

Blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado

Bruno Vitor de Azevedo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Arquiteto Nuno Duarte Salsinha Serra Grenha

Júri:

Presidente: Professor Vítor Faria e Sousa

Orientador: Professor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues

Julho de 2021

DECLARAÇÃO

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado

Bruno Vitor de Azevedo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Dissertação elaborada no âmbito do Projeto FCT EcoHydB

Eco – efficient hydraulic binders produced from waste cement –
based materials

Projeto FCT PTDC/ECI-CON/28308/2017



FCT Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o fim de uma etapa muito importante da minha vida, por isso, gostaria de deixar o meu agradecimento a todos que fizeram parte, direta ou indiretamente, deste percurso.

Agradeço ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa por ter-me recebido durante os últimos anos e por ter me formado como engenheiro para que eu possa contribuir para a sociedade com rigor e profissionalismo.

A todos os colegas e docentes que estiveram envolvidos na realização deste trabalho facilitando e possibilitando a sua correta execução deixo o meu agradecimento, especialmente ao:

- Professor José Alexandre Bogas, meu orientador, que esteve sempre disponível para ajudar na execução do trabalho. Deixo também a minha admiração pelo profissionalismo e pelos trabalhos desenvolvidos;
- Arquiteto Nuno Grenha que possibilitou a produção dos blocos e pelo apoio dado à sua execução;
- Professor Manuel Francisco, pelo apoio dado na produção do cimento reciclado e no ensaio de DRX;
- Professora Rafaela Cardoso que permitiu os ensaios de caracterização do solo utilizado para a produção do BTC.
- Todos os colegas de laboratório especialmente o Bruno Carvalho, Daniel Leal e a Susana Hu por terem apoiado a execução dos ensaios laboratoriais e por terem sido uma ótima companhia.
- Técnicos do laboratório em especial ao Pedro Costa e ao Francisco Baptista pela disponibilidade para ajudar e por providenciarem todos os materiais e utensílios necessários para a execução da campanha experimental.

Ao meu pai (Gilberto Azevedo), mãe (Maria Divina Azevedo), irmã (Amanda Azevedo) e a toda a minha família deixo o meu enorme agradecimento por terem sempre acreditado e me motivado para seguir os meus sonhos.

Agradeço a minha namorada (Natália Santos) e a toda a sua família por terem me apoiado durante todos estes anos, tornando o meu percurso mais leve e divertido.

Agradeço ainda a todos os meus amigos que, durante estes longos anos, proporcionaram momentos incríveis e únicos.

RESUMO

A crescente preocupação de introduzir uma prática mais sustentável no sector da construção, procurando materiais mais eficientes em termos económicos e ambientais, promoveu o crescente interesse na construção em terra. Os blocos de terra comprimida (BTC) têm sido uma das técnicas mais exploradas face a outras soluções em terra, em virtude da sua maior velocidade de processamento, menor variabilidade e maior resistência mecânica. No entanto, um dos principais inconvenientes da construção em terra é a sua reduzida resistência à água, o que obriga à sua estabilização. Atualmente, o cimento Portland (CP) tem sido o estabilizante mais utilizado, mas a sua incorporação entra em conflito com a natureza ecológica e sustentável da construção em terra. Nesse sentido, o cimento reciclado (CR), que tem vindo a ser alvo de investigação e desenvolvimento no Instituto Superior Técnico, permite reutilizar os resíduos construção e demolição, garantindo ainda a redução significativa das emissões de CO₂ e do consumo de recursos naturais associados à produção do CP. Como tal, na presente dissertação pretendeu-se, pela primeira vez, estudar a produção e caracterização de BTC estabilizados com CR termoativado a partir de resíduos de materiais cimentícios.

Para tal, foi realizada uma extensa campanha experimental que envolveu a produção e caracterização de CR, a produção de BTC com diferentes composições, a caracterização dos BTC no estado fresco (massa volúmica e porosidade) e, finalmente, a caracterização dos BTC no estado endurecido, em termos de resistência mecânica (compressão, tração por compressão diametral, flexão), módulo de elasticidade, retração, velocidade de ultrassons, dureza superficial, condutibilidade térmica e resistência à água (absorção por imersão, capilaridade, a baixa pressão, permeabilidade, erosão acelerada por jato de água). De modo a avaliar a influência do tipo e teor de estabilizante, foram produzidos BTC não estabilizados e com 5% ou 10% de CR ou de CP. Complementarmente, foram realizados ensaios de termogravimetria e difração de raios-X para aferir a capacidade de hidratação do cimento reciclado quando incorporado nos BTC.

Em geral, os BTC de referência com CP apresentaram melhor desempenho mecânico e de durabilidade do que os BTC com CR, em resultado de se terem atingido maiores compacidades durante a produção dos blocos, conduzindo a uma redução da porosidade global e das propriedades de absorção. Para tal, contribuiu a elevada exigência de água do CR. Ainda assim, o CR demonstrou ser adequado e eficiente na estabilização dos BTC, contribuindo para um aumento significativo da sua resistência mecânica e durabilidade face aos BTC não estabilizados. Conclui-se que foi possível produzir BTC mais eco-eficiente, sem prejuízo significativo do seu desempenho no estado endurecido, atingindo-se uma solução viável que justifica o desenvolvimento de investigação adicional.

Palavras-chave:

Bloco de terra comprimida, estabilizante, cimento reciclado, resistência à água, sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing concern to introduce a more sustainable practice in the construction sector, looking for more efficient materials in economic and environmental terms, has promoted the increasing interest in earth construction. Compressed earth blocks (CEB) have been one of the most explored techniques compared to other earth solutions, due to their higher processing speed, lower variability and higher mechanical strength. However, one of the main drawbacks of earth construction is its low water resistance, which requires its stabilisation. Currently, Portland cement (PC) has been the most used stabiliser, but its incorporation conflicts with the ecological and sustainable nature of earth construction. In this sense, recycled cement (RC), which has been the subject of research and development at Instituto Superior Técnico, allows the reuse of construction and demolition waste, ensuring a significant reduction of CO₂ emissions and consumption of natural resources associated with the production of PC. As such, this dissertation aimed, for the first time, to study the production and characterisation of CEB stabilised with thermoactivated aggregates from waste cementitious materials.

For this purpose, an extensive experimental campaign was performed, which involved the production and characterisation of RC, the production of CEB with different compositions, the characterisation of the CEB in the fresh state (density and porosity) and, finally, the characterisation of the CEB in the hardened state, in terms of mechanical strength (compressive, tensile by diametrical compression, flexural), modulus of elasticity, shrinkage, ultrasonic velocity, surface hardness, thermal conductivity and water resistance (absorption by immersion, capillarity, at low pressure, permeability, accelerated erosion by water jet). In order to evaluate the influence of type and content of stabiliser, non-stabilised and CEB with 5% or 10% of CR or PC were produced. Complementarily, thermogravimetry and X-ray diffraction tests were performed to assess the hydration capacity of the recycled cement when incorporated into the CEB.

In general, the reference CEBs with PC showed better mechanical performance and durability than the CEBs with RC, as a result of having achieved greater compactness during the production of the blocks, leading to a reduction of overall porosity and absorption properties. The high water requirement of the RC contributed to this phenomenon. Nevertheless, the RC proved to be adequate and efficient in stabilising the CEB, contributing to a significant increase in their mechanical strength and durability, when compared to non-stabilised CEB. In conclusion, it was possible to produce more eco-efficient CEB, without significant loss of performance in the hardened state, reaching a viable solution that justifies the development of further research.

Keywords:

Compressed earth block, stabilizer, recycled cement, water resistance, sustainability.

ÍNDICE GERAL

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objetivos e metodologia	2
1.3	Motivação	3
1.4	Estrutura da dissertação.....	3
2	Estado de arte	5
2.1	Aplicação da terra na construção	5
2.2	Construção em terra atualmente	7
2.3	A terra e as suas propriedades	8
2.4	Identificação e classificação dos solos.....	9
2.5	Estabilização da terra	11
2.6	O cimento reciclado	12
2.7	Blocos de terra comprimida (BTC)	15
2.7.1	Produção dos BTC	16
2.7.2	Processo de construção de alvenarias com BTC	17
2.7.3	Regulamentação da construção com BTC.....	18
2.7.4	Vantagens e desvantagens dos BTC	19
2.7.5	Formulação dos BTC.....	19
3	Campanha experimental	21
3.1	Descrição da campanha experimental	21
3.2	Caracterização da terra	22
3.2.1	Determinação dos limites de consistência	22
3.2.2	Ensaio de compactação (Proctor)	23
3.2.3	Análise granulométrica por peneiração húmida	24
3.2.4	Determinação da fração de matéria orgânica	25
3.2.5	Determinação da massa volúmica das partículas	26
3.3	Estabilizantes.....	26
3.3.1	Cimento Portland	26
3.3.2	Cimento reciclado	27
3.3.3	Caracterização do cimento reciclado	28
3.4	Produção dos BTC	29

3.5	Caracterização dos BTC	32
3.5.1	Massa volúmica	34
3.5.2	Resistência à compressão	34
3.5.3	Resistência à tração por flexão	35
3.5.4	Resistência à tração por compressão diametral	36
3.5.5	Módulo de elasticidade	36
3.5.6	Velocidade de propagação de ultrassons	37
3.5.7	Esclerômetro pendular	38
3.5.8	Retração	38
3.5.9	Condutibilidade térmica	39
3.5.10	Permeabilidade à água	40
3.5.11	Absorção de água por imersão	41
3.5.12	Absorção de água por capilaridade	42
3.5.13	Absorção de água a baixa pressão	42
3.5.14	Erosão acelerada (<i>spray test</i>)	43
3.5.15	Análises termogravimétrica (TG) e difração de raios-X (DRX)	44
4	Apresentação e discussão de resultados	45
4.1	Caracterização da terra e do cimento reciclado	45
4.2	Estado fresco e Composição dos BTC	47
4.3	Massa volúmica no estado endurecido	49
4.4	Análise termogravimétrica (TG) e difração de raios-x (DRX)	51
4.5	Resistência mecânica	53
4.5.1	Resistência à compressão	53
4.5.2	Eficiência estrutural	58
4.5.3	Resistência à tração	59
4.6	Módulo de elasticidade	61
4.7	Velocidade de propagação de ultrassons	62
4.8	Índice esclerométrico	63
4.9	Condutibilidade térmica	64
4.10	Retração	65
4.11	Durabilidade	67
4.11.1	Absorção de água por imersão	67

4.11.2	Absorção de água por capilaridade.....	68
4.11.3	Absorção de água a baixa pressão.....	70
4.11.4	Permeabilidade à água.....	71
4.11.5	Erosão acelerada.....	73
5	Conclusões.....	75
5.1	Conclusões gerais	75
5.2	Proposta de desenvolvimento futuro	79
6	Referências	81

Anexos:

A.1:	Resultado dos ensaios de resistência à compressão e tração.....	A.1-1
A.2:	Resultado dos ensaios de absorção de água.....	A.2-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Construções em terra: a) Mesquita Djenné, Mali; b) Cidade de Shibam, Iêmen.	5
Figura 2 – As construções tradicionais em terra portuguesas e a sua distribuição pelo território nacional: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique.	6
Figura 3 – Construções modernas em terra: a) Edifício habitacional, Brasil; b) Museu de arte SanBaoPeng, China.	8
Figura 4 - Representação gráfica dos limites de consistência do solo.	10
Figura 5 - Curva de compactação dos solos.	10
Figura 6 - Ciclo de vida do cimento Portland e do cimento reciclado.	13
Figura 7 - Prensas utilizadas na compactação dos BTC: a) Prensa mecânica Cinva-Ram; b) Prensa mecânica Terstaram; c) Prensa hidráulica.	15
Figura 8 - Construção com BTC: a) Laje de fundação e primeira fiada, b) Levantamento das paredes e pilares, c) Sistemas hidráulicos e elétricos.	18
Figura 9 – Determinação do limite de liquidez: a) mistura da terra com água; b) colocação da terra na concha de Casagrande; c) recolha da amostra para levar à estufa.	22
Figura 10 – Ensaio de limite de plasticidade: a) solo preparado para o ensaio de plasticidade; b) filamentos cilíndricos com 3 mm diâmetro; c) amostras para serem levadas à estufa.	23
Figura 11 – Ensaio de compactação: a) preparação da terra; b) solo em excesso no molde; c) molde pronto para a pesagem.	24
Figura 12 - Peneiração: a) séries de peneiros; b) e c) solo peneirado; d) cápsulas com as amostras da terra após a peneiração húmida.	25
Figura 13 – Determinação da percentagem de matéria orgânica: a) mistura da terra com água oxigenada; b) solo após secagem em estufa.	25
Figura 14 – Determinação da massa volúmica das partículas dos solos: a) calibração do picnómetro; b) picnómetro após colocação da terra.	26
Figura 15 - Produção do cimento reciclado: a) produção dos provetes de pasta de cimento; b) britagem dos provetes; c) balde de maxilas; d) moinho de rolos; e) moinho de bolas; f) peneiração do cimento; g) forno de câmara rotativa.	27
Figura 16 - Caracterização do cimento reciclado: a) produção da pasta de cimento reciclado; b) moldagem dos provetes; c) ensaio de flexão.	28
Figura 17 - Mistura: a) Produção da mistura na betoneira; b) Produção manual.	30
Figura 18 - Produção dos BTC: a) preparação dos cantos; b) moldagem; c) cura dos blocos.	31
Figura 19 - Ensaio de compressão: a) preparação do ensaio; b) provete após o ensaio.	34
Figura 20 - Ensaio de tração por flexão: a) montagem do provete ; b) provete após o ensaio.	35
Figura 21 - Ensaio de tração por compressão diametral: a) ensaio; b) provete após rotura.	36
Figura 22 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade.	37
Figura 23 - Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons.	38
Figura 24 – Ensaio com o esclerómetro pendular: a) Equipamento; b) Medição.	38
Figura 25 – Provetes do ensaio de retração.	39
Figura 26 - Ensaio de condutibilidade térmica.	40

Figura 27 - Ensaio de permeabilidade à água: a) pintura com tinta epóxi; b) ensaio.....	40
Figura 28 - Ensaio de absorção de água por imersão.	41
Figura 29 - Ensaio de absorção capilar: a) início do ensaio; b) provetes ao fim de 48 horas.	42
Figura 30 - Ensaio de absorção de água à baixa pressão.....	43
Figura 31 - Ensaio de erosão acelerada: a) equipamento utilizado; b) erosão superficial do bloco RC10; c) penetração de humidade.	44
Figura 32 - Curva granulométrica da terra selecionada.	45
Figura 33 - Massa volúmica no estado endurecido para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa até massa constante; após 28 dias el laboratório.	49
Figura 34 – Relação entre a massa volúmica aos 28 dias (ρ_{28d}) e a porosidade total, $P_{T;Mvf}$	50
Figura 35 - Curvas TG e DTG para as composições PC10 e RC10.	51
Figura 36 - Análise de difração de raios-X para as composições PC10 e RC10.	52
Figura 37 – a) Bloco RC10 poucas horas após a produção; b) comparação entre um bloco PC10 (topo) e um bloco RC10 (base).	53
Figura 38 – Resistência à compressão aos 28 dias no estado seco obtida por diferentes autores em BTC com diferentes teores de cimento como agente estabilizante.....	54
Figura 39 - Evolução da resistência à compressão aos 28 dias para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa até massa constante; após 28 dias el laboratório.	55
Figura 40 – Resistência à compressão do BTC aos 3, 7, 28 e 90 dias, em condições de ambiente laboratorial.....	55
Figura 41 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo para BTC curados em laboratório (cura húmida durante 7 dias seguido de cura em laboratório)	56
Figura 42 – Resistência à compressão relativa dos BTC, face aos BTC estabilizados com igual teor de CP. Para os BTC não estabilizados a comparação é estabelecida para 10% CP.	57
Figura 43 - Variação da resistência à compressão em função da percentagem de incorporação de CR nos BTC com 10% de ligante, para idades entre 3 e 28 dias.....	57
Figura 44 – Relação entre a resistência à compressão ao 28 dias ($f_{cm,28d}$) e a porosidade total, $P_{T;Mvf}$	58
Figura 45 - Relação entre a resistência à compressão ao 28 dias ($f_{cm,28d}$) e a massa volúmica aos 28 dias (ρ_{28d}).....	58
Figura 46 – Eficiência estrutural aos 28 dias para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa até massa constante; após 28 dias em laboratório.	58
Figura 47 – Resistência média à tração por compressão diametral e por flexão dos BTC curados em laboratório.....	60
Figura 48 – Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração.	61
Figura 49 – Relação em termos tensão-deformação (σ - ϵ) dos BTC com 10% CR e 10% CP.....	62
Figura 50 – Velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa; após 28 dias em laboratório.....	62
Figura 51 – Relação entre a massa volúmica e a velocidade de ultrassons - BTC curados em laboratório.....	63

Figura 52 – Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de ultrassons - BTC curados em laboratório.....	63
Figura 53 – Índice esclerométrico aos 28 dias para os BTC curados em laboratório, não estabilizados ou estabilizados com 10% de ligante.	63
Figura 54 – Relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico, IE_{PT} . aos 28 dias..	64
Figura 55 – Condutibilidade térmica aos 28 dias para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa; após 28 dias em laboratório.....	64
Figura 56 – Relação entre a condutibilidade térmica, λ_m , e porosidade total dos BTC, $P_{T,Mvf}$	65
Figura 57 – Relação entre a condutibilidade térmica, λ_m , e a massa volúmica seca de materiais de base cimentícia, tendo em consideração diferentes autores.	65
Figura 58 - Retração do BTC com 10% de CR (RC10) ou 10% CP (PC10) durante 21 dias, no gráfico da direita é representado os valores individuais e no da esquerda os valores médios.	66
Figura 59 – Imersão dos BTC com diferentes composições: a) BTC não estabilizado (T); b) todas as outras composições.....	67
Figura 60 – Absorção de água às 24 e 48 horas, em percentagem de massa.	68
Figura 61 – Absorção de água às 24 e 48 horas, em percentagem de volume.	68
Figura 62 – Relação entre a absorção, em percentagem de massa, e a porosidade total dos BTC ($P_{T,Mvf}$).	68
Figura 63 – Relação entre a absorção, em percentagem de volume, e a porosidade total dos BTC ($P_{T,Mvf}$).	68
Figura 64 – Evolução da absorção de água por capilaridade.....	69
Figura 65 – Evolução do coeficiente de absorção de água por capilaridade.	69
Figura 66 – Fases do ensaio de absorção por capilaridade: a) inicial; b) 24 horas; c) 72 horas.	70
Figura 67 – Evolução da absorção de água a baixa pressão.	70
Figura 68 - Coeficiente de permeabilidade, K_w , dos BTC estabilizados com 10% de cimento.	72
Figura 69 - Coeficiente de permeabilidade, K_w , versus porosidade global.	72
Figura 70 - Porosidade capilar versus permeabilidade de pastas cimentícias (Powers, 1958)	72
Figura 71 – Face dos BTC antes e após o ensaio de erosão acelerada a 2,5 bar: a) face de referencia (antes do ensaio); b) face do PC10 após 1 hora de ensaio; c) face do RC10 após 1 hora de ensaio; d) face do bloco não estabilizado a uma pressão de 0,5 bar ao fim de 7 minutos.	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens na utilização do BTC face ao adobe e a taipa.	19
Tabela 2 – Características da terra para a produção do BTC.	19
Tabela 3 – Proporções recomendadas de cimento na estabilização do BTC.	20
Tabela 4 – Normas utilizadas nos ensaios de caracterização do solo.	22
Tabela 5 – Composição dos blocos produzidos	30
Tabela 6 - Propriedades do cimento Portland.....	26
Tabela 7 – Ensaios e respetivos documentos normativos consultados.	32
Tabela 8 – Resumo dos provetes utilizados em cada ensaio.....	33
Tabela 9 – Propriedades do cimento reciclado (CR).	46
Tabela 10 - Massa volúmica fresca, ρ_f , teor de água, composição, teor de vazios, V_v , estimativa da porosidade total, $P_{T,Mvf}$, e espessura média dos BTC, e_{BTC}	47
Tabela 11 – Massa volúmica no estado endurecido, aos 28 dias - ρ_{28d} , seca - ρ_{seca} , saturada - $\rho_{saturada}$	49
Tabela 12 - Resistência média à compressão dos BTC entre 3 e 90 dias de idade, para diferentes condições de ensaio (laboratório; seco; saturado).	54
Tabela 13 – Resistência à tração por compressão diametral, f_{ctsp} , e por flexão, f_{ctmr} , aos 28 dias. Ensaios sobre provetes curados em laboratório (Lab), ou em câmara húmida (Hum).	59
Tabela 14 – Coeficiente de absorção aos 5 minutos, $C_{abs,5min}$, e tempo total de ensaio nos BTC com 10% de ligante.....	71
Tabela 15 - Resultados do ensaio de erosão acelerada.....	73
Tabela 16 – Resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios apresentados no capítulo 3.	76

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- a/l – Relação entre a massa de água e a massa de ligante (cimento)
- Afm – Monosulfoaluminato de cálcio hidratado
- AL – Humidade de ensaio laboratorial, em ambiente com cerca de 19-26°C e HR de 55-75%
- BTC – Bloco de terra comprimida
- CP – Cimento Portland
- CR – Cimento Reciclado
- CH – Hidróxido de Cálcio [Ca(OH)₂]
- C₃S – Silicato Tricálcico [3CaO·SiO₂]
- C₂S – Silicato Bicálcico [2CaO·SiO₂]
- C₃A – Aluminato Tricálcico [3CaO·Al₂O₃]
- C-S-H – Silicatos de Cálcio Hidratados
- DTG – Derivada da curva da termogravimetria
- DRX – Difração Raios-X
- HR – Humidade relativa
- HU – Humidade de ensaio, em ambiente com cerca de 20°C e HR superior a 90%
- IP – Índice de plasticidade
- IE^{PT} - índice esclerométrico obtido com o esclerômetro pendular do tipo PT
- IST – Instituto Superior Técnico
- LL – Limite de liquidez
- LP – Limite de plasticidade
- MO – Matéria orgânica
- N/A – Não avaliado/Não existe
- RCD – Resíduos de construção e demolição
- SE – Humidade de ensaio seco
- ST – Humidade de ensaio saturado
- TG – Termogravimetria
- TOA – Teor ótimo em água

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A terra é um dos principais elementos da natureza, sendo utilizada há milénios como material de construção. A necessidade de proteger-se levou o homem a construir abrigos com materiais naturais como a terra, a madeira, a pedra, as fibras naturais, entre outros. Um dos vestígios mais antigos da construção em terra, datado de aproximadamente 10 000 AC, pode ser encontrado na Mesopotâmia (Gomes, 2005). É estimado que atualmente mais de 30% da população mundial ainda viva em habitações em terra (Kakizawa, 2007; Little *et al.*, 2001), sendo que a maior parte destas construções se encontram em regiões menos desenvolvidas do globo, na América Central, no Médio Oriente e no Continente Africano. Em Portugal, a construção em terra destaca-se principalmente pela construção em taipa, adobe e tabique (Jorge *et al.*, 2005). Estes três métodos construtivos representam atualmente cerca de 5-6% da construção em todo o país, verificando-se uma maior representatividade nas regiões centro-norte e sul (Censos, 2011).

A partir do século XIX, com o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de construção, a utilização da terra na construção entrou em declínio. No entanto, com a crescente preocupação de implementar uma construção economicamente e ambientalmente mais sustentável, tem renascido o interesse na utilização da terra como material de construção. Entre outros motivos, aponta-se como principais benefícios o facto de a terra ser um material natural, abundante, de fácil exploração, ecológico, reutilizável, não gerador de resíduos e com reduzida energia incorporada, para além de contribuir de forma positiva para o conforto higrotérmico e para a melhor qualidade do ambiente interior das habitações (Riza, 2016; Lourenço, 2002).

De facto, a construção em terra caracteriza-se por envolver um baixo consumo de energia e um reduzido nível de emissões de CO₂. Assim, apesar da construção em terra ter tido menos expressão nos países desenvolvidos, a tendência dos últimos anos tem sido uma maior reconsideração deste material na arquitetura moderna, como sucede na Alemanha e na Austrália, que já preveem normas para a estes tipos de construções desde meados do século XX (Little *et al.*, 2001; Ribeiro *et al.*, 2016).

A principal desvantagem atribuída à construção em terra, para além da sua inadequabilidade em edifícios altos, é a sua elevada suscetibilidade à água que reduz de forma significativa as suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. Nesse sentido, os blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com materiais cimentícios são uma das abordagens mais eficientes para contornar este problema. Face a outras técnicas em terra, como o adobe, é garantida uma maior velocidade de processamento, menor variabilidade e maiores níveis de resistência mecânica e durabilidade, resultante da ação extra de compactação inerente ao seu fabrico. Por sua vez, o cimento tem-se revelado como sendo o estabilizante mais eficiente no incremento de resistência mecânica e durabilidade à água dos BTC. Contudo, a estabilização com este tipo de ligante entra em conflito com o principal objetivo da construção em terra, que visa um produto de natureza ecológica e sustentável. Atualmente, é documentado que o setor da construção contribui com mais de 30% das emissões de carbono (UNEP), sendo que os materiais de base cimentícia assumem grande parte desse impacto,

em particular a produção do cimento, que é responsável por cerca de 8% das emissões mundiais de CO₂ geradas pelo homem (Chatham House, 2018). Desse modo, é importante encontrar estabilizantes alternativos que sem comprometer a qualidade técnica da construção em terra, mantenham em simultâneo a sua natureza sustentável e ecológica.

No Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico tem sido desenvolvida uma nova linha de investigação, no âmbito do projeto EcoHydB - PTDC/ECI-CON/28308/2017, que visa a produção e caracterização de cimento reciclado de baixo carbono, termoativado a partir de resíduos de betão antigo. Face ao cimento Portland (CP) convencional, o cimento reciclado (CR) permite reutilizar os resíduos de construção e demolição, com redução do seu impacto no ambiente e contribuindo ainda para a redução em mais de 60% das emissões de CO₂ e para a diminuição do consumo de recursos naturais. Estudos anteriores demonstram a capacidade hidráulica deste novo tipo de ligante, bem como a sua eficiência quando inserido em materiais de base cimentícia, atingindo-se evoluções de resistência perto dos verificados no cimento Portland (Bogas 2020, Real *et al.* 2020, Carriço *et al.* 2020).

Assim, considera-se que o cimento reciclado reúne as condições necessárias para ser explorado como estabilizante alternativo à produção dos BTC, salientando-se que um estudo deste tipo nunca foi realizado.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

A presente dissertação, desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, tem como principal objetivo a produção e caracterização de BTC mais sustentáveis, utilizando cimento reciclado termoativado a partir de resíduos de pasta cimentícia hidratada. Pretende-se caracterizar os novos tipos de BTC em termos das suas principais propriedades físicas, mecânicas e de resistência à água, confrontando-os com BTC de referência não estabilizados ou produzidos com igual teor de cimento Portland (CP).

Para cumprimento deste objetivo, foi planeado um extenso trabalho experimental que envolveu numa primeira fase a produção e caracterização de cimento reciclado, seguindo-se a produção de BTC com diferentes composições, a caracterização dos BTC no estado fresco (massa volúmica e porosidade) e finalmente, a caracterização dos BTC no estado endurecido, em termos de resistência mecânica (compressão, tração por compressão diametral, flexão), módulo de elasticidade, retração, velocidade de ultrassons, dureza superficial, condutibilidade térmica e resistência à água (absorção por imersão, capilaridade, a baixa pressão, permeabilidade, erosão acelerada por jato de água). De modo a avaliar a influência do tipo e teor de estabilizante, foram produzidos BTC não estabilizados e com 5% ou 10 % de ligante, CR ou CP. Complementarmente, foram realizados ensaios de termogravimetria e difração de raios-X para aferir a capacidade de hidratação do cimento reciclado quando incorporado nos BTC.

1.3 MOTIVAÇÃO

A construção sustentável tem sido um tema de grande popularidade nos últimos anos devido a uma crescente preocupação com o meio ambiente. O setor da construção é dos que mais contribui para a poluição do ar e da água e é estimado que mais de 50% dos recursos naturais sejam consumidos pelo sector e o consumo de energia em edifícios represente até 40% do valor global, sendo ainda a indústria responsável pela geração de maior quantidade de resíduos (UNEP).

Nesse sentido, como discutido, a construção em terra estabilizada com ligantes de baixo carbono visa contribuir para uma indústria da construção mais ecológica e sustentável, alinhada com os objetivos de desenvolvimento sustentável das nações unidas, em especial os pilares 9 e 12 relacionados com a “Indústria, inovação e infraestruturas” e a “produção e consumo sustentáveis”, respetivamente. Ainda em estudo, o cimento reciclado que tem sido desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico apresenta-se como uma alternativa viável à estabilização de BTC. A utilização simultânea de terra, que é um material potencialmente 100% reciclável, aliado à incorporação de cimento resultante de resíduos de materiais cimentícios, vai promover o desenvolvimento de uma economia circular para o sector da construção.

Assim, o presente trabalho, ao explorar, pela primeira vez, a incorporação inovadora de cimento reciclado em substituição de CP nos BTC, é motivo suficiente para justificar a sua realização e dar lugar ao crescimento de uma nova linha de investigação neste domínio.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada em 5 capítulos, referindo-se o primeiro e o último à introdução e conclusão, respetivamente. A estrutura do capítulo 3 e 4, que constitui o corpo principal da dissertação, foi elaborado de acordo com o plano definido para o trabalho experimental. Este foi desenvolvido segundo 4 etapas principais, envolvendo a preparação da pasta de cimento de origem e a produção do cimento reciclado, a seleção e caracterização da terra utilizada nos BTC, a produção e caracterização dos BTC no estado fresco e finalmente a caracterização dos mesmos no estado endurecido. Em seguida resume-se os principais aspetos considerados em cada capítulo.

- O capítulo 1 introduz e define a motivação, os objetivos, a metodologia e a organização da dissertação.
- O capítulo 2, referente ao estado de arte, apresenta um breve resumo de estado de arte relativo aos temas abordados na dissertação. O principal objetivo deste capítulo é evidenciar alguns aspetos relevantes referentes à construção em terra e à produção de BTC, à seleção e estabilização da terra, à produção de cimento reciclado e à caracterização dos BTC.
- O capítulo 3, campanha experimental, descreve os materiais utilizados, metodologias utilizadas na produção do CR e dos BTC, e ensaios de caracterização dos mesmos no estado fresco e endurecido.
- O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com o referido no capítulo 3.

- O capítulo 5 resume as principais conclusões obtidas ao longo do capítulo 4. São ainda apresentadas propostas de desenvolvimentos futuros, dando seguimento ao presente estudo.

No final deste documento é ainda apresentado a lista de referências bibliográficas, bem como os anexos com os resultados obtidos nos vários ensaios descritos no capítulo 3.

2 ESTADO DE ARTE

O presente capítulo, tem como objetivo o enquadramento histórico e científico na utilização da terra como um material de construção, dando a conhecer as suas principais propriedades, características, vantagens e limitações. Um foco especial é dado aos blocos de terra comprimida (BTC), que aparecem como um material em terra mais adequado às novas exigências de durabilidade e funcionalidade das construções. Em seguida aborda-se a importância da estabilização da terra e a necessidade de se procurarem soluções sustentáveis para este efeito que permitam manter os reduzidos níveis de energia incorporada e a natureza ecológica da construção em terra.

2.1 APLICAÇÃO DA TERRA NA CONSTRUÇÃO

A terra é um dos materiais de construção mais antigos, cuja sua utilização remonta às primeiras sociedades agrícolas, entre 12000 a 7000 a.C. Ainda hoje é possível encontrar construções em terra com mais de 3000 anos, contrariando a visão de que este tipo de construções está necessariamente associado a soluções precárias e de reduzida durabilidade. Na realidade, a par da pedra natural, a terra é considerada o material de construção com maior registo histórico da sua utilização (Cid-falceto *et al.*, 2012; Kinuthia, 2015; Hall *et al.*, 2012).

Algumas das pirâmides do Antigo Egito, troços da Grande Muralha da China, a Mesquita de Djenné no Mali e a cidade de Shibam no Iêmen são exemplos de construções em terra, classificadas como património mundial pela UNESCO (2021). No continente africano, a Mesquita Djenné (Figura 1a) é considerada como uma das construções em terra mais importantes, tendo sido construída inicialmente em 1280 e reconstruída em adobe no ano de 1906. É considerada a maior construção existente em adobe, com a torre principal de 20 metros de altura (Jean-Louis, 1987; Caillié, 1830).



Figura 1 – Construções em terra: a) Mesquita Djenné (Mundo, 2015), Mali; b) Cidade de Shibam, Iêmen (Zero, 2020).

Shibam, representada na Figura 1b), é conhecida como uma das primeiras cidades com edifícios em terra apresentando cerca de 5 a 11 andares de altura. A sua construção teve início no século III, sendo reconstruída no século XVI devido a uma grande inundação que danificou as fundações da antiga cidade. A construção destes edifícios tem por base as técnicas de construção em adobe cuja espessura se estreita gradualmente nos andares superiores, o que permite melhorar a sua estabilidade (Helfritz, 1937).

A Europa tem também uma longa história de construção tradicional em terra, incluindo-se algumas dessas construções no inventário de património mundial da UNESCO (Hall *et al.*, 2012; Delgado *et al.*, 2006). Alguns desses exemplos são: a cidade de Alhambra, Espanha que é considerada a cidade muçulmana medieval mais bem preservada do mundo, sendo considerada património da humanidade em 1984; o Mosteiro de Maulbronn, Alemanha que foi considerado património da humanidade em 1993 (UNESCO, 2021).

Em Portugal, a construção em terra encontra-se espalhada um pouco por todo o país, cobrindo diferentes períodos da nossa história, desde construções domésticas do pré-histórico (Bruno *et al.*, 2010), construções pré-medievais (Parracha *et al.*, 2019), medievais (Gomes *et al.*, 2019), e pós-medievais (Parracha *et al.*, 2019). Essencialmente, destacam-se as técnicas de construção em adobe, taipa e tabique. Na Figura 2 é apresentado um panorama geral da distribuição destes tipos de construção pelas regiões de Portugal.

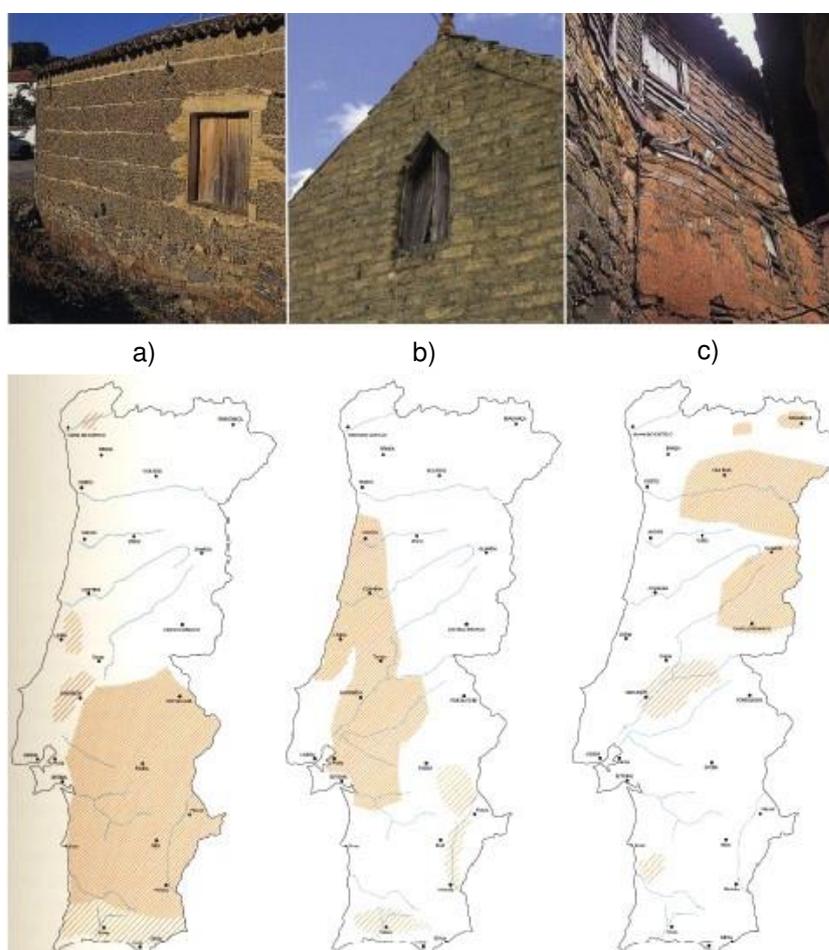


Figura 2 – As construções tradicionais em terra portuguesas e a sua distribuição pelo território nacional: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique (Jorge *et al.*, 2005).

A maioria das construções em terra distribuem-se pelo centro e sul do território nacional. A taipa é quase exclusiva do centro sul do país devido ao domínio Islâmico entre os séculos VII e XII. No Norte de Portugal a construção em tabique tem uma maior expressão e o adobe predomina no litoral centro, devido às próprias características dos materiais e à maior abundância em água (Jorge *et al.*, 2005).

2.2 CONSTRUÇÃO EM TERRA ATUALMENTE

Atualmente, é estimado que cerca de 30 a 50% da população mundial ainda viva em habitações de terra (Kakizawa, 2007; Little *et al.*, 2001). No entanto, apesar da terra ser um material de construção milenar, após a revolução industrial este material caiu em desuso, sendo progressivamente substituído por novos materiais e técnicas de construção mais avançadas, mais compatíveis com as necessidades modernas da população (Rix, 1998; Riza *et al.*, 2010). O betão e o tijolo cerâmico assumiram maior importância, tratando-se de materiais de produção mais versáteis e associados a maior resistência, durabilidade e mais fácil industrialização.

A construção em terra perde-se ainda com a migração da população para as grandes urbanizações e com a necessidade de construção em altura. Assim, a maioria das construções em terra atuais são encontradas no Continente Africano, Médio Oriente e América Central, embora a cultura em construção em terra seja partilhada por todos os países. Como referido, são vários os exemplos existentes de construções em terra que se difundem pela Europa, sendo vários deles considerados como motivo de interesse para a sua manutenção e reabilitação (Hall *et al.*, 2012).

