

Estabilização de blocos de terra com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão - Durabilidade

José Frederico Teodoro Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador:

Professor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Júri:

Presidente: Professora Maria da Glória de Almeida Gomes

Orientador: Professor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

janeiro de 2024

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.

Estabilização de blocos de terra com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão - Durabilidade

José Frederico Teodoro Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Dissertação elaborada no âmbito do Projecto FCT Eco+RCEB
Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks

Task 5 – Durability of CSEB

Projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021



Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

AGRADECIMENTOS

Serve esta página para agradecer a quem me acompanhou neste percurso e me manteve motivado para a concretização deste trabalho.

Em primeiro lugar, à minha família, que sempre me apoiou em tudo e com quem sei que posso sempre contar.

Aos meus amigos que nunca me abandonaram e que torcem e me ajudam a ter sucesso.

À AFA, que serviu de segunda casa durante estes últimos 6 anos, onde muito aprendi e cresci e aos meus camaradas que nunca me deixam caminhar sozinho.

Ao IST e aos professores da instituição, pelo zelo e brio com que se encarregam do seu trabalho e que muito me ensinaram. Em especial aos meus colegas de projeto e orientador de tese.

RESUMO

A construção em terra, nomeadamente a técnica de blocos de terra comprimida (BTC), reapareceu nos últimos anos no sentido de se procurarem soluções construtivas mais ecológicas e sustentáveis. Porém, uma das grandes desvantagens da construção em terra é a sua reduzida durabilidade face à ação da água, sendo necessário a sua estabilização química. O cimento Portland (CP) é eficaz enquanto estabilizante dos BTC, mas devido ao seu elevado impacto ambiental devem ser procuradas soluções alternativas. Desse modo, no presente trabalho explora-se a utilização de cimento reciclado (CR) na produção de BTC, com foco no seu comportamento em termos de durabilidade à água.

Foi implementada uma campanha experimental no sentido de caracterizar BTC estabilizados de diferentes composições. Neste sentido, começou-se por selecionar e caracterizar o solo a utilizar, bem como os resíduos de construção e demolição que serão incorporados nos blocos. De seguida, produziu-se o cimento reciclado, através de moagem e termoativação de resíduos de cimento/betão. O CR foi também caracterizado. Com estes materiais, produziram-se blocos com variação de tipo de cimento (CP42.5, CP32.5, CR de pasta de cimento e CR de Betão), de teor de ligante (0, 4 e 8%), de substituição de CP por CR (0, 20, 50 e 100%), de incorporação de RCD (0,15 e 25%) e de teor de água. Estes provetes foram, então, caracterizados em termos de massa volúmica fresca e aos 28 dias, resistência à compressão, absorção de água por imersão, capilaridade e baixa pressão, erosão e erosão acelerada, permeabilidade ao vapor e secagem. Os resultados foram comparados entre si, com provetes não estabilizados e com referência a trabalhos anteriores.

Os BTC estabilizados apresentaram propriedades melhoradas, especialmente na diminuição da suscetibilidade à água. Verificaram-se maiores resistências, menores porosidades, maiores massas volúmicas e menores absorções quando os provetes são estabilizados. O teor de ligante, relação a/l e método de compactação demonstraram ter grande influência nas características finais dos provetes. A incorporação de RCD até 25% produziu resultados ligeiramente melhores de compacidade e resistência nos BTC, mostrando-se viável a utilização deste material, melhorando a natureza sustentável deste tipo de construção. Conclui-se que a estabilização dos BTC é fundamental, com o cimento reciclado a mostrar ser uma alternativa viável face ao CP.

Palavras-chave:

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

ABSTRACT

Earth construction, more specifically compressed earth blocks (CEB), has reappeared in recent years in the search of constructive solutions that are more eco-friendly and sustainable. However, one of the big disadvantages of earth construction is its reduced durability when subject to water, making it necessary to chemically stabilize it. Portland cement (PC) is effective as a CEB stabilizer, although its high environmental impact makes the look for alternatives a priority. Therefore, in the present work, the use of recycled cement (RC) will be explored as a way to stabilize CEB, with a big focus on their behaviour in terms of water durability.

