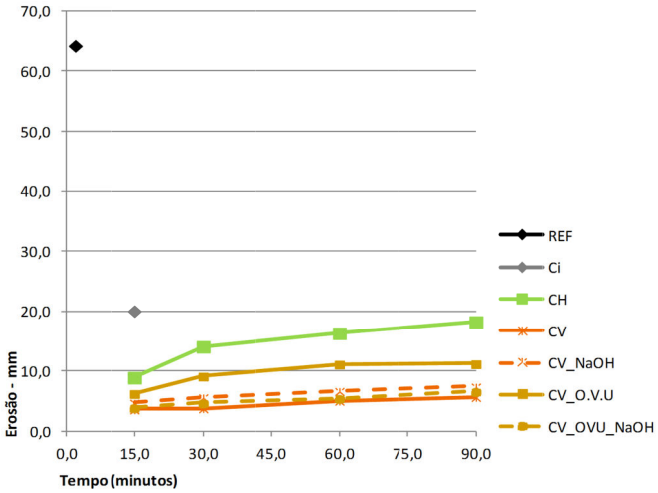


Figura 114 – Solo real estabilizado com diferentes composições (56 dias) – erosão acelerada por jato de água durante 90 minutos

Observando a Tabela 55 e a Figura 114 verifica-se que apenas as composições do solo de referência, REF, e solo com cimento, Ci, ultrapassam o valor limite de erosão, de 1 mm/min, tendo o ensaio terminado aos 2 e aos 15 minutos respetivamente.

Constata-se, também, que o solo com cal hidratada, CH, apresenta um desgaste intermédio entre as composições testadas e o solo com cal viva, CV, apresenta a menor erosão.

Salienta-se ainda que as composições de solo com cal viva e hidróxido de sódio ou óleo usado, CV_ NaOH, e CV_OVU_NaOH, apresentam uma erosão similar à erosão de CV. E a composição CV_OVU apresenta uma erosão ligeiramente superior a estas composições.

11.5.1. Comparação com os resultados de solo preparado em laboratório

Observaram-se algumas diferenças entre os resultados obtidos com solo preparado em laboratório e com solo real na erosão acelerada por jato de água, ainda que com a mesma ordem de grandeza dos valores de erosão.

No solo real, além do solo de referência, sem estabilizante, o solo estabilizado com cimento apresenta a pior erosão, seguindo-se o solo com cal hidratada. As

composições de solo estabilizado com cal viva, com ou sem óleo vegetal usado ou hidróxido de sódio, apresentam menor desgaste, sobretudo a composição apenas com cal viva.

No solo de laboratório, além do solo de referência, sem estabilizante, o solo estabilizado com cal hidratada apresenta uma maior erosão. Com menor erosão estão as composições de solo com cal viva, com cimento e cal viva com óleo vegetal usado, apresentando um desgaste semelhante. Todavia, a composição que apresenta menor erosão é o solo com cal viva e óleo usado.

No solo real a composição com cal viva e óleo vegetal usado não se obteve um resultado semelhante às restantes composições com cal viva, tal como no solo de laboratório, uma vez que a erosão foi ligeiramente maior. Pensa-se que isto poderá ser justificado pela erosão superficial provocada ao remover o provete do molde durante o processo de fabrico do mesmo que prejudicou o seu desempenho no ensaio.

11.5.2. Comparação com resultados de outros autores

Comparando os resultados obtidos no estudo sobre BTC com solo/cimento (5 %) e solo/cal (8 %), de Guettala et al, 2005, com um ensaio de erosão acelerada, embora com um método de ensaio um pouco diferente (jato horizontal a 17 cm de distância ao chuveiro e com pressão de 1,6 Kg/m^2, durante duas horas), observa-se que se obtiveram resultados contraditórios, uma vez que estes autores obtiveram menor erosão com solo/cimento (erosão de 1,0 mm) do que com solo/cal (erosão de 2,2 mm).

Na presente tese, os resultados obtidos, em solo real, mostraram uma maior erosão no solo com cimento do que no solo com cal, seja cal hidratada ou cal viva.

11.6. Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água é de elevada importância, porque é um dos principais fatores que permitem manter um ambiente interior salutar no interior dos edifícios, como já foi referido na presente tese. Assim, realizou-se o ensaio de permeabilidade ao vapor de água a fim de se avaliar se as composições

com óleo (com ou sem hidróxido de sódio), apesar do seu bom desempenho hidrófugo, permitem a passagem de vapor de água.

Este teste realizou-se segundo a metodologia descrita no capítulo 6, atendendo à norma de ensaio NP EN 1015-19:2000, em provetes específicos para este ensaio. O ensaio realizou-se a partir dos 28 dias de idade dos provetes, prolongando-se até aos 90 dias.

Os resultados obtidos, documentados na Figura 115, são apresentados segundo os valores do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, π - (kg/m.s.Pa)x10^{12}, e os valores inversos da espessura de ar de difusão equivalente por centímetro de solo, Sd (m) (a medida que a permeabilidade aumenta, os valores de Sd diminuem).

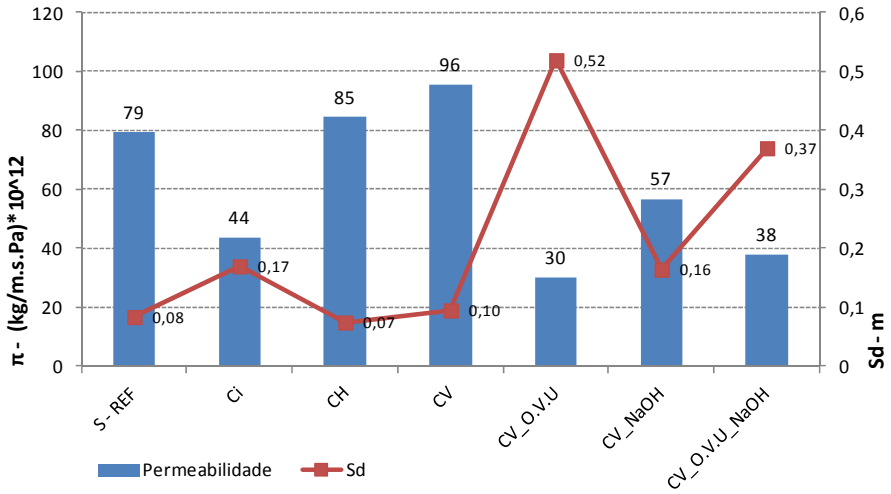


Figura 115 – Permeabilidade ao vapor de água e respetivos valores de Sd

Analisando os resultados obtidos verifica-se que existem, essencialmente, duas ordens de grandeza. Com maiores valores de permeabilidade encontram-se as composições de solo não estabilizado, REF, e solo estabilizado com cal viva, CV, ou cal hidratada, CH. Por sua vez, com menor permeabilidade, encontram-se as composições de solo estabilizado com cimento, Ci, e de solo estabilizado com cal viva com óleo ou hidróxido de sódio, CV_O.V.U, CV_NaOH e CV_ O.V.U_NaOH. Salientando-se com maior permeabilidade ao vapor de água a composição CV e com menor permeabilidade a composição CV_O.V.U.

Os valores de Sd, sendo os valores inversos, apresentam os mesmos resultados, mas inversamente, porque quanto menor é o valor maior é a permeabilidade.

11.6.1. Comparação com valores de referência e resultados de outros autores

O gráfico seguinte, Figura 116, mostra uma análise comparativa com valores médios de permeabilidade ao vapor de água de outros materiais de construção (Pinto, 2002).

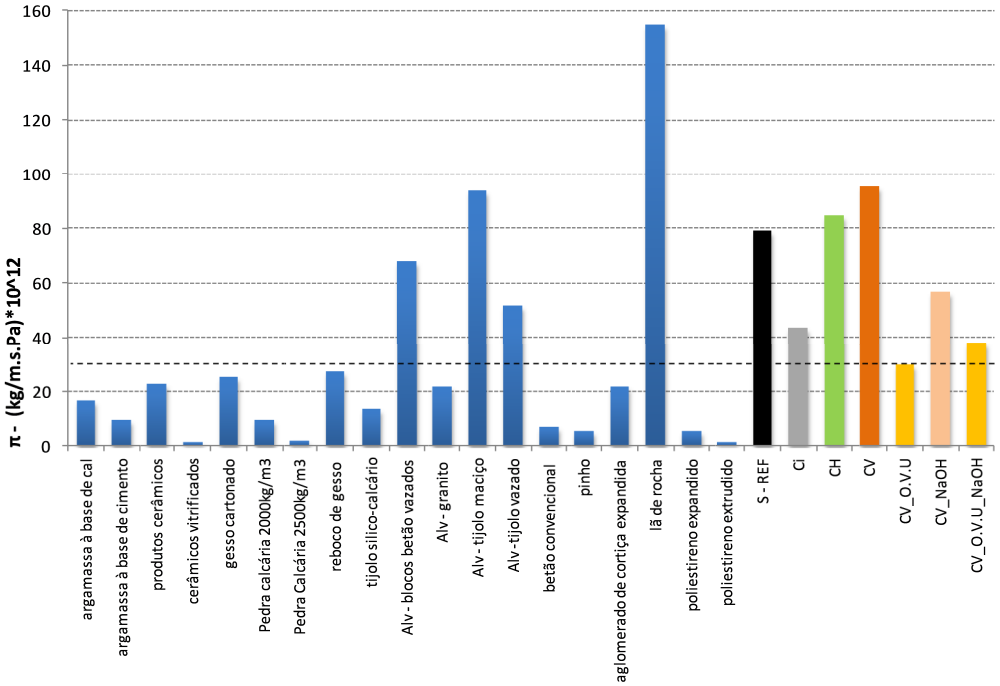


Figura 116 – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água – vários materiais de construção e composições testadas

Os valores em comparação mostram que o solo de referência e o solo estabilizado com cal viva ou cal hidratada apresentam valores com a mesma ordem de grandeza que a alvenaria de tijolo maciço.

Observando-se, também, que o solo estabilizado com cimento ou com cal viva e hidróxido de sódio apresentam valores com a mesma ordem de grandeza que a alvenaria de tijolo vazado.

Relativamente às composições com óleo, verifica-se que mesmo existindo uma redução da permeabilidade ao vapor de água, esta não terá um efeito prejudicial no controlo da humidade no interior dos edifícios. Isto, porque apresentam valores superiores a materiais que tradicionalmente costumam ser conhecidos pelo seu bom desempenho de permeabilidade ao vapor de água, como por exemplo, a argamassa à base de cal e reboco de gesso.

Comparando os resultados obtidos com óleo vegetal usado com os estudos de Čechová, sobre argamassas de cal hidratada com óleo de linhaça (Čechová, 2009), verifica-se que o óleo usado, tal como o óleo de linhaça, não afeta a permeabilidade ao vapor de água.

11.7. Comparação de composições

Para complemento e melhor compreensão desta análise, apresenta-se a Tabela 56 com a seguinte classificação em relação ao comportamento obtido em cada composição em comparação com o solo de referência, REF:

(--) – Mau – obtenção de valores piores do que REF;

(-) – Insatisfatório – obtenção de valores ligeiramente piores do que REF;

(+-) – Sem influência - obtenção de valores iguais aos de REF;

(+) – Satisfatório – obtenção de valores ligeiramente melhores do que REF;

(++) – Bom – obtenção de valores melhores do que REF; e

(+++) – Excelente – obtenção de valores muito melhores do que REF.

Tabela 56 – Resultados das composições testadas com solo real

Composições / **Testes**	Ci	CH	CV	CV_NaOH	CV_OVU	CV_OVU_NaOH
Resistência à compressão (Estado seco)	++	-	++	+++	+++	+++
Resistência à compressão (Estado saturado)	+	+	++	++	+++	+++
Absorção de água por capilaridade	++	++	++	++	+++	+++
Erosão acelerada por jato de água	+	++	+++	+++	+++	+++
Teste de absorção da gota de água	+-	+-	+-	+-	+++	++
Permeabilidade ao vapor de água	+-	+	++	+-	+-	+-

Observando os resultados gerais verifica-se que as composições com maior resistência à ação da água (capilaridade, resistência à compressão em estado saturado e erosão) são as de solo estabilizado com cal viva e óleo vegetal usado, com ou sem hidróxido de sódio, CV_O.V.U e CV_O.V.U_NaOH. Todavia, como na maioria dos testes não existe uma diferença significativa entre os resultados destas composições, não parece existir vantagem com a adição complementar de hidróxido de sódio.

12. Estudo de proliferação de fungos

12.1. Introdução

Uma vez que durante os ensaios de absorção de água por capilaridade sugiram fungos em alguns provetes, quer em solo preparado em laboratório, quer em solo real, houve a necessidade de confirmar se a adição de biopolímeros poderá ser prejudicial na construção em terra.

Deste modo, decidiu-se verificar este fato colocando os provetes em distintas situações. Para tal, observaram-se provetes (com cura húmida de duas semanas) que foram reservados em três ambientes diferentes: em ambiente interior com humidade e temperatura comuns; em ambiente com exposição ao sol; e em ambiente propício ao aparecimento de fungos (teste de proliferação de fungos normalizado, segundo adaptação da norma ASTM, D 3273 – 00).

12.2. Crescimento de fungos - fatores de influência e observação a olho nu

Para observar o aparecimento e crescimento de fungos é necessário atender aos fatores que influenciam este fenómeno. A Tabela 57 mostra de forma sintética o que os fungos necessitam para se desenvolver.

Tabela 57 – Fatores que influenciam o aparecimento e crescimento de fungos (adaptado de Sedlbauer, 2001)

Fator de influência	Parâmetro	Unidade	Variação do crescimento		Observações
			mínimo	máximo	
Temperatura	Temperatura na superfície do componente	ºC	-8	60	Depende da espécie de fungos e da fase de vida (germinação dos esporos ou crescimento do micélio)
Humidade	Humidade relativa na superfície do componente	%	70 (a)	100	
Substrato	Quantidade de nutrientes e sal	-	-	-	Também podem ser encontrados nutrientes em depósitos de pó
Ambiente	pH na superfície do componente	-	2	11	(b)
Tempo	Horas por dia	h/d	1	-	Depende da temperatura e humidade
Atmosfera	Quantidade de oxigénio	%	0,25	-	Sempre existe

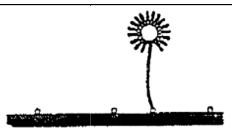
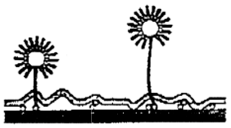
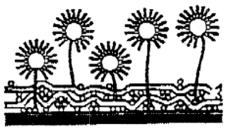
(a) Existem fungos que crescem em bolachas ainda que com humidade de 45 %.

(b) O valor do pH também depende da humidade e temperatura e é influenciado pelos fungos.

A Tabela 58 mostra como se desenvolve o crescimento dos fungos e quais são as respetivas fases ou classes de crescimento, consoante o estágio de crescimento atingido na amostra em questão.

Na generalidade, os fungos desenvolvem-se por estruturas filamentosas, cilíndricas, com 2 a 10 μm de diâmetro podendo atingir até vários centímetros de comprimento. Estes filamentos denominam-se hifas e uma rede de hifas constitui um micélio. A maioria dos fungos reproduz-se através de esporos contidos no seu corpo frutífero (Wikipedia, 2011).