No entanto, apesar da construção em terra ter atravessado um período longo de adormecimento, a necessidade atual de uma construção mais sustentável fez com que ressurgisse o interesse na construção em terra. O reduzido impacto ambiental, a baixa energia incorporada, a elevada disponibilidade de matéria-prima no planeta, o baixo custo, a fácil reciclagem, o aumento do conforto higrotérmico e da melhoria de qualidade do ambiente interior das habitações, a resistência ao fogo e a elevada capacidade estética da construção em estética (Hall *et al.*, 2012; Damme *et al.*, 2017; Jayasinghe *et al.*, 2016; Walker, 2004), são algumas das vantagens que impulsionam a sua utilização e se começam a sobrepor às questões relacionadas com a eventual menor durabilidade e resistência mecânica, a construção em altura e a baixa produtividade.

Em particular destaca-se o facto de a terra possuir um valor de energia primária cerca de 30 vezes inferior ao betão e aos tijolos de barro vermelho, e 3 ordens de magnitude inferior ao do aço (Schroeder, 2012). De facto, a construção em terra tem muito a beneficiar com a futura legislação que privilegia a produção e aplicação de materiais mais ecológicos.

Nos últimos anos, a construção em terra beneficiou também do avanço de novos materiais e soluções construtivas, permitindo também reduzir e aproximar estes materiais aos requisitos técnicos e funcionais constantes na normalização atual.

A França, a Alemanha, a Áustria, o Brasil, o Reino Unido, a Índia, os EUA e a Austrália, são exemplos de países que têm vindo a considerar a construção em terra como uma alternativa credível à construção corrente (Hall *et al.*, 2012). Na França, o Grupo CRATerre é uma referência a nível internacional de pesquisa e desenvolvimento da construção em terra. Na Austrália, Espanha, França e na Alemanha têm aumentado o volume de pesquisas realizadas nesta área assim como o desenvolvimento de documentos normativos, dando-se reconhecimento à crescente aceitação da terra como um material de construção contemporâneo (Schroeder, 2012). No Brasil, há um grande desenvolvimento na construção com BTC, conhecido por tijolo ecológico ou bloco terra-cimento. Na

Figura 3 apresenta-se dois exemplos de construções modernas em terra, uma moradia construída em BTC no Brasil e um museu de arte construído em Taipa na China.

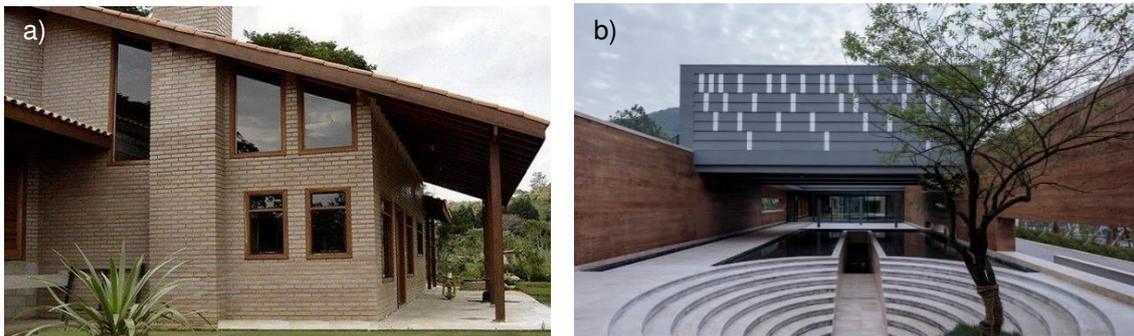


Figura 3 – Construções modernas em terra: a) Edifício habitacional, Brasil (Oliveira, 2019); b) Museu de arte SanBaoPeng, China (Shuang, 2017).

Neste sentido, os blocos de terra comprimida, principalmente quando estabilizados, surgiram como uma abordagem promissora para a construção em terra, alicerçados no aumento das suas propriedades mecânicas e de durabilidade e associados a uma maior produtividade e mais fácil controle da sua produção (Cid-falceto *et al.*, 2012; Rigassi, 1985; González-López, 2018; Silva, 2015). Na secção 2.7, aborda-se este tipo de blocos que foram alvo de estudo no presente trabalho.

2.3 A TERRA E AS SUAS PROPRIEDADES

A terra, material de construção geralmente abordado no meio científico como solo, é um material extremamente abundante na natureza e tem origem na meteorização e erosão das rochas por ação de agentes atmosféricos (Motta, 1997). O solo contém partículas de diversas constituições minerais e com uma enorme gama de dimensões e formas. É muito comum, no seu estado natural, os solos conterem água e ar, ocupando os espaços vazios entre as suas partículas. Na sua constituição, há matérias orgânicas como raízes, vegetais e restos de animais, indesejáveis nos materiais de construção. No entanto, ocorre uma diminuição acentuada de matéria orgânica com a profundidade (Lourenço, 2002).

Devido ao seu processo de formação, o solo torna-se um material extremamente heterogêneo e complexo fazendo assim, com que a escolha correta da matéria-prima seja um fator fundamental para garantir o sucesso na utilização da terra como um material de construção. As diferentes técnicas construtivas, exigem diferentes características deste material, sendo muito importante conhecer as suas propriedades e características (Neves, 2016).

Em termos de propriedades do solo, a coesão pode ser definida, de uma forma genérica, como a resistência ao corte de um solo quando não há nenhuma ação externa sobre ele. Geralmente, esta resistência tem origem na pressão capilar da água intersticial do solo e nas ligações entre as partículas, exercidas pelo potencial atrativo de natureza molecular. Esta propriedade é mais expressiva em solos finos, como é o caso das argilas. Nos solos granulares, como as areias, a coesão não é significativa e o ângulo de atrito é o principal fator na resistência ao corte. A resistência e a rigidez dos solos diminuem quando há um aumento da pressão da água e da quantidade de água no seu meio (Neves, 2016).

A compressibilidade do solo esta ligada à sua variação de volume devido ao rearranjo das partículas e à variação dos vazios. O solo é um sistema trifásico, composto por partículas sólidas, água

e ar. Quando o solo é submetido a um carregamento, este tende a expulsar o ar e a água existente no seu meio, provocando uma diminuição no volume de vazios. As partículas sólidas não são compressíveis, mas rearranjam-se no espaço liberado pela água e o ar. A distorção sofrida não é totalmente recuperável, ou seja, o solo comporta-se como um material plástico (Neves, 2016).

2.4 IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Os solos são classificados de acordo com a sua composição, dimensão das partículas e comportamento à água. Neste contexto, os ensaios fundamentais para a identificação das suas principais características são a análise granulométrica, os limites de consistência e o teor ótimo de água. Na análise granulométrica é obtida a distribuição das dimensões dos grãos de um solo, ou seja, determina-se a dimensão das partículas do agregado e das suas respetivas percentagens. As partículas de maiores dimensões (areias e seixos), são peneiradas e obrigadas a passar por uma serie de peneiros de malha normalizada e sucessivamente mais apertada. Em relação às partículas de menores dimensões (argilas e siltes), o solo é misturado com água destilada, ocorrendo o processo de sedimentação das partículas (LNEC E-239, 1970). A curva granulométrica do solo, é apresentada em escala logarítmica, indicando-se a percentagem passada acumulada em função da dimensão das partículas. Como referido, o solo é composto maioritariamente por matéria mineral: seixo, areia, silte e argila. A seguinte classificação granulométrica é definida segundo a especificação LNEC E-239 (1970):

- Argila: diâmetro inferior a 0,002 mm, elemento responsável pela coesão dos solos;
- Silte: entre 0,002 a 0,06 mm de diâmetro, coesão apenas em contacto com a água;
- Areia: entre 0,06 a 2 mm de diâmetro, inerte, de fraca coesão e resistência interna elevada;
- Seixo: entre 2 a 60 mm de diâmetro, inerte e sem coesão.

A granulometria do solo pode ser classificada como extensa, quando existem partículas de várias dimensões e uniforme nos casos onde as partículas têm dimensões semelhantes. Pode-se ter uma boa ou má graduação, se tiver todas as dimensões presente ou apenas algumas, respetivamente (Falcão, 2014).

O comportamento do solo depende, não apenas da sua granulometria, mas também da sua interação com a água (Rigassi, 1985). Os limites de consistência são os valores de teor em água que marcam as fronteiras do comportamento do material, sendo apenas aplicáveis a solos com um comportamento plástico. O solo com um teor em água inferior ao limite de retração (LR) tem um comportamento sólido, ou seja, não tem coesão e não é moldável. Os limites relevantes para a classificação do solo são os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), bem como o respetivo índice de plasticidade (IP). Estes limites permitem avaliar o comportamento da argila sem a necessidade da determinação da sua composição mineralógica. O limite de plasticidade representa o teor em água em que o solo passa de um comportamento semi-sólido para um comportamento plástico. O limite de liquidez define o teor em água mínimo para que o solo apresente um comportamento líquido. Neste caso, o solo comporta-se como um fluido denso, de baixa coesão e com impossibilidade de ser moldado. O índice de plasticidade, representa o intervalo de valores para a qual o solo apresenta um comportamento plástico. Neste estado, o solo demonstra uma maior coesão e elevada consistência, ou

seja, permite ser moldado mantendo a sua forma (Falcão, 2014). A Figura 4 representa estes limites em função do teor de água.

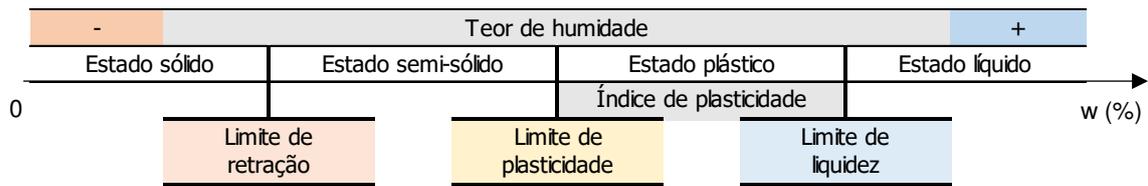


Figura 4 - Representação gráfica dos limites de consistência do solo.

A terra, quando utilizado para fins da engenharia, é muitas vezes compactada de modo a obter propriedades satisfatórias de resistência ao corte, compressibilidade e permeabilidade. Os ensaios de compactação fornecem a base para determinar o volume final de compactação e a quantidade de água necessária. O teor ótimo de água (TOA), define-se como o teor em água que confere a maior compactação à terra (Fernandes, 2011). O grau de compactação de um solo é influenciado por três fatores, sendo eles, a força de compactação, a composição do solo e o teor de água. Quanto maior a força aplicada, maior será a massa volúmica do solo compactado. No que se refere à composição, um solo com uma granulometria extensa e bem graduada, será naturalmente mais apto a ser compactado devido à maior facilidade de rearranjo das suas partículas e preenchimento dos espaços vazios (Rigassi, 1985). Na definição da curva de compactação de um solo, a energia aplicada e a composição do solo são constantes, sendo o teor em água a variante. A curva é definida pelo teor em água (w) e o respetivo peso volúmico seco (γ_d), conforme apresentado na Figura 5.

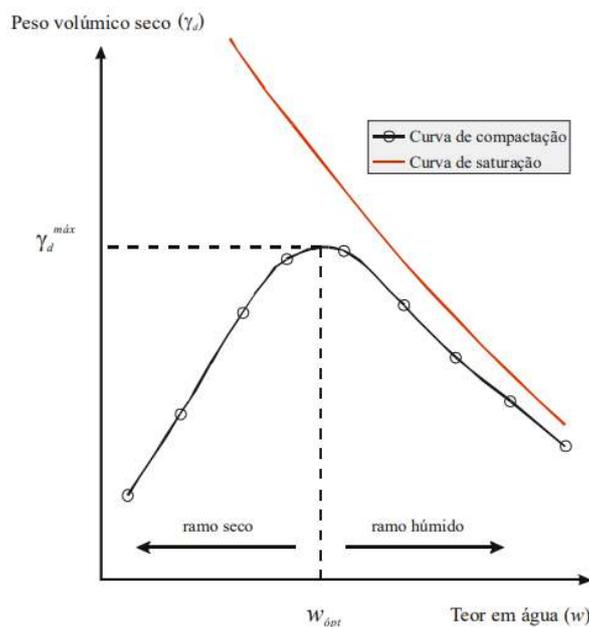


Figura 5 - Curva de compactação dos solos (Santos, 2008).

A compactação do solo é facilitada pela adição de água devido à lubrificação das partículas e à desagregação das partículas que se encontravam aglomeradas. No entanto, quando o teor em água é superior ao ótimo, verifica-se uma diminuição do peso volúmico seco devido à incompressibilidade da água e da retenção de ar, aprisionado entre as partículas do solo (Rigassi, 1985). Na ASTM D2487-06 (2000) a classificação do solo é realizada com base nos resultados dos ensaios de análise granulométrica e limites de consistência. Em apoio a esta classificação é geralmente utilizada a carta

de plasticidade utilizada para a classificação das argilas e o diagrama triangular de Feret que fornece uma visão geral sobre a classificação dos solos de acordo com a sua composição.

A qualidade das construções em terra está relacionada especialmente com as propriedades tecnológicas e mineralógicas da argila utilizada. A granulometria das argilas tem uma relação intrínseca com a resistência mecânica, sendo uma das características mais importantes dos minerais argilosos. Esta propriedade interfere em outras características, como a plasticidade e a permeabilidade, que são dependentes da dimensão, distribuição granulométrica e forma das partículas (Gomes, 1988).

A argila é constituída por impurezas e, por minerais argilosos, podendo-se incluir a presença de oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio, sendo que a complexidade e variabilidade das argilas deve-se à variação qualitativa e quantitativa dos minerais argilosos e não argilosos (matéria orgânica) que as constituem (Meira, 2001). As partículas da argila possuem uma elevada superfície específica e os seus minerais a propriedade de trocar iões fixos na superfície exterior dos seus cristais ou localizados em espaços interiores, mas acessíveis por outros iões existentes nas soluções aquosas envolventes (Meira, 2001).

2.5 ESTABILIZAÇÃO DA TERRA

O maior problema associado aos materiais em terra é a sua reduzida integridade e elevada suscetibilidade à água (Jayasinghe *et al.*, 2016; Alam *et al.*, 2015; Reddy, 2012). Acrescente-se ainda a elevada variabilidade do solo que dificulta a sua utilização generalizada (Schroeder, 2012). Neste sentido, a estabilização permite melhorar significativamente a resistência mecânica, resistência à água e reprodutibilidade dos materiais em terra (Schroeder, 2012; Mansour *et al.*, 2016).

Assim, a estabilização da terra consiste na alteração das suas características com o intuito de melhorar o seu comportamento mecânico e/ou físico. Os métodos de estabilização da terra podem ser divididos da seguinte forma (Silva, 2015; Reddy, 2012):

- A **estabilização física** consiste na adição ou remoção de um ou mais materiais, sendo as formas mais habituais, a adição de fibras com o objetivo de controlar a variação dimensional do material e a adição/remoção de um determinado agregado de modo a corrigir a granulometria, permitindo assim, um melhor preenchimento dos vazios e/ou a correção do teor de argila/areia da terra.
- A **estabilização mecânica** consiste em submeter a terra a uma ação mecânica, compactando-o de modo a obter-se uma maior compactidade. Este método permite um aumento na resistência mecânica e uma redução do volume de vazios.
- A **estabilização química** advém da introdução de uma nova substância na terra, criando-se novos compostos químicos de modo a aumentar a coesão entre as suas partículas. Este processo contribui significativamente para o aumento da resistência e durabilidade dos materiais em terra, sendo os estabilizantes mais comuns o cimento, a cal e o betume.

A presença de minerais argilosos expansivos pode causar dilatação excessiva quando a terra entra em contacto com a água e retrai após secagem. Neste caso, a cal é utilizada como estabilizador, reagindo com os minerais argilosos na sua superfície, o que proporciona a sua estabilização (Venkatarama, 2012). No entanto, não permite aumentar significativamente a sua resistência e coesão.

Neste caso, o cimento é o ligante hidráulico mais eficiente e mais utilizado na estabilização da terra, permitindo aumentar a resistência mecânica, a estabilidade volumétrica e a durabilidade dos materiais em terra, devido à ação de aglutinação que cimenta as partículas da terra (Jayasinghe *et al.*, 2016; Taallah *et al.*, 2016; Bogas *et al.*, 2019). O gel-CSH originado pelas reações de hidratação, interage principalmente com as frações de areia e seixo, aglutinando e cimentando estas partículas. Esta é, provavelmente, a principal razão para o aumento da resistência.

Na estabilização de BTC são usuais teores de cimento de cerca de 5-10% (Reddy, 2012). Damme e Houben (2017) referem que até 10% de cimento, da massa da terra, a resistência mecânica dos BTC pode ser aumentada em 2 a 3 vezes. Porém, acima de 10%, a resistência deixa de ser significativamente afetada, podendo inclusivamente diminuir (Riza *et al.*, 2015). No entanto, apesar do cimento aumentar as características de resistência e durabilidade dos materiais estabilizados, falha na questão da sustentabilidade, visto que se trata de um material cuja produção está associada a elevadas emissões de CO₂, elevado consumo de matérias primas naturais e necessidades elevadas de energia térmica (WBCSD, 2009). De facto, a maioria dos entusiastas europeus na construção em terra consideram que a utilização de cimento vai contra as expectativas ambientais e à própria natureza ecológica da terra (Hall *et al.*, 2012). Nesse sentido, é sugerido que apenas a consideração de estabilizadores de baixo carbono é viável para se atingirem os níveis desejáveis de neutralidade em relação ao nível de emissões e energia incorporada (Hall *et al.*, 2012).

Neste contexto, têm sido desenvolvidos vários estudos que consideram a incorporação de estabilizantes naturais, como resinas naturais (Millogo *et al.*, 2014), sub-produtos industriais, como sílica fumo (Kerali 2001; Abdulsalam *et al.*, 2018), cinza volante (Egenti, 2013), escória (Sekhar *et al.*, 2018) e outros materiais pozolânicos (Danso *et al.*, 2019; Izemouren *et al.*, 2015). No entanto, a inclusão destes produtos não tem tido grande sucesso, falhando em termos de viabilidade técnica e económica. Refere-se a reduzida durabilidade à água em BTC com produtos naturais (Yalley, 2013) ou a sua perda excessiva de eficiência. Neste contexto, foi iniciada uma linha de investigação no departamento de engenharia civil, arquitetura e georrecursos do Instituto Superior Técnico, que visa a produção e desenvolvimento de cimentos reciclados obtidos a partir de detritos de betão endurecido. Este tema é abordado em seguida, na secção 2.6.

2.6 O CIMENTO RECICLADO

Nos últimos anos tem-se notado uma crescente preocupação com o meio ambiente, incentivando a procura de soluções mais sustentáveis e uma melhor gestão dos recursos naturais. O tema deste subcapítulo parte deste princípio, apresentando o cimento reciclado como uma solução mais sustentável e que promove a economia circular na indústria da produção do cimento. Resumidamente, será exposta a motivação para o seu desenvolvimento, a origem, o processo de produção e as suas características.

A produção do cimento tem um enorme impacto na sociedade e, segundo ao relatório de atividades da Associação Europeia do Cimento (CEMBUREAU, 2019) em 2018 foram produzidos, aproximadamente, 3,99 mil milhões de toneladas de cimento pelos 20 principais países produtores, a

China contribui para 54,5 % desse valor, seguindo a Índia e a Europa com 8,2 % e 6,4 %, respetivamente.

Ao longo do seu ciclo de vida, o cimento é responsável por diversos problemas ambientais como o elevado consumo de matérias primas (CEMBUREAU, 2019), a libertação de mais de 750 kg de CO₂ para a atmosfera por tonelada de clínquer produzido (principal constituinte do cimento) (Kajaste e Hurme, 2016), o alto consumo energético associado ao seu tratamento térmico (CEMBUREAU, 2019) e o depósito dos resíduos de construção e demolição (RCDs) em aterros. Na Figura 6 é apresentada uma comparação entre o ciclo de vida do cimento Portland e do cimento reciclado.

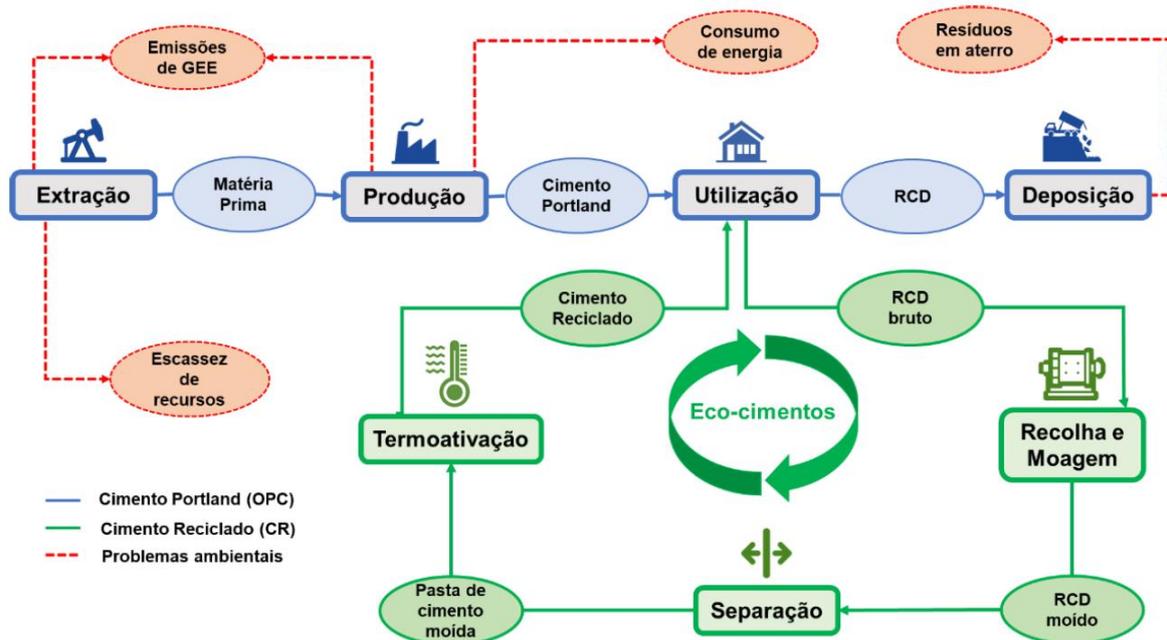


Figura 6 - Ciclo de vida do cimento Portland e do cimento reciclado (Bandeira, 2020).

O cimento reciclado promove a reutilização dos materiais cimentícios presentes nos RCDs, ou seja, reduz a exploração de matérias primas e o depósito de resíduos em aterros e, a sua produção permite uma redução superior a 60% das emissões de GEE (gases de efeito de estufa) para a atmosfera, estando também associada a um menor consumo energético em relação ao cimento Portland (Bandeira, 2020; Carriço *et al.*, 2020). Provavelmente, Splittgerber e Mueller (2003) foram os primeiros a tentarem a recuperação da ligação hidráulica de materiais cimentícios através do tratamento térmico. Estes autores formularam uma hipótese em que reverter o processo de ligação da hidratação do cimento era possível e desde então muitos trabalhos tem-se vindo a desenvolver sobre este tema.

O conceito por de trás do cimento reciclado, como apresentado na Figura 6, está na separação da fração de cimento dos outros componentes presentes nos RCDs, que é então reduzido a pó e finalmente sujeito a um tratamento térmico às altas temperaturas (Carriço *et al.*, 2020).

A separação dos constituintes do betão (agregados, areias, aço e pasta de cimento) é um dos principais desafios no processo de reciclagem do cimento, no entanto, o departamento de engenharia civil do IST tem desenvolvido um procedimento que tem se mostrado ser muito promissor (Bogas *et al.*, 2019), no entanto, por ainda não ser um método economicamente viável, leva a muitos pesquisadores recorrerem a análise apenas da pasta de cimento.

A moagem parte, em muitos estudos, de pastas de cimento ou de materiais cimentícios retirados de RCDs. Esta etapa aumenta a finura e a superfície específica das partículas, fatores que afetam a reatividade, taxa de hidratação e desenvolvimento da resistência mecânica nestes materiais (Marchon *et al.*, 2015; Kurdowski, 2014). No entanto, Carriço *et al.* (2020) relatam que a redução do tamanho das partículas de CR origina uma redução na porosidade da fração mais grossa e que afeta a absorção da água. O tamanho das partículas, em muitos estudos realizados, são usualmente abaixo dos 150 μm , contudo o ideal seria conseguir partículas do mesmo tamanho que a do cimento Portland (50 μm), não sendo de fácil execução (Carriço *et al.*, 2020).

A reativação térmica é o processo mais importante pois, este é responsável pela recuperação das propriedades do cimento hidratado. (Shui *et al.*, 2009) Este tratamento é composto por três estágios, sendo estes a rampa de aquecimento, temperatura de residência no forno e a taxa de arrefecimento (Serpell *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2014; Shui *et al.*, 2011). A taxa de aquecimento, em diversas pesquisas variam entre 5 a 15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, já a temperatura ótima e o tempo de permanência no forno, ainda em discussão, variam entre 600 a 800 $^{\circ}\text{C}$ e entre 2 a 3 horas, respetivamente (Bandeira, 2020). Após a conclusão deste tratamento o material é arrefecido até a temperatura ambiente permitindo a sua reutilização como um material ligante. Um acréscimo à temperatura de cozedura durante termoativação contribui para o aumento da superfície específica devido à uma maior fissuração e separação das partículas, conferindo-lhes uma menor dimensão e maior massa volúmica. O Valor desta propriedade varia, geralmente, entre 2650-2950 kg/m^3 , sendo ligeiramente inferior ao CP (3150 kg/m^3) (Shui *et al.*, 2014; Bogas *et al.*, 2019).

O cimento Portland é composto por silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) e aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF) e a sua hidratação produz, principalmente, C-S-H, CH, etringita e monossulfato aluminatos de cálcio. O tratamento térmico destes produtos, originam uma maior quantidade de cal livre e a falta de silicato tricálcico (C_3S) quando comparado com ao CP (Carriço *et al.*, 2020). Shui *et al.* (2009), descrevem a reidratação do cimento termoativado a 600 $^{\circ}\text{C}$ em três partes, formação de C-S-H devido à recombinação de Ca^{2+} e H_2O com C-S-H parcialmente desidratado através da polimerização e a hidratação do $\beta\text{-C}_2\text{S}$, a hidratação de CaO para CH e a hidratação de C_2AH_8 desidratado. Tanto na hidratação do CP como no CR, é observado uma reação exotérmica no contato do cimento e a água, seguido por uma indução na reação durante o período inicial e o pico de hidratação é atingido por volta de 10 horas após o início (Carriço *et al.*, 2020).

Na aplicação do cimento reciclado é necessário entender o seu comportamento físico e mecânico. Alguns autores relatam que o cimento termoativado tem uma maior necessidade de água devido a alta superfície específica, a morfologia dos poros e a quantidade de cal livre. (Serpell *et al.*, 2015; Yu, 2013; Shui *et al.*, 2009). Esta necessidade de água está relacionada com a melhora da trabalhabilidade das pastas de CR, no entanto, o aumento da quantidade de água influencia negativamente a suas propriedades físicas e mecânicas (Arandigoyen *et al.*, 2005). A porosidade nas argamassas está associada à evaporação da água de amassadura em excesso no seu interior, ou seja, o volume que estava preenchido com água, após a secagem, passa a estar ocupado com ar. Bandeira (2020) no seu trabalho, relata que o coeficiente de absorção em argamassas com 100% de cimento

reciclado em comparação com o cimento Portland chega a ser 7 vezes superior, resultando do aumento de quase 2 vezes da relação a/l entre as duas misturas.

Em muitos documentos consultados os valores para a resistência à compressão variam de acordo com a temperatura de termoativação do CR, relação a/l, grau de finura e a origem do cimento. Carriço *et al.* (2020) relatam que os valores para a resistência de compressão aos 28 dias variam, geralmente, entre 4 a 30 MPa em provetes de argamassa com cimento 100% reciclado.

No cimento reciclado, existe apenas, o composto de silicato bicálcico, o que dá origem a reações de hidratação mais lentas e a um menor ganho de resistência mecânica. Como referido, os cimentos reciclados têm uma elevada superfície específica, alta porosidade e forte tendência aglutinante, fatores que conduzem a uma maior necessidade de água, contribuindo negativamente para as suas propriedades (Bandeira, 2020). No entanto, durante os primeiros 7 dias de cura dos BTC estabilizados com cimento Portland e com cimento reciclado é importante humedece-los de modo a garantir que as reações de hidratação aconteçam, fator que afeta diretamente a sua qualidade e as suas propriedades físicas e mecânicas.

Tendo em conta a necessidade de materiais cada vez mais ecológicos, o cimento reciclado apresenta-se como uma forte alternativa na estabilização dos blocos de terra comprimida. Na secção 2.7 é abordado o BTC tendo em conta as suas origens, modelo de produção, modelo de construção, características e propriedades.

2.7 BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA (BTC)

O bloco de terra comprimida, é uma técnica de construção relativamente nova que combina as técnicas do adobe e da taipa. Os BTC surgiram nos anos 50 com a invenção da primeira prensa de aço (Cinva-Ram), resultado de pesquisas realizada pelo Eng. Raul Ramirez no Centro Colombiano Interamericano de Habitação (CINVA) (Exelbirt, 2011). A Cinva-Ram (Figura 7a) é capaz de comprimir a terra em um bloco de tamanho regular com uma maior densidade, resistência mecânica e durabilidade à água face aos blocos de adobe (Rocha, 2017). Na Figura 7 apresentam-se algumas das prensas utilizadas para a compactação dos BTC.

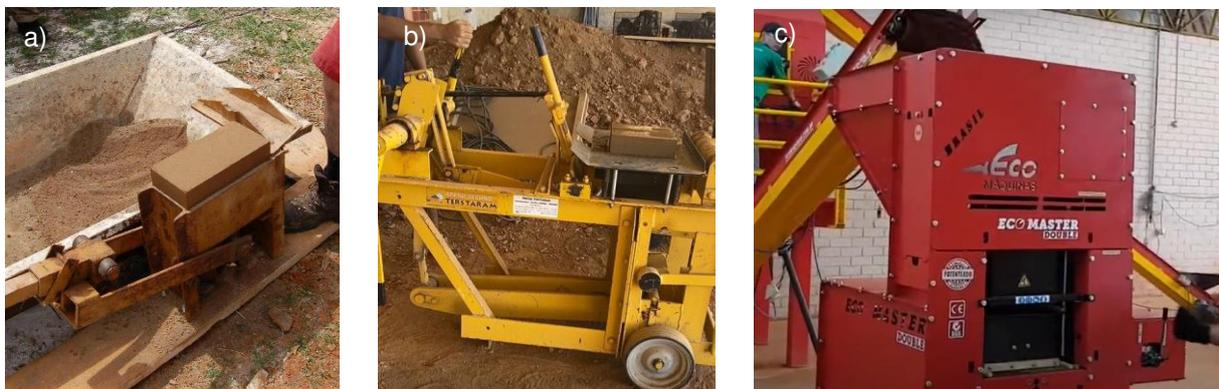


Figura 7 - Prensas utilizadas na compactação dos BTC: a) Prensa mecânica Cinva-Ram (Senf, 2006); b) Prensa mecânica Terstaram; c) Prensa hidráulica (EcoMáquinas, 2017).

A invenção do betão armado e a sua chegada a Portugal no início do século XX, bem como a industrialização e o desenvolvimento de outros materiais (Namora, 2015), levou ao abandono das técnicas de construção com terra. Desse modo, a construção em terra e os BTC em particular, tiveram uma fraca aceitação no mercado da construção. No entanto, com a crescente preocupação de tornar a indústria da construção mais sustentável, a construção em terra voltou a ser repensada. Nesse sentido, os BTC afiguram-se como soluções mais promissoras neste domínio, pois exploram uma maior capacidade mecânica e de durabilidade da terra, para além de garantirem condições mais uniformes na sua produção (Silva, 2015; Kerali, 2001; Namango, 2006).

2.7.1 Produção dos BTC

Os BTC são geralmente constituídos por areias argilosas com uma granulometria extensa e bem graduada. Como referido, podem conter outros produtos na sua formulação de modo a melhorar o seu comportamento à água e em termos de resistência mecânica, nomeadamente estabilizantes (Kerali, 2001; Namango, 2006) e produtos hidrófugos (Lopes, 2015). Por sua vez, a mistura, ao ser comprimida, deverá ter um teor em água próximo do ótimo, aumentando assim a sua compacidade e qualidade.

A produção do BTC passa pela utilização de uma prensa em aço, a qual permite a produção de diferentes tipos de blocos em termos de tamanho e forma. Os blocos poderão ter diversas configurações, sendo eles, perfurados, maciços ou de encaixe. A dimensão e a forma variam entre países, mas as geometrias mais comuns estão entre 200x100x60 mm e 300x150x120 mm.

A versatilidade dos BTC na construção é elevada, podendo assumir funções estruturais (capacidade autoportante) ou de enchimento. Devido à sua variedade de formas e tamanhos há uma maior compatibilidade com as especialidades (instalações prediais) e adaptabilidade à geometria da construção. Apresentam um acabamento liso que evita a necessidade de reboco e pintura e, a sua coloração varia de acordo com a cor da areia, argila e estabilizantes utilizados, podendo-se obter blocos de diferentes cores sendo mais usual o tom avermelhado a acinzentado. A estabilidade dimensional dos BTC torna-os mais atrativo que as restantes técnicas de construção em terra e, permite a estandardização dos blocos de forma a melhorar o controlo de qualidade no processo de produção (Lourenço, 2002; Silva, 2015; Lopes, 2015).

O processo de produção dos BTC é comum para qualquer tipo, independente da forma ou tamanho. No entanto, é importante garantir uma correta gestão da produção e controlo de qualidade em cada etapa. É um processo cíclico e o seu rendimento está geralmente limitado pelo grau de mecanização do estaleiro de produção (Silva, 2015). As etapas necessárias para a produção do BTC são as seguintes:

- Na **extração** da terra deve ser tido em conta a profundidade da escavação, que deverá ser abaixo de um metro de profundidade evitando-se a matéria orgânica existente na superfície;
- A **pulverização**, é a etapa onde se pretende desfazer os torrões presentes na terra, sendo este prejudicial para a homogeneidade e a coesão dos blocos. A pulverização pode ser feita manualmente com maços e pilões ou por pulverizadores mecânicos, sendo o rendimento significativamente superior no segundo;

- Na **peneiração** pretende-se remover elementos indesejados como pedras e matérias orgânicas, assim como corrigir a granulometria da terra;
- Para a realização da mistura é preciso ter especial atenção na **dosagem dos constituintes**, seja por peso ou volume, principalmente nos casos em que se utilizam estabilizantes químicos.
- A **mistura a seco** prevê a homogeneização da mistura com o estabilizante antes da adição da água. Na **mistura humedecida** adiciona-se a água necessária para atingir a humidade prevista misturando-se até obter uma amassadura homogénea. Estas misturas poderão ser feitas à mão ou com o apoio de betoneiras, sendo a última, mais eficaz em termos de rendimento de produção. No entanto, a mistura húmida tende a agarrar-se nas paredes e nas pás da betoneira prejudicando a homogeneização e aumentando os desperdícios.
- No **processo de prensagem**, a mistura é colocada previamente no molde. A prensa é regulada de acordo com a espessura pretendida e de modo a garantir uma boa pressão de compactação. Quanto maior o volume, maior será a espessura do bloco para uma mesma pressão de compactação.
- A **moldagem** dos blocos poderá ser realizada em prensas manuais ou mecânicas, obtendo-se no último caso um rendimento e qualidade superior. As prensas manuais têm, normalmente, pressões de compactação entre 1 a 4 MPa.
- Na **desmoldagem** o bloco é depois retirado da prensa e colocado no local destinado à sua cura. É importante ter algum cuidado no transporte do bloco fresco por apresentar ainda fraca coesão inicial e as arestas sensíveis.
- A **cura** dos blocos é umas das etapas mais importantes, com influência direta na sua qualidade final. Os blocos não estabilizados têm uma cura seca, sendo importante isolá-los bem de modo a evitar uma secagem brusca e, conseqüentemente, a fendilhação superficial. Nos blocos estabilizados, o processo de cura envolve, geralmente, o humedecimento destes durante os primeiros 7 dias após a desmoldagem, seguidos de cura seca ao ar, de forma semelhante ao realizado betão. Nos blocos estabilizados com cimento, a água é também responsável pelas reações de hidratação.

2.7.2 Processo de construção de alvenarias com BTC

Embora não seja o âmbito do trabalho, neste subcapítulo pretende-se dar uma ideia do que é a construção em BTC. O processo de construção com o BTC passa pelas seguintes etapas (EcoMáquinas, 2020):

- A **fundação** é projetada de acordo com as condições do solo e da própria construção. No entanto, de forma a evitar o contacto direto entre o solo e as paredes de BTC é recomendado a construção de uma laje em betão em toda a área da construção (Figura 8a).
- O **levantamento das paredes em BTC** seguem os mesmos princípios da construção em alvenaria de tijolo. A argamassa utilizada no assentamento dos blocos é geralmente composta por cimento, areia e de preferência, a mesma terra empregue no BTC. A primeira fiada deve levar uma argamassa à base de cimento entre a laje e o bloco, garantindo uma melhor ligação entre as paredes e as fundações. Uma particularidade desta nova tecnologia é a possibilidade

de os elementos verticais estruturais serem embutidos na parede, melhorando a estética e diminuindo os trabalhos associados às colunas em betão, Figura 8b).

- O BTC poderá ser utilizado como material de enchimento ou ter a função estrutural (autoportante), no entanto, há sempre necessidade de se construir, pelo menos, um lintel em betão armado. Este lintel permite a distribuição dos esforços por todas as paredes e reforça a estabilidade e contraventamento da estrutura.
- Como referido, as **instalações prediais** podem ser embutidas nos blocos, o que promove uma construção mais limpa e simples.



Figura 8 - Construção com BTC: a) Laje de fundação e primeira fiada, b) Levantamento das paredes e pilares, c) Sistemas hidráulicos e elétricos (EcoMáquinas, 2020).

Os BTC permitem a construção de colunas, muros, paredes circulares, arcos, abóbadas e cúpulas. Nas paredes circulares, é aconselhado um raio mínimo de 3 metros de modo a evitar aberturas entre os blocos superiores a 1 cm. Em alguns casos os arcos são utilizados como suporte para a abertura de vãos. O acabamento a ser realizado no BTC segue o mesmo princípio das paredes de alvenaria tradicional. A pintura poderá ser realizada diretamente no bloco ou, nos casos em que se pretenda um acabamento completamente liso, a parede poderá levar uma argamassa à base de cimento ou gesso. Contudo, nos acabamentos com ladrilhos, não há necessidade de regularização das paredes, podem ser colados diretamente na parede de BTC (EcoMáquinas, 2020).