An experimental campaign was implemented with the objective of characterizing stabilized CEB of various compositions. As such, the selection and characterization of the soil and construction debris and waste (CDW) that will be incorporated in the blocks was completed. Then, the RC was produced, through milling and thermal activation of cement and concrete debris. The RC was also characterized. With these materials, blocks were produced with varying types of cement (PC42.5, PC32.5, RC from cement, RC from concrete), different percentage of binder (0, 4 and 8%), of RC-PC replacement (0, 20, 50 and 100%), of CDW (0, 15 and 25%) and water content. These blocks were, then, tested in terms of fresh density and after 28 days, mechanical strength by compression, water absorption by immersion, capillarity and at low pressure, erosion and accelerated erosion, vapour permeability and drying. The test results were compared with each other, with unstabilized blocks, and with previous works.

The stabilized CEB showed improved properties, especially in reducing the water degradation. They also presented bigger mechanical resistances, less porosity, bigger densities and smaller absorptions. Binder content, w/b ratio and the compaction method all proved to influence the final characteristics of the block. CDW incorporation, up to 25%, produced slightly better results of compaction and compression strength, demonstrating that the use of this material is viable, improving the sustainability nature of this technique. It is concluded that CEB stabilization is fundamental, with RC being a viable alternative to PC.

Keywords:

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

ÍNDICE GERAL

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objetivos e metodologia	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	Estado de arte	3
2.1	Construção em terra ao longo da história	3
2.2	Construção em terra atualmente e redução do impacto ambiental	4
2.3	Normas e métodos existentes e seu desenvolvimento	5
2.4	Propriedades da terra e das construções em terra	6
2.5	Caracterização dos solos	7
2.6	Vantagens e desvantagens da utilização da terra	8
2.7	Estabilização da terra	9
2.8	Estabilização com Cimento Portland	10
2.9	O cimento reciclado	10
2.10	Blocos de terra comprimida (BTC)	12
2.10.1	Produção de BTC	13
2.10.2	Composição dos BTC	14
3	Campanha experimental	15
3.1	Resumo da campanha experimental	15
3.2	Caracterização da terra	16
3.2.1	Análise granulométrica e teor de argila	17
3.2.2	Determinação dos limites de consistência	19
3.2.3	Ensaio de compactação (Proctor)	20
3.2.4	Determinação da massa volúmica e absorção de água	21
3.2.5	Determinação da fração de matéria orgânica	22
3.2.6	Composição mineralógica	23
3.3	Caracterização do agregado reciclado	23
3.3.1	Análise granulométrica	24
3.3.2	Massa volúmica e absorção de água às 24 horas	24
3.3.3	Composição dos RCD	25
3.4	Estabilizantes	26

3.4.1	Cimento Portland	26
3.4.2	Cimento reciclado	26
3.4.3	Caracterização do cimento reciclado	29
3.5	Estudos prévios	32
3.5.1	Composições preliminares	32
3.5.2	Teor Ótimo de Água (Proctor)	35
3.6	Produção dos BTC	36
3.6.1	Composição dos BTC.....	36
3.6.2	Preparação dos constituintes da mistura	38
3.6.3	Mistura, prensagem e cura	39
3.6.4	Construção dos muros de alvenaria.....	39
3.7	Caracterização dos BTC	40
3.7.1	Massa volúmica	40
3.7.2	Resistência à compressão	41
3.7.3	Absorção de água por imersão	41
3.7.4	Absorção de água por capilaridade.....	42
3.7.5	Absorção de água a baixa pressão (Tubo de Karsten).....	43
3.7.6	Erosão (<i>drip test</i>)	43
3.7.7	Erosão acelerada (<i>spray test</i>)	44
3.7.8	Permeabilidade ao vapor.....	44
3.7.9	Secagem.....	46
4	Apresentação e discussão de resultados	47
4.1	Massa volúmica e porosidade	47
4.2	Resistência à compressão	51
4.3	Absorção de água por imersão	55
4.4	Absorção de água por capilaridade.....	59
4.5	Absorção de água a baixa pressão (karsten).....	63
4.6	Secagem.....	66
4.7	Erosão por gotejamento (<i>drip test</i>).....	69
4.8	Erosão acelerada (<i>spray test</i>)	70
4.9	Permeabilidade ao vapor.....	73
5	Conclusões.....	77