Tabela 58 – Classes de intensidade de crescimento de fungos (adaptado de Sedlbauer, 2001)

Classe	Caraterísticas	Esquema
0	Crescimento não detetado	
1	Crescimento visível só em microscópio	
2	Crescimento visível a olho nu	
3	Crescimento notável	
4	Crescimento forte	
5	Crescimento total	

12.3. Aparecimento de fungos durante os ensaios de absorção por capilaridade

As Figuras 117, 118 e 119 mostram fungos visíveis a olho nu que surgiram em alguns provetes durante os ensaios de absorção de água por capilaridade. Este fato ocorreu porque a humidade dos provetes e a humidade relativa do ambiente condicionado (perto de 100%) aumentou as condições favoráveis ao crescimento de fungos.

Durante os ensaios de absorção de água por capilaridade, referentes ao capítulo 8, observou-se um provete de solo preparado em laboratório, não estabilizado, com a adição de óleo de linhaça, OL, que se encontra revestido de fungos (parecendo ser de diferentes estirpes). Verificando-se que também os provetes da composição com açúcar, Aç, apresentavam alguns fungos,

ainda que em menor quantidade, assim como apareciam focos, muito pequenos, de fungos nos provetes das restantes composições (ver Figura).

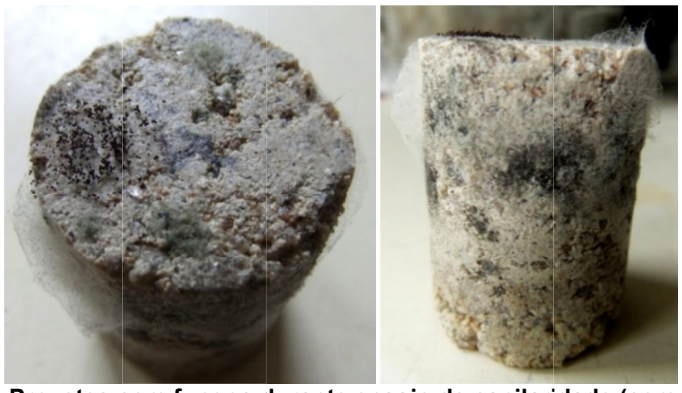


Figura 117 – Provetes com fungos durante ensaio de capilaridade (composição OL)

Nos provetes de solo preparado em laboratório, referentes aos capítulos 9 e 10, também surgiram alguns pequenos focos de fungos, ou micélios, nas composições com cal hidratada e com cal viva e óleo vegetal usado, CH e CV/OVU, como se observa na Figura .

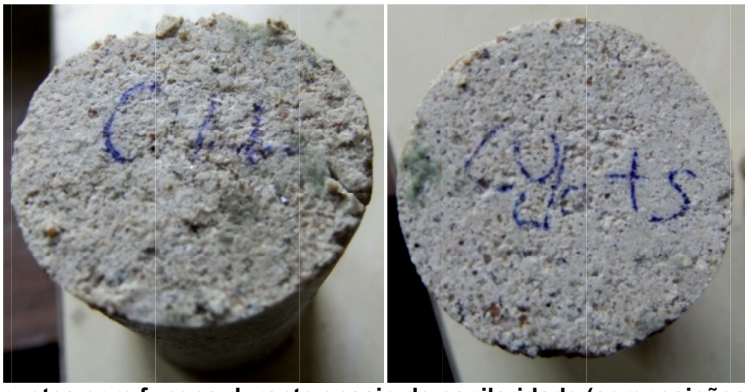


Figura 118 – Provetes com fungos durante ensaio de capilaridade (composições CH e CV/OVU)

Micélios semelhantes surgiram, também, em provetes de solo real estabilizado com cal viva e óleo vegetal usado, CV_OVU, como se observa na Figura .

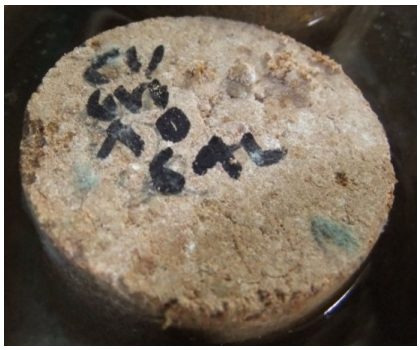


Figura 119 – Provetes com fungos durante ensaio de capilaridade em solo real (CV_O.V.U_NaOH)

12.4. Provetes em ambiente interior e provetes expostos ao sol

Os provetes que estiveram em ambiente interior foram sujeitos a uma média de 22ºC de temperatura e 50 % de humidade relativa durante um mês. Nestes provetes não se observou o aparecimento de fungos.

Os provetes expostos ao sol estiveram em ambiente exterior durante dois meses, não tendo ocorrido períodos de chuva e com a maioria de dias sob de céu limpo, com sol. Nestes provetes também não se observaram fungos conforme documenta a Figura 120.

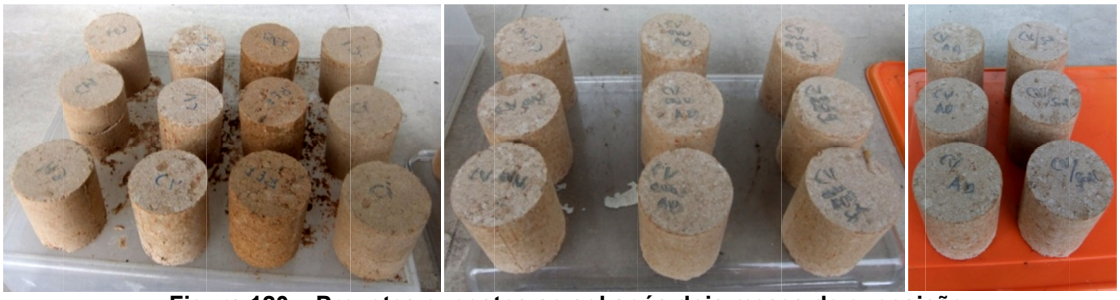


Figura 120 – Provetes expostos ao sol após dois meses de exposição

12.5. Provetes em ambiente propício ao aparecimento de fungos – Teste de proliferação de fungos normalizado

Este teste foi realizado segundo adaptação da norma ASTM, D 3273 – 00, conforme a metodologia descrita no capítulo 6, que cria um ambiente facilitador para o crescimento de fungos.

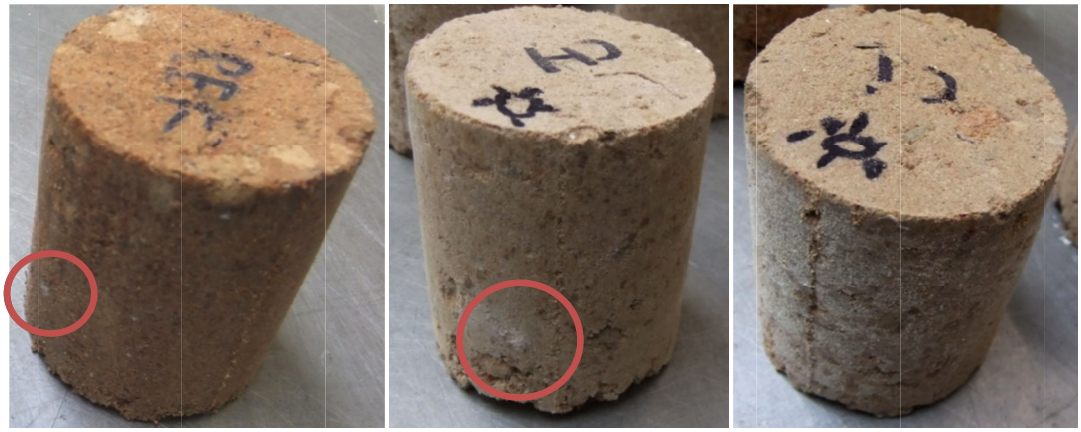
O ambiente criado durante este ensaio permitiu manter uma temperatura média de 27,2ºC e uma humidade relativa média de 98% que propiciou a proliferação dos fungos nos provetes através da inserção de micélios de fungos iniciadores, colocados em solo orgânico húmido.

Neste ambiente condicionado foram colocados provetes, durante dois meses, das diversas composições testadas que estiveram previamente em diferentes ambientes: em ambiente interior com humidade e temperatura normal e provetes expostos ao sol.

A Figura 121 mostra os provetes após os dois meses de teste na caixa de ensaio e as Figuras 122 a 124 mostram as imagens específicas de cada provete.

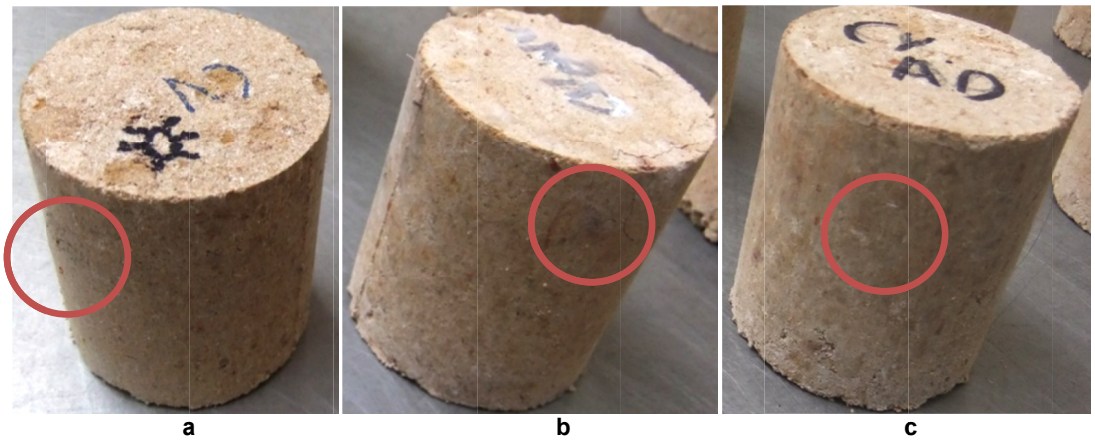


Figura 121 – Provetes após o teste de fungos



a b c

Figura 122 – Provetes após teste de proliferação de fungos: a – REF; b – CH; e c - Ci



a b c

Figura 123 – Provetes após teste de proliferação de fungos: a – CV; b – CV_O.V.U; e c – CV_NaOH



Figura 124 – Provete após teste de proliferação de fungos - CV_OVU_NaOH

Verificando-se que todos os provetes apresentaram fungos na sua superfície (ver zonas mais claras ou acinzentadas sobre os provetes). Observando-se, no entanto, uma maior quantidade de fungos nas composições com óleo vegetal usado, composições CV_OVU e CV_OVU_NaOH em que os fungos se encontravam distribuídos por quase toda a superfície do provete. Nas restantes composições, observou-se que os fungos se fixaram apenas na lateral dos provetes. Na composição com cimento, Ci, observou-se que se fixou um fungo com aspeto visual diferente dos que se fixaram nos restantes provetes (mais disperso).

Relativamente aos provetes que estiveram expostos ao sol antes do ensaio observou-se que, também, nestes se verificou o aparecimento de fungos.

12.6. Verificação da existência de fungos por microscopia eletrónica

O estudo microscópico consistiu na visualização da superfície dos provetes submetidos ao teste de proliferação em microscópico eletrónico.

Nas Figuras 125 e 126 observam-se as imagens obtidas à escala de 2000x, dos respetivos fungos sobre as composições realizadas com solo real.

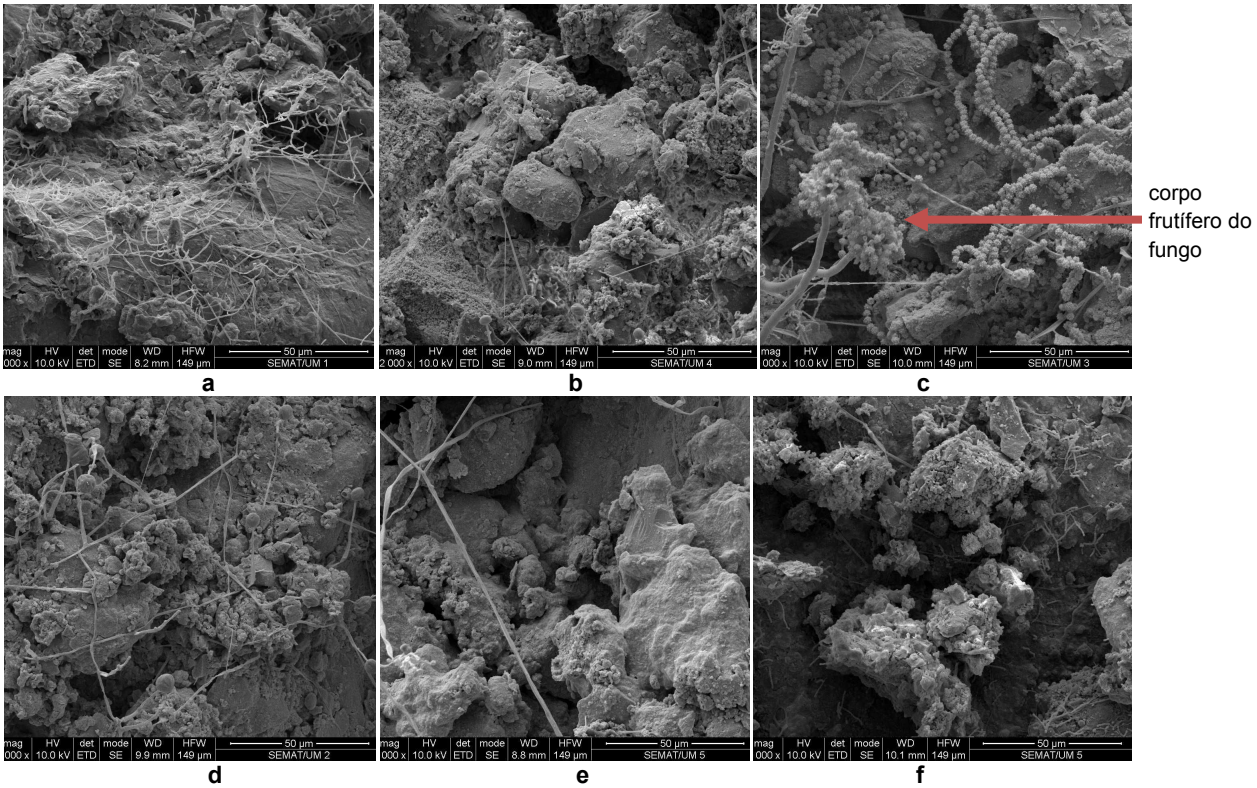


Figura 125 – Imagens de microscopia eletrónica a 2000x: a – REF; b – CH; c – Ci; d - CV; e – CV_O.V.U; e f – CV_NaOH

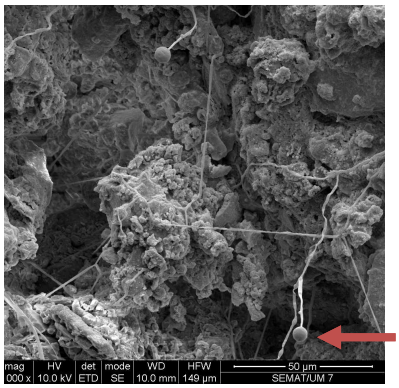
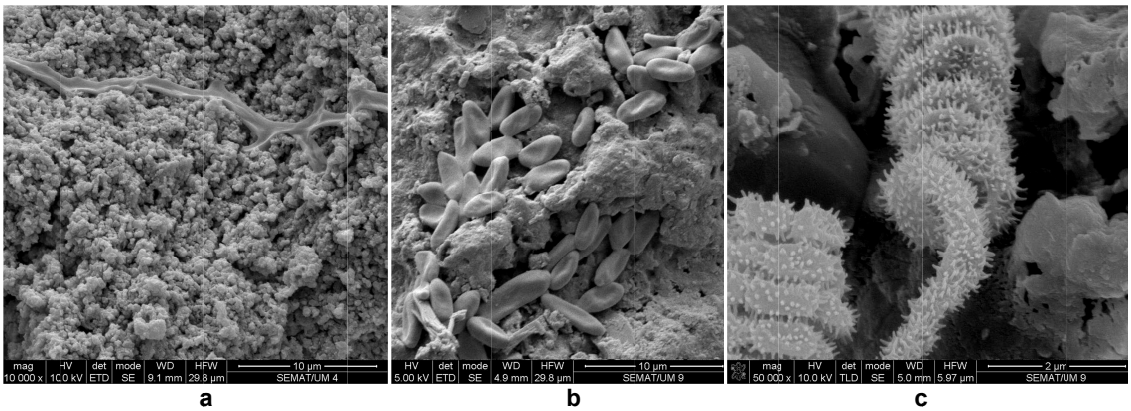


Figura 126 – Imagem de microscopia eletrónica a 2000x - CV_OVU_NaOH

As imagens obtidas confirmam a presença de fungos em todas as composições na superfície dos provetes, no entanto, sem ser possível estabelecer uma comparação quantitativa.