2.7.3 Regulamentação da construção com BTC

Nestes últimos anos verificou-se um aumento no interesse da utilização da terra como material de construção, devido principalmente às suas vantagens económicas, ambientais e sua versatilidade na construção. No entanto, para que seja efetiva a sua introdução na indústria, são necessários documentos que regulem a aplicação deste material na construção. A regulamentação existente é ainda escassa e bastante dispersa pelo mundo. Lourenço (2002) refere que um dos principais problemas na normalização da construção em terra é a discordância entre os resultados obtidos em laboratório e em condições reais. Alguns países já preveem documentos que regulam a construção em terra, destacando-se a Austrália, a Alemanha, a Nova Zelândia, a França, a Colômbia e o Brasil, sendo estes alguns dos maiores impulsionadores da construção em terra (Ribeiro *et al.*, 2016; Schroeder, 2012). A evolução que se tem verificado ao nível do desenvolvimento de documentos normativos demonstra a crescente afirmação da terra como material de construção.

2.7.4 Vantagens e desvantagens dos BTC

Na Tabela 1 resumem-se algumas das vantagens, bem como desvantagens atribuídas à construção em BTC face a outras construções em terra.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens na utilização do BTC face ao adobe e a taipa (Silva, 2015).

Vantagens
Os blocos podem ser menores do que os blocos de adobe;
Os blocos podem ser empilhados durante o processo de cura ao contrário dos blocos de adobe;
A estabilidade dimensional nos BTC é maior, promovendo uma maior eficácia na aplicação;
A prensagem torna o BTC mais resistente e durável em relação ao adobe;
O BTC perfurado, permitem a passagem de tubos e armaduras sem a necessidade de furos;
Menor consumo de água em relação à outras técnicas de construção;
Maior simplicidade na produção e execução de paredes face à taipa;
Maior compatibilidade com sistemas de revestimento (pinturas, estuques, ladrilhos e outros).

Desvantagens
Blocos mais pesados que os de adobe;
Produção mais árdua relativamente ao adobe no caso da produção manual;
Dimensões limitadas pelos moldes das prensas disponíveis;
As arestas dos blocos são frágeis e danificam-se frequentemente.

2.7.5 Formulação dos BTC

Os BTC são geralmente, compostos por cerca de 80 a 90% de terra, sendo esta o seu principal constituinte. A restante percentagem é alocada ao estabilizante e à água. A granulometria e os limites de consistência, são algumas das características mais importantes na escolha da terra a ser utilizada para a formulação dos BTC. É importante notar que, no que diz respeito à classificação granulométrica, não existe um consenso geral nas regulamentações e nos ensaios realizados. De modo a ir de encontro à maioria das investigações e regulamentos propostos sobre os BTC, serão consideradas como argila/silte todas as partículas com dimensões inferiores a 0,074mm (Silva, 2015).

Tendo em consideração os trabalhos realizados por Burroughs (2008) e Delgado *et al.* (2007) onde foram analisados mais de 100 solos diferentes, bem como o contante em vários documentos normativos, realizou-se a Tabela 2 onde são apresentadas as características da terra para a produção do BTC pretendia neste trabalho (Silva, 2015).

Tabela 2 – Características da terra para a produção do BTC (Silva, 2015).

Propriedades	Estabilizados	Não estabilizados
Seixo (fino)	0 - 30%	
Areia	25 - 70%	
Argila/silte	20 - 35%	22 - 45%
LL	25 - 40	25 - 40
IP	2 - 20	2 - 30

No que se refere à quantidade de água utilizada na produção dos BTC, uma grande parte das investigações consideram o teor ótimo em água (TOA), como o teor de humidade para a moldagem dos blocos. Alguns autores sugerem valores de 9 a 17% (Rigassi, 1985) e outros mais conservadores de 10 a 13% (Riza *et al.*, 2010). No entanto, é importante notar que estas percentagens variam consoante o tipo de terra e se este é ou não estabilizado.

A Tabela 3 apresenta algumas recomendações para a percentagem de estabilizantes a incorporar no BTC.

Tabela 3 – Proporções recomendadas de cimento na estabilização do BTC (Adaptação Silva, 2015).

Referências	Proporção (%)	Observações
Rigassi (1985)	4 - 10	CRATerre (Manual de produção de BTC)
Walker (1995)	5 - 10	<5% Arestas muito frágeis >10% Economicamente inviável
Kerali (2001)	3 - 10	5 - 8% é o mais adequado para o BTC
Namango (2006)	3 - 12	4 - 10% é o mais adequado para o BTC
Riza et al. (2010)	4 - 10	Utiliza Walker (2002) como referência

Resumidamente, a percentagem de cimento recomendado é cerca de 4 a 10%. Acima de 10% a sua utilização torna-se economicamente inviável face aos ganhos obtidos, e abaixo de 4% não é verificada uma melhoria suficiente nas suas propriedades.

3 CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado em detalhe o processo de produção dos BTC assim como os ensaios realizados para a caracterização da terra a ser utilizada, a produção do cimento reciclado e a caracterização física, mecânica e de durabilidade dos BTC. Descreve-se em pormenor os materiais utilizados, o processo de produção, os equipamentos utilizados, o método de ensaio, a obtenção de resultados e as normas adotadas.

3.1 DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental foi dividida em quatro fases, que envolveram: a caracterização e a seleção da terra a ser utilizada; a produção e caracterização do cimento reciclado; a produção dos blocos; os ensaios de caracterização dos BTC.

Na primeira fase foram caracterizados três diferentes tipos de solos de forma a escolher, segundo os critérios apresentados no subcapítulo 2.7.5, os que apresentavam as melhores características para a produção de BTC. Os três solos foram recolhidos de diferentes Herdades na localidade de Montemor-o-Novo e trazidos para o Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico (LEC-IST) para análise. A segunda fase envolveu a produção do cimento reciclado a ser utilizado para a estabilização dos blocos. O cimento reciclado foi produzido a partir de pastas de cimento hidratado com mais de 120 dias, fabricadas em laboratório, de acordo com o procedimento adotado em trabalhos prévios realizados no âmbito do projeto FCT – “*Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials*” - EcoHydB - PTDC/ECI-CON/28308/2017. Na terceira fase, foram produzidos os blocos de acordo com o plano inicialmente estabelecido. Cada bloco foi designado de acordo com a percentagem e tipo de estabilizante na mistura, tendo em conta a utilização de cimento reciclado termoativado (CR) ou cimento Portland normal (CP), no caso das misturas de referência. Foi ainda considerada uma mistura de referência não estabilizada de modo a permitir uma melhor avaliação da eficiência do cimento reciclado como estabilizante.

Designação dos BTC:

- **PC10** – Blocos de referência estabilizados com: 90% de terra e 10% de cimento Portland;
- **RC10** – Blocos estabilizados com: 90% de terra e 10% de cimento reciclado;
- **PC5** – Blocos de referência estabilizados com: 95% de terra e 5% de cimento Portland;
- **RC5** – Blocos estabilizados com: 95% de terra e 5% de cimento reciclado;
- **RC2PC8** – Blocos estabilizados com: 90% de terra, 2% de cimento reciclado e 8% de cimento Portland;
- **RC5PC5** – Blocos estabilizados com: 90% de terra, 5% de cimento reciclado e 5% de cimento Portland;
- **T** – Blocos de referência sem estabilizantes químicos: 100% terra.

Por último, a quarta fase envolveu a caracterização dos blocos em termos das suas principais propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade, conforme será exposto nos próximos subcapítulos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA TERRA

O principal objetivo deste subcapítulo é caracterizar os solos de forma a identificar os que apresentam as características desejadas para a produção dos BTC. Esta caracterização teve como base os documentos normativos apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Normas utilizadas nos ensaios de caracterização da terra.

Ensaio	Documento normativo
Determinação dos limites de consistência	NP-143 (1969)
Ensaio de compactação	D698 (2000) e LNEC E-197 (1966)
Análise granulométrica por peneiração húmida	LNEC E-239 (1970) e LNEC E-195 (1966)
Determinação da fração de matéria orgânica	Ensaio expedito Silva(2015)
Determinação da massa volúmica das partículas	NP-83 (1965)

3.2.1 Determinação dos limites de consistência

A determinação dos limites de consistência de um solo é fundamental para a seleção da terra a utilizar, afetando, conseqüentemente, a qualidade final dos BTC. O ensaio de determinação dos limites foi realizado de acordo com a Norma Portuguesa NP – 148 (1969) que envolve a identificação do limite de liquidez (w_L), limite de plasticidade (w_P) e o cálculo do índice de plasticidade (IP).

Entende-se por limite de liquidez de uma amostra de solo o teor em água que define a fronteira entre o estado semilíquido e plástico da terra. Este limite é definido como o teor de água correspondente a 25 pancadas na concha de Casagrande, obtido por interpolação numa curva que relaciona o teor de água de cada um de 4 provetes da amostra com o número de pancadas para o qual os bordos inferiores de um sulco aberto num provete unem-se numa extensão de 1cm. Retirou-se 500g da amostra a ensaiar, que foi pisada no almofariz com uma mão de borracha de forma a separar as suas partículas e de seguida passada através do peneiro nº 40. Do material passado através do peneiro, recolheu-se cerca de 100 gramas. Coloca-se a porção de solo, preparado como indicado anteriormente, na concha misturando-a com água destilada de modo a obter uma pasta homogénea, que de seguida é distribuída numa camada com espessura máxima de 1 cm e com a superfície nivelada. Em seguida, com o auxílio do riscador, realiza-se um sulco com largura de 2 mm, representado na Figura 9b).



Figura 9 – Determinação do limite de liquidez: a) mistura da terra com água; b) colocação da terra na concha de Casagrande; c) recolha da amostra para levar à estufa.

Por fim, registou-se o número de golpes necessários para que as duas faces da terra, separadas pelo sulco, voltassem a unir-se num comprimento de cerca de 1 cm. Da união da terra retirou-se uma

pequena amostra que foi pesada e em seguida seca em estufa ventilada de 105-110°C durante 24 horas. Quando seca, foi novamente pesada de forma a determinar o teor de água correspondente ao número de pancadas. Este procedimento foi repetido para quatro teores de água, com a adição de água ou de terra seca caso se pretenda, respetivamente, diminuir ou aumentar o número de pancadas. Este ensaio prevê que o número de pancadas varie entre 10 e 40, dois pontos abaixo e dois acima de 25 pancadas.

O limite de plasticidade de uma amostra de solo representa o teor em água que define a fronteira entre o estado plástico e semissólido. Este limite é alcançado ao se formar pequenos filamentos cilíndricos com cerca de 3 mm de diâmetro que mostrem alguma fissura, mas que não se desfaçam (Figura 10b).



Figura 10 – Ensaio de limite de plasticidade: a) solo preparado para o ensaio de plasticidade; b) filamentos cilíndricos com 3 mm diâmetro; c) amostras para serem levadas à estufa.

Da mesma amostra preparada para o limite de liquidez, retirou-se cerca de 20g da terra à qual foi adicionada água destilada até a mistura tornar-se suficientemente plástica, permitindo assim moldar quatro pequenas esferas sensivelmente iguais. Posteriormente, rolou-se uma esfera sobre a placa de vidro até formarem filamentos cilíndricos de 3 mm de diâmetro, voltou-se a formar uma esfera e rolou-se novamente. Foi seguido este procedimento até obter filamentos de 3 mm com pequenas fissuras. Os pequenos filamentos fissurados foram colocados em uma cápsula, pesados e em seguida colocados em uma estufa ventilada de 105-110°C durante 24 horas. Depois de seca, a amostra foi pesada novamente de modo a obter o teor de água associado. Este procedimento foi realizado para as quatro esferas. O resultado para este ensaio consiste na média dos valores de teor de água obtido para as quatro amostras e o índice de plasticidade (IP) da terra é obtido pela diferença entre os valores do limite de liquidez e o limite de plasticidade.

3.2.2 Ensaio de compactação (Proctor)

O ensaio de compactação (Proctor) consiste na determinação do teor ótimo em água (TOA) de um determinado solo. O TOA resume-se no teor de água que permite a terra atingir a sua massa volúmica seca máxima para uma determinada energia de compactação. A determinação do TOA possibilita identificar, aproximadamente, o teor em água a utilizar na produção dos BTC, garantindo assim a sua máxima compacidade (Bahar et al., 2004). Este ensaio, foi realizado de acordo com a Norma D698 (2000), seguindo o processo de compactação leve em molde pequeno, sendo este

processo, o que melhor representa as pressões de compactação exercidas pelas prensas utilizadas na produção do BTC (Bahar et al., 2004; Namango, 2006).

Separou-se uma amostra da terra, que foi passada pelo peneiro nº 4 de forma a obter 12,5kg de solo peneirado, separando-o em cinco porções iguais de 2,5kg. A cada porção, foi adicionada uma quantidade pré-estabelecida de água. Em um tabuleiro, misturou-se a terra e a água de forma a obter uma mistura homogênea. De seguida, colocou-se um terço da mistura no molde cilíndrico e compactou-se através de 25 pancadas distribuídas pela área do molde com o auxílio do pilão. O processo foi repetido de forma a fazer um total de 3 camadas.

Após a compactação, retirou-se a alonga, removendo a terra em excesso (Figura 11). Registrou-se a massa do molde com a terra compactada e, de ambas as faces, foram retiradas e pesadas amostras do interior do molde. As amostras foram colocadas em uma estufa ventilada de 105-110°C e ao fim de 24 horas foi registada a sua massa seca. Este processo foi repetido para as cinco porções de forma a obter os cinco pontos na curva de compactação.

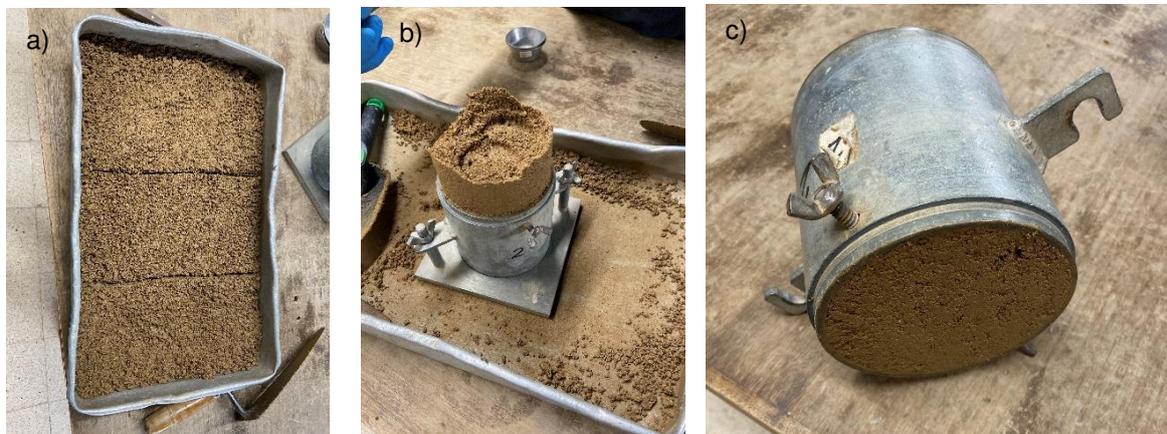


Figura 11 – Ensaio de compactação: a) preparação da terra; b) solo em excesso no molde; c) molde pronto para a pesagem.

O resultado consiste na determinação da curva de compactação de acordo com os cinco pontos definidos pelo teor em água e pela massa volúmica seca. O TOA corresponde ao ponto máximo da curva de compactação.

3.2.3 Análise granulométrica por peneiração húmida

O principal objetivo deste ensaio é obter a curva granulométrica para um dado solo. O ensaio consiste na identificação das dimensões das partículas, expressas em percentagem em relação à massa total da amostra. Este ensaio foi realizado de acordo com a Especificação LNEC E-239 (1970), sendo identificado apenas a granulometria para as partículas com dimensões superiores a 0,074 mm.

Retirou-se aproximadamente 1kg de amostra de solo e colocou-se a secar em estufa ventilada a 105-110°C até massa constante. A amostra foi então colocada no almofariz e com o apoio do pilão de borracha foram desagregados os torrões de forma a não reduzir o tamanho individual das partículas como indicado na Especificação LNEC E-195 (1966). Seguidamente, como representado na Figura 12, passou-se a amostra pelos peneiros indicados até o peneiro #10 por ordem decrescente de tamanho, registando-se a massa retida em cada peneiro. No peneiro #200, lavou-se por meio de um jato de água a fração passada no peneiro #10 que foi, em seguida, seca em estufa ventilada a 105-110°C durante

24 horas. Após a secagem, a fração de solo foi passada pelos peneiros de #10 a #200, por ordem decrescente de tamanho, registrando-se a massa retida em cada um.



Figura 12 - Peneiração: a) séries de peneiros; b) e c) solo peneirado; d) cápsulas com as amostras da terra após a peneiração húmida.

O resultado é expresso através da curva granulométrica, representando a dimensão do peneiro nas abscissas de uma escala logarítmica e a percentagem de massa retida acumulada em cada peneiro nas ordenadas.

3.2.4 Determinação da fração de matéria orgânica

A influencia da matéria orgânica (MO) nos BTC é prejudicial, dado que afeta o processo de estabilização química e a sua durabilidade e resistência. A matéria orgânica decompõe-se no interior do bloco, deixando-os mais porosos. O objetivo desse ensaio é identificar a percentagem de matéria orgânica presente na terra. Para tal, cerca de 1 kg de amostra da terra foi seco em estufa ventilada a 105-110°C até massa constante. A terra seca foi misturado com 0,5 litros de água oxigenada (H_2O_2) em um tabuleiro (Figura 13a) e deixado a reagir. Por fim, a amostra foi colocada novamente na estufa até massa constante e registou-se o valor final (Figura 13b).



Figura 13 – Determinação da percentagem de matéria orgânica: a) mistura da terra com água oxigenada; b) solo após secagem em estufa.

A matéria orgânica reage com a água oxigenada e a massa de matéria orgânica presente na terra é obtida pela subtração da massa antes e após a mistura com o H_2O_2 . A percentagem de matéria orgânica é dada pela razão entre a massa de MO e a massa inicial da amostra.

3.2.5 Determinação da massa volúmica das partículas

Este ensaio tem como objetivo calcular o valor da massa volúmica das partículas constituintes de um dado solo. O ensaio foi realizado de acordo com a Norma NP – 83 (1965). Após secar cerca de 100 g de solo em estufa ventilada a 105-115°C, a amostra foi passada pelo peneiro nº 4 da ASTM e recolheu-se 25 g.

De modo a calibrar os picnómetros (Figura 14a), encheu-se com água destilada até ao nível de referência, registando a sua massa final. Colocou-se a terra seca e encheu-se novamente de água destilada até cerca de $\frac{3}{4}$ da sua capacidade, deixando-o absorver (Figura 14b). O picnómetro foi agitado de modo a retirar-se o ar restante e foi deixado repousar por 24 horas. Depois de retirar o ar da terra, colocou-se novamente a água destilada até ao nível de referência e registou-se a massa final.

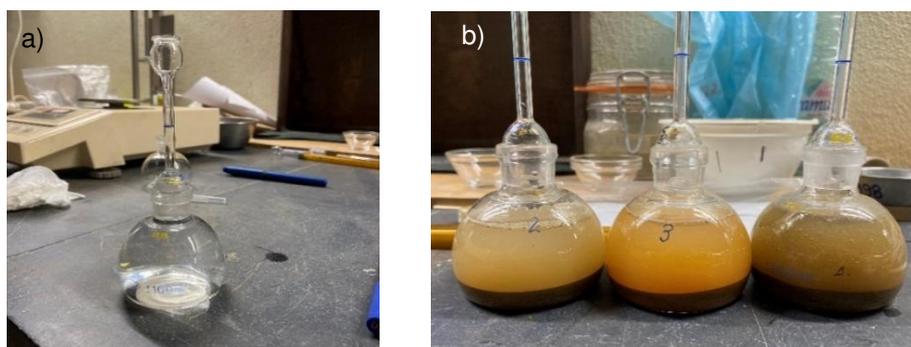


Figura 14 – Determinação da massa volúmica das partículas dos solos: a) calibração do picnómetro; b) picnómetro após colocação da terra.

Resumidamente, a massa volúmica das partículas de um solo é definida como o quociente da massa de um dado volume dessas partículas, pela massa de igual volume de água destilada a 20°C. Para um maior rigor, deve ser determinado o coeficiente K que relaciona a densidade da água a 20°C com a temperatura a que foi realizado o ensaio.

3.3 ESTABILIZANTES

3.3.1 Cimento Portland

Para a produção da pasta de origem sujeita a reciclagem (3.3.2), bem como para a produção dos BTC de referência foi considerado um cimento tipo I 42,5 (CP), cujas principais características apresentam-se na Tabela 5. Os valores apresentados foram gentilmente fornecidos pelo fabricante.

Tabela 5 - Propriedades do cimento Portland.

Parâmetros	CEM I 42,5 R	
Densidade (g/cm ³)	3,07	
Superfície específica (cm ² /g)	4 437,00	
Resíduo na peneira de 45 µm (%)	6,80	
Resistência à compressão em pastas (MPa)	1 dia	16,80
	7 dias	43,60
	28 dias	57,00
Expansão (mm)	1,00	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	19,64 + 5,34 + 3,05	
CaO + MgO (%)	62,80 + 1,80	
CaO + MgO livre (%)	0,7 + 0,9	
Tempo de presa (min)	Inicial	170
	Final	280

3.3.2 Cimento reciclado

A produção de cimento reciclado (CR) envolveu um processo complexo e moroso. Basicamente, o processo envolveu 3 fases relativas à recolha e tratamento de detritos de betão (britagem e moagem), separação dos vários constituintes e, posteriormente, o tratamento do cimento. Devido à morosidade do processo e de modo a ter um maior controlo sobre as variáveis presentes no estudo, o cimento reciclado foi obtido diretamente de pastas produzidas laboratorialmente, sem contaminação de agregado. Desse modo, foi inicialmente produzida uma pasta com a/l de 0,45, que foi curada durante pelo menos 120 dias de modo a simular uma pasta antiga. Após a produção da pasta, o processo de reciclagem do cimento, passa por 4 importantes etapas (britagem, moagem, peneiração e termoativação).

O cimento utilizado para a produção da pasta foi o CEM I 42,5. Com um berbequim mecânico, misturou-se o cimento com água em um recipiente de capacidade para 80 litros. Para este projeto foram produzidos 8 cubos de pasta de cimento com 15cm de aresta (Figura 15a). Os provetes foram mantidos em câmara húmida por um período mínimo de 7 dias e em seguida deixados em ambiente de laboratório por mais de 120 dias.

Após o período de cura, os provetes de pasta de cimento foram sujeitos aos processos mecânicos de britagem, moagem e peneiração. O objetivo deste processo é diminuir a granulometria dos resíduos de modo a obter-se um grau de finura inferior a 250 μm .



Figura 15 - Produção do cimento reciclado: a) produção dos provetes de pasta de cimento; b) britagem dos provetes; c) balde de maxilas; d) moinho de rolos; e) moinho de bolas; f) peneiração do cimento; g) forno de câmara rotativa.

Para a britagem dos blocos de pasta recorreu-se à britadeira de maxilas presente no LC, Figura 15b), a qual, permitiu triturar o provete para partículas com dimensões inferiores a 70 mm. Na fase seguinte, o material foi triturado no laboratório de mineralogia e geologia (GEOLAB) do IST. O objetivo passa, primeiramente, por reduzir as suas partículas para dimensões inferiores a 10 mm, recorrendo-se a uma britadeira de maxilas de menor dimensão, seguido de moinho de rolos, Figura 15c) e d). Em

seguida, de modo a transformar este material em um pó, recorreu-se ao moinho de bolas (Figura 15e), sendo colocado, no seu interior, 625 esferas de aço de diferentes diâmetros, compreendidos entre 10 a 50 mm. O material foi moído faseadamente, em porções máximas de 12 kg, durante um período de 2 horas a uma velocidade de, aproximadamente, 40 rpm. É importante referir ainda que, de forma a evitar a aglomeração das partículas nas paredes do moinho, o material foi previamente seco a uma temperatura média de 120°C durante 3 horas, para além de se ter adicionado aditivo de lavagem na porção de 0.2% em peso de material. Por fim, passou-se o material moído pelo peneiro, removendo as partículas com dimensões superiores a 250 µm, ilustrado na Figura 15f).

A termoativação do cimento é uma etapa fundamental na recuperação das propriedades ligantes dos cimentos hidratados (Bandeira, 2020). Com este processo, pretende-se recuperar as reações químicas de hidratação do cimento. Para tal, utilizou-se um forno rotativo da Termolab, ilustrado na Figura 15g). O material foi aquecido a uma taxa de 15°C/min até ao patamar de 650°C, mantendo-se a esta temperatura por 3 horas. Finalmente o material arrefeceu dentro do forno por 12 horas.

3.3.3 Caracterização do cimento reciclado

Para a caracterização do cimento reciclado produzido procedeu-se à avaliação das suas propriedades físicas e mecânicas no estado fresco e endurecido a partir da produção e ensaio de pastas de cimento reciclado. Foi avaliado o tempo de presa, a massa volúmica, o espalhamento, a resistência à flexão e a resistência à compressão.

A relação a/l obtida para a consistência normal da pasta foi de 0,73, sendo este valor utilizado para a produção da pasta a ser ensaiada. As pastas foram produzidas de acordo com a norma EN 1015-2 (1998), esta produção teve o apoio de uma misturadeira de eixo vertical, ilustrado na Figura 16a). O processo passa pelo humedecimento da cuba, em seguida, mistura-se o cimento e a água que são acrescentados alternadamente em pequenas quantidades. Após a produção da pasta, foi avaliado o tempo de presa, a sua massa volúmica e o espalhamento segundo as normas EN 196-3 (2017), EN 1015-6 (1998) e EN-1015-3 (2004), respetivamente.

Para cada idade de ensaio, foram produzidos 3 provetes 40x40x160 mm (Figura 16b). Os provetes foram compactados com recurso a uma mesa de compactação e preenchidos em duas camadas idênticas, aplicando-se um total de 60 pancadas. Após rasar o molde com uma colher de pedreiro, colocou-se uma película plástica no topo do molde e deixou-se em ambiente de laboratório durante 24 horas. Após este tempo, os provetes foram desmoldados e colocados na câmara húmida.

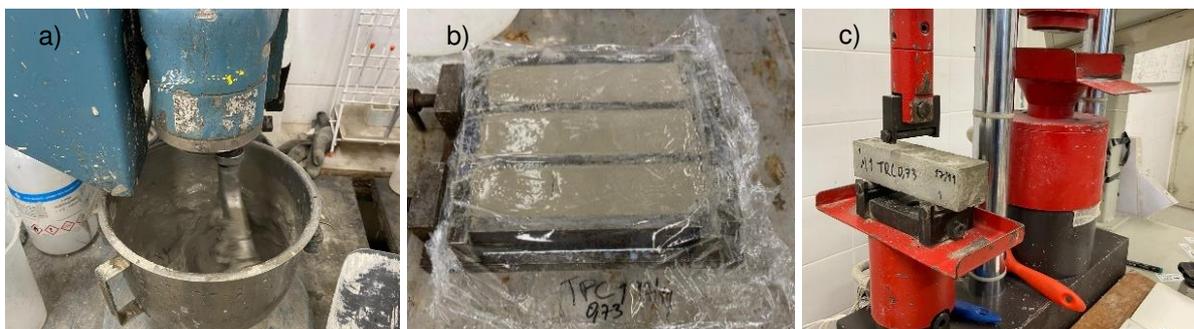


Figura 16 - Caracterização do cimento reciclado: a) produção da pasta de cimento reciclado; b) moldagem dos provetes; c) ensaio de flexão.

Os ensaios de flexão e compressão foram realizados segundo a norma EN 1015-2 (1998), para as idades de 3, 7 e 28 dias. Este ensaio foi realizado na prensa *Form+ Test Seidner 505/200/10 DM1*, ilustrada na Figura 16c). Inicialmente, os provetes foram ensaiados à flexão, sendo colocados em dois apoios cilíndricos espaçados de 10 cm. Uma carga central foi então aplicada com uma velocidade média de 0,02 kN/s. Deste ensaio obteve-se duas metades semelhantes que foram ensaiadas à compressão com uma velocidade média de 0,20 kN/s. Os valores da resistência à flexão e compressão podem ser obtidos pelas expressões 3.1 e 3.2, respetivamente.

$$f_{tf} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (3-1)$$

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (3-2)$$

Em que, f_{tf} (MPa) é a resistência à tração, f_c (MPa) é a resistência à compressão, F (N) é a carga máxima aplicada, l (100 mm) é o vão entre os apoios, b (40 mm) é a largura do provete, h (40 mm) é a altura do provete e A (1600 mm²) é a área da secção comprimida.

3.4 PRODUÇÃO DOS BTC

Os BTC são influenciados, na sua qualidade, por diversos fatores, sendo importante uma boa escolha da terra a utilizar, proporção de estabilizante, da quantidade de água de mistura e processo de produção e da cura, conforme abordado no capítulo 2. No que se refere ao processo de produção dos BTC, neste subcapítulo serão abordados os materiais e equipamentos utilizados, assim como a metodologia considerada na produção dos BTC.

Os blocos foram produzidos com uma dimensão de 220x105x60 mm e, para a produção da quantidade estipulada, foram precisos aproximadamente 1,4 m³ de terra, 50 kg de cimento Portland e 42 kg de cimento reciclado. A produção contou com o apoio do Arquiteto Nuno Grenha, nomeadamente através da Associação Cultural de Arte e Comunicação das Oficinas do Convento de Montemor-o-Novo, que cederam o Telheiro da encosta do Castelo de Montemor, onde foram produzidos aproximadamente 300 blocos.

Como referido no capítulo 2, uma das principais vantagens do uso dos BTC na construção é a disponibilidade e facilidade de extração da matéria prima, podendo ser realizada no próprio local da construção. No presente trabalho, a terra foi extraída de uma herdade a cerca de 1 Km de distância do local de produção. Aproximadamente 2 m³ de terra foram extraídos por retroescavadora e transportados por camião até o local de produção dos BTC. A composição utilizada em cada tipo de BTC apresenta-se na Tabela 6. O teor de água foi definido de modo a que a mistura apresentasse uma consistência adequada, através do ensaio do drop test conforme referidos nos parágrafos seguintes.

A preparação da terra passou, essencialmente, por três etapas: a triagem, a pulverização e a peneiração. A terra extraída foi espalhada de forma a separar-se as pedras e matéria orgânica visíveis. Após a triagem inicial, a terra foi distribuída por baldes que alimentaram o pulverizador de pás mecânico. A quantidade de terra estimada para a produção de cerca de 100 blocos por dia foi de aproximadamente 8 carrinhos de mão. Peneirou-se a terra pulverizada com apoio de um peneiro

rotativo de malha quadrada de 4 mm de modo a remover as pedras, os torrões e a matéria orgânica, e a corrigir a granulometria da terra a utilizar nos BTC.

Tabela 6 – Composição dos blocos produzidos

Referência	Terra ^a (%)	CP ^b (%)	CR ^b (%)	Água (%)	a/l
PC10	90	10	-	11,0	1,10
RC10	90	-	10	12,5	1,25
PC5	95	5	-	11,0	2,20
RC5	95	-	5	12,5	2,50
RC2PC8	90	2	8	11,0	1,10
RC5PC5	90	5	5	11,5	1,20
T	100	-	-	10,0	-

^a percentagem em massa da terra com 4% de humidade; ^b percentagem em peso seco de estabilizante

Idealmente, a mistura da terra, cimento e água deveria ser realizada em uma betoneira de eixo vertical. No entanto, durante a mistura com água, o movimento rotativo da pá originou esferas de argila e cimento, ilustradas na Figura 17a). Esse fenómeno, deve-se ao facto de a terra ter um elevado teor em argila e que, após o contacto com a água, criar pequenas esferas que aglomeram os finos da mistura. De forma a contornar o problema, a mistura foi realizada manualmente sobre um tabuleiro com uma capacidade para aproximadamente 20 kg de mistura, Figura 17b).



Figura 17 - Mistura: a) Produção da mistura na betoneira; b) Produção manual.

Inicialmente, adicionou-se as quantidades necessárias de terra e cimento pretendida para a produção, perfazendo um total de 20 kg de mistura seca. Após se obter uma mistura seca homogénea, adicionou-se, faseadamente, a quantidade de água necessária para alcançar o teor de água pretendido.

Para verificar se a quantidade de água adicionada era a ideal, realizou-se o drop test de acordo com a norma NZS 4298 (1998). Resumidamente, este ensaio consiste em pegar uma mão cheia da mistura e comprimi-la. Caso este aglomerado não fique coeso, é necessário adicionar mais água à mistura de modo a aumentar-se o teor de água. Este procedimento é repetido até se obter uma bola de mistura coesa que, de seguida, é deixada cair da altura da cintura sobre uma superfície rija e plana.

Existem três resultados possíveis para este ensaio: seco na situação em que o aglomerado se desfaz completamente; muito húmido, no caso em que este não se divide; ponto ideal em que se divide em 2 ou 3 partes. Se o material está seco ou húmido, é adicionado, respetivamente, água ou mistura seca, repetindo-se este processo até se obter a humidade pretendida.

Seguidamente, a mistura húmida foi transportada até à prensa para ser moldada, utilizando-se uma prensa manual Terstaram da Appro Techno (Appro Techno, 2021). Esta prensa requer duas pessoas para operá-la e é capaz de produzir, segundo a sua ficha técnica, 1400 blocos em 8 horas com uma força de compactação de aproximadamente 150 kN.

A terra foi colocada dentro do molde, tendo-se especial atenção aos cantos dos blocos. Para tal, é aconselhado apertar os quatro cantos, conforme a Figura 18a), de forma a reforçar os pontos mais problemáticos durante a desmoldagem devido à força de atrito entre as faces laterais do bloco e do molde. A compactação da mistura é realizada pela descida da alavanca, o que faz com que o prato inferior da prensa ascenda, pressionando-a contra o prato superior inicialmente travado. É necessário garantir uma boa limpeza dos pratos da prensa de forma a evitar danos nos blocos durante a desmoldagem.



Figura 18 - Produção dos BTC: a) preparação dos cantos; b) moldagem; c) cura dos blocos.

Após moldagem dos blocos determinou-se a massa e a espessura de forma a controlar a qualidade de execução durante a fase de produção. Os blocos frescos possuem uma fraca coesão, ou seja, é importante ter cuidado no transporte e armazenamento dos BTC. Não tocar nas arestas dos blocos e não realizar pressões pontuais são exemplos de boas práticas. O bloco ainda fresco foi então colocado em paletes, organizados paralelamente na mesma camada e transversalmente na camada superior até um máximo de 4 camadas, como mostra a Figura 18c).

A cura do bloco variou consoante este foi ou não estabilizado com cimento. Para os blocos não estabilizados, foi adotada cura seca. A cura seca consiste em cobrir os blocos durante os 7 primeiros dias com uma lona plástica, protegendo-os do ambiente exterior e evitando a diminuição brusca de humidade. Um mau condicionamento poderá gerar fissuras nos blocos e consequentemente diminuir a sua qualidade. Nos blocos estabilizados, adotou-se a cura húmida. A produção, por ter-se realizado no verão, os blocos foram cobridos com uma lona plástica e humedecidos em intervalos de 1 em 1 hora durante o dia com um regador durante os primeiros 7 dias. Após os 7 dias de idade, os blocos foram colocados em dois ambientes distintos: laboratório e câmara húmida.

Os blocos produzidos foram levados para o Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico (LEC-IST) em duas fases. Os blocos a ensaiar nos primeiros 7 dias, assim como os blocos destinados à cura húmida, foram levados aos 3 dias de idade. Os restantes blocos ficaram no local de produção por mais 15 dias.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS BTC

Os BTC foram caracterizados em termos físicos, mecânicos e de durabilidade, de acordo com a Tabela 7. Tendo em conta a falta de documentos normativos relativos à construção em terra em Portugal, os ensaios de caracterização foram realizados com base em normas ou documentos guia publicadas em outros países ou normas existentes para outros tipos de materiais.

Tabela 7 – Ensaio e respetivos documentos normativos consultados.

Ensaio	Documento normativo
Massa volúmica	NP EN 772-13 (2002)
Resistência à compressão	NP EN 772-1 (2002) e NBR 8492 (1984)
Resistência à tração por flexão	NP EN 772-6 (2002)
Resistência à tração por compressão diametral	NP EN 12390-6 (2011)
Ultrassons	NP EN 12504-4 (2007)
Esclerómetro pendular	ASTM C805 (1993) e NP EN 12504-2 (2012)
Retração	LNEC E-398 (1998)
Condutibilidade térmica	ISO/FDIS 10456 (2007)
Módulo de elasticidade	LNEC E397 (1993)
Permeabilidade à água	Procedimento Interno
Absorção de água por imersão	LNEC E-394 (1993) e NBR 8492 (1984)
Absorção de água por capilaridade	NTC 5324 (2004) e NP EN 772-11 (2002)
Absorção de água à baixa pressão (Karsten)	RILEM Nº 11.4 (1980) e EN 16302 (2013)
Erosão acelerada (spray test)	NZS 4298 (1998)

Os blocos foram caracterizados aos 3, 7, 28 e 90 dias para diferentes condições de ensaio:

- Seco (SE) – Provetes secos em estufa ventilada até massa constante;
- Saturado (ST) – Provetes imersos em água até à idade de ensaio;
- Ambiente laboratorial (AL) – Provetes colocados no ambiente de laboratório com temperatura de 19-26°C e humidade relativa de 55 a 75%;
- Húmido (HU) – Provetes colocados em câmara húmida, para uma temperatura de 20°C e humidade relativa superior a 90%.

Na Tabela 8 é apresentado um resumo de todos os ensaios realizados, bem como o número de provetes utilizados, a idade de ensaio e as condições de cura e de ensaio.

Tabela 8 – Resumo dos provetes utilizados em cada ensaio.