5.1	Conclusões gerais	77
5.2	Proposta de desenvolvimento futuro	80
6	Referências	81
6.1	Documentos normativos	87
7	Anexos	A

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Terra na antiguidade: a) Construção de blocos de terra, Egito; b) Cidade de Shibam, Iémen.	3
Figura 2 – As construções tradicionais em terra portuguesas e a sua distribuição pelo território nacional: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique.....	4
Figura 3 – Construções modernas em terra: a) Edifício habitacional, Brasil; b) Escola de Artes Plásticas em Oaxaca, México.	6
Figura 4 - Ciclo de vida do cimento Portland e do cimento reciclado.	11
Figura 5 - Prensas utilizadas na compactação dos BTC: a) Prensa mecânica manual Terstaram; b) Prensa hidráulica OSKAM.....	13
Figura 6 – Solo FA armazenado em Montemor-O-Novo (a); pormenor de solo FA original (b).	16
Figura 7 – Material TV recolhido e transportado em Big Bags (a); Material em pormenor (b).	17
Figura 8 – Análise granulométrica da terra: a) desagregação de aglomerados; b) peneiração; c) mistura com solução de hexametáfosfato de sódio; d) lavagem da amostra.	18
Figura 9 – Análise granulométrica do solo FA, resíduo argiloso TV e dos RCD (envolvendo granulometria por peneiração a seco acima de 75 µm e por adsorção de Raio X abaixo de 75 µm)..	18
Figura 10 – Determinação do limite de liquidez: a) preparação da concha de Casagrande; b) concha de Casagrande preparada para impactos; c) recolha da amostra para levar à estufa.....	19
Figura 11 – Determinação do limite de plasticidade: a) rolagem das esferas em filamentos; b) amostras prontas a serem colocadas em estufa.	20
Figura 12 - Diagrama de plasticidade (XP P13-901 (2022)).....	20
Figura 13 – Ensaio de compactação: a) solo preparado; b) compactação do solo; c) provete após compactação.	21
Figura 14 - Curva de compactação do solo FA.....	21
Figura 15 – Determinação da massa volúmica das partículas dos solos: a) picnómetro com água destilada; b) picnómetro pronto para pesagem; c) pesagem do picnómetro.	22
Figura 16 - Determinação da percentagem de matéria orgânica: a) cadinhos com amostra; b) mufla	22
Figura 17 –RCD: Material recolhido e transportado em Big Bags (a); Material em pormenor (b).	23
Figura 18 - Determinação da absorção de água das partículas dos solos: a) picnómetro; b) tabuleiro e secador; c) molde de ensaio; d) ensaio completo.....	25
Figura 19 – Determinação fração de agregados nos RCD: a) determinação do volume das partículas flutuantes; b) processo de separação por tipologia; c) separação concluída	25
Figura 20 – Provetes: a) pasta de cimento de origem; b) betão de origem.	27
Figura 21 - Produção do cimento reciclado: a) britagem na britadeira no LC-IST; b) britagem na britadeira de menor abertura do Geolab-IST; c) moagem no moinho de rolos; d) peneiração intermédia do resíduo de betão; e) moinho de bolas; ai) partículas depois de a); bi) partículas depois de b); ci) partículas depois de c); di) partículas depois de d); ei) partículas depois de e) no forno horizontal; f) forno rotativo da <i>Thermolab Scientific Equipments</i> ; g) curva de termoativação do cimento.	28
Figura 22– Análise granulométrica laser de CRP (RCP) e de cimento tipo 42,5 (CP).....	29