Todavia, ao observar-se as imagens microscópicas à escala de 150x, verifica-se que as composições que apresentam maior crescimento de fungos são as que contém óleo (ver **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e 143 no capítulo 13), sobre microscopia, das composições CV_O.V.U e CV_O.V.U_NaOH).

Com um fator de ampliação maior, a 10.000x, é possível observar o que parecem ser três estirpes diferentes de fungos que se desenvolveram nos provetes testados, ver Figura 127.



a **b** **c**

Figura 127 – Imagens de microscopia eletrónica: a - 10.000x; b – 10.000x e c - 50.000x

Para averiguar se este crescimento continua em ambiente exterior, retiraram-se os provetes da caixa de ensaio e colocaram-se em ambiente exterior durante um mês. Durante este tempo a maioria dos dias esteve com céu limpo. Verificou-se, assim, que este crescimento parou, deixando mesmo de se ver

fungos, a olho nu, na maioria dos provetes, conforme se observa na Figura 128.



Figura 128 – Provetes colocados ao sol após o ensaio de fungos

Poderá concluir-se que é necessário ter cuidado na construção em terra, relativamente aos espaços húmidos dos edifícios, sobretudo se for adicionado ao solo materiais de origem biológica, como os biopolímeros aqui testados. Isto, porque se verificou o aparecimento de fungos na maioria dos provetes com adição de óleos (durante os ensaio de absorção por capilaridade) e na generalidade dos provetes durante o teste de crescimento de fungos. Ainda que, este crescimento de fungos tenha ocorrido apenas em situações de temperatura e humidade propícias ao crescimento dos mesmos, este aspeto indica que sempre que existir um excesso de humidade à temperatura normal poderão surgir fungos.

13. Estudo de microscopia eletrónica e ótica

13.1. Introdução

No sentido de se tentar perceber a distribuição, a nível microscópio, dos materiais constituintes (areia, argila e estabilizantes) das composições testadas, realizaram-se estudos de microscopia eletrónica em amostras de solo preparado em laboratório (composições apresentadas ao capítulo 8).

Realizando-se, também, estudos de microscopia eletrónica em amostras de solo real (composições apresentadas ao capítulo 11) no intuito de confirmar que tipos de argilas estarão presentes no solo real e, de igual modo, observar a distribuição, a nível microscópio, dos materiais constituintes (areia, silte, argila e estabilizantes) das composições testadas. Completando-se ainda este estudo com uma observação a nível de microscopia ótica, uma vez que permite observar a cores a distribuição dos materiais constituintes, podendo-se verificar aspetos diferentes dos observados na microscopia eletrónica.

Os estudos de microscopia foram realizados segundo as metodologias descritas no capítulo 6, em amostras com 90 dias de cura.

As amostras para ensaio foram retiradas da parte exterior dos provetes, como assinalado na Figura 129, observando-se a superfície exterior e também o interior das composições, através de aberturas existentes na superfície.

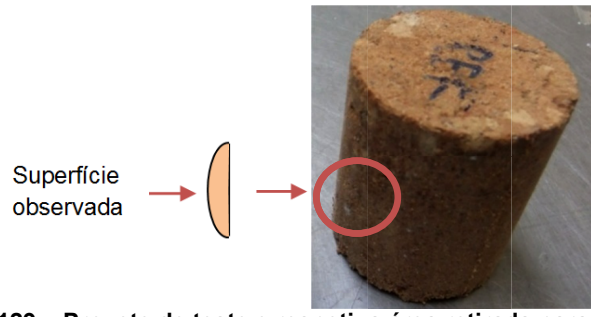


Figura 129 – Provete de teste e respetiva área retirada para análise

13.2. Estudo das composições de solo preparado em laboratório

Para este estudo utilizaram-se amostras de provetes de solo preparado em laboratório (com areia e caulino, sem e com biopolímeros ou aditivos minerais) que se mantiveram à temperatura e humidade ambiente.

Os resultados apresentam-se em várias escalas microscópicas, com ampliação a 100, 1000 e 5000 vezes. Como tal, é possível observar a distribuição espacial

das placas de argila numa escala mais próxima do seu comportamento macroscópico e numa escala com maior definição, verificando-se concretamente o que acontece a nível microscópico.

Na Figura 130 pode-se observar um grupo de placas de caulinite unidas paralelamente (*face to face*), estado normal da argila, presente no solo de referência, sem estabilizantes.

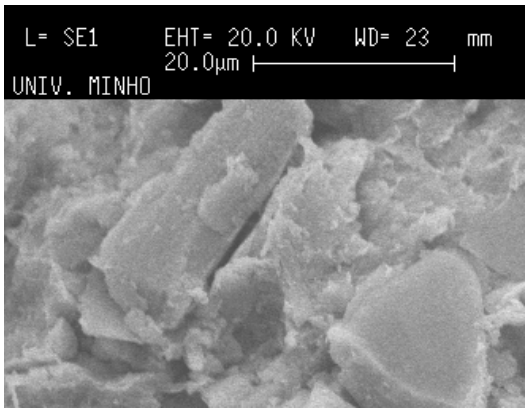
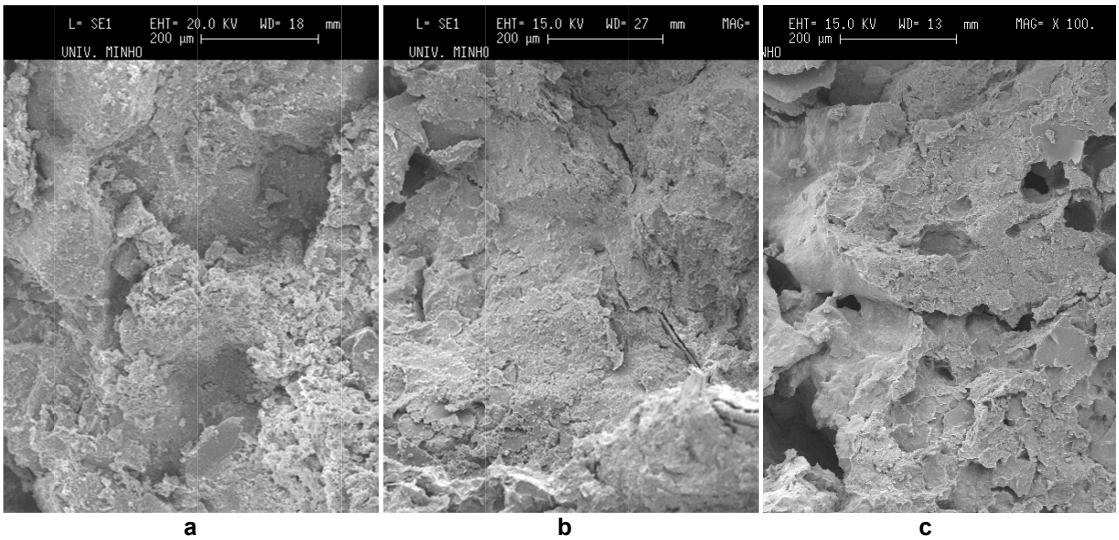


Figura 130 – Imagem de microscopia, a 1000x da composição REF

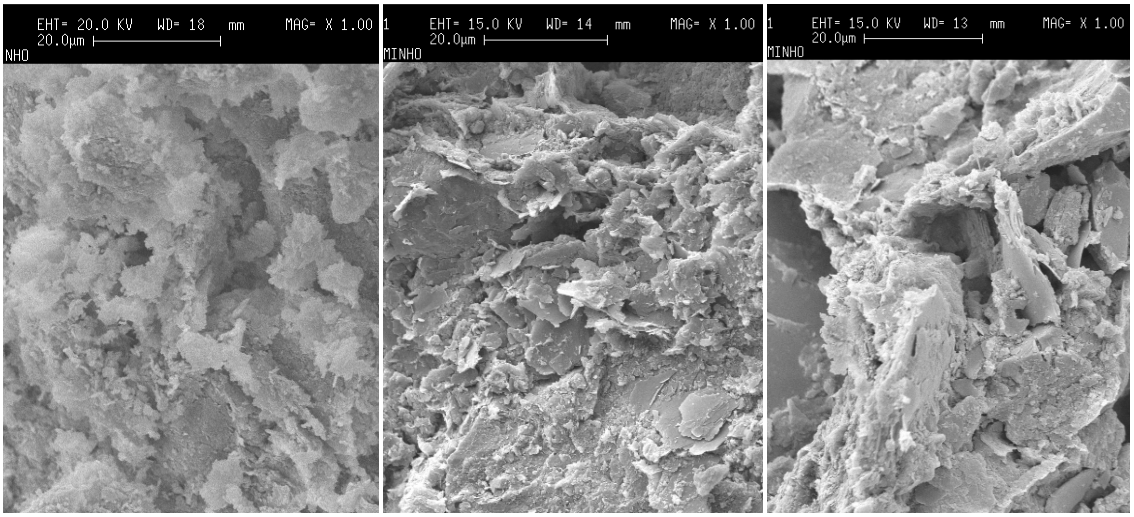
Nas figuras seguintes apresentam-se imagens microscópicas de composições que se destacaram com alguma diferença em relação à composição de referência, REF.

Na Figura 131 observam-se imagens, com ampliação a 100x, do solo de referência, solo com glicerol e solo com glicerol e hidróxido de sódio. E na Figura 132 observam-se imagens das mesmas composições a 1000x.



a **b** **c**

Figura 131 – Imagens de microscopia, a 100x, das composições: a - REF; b - GL e c - GL_NaOH



a **b** **c**

Figura 132 – Imagens de microscopia, a 1000x, das composições: a - REF; b - GL e c - GL_NaOH

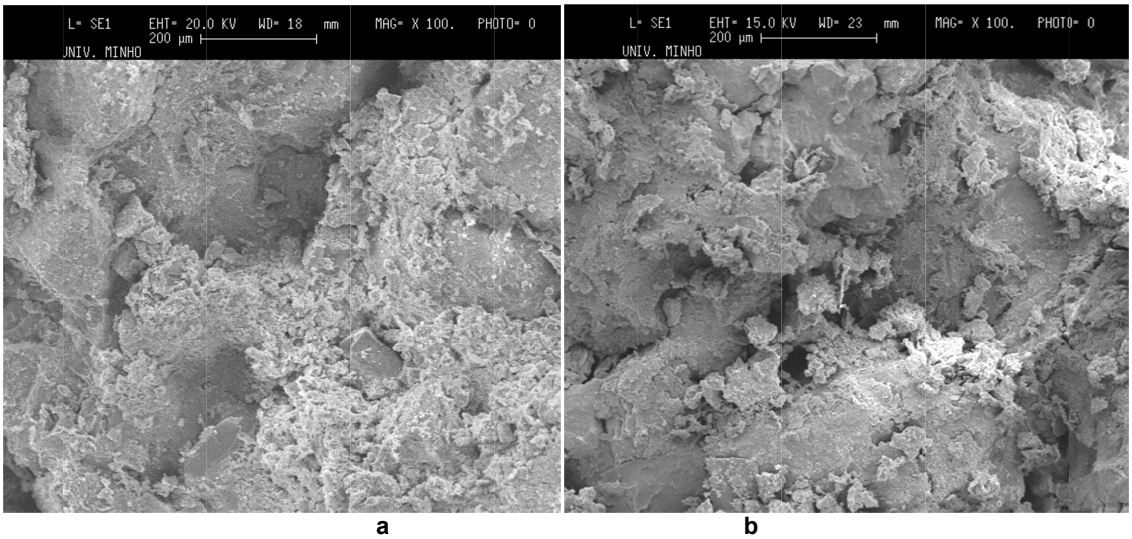
Na ampliação a 100x, no solo de referência, REF, observa-se que não existe uma dispersão da argila suficiente para preencher os espaços entre os grãos de areia, notando-se a presença de aglomerados de argila dispersos.

Já no solo com biopolímeros, sem ou com adição de hidróxido de sódio, se observa uma maior dispersão da argila que leva ao preenchimento dos espaços vazios (ver o exemplo de GL e GL_NaOH). Desta forma, com uma maior uniformidade na distribuição do material ligante, o caulino, existirá uma maior coesão na ligação das partículas de argila com os agregados do solo, a areia.

Na ampliação a 1000x observa-se, ainda nestas composições, algum efeito (*face to edge*), revelando que existiu um rearranjo na posição das partículas de argila, deixando de estar paralelas entre si.

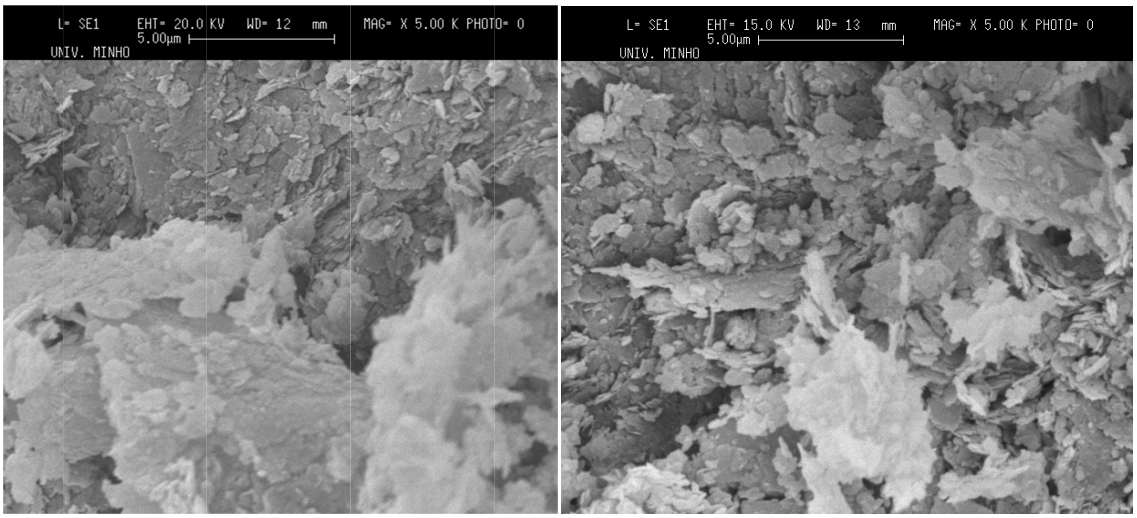
Estes dois fatores levam a crer que a menor absorção de água por capilaridade, observada com a adição da generalidade dos biopolímeros testados, resultará de uma maior conexão entre os agregados e o ligante e de uma maior ligação entre as partículas de argila que compõem este ligante. Este fenómeno de certo dificultará a passagem da água absorvida, uma vez que existirão menos fendas e menos espaço livre entre o ligante e a areia. Além disso, o caminho que a água tem de percorrer entre as partículas de caulinite também é dificultado pelo efeito "*face to edge*".