Ensaio	Composições	Nº de provetes	Idade (dias)	Local de cura ^a	Condição de ensaio ^a
Compressão, Massa volúmica	PC10, RC10, PC5, RC5, RC2PC8, RC5PC5	3	3	LP	CI
	T				SAE
	PC10, RC10, PC5, RC5, RC2PC8, RC5PC5	5	7	LAB	CI
	T				SAE
	PC10, RC10, PC5, RC5, RC2PC8, RC5PC5	4	28	LAB	AL
	T				SE, AL
	PC10, RC10				SE, ST
	PC10, RC10	4	90	CH	AL
	PC10, RC10			LAB	AL
Tração por flexão	PC10, RC10	6	28	LAB	AL
	PC5, RC5, RC2PC8, RC5PC5, T	3			
Tração por compressão diametral	PC10, RC10	4	28	LAB	AL
	PC5, RC5, RC2PC8, RC5PC5, T	3			
	PC10, RC10	CH			
Termogravimétrica (TG)	PC10, RC10	1	>28	LAB	AL
Difração de raios- X (DRX)	PC10, RC10	1	>28	LAB	AL
Ultrassons	PC10, RC10, PC5, RC5, RC2PC8, RC5PC5	2	28	LAB	AL
	PC10, RC10			CH	SE, ST
	T	LAB	SE, AL		
Retração	PC10, RC10	3	1 - 21	CR	ACR
Condutibilidade térmica	PC10, RC10, RC5PC5, RC2PC8, RC5, PC5, T	1	>28	LAB	AL, SE, ST
Esclerômetro pendular	PC10, RC10, RC5PC5, RC2PC8, T	2	>28	LAB	AL
Módulo de elasticidade	PC10, RC10	1	>28	LAB	AL
Absorção Capilar	PC10, RC10, RC2PC8, RC5PC5	3	28	LAB	SE
Absorção por imersão	PC10, RC10, RC2PC8, RC5PC5	2	28	LAB	AL
Absorção (Karsten)	PC10, RC10, RC2PC8, RC5PC5	1	28	LAB	SE
Erosão acelerada	PC10, RC10, RC5PC5	6	>28	LAB	AL
	T	2			
Permeabilidade à água	PC10, RC10, RC5PC5, RC2PC8	3	>28	LAB	AL

^a Legenda: CI - Cura inicial, SE - Seco em estufa, ST - Saturado, AL - Ambiente de laboratório, HU - Húmido, SAE - Ambiente Exterior, ACR - Ambiente da camara de retração, CH - Camara húmida, LP - Local de Produção, CR - Camara de retração.

3.5.1 Massa volúmica

A massa volúmica dos BTC foi avaliada no estado fresco (logo após a produção) e no estado endurecido, após 28 dias de idade. A massa volúmica fresca permite caracterizar de uma forma indireta a compactidade dos BTC, relacionando-a com outras propriedades no estado endurecido.

No local de produção, foram escolhidos 3 blocos de referência por tipo de amassadura. Estes blocos foram pesados após a sua compactação, obtendo-se a sua massa no estado fresco. O volume dos blocos foi de aproximadamente 0,001386 m³ (220x105x60mm), podendo sofrer pequenas alterações na altura de compactação (entre 5,9 a 6,2 cm). No estado endurecido, os blocos foram avaliados em três condições distintas: seco em estufa ventilada a 100°C até massa constante; saturados durante, pelo menos, 48 horas de imersão em água; ambiente de laboratório.

A determinação da massa volúmica foi realizada por um ensaio simples, de acordo o previsto na EN 772-13 para blocos de alvenaria. Nos provetes saturados, a superfície foi seca com um pano absorvente de modo a remover a humidade superficial. A balança utilizada foi a Kern FKB com uma precisão de 0,1 g. A massa volúmica é calculada segundo a equação 3.3:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3-3)$$

Em que, ρ (Kg/m³) é a massa volúmica, M (Kg) é a massa do bloco e V (m³) é o volume do bloco.

3.5.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão teve como base a norma europeia para tijolos cozidos EN 772-1 (2002) e a norma brasileira para blocos de terra comprimida NBR 8492 (1984). Diferentemente do estabelecido pela norma brasileira, os blocos foram ensaiados inteiros e perpendicularmente ao seu leito, segundo a sua face de maior área (Figura 19).

Neste ensaio, a força de compressão foi exercida por uma prensa hidráulica Toni pact, com uma capacidade de até 3000 kN e velocidade de carregamento mínimo de 0,1 kN/s. A gama de valores esperada para a resistência dos blocos é bastante inferior à capacidade da prensa, o que implicou a necessidade de acoplação de uma célula de carga com capacidade de 200kN, obtendo-se valores mais precisos. A célula de carga foi ligada a um data logger *Spider8*, tendo sido utilizado o software de aquisição de dados *Catman Express*.



Figura 19 - Ensaio de compressão: a) preparação do ensaio; b) provete após o ensaio.

De modo a avaliar o desenvolvimento temporal da resistência à compressão dos BTC, ensaiou-se provetes aos 3, 7, 28 e 90 dias. Avaliou-se também a variação da resistência dos BTC de acordo com o seu teor em água, sendo ensaiados blocos saturados, secos em estufa a 100°C e condicionados

em ambiente de laboratório (Tabela 8). Como ilustrado na Figura 19a), na superfície superior e inferior do bloco foram colocadas placas de contraplacado de forma a reduzir o atrito entre a superfície do bloco e da prensa e permitir a distribuição de força no provete. Para os ensaios aos 3 e 7 dias, em que eram esperados valores baixo para a força de compressão, a velocidade de carga foi de 4 kN/s. Nos ensaios aos 28 e 90 dias a velocidade adotada foi de 8 kN/s (0.35 MPa/s). Isso torna a avaliação da resistência entre os 7 e os 28 dias menos rigorosa.

A resistência á compressão foi calculada segundo a equação 3.4:

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (3-4)$$

Em que, f_c (MPa) é a resistência à compressão, F_c (N) é a força máxima de compressão e A (mm²) é a área da superfície comprimida.

3.5.3 Resistência à tração por flexão

No ensaio de resistência à tração por flexão é exercida uma força pontual a meio vão, o que origina uma força de tração na superfície inferior do provete. A norma NP EN 772-6 (2002) foi adaptada para este ensaio visto não existir nenhuma norma específica para a caracterização dos BTC.

Para este ensaio foi necessário um suporte que simulasse um apoio simplesmente apoiado a 2 cm de cada extremidade do bloco, deixando-se um vão de 18 cm (Figura 20). O prato superior da prensa acotoou diretamente sobre um varão com 15 mm de diâmetro posicionado a meio vão, de modo a exercer uma força pontual. Para tal, utilizou-se a prensa e a célula de carga indicadas no ponto 3.5.3. Os provetes utilizados neste ensaio foram todos condicionados em ambiente de laboratório e ensaiados aos 28 dias. Antes do ensaio, pesou-se e mediu-se as dimensões de cada provete e marcou-se os pontos nas extremidades e a meio vão de forma a garantir a correta realização do ensaio. O valor da força esperada para a rotura do provete era menor que 10% da resistência à compressão. Assim, a velocidade de carga utilizada no ensaio foi a mínima permitida pela prensa (0,1 kN/s).

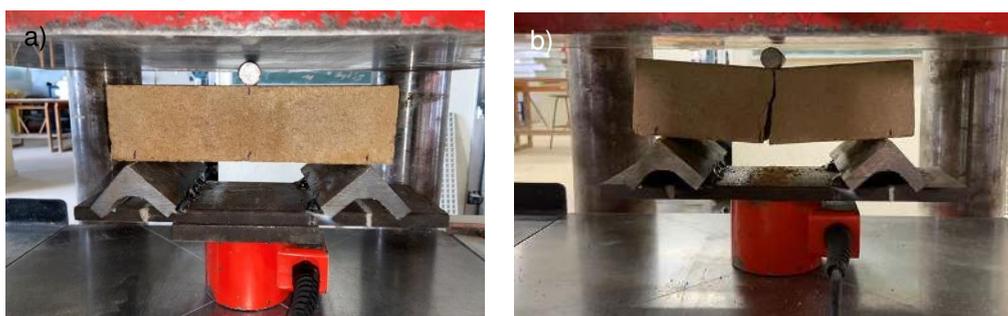


Figura 20 - Ensaio de tração por flexão: a) montagem do provete ; b) provete após o ensaio.

Os resultados da resistência a tração por flexão foram obtidos a partir da equação 3.5:

$$f_{ctr} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (3-5)$$

Em que, f_{ctr} (MPa) é a resistência à tração, F (N) é a carga máxima aplicada a maio vão, l (180 mm) é a vão entre os apoios, b (105 mm) é a largura e h (60 mm \pm 2 mm) é a altura do provete.

3.5.4 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi efetuada de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011), idealizada para o ensaio de provetes de betão, tendo sido adaptada para os BTC.

Neste ensaio, utilizou-se o mesmo suporte empregue para os ensaios com provetes de betão. No entanto, houve um ajuste na altura do suporte por não ser compatível com a altura dos blocos a serem ensaiados. Neste suporte (Figura 21), a força exercida pela prensa é transmitida por uma barra metálica e pelo auxílio de tiras de cartão prensado (250x10x4 mm) colocadas entre as faces do bloco e do suporte. Para além do suporte, foram utilizados os mesmos equipamentos referidos no ponto 3.5.2 para a aquisição dos dados.

Parte dos blocos foram condicionados em ambiente de laboratório e a outra parte em câmara húmida de acordo com as quantidades apresentadas na Tabela 8. Os provetes foram ensaiados aos 28 dias. Antes do ensaio, os blocos foram pesados e marcados para se evitar excentricidades, tendo-se especial atenção ao alinhamento do bloco no suporte. A velocidade de carga foi de 0,1 kN/s.

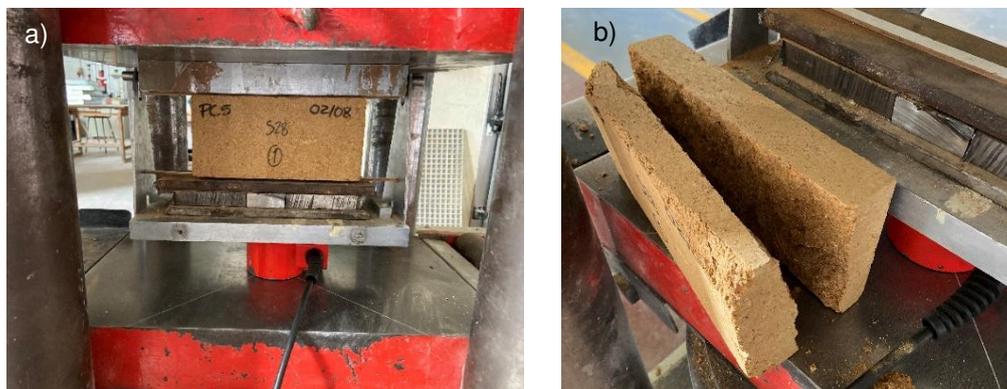


Figura 21 - Ensaio de tração por compressão diametral: a) ensaio; b) provete após rotura.

O valor para a resistência a tração por compressão diametral é obtido segundo a equação 3.6:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d} \quad (3-6)$$

Em que, $f_{ct,sp}$ (MPa) é a resistência à tração, F (N) é a carga máxima aplicada a maio vão, l (220 mm) é a comprimento do provete e d (60 mm \pm 2 mm) é a secção transversal do provete.

3.5.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, permite avaliar a rigidez de um determinado material sólido. Esta propriedade define a relação entre a tensão e a deformação do material em regime elástico e segundo uma direção uniaxial. Este ensaio foi realizado tendo por base a adaptação da especificação E397 (1993), pensada para provetes de betão, recorrendo à utilização de extensómetros. Para cada uma das composições PC10 e RC10 foi apenas ensaiado um provete aos 28 dias de idade. Os provetes foram curados em laboratório até à idade de ensaio, conforme resumido na Tabela 8.

O ensaio foi realizado na prensa Instron com capacidade de 250 kN existente no laboratório de estrutura e resistência dos materiais do IST. Inicialmente, foi necessário preparar a superfície dos blocos com um betume de reparação onde foram posteriormente colados extensómetros do tipo *TML*

modelo *PFLW-30-11-3LJC* de 120 Ω , colados superficialmente a meia altura dos provetes e em faces opostas (Figura 22).

A maior dificuldade deste ensaio consiste em definir a velocidade de carregamento e a carga máxima de modo a não ultrapassar o regime elástico do provete. Após ensaios prévios, a velocidade adotada para este ensaio foi de 3,2 kN/s e a carga máxima de cerca de 1/3 da resistência à compressão, que corresponde a cerca de 6 kN. A aquisição dos valores de medição de força e deslocamento foi efetuada através do *data logger Spider 8*.

O procedimento utilizado implicou a realização de pelo menos 4 ciclos de carga e descarga, em que se fez variar a tensão na secção de 0,5 MPa até 1/3 da resistência à compressão estimada. O ensaio foi realizado por controlo de força, tendo sido concluído quando se verificaram diferenças inferiores a 10% entre as extensões médias obtidas em ciclos consecutivos. O módulo de elasticidade é calculado de acordo com a equação 3.9.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} \times 10^{-3} \quad (3-7)$$

Em que, E (GPa) é a módulo de elasticidade, σ_f e σ_i (MPa) é a tensão final e inicial e ε_f e ε_i (% $\times 10^{-6}$) é a extensão final e inicial.



Figura 22 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade.

3.5.6 Velocidade de propagação de ultrassons

A técnica de ultrassons é um ensaio não destrutivo realizado por meio de ondas ultrassônicas, a fim de detetar internamente possíveis defeitos nos materiais. Este ensaio permite avaliar, indiretamente, a densidade do material. Segundo a teoria de propagação de ondas, quanto mais denso o material, maior será a velocidade de propagação das ondas sonoras nesse meio.

O ensaio teve como base a norma NP EN 12504-4 (2007), adotando-se o equipamento Pundit *Lab+* (*Proceq*) ilustrado na Figura 23. Por cada composição, ensaiaram-se dois provetes para diferentes teores de humidade aos 28 dias de idade. Devido à irregularidade da superfície do provete e de forma a facilitar a transmissão de ondas ultrassônicas aplicou-se vaselina sólida na superfície de contacto entre o provete e os transdutores. Basicamente, o ensaio consistiu na determinação da velocidade de ultrassons resultante do quociente entre o comprimento do provete (220 mm) e o tempo

de propagação das ondas entre transdutores posicionados em faces opostas. Os valores do tempo e velocidade de propagação de ultrassons são lidos diretamente no equipamento.



Figura 23 - Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons.

3.5.7 Esclerômetro pendular

Este ensaio, não destrutivo, tem como principal objetivo medir a dureza superficial de um material, baseando-se no princípio da reflexão de uma massa elástica, de acordo com o descrito nas normas ASTM C805 e EN 12504-2. O esclerômetro utilizado para este ensaio é do tipo PT, adequado para materiais com baixa resistência à compressão (Galvão, 2009).

Ensaiou-se dois blocos de cada composição PC10, RC10, RC5PC5, RC2PC8 e T. O ensaio consiste em encostar o equipamento ao provete e libertar o pêndulo que percorre 180° até golpear a superfície (Figura 24). Neste ensaio o bloco foi encostado a uma parede rígida de modo a não haver perda de energia, a quantidade de energia recuperada é medida pelo ressalto do pêndulo. Os resultados são lidos diretamente no esclerômetro em uma escala acoplada ao aparelho. Estes valores não devem ser relacionados com outros resultados obtidos em aparelhos diferentes, sendo apenas adequados para efeitos de estudos comparativos.



Figura 24 – Ensaio com o esclerômetro pendular: a) Equipamento; b) Medição

3.5.8 Retração

A retração total dos BTC foi medida de acordo com o procedimento indicado na especificação LNEC E-398 (1998). Após a produção dos blocos, os provetes foram condicionados em tela plástica durante as primeiras 24 horas, de modo a prever perdas de água por evaporação. Em seguida, foram

colocadas pastilhas metálicas na direção diagonal dos blocos (Figura 25), de modo a permitir comportar a base de medida do comparador (200 mm). Posteriormente, os blocos foram conduzidos para uma câmara condicionada com temperatura média de 27 ± 2 °C e humidade relativa de $60 \pm 2\%$, onde permaneceram durante a realização do ensaio. A monitorização da retração foi realizada com recurso a um comparador (*DEMEC Mitutoyo Absolute*) de 1 µm de precisão e curso de 5,0 mm capaz de medir a variação dimensional dos provetes por comparação com uma barra padrão.

Para este ensaio utilizou-se três blocos de cada uma das composições PC10 e RC10 (Figura 25). A variação de dimensão foi monitorizada durante 21 dias, obtendo-se registos após 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 16, 20 dias de idade. A extensão de retração foi medida de acordo com a equação 3.7.

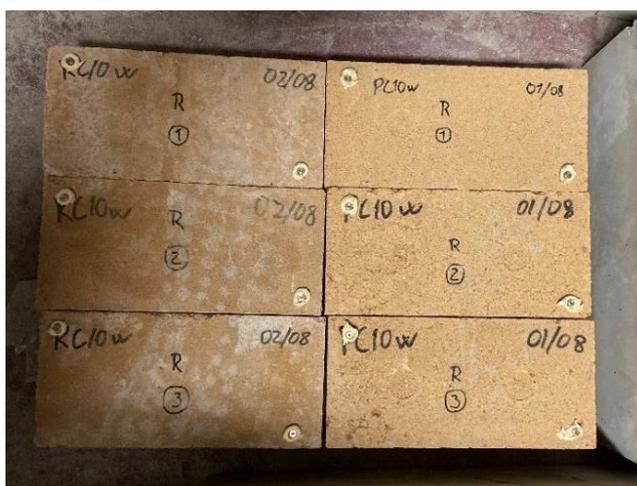


Figura 25 – Provetes do ensaio de retração.

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta_i - \Delta_0}{d_0} \quad (3-8)$$

Em que, ε (m/m) é a extensão de retração, Δ_i (mm) é a variação de dimensão no dia i , Δ_0 (mm) é a variação de dimensão inicial e d_0 (mm) é a distancia entre os pontos de medição inicial.

3.5.9 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica foi medida com base na norma ISO/FDIS 10456 (2007), tendo-se utilizado o equipamento de medição ISOMET 2114 (Applied Precision Enterprise) com uma sonda plana. Este equipamento determina a condutibilidade térmica através de um método transiente, determinando a resposta a um impulso de calor aplicado ao provete, que promove a geração de um fluxo de calor. O ensaio consiste em encostar o sensor do aparelho na superfície do provete (Figura 26), que em pouco tempo devolve o valor da condutibilidade térmica. O equipamento fornece diretamente os valores do coeficiente de condutibilidade térmica, λ , em W/mK e da capacidade térmica volumétrica, em J/m³K. O erro indicado pelo fornecedor é de cerca de 10%, para λ entre 0,7 e 2,5 W/mK, e de 5%+0,001 W/mK, para λ entre 0,0015 e 0,7 W/mK.

Dado que a condutibilidade térmica é afetada pelo teor de humidade, os BTC foram ensaiados para 3 níveis de pré-condicionamento: equilíbrio com o ambiente de laboratório; secos em estufa a 100°C; saturados (imersos por mais de 48 horas). Os provetes secos e saturados foram revestidos por um plástico de modo a evitar trocas de humidade com o exterior. De forma a garantir uma maior

fiabilidade nos resultados, este ensaio foi realizado em uma câmara condicionada com humidade e temperatura controlada.

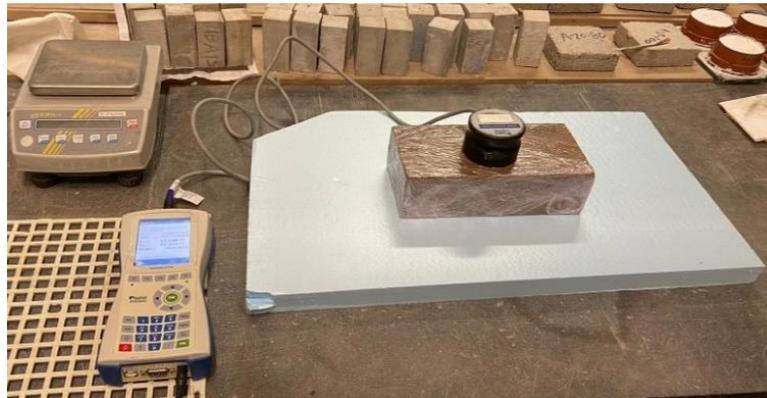


Figura 26 - Ensaio de condutibilidade térmica.

De acordo com a norma ISO/FDIS 10456 (2007) é necessário converter os resultados para uma temperatura de referência de 10°C, conforme a equação 3.8:

$$\lambda_p = \lambda_1 \times e^{f_t(T_p - T_1)} \quad (3-9)$$

Em que, λ_1 e λ_p (W.°C/m) é o coeficiente de condutibilidade térmica em condições de temperatura de ensaio e padrão, f_t (0,001, Tabela A.11 da ISSO/FDIS 10456) é o coeficiente de conversão de temperatura e T_1 e T_p (°C) é a temperatura de ensaio e padrão.

3.5.10 Permeabilidade à água

Este ensaio tem como objetivo determinar o coeficiente de permeabilidade à água dos BTC, que é uma medida da taxa com que um dado caudal de água atravessa uma área de material. Parte-se do princípio que quanto maior a porosidade aberta do material, menor será a sua resistência ao escoamento de água. Por não existir um documento normativo para este ensaio, adotou-se o procedimento realizado por Silva (2015), que teve por base outros ensaios sobre provetes de betão realizados no IST (Bogas 2011).

O equipamento utilizado para este ensaio é composto por dois reservatórios, um de ar comprimido e outro de água que, com apoio de válvulas, permite controlar o escoamento e pressão de água pretendida (Figura 27). Basicamente o ensaio consiste em submeter meios blocos a uma pressão de água constante de 100 kPa e, após a estabilização do fluxo de água, registar a água escoada dos provetes durante 5 minutos.

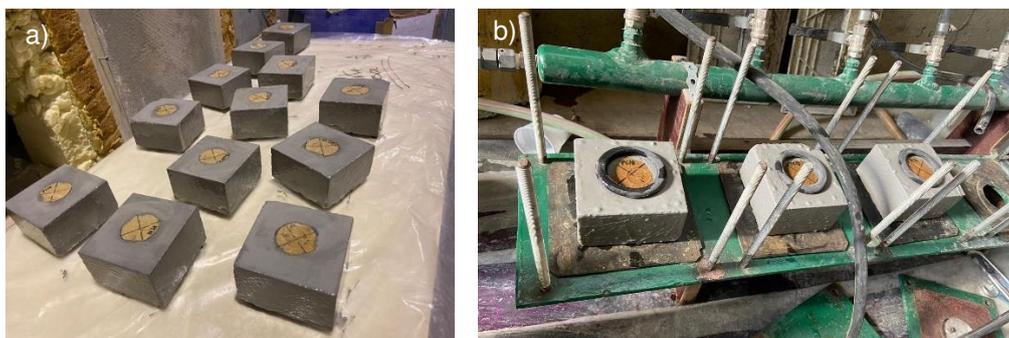


Figura 27 - Ensaio de permeabilidade à água: a) pintura com tinta epóxi; b) ensaio.

Para cada composição com incorporação de 10% de ligante foram ensaiados três meios inicialmente curados em ambiente de laboratório, conforme indicado na Tabela 8. Os provetes foram impermeabilizados com uma resina epóxi bi-componente (Master Seal M 338), exceto na região de entrada e saída de água, onde ficou por vedar uma área circular centrada de 5 cm de diâmetro (Figura 27a). Antes do ensaio e após a secagem da resina, os provetes foram imersos em água durante três dias, de modo a evitar fenômenos de capilaridade. Em seguida, os provetes foram apertados entre duas chapas metálicas, com auxílio de anilhas de borracha, de forma a evitar possíveis fugas de água.

O valor do coeficiente de permeabilidade é calculado segundo a Lei de Darcy, assumindo-se em escoamento laminar e permanente, para uma temperatura de ensaio de 20°C, sendo obtido pela equação 3.10 (Kropp, et al. 1995):

$$k_w = \frac{Q * l}{A * \Delta h} \quad (3-10)$$

Em que, k_w (m/s) é o coeficiente de permeabilidade, Q (m³/s) é o caudal de água escoado, l (0,06 m) é a espessura do provete, A (m²) é a área de penetração da água, área circular de 5 cm de diâmetro e Δh (m.H₂O) é a variação da pressão da água, 100 kPa.

3.5.11 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção por imersão permite avaliar de forma indireta a porosidade aberta dos blocos, propriedade que se relaciona com a durabilidade e resistência à água. Neste ensaio foi adotada a Especificação LNEC E394 (1993) e a norma NBR 8492 (1984), adaptada ao caso específico dos BTC. Para algumas das composições selecionadas foram ensaiados 2 provetes, que foram previamente condicionados em laboratório ou em câmara húmida, conforme indicado na Tabela 8. Seguindo a norma NBR 8492 (1984), os provetes foram totalmente imersos em água com aproximadamente 2 cm entre a face superior do bloco e a superfície da água. De forma a garantir o máximo contacto entre a superfície bloco e a água, foram colocadas ripas entre o fundo do tanque e a superfície inferior dos blocos (Figura 28).

Conforme estabelecido na especificação E394 (1993), o tanque de imersão foi colocado em uma sala com temperatura de 20 ± 2°C. Registou-se a massa dos blocos ao fim de 24 horas e 48 horas, limpando-se o excesso de água na superfície dos blocos em cada pesagem. Por fim, os provetes foram secos em estufa ventilada a 100 ± 5°C até massa constante.



Figura 28 - Ensaio de absorção de água por imersão.

O valor da absorção de água por imersão em um determinado instante, é determinado em percentagem de massa pela equação 3.11:

$$A_i = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3-11)$$

Em que, A_i (%m) é a absorção de água em massa, m_i (g) é a massa do provete no instante i e m_s (g) é a massa do provete seco.

3.5.12 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com o sugerido nas normas NTC 5324 (2004) e NP EN 772-11 (2002), permitindo avaliar a absorção velocidade de absorção capilar dos BTC.

Para cada composição foram ensaiados três provetes que foram acondicionados em ambiente de laboratório ou em câmara húmida, conforme indicado na Tabela 8. Aos 28 dias, os provetes foram secos em estufa ventilada a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante. Idealmente e, segundo a norma adotada, os blocos deveriam ser ensaiados deitados, no entanto, após um ensaio prévio, verificou-se que a altura do bloco não era suficiente para obter resultados representativos. Em menos de 4 horas ocorria a absorção total dos blocos. Dessa forma, os blocos foram ensaiados ao alto, como se ilustra na Figura 29. Em um tabuleiro com ripas metálicas, os blocos foram posicionados de modo a submergir a face lateral em aproximadamente 5 mm de altura. Os blocos foram pesados após 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 2 horas, 6 horas, 24 horas e 72 horas. Antes de cada pesagem, removeu-se a humidade superficial com um pano absorvente.

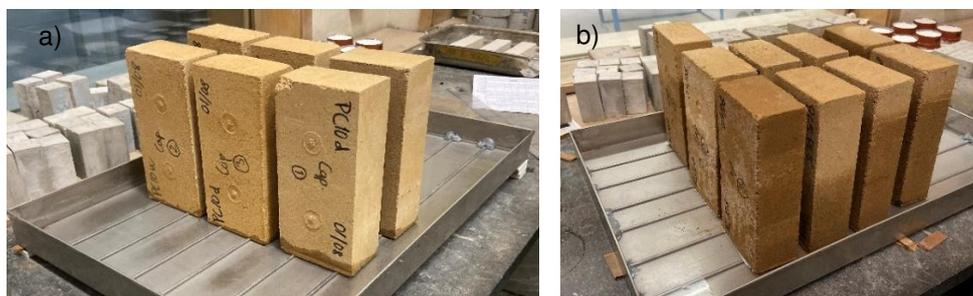


Figura 29 - Ensaio de absorção capilar: a) início do ensaio; b) provetes ao fim de 48 horas.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade, é determinado segundo a equação 3.12:

$$C_c = \frac{(m_t - m_s)}{A\sqrt{t}} \times 100 \quad (3-12)$$

Em que, C_c ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) é o coeficiente de absorção de água por capilaridade, m_t (g) é a massa do provete no instante t , m_s (g) é a massa do provete seco, t (min) é o tempo decorrido entre o início do ensaio e o instante da medição da massa e A (m^2) é a área de contacto entre o provete e a água.

3.5.13 Absorção de água a baixa pressão

O ensaio de absorção de água a baixa pressão avalia a permeabilidade da superfície do bloco ao contacto com a água. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 16302 (2013), sendo utilizado o tubo de Karsten para superfícies verticais com uma abertura de 2,5 cm de diâmetro e com capacidade de 4 cm^3 de volume de água.

Os blocos foram mantidos em ambiente de laboratório, sendo ensaiado um bloco por composição. Os blocos foram secos em estufa ventilada com uma temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante, conforme referido na Tabela 8. Aos 28 dias foram colados tubos de Karsten na superfície lateral, perpendicular ao leito dos blocos (Figura 30), que coincide com a superfície a ficar diretamente em contacto com o exterior. Após fixados com auxílio de mástique, os tubos são preenchidos com água até ao nível de graduação de 4 cm^3 e regista-se o volume de água absorvido em diferentes intervalos de tempo (Anexo A.2).



Figura 30 - Ensaio de absorção de água à baixa pressão.

O resultado é obtido pelo declive da reta que resulta da interpolação linear do tempo e a razão da massa de água absorvida com a área de absorção, representada pela equação 3.13:

$$C_{abs}^i = Declive \begin{cases} x : [0, t_i] \\ y : [0, \frac{m_i}{A}] \end{cases} \quad (3-13)$$

Em que, C_{abs}^i (kg.s/m^2) é o coeficiente de absorção no instante i , A (cm^2) é a área de absorção de água $1,35^2 \cdot \pi$, m_i (g) é a massa de água absorvida até ao instante i e t_i (s) é o tempo decorrido desde o início do ensaio até ao instante i .

3.5.14 Erosão acelerada (*spray test*)

O principal objetivo deste ensaio é determinar a resistência à erosão dos BTC por meio de um jato de água sob pressão, simulando-se a ação de chuva intensa. Este ensaio foi desenvolvido pela CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*) e encontra-se presente na norma NZS 4298 (1998). O equipamento utilizado foi preparado exclusivamente para este ensaio, de modo a cumprir os requisitos desta norma.

O ensaio consiste em direcionar um jato de água horizontal com uma pressão de 50 kPa durante 1 hora ou até à rotura do bloco, com paragens sucessivas de 15 em 15 minutos para controle da profundidade erodida (Figura 31). Segundo a norma adotada, a face de exposição do bloco deveria ser uma área circular de 150 mm de diâmetro. No entanto, devido à reduzida dimensão dos blocos (220x105x60 mm), foi necessário diminuir a área de exposição para 100 mm de diâmetro.

Foram ensaiados 2 provetes por composição, que foram previamente condicionados em ambiente de laboratório (Tabela 8). Complementarmente, o ensaio foi ainda realizado para uma pressão de 250 kPa (pressão máxima garantida pela rede de distribuição), de modo a permitir uma melhor avaliação da durabilidade relativa dos vários tipos de BTC estudados neste trabalho.

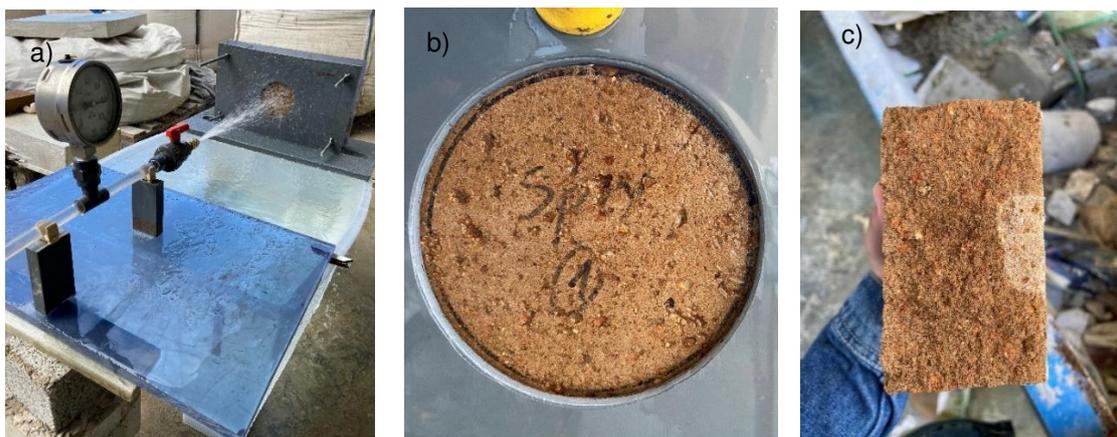


Figura 31 - Ensaio de erosão acelerada: a) equipamento utilizado; b) erosão superficial do bloco RC10; c) penetração de humidade.

O resultado consiste na quantificação da profundidade erodida (PE) e da profundidade de penetração de humidade (PH), medida após secção dos blocos. Com base na norma NZS 4298 (1998) e tendo em consideração a máxima espessura de 60 mm dos BTC, foram considerados os seguintes índices de erosão (IE) em função do valor de PE: $0 \leq PE < 10$ (EI1); $10 \leq PE < 25$ (EI2); $25 \leq PE < 45$ (EI3); $45 \leq PE < 60$ (EI4); $60 \geq PE$ (EI5).

3.5.15 Análises termogravimétrica (TG) e difração de raios-X (DRX)

Para os ensaios de TG e DRX foram inicialmente preparadas amostras resultantes da moagem de 20 gramas de cada bloco (PC10 e RC10). O ensaio de termogravimetria foi realizado com o apoio do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com recurso a um equipamento *SETARAM*, modelo *TGA92*. Resumidamente, este ensaio consistiu em monitorizar a perda de massa de 1 grama da amostra através de uma balança de alta precisão (sensibilidade na ordem de $0,1 \mu\text{g}$) sujeita a um ambiente controlado de temperatura, pressão e atmosfera circundante. A amostra foi submetida a um aumento gradual de temperatura até $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, para uma taxa de $10^\circ\text{C}/\text{minuto}$, registando-se a sua variação de massa. A curva de perda de massa indica variações na composição das fases, enquanto que a derivada dessa curva assinala as regiões onde terá ocorrido uma transformação do material.

O ensaio de difração de raios-X, foi realizado no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do IST, com recurso ao difratómetro PANalytical X'Pert Pro. As amostras foram sujeitas a um varrimento de raios-X entre 5 e $70 \text{ }^\circ 2\theta$ com um passo angular de $0,033 \text{ }^\circ 2\theta$, para um tempo equivalente a 148 segundos. A difração de raios-X é um ensaio que permite a identificação dos minerais constituintes de um determinado material. Carvalho (2020) refere que as principais fases cristalinas observadas no cimento reciclado são a Iarnite, CH, etringite, calcite e cal, variando em quantidade de acordo com a temperatura de termoativação do cimento reciclado. No cimento Portland normal, nota-se uma maior quantidade de etringite e C-S-H que no cimento reciclado.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se e discute-se os resultados referentes à caracterização dos blocos de terra comprimida (BTC) em termos de propriedades físicas, resistência mecânica, propriedades de transporte e resistência à água. A caracterização dos BTC teve por base a realização da campanha experimental descrita no capítulo 3. Inicialmente, aborda-se a caracterização da terra e do cimento utilizado na produção dos BTC, de forma a identificar a influência destes materiais nas propriedades dos BTC, seguido da discussão relativa aos estudos de caracterização dos BTC.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA TERRA E DO CIMENTO RECICLADO

A terra selecionada para a produção dos BTC foi uma areia argilosa com 20,1% de seixo fino, 48,4% de areia e 31,5% de material fino (argila e silte). Na Figura 32 é apresentada a curva granulométrica da terra selecionado. De acordo com o ensaio descrito em 3.2.4, a terra apresentava menos de 1% de matéria orgânica, podendo-se considerar que, conforme desejável, este fator teve uma influência pouco significativa nas propriedades dos BTC.

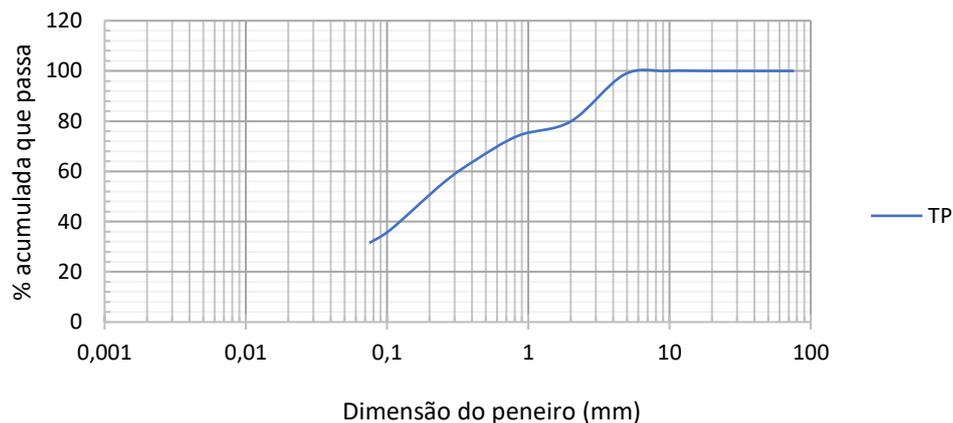


Figura 32 - Curva granulométrica da terra selecionada.

A massa volúmica das partículas da terra, de acordo com 3.2.5, foi de $2,85 \text{ g/cm}^3$, sendo ligeiramente superior à massa volúmica dos solos utilizados em outros trabalhos realizados no IST (aproximadamente $2,65 \text{ g/cm}^3$, Silva, 2015; Lopes, 2015). Os limites de consistência, determinados conforme 3.2.1, enquadram-se na gama de valores recomendada (Barbosa, 1996; Burroughs, 2008; Rigassi, 1985), tendo-se obtido um limite de liquidez de 30% e um limite de plasticidade de 22%, a que corresponde um índice de plasticidade de 8%. O teor ótimo em água (TOA), determinado conforme 3.2.2, foi de 16% para uma massa volúmica seca de aproximadamente 1800 kg/m^3 . Este valor de teor de água serviu de base à estimativa inicial da quantidade de água a adoptar na produção dos BTC (secção 4.2).

Como referido no capítulo 3, os ligantes utilizados para a estabilização da terra foram o cimento reciclado (CR) e o cimento Tipo I 42,5 (CP). Em 3.3.1 apresentam-se os resultados de caracterização do CP, conforme indicado pelo fabricante. Na Tabela 9 resumem-se os resultados referentes à caracterização do cimento reciclado, nomeadamente no que se refere à sua composição química, massa volúmica, resistência mecânica, exigência de água e tempo de presa.

Tabela 9 – Propriedades do cimento reciclado (CR).