Figura 23 – Caracterização do cimento reciclado: a) provetes de pasta de cimento reciclado termoativado; b) ensaio à compressão.	30
Figura 24 – Curvas termogravimétricas do RP e CRP	31
Figura 25 – Curvas termogravimétricas das duas frações de resíduos de betão.....	32
Figura 26 - Curva de compactação para as misturas UCEB/TV11, CP8/TV11, CRP8/TV11 e UCEB/TV18	36
Figura 27 – Curvas granulométricas limite das composições de BTC e fuso XP P-13-901 (2001).	38
Figura 28 – Preparação do solo FA: a) secagem ao sol; b) pulverização; c) crivagem	38
Figura 29 – Produção BTC: a) misturadora de eixo vertical; b) prensa hidráulica; c) arrumação dos blocos	39
Figura 30 – Ensaio de compressão: a) preparação do ensaio; b) provete após ensaio; c) gráfico força-tempo registado pelo software Automax Multitest	41
Figura 31 - Ensaio de absorção de água por imersão: a) tanque com os blocos; b) balança hidrostática	42
Figura 32 - Ensaio de absorção capilar: a) início do ensaio; b) provetes ao fim de 24 horas	42
Figura 33 - Ensaio de absorção de água à baixa pressão (Karsten).....	43
Figura 34 - <i>Drip test</i> : a) Esquema do ensaio; b) Pano absorvente; c) Profundidade de penetração da água.....	44
Figura 35 - Ensaio de erosão acelerada: a) equipamento utilizado; b) erosão superficial do bloco; c) penetração de humidade.....	44
Figura 36 - Ensaio de permeabilidade ao vapor: a) e b) copos com provetes e CaCl_2 no tanque; c) pesagem dos copos.	45
Figura 37 – Ensaio de secagem: provetes selados na câmara seca	46
Figura 38 – Relação entre porosidade total e massa volúmica fresca.	49
Figura 39 – Resistência à compressão aos 28 dias <i>versus</i> porosidade total	53
Figura 40 – Resistência à compressão em função da percentagem de substituição de CP por CR ...	54
Figura 41 – Resistência à compressão em função da percentagem de substituição de solo por RCD55	
Figura 42 – Dois blocos de UCEB desintegrados (à direita) enquanto os blocos com CP ou CRP mantêm a sua integridade (à esquerda)	56
Figura 43 – Absorções por imersão, em percentagem de volume (apenas os valores máximos de absorção ao longo do tempo são indicados).....	57
Figura 44 – Relação entre a absorção em volume a longo prazo ($\text{abs}_{i,v,t}$) e a porosidade total.....	58
Figura 45– Absorção em volume ($\text{abs}_{i,v,t}$) em função da percentagem de substituição de solo por RCD	59
Figura 46– Diferentes tipos de estabilizante: absorção capilar ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 10 minutos, $C_{\text{abs},10\text{m}}$ e até 6 horas, $C_{\text{abs},10\text{m-6h}}$ (direita)	61
Figura 47– Substituição de CP por CR: absorção capilar ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 10 minutos, $C_{\text{abs},10\text{m}}$ e até 6 horas, $C_{\text{abs},10\text{m-6h}}$ (direita).....	61
Figura 48– Substituição de solo por RCD: absorção capilar ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 10 minutos, $C_{\text{abs},10\text{m}}$ e até 6 horas, $C_{\text{abs},10\text{m-6h}}$ (direita).....	61