Nas Figuras 133 e 134 observa-se o efeito da adição de cloreto de sódio no solo simples.



a **b**

Figura 133 – imagens de microscopia, a 100x, das composições: a - REF e b - NaCl



a **b**

Figura 134 – imagens de microscopia, a 5000x, das composições: a - REF e b - NaCl

Observa-se em ambas as ampliações, a 100x e a 5000x que o solo com cloreto de sódio apresenta um maior efeito de floculação e de *face to edge*.

No entanto, os espaços vazios entre os grãos de areia aparentam ser maiores do que no solo de referência. O que pode explicar porque a composição NaCl apresentou uma absorção por capilaridade ligeiramente maior do que a registada no solo de referência, no ensaio aos 180 dias.

Todavia, os resultados da microscopia não permitem explicar porque razão a composição com cloreto de sódio apresentou maiores resistências à compressão, no estado saturado, aos 14 e aos 180 dias. Assim, outros fatores

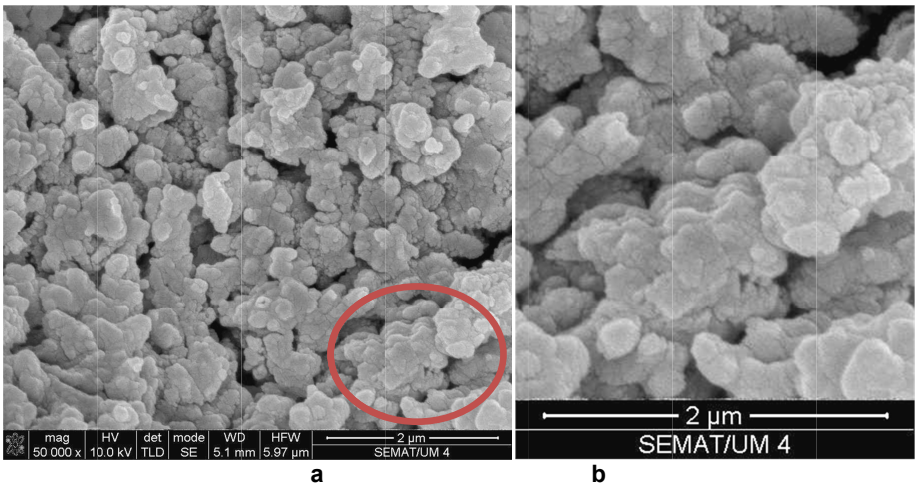
terão proporcionado este aumento de resistência, além da dispersão dos materiais constituintes no solo compactado.

13.3. Estudo das composições de solo real

As amostras utilizadas para análise microscópica foram retiradas dos provetes utilizados no estudo de verificação do aparecimento de fungos. Estes provetes foram mantidos em condições controladas de temperatura e humidade e posteriormente secos (ver capítulo 6). Consequentemente, em diversas figuras observa-se a existência de fungos, como já foi referido no capítulo 12.

Os resultados apresentam-se em diversas escalas microscópicas, com ampliação a 150, 2000, 10.000 e 50.000 vezes. Assim, é possível observar com maior pormenor a distribuição espacial dos constituintes.

A primeira análise realizada foi a identificação do tipo de argilas existentes no solo utilizado. Observando a Figura 135 (a e b), que mostra placas de caulinite no solo real utilizado neste estudo, verifica-se que neste solo as placas de argila se encontram paralelas entre si e distribuídas pelo solo de forma uniforme, à semelhança da Figura 50 – b, presente no capítulo 6, em que se observa como as placas de caulinite podem estar dispostas em termos microscópicos.

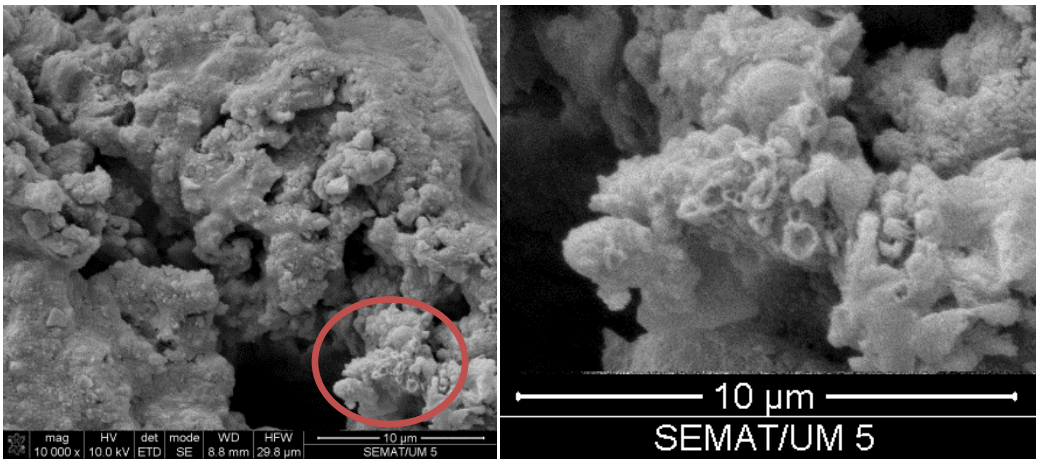


a b

Figura 135 – Imagens de microscopia de caulinite no solo real selecionado: a – a 50.000x e b – imagem ampliada da zona assinalada

Na Figura 136, em (a) observa-se a presença de montemorilonite no solo real utilizado, verificando-se alguma semelhança com a Figura 51, presente no

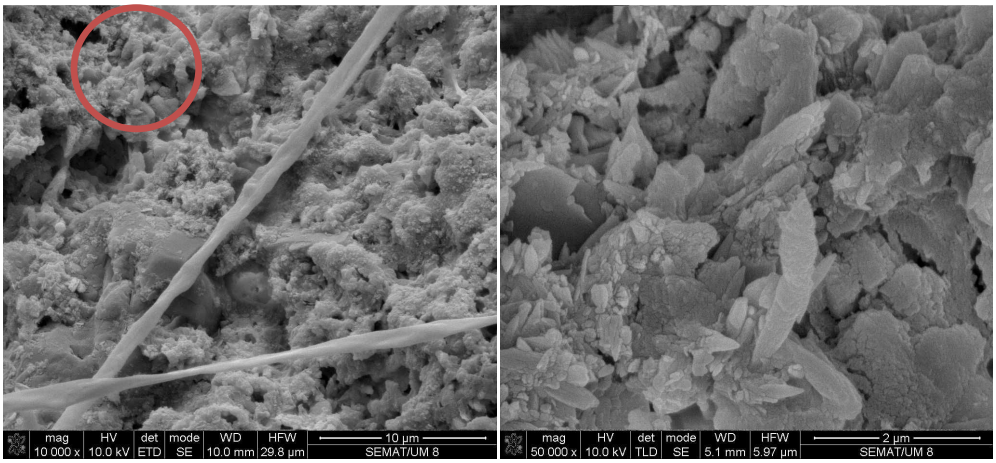
capítulo 6, em que se observa como as placas de montemorilonite podem estar dispostas em termos microscópicos.



a b c

Figura 136 – a – Imagens de microscopia de montemorilonite no solo real selecionado: a - 10.000x e b - imagem ampliada da zona assinalada

A Figura 137 mostra a presença de ilite no solo real utilizado, à semelhança da Figura 52, presente no capítulo 6, em que se observa como as placas de ilite (mais alongadas que as placas de caulinite) podem estar dispostas em termos microscópicos.

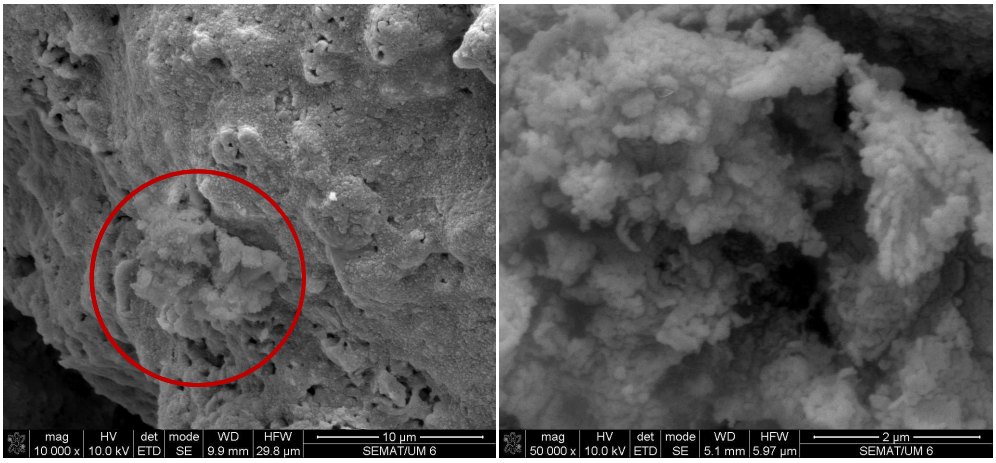


a b

Figura 137 – Imagens de microscopia de ilite no solo real selecionado: a - a 10.000x e b - a 50.000x

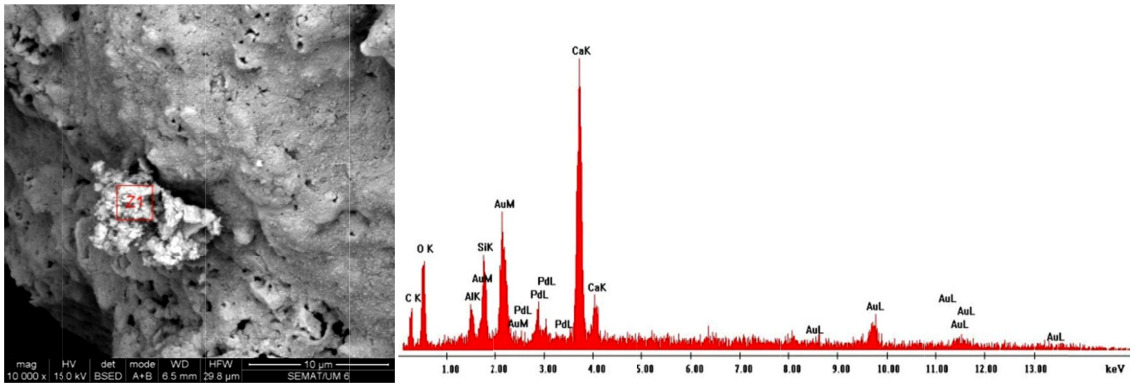
Na Figura 138 observam-se imagens microscópicas de um floco de cal presente no solo estabilizado com cal, CV_NaOH, em diferentes escalas. Na Figura 139 observa-se uma imagem microcópica EDS (BSED) que identifica o mineral existente no solo, através do respetivo número atómico e da respetiva análise química. Nesta análise confirma-se a elevada presença de cálcio neste aglomerado de partículas no solo, bem como alguma presença de alumina e

sílica, o que indica que resultará da reação da cal com as argilas do presente no solo.



a b

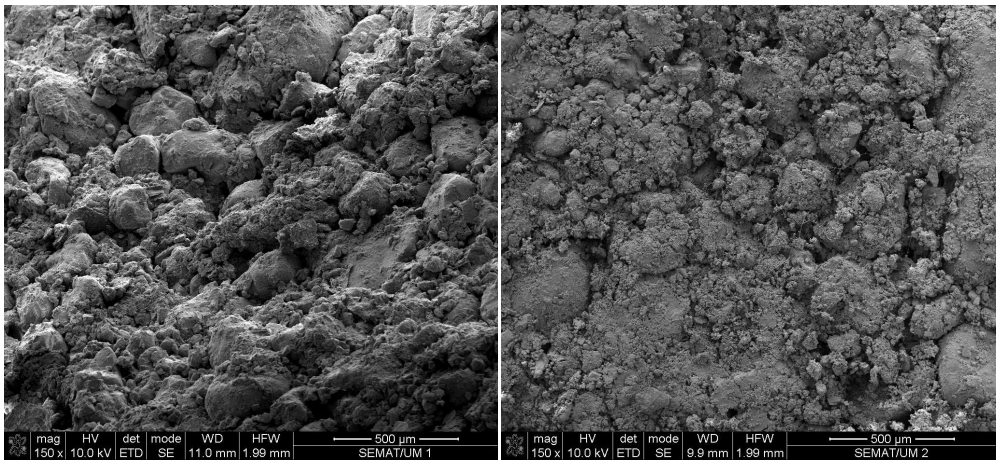
Figura 138 – Imagens de microscopia de floco de cal na composição CV_NaOH: a - a 10.000x e b - a 50.000x



a b

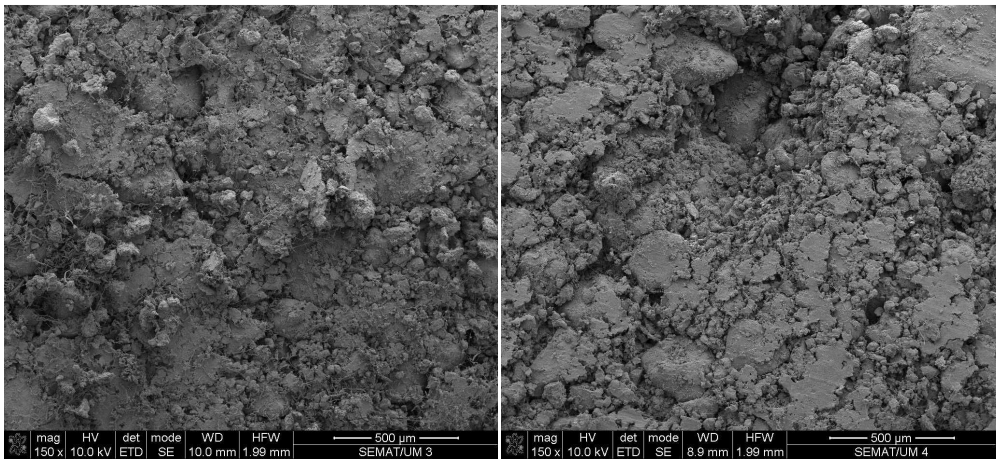
Figura 139 – Imagem de microscopia de floco de cal na composição CV_NaOH: a - imagem EDS a 10.000x e b - análise química da zona Z1

Em relação ao estudo das restantes composições estudadas, as Figuras 140 a 141 mostram os resultados obtidos das composições com vários estabilizantes.