Parâmetros		Normas	CR
Massa volúmica absoluta ^a (g/cm ³)			3,00
Resistência à compressão em pastas de consistência normal (MPa)	3 dias		9,8
	7 dias	EN 196-1	13,7
	28 dias		17,3
Resistência à flexão em pastas de consistência normal (MPa)	3 dias		0,96
	7 dias	EN 196-1	1,17
	28 dias		1,22
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)		EN 196-2	19,14 + 5,13 + 3,00
CaO + MgO (%)		EN 196-2	60,79 + 1,77
CaO livre (%)		EN 451-1	13,94
Exigência de água (a/l)		EN 196-3	0,73
Tempo de presa (min)	Inicial		290
	Final	EN 196-3	385

^a Através da medição por picnómetro de hélio

A resistência mecânica do CR foi determinada sobre pastas de consistência normal, de acordo com o referido em 3.3.3. Estes valores não podem ser diretamente comparados com os obtidos na caracterização do CP, visto que estes foram ensaiados em argamassas de referência com diferente composição. Recentemente, Carvalho (2020) obteve os seguintes resultados de resistência à compressão aos 3 e 28 dias em pastas de idêntica relação a/l (0.72), produzidas com CR termoativado a 650°C ou com CEM I 42.5 (CP): pastas com CP – 14.0 MPa (3 dias) e 26.5 MPa (28 dias); pastas com CR – 16.7 MPa (3 dias) e 19.2 MPa (28 dias). No presente trabalho, as resistências obtidas na pasta com CR foram inferiores, principalmente aos 3 dias de idade. No entanto, em geral, verifica-se que os valores obtidos de resistência à tração e à compressão estão de acordo com o reportado em outros trabalhos (Bandeiras, 2021; Carvalho 2020; Carriço *et al.*, 2020, Bogas, 2019). Tendo em consideração a resistência obtida nas pastas de CP produzidas por Carvalho (2020), conclui-se ainda que o cimento reciclado foi capaz de apresentar adequada capacidade de hidratação, atingindo resistências aos 28 dias de cerca de 65% da obtida em pastas com PC de a/l semelhante.

Os valores indicados de massa volúmica e composição química foram determinados no âmbito do trabalho de Leal (2021), também realizado no IST no âmbito do projeto EcoHydb. Finalmente, os resultados referentes ao tempo de presa, determinados de acordo com 3.3.3, indicam um retardamento da mesma, para inícios de presa cerca de 1,7 vezes superiores aos obtidos no CEM I 42.5. Este retardamento está de acordo com o reportado por outros autores (Bogas *et al.* 2020, Real *et al.* 2020), sendo justificado pela menor finura e maior estado de aglomeração do CR, bem como o facto de este cimento apresentar um estágio de indução mais prolongado do que o CP.

Verificou-se ainda que para a mesma relação a/l, as pastas com CP apresentaram consistência fluida, para espalhamentos muito superiores aos registados nas pastas com CR de consistência normal. Este aumento significativo de exigência de água, igualmente reportado por vários autores (Balduco *et al.*, 2019; Shui *et al.* , 2009; Xuan *et al.*, 2010, Bogas *et al.* 2020), está essencialmente associado à natureza porosa e elevada área superficial das partículas de CR, bem como à extinção da cal livre presente nestes cimentos (Tabela 9).

4.2 ESTADO FRESCO E COMPOSIÇÃO DOS BTC

Durante a fase de produção dos BTC existem diversos fatores que afetam a sua qualidade final. Alguns desses fatores são facilmente controlados ainda na fase de produção, permitindo a identificação dos blocos com menor qualidade. Neste trabalho controlou-se o teor de água da mistura, a relação água/ligante, a massa volúmica fresca e a espessura dos blocos. Na Tabela 10 apresentam-se os resultados referentes a estes parâmetros. Os valores indicados de massa volúmica fresca, ρ_{fr} , referem-se à média dos resultados obtidos em cada BTC produzido, após aferição da sua massa e geometria. A relação a/l_{efet} refere-se à quantidade de água livre na mistura após descontar cerca de 4% de absorção de água da terra.

Tabela 10 - Massa volúmica fresca, ρ_{fr} , teor de água, composição, teor de vazios, V_v , estimativa da porosidade total, $P_{T,MVf}$, e espessura média dos BTC, e_{BTC} .

Mistura	ρ_{fr} (kg/m ³)	Teor de água (%)	Relaçã o a/l_{efet}	M_{CP} (kg/m ³)	M_{CR} (kg/m ³)	M_T (kg/m ³)	V_v (%)	$P_{T,MVf}$ (%)	e_{BTC} (mm)
PC10	1991	15,0	1,1	179		1552	12,8	36,4	61
RC10	1871	16,5	1,25		166	1439	16,5	41,0	61
PC5	1950	15,2	2,2	88		1605	14,1	39,2	61
RC5	1879	15,2	2,2		85	1546	17,6	41,7	61
RC2PC8	1954	15,0	1,1	141	35	1523	14,4	37,5	61
RC5PC5	1870	15,5	1,15	84	84	1451	17,2	40,2	61
T	2026	14,4				1771	12,4	37,9	59

Conforme referido, a terra foi caracterizada por um TOA de 16%. Segundo AVEI (2014), a utilização de teores de água mais baixos resulta em uma maior resistência mecânica, maior durabilidade e melhor comportamento térmico. Duarte (2013) também sugere que a obtenção de valores inferiores ao TOA, apesar de não conduzir ao valor máximo de compactidade, conduz a maior resistência mecânica a longo prazo. Nos blocos estabilizados, a relação a/l tem também influência na qualidade e resistência dos mesmos. Assim, é importante encontrar um teor em água que permita atingir uma boa compactidade, sem conduzir a um aumento significativo da relação a/l . O teor em água para as várias misturas variou entre 14.4 e 16.5%, sendo ligeiramente inferior ao TOA. Estes valores estão acima do recomendado por Rigassi (1985) (10 a 13%), devido ao elevado TOA da terra selecionada. Em resultado da maior exigência de água do CR, conforme analisado em 4.1, os BTC com 10% deste tipo de cimento foram moldados com um maior teor de água e, por conseguinte, uma maior relação a/l , face à mistura de referência de igual teor de ligante.

A massa volúmica fresca relaciona-se diretamente com o grau de compactação. A compactação do bloco é influenciada não apenas pelo teor de água da mistura, mas também pela pressão exercida pela própria prensa. Segundo a ficha técnica da prensa utilizada, esta exerce uma pressão de compactação entre 2 a 4 MPa (Appro Techno, 2021), dependendo da quantidade de mistura colocada dentro do molde e da calibração da prensa.

De acordo com Rigassi (1985), o valor da massa volúmica fresca mínima ideal é de 1800 kg/m³, recomendando um valor de 2200 kg/m³. Silva (2015) e Lopes (2015), reportam massas volúmicas frescas de blocos estabilizados e não estabilizados de 2010 kg/m³ e 1930 kg/m³, respetivamente. No presente trabalho, a massa volúmica nos blocos não estabilizados foi cerca de 0.8% superior. Assumindo que o grau de compactação foi equivalente, visto que estes autores utilizaram a mesa

prensa, a diferença de massa volúmica deverá estar associada ao diferente teor em água das misturas e ao facto da massa volúmica das partículas da terra utilizada neste trabalho ($2,85 \text{ g/cm}^3$) ser cerca de 7% superior ao da terra utilizada por estes autores ($2,66 \text{ g/cm}^3$).

Nos blocos estabilizados com CP seria esperado uma massa volúmica fresca superior à dos blocos não estabilizados, visto que a massa volúmica do cimento é cerca de 10% superior à da terra. No entanto, estas misturas foram produzidas com maior teor em água do que os BTC não estabilizados. Por sua vez, nos blocos estabilizados com CR, observa-se que a massa volúmica fresca é cerca de 4-6% inferior à dos blocos estabilizados com CP, o que não se justifica apenas pela ligeira redução na massa volúmica do cimento reciclado face ao CP (Tabela 9). A natureza porosa do CR e a sua maior exigência de água (secção 4.1), aumentando a relação a/l, conduzem a uma maior redução de massa volúmica, para além de poderem contribuir para uma maior dificuldade de compactação das misturas.

Conhecendo o traço ponderal das misturas (secção 3.4) e sabendo a massa volúmica fresca das mesmas (Tabela 9) é possível estimar a composição final dos BTC (Massa de cimento, M_{CP} , ou cimento reciclado, M_{CR} e Massa de terra seca, M_T , por m^3 de mistura), bem como o seu teor de vazios acidental, apresentado na Tabela 10. Como é possível confirmar, os BTC com CR foram produzidos com menor compactidade, o que se deverá refletir nas restantes propriedades analisadas neste trabalho. Verifica-se também que as misturas com menor teor de cimento conduzem a blocos de menor compactidade, associados a menores otimizações granulares após compactação. O menor volume de vazios foi atingido nas misturas não estabilizadas, corroborando a utilização de um TAO mais otimizado.

Na Tabela 10 apresenta-se ainda uma estimativa da porosidade total dos BTC no estado endurecido, a longo prazo ($P_{T.mvf}$), tendo por base o conhecimento do valor da massa volúmica fresca. Para tal, admite-se que a porosidade total dos BTC a longo prazo corresponde ao volume de vazios equivalente à soma do volume de ar e do volume de água que não reage com o cimento. De acordo com Neville (1995) pode-se admitir que a água de hidratação corresponde a cerca 23% da massa de cimento, embora esta varie em função do tipo e composição do mesmo. Pelas razões abordadas em 4.3, considerou-se 22% no caso do CR. Finalmente, considerando uma percentagem de hidratação a longo prazo de 80% (Silva, 2018), na Tabela 10 estima-se a porosidade total dos blocos. Na determinação do volume dos produtos hidratados, assume-se que este corresponde à soma do volume de cimento anidro com o volume de água combinada, reduzido de 0,254 (Neville 1995). Note-se que nesta estimativa de porosidade, determinada tendo por base as suposições referidas, não se tem em consideração eventuais fenómenos de retração, o que torna a estimativa apenas aproximada.

A porosidade total variou entre 36,4% e 41,7%, dependendo do tipo de composição. Após hidratação, a menor porosidade total é atingida na mistura com 10% CP. Por sua vez, a estimativa de porosidade confirma a obtenção de BTC de menor compactidade quando se incorpora CR. Os valores estimados de porosidade nos BTC estabilizados são superiores ao determinado por Lopes (2015) e Silva (2015) em BTC com 8% de CP, cuja porosidade atingida foi de 30%. Isso significa que foi atingida uma menor otimização com a terra utilizada neste trabalho, associado a um maior TOA. Nos BTC não estabilizados atingiram-se porosidades de cerca de 38%, ligeiramente superior às de Lopes (2015) e Silva (2015), que foram cerca de 35%.

4.3 MASSA VOLÚMICA NO ESTADO ENDURECIDO

A massa volúmica no estado endurecido dos BTC é um ensaio não destrutivo e permite aferir de forma indireta a qualidade e compacidade dos blocos. Na Tabela 11 apresentam-se os valores obtidos de massa volúmica aos 28 dias (para BTC curado em ambiente de laboratório), bem como os valores de massa volúmica seca e saturada determinados de acordo com 3.5.1, após 28 dias de idade. Em relação à massa volúmica seca e saturada, foram apenas ensaiadas as misturas PC10, RC10, RC2PC5, RC5PC5 e T. Na Figura 33 resume-se a evolução da massa volúmica em função das suas condições de cura, para as várias misturas.

Tabela 11 – Massa volúmica no estado endurecido, aos 28 dias - ρ_{28d} , seca - ρ_{seca} , saturada - $\rho_{saturada}$ e PT_{mvs} – porosidade total, calculado a partir da massa volúmica seca.

Mistura	ρ_{28d} (kg/m ³)	ρ_{seco} (kg/m ³)	ρ_{sat} (kg/m ³)	PT_{mvs} (%)
PC10	1864	1732	2030	38,4
RC10	1729	1629	1913	42,1
PC5	1793			
RC5	1718			
RC2PC8	1797	1689	1973	39,9
RC5PC5	1789	1646	1950	41,4
T	1815	1794		37,1

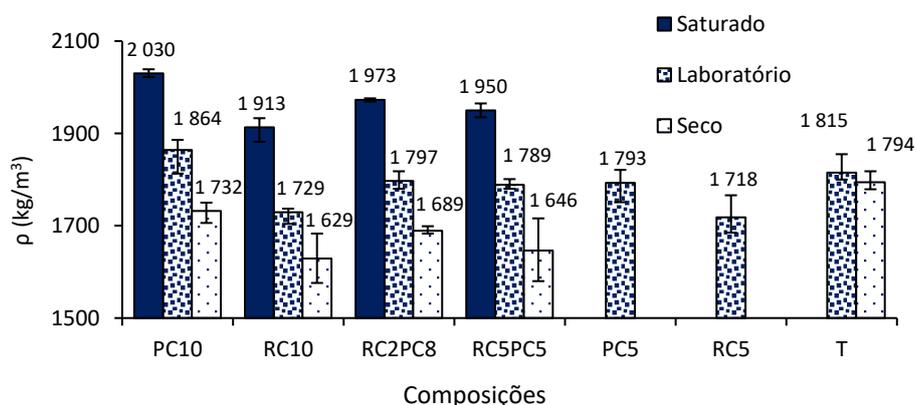


Figura 33 - Massa volúmica no estado endurecido para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa até massa constante; após 28 dias el laboratório.

Conforme seria de esperar, existe uma redução de massa volúmica com a diminuição do teor de humidade dos BTC (Figura 33). No caso dos blocos não estabilizados verificou-se ainda que estes desagregaram-se após imersão em água, não tendo sido possível determinar a sua massa volúmica saturada. Salienta-se assim a importância da estabilização na resistência à água dos BTC. Nesse sentido, o CR revelou ser eficiente na estabilização dos BTC, demonstrando possuir adequadas propriedades hidráulicas.

Face ao observado para a massa volúmica fresca, os BTC não estabilizados apresentam massa volúmica seca mais próxima dos BTC com CP (Tabela 11). Isso seria de esperar, visto que nos BTC não estabilizados toda a água da mistura é removida por evaporação, ao passo que nos BTC com CP parte da água reage com o cimento, aumentando assim a sua massa volúmica. Novamente, os BTC

com CR apresentaram os menores valores de massa volúmica seca. Por sua vez, ao contrário do esperado, verificou-se que a variação de massa volúmica fresca para a massa volúmica seca foi ligeiramente superior nos BTC com CP (259 kg/m^3) do que nos BTC com CR (242 kg/m^3). Por um lado, como referido, os BTC com CR foram produzidos com relações a/l superiores, devido à sua maior exigência de água. Por outro lado, o CR deverá fixar menos quantidade de água de hidratação do que o CP, embora a diferença não seja significativa (Bogas *et al.*, 2020). De facto, os silicatos de cálcio nos cimentos reciclados encontram-se apenas na forma de diferentes polimorfos de C_2S , ao passo que no CP o componente principal é o C_3S . Desse modo, dado que a reação de hidratação do C_3S envolve maior incorporação de água quimicamente ligada do que o C_2S Neville (1995), os BTC com CR vão reter menor quantidade de água de hidratação. Acrescente-se ainda que o cimento reciclado, dado ser produzido a partir de pastas antigas sujeitas a processos de termoativação, moagem e armazenamento, vai apresentar maior teor de substâncias carbonatadas (Bogas *et al.*, 2020). Assim, diminui a quantidade de produtos hidratáveis no CR, o que também contribui para a formação de menor volume de produtos de hidratação. Como tal, ao contrário do obtido, seria esperado uma maior quantidade de água evaporável nos BTC com CR, agravando a diferença entre a massa volúmica fresca e a massa volúmica seca. Ainda assim, as diferenças entre BTC foram pequenas.

Adicionalmente, conhecendo o valor de massa volúmica seca (Tabela 11) e sabendo o traço ponderal das misturas, é também possível estimar a sua porosidade total. As mesmas suposições referidas em 4.2 em relação à água de hidratação foram consideradas neste cálculo. Verifica-se que o valor de porosidade total foi cerca de até 2.3% superior ao estimado em 4.2, considerando-se que a diferença não foi significativa.

Na Figura 34 apresenta-se a relação obtida entre a massa volúmica no estado endurecido, aos 28 dias (ρ_{28d}), e a porosidade total, $P_{T,MVf}$. Confirma-se, como seria de esperar, uma elevada correlação entre estas propriedades, verificando-se que as misturas onde se atingiu maior compactidade foram as produzidas com 10% de CP. As misturas com 20 a 50% de incorporação de CR apresentaram compacidades intermédias à das misturas com 5 a 10% de CR. Confirma-se que independentemente de eventuais diferenças nas massas volúmicas dos constituintes, a massa volúmica dos BTC é essencialmente condicionada pelo nível de porosidade atingido na produção dos blocos.

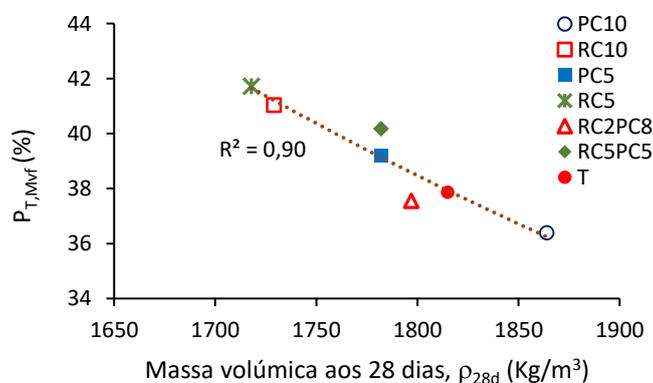


Figura 34 – Relação entre a massa volúmica aos 28 dias (ρ_{28d}) e a porosidade total, $P_{T,MVf}$.

4.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG) E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Na Figura 35 apresenta-se curva termogravimétrica (TG) e respetiva derivada (DTG), dos BTC produzidos com 10% de CP e CR. Conforme referido em 3.5.15, este ensaio permite analisar a variação de massa com o aumento de temperatura, que está associada a fenómenos de desidratação, desidroxilação e descarbonatação das fases presentes.

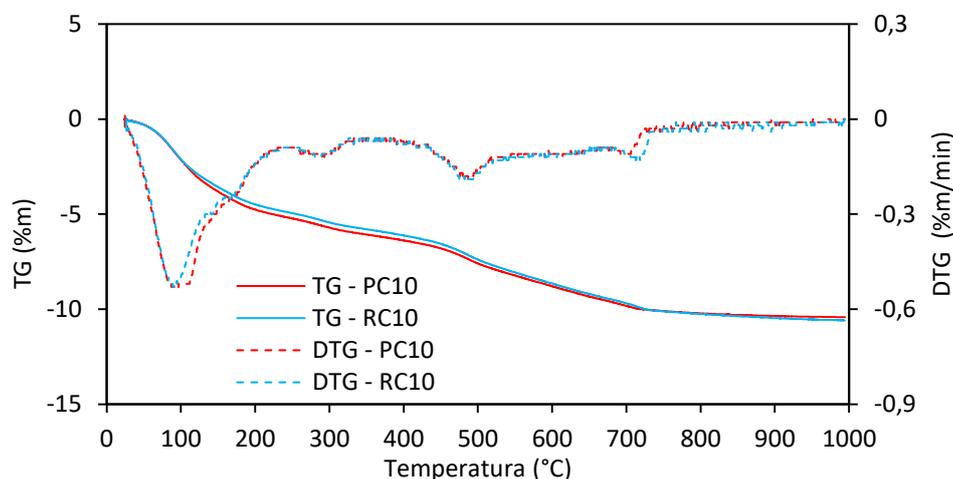


Figura 35 - Curvas TG e DTG para as composições PC10 e RC10.

Em geral, constata-se que as curvas foram muito similares para os dois tipos de BTC, sugerindo a presença do mesmo tipo de fases e associadas a estados de hidratação semelhantes.

São identificadas 3 fases mais importantes de perda de massa, nomeadamente até aos 200°C, entre cerca de 440°C e 540°C e acima de 700°C, a que corresponde as etapas de desidratação, desidroxilação e descarbonatação, respetivamente (Alonso *et al.*, 2004; Bogas *et al.*, 2019; Alarcon-Ruiz *et al.*, 2005). Até 200°C, a perda de massa nos materiais cimentícios deve-se à eliminação de água livre e água de hidratação dos produtos de hidratação, nomeadamente ettringite, C-S-H e monosulfoaluminatos ou carboaluminatos de cálcio (fases Afm) e entre 440°C a 550°C à desidroxilação do hidróxido de cálcio (Bogas *et al.*, 2019; Alarcon-Ruiz *et al.*, 2005). Acima de 700°C ocorre essencialmente a descarbonatação de materiais carbonatados (Bogas *et al.*, 2019). Porém, nestas regiões ocorre também a desidratação de minerais argilosos, como é o caso da montemorilonite na região entre 100 e 200°C e 700 e 800°C, da illite na região dos 100°C e entre 500 e 650°C e da kaolinite perto de 100°C e entre 500 e 600°C (Bogas *et al.*, 2019; Skibsted *et al.*, 2019; Khatib *et al.*, 2018; Brigatti *et al.*, 2005; Derkowski *et al.*, 2012; Favero *et al.*, 2016).

Como tal, as perdas de massa estão essencialmente relacionadas com a presença de ligante e minerais argilosos nos BTC. Neste caso, a presença de argilas vai dificultar a distinção entre os dois tipos de BTC, que foram produzidos com idêntico tipo e quantidade de terra. Conforme verificado mais adiante, apenas illite e nontronite foram identificadas na composição da terra. Acrescente-se que como os blocos foram produzidos com 90% em massa de terra, eventuais diferenças relacionadas com o tipo de ligante são mais difíceis de identificar. Ainda assim, verifica-se que a perda de massa do PC10 foi ligeiramente superior à do RC10, em especial na região de desidratação dos produtos de hidratação, o que sugere se ter atingido um maior nível de hidratação nesta mistura. Na realidade, o que sucede é

que o volume de produtos anidros disponíveis para hidratar tende a ser maior no PC do que no CR. Isso resulta do maior volume de material pré-carbonatado existente no RC10, conforme confirmado através da maior perda de massa desta mistura acima de 700°C (Figura 35). Na região de desidroxilação, a perda de massa é semelhante, apesar de ser reconhecido que a quantidade de hidróxido de cálcio gerado no CP tende a ser superior à do CR (Real *et al.*, 2020, Bogas *et al.*, 2020). Isso é atribuído à sobreposição das perdas de massa dos minerais argilosos, em especial illite, que está presente nos dois tipos de BTC, conforme analisado em seguida através dos resultados de DRX.

Independentemente das pequenas diferenças observadas entre composições, mostra-se que foram desenvolvidos produtos de hidratação nos BTC com CR, o que comprova a sua capacidade de reidratação e desenvolvimento de novos produtos de hidratação em misturas de terra.

Na análise de difração de raios-X é possível identificar os minerais em maior abundância na mistura (Figura 36). Os minerais identificados foram essencialmente os presentes na terra, em resultado desta corresponder a cerca de 90% da massa do bloco. Como esperado, os minerais em maior quantidade pertencem ao grupo dos silicatos, como é o caso do quartzo e da albite. Identificou-se também minerais argilosos, nomeadamente a nontronite e a illite. No entanto, por análise de TG a desidroxilação da Nontronite é reportada perto de 400°C (Derkowski *et al.*, 2012). Logo, por análise da Figura 35, a sua presença não deverá ter grande significado.

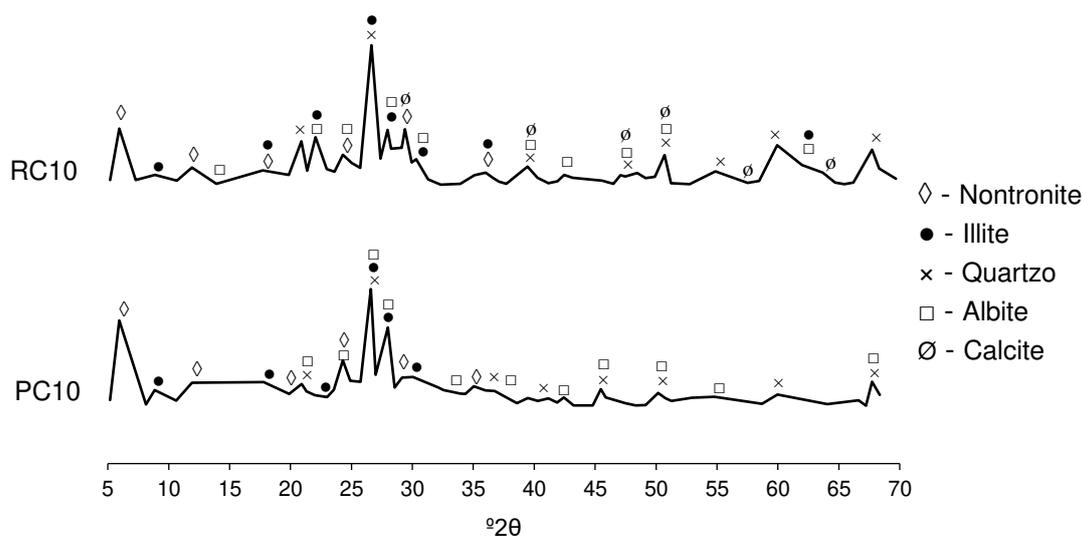


Figura 36 - Análise de difração de raios-X para as composições PC10 e RC10.

A mistura com CR distingue-se pela presença de maior teor de calcite (Figura 36), estando em linha com o maior teor de produtos carbonatados nestes materiais (Bogas *et al.*, 2020, Wang *et al.*, 2018). A portlandite presente no cimento hidratado e identificada na análise TG, não foi detetada no DRX. Isso não significa que esta não possa estar presente, mas apenas que para o nível de deteção do ensaio a sua quantidade não foi significativa (Snellings, 2018). O mesmo se aplica a outras fases de menor representatividade e cristalinidade, como a ettringite e as Afm. Confirma-se a importância da presença de minerais argilosos na interpretação dos resultados obtidos do TG.

Finalmente, referir que durante a produção dos blocos verificou-se um maior fenómeno de lixiviação e aparecimento de pontos de cal nos blocos com CR (Figura 37). Isso deverá estar associado

ao facto do CR apresentar inicialmente um teor de cal livre superior a 10%, que é extinta durante o processo de mistura e fica imediatamente disponível durante os primeiros instantes de hidratação.

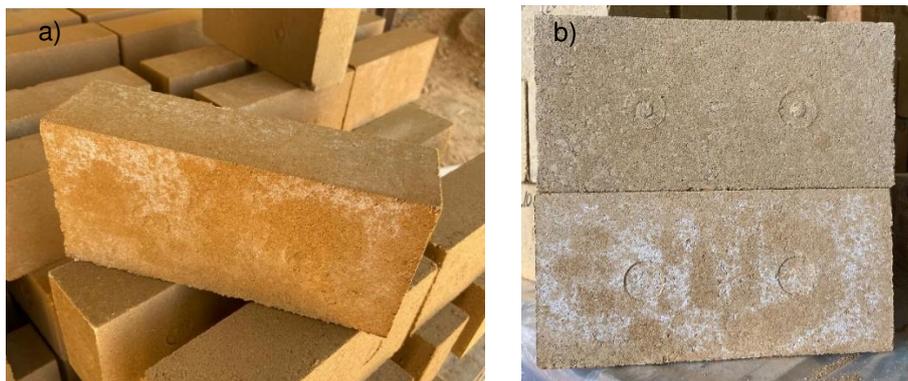


Figura 37 – a) Bloco RC10 poucas horas após a produção; b) comparação entre um bloco PC10 (topo) e um bloco RC10 (base).

4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Neste subcapítulo procede-se à caracterizadas da resistência mecânica dos BTC, nomeadamente em termos de resistência à compressão e tração.

4.5.1 Resistência à compressão

Tal como referido no capítulo 3, foram considerados BTC sujeitos a diferentes tipos de cura e condições de ensaio, nomeadamente: 7 dias em cura húmida seguido de cura em laboratório; saturados em água antes da idade de ensaio; secos em estufa antes da idade de ensaio. Os vários tipos de BTC foram ensaiados aos 28 dias para as condições de ensaio referidas. Adicionalmente, para as condições de cura em laboratório, foram ensaiados BTC a diversas idades, nomeadamente aos 3, 7, 28 e 90 dias. Os resultados médios obtidos assim como os coeficientes de variação (CV) para os blocos ensaiados aos 28 dias resumem-se na Tabela 12. No Anexo A.1 apresentam-se os vários resultados obtidos para esta propriedade.

Dependendo das condições de cura, idade de ensaio e composição dos BTC, a resistência à compressão variou entre 0,83 MPa e 7,43 MPa, o que salienta a importância destes fatores. Por esse motivo, é difícil fazer comparações com os resultados de outros autores, especialmente se ainda se tiver em consideração que os BTC podem ser produzidos com diferentes geometrias e pressões de compactação. Morel *et al.* (2007) refere que tanto a dimensão do bloco como o procedimento do ensaio têm uma grande influência na resistência. Uma maior largura nos BTC influencia positivamente a resistência à compressão podendo resultar em um aumento de até 2 vezes para larguras que variam entre 30 a 120 mm. O mesmo é observado por Mariana (2020), que reporta variações na resistência à compressão superiores a 2 vezes, consoante a relação altura/largura dos BTC. Por sua vez, Kerali (2001), estudou a influência do grau de compactação na resistência à compressão, confirmando que esta propriedade é grandemente afetada pelo grau de compactação. Riza *et al.* (2010) refere que o aumento da pressão de compactação de 5 para 20 MPa pode resultar num aumento de até 80% na resistência à compressão.

Tabela 12 - Resistência média à compressão dos BTC entre 3 e 90 dias de idade, para diferentes condições de ensaio (laboratório; seco; saturado).

Mistura	$f_{cm,Lab}$ (MPa)					$f_{cm,Seco}$ (MPa)		$f_{cm,Sat}$ (MPa)	
	3 dias	7 dias	28 dias	CV ₂₈ (%)	90 dias	28 dias	CV ₂₈ (%)	28 dias	CV ₂₈ (%)
PC10	3,38	3,54	5,92	4,5	5,66	7,43	33,8	4,32	20,9
RC10	1,77	2,52	4,44	6,0	4,74	6,53	15,5	2,45	3,8
PC5	1,47	1,82	3,34	8,8					
RC5	0,97	1,05	2,45	4,8					
RC2CP8	2,61	3,14	5,12	5,6					
RC5CP5	2,01	2,78	4,99	2,3					
T	0,83	1,79	2,33	8,3		4,25	8,0		

Utilizando geometrias de blocos e equipamentos de moldagem e compressão semelhante ao considerado neste trabalho, Lopes (2015) reporta resistências à compressão aos 28 dias em BTC com 0% e 8% CP de 0,37 MPa e 1,8 MPa, respetivamente. Estes valores, bastante inferiores aos obtidos no presente trabalho justificam-se pelo facto dos BTC terem sido ensaiados em meios blocos empilhados, aumentando a relação altura/largura. Considerando blocos de maior dimensão, mas produzidos e ensaiados de forma semelhante ao realizado no presente trabalho, Silva (2015) reporta resistências de 1,3 MPa e 4,2 MPa, para BTC não estabilizados e com 8% de CP, respetivamente. Adicionalmente, em BTC secos, obteve resistências de 2,4 e 5,4 MPa, respetivamente. Estes valores já são mais próximos dos obtidos no presente trabalho. Ainda assim, verificam-se diferenças significativas que confirmam a importância da relação altura/largura dos blocos durante o ensaio.

Na Figura 38 comparam-se os resultados de resistência à compressão de blocos no estado seco obtidos no presente estudo e por outros autores, tendo em conta pressões de compactação semelhantes. Mesmo tendo em consideração diferenças de composição e condições de ensaio, os resultados do presente estudo enquadram-se na ordem de grandeza do reportado por outros autores (Silva, 2015; Walker, 1995; Ngowi, 1997; Namango, 2006, Bahar et al. 2004). Confirma-se a tendência da resistência dos BTC aumentar com a dosagem de cimento, promovendo um aumento da coesão entre as partículas de terra. Isso confirma-se também para os BTC com 10% CR (Figura 38).

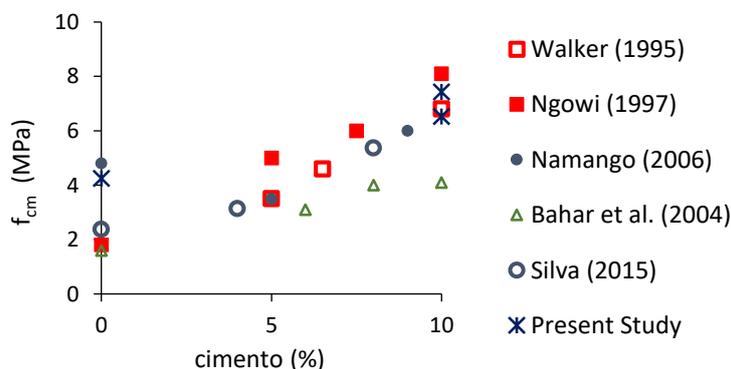


Figura 38 – Resistência à compressão aos 28 dias no estado seco obtida por diferentes autores em BTC com diferentes teores de cimento como agente estabilizante.

Na Figura 39 analisa-se a influência das condições de cura na resistência dos BTC. Conforme esperado, a resistência à compressão é negativamente afetada pelo aumento do teor de humidade dos

BTC. Esta redução é atribuída ao desenvolvimento de pressões de água nos poros e liquefação da porção não estabilizada das partículas de solo argiloso (Walker 1995, Riza 2015). Tal como no ensaio de massa volúmica, os blocos não estabilizados desintegraram-se após imersão em água. Os blocos estabilizados, ainda assim, viram reduzida a sua resistência para valores de apenas 58% (CP) e 38% (CR) da sua resistência no estado seco, quando foram imersos em água. Reduções de resistência para cerca de 41% da obtida em estado seco, são referidas por Silva (2015) em BTC estabilizados com 8% CP. Isso significa, que para além do tipo e teor de ligante, a sensibilidade dos BTC à água depende do tipo de solo utilizado.

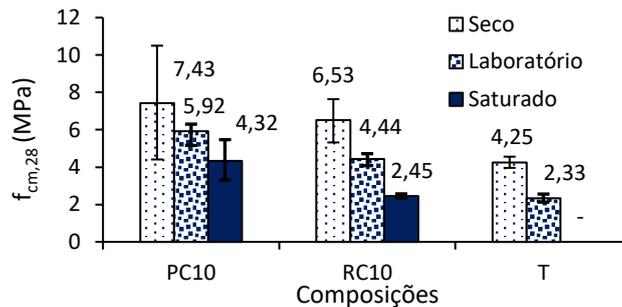


Figura 39 - Evolução da resistência à compressão aos 28 dias para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa até massa constante; após 28 dias el laboratório.

A influência do teor de ligante é analisado na Figura 40, para BTC curados em laboratório. Confirma-se que o aumento da percentagem de cimento, CP ou CR, de 5% para 10% contribui para um ganho significativo da resistência à compressão, podendo compensar a mais valia técnica desta solução face ao aumento de impacte ambiental causado pela mesma. Independentemente do teor e tipo de ligante, verifica-se um aumento esperado da resistência ao longo do tempo. Demonstra-se a reação de hidratação progressiva do cimento reciclado, conforme confirmado no trabalho de Bogas et al. (2020).

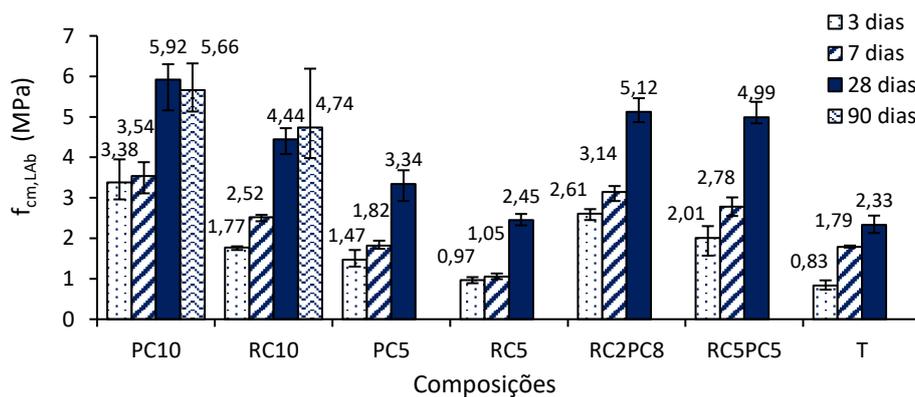


Figura 40 – Resistência à compressão do BTC aos 3, 7, 28 e 90 dias, em condições de ambiente laboratorial.

A evolução da resistência à compressão ao longo do tempo é melhor observada na Figura 41. Para além da hidratação do ligante, a evolução da resistência é afetada pelo efeito de secagem dos blocos. Desse modo, visto que os blocos foram sujeitos a cura húmida durante os primeiros 7 dias de

idade, ocorre uma menor evolução da resistência inicial em alguns BTC. Ligeiras diferenças resultam ainda de a velocidade de carga após os 7 dias ter sido diferente (3.5.3)

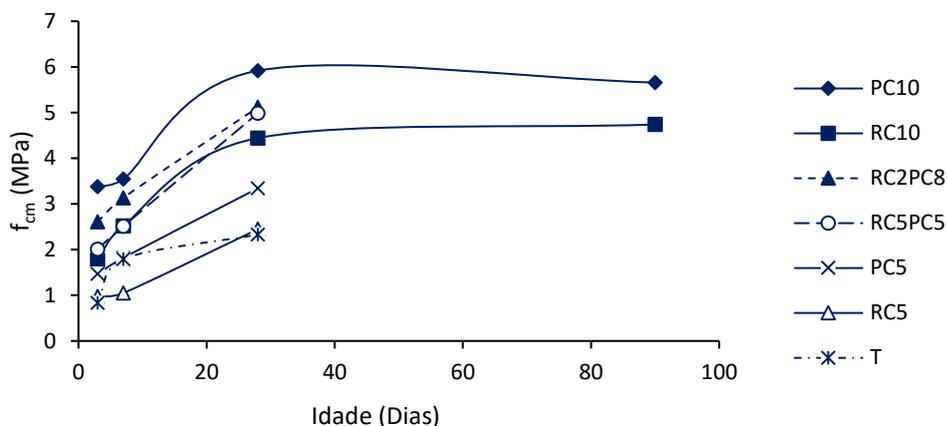


Figura 41 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo para BTC curados em laboratório (cura húmida durante 7 dias seguido de cura em laboratório)

Face aos BTC não estabilizados (para as condições de cura em laboratório), não se verifica um grande ganho de resistência à compressão com a estabilização dos blocos com 5% de ligante, em especial no caso de incorporação de CR, cujo o aumento foi de apenas 5% aos 28 dias (Figura 40). O aumento de coesão atingido entre as partículas da terra não terá compensado de forma significativa o aumento verificado na porosidade total dos BTC.