Figura 49– Relação entre o coeficiente de absorção ($C_{abs,10m-6h}$) e a porosidade total.	62
Figura 50– Relação entre a absorção por imersão, $abs_{i,v,t}$, e a absorção capilar, $abs_{c,v,72h}$	62
Figura 51– Diferentes tipos de estabilizante: absorção a baixa pressão ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 5 minutos, $C_{abs,5m}$ e tempo de ensaio, t_{med} (direita).....	64
Figura 52– Substituição de solo por RCD: absorção a baixa pressão ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 5 minutos, $C_{abs,5m}$ e tempo de ensaio, t_{med} (direita).....	64
Figura 53– Substituição de CP por CR: absorção a baixa pressão ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 5 minutos, $C_{abs,5m}$ e tempo de ensaio, t_{med} (direita).....	64
Figura 54– Relação entre o coeficiente de absorção ($C_{abs,10m-6h}$) e a porosidade total.	65
Figura 55– Diferentes tipos de estabilizante: Curva de secagem ao longo do tempo (esquerda); Taxa de secagem entre 1h e 172h, DR_{1-172h} , e índice de secagem, IS (direita)	66
Figura 56– Substituição de CP por CR: Curva de secagem ao longo do tempo (esquerda); Taxa de secagem entre 1h e 172h, DR_{1-172h} , e índice de secagem, IS (direita)	67
Figura 57– Substituição de solo por RCD: Curva de secagem ao longo do tempo (esquerda); Taxa de secagem entre 1h e 172h, DR_{1-172h} , e índice de secagem, IS (direita)	67
Figura 58– Relação entre a taxa de secagem (DR_{1-172h}) e a porosidade total.	68
Figura 59– Relação entre o índice de secagem (IS) e a porosidade total.	68
Figura 60– Provetes CEM8, CEM8TH, CRP8 e UCEB após ensaio, respetivamente.	69
Figura 61– Diferentes níveis de erosão: a) provete CEM8; b) provete CRP8; c) provete CRP4; d) provete UCEB.....	72
Figura 62– Penetração de humidade, nos BTC analisados após 120 minutos de erosão acelerada (120kPa).	72
Figura 63 – Relação entre a penetração de humidade, PH250 kPa, e a porosidade total.....	73
Figura 64– Permeabilidade ao vapor, W_{vp} , e resistência à difusão, μ , de BTC com diferentes tipos de estabilizante (esquerda) ou percentagens de substituição de CP por CRP (direita).....	75
Figura 65– Permeabilidade ao vapor, W_{vp} , e resistência à difusão, μ , de BTC com diferentes teores de RCD	76
Figura 66– Permeabilidade ao vapor, W_{vp} , versus porosidade total, P_T	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características da terra para a produção de BTC (Silva, 2015).	14
Tabela 2 – Proporções recomendadas de cimento na estabilização do BTC.	14
Tabela 3 – Análise granulométrica por adsorção de Raios X da fração < 63 μm	18
Tabela 4 – Índices de Atterberg para o solo FA e resíduo TV	20
Tabela 5 – Massa volúmica e absorção de água dos solos	22
Tabela 6 – Percentagem de matéria orgânica	23
Tabela 7 - Fases mineralógicas identificadas por difração de Raios-X	23
Tabela 8 - Massas volúmicas e absorção de água do RCD	25
Tabela 9 - Frações constituintes do RCD	26
Tabela 10 - Propriedades do cimento Portland.....	26
Tabela 11 - Propriedades do cimento reciclado.....	29
Tabela 12 – Resultados do ensaio de termogravimetria.....	31
Tabela 13 – Composições preliminares (Fase 1).....	33
Tabela 14 - Principais resultados obtidos para as composições preliminares (Fase 1)	34
Tabela 15 - Composições preliminares (Fase 2)	34
Tabela 16 - Principais resultados obtidos para as composições preliminares (Fase 2)	35
Tabela 17 – Composição dos BTC produzidos.....	37
Tabela 18 – Resumo dos provetes utilizados em cada ensaio.....	40
Tabela 19 – Resumo das composições dos BTC	47
Tabela 20 – Massa volúmica, MV, e porosidade total, $P_{T,BTC}$, dos BTC	48
Tabela 21 – Resistência média à compressão aos 28 dias, $f_{c,28d}$, saturada, $f_{c,sat}$, e não confinada $f_{c,un}$	52
Tabela 22– Absorção de água por imersão às 24h e 48h, em massa, $abs_{i,m}$, e em volume, $abs_{i,v}$	56
Tabela 23– Absorção capilar a 72h, $abs_{c,72h}$, coeficiente de absorção $C_{abs,10min}$ e $C_{abs,10min-6h}$ e coeficiente de variação de $C_{abs,10min}$	60
Tabela 24 –Resultados ensaio de gotejamento – <i>drip test</i>	69
Tabela 25 –Resultados ensaio de erosão acelerada.....	71
Tabela 26– Permeância, Λ , Permeabilidade Wvp , e resistência à difusão, μ , de vapor de água	73