a b

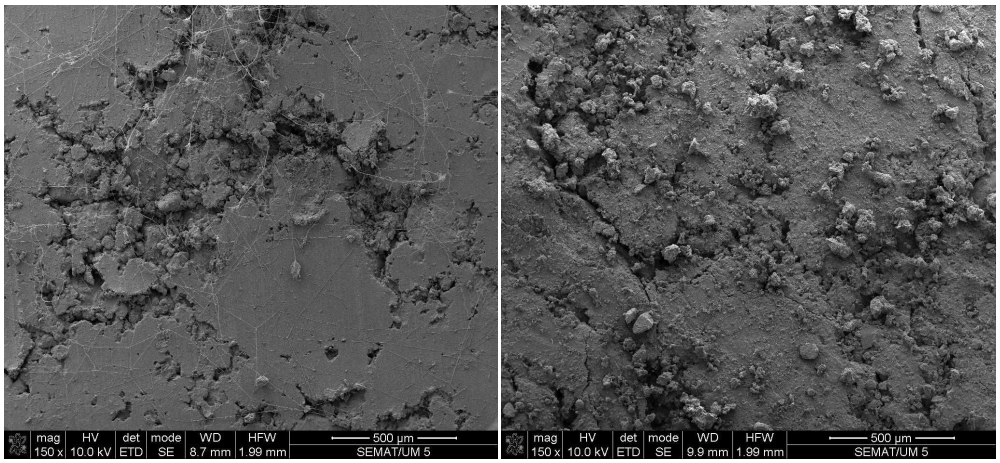
Figura 140 – Imagens de microscopia, a 150x, das composições: a – REF e b – CV



a **b**

Figura 141 – Imagens de microscopia, a 150x, das composições: a – Ci e b – CH

As imagens mostram que existe uma diferença clara entre o solo não estabilizado, REF, e o solo com estabilizantes (CV,Ci ou CH), mas no entanto não existem diferenças significativas entre o solo com os diferentes estabilizantes utilizados.



a **b**

Figura 142 – Imagens de microscopia, a 150x, das composições: a – CV_OVU e b – CV_NaOH

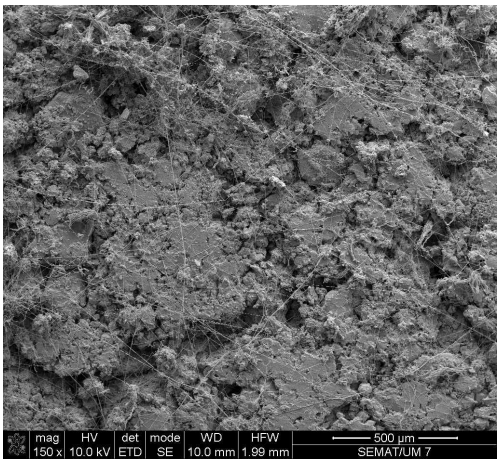
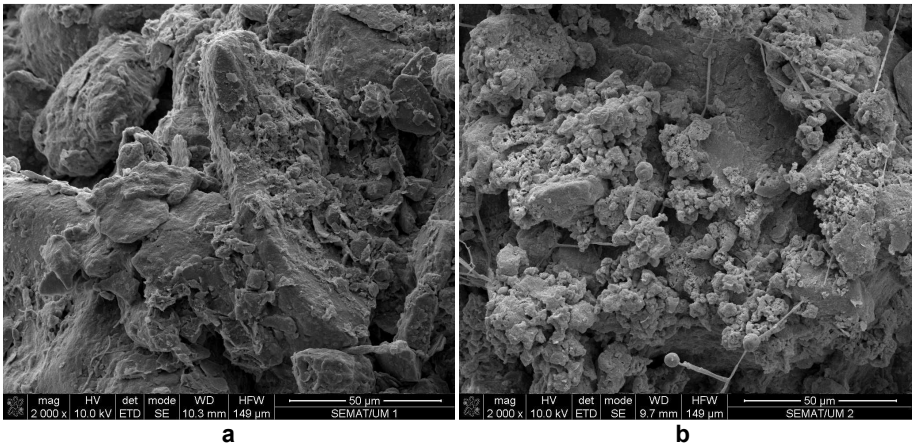


Figura 143 – Imagens de microscopia, a 150x, da composição CV_OVU_NaOH

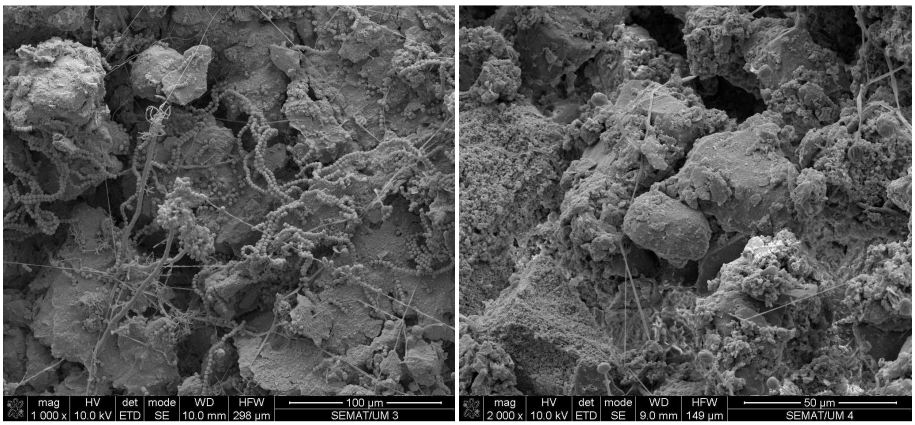
Nas Figuras 142 e 143 observa-se que o solo com cal e adição do óleo vegetal usado ou hidróxido de sódio, CV_O.V.U, CV_NaOH ou CV_ O.V.U_NaOH, apresentam uma superfície com maior quantidade de material ligante, cal e argila, observando-se menos grãos à superfície. Deste modo, pode considerar-se que existe maior envolvência dos grãos, obtendo-se um material com menor porosidade e com menor absorção de água por capilaridade, como observado anteriormente. Ainda que este facto, também possa estar, de certa forma, associado a uma maior trabalhabilidade e uma maior facilidade de compactação.

Analisando imagens com maior ampliação, a 2.000x, Figuras 144 e 145, observa-se mais uma vez que o solo estabilizado apresenta maior envolvência dos grãos com material ligante do que o solo de referência (REF). Verifica-se, ainda, que as composições com cal apresentam floculação da argila. Contudo, os flocos presentes no solo com cal hidratada (CH) são de menor dimensão do que os da cal viva (CV).



a **b**

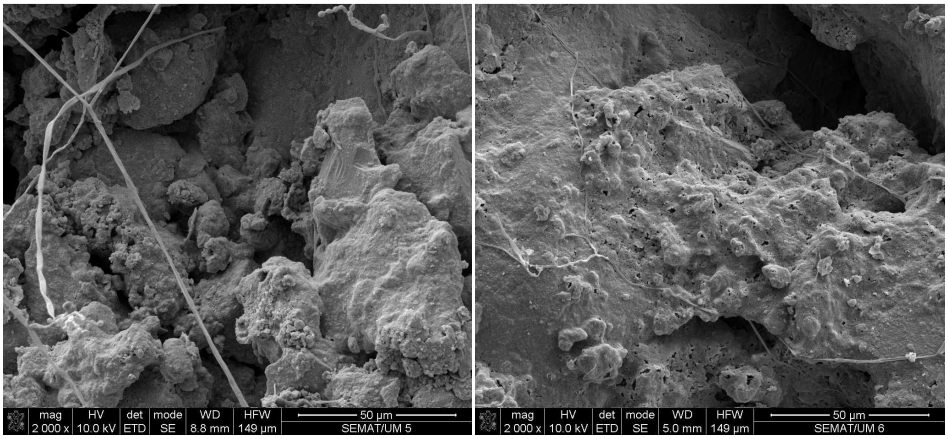
Figura 144 – imagem de microscopia, a 2000x, das composições: a – REF e b – CV



a **b**

Figura 145 – imagem de microscopia, a 2000x, das composições: a – Ci e b – CH

Nas Figuras 146 e 147, relativas às composições de solo estabilizado com cal viva com óleo ou hidróxido de sódio, CV_OVU, CV_NaOH e CV_ OVU_NaOH, observa-se que existe um maior envolvimento dos grãos relativamente ao solo com cal viva simples, CV. Entre estas composições verifica-se maior floculação na composição CV_OVU_NaOH e um ligante mais compacto com CV_NaOH e CV_OVU. O que significa que estas composições, pela sua maior coesão terão menor porosidade. Podendo justificar porque obtiveram menores valores de absorção por capilaridade e maiores resistências à compressão, sobretudo em estado saturado, face às composições sem estes aditivos.



a **b**

Figura 146 – imagem de microscopia, a 2000x, das composições: a – CV_OVU e b – CV_NaOH

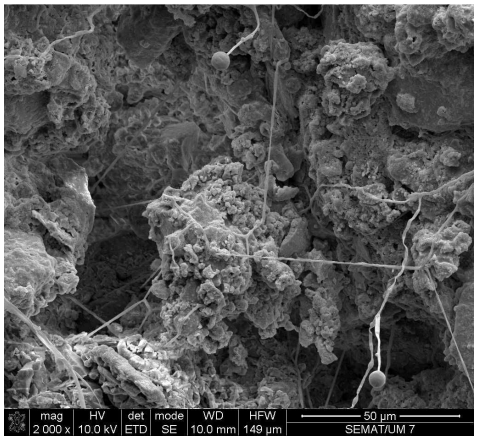
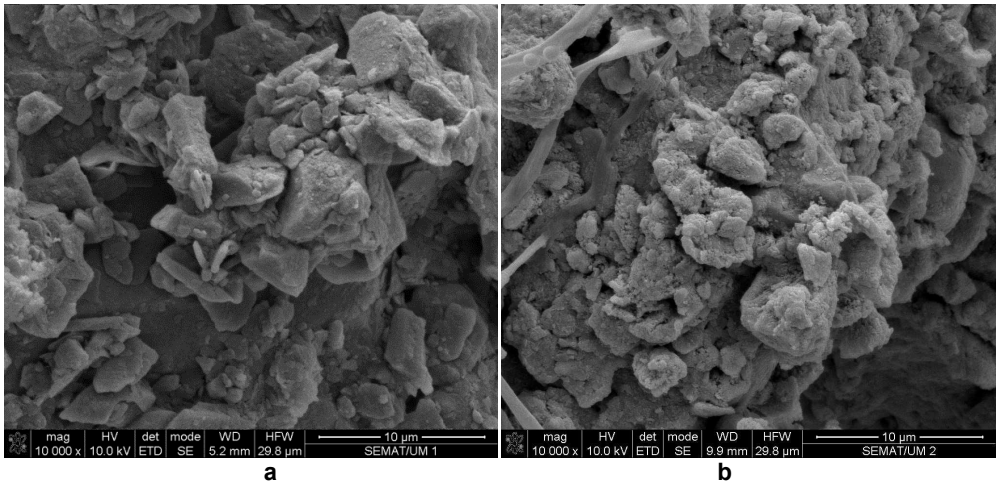


Figura 147 – imagem de microscopia, a 2000x, das composições: a – CV_OVU_NaOH

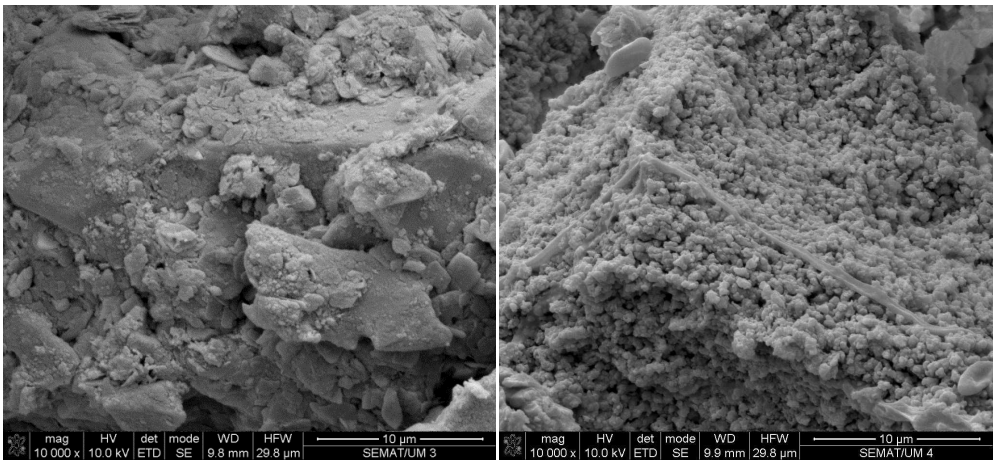
Observando-se imagens com ampliação a 10.000 vezes, Figuras 148 e 149, não parecem ser percetíveis diferenças significativas entre o solo de referência, REF, e o solo com cal viva, CV, ou com cimento, Ci. No entanto, na composição com cal hidratada, CH, observam-se flocos reduzida dimensão a envolver os grãos de areia, o que não se verificou nas imagens de cal viva.

Todavia, não se detetou nada a nível microscópico que possa justificar as menores resistências à compressão da cal hidratada.



a **b**

Figura 148 – imagem de microscopia, a 10.000x, das composições: a – REF e b – CV

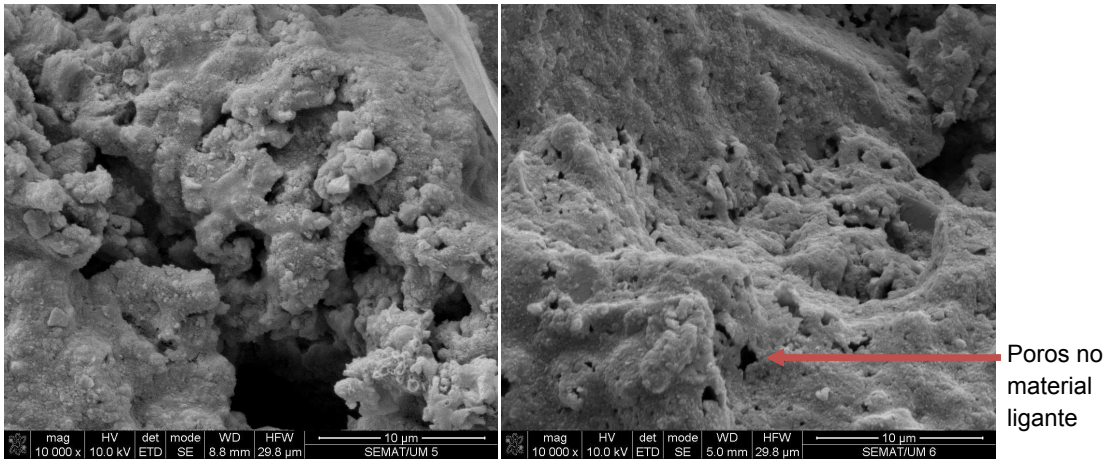


a **b**

Figura 149 – imagem de microscopia, a 10.000x, das composições: a – Ci e b – CH

Parecem existir maiores diferenças, nas Figuras 150 e 151, referentes às composições de cal viva com óleo ou hidróxido de sódio, CV_NaOH, CV_OVU e CV_OVU_NaOH. Nestas imagens observa-se uma massa ligante mais envolvente e uniforme, ainda que se observe alguma porosidade na mesma (ver Figura – b).