De modo a se perceber melhor a influência do tipo de ligante, na Figura 42 apresenta-se a resistência relativa dos BTC face às misturas de referência estabilizadas com igual teor de CP. No caso dos BTC não estabilizados a comparação é estabelecida para 10% CP. A incorporação de 10% CP e 10% CR permitiu incrementar em mais de 2,5 e 1,91 vezes a resistência aos 28 dias dos BTC não estabilizados, respetivamente. Apesar de não ser tão eficiente como o CP, o cimento reciclado revelou ser uma alternativa bastante viável à estabilização dos BTC, contribuindo para o aumento de coesão entre as partículas da terra. Conforme observado na Figura 42, a resistência à compressão aos 28 dias dos BTC com CR foi cerca de 73-75% da obtida nos BTC com igual quantidade de CP, variando de forma pouco significativa com o teor de ligante. Em idades mais jovens, aos 3 e 7 dias, a resistência relativa diminuiu para valores até 52%. A redução da resistência relativa dos BTC com CR face aos de referência com CP em idades jovens contraria a tendência observada por vários autores em misturas cimentícias, onde o melhor desempenho relativo do CR ocorre aos 3 dias de idade (Shui et al 2009, Bogas et al 2020, Carriço et al 2020). Este fenómeno deverá resultar de a terra apresentar-se mais húmido nas idades iniciais, nomeadamente tendo em conta que os BTC foram sujeitos a cura húmida até aos 7 dias de idade. De facto, como referido anteriormente, o efeito da estabilização aumenta com a secagem dos blocos. Neste caso, comparando as misturas PC10 e RC 10, verifica-se que a resistência relativa dos BTC com CR aumenta de 56.7% em estado saturado, para 75.1% em condições de laboratório e 87.9% em estado seco. Ainda assim, fica claro que os BTC com CR apresentam uma maior sensibilidade à água do que os BTC com CP, tendo sido menos eficazes no efeito de estabilização.

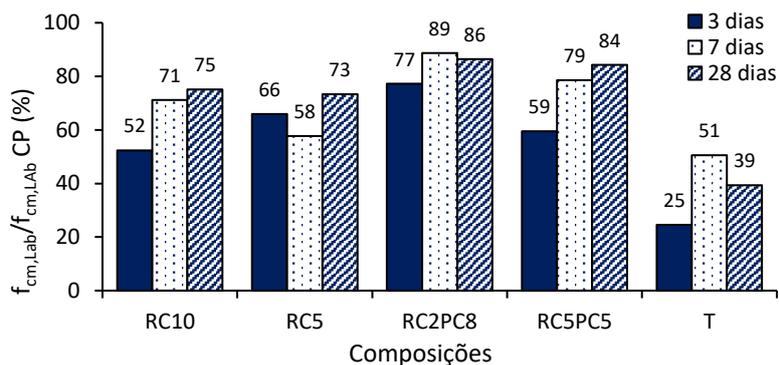


Figura 42 – Resistência à compressão relativa dos BTC, face aos BTC estabilizados com igual teor de CP. Para os BTC não estabilizados a comparação é estabelecida para 10% CP.

Na Figura 43 apresenta-se a variação da resistência à compressão com a percentagem de incorporação de CR nos BTC com 10% de estabilizante. Verifica-se uma redução quase linear da resistência dos BTC com a percentagem de incorporação de CR.

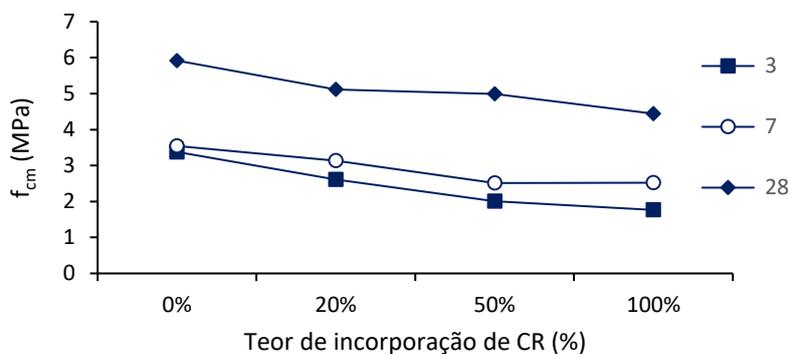


Figura 43 - Variação da resistência à compressão em função da percentagem de incorporação de CR nos BTC com 10% de ligante, para idades entre 3 e 28 dias.

A menor resistência das misturas cimentícias com CR face às com CP é atribuída na literatura à formação de menores volumes de produtos de hidratação no CR (Real *et al.*, 2020; Carriço *et al.*, 2020), conforme discutido em 4.3. No entanto, deve-se ter ainda em consideração que, devido à sua maior exigência de água, os BTC com CR foram produzidos com maior relação a/l e maior porosidade total (4.3), o que contribui igualmente para a sua queda de resistência. Este aspeto é discutido no parágrafo seguinte. A incorporação parcial de CR em substituição de cimento conduziu a resistências à compressão intermédias das atingidas nos BTC com 10% CP e 10% CR, respetivamente. Para 20% e 50% de substituição, a resistência aos 28 dias foi reduzida de apenas 11% e 15% face aos BTC com apenas CP, respetivamente, considerando-se variações pouco significativas, em especial tendo em conta que estas misturas foram produzidas com maior volume de porosidade inicial.

Para analisar o efeito da porosidade total na resistência dos BTC, apresenta-se na Figura 44 a relação obtida entre estas propriedades. Ao contrário do que poderia ser esperado, verifica-se uma fraca relação entre a resistência à compressão e a porosidade total, bem como entre esta e a massa volúmica dos BTC (Figura 45). De facto, existe uma fraca relação entre qualquer uma das propriedades, quando se tem em consideração BTC com composições muito distintas. No entanto, para um mesmo

teor de ligante (0%, 5% ou 10%), observa-se uma tendência clara para a resistência aumentar com a redução da porosidade. Por outro lado, para um dado teor de ligante, não se verificam variações significativas em função da percentagem de incorporação de CR. Isso significa que a resistência foi essencialmente afetada pelo nível de compactidade atingido no BTC e pelo teor de ligante, demonstrando-se uma vez mais a elevada potencialidade do cimento reciclado na produção mais eco-eficiente de BTC.

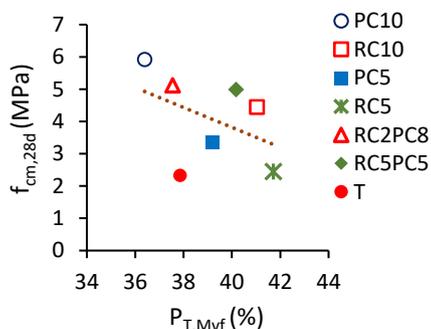


Figura 44 – Relação entre a resistência à compressão ao 28 dias ($f_{cm,28d}$) e a porosidade total, $P_{T,Mvf}$.

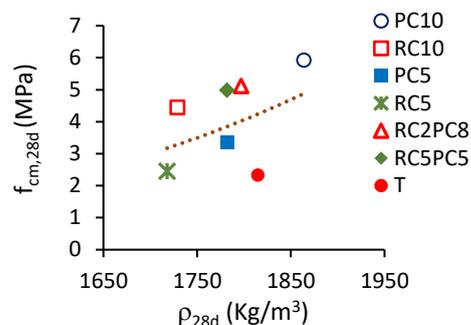


Figura 45 - Relação entre a resistência à compressão ao 28 dias ($f_{cm,28d}$) e a massa volúmica aos 28 dias (ρ_{28d}).

4.5.2 Eficiência estrutural

A eficiência estrutural relaciona a resistência à compressão com a massa volúmica de um dado material, objetivando-se soluções de maior resistência associadas a baixa massa volúmica. Normalmente, a resistência tende a aumentar com o aumento da massa volúmica, conforme analisado em 4.5.1. Mas outros fatores, como o tipo e teor de ligante, afetam igualmente esta propriedade (Bogas 2011). Na Figura 46 resumem-se os valores de eficiência estrutural obtidos para os BTC, sujeitos a diferentes condições de cura.

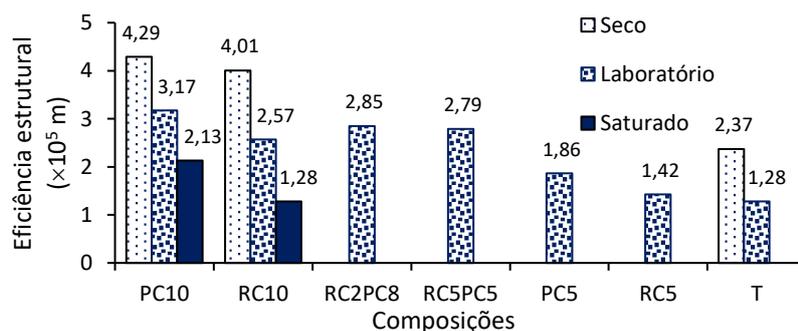


Figura 46 – Eficiência estrutural aos 28 dias para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa até massa constante; após 28 dias em laboratório.

Como esperado, os BTC no estado seco apresentam os maiores valores de eficiência estrutural, visto que estão associados a uma diminuição da sua massa volúmica e a um aumento significativo da sua resistência mecânica. Por sua vez, os BTC ensaiados em condições saturadas apresentam reduções significativas da sua eficiência estrutural, para valores inferiores a 50% da obtida em condições secas. Este aspeto é relevante e salienta a enorme sensibilidade em termos de comportamento estrutural dos BTC, mesmo quando estabilizados. Corroborando os resultados de

resistência à compressão, o teor de ligante teve uma influência significativa no aumento de eficiência estrutural. A influência do tipo de ligante foi mais importante quando os BTC foram ensaiados saturados, verificando-se diferenças pouco significativas em condições secas. Mesmo em condições de laboratório, a ligeira diminuição da massa volúmica nos blocos estabilizados com CR (7%) em relação aos estabilizados com CP, não é compensada pela maior redução de resistência à compressão (25%).

4.5.3 Resistência à tração

A resistência à tração foi avaliada através dos ensaios de flexão e compressão diametral descritos em 3.5.3 e 3.5.4, respetivamente. Tal como na resistência à compressão, os BTC foram ensaiados para diferentes teores de humidade, de modo a analisar a influência deste parâmetro. Na Tabela 13 apresentam-se os valores médios obtidos em cada um destes ensaios, bem como os respetivos coeficientes de variação (CV). No Anexo A.1 indica-se de forma mais detalhada os vários resultados de cada provete. Na Figura 47 resume-se os resultados médios obtidos em laboratório.

Tabela 13 – Resistência à tração por compressão diametral, f_{ctsp} , e por flexão, f_{ctmr} , aos 28 dias. Ensaios sobre provetes curados em laboratório (Lab), ou em câmara húmida (Hum).

Mistura	N ^o *	f_{ctsp} (MPa)		N ^o *	f_{ctsp} (MPa)		N ^o *	f_{ctmr} (MPa)	
		Lab	CV (%)		Hum	CV (%)		Lab	CV (%)
PC10	4	0,51	14,2	3	0,45	24,8	6	0,97	8,6
RC10	4	0,44	11,6	3	0,33	33,2	6	0,93	14,5
PC5	3	0,36	10,8				3	0,69	6,5
RC5	3	0,20	11,8				3	0,52	12,8
RC2PC8	3	0,44	7,1				3	1,02	3,0
RC5PC5	3	0,56	5,0				3	1,17	5,8
T	3	0,25	19,9				3	0,41	11,6

* Número de blocos ensaiados para cada mistura

Tal como esperado, e tratando-se de um material enquadrado no grupo dos cerâmicos, a resistência à tração foi reduzida, sendo cerca de 8-10% e 16-23% da resistência à compressão, no caso da resistência à tração por compressão diametral e flexão, respetivamente. Uma relação de 15% para a resistência à flexão é referida por Namango (2006) e Mostafa *et al.* (2016). Silva (2015) apresenta uma relação entre a resistência à flexão e à compressão superior. Isto deve-se ao valor de resistência à compressão ter sido superior neste trabalho, devido às diferenças na geometria do bloco e ao diferente esquema de ensaio adotado para a resistência à compressão.

Conforme observado em ensaios de betão, a resistência à flexão tende a ser o dobro da obtida por compressão diametral, já que esta beneficia do efeito de uma maior plasticidade e redistribuição de tensões na região tracionada (Bogas, 2011). De facto, nesta região ocorre uma distribuição não linear das tensões na secção do provete (Dreux *et al.*, 2002). A resistência à compressão diametral aproxima-se mais da resistência à tração axial, envolvendo um modo de rotura mais frágil. Acrescente-se ainda que os ensaios foram realizados segundo diferentes direções dos blocos, com os ensaios de flexão a realizarem-se na direção perpendicular à de prensagem do bloco

Devido aos baixos valores de resistência à tração e à variabilidade do próprio ensaio, torna-se mais difícil distinguir pequenas diferenças entre composições, em especial quando foram produzidos com o mesmo teor de ligante. Pelos motivos referidos, os ensaios de flexão estiveram associados a

variabilidades ligeiramente inferiores do que os de compressão diametral (Tabela 13), tal como observado por Silva (2015).

A resistência à flexão, na ordem de 1 MPa, foi ligeiramente inferior à obtida por Namango (2006), de 1,57 MPa, tendo em consideração BTC com idêntico teor de cimento (9%), mas ensaiados no estado seco. Por sua vez, Silva (2015) refere 1,2 MPa e 0,6 MPa para BTC com 8% cimento ensaiados à flexão e compressão diametral, respetivamente, apenas ligeiramente superiores aos valores obtidos no presente trabalho. Outros autores, como é o caso de Mostafa *et al.* (2016), promoveram o aumento desta propriedade através da incorporação de fibras nos BTC. Neste caso, os autores reportam um aumento de até 82% para a resistência à tração por flexão de BTC reforçados com fibras de banana e estabilizados com 7% de cimento. Mais uma vez se salienta que é difícil estabelecer comparações diretas com a literatura, visto que os resultados são afetados pela geometria e teor de humidade dos blocos, para além do esquema de ensaio. Dessa forma, interessa sobretudo analisar o comportamento relativo entre diferentes composições.

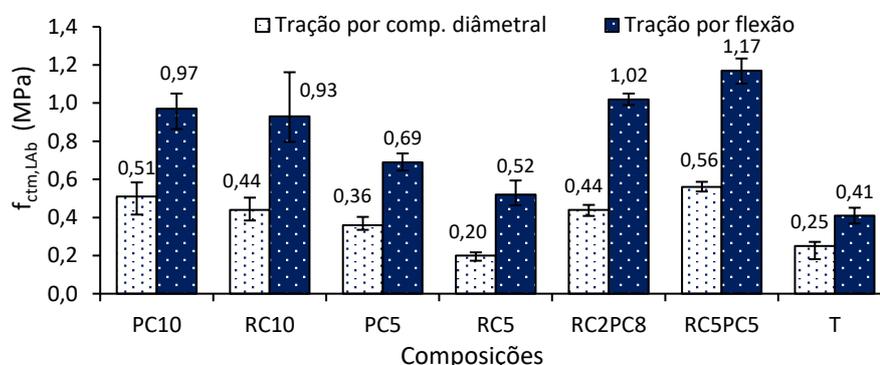


Figura 47 – Resistência média à tração por compressão diametral e por flexão dos BTC curados em laboratório.

Tal como observado para a resistência à compressão, a resistência à flexão foi mais afetada pelo teor de ligante do que pelo tipo de ligante. Destaca-se o facto de para 10% de teor de ligante, se terem verificado diferenças pouco significativas, inferiores a 15% entre os BTC com CP e CR. Inclusivamente, constata-se que a mistura de 50% CR mais 50% CP conduziu aos melhores resultados, obtendo-se resistências até 20% superiores face aos BTC com apenas 10% CP. Para além da variabilidade do próprio ensaio, os resultados são afetados pela distribuição de humidade na espessura do provete, que resulta das condições de secagem em laboratório. A secagem superficial induz compressão na região interna do provete e conseqüente tração na superfície, o que afeta sobretudo os resultados de resistência à flexão. Ainda assim, em face da ordem de grandeza dos resultados obtidos, pode-se admitir que a incorporação de CR teve uma influência pouco significativa na resistência à tração dos BTC, sem prejudicar esta propriedade para percentagens de incorporação de até 50%.

No entanto, quando os blocos foram ensaiados em condições próximas da saturação, verifica-se uma maior redução de resistência à tração com a incorporação de CR, correspondendo a cerca de 73% da resistência obtida nos BTC com apenas CP. Neste caso, os efeitos de retração diferencial referidos não têm significado. Assim, parece confirmar-se uma maior sensibilidade deste ligante à água.

Verifica-se uma redução importante da resistência à tração quando se reduziu o teor de ligante para 5%, tanto nos BTC com CP (~30%) como com CR (~50%). A maior redução nos CR está de acordo com o também observado na resistência à compressão. Inclusivamente, observa-se que face aos BTC não estabilizados, não se registam grandes vantagens na estabilização dos blocos com CR, para condições de cura em laboratório. Conclui-se assim que a estabilização com 5% CR não terá sido eficiente na melhoria das propriedades mecânicas dos BTC. Por sua vez, a estabilização dos BTC com 10% de CR permitiu incrementar a resistência à flexão e por compressão diametral em 2,3 e 1,8 vezes face aos BTC não estabilizados, respetivamente. Acrescente-se ainda que em condições de saturação, os BTC estabilizados com CR apresentaram resistência ao contrário dos não estabilizados que se desintegraram. Dessa forma, a capacidade de reidratação e estabilização do CR fica demonstrada.

Na Figura 48 relaciona-se os resultados de resistência à tração com os obtidos para a resistência à compressão. Em geral verifica-se uma boa correlação entre estas duas propriedades, visto que ambas são afetadas pela porosidade e coesão entre partículas da terra.

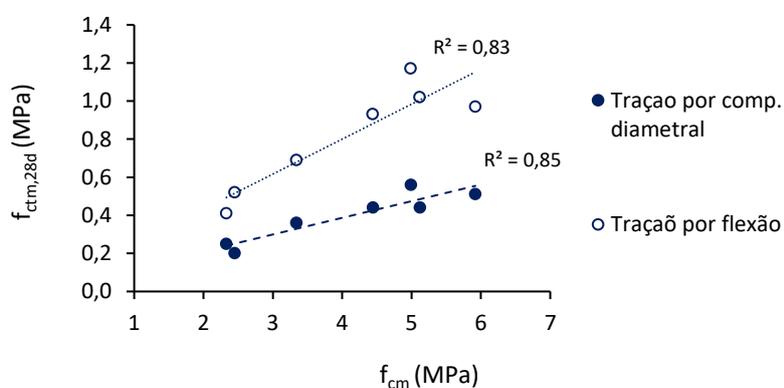


Figura 48 – Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração.

4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE

No presente trabalho, o módulo de elasticidade foi apenas medido para os BTC com 10% de CP e 10% de CR, tendo-se ensaiado apenas 1 provetes por composição, de acordo com 3.5.5. O módulo de elasticidade obtido para os blocos PC10 e RC10 foi de 2,77 e 2,1 GPa, respetivamente. Na literatura consultada são referidos módulos de elasticidade de 0,4 a 2 GPa para blocos de terra não estabilizados (Miccoli, 2014) e valores médios de 2,5 GPa para blocos estabilizados com 10% de cimento (Bahar *et al.*, 2004). Estes valores são da ordem de grandeza dos obtidos neste trabalho. A baixa rigidez destes materiais deriva essencialmente da elevada porosidade e da fraca consolidação existente entre as partículas da terra. Os BTC com CP, associados a menor porosidade total (secção 4.3) e maior resistência mecânica (secção 4.5), apresentaram um módulo de elasticidade 32% superior ao dos BTC com CR. O aumento do módulo de elasticidade com a resistência mecânica foi igualmente reportado por Eusébio (2001). Na Figura 49 resume-se o gráfico tensão-deformação obtido em um dos provetes ensaiados para o PC10 e RC1, onde se evidencia a menor rigidez atingida nos BTC com CR.

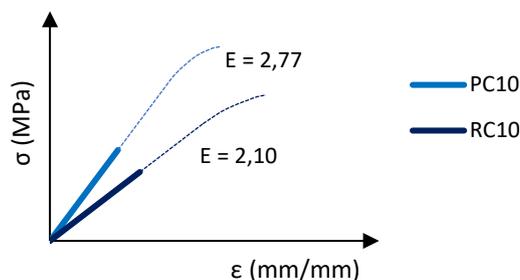


Figura 49 – Relação em termos tensão-deformação (σ - ϵ) dos BTC com 10% CR e 10% CP.

4.7 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

A velocidade de propagação de ultrassons permite avaliar a qualidade do material, identificando possíveis falhas e fissuras no interior, sem danificá-lo. A velocidade de ultrassons é essencialmente afetada pela rigidez e massa volúmica dos materiais, embora outros fatores como o teor em água influenciem esta propriedade. Neste caso, um maior teor em água contribui para uma maior velocidade de propagação, visto que a água ocupa o lugar dos vazios onde a transmissão é dificultada (Trtnnik *et al.*, 2008; Pundit, 1991). Na Figura 50 resumem-se os resultados obtidos para a velocidade média de ultrassons, V_{us} , nos BTC ensaiados. Os resultados estão apresentados para os BTC sujeitos a diferentes condições de cura.

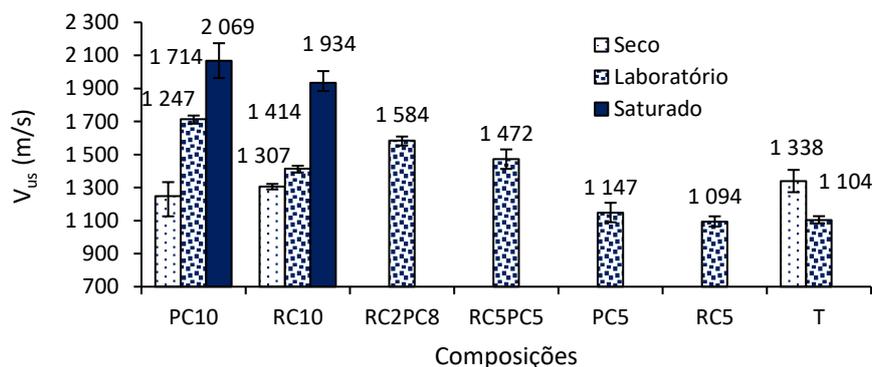


Figura 50 – Velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa; após 28 dias em laboratório.

A velocidade de ultrassons variou entre 1100 e 1700 m/s nos BTC curados em laboratório, atingindo cerca de 2100 m/s quando saturados. Lopes (2015) apresenta valores da mesma ordem de grandeza, referindo velocidades de propagação de ultrassons a variar entre 1100 a 2300 m/s. Por sua vez, Silva (2015) apresenta valores cerca de 9% inferiores ao relatados por Lopes (2015). Em geral a velocidade de ultrassons foi capaz de distinguir os BTC de melhor qualidade, constatando-se menores valores de V_{us} nos BTC não estabilizados ou com pobres dosagens de ligante. Por outro lado, é igualmente clara a redução de V_{us} com a percentagem de incorporação de CR, o que se justifica pelo maior aumento de porosidade nestes BTC. Face aos BTC com CP, a incorporação de CR conduziu a reduções de 5 a 17% em V_{us} . Confirma-se ainda a importância do teor em água na medição desta propriedade (Figura 50).

Sendo a massa volúmica uma das principais propriedades que afetam a velocidade de ultrassons, na Figura 51 relacionam-se estas duas propriedades. No entanto, verifica-se uma fraca correlação entre estas propriedades, assim como ocorreria com a porosidade total. De facto, a velocidade de ultrassons é igualmente afetada pela rigidez do material, condicionada pelo teor e tipo de ligante. Na Figura 52 pode-se observar uma elevada correlação entre V_{us} e a resistência à compressão, visto que estas duas propriedades são essencialmente afetadas pela porosidade (massa volúmica) e pela ligação entre partículas (rigidez). Esta relação é elevada porque se comparam BTC com composições não muito distintas (semelhante teor da terra) e ensaiadas para idênticos teores de humidade. Para diferentes teores de humidade, a resistência varia de forma inversa com a velocidade de ultrassons, deixando de existir correlação entre estas propriedades. Ainda assim, demonstra-se que este ensaio não destrutivo pode ser útil para a avaliação expedita da qualidade dos BTC.

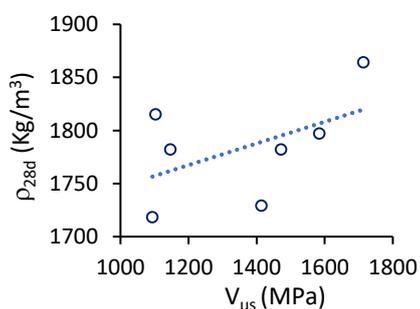


Figura 51 – Relação entre a massa volúmica e a velocidade de ultrassons - BTC curados em laboratório.

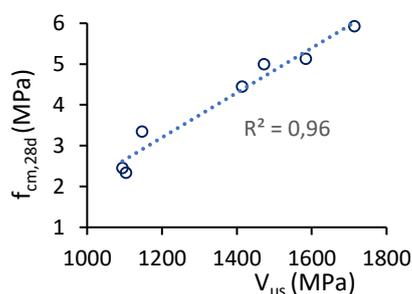


Figura 52 – Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de ultrassons - BTC curados em laboratório.

4.8 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO

Neste trabalho foi também considerado o esclerómetro pendular para avaliação não destrutiva da qualidade dos BTC. Neste ensaio, realizado de acordo com 3.5.7, determina-se o índice esclerométrico, IE_{PT} , que é uma medida da rigidez superficial dos materiais. Na Figura 53 resumem-se os resultados obtidos no presente trabalho para os BTC curados em condições de laboratório. Os BTC estabilizados com apenas 5% de ligante não foram sujeitos a este ensaio.

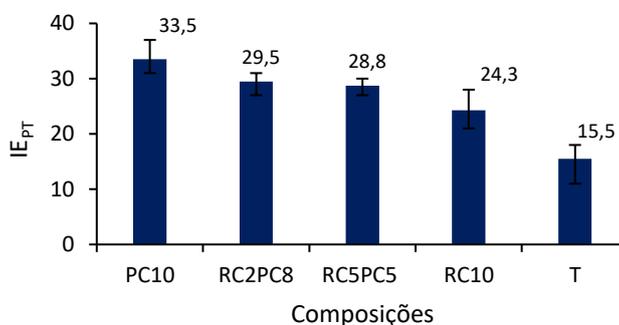


Figura 53 – Índice esclerométrico aos 28 dias para os BTC curados em laboratório, não estabilizados ou estabilizados com 10% de ligante.

Conforme observado nos restantes ensaios, os BTC estabilizados apresentaram valores de IE_{PT} superiores ao BTC não estabilizado, independentemente do tipo de ligante. Por sua vez, os BTC com

CR, de maior porosidade e menor resistência mecânica, apresentam índices até 27% inferiores aos do BTC com apenas CP. Ainda assim, o IE_{PT} do RC10 foi 57% superior ao do BTC não estabilizado, apresentando uma melhoria clara da rigidez superficial. Tal como para a velocidade de ultrassons, verifica-se uma boa correlação entre o IE_{PT} e a resistência à compressão (Figura 54), apesar do reduzido número de resultados, com o ensaio esclerométrico a permitir de forma eficiente a distinção de BTC de diferentes qualidades.

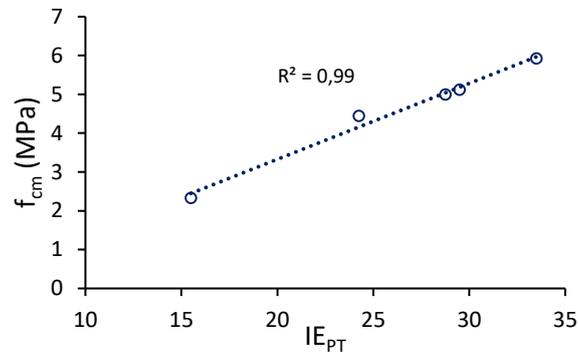


Figura 54 – Relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico, IE_{PT} , aos 28 dias.

4.9 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Na Figura 55 apresentam-se os valores da condutibilidade térmica dos BTC, tendo em consideração a sua medição para diferentes teores de humidade.

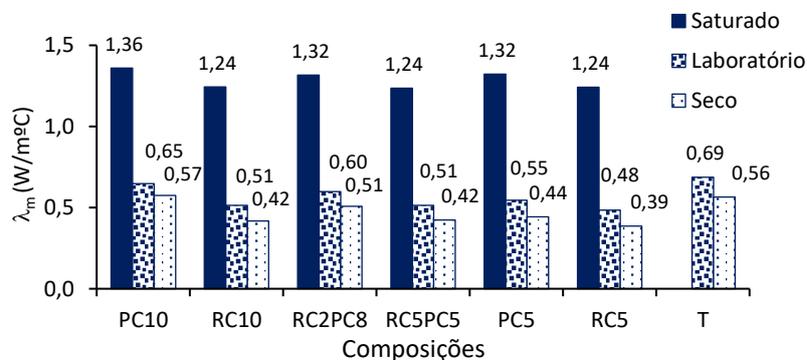


Figura 55 – Condutibilidade térmica aos 28 dias para diferentes condições de cura: saturados em água; secos em estufa; após 28 dias em laboratório.

Como esperado, a condutibilidade térmica tende a aumentar com o teor em água, pois a condutibilidade térmica da água é cerca de 25 vezes superior à da terra (Ashworth, 1991; Silva, 2015). No presente estudo, a condutibilidade térmica nos BTC saturados foi mais do dobro da obtida em estado seco, resultando numa importante depreciação da sua capacidade de isolamento térmico. Este fator demonstrou ser mais relevante do que as alterações impostas na composição e tipo de estabilização das misturas (Silva, 2015; Lopes, 2015). Visto que os blocos curados em laboratório foram sujeitos a secagem, aproximando-se mais da condição seca (secção 3.5.9), apenas se observa uma ligeira redução das características de isolamento térmico face aos BTC secos.

Para um dado tipo de cura, os BTC não estabilizados e os BTC estabilizados com CP apresentaram uma condutibilidade térmica superior aos blocos estabilizados com CR (13 a 36%), o que deverá estar ligado com as diferenças de porosidade total atingidas nas várias misturas. De modo a analisar este aspeto, na Figura 56 apresenta-se a relação entre a porosidade total, determinada de acordo com 4.2 e a condutibilidade térmica medida em estado seco. Demonstra-se que esta propriedade é fortemente afetada pela porosidade atingida nos BTC, assumindo menor relevância outros fatores, como o teor e tipo de ligante, ao contrário do que tinha sido observado para outras propriedades analisadas neste trabalho. Isso já seria esperado, visto que é reconhecido a elevada correlação entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica dos materiais (Real *et al.*, 2016).

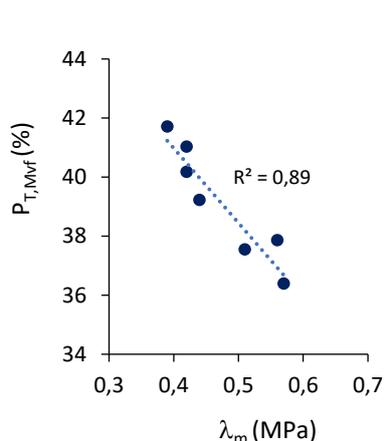


Figura 56 – Relação entre a condutibilidade térmica, λ_m , e porosidade total dos BTC, $P_{T,Mvf}$.

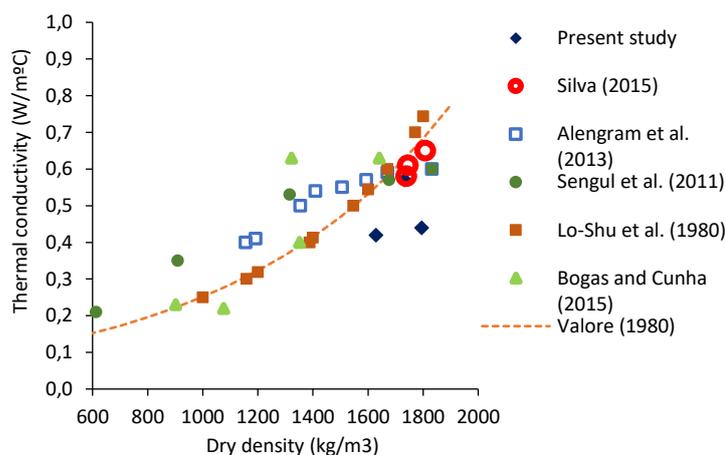


Figura 57 – Relação entre a condutibilidade térmica, λ_m , e a massa volúmica seca de materiais de base cimentícia, tendo em consideração diferentes autores.

Na Figura 57 é possível confirmar que os resultados obtidos neste estudo seguem a tendência de resultados apontados por outros autores, tendo em consideração diferentes materiais de base cimentícia. Ainda assim, no presente trabalho obtiveram-se valores inferiores para uma dada massa volúmica nos BTC com CR ou não estabilizados, face aos restantes autores. Tendo em consideração a espessura dos blocos (11 cm), e assumindo um coeficiente de condutibilidade térmica de 0,42 W/m°C para os BTC com 10% CR, o coeficiente de transmissão térmica, U , de uma parede simples exterior com um pano de alvenaria de BTC, seria de 2,38 W/(m².°C). Assume-se o valor de 0,04 e 0,13 m².°C/W para a resistência superficial exterior e interior (ITE50), respetivamente. Numa parede simples de betão ($\lambda=1,65$ W/m°C, ITE50) ou de alvenaria de pedra ($\lambda=2,3$ W/m°C, ITE50), seria obtido um coeficiente de transmissão térmica equivalente para espessuras de 43 e 60 cm, respetivamente. O valor obtido de U é ainda comparável com o de uma parede simples de alvenaria de tijolo furado, de igual espessura. Ou seja, os BTC apresentam um comportamento térmico semelhante ao de um tijolo furado de 11 cm.

4.10 RETRAÇÃO

No presente estudo foi avaliada a retração de acordo com 3.5.8 para os BTC produzidos com 10% de CR ou CP. Desse modo pretendia-se avaliar a influência do tipo de ligante. Como referido em 3.5.8, devido à reduzida dimensão dos blocos houve necessidade de medir a retração ao longo da sua

diagonal. Neste caso, assume-se de forma razoável que os blocos apresentaram um comportamento isotrópico no plano em termos de variação dimensional.

De acordo com a norma colombiana NTC 5324 (2004), a variação da dimensão dos BTC não deve ultrapassar 0,45 mm/m quando submetidos a um ambiente com temperaturas entre 33 a 45 °C e humidade de 50% e uma expansão máxima de 0,30 mm/m quando submersos em água. De acordo com a norma NZS 4298 (1998) sugere-se um limite de retração de 0.05% para construção em taipa. No presente trabalho, os blocos foram submetidos a um ambiente com temperaturas médias de 28,5 °C e humidade relativa de 62,5 % durante 21 dias. Na Figura 58 é apresentado a curva de retração obtida para os blocos PC10 e RC10. O tempo apresenta-se em escala logarítmica.

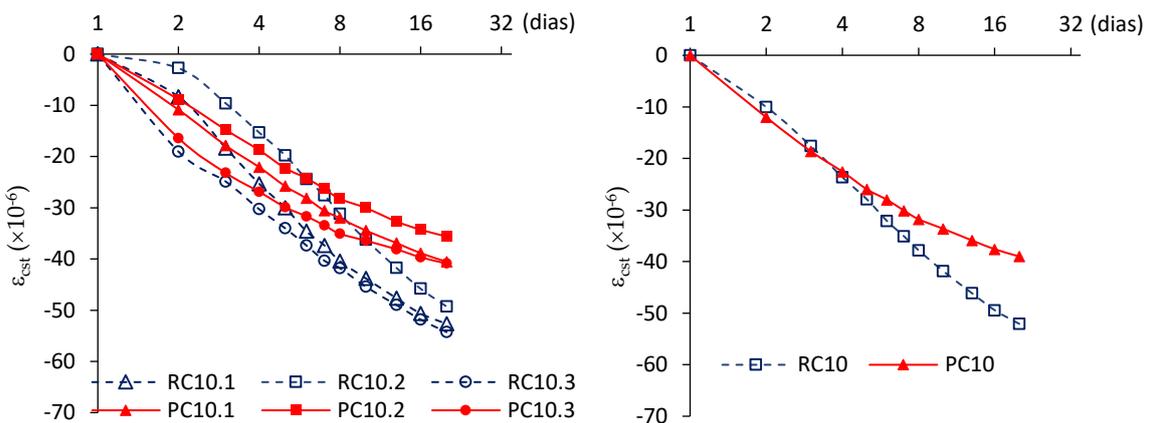


Figura 58 - Retração do BTC com 10% de CR (RC10) ou 10% CP (PC10) durante 21 dias, no gráfico da direita é representado os valores individuais e no da direita os valores médios.

Visto que só foram realizadas medições de retração durante os primeiros 21 dias de idade, não foi possível atingir a estabilização da variação dimensional. No entanto, as curvas indiciam que a estabilização da retração deverá ser atingida mais cedo e para valores inferiores no PC10 do que no RC10. Apesar da retração inicial, até aos 5 dias, ter sido similar nas duas composições, a retração a longo prazo foi inferior no PC10. Para tal contribui o facto das misturas com RC terem sido produzidas com maior teor de água e fração de pasta (secção 4.2), para além de estarem associados a menor rigidez (secção 4.5). Outro aspeto que pode contribuir para a maior retração das misturas com RC está relacionado com o facto das pastas com este tipo de ligante apresentarem matrizes mais refinadas do que as pastas de CP com igual a/l. De acordo com Bandeira (2020), para a mesma relação a/l, a natureza porosa do CR faz com que parte da água da mistura seja absorvida, tornando o espaço interpartículas mais reduzido e mais compacto, mas sem que a porosidade global, incluindo a região intrapartículas, seja reduzida. Assim, para idêntico nível de porosidade, pode aumentar a ação da retração devido ao refinamento da porosidade. Acrescente-se ainda que, conforme referido, a longo prazo, o volume de produtos de hidratação tende a ser menor nas misturas com CR devido ao facto existir menor quantidade inicial de silicatos de cálcio hidratáveis (Bogas *et al.*, 2020).