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

BTC - Bloco de terra comprimida
a/c - Relação água/cimento
a/l - Relação água/ligante
CP - Cimento Portland
CR - Cimento Reciclado
CRP - Cimento Reciclado de Cimento Portland
CRB - Cimento Reciclado de Betão
CO₂ - Dióxido de Carbono
C₃S - Silicato Tricálcico
C₂S - Silicato Bicálcico
ACOC - Oficinas do Convento de Montemor-o-Novo
HR - Humidade relativa (%)
IP - Índice de plasticidade
IST - Instituto Superior Técnico
LL - Limite de liquidez
LP - Limite de plasticidade
N/A - Não avaliado/Não aplicável/Não existe
RCD - Resíduos de construção e demolição
FAP - Força Aérea Portuguesa
CT - Campo de Tiro de Alcochete
TOA - Teor Ótimo de Água
TV - Torres Vedras
MN - Montemor-o-Novo
LMIN - Laboratório de Minas
LEC-IST - Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.
GeoLab-IST - Laboratório de Geotecnologia do Instituto Superior Técnico.
HQRS - High Quality Recycled Sand
TW/TA/TH - Teor de água (%)
TG - Análise Termogravimétrica
DRX - Difração de Raios-X
SAT - Condições de Saturação
SEC – Condições de Secagem
AL - Condições de Ambiente Laboratorial
 Δ^2 - Quadrado do Desvio
DTG - Derivada da Termogravimetria

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Apesar da construção em terra ser uma técnica utilizada há milhares de anos, com exemplos de aplicação em vários locais do mundo, esta caiu em desuso no século passado, após o surgimento de materiais mais eficientes, como o betão (Hall, *et al.*, 2012; Kinuthia, 2015). Face a este novo material, a construção em terra apresenta propriedades inferiores, tanto em termos de durabilidade, como de resistência. No entanto, o betão e a grande quantidade de cimento utilizado na sua produção, têm um elevado impacto ambiental, justificando-se soluções mais eco-eficientes, como a construção em terra (Aubert *et al.*, 2019; Boden *et al.*, 2020), pelo menos em aplicações de menor exigência estrutural. Neste sentido, a construção em terra poderá ser a alternativa construtiva procurada. Esta está associada a uma energia incorporada cerca de 30 vezes inferior à do betão ou à de blocos cerâmicos tradicionais (Schroeder, 2012). Outras vantagens na construção em terra estão relacionadas com a elevada disponibilidade de matéria-prima; reduzidos custos de transporte (princípio de construção no local de extração do solo); facilidade de produção e conforto higrotérmico (Uzoegbo, 2020).

Porém, uma das maiores desvantagens da construção em terra é a sua enorme sensibilidade e falta de durabilidade face à ação da água. Assim, de modo a estender o seu domínio de utilização a ambientes de maior exigência, não protegidos da ação direta da água, é necessário proceder à sua estabilização (Rigassi, 1985; Uzoegbo, 2015). A estabilização mecânica, como sucede nos blocos de terra comprimida (BTC), objeto do presente trabalho, é efetiva no aumento das características mecânicas da construção em terra (Jayasinghe, 2016; Nabais 2023). Porém, apenas a estabilização química é verdadeiramente eficiente na resistência à água (Taallah, *et al.*, 2016; Bogas, *et al.*, 2018; Cicek *et al.*, 2020). Neste caso, a forma mais eficaz de estabilização química dos BTC envolve a utilização de cimento Portland (CP). Porém, apesar de se utilizar em menores dosagens do que no betão, a incorporação de cimento vai alterar a natureza ecológica da construção em terra, aumentando largamente o seu impacto ambiental (Hall, 2012). Assim, são absolutamente necessárias alternativas mais ecológicas ao CP, que, sem afetar significativamente as propriedades dos BTC, permita reduzir a sua pegada ecológica. Neste sentido, o desenvolvimento de novos cimentos reciclados, que se tem preconizado ao longo dos últimos 5 anos no Instituto Superior Técnico, pode ser uma solução interessante para a estabilização mais eco-eficiente dos BTC. Conforme demonstrado nos trabalhos de Sousa e Bogas (2021), Bogas *et al.* (2022) e Real *et al.* (2022), sem afetar significativamente as características mecânicas e de durabilidade dos materiais de base cimentícia, o cimento reciclado (CR) permite contribuir para a redução importante das emissões de CO₂, pois a sua produção é efetuada a cerca de metade da temperatura do fabrico do clínquer, e porque é evitada a fase extremamente penalizante de descarbonatação de material carbonatado. Reduções superiores a 60% nas emissões de CO₂ são referidas por Real *et al.* (2022). Para além disso, dado que o CR é obtido a partir de resíduos de construção e demolição (RCD), existe uma redução importante do consumo de matérias-primas naturais e uma taxa de reciclagem elevada, promovendo a economia circular da construção (Sousa e Bogas, 2021). No âmbito do projeto de investigação Eco+RCEB – “Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks”, ref. PTDC/ECI-CON/0704/2021, a utilização de CR como estabilizante de BTC foi recentemente explorada e validada nos trabalhos de Nabais (2023) e Gonçalves (2023), que