Nas composições com cal viva e óleo CV_OVU e CV_OVU_NaOH, observa-se, ainda, alguma floculação, o que não se apresenta na composição apenas com cal viva e hidróxido CV_NaOH. É possível que sejam estes dois aspetos, a massa ligante e a ligeira floculação observada, que tenham conduzido a menores valores de absorção de água por capilaridade como foi observado nestas composições com adição de óleo.



a **b**

Figura 150 – imagem de microscopia, a 10.000x, das composições: a – CV_OVU e b – CV_NaOH

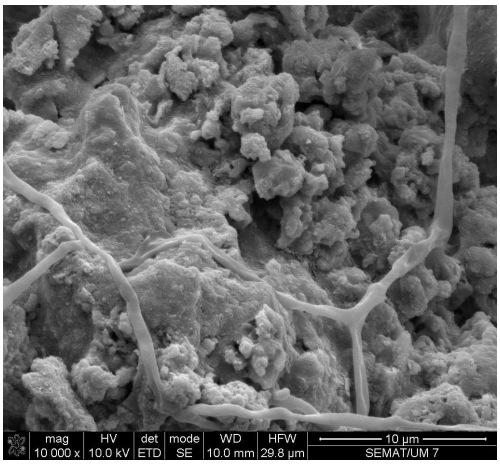
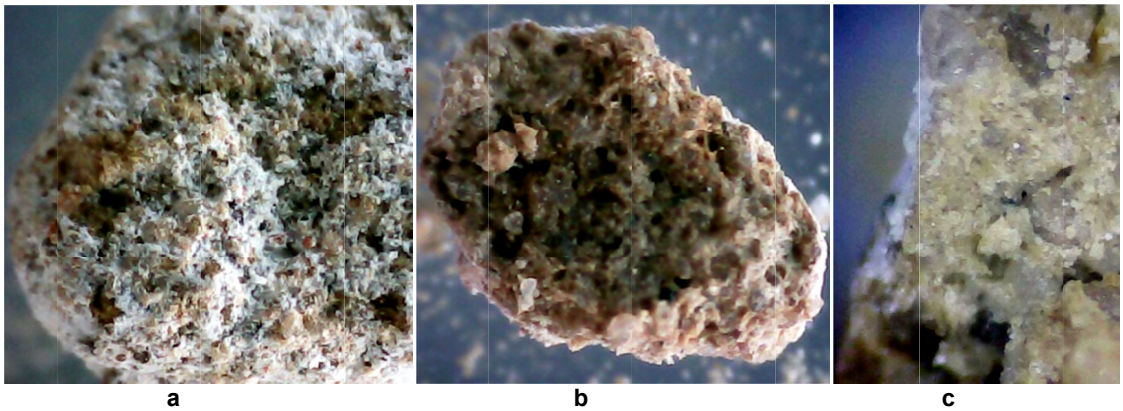


Figura 151 – imagem de microscopia, a 10.000x, da composição CV_OVU_NaOH

Recorrendo a microscopia ótica, de baixa resolução, observou-se que as composições com cal viva formam pequenos aglomerados de solo recobertos por um fino "filme" de cal, conforme documenta a Figura 152.

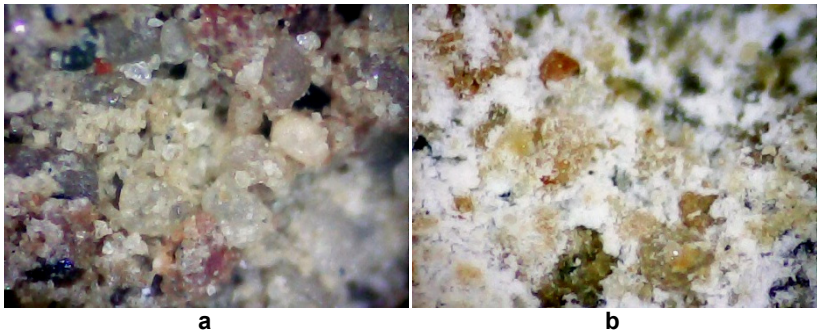


a **b** **c**

Figura 152 – Imagem da composição CV: a - 20x; b - 20x e c - 80x

Além disso, obtiveram-se imagens complementares que permitem observar a cores e a distribuição dos grãos e ligante nas diferentes composições. A

análise destas imagens permitiu confirmar que o solo de referência apresenta maior quantidade de vazios do que os solos estabilizados e que entre os solos com estabilizante, o solo estabilizado com cal viva dá origem a um menor número de vazios (ver Figura 153).



a b

Figura 153 – Imagens a 80x das composições: a - REF; b - CV

No sentido de estabelecer uma relação entre a distribuição das argilas ao nível microscópico e o comportamento verificado ao nível da absorção de água por capilaridade realizaram-se os seguintes esquemas, Figura 154, que sintetizam o que, eventualmente, se passará ao nível microscópico.

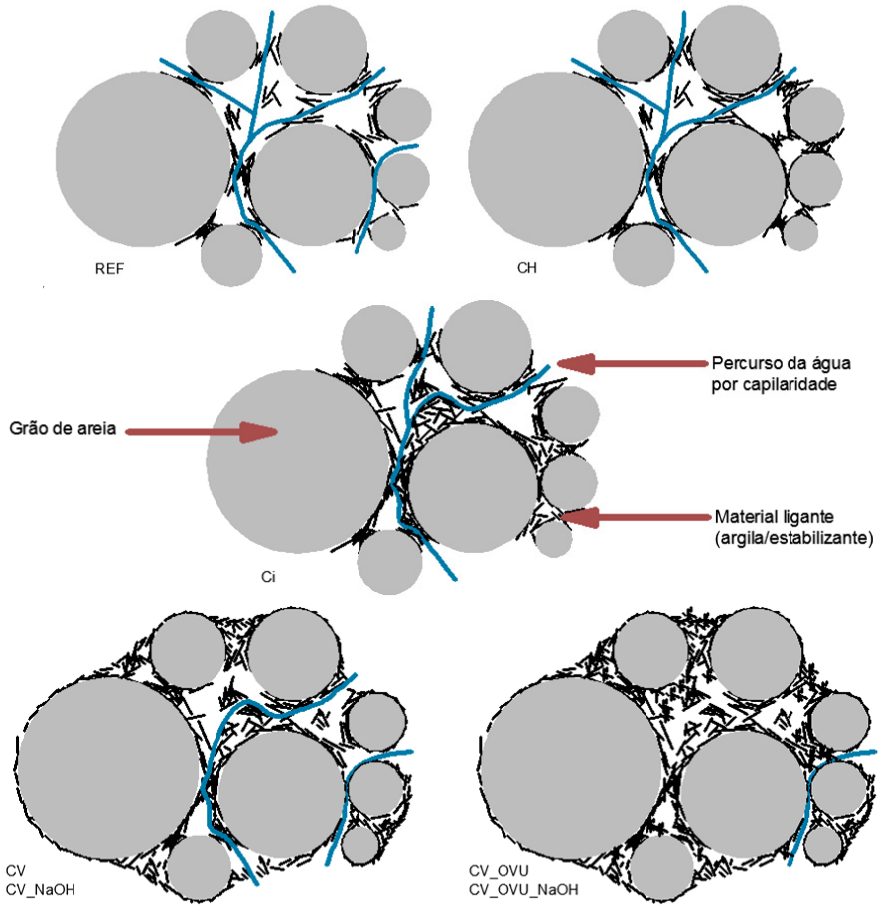


Figura 154 – Esquemas do comportamento microscópico observado

Pensa-se que, além de fenómenos de ordem química que possam ocorrer no solo, especialmente no solo estabilizado (que não foram objeto de estudo na presente tese), a redução da absorção de água obtida pelo soo estabilizado com cal ou cimento, CH, CV e Ci, em relação ao solo de sem estabilizante, REF, dever-se-á a um maior preenchimento dos espaços intersticiais em torno dos grãos de areia com material ligante (argilas, silte e estabilizante).

Na estabilização com cal viva, além do preenchimento dos espaços intersticiais, a redução também poderá dever-se-á ao “filme” de cal formado na superfície dos pequenos aglomerados de solo conforme documentado na Figura 152.

Tais factos, verificam-se com maior expressão no solo estabilizado com cal viva e óleo ou hidróxido, CV_O.V.U, CV_ NaOH e CV_O.V.U_NaOH (em que se observou a menor absorção de água) conforme documentam as Figuras 150 e 151.

14. Conclusões

Este estudo centrou-se na investigação de métodos de proteção face à água, antigos e recentes, no sentido de encontrar novas soluções de estabilização de solos, para construção em terra, com um melhor desempenho face à ação da água. Sendo o objetivo geral deste estudo, a avaliação do desempenho da estabilização do solo com cal viva, biopolímeros ou aditivos minerais em solo compactado para construção em taipa ou BTC. Procurando-se em particular obter uma redução da erosão causada pelas chuvas e diminuição da absorção de água por capilaridade, sem necessidade de recorrer a um revestimento adicional como argamassas ou pinturas. Assim, poderá obter-se as seguintes conclusões sobre a parte experimental e conclusões gerais da tese.

14.1. Conclusões sobre a parte experimental

A estabilização do solo com cal viva apresenta, neste estudo, melhores resistências à compressão, menor absorção de água e maior resistência à ação da chuva do que o solo estabilizado com cimento ou a cal hidratada. Pode-se considerar que será um material durável, uma vez que os testes de erosão acelerada são ainda mais agressivos do que a ação da verdadeira chuva. Além disso, segundo o estado da arte, a durabilidade da construção em terra relativamente à ação da chuva pode aumentar com o passar dos anos, uma vez que vai se formando uma crosta de proteção na superfície das paredes de terra tornando-as mais resistentes à água.

A adição de óleo vegetal usado no solo estabilizado com cal viva, em pequenas quantidades, mostra um comportamento eficaz relativamente à ação da água na construção em terra, sobretudo na redução da absorção de água por capilaridade ou imersão. Relativamente à ação da chuva e vento, aqui simulada nos testes de erosão acelerada por jato de água as composições realizadas com solo real mostram que não existem diferenças significativas em relação ao solo estabilizado com cal viva simples.

Em relação ao estudo de crescimento de fungos, poderá concluir-se que é necessário ter cuidado na construção em terra, relativamente aos espaços húmidos dos edifícios, sobretudo se for adicionado ao solo materiais de origem biológica, como os biopolímeros aqui testados. Ainda que, nos provetes testados, o crescimento de fungos tenha ocorrido apenas em situações de

temperatura e humidade propícias ao crescimento dos mesmos, este aspeto indica que sempre que existir um excesso de humidade à temperatura normal poderão surgir fungos.

Relativamente aos estudos de microscopia, conclui-se que as composições com melhor desempenho (estabilização de cal viva com óleo ou hidróxido) relativamente às ações da água, capilaridade e erosão pela ação da chuva, apresentaram um maior preenchimento dos espaços intersticiais em torno dos grãos de areia com material ligante (argilas, silte e estabilizante). Verificando-se também a presença de uma fina camada de cal na superfície dos pequenos aglomerados de solo. Fatores que de certo influenciarão, de forma significativa, o percurso da água que, eventualmente, entre em contacto com o solo. Isto, além de fenómenos de ordem química que possam ocorrer no solo, especialmente no solo estabilizado, mas que não foram objeto de estudo na presente tese.

14.2. Conclusões gerais

Com base nos resultados obtidos, poderá concluir-se que em relação à sua aplicação real, "*in situ*", a estabilização do solo com cal viva será benéfica para construção em terra compactada, podendo ser utilizada para construir paredes interiores e exteriores. A sua boa resistência à ação da água deverá permitir uma boa durabilidade do material, sobretudo em paredes exteriores, sem recurso à utilização de argamassas de revestimento ou outro tipo de revestimento adicional. Em paredes interiores em zonas húmidas como cozinhas e casas de banho, desde que devidamente ventiladas para evitar o aparecimento de fungos, também poderão ser utilizadas, uma vez que se mostra até mais permeável ao vapor de água do que o solo não estabilizado ou estabilizado com cal hidratada ou cimento (o mais impermeável).

No entanto, a adição de óleo em conjunto com a cal viva, apesar do bom desempenho em relação às ações da água (capilaridade e erosão), deverá apenas ser utilizada para construção de paredes para espaços bem ventilados ou em paredes exteriores. Isto porque os óleos com a presença de humidade potenciam o crescimento de fungos em maior quantidade do que em solo sem aditivos de origem biológica. Como as paredes exteriores estão expostas a

variações de humidade, temperatura e sobretudo a uma boa ventilação e recebem luz solar estas estarão muito menos sujeitas ao crescimento de fungos. Pelo que a aplicação destas composições em paredes exteriores não deverão apresentar problemas de durabilidade, nem será necessário recorrer à utilização de qualquer tipo de revestimento adicional.

Em relação à aplicabilidade das composições estudadas em outros tipos de solo, além do solo areno-argiloso utilizado, o seu desempenho teria de ser estudado, uma vez que existe uma grande variabilidade de solos. No entanto, teoricamente, segundo o estado da arte observa-se que para se obter bom desempenho na estabilização dos solos com cal é necessária a existência de argila em quantidade suficiente no solo.

Recomendações para trabalhos futuros

Relativamente a futuros estudos verifica-se que será de interesse científico:

- A realização de um estudo microscópico em amostras com a presença de água no interior das amostras de solo estabilizado com cal viva e óleo. Tal permitirá verificar como este tipo de estabilização se torna mais resistente à água;
- A execução de paredes de teste a fim de avaliar a durabilidade destas composições quando aplicadas "*in situ*" durante vários anos sob o efeito erosivo da chuva e vento; e
- Verificação em laboratório e "*in situ*" do desempenho deste tipo de composições em argamassas à base de terra; e
- Um estudo com as composições testadas em outros tipos de solo para verificação do seu desempenho em diferentes solos.

Referências bibliográficas

1. ABNT, “Associação brasileira de normas técnicas”, *Catálogo*, disponível em www.abntcatalogo.com.br, acedido em 2011.

2. Achenza, M. e Fenu, L. *On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction*, Materials and Structures 39:21–27, RILEM, 2006.

3. Adriano, P. e Santos Silva, A., *Caraterização de Argamassas Antigas da Igreja de Santa Maria de Évora - Sé Catedral de Évora*, Relatório LNEC 59/06-NMM, pp 53, 2006.

4. AFNOR, XP P13-901, *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception*, www.boutique.afnor.org, acedido em 2011.

5. Aguiar, José, *Algumas notas sobre a conservação de revestimentos exteriores em edifícios antigo*s, Jornada Prática da Conservação e Restauro do Património Arquitetónico, GECo.RPA, Seteais, Sintra, Outubro, 1998.

6. Anger, Romain, Fontaine, Laetitia e Houben, Hugo, *Influence de la teneur en sel et du ph sur la plasticite du materiau terre*, Conferência Internacional MEDITERRA 2009, 1ª Conferenza Mediterranea sull´ Architettura in Terra Cruda, Edicom Edizioni, Março, 2009.

7. Arredondo, F., *Estudio de Materiales I*. Ed. Servicio de publicaciones, revista de obras públicas, Madrid, 1983.

8. Associação Centro da Terra, www.centrodaterra.org, acedido em 2011.

9. ASTM, D 1633 – 00, Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2000.

10. ASTM, D 2487-93, *Classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System).* Annual Book of ASTM Standards Soil and Rock, 207– 216, 1993.

11. ASTM, D 559 – 03, Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2003.

12. Auckland Council, *The Sustainable Home Guidelines - Materials - Earth building*, publicado em 1998 como revisões em 2000 e 2008, disponível em www.waitakere.govt.nz, 2008.