A retração do PC10 e RC10 medida aos 21 dias corresponde a apenas cerca de 0,053 e 0,039 mm/m, respetivamente. Devido ao facto de os ensaios terem sido realizados em condições distintas de humidade e temperatura, e dado não ser conhecido o valor para a variação dimensional

após a estabilização da retração, não é possível comparar diretamente os resultados obtidos com o recomendado na norma colombiana NTC 5324 (2004). Ainda assim, no abrangendo período em que a retração é mais relevante, qualquer das misturas conduziu a valores de retração muito inferiores ao máximo recomendado nesta norma.

4.11 DURABILIDADE

Neste trabalho, a durabilidade dos BTC foi essencialmente avaliada em termos das suas propriedades de transporte e resistência à água. Neste sentido, foram realizados ensaios de absorção de água por imersão, capilaridade e a baixa pressão, bem como de permeabilidade e resistência à erosão por jato de água.

4.11.1 Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão permite dar uma ideia do volume de porosidade acessível dos BTC, bem como do seu comportamento em ambiente submerso. Esta propriedade foi apenas medida para os BTC estabilizados, dado que os blocos não estabilizados, após contacto com a água, perderam progressivamente a sua coesão (Figura 59a). Nos restantes casos, os vários blocos analisados não sofreram deterioração aparente durante o período de 48 horas em que estiveram submersos (Figura 59b).

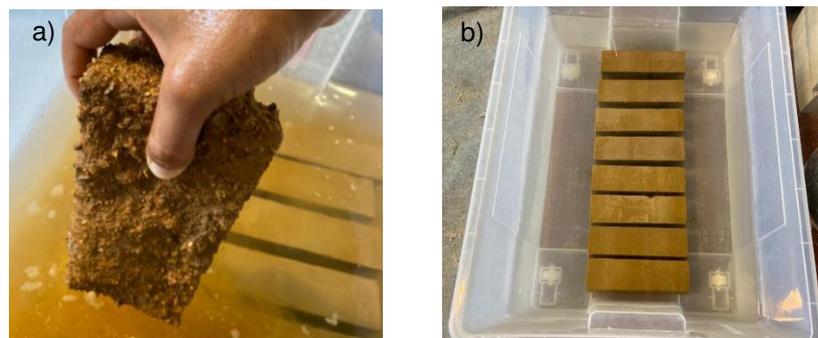


Figura 59 – Imersão dos BTC com diferentes composições: a) BTC não estabilizado (T); b) todas as outras composições.

Na Figura 60 apresenta-se a absorção média obtida em cada mistura até às 48 horas e no Anexo A.2 são indicados os valores individuais para cada bloco. Apenas os BTC com 10% de estabilizante foram ensaiados. A absorção ocorreu essencialmente durante as primeiras 24 horas, com ligeiro aumento até às 48 horas. Em geral, observa-se uma tendência crescente do aumento da absorção com a percentagem de incorporação de CR. A absorção nos BTC com CR foi até 14% superior à dos BTC apenas com CP. As diferenças indicadas são atenuadas caso se considere a absorção em percentagem de volume, em vez de massa, visto que os BTC com CR estão associados a menor massa volúmica (Figura 61). Estes valores correspondem a cerca de 90% da porosidade total estimada em 4.2, o que significa que pelo menos 90% da porosidade dos BTC é acessível à água num dado período de tempo. Nas misturas com CR verifica-se uma fração ligeiramente inferior de porosidade acessível à água (87-89%), o que sugere uma menor interconectividade da sua estrutura porosa.

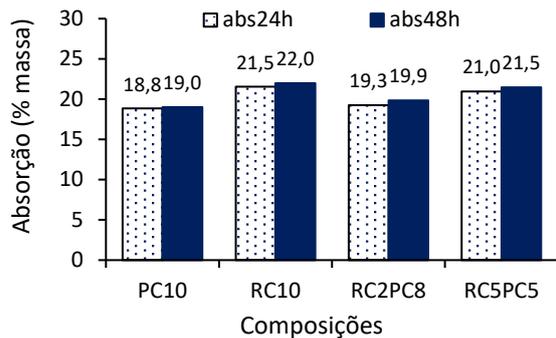


Figura 60 – Absorção de água às 24 e 48 horas, em percentagem de massa.

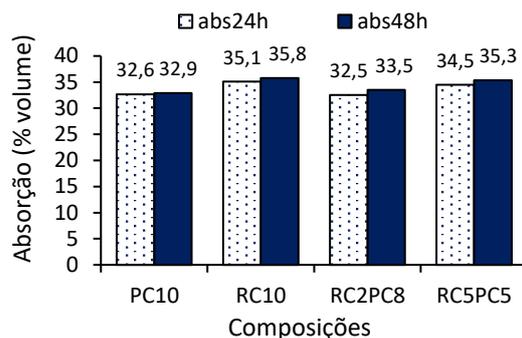


Figura 61 – Absorção de água às 24 e 48 horas, em percentagem de volume.

A maior absorção nos BTC com CR estará essencialmente relacionada com a sua maior porosidade total. De facto, verifica-se que existe uma boa correlação entre esta propriedade e a absorção em percentagem de massa (Figura 62) e de volume (Figura 63).

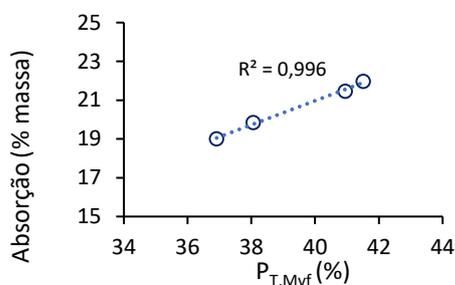


Figura 62 – Relação entre a absorção, em percentagem de massa, e a porosidade total dos BTC ($P_{T,Mvf}$).

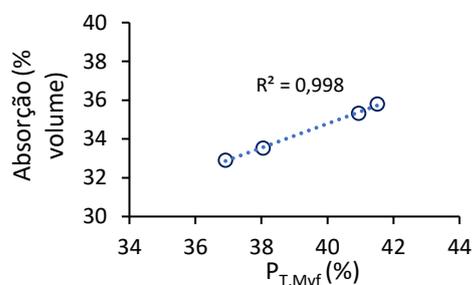


Figura 63 – Relação entre a absorção, em percentagem de volume, e a porosidade total dos BTC ($P_{T,Mvf}$).

De acordo com a Norma Brasileira NBR 8492 (1984) apenas os BTC com absorção em massa às 24 horas inferior a 20% podem ser considerados para aplicação em ambientes húmidos. Neste caso, apenas os BTC com até 20% de substituição de CP por CR cumpriram este requisito. Mas importa referir que no presente trabalho, mesmo para as misturas com 10% CP, foram atingidos níveis absorção superiores aos reportados na literatura. Silva (2015) refere absorções às 48 horas de apenas 13,3% para BTC estabilizados com 8% de cimento, tendo atingido maiores níveis de compactidade do que o verificado no presente trabalho. De acordo com a norma Australiana HB195 (2002) valores típicos de absorção em BTC podem variar entre 10 e 25%, encontrando-se os resultados do presente trabalho enquadrados no nível superior deste intervalo. Em blocos estabilizados com 9% de CPN, Kerali (2001), obteve apenas 7% de absorção de água por imersão, devido essencialmente ao elevado grau de compactação atingido nos blocos. O maior nível de compactação dos BTC melhora, não apenas as suas propriedades mecânicas, mas também a sua acessibilidade à água.

4.11.2 Absorção de água por capilaridade

Na Figura 64 é apresentado a evolução até às 72 horas da absorção capilar e do coeficiente de absorção ao longo do tempo, respetivamente, para os BTC estabilizados com 10% de ligante. No Anexo

A.2 apresentam-se os resultados obtidos em cada provete, tendo-se verificado uma variabilidade elevada no ensaio, com coeficientes de variação entre 6,5 e 19,4%.

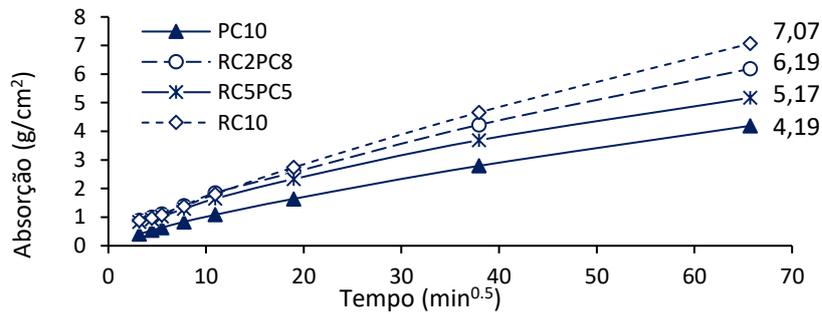


Figura 64 – Evolução da absorção de água por capilaridade.

Conforme observado no ensaio de absorção por imersão, existe um aumento da taxa de absorção e do volume de água absorvida às 72 horas nos BTC com 10% CR, apresentando as misturas com substituição parcial de CP por CR valores intermédios dos do BTC com apenas CP. Conforme discutido, isso deverá estar relacionado com a maior porosidade global dos blocos com CR (associados a maior relação a/l e maior volume de pasta), bem como com o maior refinamento da porosidade destas misturas, para idêntico nível de porosidade (Bogas et al. 2020). No entanto, não era esperada uma diferença tão significativa entre os BTC com 10% CP e os restantes BTC. De facto, a absorção às 72 horas foi cerca de 70% superior nos blocos com RC. Importa referir que, pelas razões apontadas em 3.5.12, os blocos foram ensaiados na vertical, perpendicularmente à direção de compactação, o que aumenta as suas propriedades de absorção (Figura 65). Os valores obtidos neste estudo para o BTC com 10% CP são ligeiramente superiores aos reportados por Lopes (2015) em blocos ensaiados segundo a mesma direção e estabilizados com 8% de cimento (3.69 g/cm² às 72 horas).

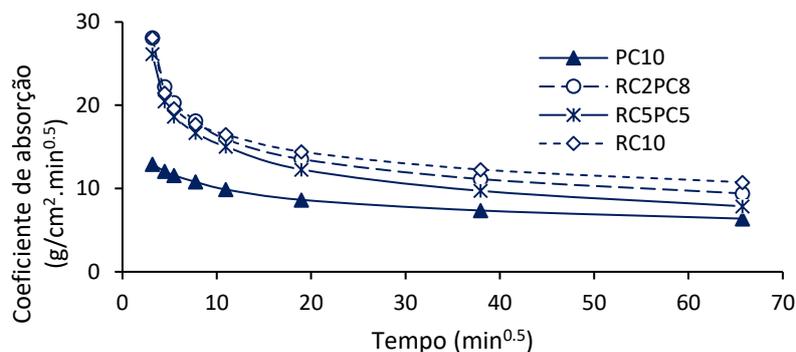


Figura 65 – Evolução do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Ao contrário do que poderia ser esperado, nos BTC com percentagens de incorporação intermédias de CR, a mistura com 20% de substituição de CP por CR apresentou maior volume de absorção às 72 horas do que o BTC com 50% de substituição. Isso não era esperado, visto que conforme observado em 4.2 e 4.11.1, a porosidade total foi superior nos BTC com 50% de substituição. Este fenómeno poderá estar relacionado com o facto da mistura com 50% de substituição ter atingido mais cedo a altura máxima de ascensão capilar, conduzindo a absorções próximas da saturação dos largos poros (Figura 66). Desse modo, ocorre uma redução mais significativa da taxa de absorção a longo prazo.



Figura 66 – Fases do ensaio de absorção por capilaridade: a) inicial; b) 24 horas; c) 72 horas.

De acordo com a norma NTC 5324 (2004), tendo por base os valores do coeficiente de absorção aos 10 minutos, $C_{b,10min}$, considera-se a seguinte classificação em termos de absorção capilar: I - $C_{b,10min} \leq 20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ – “muito baixa absorção”; II - $C_{b,10min} \leq 40 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ – “baixa absorção”. Neste caso, os BTC com 10% CP estariam inseridos na classe I ($C_{b,10min} = 12,9 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) e os BTC com 10% CR na classe II ($C_{b,10min} = 34,6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$).

Por sua vez, após o ensaio de absorção capilar, os BTC com 10% CP e 10% CR apresentaram uma absorção às 72 horas que, convertida para percentagem de massa, correspondente a 59% e 92% da absorção por imersão, e convertendo em volume, a 52% e 81% da porosidade total. Isso sugere uma redução significativa da resistência à absorção quando se procede à substituição de CP por CR. Assim, parece ser claro que os BTC com CR estão associados a um maior nível de porosidade e conectividade entre poros. Este é um aspeto importante, visto que, conforme referido, a facilidade dos blocos em absorver água prejudica as propriedades mecânicas e físicas do BTC, traduzindo-se em uma menor durabilidade.

4.11.3 Absorção de água a baixa pressão

Neste ponto, apresenta-se os resultados referentes ao ensaio de absorção de água a baixa pressão através de tubos Karsten, realizado de acordo com 3.5.13, na face lateral de exposição dos blocos com o ambiente exterior. Este ensaio permite avaliar a permeabilidade superficial dos blocos, distinguindo o comportamento dos BTC com CP face ao dos BTC com diferente percentagem de incorporação de CR. Na Figura 67 apresenta-se a evolução da absorção em função do tempo para os blocos com diferentes composições, curados em ambiente variável de laboratório (3.5.13). Na Tabela 14 resumem-se os valores obtidos do coeficiente de absorção aos 5 minutos, $C_{abs,5min}$, e do tempo total de ensaio para os vários BTC com 10 % de ligante.

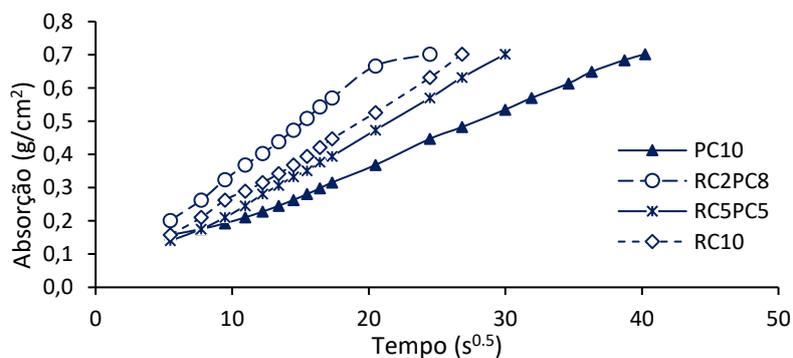


Figura 67 – Evolução da absorção de água a baixa pressão.

Como esperado e de acordo com os resultados obtidos nos restantes ensaios de absorção, o bloco PC10 foi o que apresentou menor taxa de absorção ao longo do tempo. Neste caso, o tempo de absorção no RC10 foi 56% inferior e o coeficiente de absorção aos 5 minutos 50% superior ao obtido no PC10. Tal como verificado na absorção capilar, a mistura com apenas 20% de cimento reciclado apresentou pior desempenho do que os BTC com maior teor de incorporação, inclusivamente com 100% CR. Assim, a absorção a baixa pressão apresentou uma fraca relação com a porosidade total. Uma justificação para tal pode resultar do diferente teor de humidade dos provetes na altura do ensaio, visto que estes foram deixados a arrefecer durante um dia antes do ensaio.

Tabela 14 – Coeficiente de absorção aos 5 minutos, $C_{abs,5min}$, e tempo total de ensaio nos BTC com 10% de ligante.

Misturas	$C_{abs,5min}$ (kg/m ² .s)	Tempo de ensaio (min)
PC10	0,008	27
RC2PC8	0,016	8
RC5PC5	0,011	14
RC10	0,012	12

Lopes (2015), recorrendo ao mesmo ensaio, verificou absorções de 0.7 g/cm² após 10 minutos em BTC estabilizados com 8% de cimento. No presente trabalho, os BTC com 10% CP apresentaram uma absorção de apenas 0.45 g/cm² após o mesmo período de ensaio (64% do obtida por Lopes 2015). Estas diferenças justificam-se não apenas pelo diferente nível de compacidade atingida nos BTC, mas também pelas diferentes condições de humidade dos mesmos na altura do ensaio. Salieta-se a elevada redução (superior a 90%) obtida por Lopes (2015) no coeficiente de absorção a baixa pressão após aplicação de um hidrófugo de superfície, embora tenha apenas funcionado no sentido de retardar esta ação, atingindo-se a longo prazo similares níveis de absorção.

4.11.4 Permeabilidade à água

A permeabilidade à água permite, de forma complementar, transmitir uma melhor ideia da conectividade da estrutura porosa dos BTC, traduzindo a facilidade em que estes se deixam atravessar pela água.

O coeficiente de permeabilidade (K_w) obtido neste trabalho variou entre $2,8 \times 10^{-7}$ m/s, para blocos estabilizados com 10% de CPN, até $6,1 \times 10^{-7}$ m/s para blocos estabilizados com 10% CR. Estes valores foram da ordem de grandeza dos reportados por Silva (2015) e Lopes (2015), tendo em conta BTC estabilizados com 8% de cimento ($3,2 \times 10^{-7}$ m/s e $2,6 \times 10^{-7}$ m/s, respetivamente). Na Figura 68 resume-se os resultados obtidos neste ensaio. Note-se que não é comum a realização deste ensaio nos BTC, devido à dificuldade na realização do mesmo. Para além dos dois trabalhos referidos, apenas Bahar et al. (2004) documentam resultados de permeabilidade sobre cilindros de terra estabilizados com 10% de cimento, tendo atingindo valores mais baixos, de $7,8 \times 10^{-8}$ m/s. Este valor mais baixo pode ter resultado da maior compactação utilizada pelos autores na produção dos BTC. Note-se que betões de média à baixa qualidade apresentam valores de K_w na ordem de grandeza de 10^{-16} a 10^{-10} m/s (Geiker et al. 2007). Por sua vez, Delgado et al., 2006 refere valores na ordem de grandeza de

10^{-8} m/s para paredes de taipa. Conclui-se assim que a permeabilidade à água pode assumir maior importância nos BTC, sendo comparáveis, em termos de desempenho, a betões muito pobres.

Corroborando a tendência geral observada nos restantes ensaios, verifica-se que a permeabilidade aumentou com o aumento da percentagem de incorporação de CR em substituição de CP. Como observado na Figura 68, o coeficiente de permeabilidade foi cerca de 2 vezes superior nos BTC com 10% de CR do que apenas com igual teor de CP. Mais uma vez os resultados de permeabilidade seguem a tendência da porosidade total, demonstrando a importância deste parâmetro na durabilidade dos BTC (Figura 69). No entanto, importa destacar que, tal como sucedeu nos ensaios de absorção capilar, não se observaram grandes diferenças entre os BTC com 20 e 50% de incorporação de CR, apesar destes últimos apresentarem maiores valores de porosidade total.

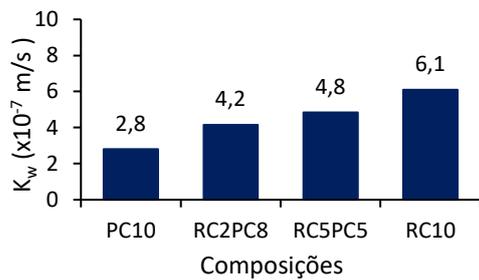


Figura 68 - Coeficiente de permeabilidade, K_w , dos BTC estabilizados com 10% de cimento.

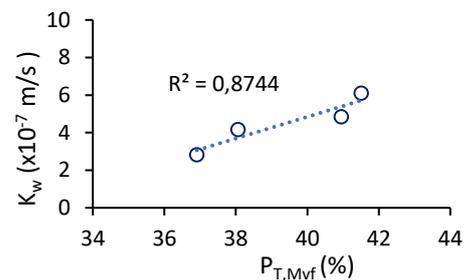


Figura 69 - Coeficiente de permeabilidade, K_w , versus porosidade global.

Conforme analisado em 4.2, a porosidade dos BTC com CR foi cerca de 13% superior à do BTC com CP. Assim, pequenos aumentos de porosidade podem conduzir a aumentos significativos de permeabilidade em pastas cimentícias (Figura 69). Embora a estrutura porosa do sistema cimentício não seja idêntico à dos blocos de terra, um aumento de 13%, de por exemplo 30% para 34% de porosidade, pode significar um aumento do dobro da permeabilidade (Figura 70). Assim, conclui-se que terá ocorrido um aumento importante da conectividade quando se procedeu à substituição do CP por CR, essencialmente devido ao facto de se terem produzido blocos de menor compactidade, e não propriamente devido à ineficiente capacidade de hidratação do cimento reciclado. Como tal, justifica-se a realização de um trabalho futuro de otimização da composição dos BTC com cimento reciclado, de modo a contornar a sua maior exigência de água e conseqüente menor eficiência de moldagem.

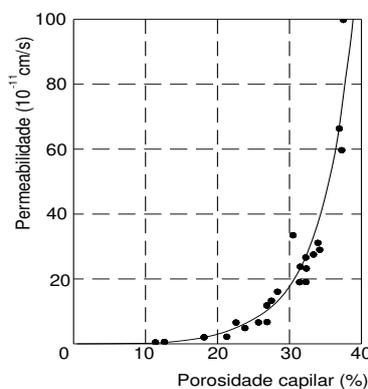


Figura 70 - Porosidade capilar versus permeabilidade de pastas cimentícias (Powers, 1958)

4.11.5 Erosão acelerada

O ensaio de erosão acelerada permite avaliar a profundidade de erosão e a penetração de humidade nos BTC originado pela ação de um jato de água. Este ensaio simula o efeito de chuva intensa, analisando-se as consequências desta ação sobre os BTC e classificando-os segundo a norma NZS 4298 (1998). Na Tabela 15 resume-se os resultados obtidos neste ensaio para os BTC não estabilizados e estabilizados com 10% de teor de ligante, em que PE é a profundidade de erosão, determinada de acordo com o descrito em 3.5.14.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de erosão acelerada.

Composição	Pressão (kPa)	Tempo de ensaio (min)	PE profundidade de erosão (mm)	Penetração de humidade para 250 kPa (mm)	Índice de erosão
PC10	50, 100, 250	60	-	38	Aceite
RC5PC5	50, 100, 250	60	-	36	Aceite
RC10	50, 100, 250	60	-	39	Aceite
T	50	7	60	N/A	Rejeitado

Os BTC estabilizados apresentaram uma boa durabilidade face à erosão por ação de chuva intensa, independentemente do tipo de ligante. Todos os provetes apresentaram erosão desprezável quando sujeitos à pressão de 0,5 bar, conforme indicado na NZS 4298 (1998). De acordo com esta norma, e tendo-se obtido profundidades de erosão inferiores a 1 mm/h, os BTC seriam classificados como sendo da classe IE1 (IE – índice de erosão em mm), de acordo com a seguinte hierarquia para blocos de 60 mm de espessura: $0 \leq PE < 10$ (IE1); $10 \leq PE < 25$ (IE 2); $25 \leq PE < 45$ (IE 3); $45 \leq PE < 60$ (IE4); $60 \leq PE$ (IE5).

Mesmo aumentando a pressão do jato de água para o dobro (1 bar) e depois para 5 vezes a pressão inicial (2,5 bar), a erosão não foi muito significativa após 1 hora de ensaio. Conforme observado na Figura 71, os BTC sofreram apenas alguma erosão superficial quando sujeitos a 1 hora de exposição ao jato de água de 2,5 bar. Neste caso, o nível de erosão superficial parece ter sido ligeiramente superior no RC10, embora as diferenças não tenham sido significativas face ao PC10 (Figura 71 b,c).

Como referido, no final do ensaio foi ainda medida a penetração de água nos blocos, após seccionamento dos mesmos na direção perpendicular à de exposição (Tabela 15). Neste caso, a penetração de humidade foi muito similar nos 3 tipos de BTC estabilizados que foram ensaiados, concluindo-se que o seu comportamento à ação da água foi elevado, independentemente do tipo de ligante.

A profundidade de penetração de água foi ainda similar à reportada por Silva (2015) em BTC estabilizados com 8% de cimento (40 mm). Em misturas com 4% de cimento mais 4% de cal, o autor observou uma penetração 43% superior, revelando uma pior capacidade da cal e salientando a eficiência do cimento reciclado utilizado neste trabalho, por comparação direta do desempenho relativo das várias misturas. Exelbirt (2011) também reporta erosões inferiores a 1 mm/h para BTC com 7% de cimento, mas de 25 mm/h para 5% de cimento e 7% de cal.

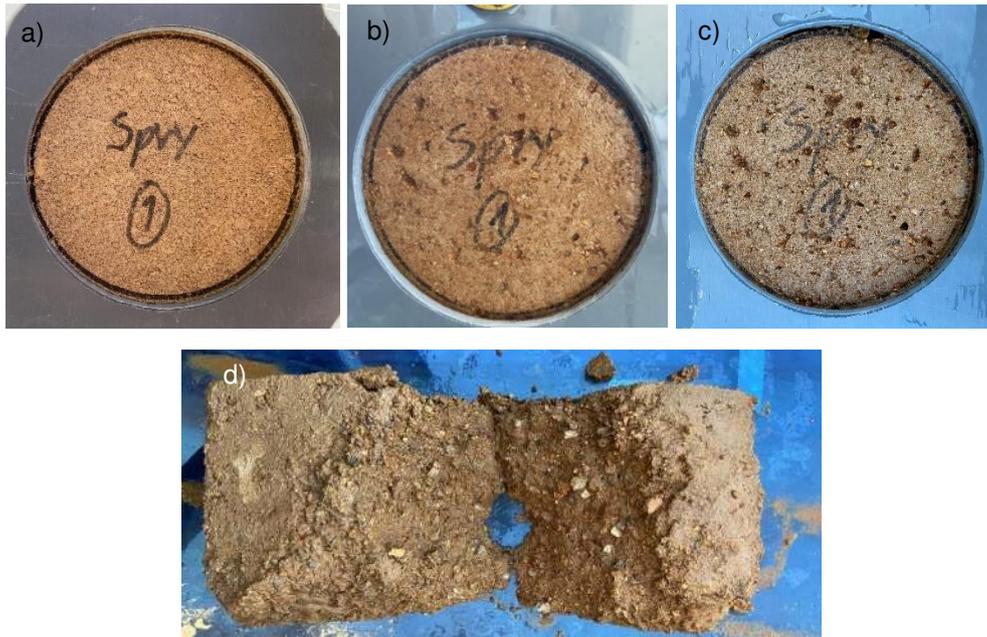


Figura 71 – Face dos BTC antes e após o ensaio de erosão acelerada a 2,5 bar: a) face de referência (antes do ensaio); b) face do PC10 após 1 hora de ensaio; c) face do RC10 após 1 hora de ensaio; d) face do bloco não estabilizado a uma pressão de 0,5 bar ao fim de 7 minutos.

Por sua vez, os blocos não estabilizados foram totalmente erodidos ao fim de apenas 7 minutos de ensaio, para a pressão mais baixa de 0,5 bar (Figura 71d, Tabela 15). Como observado no ponto 4.11.1, os blocos não estabilizados são muito suscetíveis à ação da água, desagregando-se completamente quando em contacto com a água. Por esse motivo, não é recomendada a sua utilização em paramentos exteriores não protegidos da ação direta da água. Resultados similares em BTC não estabilizados sujeitos ao mesmo tipo de ensaio foram obtidos por outros autores, que reportam também a erosão completa dos blocos não estabilizados em poucos minutos (Lopes, 2015; Silva, 2015; Exelbirt, 2011, Cid-Falceto et al., 2012). Confirma-se a importância da estabilização dos BTC, demonstrando-se a adequabilidade e hidraulicidade dos ligantes utilizados, nomeadamente do cimento reciclado. Desmistifica-se também o facto de a construção em terra não poder apresentar durabilidade à água.

Importa referir que de acordo com a literatura, a maioria dos ensaios experimentais de avaliação da durabilidade tendem a simular condições mais agressivas do que as observadas na realidade (Exelbirt, 2011; Heathcote, 2002, Elenga et al., 2011), o que salienta ainda mais a elevada resistência à erosão dos BTC estabilizados.

5 CONCLUSÕES

No presente capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas no trabalho, que teve como principal objetivo a produção e caracterização de blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com incorporação de cimento reciclado (CR). Para tal, foi realizado um trabalho baseado numa forte componente experimental, que abrangeu numa primeira fase a seleção e caracterização da terra e a produção e caracterização do cimento reciclado, seguido da produção e caracterização dos BTC. Ao todo foram consideradas 7 composições diferentes, incluindo uma mistura de referência não estabilizada (T), duas misturas de referência estabilizadas com 5% (PC5) ou 10% (PC10) de CP e BTC produzidos com incorporação de 20% (RC2PC8), 50% (RC5PC5) e 100% CR, para 5% (RC5) e 10% (RC10) de ligante. Os BTC foram caracterizados em termos de massa volúmica, resistência mecânica (compressão, tração, módulo de elasticidade), velocidade de ultrassons, índice esclerométrico, condutibilidade térmica, retração, durabilidade (absorção de água por capilaridade, imersão e a baixa pressão, permeabilidade à água e erosão acelerada) e por análises de termogravimetria e de difração de raios-X. No ponto em seguida resumem-se as principais conclusões obtidas no trabalho e no final do capítulo são sugeridas algumas propostas de desenvolvimento futuro.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Para o presente trabalho foi considerado um solo argiloso constituído por 32% de material fino (argila e silte) e 68% de seixo fino e areia, apresentando um índice de plasticidade de 8%, dentro do usualmente considerado na produção de BTC. Destaca-se o elevado teor ótimo em água (TOA) da terra utilizada (16%), com consequências na compacidade final dos BTC. Como estabilizante, para além do cimento Tipo I 42.5 (CP) utilizado nos BTC de referência, foi adotado cimento reciclado (CR) obtido a partir da termoativação a 650°C de pasta de cimento hidratado com mais de 4 meses de idade.

O CR apresentou maior exigência de água e maior tempo de presa face ao CP, desenvolvendo resistências mecânicas em pastas aos 28 dias de aproximadamente 65% da obtida em pastas com PC de igual a/l. A realização paralela de ensaios de termogravimetria e de difração de raios X, sobre BTC produzidos com cimento reciclado, permitiu também confirmar a adequada capacidade de hidratação do cimento reciclado, afigurando-se como um ligante ou uma adição ativa de elevado potencial para a produção alternativa de misturas cimentícias mais eco-eficientes.

Os BTC produzidos no presente trabalho apresentaram uma massa volúmica fresca entre cerca de 1850 e 2000 kg/m³, para porosidades totais de 36-42%, ligeiramente acima do referido por outros autores, o que sugere uma menor otimização das misturas para o tipo de solo e ação de compactação utilizada. A elevada exigência de água do CR, resultante da sua natureza porosa, elevada área superficial e presença de cal livre, afetam a produção dos BTC, promovendo o aumento da quantidade de água de mistura, relação a/l efetiva e diminuição da compacidade. Desse modo, os BTC com cimento reciclado apresentaram menor massa volúmica e maior porosidade total (até 13% superior à dos BTC com apenas CP). Os BTC com apenas 5% de estabilizante apresentaram maior porosidade total do que com 10% de ligante, mas os BTC não estabilizados atingiram o máximo de compacidade

para um TOA de apenas 14%. Como seria de esperar, observou-se uma boa correlação entre a massa volúmica e a porosidade total dos BTC.

Para as condições referidas, os vários tipos de BTC produzidos no presente trabalho foram caracterizados no estado endurecido, em termos de comportamento mecânico, condutibilidade térmica e durabilidade. Na Tabela 16 resume-se os valores médios obtidos em cada uma das principais propriedades analisadas no presente trabalho para as várias composições estudadas, nomeadamente no que se refere à massa volúmica fresca (ρ_{fr}), massa volúmica seca (ρ_{se}), massa volúmica em ambiente de laboratório (ρ_{lab}), massa volúmica saturada (ρ_{sat}), porosidade total calculada a partir da massa volúmica fresca (PT_{mvf}), porosidade total calculada a partir da massa volúmica seca (PT_{mvs}), resistência à compressão média (f_{cm}), resistência à tração por flexão média (f_{ctmr}), resistência à tração por compressão diametral (f_{ctsp}), módulo de elasticidade (E), velocidade de propagação de ultrassons (V_{us}), índice de retração (ϵ_{cst}), índice esclerométrico (IE_{PT}), condutibilidade térmica média (λ_m), permeabilidade à água (K_w), absorção de água por imersão ($AbsI$), absorção de água por capilaridade ($AbsC$), coeficiente de absorção de água à baixa pressão (C_{abp}), índice de erosão ($I_{erosão}$).

Tabela 16 – Resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios apresentados no capítulo 3.

Propriedades	PC10	RC10	RC2PC8	RC5PC5	PC5	RC5	T
ρ_{fr} (kg/m ³)	1 991	1 871	1 954	1 870	1 950	1 879	2 026
$\rho_{se,28d}$ (kg/m ³)	1 732	1 629	1 689	1 646			1 794
$\rho_{lab,28d}$ (kg/m ³)	1 864	1 723	1 797	1 782	1 793	1 718	1 839
$\rho_{sat,28d}$ (kg/m ³)	2 080	1 913	1 973	1 950			
PT_{mvf} (%)	36,9	41,5	38,1	40,9	39,8	41,9	38,5
PT_{mvs} (%)	38,4	42,1	39,9	41,4			37,1
$f_{cm,lab,28d}$ (MPa)	5,92	4,44	5,12	4,99	3,34	2,45	2,33
$f_{cm,se,28d}$ (MPa)	7,43	6,53					
$f_{cm,sat,28d}$ (MPa)	4,32	2,45					
$f_{ctsp,lab,28d}$ (MPa)	0,51	0,44	0,44	0,56	0,36	0,20	0,25
$f_{ctmr,lab,28d}$ (MPa)	0,97	0,93	1,02	1,17	0,69	0,52	0,41
E (GPa)	2,77	2,10					
V_{us} (m/s)	1 714	1 414	1 584	1 472	1 147	1 094	1 104
ϵ_{cst} ($\times 10^{-6}$)	- 39	- 52					
IE_{PT}	33,5	24,3	29,5	28,8			15,5
λ_m (W/m°C)	0,57	0,42	0,51	0,42	0,44	0,39	0,56
K_w ($\times 10^{-7}$ m/s)	2,80	6,10	4,20	4,80			
$AbsI_{48h}$ (%m)	19,0	22,0	19,9	21,5			
Abs_{48h} (%v)	32,9	35,8	33,5	35,3			
$AbsC_{72h}$ (g/cm ²)	4,19	7,07	6,19	5,17			
$C_{abp,5min}$ (kg/m ² .s)	0,008	0,012	0,016	0,011			
$I_{erosão}$	Aceite	Aceite		Aceite			Rejeitado

Por análise termogravimétrica, a perda de massa com o aumento de temperatura está essencialmente associada à presença de ligante e minerais argilosos. Tendo ainda em consideração o auxílio de análises de DRX, conclui-se que o CR conduz ao desenvolvimento de menor volume de produtos de hidratação a longo prazo, bem como a uma maior quantidade de produtos carbonatados.

Dependendo da idade, composição e condições de cura, a resistência à compressão variou entre 0,8 e 7,4 MPa. Os resultados não são diretamente comparáveis com os de outros autores, visto que se demonstra que a resistência é bastante afectada pela geometria dos blocos e condições de ensaio. Ainda assim, confirma-se a tendência de aumento de resistência com o aumento do teor de estabilizante. A incorporação de apenas 5% de estabilizante, CR ou CP, revelou ser pouco efectiva, tendo-se preterido destas composições para os restantes ensaios de caracterização. A incorporação de 10% CR foi efectiva em aumentar a resistência dos BTC aos 28 dias em cerca de 2 vezes face aos BTC não estabilizados. No entanto, a resistência é reduzida em cerca de 25% face aos BTC com igual quantidade de CP, para teores intermédios de humidade. Para condições secas ou saturadas, a redução foi de 43% ou apenas 12%, respectivamente. Isso salienta o menor poder estabilizante e maior sensibilidade à ação da água do CR do que do CP. A maior exigência de água e a menor compacidade atingida nos BTC com CR contribuiu para um menor desempenho mecânico face aos BTC com CP. A incorporação parcial de CR conduziu a resistências intermédias, verificando-se reduções de resistência inferiores a 15% para até 50% de substituição de CP por CR.

Conforme esperado, a mesma tendência observada nos ensaios de resistência à compressão foi verificada nos ensaios de tração e flexão, nomeadamente no que se refere à influência do tipo e teor de estabilizante. No entanto, as diferenças entre BTC com CP e com CR foram atenuadas, constatando-se que a resistência à tração variou de forma pouco significativa para percentagens de incorporação de até 50%, excepto em condições saturadas, onde a redução foi de 27% nos BTC com CR. A dureza superficial, medida por esclerómetro pendular, também seguiu a mesma tendência dos ensaios de caracterização mecânica. O índice esclerométrico foi cerca de 27% inferior ao do BTC com CP, mas 57% superior face ao BTC não estabilizado.

Em geral, conclui-se que a resistência mecânica e a eficiência estrutural foram essencialmente afectadas pelo nível de compacidade atingido nos BTC e pelo teor de ligante, assumindo menor relevância o tipo de ligante, o que sugere a viabilidade do CR como material estabilizante de BTC mais eco-eficientes.

O ensaio de propagação de ultrassons foi capaz de distinguir BTC de diferente qualidade, obtendo-se valores inferiores para menores teores de ligante e maiores percentagens de incorporação de CR, que conduziram a BTC de maior porosidade total e menor rigidez. De facto, o módulo de elasticidade nos BTC com CP foi 32% superior ao dos BTC com CR, atingindo-se em ambos os casos módulos de elasticidade da ordem de grandeza do reportado em BTC correntes. Assim, a maior porosidade total e menor rigidez dos BTC conduziu a menores velocidades de ultrassons nos BTC com CR. No entanto, a velocidade de ultrassons foi essencialmente afectada pelo teor de humidade dos BTC. Para idênticos teores de humidade, verificou-se uma boa relação entre a resistência à compressão e a velocidade de ultrassons ou o índice esclerométrico.

Os BTC com CP atingiram menores valores de retração a longo prazo do que os BTC com CR, indiciando também alcançar mais cedo a estabilização desta propriedade. Isso resulta do maior volume de pasta e menor rigidez dos BTC com CR. No entanto, nos primeiros dias em que a resistência à fendilhação é menor, a retração dos BTC com CR e CP foi semelhante. Acrescente-se ainda que os

BTC estabilizados atingiram valores de retração inferiores a 0.05 mm/m, que é uma ordem de grandeza inferior ao máximo recomendado na NTC 5324 (2004).