13. Auroville Earth Institute, *Stabilised Earth Waterproofing*, Auroville Earth Institute UNESCO Chair Earth Architecture - Representative for Asia, Auroville, India, disponível em www.earth-auroville.com, acedido em 2008.

14. Avrami, Erica; Guillaud, Hubert, e Hardy, Mary, *Terra Literature Review - An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation,* The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2008.

15. AZoM, *Borax – Sodium Borate – Occurrence, Discovery and Applications*, disponível em www.azom.com (acedido em 2008), Agosto, 2004.

16. BASIN & Pratical Action, Building Advisory Service and Information Network, *Additives to clay - minerals and synthetic additives*, texto originalmente preparado para BASIN, Editado por Practical Action Publiching The Schumacher Centre for Technology & Development, 2008.

17. BASIN & Pratical Action, *Mud plasters and renders*, BASIN - Building Advisory Service and Information Network, texto original escrito para Appropriate Technology magazine Volume 26/Number 1 Junho de 1999 ATBrief N.28, Editado por Practical Action Publishing The Schumacher Centre for Technology & Development, 2002.

18. Bastos, C. *Estabilização de solos*, Mecânica dos Solos, DMC/FURG, disponível em www.dmc.furg.br/geotecnia/mecsolos, acedido em 2009.

19. Beas, Maria Isabel G., *Traditional architectural renders on earthen surfaces*, Dissertação de mestrado em Ciência, em Preservação Histórica, University of Pennsylvania, 1991.

20. Biggs, Andrew, *Plasterboard technical report - Use of recycled plasterboard in unfired clay-gypsum blocks*, Akristos Ltd, publicado por WRAP - Waste & Resources Action Programme, 2007.

21. Bomfim de Souza, Marcia Ikarugi, Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Março, 2006.

22. Borge, Bjorn. *The Ecology of Building Materi*als. Ed. Architectural Press of Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2000.

23. Borge, Bjorn. *The Ecology of Building Materials*. Ed. Architectural Press of Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2000.

24. Boutterin, Claude e Davidovits, Joseph, *Geopolymeric Cross-Linking (LTGS) and Building materials*, Versão editada do artigo: "Utilisation des terres latéritiques dans les techniques de géopolymérisation", publicado em: Actualité de la Construction de Terre en France, Plan Construction, Ministère du Logement, Paris, 1982., disponível em Geopolymer Institute, www.geopolymer.org, acedido em 2008.

25. Brito, Vânia P. S., *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte,* Dissertação de mestrado em Engenharia Civil pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Novembro, 2009.

26. Browne, Gordon, Stabilised interlocking rammed earth blocks: alternatives to cement stabilisation, Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009) 6-9, Bath, UK, Setembro, 2009.

27. Bueno, Mariano, *O grande livro da casa saudável*, edição original em 1992 intitulada *El Gran Libro da Casa Sana*, traduzido e editado por Editora Roca Ltda., Brasil, 1995.

28. Bui, Q.B., Morel, J.C., Venkatarama Reddy B.V., e Ghayad, W., Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering, Building and Environment xxx (2008) 1–8, 2008.

29. Cal-Earth, *What is Superadobe?*, The California Institute of Earth Art and Architecture, http://calearth.org (acedido em 2011).

30. Carboni, Giorgio, Science experiments on environmental education and biology, Translation edited by Michael Easterbrook, Fun Science Gallery, March 2001 (www.funsci.com acedido em 2010).

31. Carboni, Giorgio, *Science experiments on environmental education and biology*, Translation edited by Michael Easterbrook, disponível em Fun Science Gallery - www.funsci.com (acedido em 2010), Março 2001.

32. Castanheira, Edmundo, *Manual de construção do navio de madeira*, Edição Dinalivro, 1991.

33. CDI & CRAterre-EAG, *Compressed earth blocks standards,* serie No.11, publicado por CDI e CRAterre-EAG/ODA, 1998.

34. Čechová, Eva, *The effect of linseed oil on the properties of lime-based restoration mortars*, Doutoramento em Ciência para a Conservação, Universidade de Bolonha, 2009.

35. Cenfic, Workshop - Execução de marmoreados /escaiola, Seminário Cal & Pigmentos, organizado pela Câmara Municipal de Ourique, Gabinete de Cultura, Ourique, Junho, 2010.

36. Chabbi-Chemrouk, Naïma, *Conservation of Djenné - 2007 On Site Review Report* (Djenné, Mali), ArchNet Digital Library - Aga Khan Award for Architecture, disponível em https://archnet.org, acedido em 2011, Maio, 2007.

37. Cid, J., Mazarrón, F. R., Cañas, I., *Las normativas de construcción con tierra en el mundo*, Informes de la Construcción, Vol. 63, 523, 159-169, julho-setembro, 2011.

38. CIMIL, *Alúmen de potassio*, Boletim técnico, CIMIL comércio e indústria e minérios LTDA, disponível em www.cimil.com.br, acedido em 2011.

39. CIMPOR, *Ficha técnica - cimento portland de calcário, CEM II/B-L 32.5N*, publicado por CIMPOR – Cimentos de Portugal, SGPS, S.A., www.cimpor.pt, acedido em 2008.

40. CIMPOR, *Relatório de Sustentabilidade 2009*, publicado por CIMPOR – Cimentos de Portugal, SGPS, S.A., www.cimpor.pt, 2009.

41. CML, Câmara Municipal de Lisboa, *Baixa Pombalina: bases para uma intervenção de salvaguarda*, Edição Câmara Municipal de Lisboa – Pelouros do Licenciamento Urbanístico, Reabilitação Urbana, Planeamento Urbano, Planeamento Estratégico e Espaços Verdes, 2005.

42. CMS, Câmara Municipal de Setúbal, *Manual de boas práticas de intervenção no património histórico do concelho de Setúbal*, Setúbal, Gabinete dos Centros Históricos, disponível em http://jfreg-slourenco.com, acedido em 2011.

43. Cóias, Vitor, *Reabilitação: a melhor via para construção*, BCSD PORTUGAL - Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável, Lisboa, 2004, disponível em www.bcsdportugal.org acedido em 2011.

44. Correia, Mariana e Merten, Jacob, *A taipa alentejana: sistemas tradicionais de protecção*, *in* Actas do II SIACOT, Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, Centro de Investigación de Arquitetura Tradicional, Esc. Sup. Arquitetura de Madrid, Espanha, 2003.

45. CPNT - Consejo de Promocion de Nopal y Tuna, *Usos y Aplicaciones del Nopal*, Disponível em http://www.cpnt.org.mx, acedido em 2009.

46. CRATerre, http://craterre.org, acedido em 2011.

47. Crews, Carole, *Earth Plasters and Aliz*, em The Art of Natural Building, NetWorks' Productions, disponível em www.networkearth.org, acedido em 2010.

48. Cristelo, N., *Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Guimarães, 2001.

49. Crocker, Edward, *Earthen architecture and seismic codes; Lessons from de field*, International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, Istanbul, Turkey, Novembro, 2000.

50. Dachverband Lehm e.V. (Hrsg), *Lehmbau Regeln*, produzida pela associação alemã para a construção com terra, editado por Vieweg e Teubner, 2008.

51. Davidovits, Joseph, *Geopolymer chemistry and applications*, 2ªEdição, Institute Géopolymère, Junho de 2008.

52. Delgado, M. Carmen Jiménez e Guerrero, Ignacio Cañas, The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review, 2005, Construction and Building Materials 21 (2007) 237–251.

53. Dias, Camila Baptista, A pesca da baleia no Brasil colonial: Contratos e contratadores do Rio de Janeiro no século XVIII, Dissertação de mestrado em História do Instituto de Ciências Humanas, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

54. Dobson, Stephen, *Continuity of tradition: new earth building*, Terra 2000 Conference, Torquay, England, 2000.

55. Easton, David, *The industrialization of monolitithic earth walling for first world aplications,* Rammed Earth Works, Napa CA, USA, 5th International Conference on Building with Earth, LEHM 2008.

56. Eires, Rute e Jalali, Said, *Blocos de Terra Comprimidos de elevado desempenho utilizando misturas Metacaulino-Cal*, V Seminário Arquitetura de Terra em Portugal, Aveiro, Publicado em Terra em Seminário 2007, Editado por Argumentum, 2007.

57. Eires, Rute, Camões, Aires e Said Jalali, *Compressed earth mixtures with metakaolin and lime additions and antifungal additives*, Conferência Internacional MEDITERRA 2009, 1ª Conferenza Mediterranea sull´ Architettura in Terra Cruda, Edicom Edizioni, Março, 2009.

58. Eires, Rute, Camões, Aires e Said Jalali, *Optimização do desempenho de construção em terra com recurso a bio-polímeros*, Seminário de Arquitetura de Terra em Portugal, 6ºATP/Seminário Ibero-americano de Construção e Arquitetura com Terra - 9ºSiacot, Coimbra, Fevereiro, 2010.

59. Escola Superior Gallaecia (ESG) de Vila Nova de Cerveira, www.esg.pt, acedido em 2011.

60. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Earth as Building Material”, Corporate Document Repository, www.fao.org, acedido em 2010.

61. Fathy, Hassan, Arquitetura para os pobres – Uma experiência no Egipto rural, texto original publicado no Cairo em 1969 com o título “Gourna, a Tale of two Villages”, Editado em Portugal por Argumentum e Dinalivro, 2009.

62. Ferreira, Régis de C., Freire, Wesley J., *Desempenho físico-mecânico de minipainéis de terra crua tratada com aditivos* químicos, Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.3, p.585-597, set./dez., 2005.

63. Fontaine, L.; Anger, R.; Houben, H., *Quelques mecanismes de stabilisation du materiau terre de l aterre stabilisee aux composites argiles – biopolymeres*, Conferência Internacional Mediterra 2009, 1ª Conferenza Mediterranea sull´ Architettura in Terra Cruda, Edicom Edizioni, pp. 475-478, 2009.

64. Fratini, Fabio; Rescic, Silvia; Rovero, Luisa; e Tonietti, Ugo, *The earth salt architecture of middle age in the siwa oasis, egypt*, Conferência Internacional MEDITERRA 2009, 1ª Conferenza Mediterranea sull´ Architettura in Terra Cruda, Edicom Edizioni, Março, 2009.

65. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, C., e Petric, J., *Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre,* Construction and Building Materials 24 1462–1468, 2010.

66. Gervásio, Helena e Simões da Silva, Luís, *A sustentabilidade do aço,* V Congresso de construção metálica e mista, Estudos e Produtos Especiais, II-720-730, Novembro, 2005.

67. GHG, GreenHouse Gas Online*, Sources of Carbon dioxide – Industry - Lime Production*, GreenHouse Gas Online, www.ghgonline.org, acedido em 2011.

68. Gomes, Ruy José e Folque, José de Brito, Circular de informação técnica – O uso da terra com material de construção, C.I.T Nº9, Série D-4, LNEC, 1953.

69. Guelberth, Cedar Rose e Chiras, Dan, *The natural plasterbook – earh lime and gypsum plasters for natural homes*, New Society Publichers, 2005.

70. Guettala, A., Abibsi A. e Houari, H., *Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure*, Construction and Building Materials 20 (2006) 119–127, disponível online em www.elsevier.com desde Março de 2005.

71. Güven, Necip, *Mica Structure and Fibrous Growth of Illite*, Clays and Clay Minerals, Vol. 49, No. 3, 189-196, 2001.

72. Hago, Abdel Wahid, Al-Rawas, Amer e Al-Harthi, Ali S., *Determination of optimum volume proportions for Sarooj (Pozzolan) lime mixes*, environmental & Engineering Goescience. Vol. VI, Nº. 2,pg. 171-176, Maio, 2000.

73. Hall, Matthew e Djerbib, Youcef, *Moisture ingress in rammed earth: Part 2- The effect of soil particle-size distribution on the absorption of static pressure-driven water*, Construction and Building Materials 20 (2006) 374–383, disponível online em www.elsevier.com desde Março de 2005.

74. Hall, Matthew e Djerbib, Youcef, *Moisture ingress in rammed earth: Part 3 – Sorptivity, surface receptiveness and surface inflow velocity*, Construction and Building Materials 20 (2006) 384–395, disponível online em www.elsevier.com desde Março de 2005.

75. Hall, Matthew R., *Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber,* Building and Environment 42 (2007) 139–145, 2007.

76. Hamer, F. e Hamer, J., *The Potter's Dictionary of Materials and Techniques*, Univ. of Pennsylvania Pr., 1ª Edição 1975, 4ªEdição 2004.

77. Hames, Gary, A transformational construction system – The EarthCo Megablock process, EarthCo Building Systems, Inc. www.earthcomegablock.com (acedido em 2011).

78. Haquin, Gustavo, *Natural Radioactivity and Radon in Building Materials*, 12th Congress of the International Radiation Protection Association, TS III.4.4 NORM and radon issues in building, in Buenos Aires, Outubro, 2008.

79. Heathcote, Kevan Aubrey, *An investigation into the erodibility of earth wall units*, Phd Thesis, University of Technology Sydney, 2002.

80. Houben, Hugo e Guillaud, Hubert, *Earth Construction – A comprehensive guide*, Publicado originalmente com o título Traite de construcion en terre de CRATerre por Editions Parenthèse, em 1989, Edição em inglês CRATerre-EAG, Practical Action Publiching The Schumacher Centre for Technology & Development, 2008.

81. HUD - PD&R (U.S. Department of Housing and Urban Development), *Southwest housing traditions - design materials performance*, disponível em www.huduser.org e acedido em 2011, Maio, 2005.

82. Hunter, Kaki e Kiffmeyer, Donald, *Earthbag Building - The Tools, Tricks and Techniques*, New society publishers, 2004.

83. Hutton, Sue, Answers to questions about Oman - Making sarooj, em www.newsbriefsoman.info, acedido em 2010.

84. ICOMOS-ISCEAH, International Scientific Committee of Earthen Architectural Heritage, http://isceah.icomos.org acedido em 2011.

85. IM, Instituto Meteorológico, Perfil Climático - Portugal Continental - Clima 1961-1990, Instituto Meteorológico, I.P., Lisboa, Julho, 2005.

86. IPQ, NP EN 1015-19:2000, *Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria, Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas*, Instituto português da qualidade, IPQ, 2000.

87. IPQ, NP EN 459-1 (2002) *Cal de construção – Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade,* Instituto português da qualidade, IPQ, 2002.

88. Isik, B. *Earth as a wall material and its impact on pollution*, CIB World Building Congress'98, Gaevle, Sweden, Junho, 1998.

89. Jackson, Patrick, *Harvesting houses for the planet*, BBC News, disponível em http://news.bbc.co.uk, acedido em 2011, Artigo de Maio, 2007.

90. Jalali, Said, Os efeitos da energia de compactação nas caraterísticas dos solos, Dissertação de mestrado em Mecânica dos Solos da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 1985

91. Jaquin, P.A., *Analysis of historic rammed earth construction*, tese de doutoramento, Durham University, 2008.

92. Jaquin, P.A., *Humidity regulation in earth buildings*, Ramboll Technical Forum, London, Novembro, 2009.

93. Kamang, E.E.J., *Strength properties of compressed earth bricks (CEB) with earthworm cast as stabilizer*, Journal of Environmental Sciences, 1 (2). Pp. 65-70, Faculty of Environmental Sciences, University of Jos, Nigéria, 1998.