A condutibilidade térmica foi significativamente afectada pelo teor de humidade dos BTC, sendo mais de duas vezes superior em blocos saturados do que em blocos secos. A menor condutibilidade térmica foi atingida nos BTC com CR, associados a menor massa volúmica e maior porosidade total, sendo até 26% inferior à dos BTC com igual teor de CP. Confirmou-se uma elevada correlação entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica ou a porosidade total. Em termos de resistência térmica, os BTC apresentaram desempenho comparável ao de tijolos cerâmicos furados de igual espessura.

Os BTC não estabilizados evidenciaram grande sensibilidade à água, desagregando-se rapidamente após contacto com a mesma e apresentando reduções elevadas de resistência mecânica com o aumento do seu teor de humidade. Por outro lado, o CP e o CR foram eficientes na estabilização dos BTC, permitindo que estes mantivessem a sua integridade em contacto com a água. Ainda assim, como referido, a redução de resistência entre BTC secos e saturados foi de 42% e 62% nos blocos estabilizados com CP e CR, respectivamente.

Em geral, a absorção por imersão, a taxa de absorção capilar e a absorção a baixa pressão aumentou com a percentagem de incorporação de CR. Mais de 90% da porosidade dos BTC foi acessível à água, revelando a elevada interconectividade da sua estrutura porosa. Como seria de esperar, verificou-se uma elevada correlação entre a absorção ou a permeabilidade e a porosidade total dos BTC. Embora a absorção capilar tenha sido medida no sentido perpendicular ao de prensagem dos blocos, constataram-se taxas de absorção até 70% superiores nos BTC com 10% CR do que com 10% CP. Isso fez com que os BTC produzidos com CP ficassem enquadrados na classe de “muito baixa absorção” e os BTC com CR na classe de “baixa absorção”. Por sua vez, os BTC com CR apresentaram coeficientes de permeabilidade à água de até cerca de duas vezes superiores ao dos BTC com CP.

Dos vários ensaios de absorção e permeabilidade conclui-se que a incorporação de CR conduziu a BTC de maior porosidade e conectividade. Esse aumento de absorção prejudica o desempenho mecânico, a capacidade de isolamento térmico e a durabilidade dos BTC. É expectável que o desempenho dos BTC com CR seja mais próximo do obtido ns BTC com CP caso se promova uma maior optimização da quantidade de água adicionada e da compactação dos blocos, de modo a que estes atinjam soluções iniciais de maior compacidade, visto que o problema não se parece colocar ao nível da capacidade de hidratação do CR.

Finalmente, qualquer dos BTC estabilizados com 10% de ligante apresentou excelente resistência à erosão acelerada, que simula o efeito de chuva intensa. Mesmo tendo em consideração pressões de água 5 vezes superiores às sugeridas na norma, a profundidade de erosão foi inferior a 1 mm/h, enquadrando-se na classe IE1, independentemente do tipo de ligante. Em contraste, os BTC não estabilizados foram totalmente erodidos ao fim de apenas 7 minutos de ensaio.

Em geral, pode-se concluir que, no presente estudo, foi possível atingir soluções duráveis com incorporação de apenas 180 kg/m³ de CP ou CR. No caso de se adotar CR, e assumido simplificadaamente uma redução potencial de mais de 60% no nível de emissões de CO₂ (redução de energia térmica e descarbonatação evitada), a solução atingida seria comparável à de se utilizar apenas

70 kg/m³ de cimento. Num estudo recente de Sousa e Bogas (2021), estimou-se uma redução média de emissões de apenas 29%, devido à inclusão de uma etapa de secagem durante o processo de produção do CR. Neste caso, o teor de cimento equivalente nos BTC seria ainda assim de apenas 128 kg/m³. Sem considerar a parcela relativa à secagem, que poderá ser evitável após desenvolvimento de processos de separação mais eficientes, a redução potencial de CO₂ seria superior a 80% (Sousa e Bogas 2021). Para estes valores, corresponde uma dosagem de cimento equivalente de apenas 36 kg/m³, cumprindo as metas de redução de 60-80% de emissões de CO₂ recomendadas para 2050, para além da reutilização de pelo menos 70 % dos RCD (Agreement, 2015; Mađry, 2019).

5.2 PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

O presente trabalho permitiu explorar pela primeira vez a utilização de cimento reciclado de baixo carbono na estabilização de blocos de terra comprimida. Isso permite caminhar para uma construção mais sustentável e alinhada com os objetivos atuais de economia circular definidos no novo plano de atuação da comunidade europeia. Apesar de se ter desenvolvido um trabalho extenso que se julga contribuir para o aumento do conhecimento neste domínio, é necessário investir em investigação adicional que vise validar a utilização de cimento reciclado e aumentar a confiança na sua utilização. Em seguida sugerem-se algumas propostas de desenvolvimentos futuros nesta área:

- Otimização da produção dos BTC, procurando contornar os problemas de maior exigência de água do CR e maior dificuldade de compactação dos blocos;
- Explorar outras pressões de compactação e avaliar a sua influência no desempenho dos BTC;
- Produção de BTC com misturas ternárias, utilizando CR e outras adições que permitem contornar a elevada exigência de água destes ligantes;
- Caracterização de alvenarias de BTC expostas em ambiente real;
- Incorporação de cimento reciclado em outras técnicas de construção em terra;
- Análise mais detalhada dos mecanismos de ação envolvidos na estabilização da terra por ação do cimento reciclado;
- Estudo de viabilidade económica e ambiental da produção de BTC com cimento reciclado.

6 REFERÊNCIAS

- Abdulsalam M, Abdulkarem M, Olumide E, Hejazi F. (2018). Effect of Addition of Silica Fume and Oil Palm Fiber on the Engineering Properties of Compressed Earth Block. *Civ. Eng. Res. J.* 6, 0–6.
- Agreement, P. (2015, December). Paris agreement. In *Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris)*. Retrieved December (Vol. 4, p. 2017).
- Alam, I., Naseer, A., & Shah, A. A. (2015). Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Construction and Building Materials*, 77, 154-159.
- Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., & Ehlacher, A. (2005). The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete research*, 609-613.
- Alonso, C., & Fernandez, L. (2004). Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of materials science*, 39(9), 3015-3024.
- Appro Techno, (2021). Prensa Manual Terstaram. *Consultado em março de 2021*: http://www.appro-techno.be/fr/page_presse-manuelle-terstaram_29.aspx
- Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and concrete composites*, 26(7), 811-820.
- Baldusco, R., Nobre, T. R. S., Angulo, S. C., Quarcioni, V. A., & Cincotto, M. A. (2019). Dehydration and rehydration of blast furnace slag cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), 04019132.
- Bandeira J. (2020). Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado. *Dissertação em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Bogas, J. A. (2011). *Caracterização de betões estruturais com agregados de argila expandida*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Tese de doutoramento.
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 218, 377-389.
- Bogas, J. A., Silva, M., & Glória Gomes, M. (2020). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(4), 569-584.
- Bogas, J. A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 138, 106226.
- Brigatti, M. F., Colonna, S., Malferrari, D., Medici, L., & Poppi, L. (2005). Mercury adsorption by montmorillonite and vermiculite: a combined XRD, TG-MS, and EXAFS study. *Applied Clay Science*, 28(1-4), 1-8.
- Bruno, P., Faria, P., Candeias, A., & Mirão, J. (2010). Earth mortars from pre-historic habitat settlements in south Portugal. Case studies. *J. Iberian Archaeology*, 13, 51-67.

- Caillié, R. (2013). *Travels Through Central Africa to Timbuctoo and Across the Great Desert to Morocco, 1824-28: to Morocco, 1824-28*. Routledge.
- Carrigo, A., Real, S., Bogas, J. A., & Pereira, M. F. C. (2020). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*, 256, 119502.
- Carvalho M. (2020). Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação. *Dissertação em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Chatham House. (2018) Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete-0/1-introduction>
- Censos. (2011). Disponível em: https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos_quadros_edif
- Cid-Falceto, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2012). Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests. *Construction and Building Materials*, 37, 738-745.
- Danso, H., & Adu, S. (2019). Characterization of compressed earth blocks stabilized with clay pozzolana. *J. Civ. Environ. Eng.*, 9(1), 1-6.
- Delgado, M. C. J., & Guerrero, I. C. (2006). Earth building in Spain. *Construction and building materials*, 20(9), 679-690.
- Derkowski, A., Drits, V. A., & McCarty, D. K. (2012). Nature of rehydroxylation in dioctahedral 2: 1 layer clay minerals. *American Mineralogist*, 97(4), 610-629.
- EcoMáquinas. (2 de Junho de 2017). *Produzindo Blocos Ecológicos - Prensa Tijolos Ecológicos | Compressed Earth Block Machin*. Obtido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=ts0v9HmP6R4>
- EcoMáquinas. (2020). *A construção ecológica*. Obtido de www.ecomaquinas.com.br
- Egenti, C., Khatib, J. M., & Oloke, D. (2013). High carbon fly ash and soil in a shelled compressed earth block.
- Eusébio, A. P. J. (2001). *Reabilitação e melhoramento de paredes de terra crua-taipa* (Doctoral dissertation, Tese de Mestrado em Construção. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal).
- Exelbirt, J. (2011). *Characterizing Compressed Earth Bricks Based on Hygrothermal Aging and Wind-Driven Rain Erosion* (Doctoral dissertation, University of Florida).
- Falcão, J.M.F.V.N (2014), "Arquitetura Contemporânea em Terra". *Tese de Mestrado em Construção e Reabilitação, IST, Portugal*.
- Favero, J. S., Parisotto-Peterle, J., Weiss-Angeli, V., Brandalise, R. N., Gomes, L. B., Bergmann, C. P., & dos Santos, V. (2016). Physical and chemical characterization and method for the decontamination of clays for application in cosmetics. *Applied Clay Science*, 124, 252-259.

- Fernandes, M., & Correia, M. (2005). *de l'article/du chapitre Arquitectura de terra em Portugal*. distributeur Argumentum.
- Fernandes, M. D. M. (2011). *Mecânica dos solos-Introdução à engenharia geotécnica. FEUP edições, 2*.
- Ferreira, C. D. C. (2012). *A sustentabilidade do sistema construtivo em terra: um projecto de reabilitação* (Doctoral dissertation).
- Gomes, M. I., Faria, P., & Gonçalves, T. D. (2019). Rammed earth walls repair by earth-based mortars: The adequacy to assess effectiveness. *Construction and Building Materials, 205*, 213-231.
- Gomes, C. D. S. F. (1988). *Argilas: o que são e para que servem*.
- González-López, J. R., Juárez-Alvarado, C. A., Ayub-Francis, B., & Mendoza-Rangel, J. M. (2018). Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials, 163*, 179-188.
- Hall, M. R., & Swaney, W. (2012). European modern earth construction. In *Modern Earth Buildings* (pp. 650-687). Woodhead Publishing.
- Hall, M. R., Lindsay, R., & Krayenhoff, M. (2012). Overview of modern earth building. In *Modern Earth Buildings* (pp. 3-16). Woodhead Publishing.
- Helfritz, H. (1937). Land without shade. *Journal of the Royal Central Asian Society, 24*(2), 201- 216.
- Izemmouren, O., Guettala, A., & Guettala, S. (2015). Mechanical properties and durability of lime and natural pozzolana stabilized steam-cured compressed earth block bricks. *Geotechnical and Geological Engineering, 33*(5), 1321-1333.
- Jayasinghe, C., Fonseka, W. M. C. D. J., & Abeygunawardhene, Y. M. (2016). Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. *Construction and building materials, 102*, 471-477.
- Jean-Louis, B. (1987). The History of the Great Mosque of Djenne. *African Arts, 20*(3), 54-63.
- Jorge, F.; Fernandes, M.; Correia, M. (2006) *Arquitectura de Terra em Portugal*. 1ª Edição, Lisboa, Argumentum ISBN 972-8479-36-0.
- Kerali, A. G. (2001). *Durability of compressed and cement-stabilised building blocks* (Doctoral dissertation, University of Warwick).
- Khatib, J. M., Baalbaki, O., & ElKordi, A. A. (2018). Metakaolin. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (pp. 493-511). Woodhead Publishing.
- Kinuthia J. (2015). *Eco-efficient masonry bricks and blocks: design, properties and durability*. Woodhead Publishing. Editado por Pacheco-Torgal, F., Lourenco, P., Labrincha, J., Chindaprasirt, P., & Kumar, S.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. Springer Science & Business.
- Lourenço, P. I. (2002). *Construções em Terra*. Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Lopes I. (2015). Eficiência de produtos hidrófugos no desempenho face à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento e não estabilizados. *Dissertação em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Mansour, M. B., Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. B. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and building materials*, 104, 44-51.

Marchon, D., & Flatt, R. J. (2016). Mechanisms of cement hydration. In *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 129-145). Woodhead Publishing.

Mađry, T. (2019). Circular Economy-One of the Most Important Challenges for the European Union.

Meira, J. M. (2001). Argilas: o que são, suas propriedades e classificações. *Comunicações técnicas*, 2.

Millogo, Y., Morel, J. C., Aubert, J. E., & Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 71-78.

Monteiro, A. F. P. M. N. (2015). O betão armado em Portugal, através dos arquitectos.

Mostafa, M., & Uddin, N. (2016). Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 53-63.

Motta, M. (1997). Construções rurais em alvenaria de terra crua no Baixo Alentejo. *Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico*.

Mundo, Q. C. (21 de Junho de 2015). *Grande Mesquita de Djenné - Mali*. Obtido de Quatro Cantos do Mundo: <https://quatrocantosdomundo.wordpress.com/2015/06/21/grande-mesquita-de-djenne-mali-arquitetura-espetacular/>

Namango, S. S. (2006). Development of Cost-Effective Earthen Building Material for Housing Wall Construction: Investigations into the Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Sisal Vegetable Fibres, Cassava Powder and Cement Compositions. *Cassava Powder and Cement Compositions. A Doctoral Dissertation, Brandenburg Technical University, Cottbus, Germany*.

Neves, Emanuel M. (2016). Mecânica dos estados críticos, solos saturados e não saturados. *IST Press*.

Oliveira, H. (2019). *Tijolo ecológico: o que é, tipos, vantagens e desvantagens*. Obtido de Z1 Portal: <https://www.z1portal.com.br/o-tijolo-ecologico-utiliza-principios-sustentaveis-na-sua-fabricacao-e-execucao/>

Parracha, J. L., Silva, A. S., Cotrim, M., & Faria, P. (2019). Mineralogical and microstructural characterisation of rammed earth and earthen mortars from 12th century Paderne Castle. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 226-239.

Parracha, J. L., Lima, J., Freire, M. T., Ferreira, M., & Faria, P. (2019). Vernacular earthen buildings from Leiria, Portugal—material characterization. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-16.

Real, S., Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement. *Materials*, 13(18), 3937.

Reddy, B. V. (2012). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. In *Modern earth buildings* (pp. 324-363). Woodhead Publishing.

- Rix, C. G. (1998). Stabilisation of a highly plastic clay soil for the production of compressed earth blocks. *A Master Thesis submitted to the Faculty of Architecture, University of the Witwatersrand, Johannesburg.*
- Riza, F. V., Rahman, I. A., & Zaidi, A. M. A. (2010, December). A brief review of compressed stabilized earth brick (CSEB). In *2010 International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010)* (pp. 999-1004). IEEE.
- Riza, F. V., & Rahman, I. A. (2015). The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. In *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks* (pp. 379-392). Woodhead Publishing.
- Ribeiro, D., Silva, V., & Faria, P. (2016). Caracterização de blocos de terra comprimida. In *TEST&E 2016–1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil–Ensaio para Reabilitar* (pp. ID-01014). TEST&E 2016.
- Rigassi, V. (1985). Compressed earth blocks: Manual of production. *CRAterre-EAG, GATE, 1.*
- Santos, J. A. (2008). *Obras Geotécnicas-Compactação–Elementos Teóricos. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura-Instituto Superior Técnico.*
- Schroeder, H. (2012). Modern earth building codes, standards and normative development. In *Modern Earth Buildings* (pp. 72-109). Woodhead Publishing.
- Sekhar, D. C., & Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials, 166*, 531-536.
- Senf, N. (2006). *2006 MHA Annual Meeting*. Obtido de The Masonry Heater: <http://www.mha-net.org/docs/v8n2/wildac06e.htm>
- Serpell, R., & Lopez, M. (2015). Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. *Cement and Concrete Composites, 64*, 16-26.
- Serpell, R., & Zunino, F. (2017). Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of α' H-C2S. *Cement and Concrete Research, 100*, 398-412.
- Shuang, H. (2017). *SanBaoPeng Art Museum / DL Atelier*. Obtido de Archdaily: <https://www.archdaily.com/882468/sanbaopeng-art-museum-dl-atelier>
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and building materials, 23*(1), 531-537.
- Shui, Z., Lu, J., Tian, S., Shen, P., & Ding, S. (2014). Preparation of new cementitious system using fly ash and dehydrated autoclaved aerated concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 29*(4), 726-732.
- Silva M. (2015). Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios. *Dissertação em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Skibsted, J., & Snellings, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cement and Concrete Research, 124*, 105799.

- Snellings, R. (2018). Capítulo 4 – X-ray powder diffraction applied to cement. Em Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (Eds.). (2018). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. Crc Press.
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127277.
- Taallah, B., & Guettala, A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52-62.
- UNESCO, W. H. C. 1992-2021. (2021). UNESCO World Heritage List. *Consultado em março de 2021*: <http://whc.unesco.org/en/list/>
- UNESCO. (2021). *World Heritage List*. Obtido de UNESCO: <https://whc.unesco.org/en/list/>
- UNEP. (2021). United Nations Environment Programme. Disponível em: <https://www.unenvironment.org/>
- Van Damme, H., & Houben, H. (2018). Earth concrete. Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research*, 114, 90-102.
- Walker, P. J. (2004). Strength and erosion characteristics of earth blocks and earth block masonry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(5), 497-506.
- Wang, J., Mu, M., Liu, Y. (2018). Recycled cement. *Construction and Building Materials*, 1124-1132.
- WBCSD, IEA. (2009). Cement technology roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050. *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA)*.
- Xuan, D. X., & Shui, Z. H. (2011). Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature. *Fire and materials*, 35(7), 481-490.
- Yalley, P. P. K., & Manu, D. (2013). Strength and Durability Properties of Cow Dung Stabilised Earth Brick. *Civil and Environmental Research*, 13(3).
- Yorka. (2019). *Machine brique*. Obtido de Yorkam Group: <https://yorkamgroup.com/fr/produits/machine-de-parpaing-machine-brique-manuelle-automatique/>
- Yu, R., & Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. *Construction and Building Materials*, 841-851.
- Yu, R., & Shui, Z. (2014). Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. *Journal of cleaner production*, 78, 202-207.
- Zero, G. (Setembro de 2020). *Shibam*. Obtido de WikiVoyage: <https://en.wikivoyage.org/wiki/Shibam>

DOCUMENTOS NORMATIVOS

ASTM C805 (1993) – Test for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM, USA

ASTM D698 (2000), Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021

BS EN 16302 (2013) – Conservation of Cultural Heritage. Test methods. Measurement of Water Absorption by Pipe Method.

ISO/FDIS 10456 (2007) – Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values, ISSO, Geneva

LNEC E-239 (1970) – Análise granulométrica do solo por peneiração húmida, Lisboa

LNEC E-394 (1993) – Absorção de água por imersão à pressão atmosférica, Lisboa

LNEC E-398 (1998) – Betão: determinação da retração e expansão. LNEC, Lisboa

NBR 8492 (1984) – Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água de tijolos maciços de solo-cimento para alvenaria, ABNT, Rio de Janeiro

NP-83 (1965) - Solos: densidade de partículas, IPQ, Lisboa

NP-148 (1969) – Solos: determinação dos limites de consistência, IPQ, Lisboa

NP EN 772-11 (2002) – Unidades de alvenaria - Métodos experimentais - Parte 1: Agregado e natural - Determinação de absorção, Lisboa.

NP EN 772-13: 2002 Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 13: Determinação da massa volúmica real seca e da massa volúmica aparente seca de blocos para alvenaria (excepto blocos de pedra natural).

NP EN 12390-6 (2011) – Ensaio do betão endurecido: resistência à tração por compressão de provetes, IPQ, Lisboa

NP EN 12504-2 (2012) – Ensaio do betão nas estruturas. Parte 2: Ensaio não destrutivo-Determinação do índice esclerométrico, Lisboa.

NP EN 12504-4 (2007) – Medição da velocidade de propagação dos ultrassons, IPQ, Lisboa

NP EN 772-6 (2002) – Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 6: Determinação da resistência à tração por flexão de blocos para alvenaria de betão de agregados, Lisboa

NTC 5324 (2004) – Bloques de suelo cemento para muros y divisones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega, ICONTEC, Bogotá

NZS 4298 (1998) – Materials and workmanship for earth buildings, SNZ, Wellington

ANEXOS

A.1: Resultado dos ensaios de resistência à compressão e tração.

Tabela A1 - 1 – Resistência à compressão aos 3 dias de idade.

Mistura	h (mm)	Peso (g)	ρ (kg/m ³)	ρ_{med} (kg/m ³)	F (kN)	σ (Mpa)	σ_{med} (Mpa)
PC5.1	61	2 691	1 910	1 918	29,99	1,30	1,47
PC5.2	61	2 716	1 928		32,43	1,40	
PC5.3	61	2 700	1 916		39,54	1,71	
RC5.1	61	2 703	1 918	1 917	24,01	1,04	0,97
RC5.2	61	2 680	1 902		22,91	0,99	
RC5.3	61	2 722	1 932		20,61	0,89	
RC10.1	61	2 609	1 851	1 860	41,57	1,80	1,77
RC10.2	61	2 600	1 845		39,42	1,71	
RC10.3	60	2 611	1 884		41,37	1,79	
PC10.1	62	2 874	2 007	2 015	74,42	3,22	3,38
PC10.2	61	2 787	1 978		68,40	2,96	
PC10.3	61	2 904	2 061		91,28	3,95	
RC2PC8.1	63	2 880	1 979	1 981	56,68	2,45	2,61
RC2PC8.2	62	2 799	1 954		61,12	2,65	
RC2PC8.3	62	2 879	2 010		62,94	2,72	
RC5PC5.1	60	2 526	1 823	1 961	36,26	1,57	2,01
RC5PC5.2	61	2 731	1 938		53,02	2,30	
RC5PC5.3	61	2 794	1 983		50,12	2,17	
T.1	60	2 650	1 912	1 926	16,76	0,73	0,83
T.2	60	2 653	1 914		22,12	0,96	
T.3	60	2 706	1 952		18,85	0,82	

Tabela A1 - 2 – Resistência à compressão aos 7 dias de idade

Mistura	h (mm)	Peso (g)	ρ (kg/m ³)	ρ_{med} (kg/m ³)	F (kN)	σ (Mpa)	σ_{med} (Mpa)
PC10.1	63	3 049	2 095	2 034	89,52	3,88	3,54
PC10.2	61	2 858	2 028		71,80	3,11	
PC10.3	60	2 742	1 978		84,30	3,65	
RC5.1	60	2 662	1 921	1 932	22,97	0,99	1,05
RC5.2	61	2 716	1 928		23,65	1,02	
RC5.3	61	2 744	1 948		26,16	1,13	
PC5.1	60	2 797	2 018	1 971	44,76	1,94	1,82
PC5.2	60	2 723	1 964		41,28	1,79	
PC5.3	61	2 722	1 931		40,18	1,74	
RC2PC8.1	62	2 858	1 995	1 987	73,80	3,19	3,14
RC2PC8.2	61	2 757	1 957		67,55	2,92	
RC2PC8.3	61	2 833	2 010		75,94	3,29	
RC5PC5.1	61	2 748	1 950	1 951	58,81	2,55	2,78
RC5PC5.2	59	2 528	1 855		45,85	1,98	
RC5PC5.3	62	2 796	1 952		69,51	3,01	
RC10.1	60	2 603	1 878	1 888	55,94	2,42	2,52
RC10.2	60	2 640	1 905		59,71	2,58	
RC10.3	60	2 608	1 882		58,91	2,55	
T.1	60	2 543	1 834	1 851	41,98	1,82	1,79
T.2	60	2 588	1 867		40,87	1,77	
T.3	-	-	-		-	-	

Tabela A1 - 3 – Resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Mistura	h (mm)	Peso (g)	ρ (kg/m ³)	ρ_{med} (kg/m ³)	F (kN)	σ (Mpa)	σ_{med} (Mpa)
PC10.Seco.1	62	2 619	1 829	1 732	242,46	10,50	7,43
PC10.Seco.2	61	2 476	1 757		182,26	7,89	
PC10.Seco.3	61	2 335	1 657		101,85	4,41	
PC10.Seco.4	61	2 374	1 685		160,34	6,94	
PC10.Sat.1	64	3 097	2 095	2 030	92,83	4,02	4,32
PC10.Sat.2	62	2 857	1 995		76,54	3,31	
PC10.Sat.3	62	2 882	2 012		126,30	5,47	
PC10.Sat.4	62	2 889	2 017		103,95	4,50	
PC10.1	62	2 702	1 886	1 846	144,69	6,26	5,92
PC10.2	62	2 683	1 873		145,49	6,30	
PC10.3	61	2 560	1 816		131,83	5,71	
PC10.4	62	2 636	1 841		142,34	6,16	
PC10.5	61	2 555	1 813		119,14	5,16	
RC10.1	61	2 401	1 704	1 723	109,00	4,72	4,44
RC10.2	61	2 402	1 704		94,15	4,08	
RC10.3	62	2 486	1 736		103,58	4,48	
RC10.4	61	2 449	1 738		101,05	4,37	
RC10.5	61	2 440	1 732		105,41	4,56	
RC10.Seco.1	61	2 276	1 615	1 629	122,90	5,32	6,53
RC10.Seco.2	62	2 350	1 641		158,83	6,88	
RC10.Seco.3	62	2 354	1 644		176,58	7,64	
RC10.Seco.4	61	2 276	1 615		144,76	6,27	
RC10.Sat.1	61	2 652	1 882	1 912	54,06	2,34	2,45
RC10.Sat.2	62	2 760	1 927		56,43	2,44	
RC10.Sat.3	60	2 644	1 908		56,86	2,46	
RC10.Sat.4	61	2 724	1 933		59,37	2,57	
PC5.1	60	2 426	1 751	1 793	81,95	3,55	3,34
PC5.2	61	2 538	1 801		85,01	3,68	
PC5.3	60	2 471	1 783		67,43	2,92	
PC5.4	61	2 566	1 821		75,70	3,28	
PC5.5	61	2 549	1 809		75,90	3,29	
RC5.1	60	2 448	1 766	1 718	57,60	2,49	2,45
RC5.2	61	2 392	1 697		57,31	2,48	
RC5.3	60	2 336	1 685		54,11	2,34	
RC5.4	61	2 422	1 719		53,49	2,32	
RC5.5	61	2 425	1 721		60,14	2,60	
RC2PC8.1	61	2 562	1 818	1 797	114,67	4,96	5,12
RC2PC8.2	61	2 509	1 780		126,22	5,46	
RC2PC8.3	60	2 471	1 783		112,55	4,87	
RC2PC8.4	62	2 566	1 792		124,40	5,39	
RC2PC8.5	61	2 555	1 813		113,07	4,89	
RC5PC5.1	60	2 427	1 751	1 790	111,79	4,84	4,99
RC5PC5.2	61	2 528	1 794		112,19	4,86	
RC5PC5.3	61	2 511	1 782		115,79	5,01	
RC5PC5.4	62	2 550	1 781		124,15	5,37	
RC5PC5.5	61	2 538	1 801		112,33	4,86	
T.Seco.1	59	2 427	1 781	1 794	91,48	3,96	4,25
T.Seco.2	59	2 425	1 779		104,61	4,53	
T.Seco.3	59	2 477	1 818		105,31	4,56	
T.Seco.4	59	2 451	1 798		91,14	3,95	
T.1	59	2 523	1 851	1 839	55,82	2,42	2,33
T.2	60	2 494	1 800		51,17	2,22	
T.3	59	2 520	1 849		49,16	2,13	
T.4	59	2 528	1 855		59,05	2,56	

Tabela A1 - 4 – Resistência à compressão aos 90 dias de idade.

Mistura	h (mm)	Peso (g)	ρ (kg/m ³)	ρ_{med} (kg/m ³)	F (kN)	σ (Mpa)	σ_{med} (Mpa)
PC10.1	62	2 426	1 694	1 789	121,93	5,28	5,66
PC10.2	61	2 566	1 821		136,43	5,91	
PC10.3	61	2 592	1 839		145,89	6,32	
PC10.4	61	2 541	1 803		118,45	5,13	
RC10.1	61	2 312	1 641	1 683	91,84	3,98	4,74
RC10.2	61	2 422	1 719		142,91	6,19	
RC10.3	61	2 308	1 638		98,97	4,28	
RC10.4	61	2 447	1 736		104,55	4,53	

Tabela A1 - 5 – Resistência à tração por flexão aos 28 dias.

Mistura	h (mm)	Peso (g)	ρ (kg/m ³)	ρ_{med} (kg/m ³)	F (kN)	σ_{tf} (Mpa)	σ_{med} (Mpa)
RC5.1	61	2 468	1 751	1 747	0,86	0,59	0,52
RC5.2	60	2 426	1 750		0,71	0,50	
RC5.3	60	2 411	1 740		0,65	0,46	
PC5.1	61	2 513	1 783	1 811	0,94	0,65	0,69
PC5.2	60	2 533	1 827		0,96	0,69	
PC5.3	60	2 525	1 822		1,03	0,74	
RC2PC8.1	61	2 569	1 823	1 811	1,52	1,05	1,02
RC2PC8.2	61	2 579	1 830		1,43	0,99	
RC2PC8.3	60	2 466	1 779		1,41	1,01	
RC5PC5.1	61	2 490	1 767	1 812	1,59	1,10	1,17
RC5PC5.2	61	2 635	1 870		1,73	1,19	
RC5PC5.3	60	2 492	1 798		1,73	1,23	
T.1	60	2 545	1 836	1 826	0,53	0,38	0,41
T.2	60	2 490	1 796		0,52	0,37	
T.3	59	2 515	1 845		0,61	0,45	
PC10.1	60	2 470	1 782	1 762	1,47	1,05	0,97
PC10.2	60	2 471	1 783		1,25	0,89	
PC10.3	61	2 549	1 809		1,51	1,04	
PC10.4	60	2 356	1 700		1,32	0,94	
PC10.5	61	2 398	1 702		1,25	0,86	
PC10.6	61	2 530	1 795		1,51	1,04	
RC10.1	59	2 307	1 692	1 714	1,08	0,80	0,93
RC10.2	60	2 379	1 716		1,39	1,00	
RC10.3	60	2 329	1 680		1,13	0,80	
RC10.4	62	2 490	1 738		1,74	1,16	
RC10.5	61	2 435	1 728		1,36	0,94	
RC10.6	61	2 436	1 729		1,32	0,91	

Tabela A1 - 6 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Mistura	h (mm)	Peso (g)	ρ (kg/m ³)	ρ_{med} (kg/m ³)	F (kN)	σ_{sp} (Mpa)	σ_{med} (Mpa)
RC10.hum.1	61	2 767	1 963	1 988	9,55	0,45	0,33
RC10.hum.2	60	2 709	1 954		5,35	0,26	
RC10.hum.3	62	2 929	2 045		5,82	0,27	
PC10.hum.1	61	2 619	1 858	1 886	6,96	0,33	0,45
PC10.hum.2	62	2 738	1 912		9,93	0,46	
PC10.hum.3	61	2 658	1 887		11,62	0,55	
RC5.1	61	2 475	1 756	1 771	3,65	0,17	0,20
RC5.2	60	2 496	1 801		4,50	0,22	
RC5.3	60	2 434	1 756		4,34	0,21	
PC5.1	61	2 519	1 787	1 782	8,49	0,40	0,36
PC5.2	60	2 435	1 757		6,96	0,34	
PC5.3	60	2 496	1 801		6,95	0,34	
RC2PC8.1	61	2 513	1 783	1 765	9,83	0,47	0,44
RC2PC8.2	60	2 418	1 745		9,50	0,46	
RC2PC8.3	61	2 488	1 766		8,60	0,41	
RC5PC5.1	61	2 575	1 827	1 808	12,27	0,58	0,56
RC5PC5.2	61	2 587	1 836		12,37	0,59	
RC5PC5.3	60	2 439	1 760		11,11	0,54	
T.1	60	2 601	1 877	1 851	5,64	0,27	0,25
T.2	60	2 545	1 836		3,76	0,18	
T.3	59	2 509	1 841		4,67	0,23	
PC10.1	60	2 336	1 685	1 749	8,61	0,42	0,51
PC10.2	60	2 414	1 742		11,05	0,53	
PC10.3	61	2 505	1 778		12,32	0,58	
PC10.4	60	2 480	1 789		10,13	0,49	
RC10.1	60	2 366	1 707	1 710	7,96	0,38	0,44
RC10.2	60	2 440	1 760		10,46	0,50	
RC10.3	61	2 342	1 662		8,85	0,42	
RC10.4	61	2 411	1 711		9,23	0,44	

A.2: Resultado dos ensaios de absorção de água.

Tabela A2 - 1 – Absorção de água por imersão aos 28 dias de idade.

Mistura	h (mm)	Peso inicial (g)	Peso 24hs (g)	Peso 48hs (g)	Peso Seco (g)	% água inicial	% média água inicial	% água 24hrs	% média água 24hrs	% água 48hrs	% média água 48hrs
PC10.1	61	2 573	2 870	2 874	2 404	7,04	6,80	19,37	18,84	19,52	19,00
PC10.2	61	2 562	2 845	2 849	2 405	6,55		18,31		18,47	
RC5PC5.1	61	2 432	2 758	2 768	2 293	6,09	5,75	20,30	20,97	20,76	21,46
RC5PC5.2	60	2 314	2 671	2 682	2 196	5,41		21,64		22,16	
RC2PC8.1	60	2 409	2 724	2 739	2 282	5,57	5,68	19,34	19,25	20,01	19,85
RC2PC8.2	61	2 453	2 763	2 775	2 318	5,79		19,16		19,70	
RC10.1	60	2 340	2 728	2 738	2 230	4,95	4,93	22,36	21,54	22,78	21,97
RC10.2	60	2 399	2 760	2 770	2 286	4,91		20,72		21,15	

Tabela A2 - 2 – Absorção de água por capilaridade aos 28 dias de idade.

Mistura	h (mm)	Peso Seco (g)	Peso Inicial (g)	Peso 10min (g)	Peso 20min (g)	Peso 30min (g)	Peso 1h (g)	Peso 2h (g)	Peso 6h (g)	Peso 24h (g)	Peso 72h (g)
PC10.1	62	2 506	2 515	2 531	2 539	2 545	2 558	2 574	2 608	2 679	2 761
PC10.2	61	2 404	2 413	2 427	2 434	2 439	2 451	2 465	2 497	2 561	2 634
PC10.3	61	2 454	2 464	2 485	2 494	2 501	2 516	2 533	2 574	2 660	2 774
RC5PC5.1	61	2 418	2 433	2 461	2 465	2 470	2 482	2 499	2 535	2 608	2 686
RC5PC5.2	60	2 190	2 203	2 253	2 261	2 269	2 292	2 320	2 372	2 473	2 584
RC5PC5.3	60	2 274	2 289	2 424	2 430	2 437	2 454	2 476	2 523	2 615	2 646
RC2PC8.1	60	2 333	2 350	2 378	2 383	2 388	2 401	2 419	2 459	2 550	2 680
RC2PC8.2	61	2 395	2 411	2 464	2 473	2 483	2 507	2 597	2 598	2 719	2 840
RC2PC8.3	61	2 372	2 386	2 360	2 370	2 381	2 409	2 438	2 486	2 566	2 715
RC10.1	60	2 184	2 198	2 252	2 258	2 266	2 289	2 321	2 388	2 510	2 641
RC10.2	61	2 371	2 385	2 417	2 420	2 426	2 442	2 466	2 518	2 642	2 819
RC10.3	61	2 233	2 246	2 329	2 340	2 356	2 397	2 452	2 555	2 726	2 738

Tabela A2 - 3 – Absorção de água a baixa pressão aos 28 dias de idade.

Referência	PC10			RC5PC5			RC2PC8			RC10		
	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	C _{abs} (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	C _{abs} (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	C _{abs} (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	C _{abs} (kg/m ² /t)
0	-	-	--	-	-	--	-	-	--	-	-	--
15	0,60	0,11	0,070	0,60	0,11	0,070	0,70	0,12	0,082	0,70	0,12	0,082
30	0,90	0,16	0,053	0,80	0,14	0,047	1,15	0,20	0,067	0,90	0,16	0,053
60	1,00	0,18	0,027	1,00	0,18	0,027	1,50	0,26	0,042	1,20	0,21	0,032
90	1,10	0,19	0,018	1,20	0,21	0,020	1,85	0,32	0,033	1,50	0,26	0,026
120	1,20	0,21	0,014	1,40	0,25	0,017	2,10	0,37	0,028	1,65	0,29	0,021
150	1,30	0,23	0,012	1,60	0,28	0,016	2,30	0,40	0,024	1,80	0,32	0,018
180	1,40	0,25	0,011	1,75	0,31	0,015	2,50	0,44	0,022	1,95	0,34	0,016
210	1,50	0,26	0,010	1,90	0,33	0,014	2,70	0,47	0,020	2,10	0,37	0,015
240	1,60	0,28	0,009	2,00	0,35	0,013	2,90	0,51	0,018	2,25	0,39	0,014
270	1,70	0,30	0,008	2,15	0,38	0,012	3,10	0,54	0,017	2,40	0,42	0,013
300	1,80	0,32	0,008	2,25	0,39	0,011	3,25	0,57	0,016	2,55	0,45	0,012
420	2,10	0,37	0,007	2,70	0,47	0,010	3,80	0,67	0,014	3,00	0,53	0,011
600	2,55	0,45	0,006	3,25	0,57	0,009	4,00	0,70	0,011	3,60	0,63	0,009
720	2,75	0,48	0,006	3,60	0,63	0,008				4,00	0,70	0,008
900	3,05	0,54	0,005	4,00	0,70	0,007						
1020	3,25	0,57	0,005									
1200	3,50	0,61	0,004									
1320	3,70	0,65	0,004									
1500	3,90	0,68	0,004									
1620	4,00	0,70	0,004									
1800												