94. Kawamura, Mitsunori e Diamond, Sidney, *Stabilization of clay soils against erosion loss*, Clays and Clay Minerals, Vol. 23, pp. 444 451. Pergamon Press, 1975.

95. Komar, A., *Building Materials and Components*, Mir Publichers Moscow, 1974.

96. LaBarre, Suzanne, *The Better Brick: 2010 Next Generation Winner*, Metropolis Magazine, disponível em www.metropolismag.com, acedido em 2011, Maio, 2010.

97. Lawrence, Robert Michael Heathcote, A study of carbonation in nonhydraulic lime mortars, Tese de doutoramento, University of Bath, Faculty of Engineering and Design - Department of Architecture and Civil Engineering, Outubro, 2006.

98. Little, Becky e Morton, Tom, *Building with earth in scotland: Innovative design and sustainability*, Scottish Executive Central Research Unit, 2001.

99. Lusical, *Informação técnica*, fornecida pela empresa, 2006.

100. Ma, K. and Pierre, A.C., *Clay sediment-structure formation in aqueous kaolinite suspensions*, Clays and Clay Minerals, gol. 47, No. 4, 522-526, 1999.

101. Malekzadeh M.J., *Dams of the Ancient City of Istakhr*, Proceedings of the International History Seminar on Irrigation and Drainage, pg.121, Tehran, Iran, Maio, 2007.

102. Maniatidis, Vasilios e Walker, Peter, *A Review of Rammed Earth Construction*, DTi Partners in Innovation Project 'Developing Rammed Earth for UK Housing', Maio, 2003.

103. Margalha, Maria Goreti ,Veiga, Maria do Rosário, e Brito, Jorge de, *Algumas vantagens do uso da cal em pasta em revestimentos*, 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Patorreb, Porto, 2006.

104. Martin, Michel, *L'adobeton une technologie appropriee pour un habitat economique ameliore*, Sud Sciences & Technologies Nº1 – Janeiro, 1998.

105. Martínez-Camacho, Fernanda, Vazquez-Negrete, Javier, Lima, Enrique, Lara, Victor Hugo e Bosch, Pedro, *Texture of nopal treated adobe: restoring Nuestra Señora del Pilar mission,* Journal of Archaeological Science 35, 1125-1133, 2008.

106. Maruchin, Simone, Dissertação em Engenharia e Ciência de Materiais, tema *Influência do talco nas propriedades de composições tipo porcelanato*, Ponta Grossa, Brasil 2007.

107. McKissocka, I., Walkera, E.L., Gilkesa, R.J. e Carterb, D.J., *The influence of clay type on reduction of water repellency by applied clays: a review of some West Australian work,* Journal of Hydrology 231-232 (2000) 323-332, 2000.

108. Medeiros, A. C. de S., *Preparo e Uso de Soluções Salinas Saturadas para a Caraterização Fisiológica de Sementes Florestais,* Circular técnica 125, Embrapa, Colombo, PR, Dezembro, 2006.

109. Middleton, G.F., Revisto por Schneider, L.M., *Bulletin 5 - Earth-Wall Construction*, CSIRO-2, Fourth edition, National Building Technology Centre, Commonwealth of Australia, Department of Industry, Technology and Commerce1987.

110. Ministério do ambiente, do ordenamento do território e do desenvolvimento regional, *Decreto-Lei n.º 96/2008 - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE),* Diário da República, 1.ª série — N.º 110 — 9 de Junho, 2008.

111. Minke, Gernot, *"Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture"*, Birkhäuser – Publishers for Architecture, 2006.

112. Minke, Gernot, *Building with earth – 30 years of research anddevelopment at the university of kasse*l, CESB 07 PRAGUE Conference, Session T1A , 2007.

113. Monteiro, Ana, *O edifício da FLUP é um edifício doente? Algumas reflexões sobre o conforto bioclimático em espaços interiores*, Revista da Faculdade de Letras – Geografia I, série Vol. XII/XIII, Porto, 1996.

114. Moosavi, Hessam, *Hormuz* - Fotografia *Portuguese fort*, www.panoramio.com, acedido em 2011.

115. Morton, Tom, *Earth Masonry - Design and construction guidelin*es, IHS BRE Press, 2008.

116. MSD*, Manual Merck – Biblioteca médica online*, Merck Sharp & Dohme Corp., www.manualmerck.net, acedido em 2011.

117. Murray, Haydn H., *Developments in Clay Science, 2, Applied clay mineralogy Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays,* Edição Elsevier, 2007.

118. National Lime Association/Canadian Lime Institute, *CO_2 emissions calculation protocol for the lime industry - english units version*, Revision, February, 2005.

119. Naturepaint & Kreidezeit, Naturfarben GmbH, *Tadelakt overview*, disponível em www.naturepaint.com, acedido em 2011.

120. Neves, Célia Maria Martins, *Alvenaria de terra*, HABYTED CYTED PROTERRA Proyecto XIV.6 - Tecnología de construcción con tierra, Centro de referência del Habitat (CRH) da Facultad de Arquitectura, Diseño y Arte de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguai, 2003.

121. OEH, Office of Environment and Heritage, *Soil survey standard test method - Water repellency*, NSW Government (New South Wales) – Austrália, ww.environment.nsw.gov.au, acedido em 2011.

122. Oliveira, Carmen Helena Carvalho, *A radioatividade e o ambiente no ensino secundári*o, Mestrado em física para o ensino, Universidade de Lisboa, Departamento de Física, da Faculdade de Ciências, Outubro, 2006.

123. Oliveira, Daniela S. e Timm, Cláudio D., *Instabilidade da caseína em leite sem acidez adquirida*, Revista portuguesa de ciências veterinárias, RPCV (2007) 102 (561-562) 17-22, 2007.

124. OMNI Laboratories, Inc., Imagens microscópicas disponíveis em *Mineralogy Database,* em webmineral.com, acedido em 2010.

125. Orfánus, T. Bedrna, Z. Lichner, L, Hallett, P. Kňava, K. e Sebíň, M. *Spatial Variability of Water Repellency in Pine Forest Soil,* Soil & Water Res., 3, (Special Issue 1): S123–S129, 2008.

126. Oti,J. E., Kinuthia, J. M. e Bai, J., *Freeze–thaw of stabilised clay brick*, Proceedings of the ICE - Waste and Resource Management, Volume 163, Issue 3, pages 129-135, 2010.

127. Oti,J. E., Kinuthia, J. M. e Bai, J., Stabilised earth masonry technology incorporating industrial by-product, Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK, Setembro, 2009.

128. Pinto, Paulo, *Caraterização de Barreiras Pára-Vapor e sua Aplicação*, Dissertação, Faculdade de engenharia - Universidade do Porto, Abril de 2002.

129. Pont du gard, *La construction du Pont du Gard* e *Historique du Pont du Gard*, disponível em www.pontdugard.com, acedido em 2011.

130. Porto Editora, Caseína, In Infopédia, Porto Editora, 2003-2011, disponível em www.infopedia.pt/$caseina>, acedido em 2011.

131. Pruett, Robert J. e Murray, Haydn H., *Clay mineralogy, alteration history, and economic geology of the whitemud formation, southern saskatchewan, Canada*, Clays and Clay Minerals, Vol. 39, No. 6, 586-596, 1991.

132. Rigassi, Vincent, *Compressed earth blocks: Manual of production*, CRATerre-EAG, Volume I. Manual of production, Uma publicação de Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH em coordenação com BASIN, 1985.

133. Rodrigues, M. Paulina S. F. de Faria. *Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas - Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Universidade Nova Lisboa – Departamento de Engenharia Civil. Lisboa. 2004.

134. Rohlen, Ulrich e Ziegert, Christof, *Earth building practice: planning, design, building*, Editado por Bauwerk – Beuth, 2011.

135. Rolland, Gwénola, *L'aqueduc de Nîmes,* Forum Chantiers N°16, disponível em www.forum-chantiers.com, Março, 2006, acedido em 2011.

136. Rowland, Peter B., *Essays on Hormuz,* disponível em www.dataxinfo.com, acedido em 2009, 2006.

137. Sacred Sites, *Djenne, Mali*, Magic Planet Productions, disponível em http://sacredsites.com, acedido em 2011.

138. Santos da Cruz, Maria de Lurdes, *Novas Tecnologias da Aplicação de Solo-Cimento*, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil pela Universidade do Minho, Janeiro, 2004.

139. Santos, Cláudio Batista dos, *Utilização de resíduos oleosos provenientes das atividades de petróleo para uso em pavimentos rodoviários*, Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Geotécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Maio, 2010.

140. Sawitzki, Roberto Luiz, *O estudo da adição da mucilagem de catos às argamassas no municipio de piratini - Rio Grande do Sul*, ARC - Revista Brasileira de Arqueometria Restauração Conservação, Edição Especial, Nº 1, MARÇO 2006, AERPA Editora, Resumos do III Simpósio de Técnicas Avançadas em Conservação de Bens Culturais – Olinda, 2006.

141. SAZ, Standard Association of Zimbabwe, *Zimbabwe Standard N. 724:2001*, *Zimbabwe Standard Code for Rammed Earth Structures*, 2001.

142. Schilderman, Theo, *Sustainable small scale brick production: a question of energy*, publicado por Building Advisory Service and Information Network, BASIN, 2009.

143. SECIL, *Estratégia do Grupo SECIL no Combate às Alterações Climáticas*, apresentação feita por Carlos Abreu no Congresso 'CLIMA 2010 – II Congresso Nacional sobre Alterações Climáticas' na Exponor em Matosinhos, www.secil.pt, 2010.

144. Sedlbauer, K., *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. Dissertation, University of Stuttgart 2001, Download:www.ibp.fraunhofer.de.

145. Selma Al-Radi, "*Qudâd The Traditional Yemeni Plaster*", Almotamar Net, 2005, disponível em www.almotamar.net.

146. Silva, B., Correia, J., Nunes, F., Tavares, P., Varum, H., Pinto, J., *Bird Nest Construction - Lessons for Building with Earth*, WSEAS Transactions on Environment and Development, Issue 2, Volume 6, Fevereiro, 2010.

147. Silva, Bruno Miguel Machado da, *Perspetiva biomimética do ninho da andorinha-dos-beirais*, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Julho, 2009.

148. Small, j. s., *Experimental Determination of the Rates of Precipitation of Authigenic Illite and kaolinite in the Presence of Aqueous Oxalate and Comparison to the k/aR ages of Authigenic Illite in Reservoir Sandstones,* Clays and Clay Minerals, Vol. 41, No. 2, 191-208, 1993.

149. Stachera, Theodozio & Casagrande, Eloy Fassi, *Avaliação de emissões de CO_2 na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná*, ix engema - Encontro nacional sobre Gestão empresarial e meio ambiente, Curitiba, 19 a 21 de Novembro de 2007.

150. Startsev, Alexander, *Complex for desalting of water and water purification of any degree of pollution*, UNIDO North-Western International Cleaner Production Centre, disponível em www.teros-mifi.ru, acedido em 2011.

151. Stephen Dobson, *Terra 2000 continuity of tradition: new earth building*, This keynote speech was delivered at Terra 2000 Conference, Torquay, England in May 2000.

152. Sustainable Sources, *Earth Materials*, http://earth.sustainablesources.com, acedido em 2011.

153. Tamada, Ivo Shodji, *Avaliação toxicológica durante a biodegradação de óleos e biodiesel*, Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Rio Claro, Brasil, 2009.

154. Tavares, Martha, Aguiar, José e Veiga, Rosário, *Conservação e restauro de antigos revestimentos exteriores: Caraterização de alguns casos (do séc. XVIII e XIX na zona de lisboa)*, disponível em www.conservarcal.lnec.pt, Comunicação apresentada no VSBTA – Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassa, São Paulo, Brasil, Junho, 2003.

155. Teixeira, Gabriela de Barbosa e Belém, Margarida da Cunha, *Diálogos de edificação: técnicas tradicionais de restauro,* Publicação, Porto: Centro Regional de Artes Tradicionais, CRAT, 1998.

156. Teutonico, Jeanne Marie, MCcaig, Iain, Burns, Colin, e john ashurst, *The Smeaton Project: Factors affecting the properties of lime-based mortars*, Programa de pesquisa conjunto com ICCROM, English Heritage, and Bournemouth University, APT Bulletin, Vol. 25, No. 3/4, 1993.

157. University of Technology Sydney, UTS, *Earth Building Research Forum* http://www.dab.uts.edu.au, acedido em 2008.

158. Veiga, Eliane, *Arquitetura luso brasileira e suas relações com a toponímia - Toponímia e fragmentos da Arquitetura Tradicional de herança portuguesa: Algumas certezas, alguns mitos e certos equívocos*, Colóquio 260 anos de herança açoriana, Florianopolis – Santa Catarina, Brasil, Setembro, 2008.

159. Veiga, M. Rosário – *As argamassas na conservação*. In Actas das 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções existentes. Aveiro, Novembro, 2003.

160. Vitruvius Pollio, Marcus, *De architectura ou "Dez livros sobre a arquitetura* de Vitrúvio" – Livro II, em Vitruvius: On Architecture, disponível em http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius, acedido em 2011, texto original do autor escrito no século I a.C.

161. Vroomen, Robbert, *Gypsum stabilised Earth - Research on the Properties of cast Gypsum-stabilised Earth and its Suitability for Low Cost Housing Construction in Developing Countries*, Final thesis for MSc Architecture, Building & Planning, Eindhoven University of Technology, The Netherlands - Faculty of Architecture, Building and Planning, Junho, 2007.

162. Walker, Peter e Standards Australia, HB 195-2002, The *australian earth building handbook*, Standards Australia International, 2002.

163. Walker, Peter, *Review and Experimental Comparison of Erosion Tests for Earth Blocks.* In: Proceedings of the 8th International Conference on the study and conservation of earthen architecture, Turquia, 2000.

164. Weiss, Christian e Gerlach, Iris, "*Qadhat - a comparative study of ancient and new lime mortar from the Marib province"*,Yemen, Archaeol Anthropol Sci, 24 March, 1:87–94, 2009.

165. WEM Wandheizung, *WEM® Wall Heating - Product information*, disponível em www.wall-heating.com, acedido em 2008.

166. WHO, *Children's Health and the Environment - WHO Training Package for the Health Sector*, World Health Organization, www.who.int, 2009, acedido em 2011.

167. WHO, *Planos Locais de Ação em Habitação e Saúde - Manual para projetos*, Editado em Inglês pela OMS, World Health Organization Escritório Regional para a Europa sob o

título: *Local Housing and Health Action Plans*, 2007, publicado pela Direcção-Geral da Saúde, 2008.

168. Wikipédia, *Cloreto de cálcio*, Wikipédia - a enciclopédia livre, disponível em http://pt.wikipedia.org/wiki/Cloreto_de_calcio, acedido em 2008.

169. Wikipedia, http://pt.wikipedia.org/wiki/Fungi, acedido em 2011.

170. Wikipedia, *Yakhchal*, em http://en.wikipedia.org/wiki/Yakhchal, acedido em 2010.

171. Worrell, Ernst, et al, *Carbon dioxide emissions from the global cement industry*, Annual Review of Energy and the Environment Volume 26, 303–29, 2001.

172. Yavuz, Aysil Tükel, *"On Site Review Report - Restoration of Amiriya Madrasa",* Rada – Yemen, 2004.

173. Zurakowska, M., Hughes J. J. e Jez, J., *History, materials and social aspects of building from unfired earth in poland*, Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK, 6-9 September 2009.