apesar de terem verificado que os BTC com CR apresentaram resistência mecânica ligeiramente inferior à dos BTC com igual teor de CP, o seu desempenho foi bastante superior ao dos BTC não estabilizados. Porém, estes autores apenas se focaram no comportamento mecânico de BTC com cimento reciclado, sugerindo para desenvolvimento futuro a análise da sua durabilidade. Este é um dos principais objetivos do projeto Eco+RCEB, dando origem ao desenvolvimento da presente dissertação.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho em termos de durabilidade de BTC produzidos com incorporação parcial ou total de cimento reciclado e confrontar o seu desempenho face a BTC de referência não estabilizados (UCEB) ou produzidos com cimento normal (CP). De forma a melhorar a natureza sustentável da técnica, considera-se ainda a substituição parcial de solo por até cerca de 25% de resíduos de construção e demolição (RCD).

Pretende-se considerar dois tipos de cimento reciclado, um obtido diretamente de resíduos de pasta (CRP) e outro de resíduos de betão (CRB). O CRP tem a vantagem de ser mais fácil de obter e apresentar um maior rendimento, permitindo atingir, em tempo útil, as quantidades necessárias à produção dos BTC. Para além disso, dado que o CRP é obtido de material cimentício puro apresenta menor variabilidade e maior capacidade reativa. O CRB, ao ser obtido de resíduos de betão, exige uma etapa adicional e demorada de separação prévia. Neste caso, considera-se o método de separação recentemente patenteado no âmbito do projeto EcoHydb, que permite obter resíduos cimentícios com baixa contaminação de agregado. Para os BTC com CP, consideram-se dois tipos de cimento, o CEM 142.5 e CEM II/B-L 32,5 (CP32.5), este último mais económico e correntemente utilizado na construção.

Para tal, após uma fase dedicada à seleção e caracterização do solo, foram produzidos diferentes tipos de BTC, tendo em conta a incorporação de diferentes tipos (CRP, CRB, CP, CP32.5) e teor de estabilizante (0%, 4%, 8%), a incorporação parcial de CR em substituição de CP (20%, 50%), e a substituição parcial de solo por RCD (0%, 15%, 25%). A consideração de misturas mais pobres com apenas 4% de estabilizante teve dois objetivos: definição de soluções mais sustentáveis; a confrontação entre BTC de 4%CP e BTC de 8% estabilizante com 50% CR. As composições dos BTC foram previamente otimizadas tendo por base a realização de um estudo prévio em que se avaliou a influência de diferentes fatores, nomeadamente o teor de ligante, composição da mistura de terra e teor em água. Os BTC foram posteriormente ensaiados laboratorialmente em termos de algumas das suas principais propriedades físicas (massa volúmica), mecânicas (resistência à compressão) e, sobretudo, de durabilidade (absorção por imersão, capilaridade e a baixa pressão; secagem; erosão acelerada por ação da água - *drip* e *spray test*; permeabilidade ao vapor de água).

Este trabalho, no âmbito do projeto Eco+RCEB, foi realizado com a colaboração de dois colegas, um aluno de mestrado e outro de doutoramento, que desenvolvem estudos no mesmo domínio.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo o primeiro e o último a introdução e a conclusão, respetivamente. No capítulo 2 apresenta-se uma breve análise do estado da arte relativo aos temas pertinentes à dissertação. 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. No capítulo 3 descreve-se este trabalho e no capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

2 ESTADO DE ARTE

Este capítulo tem como objetivo mostrar a aplicação da terra na construção ao longo da história, bem como a sua disseminação por todo o mundo, evidenciando a sua aplicabilidade, vantagens e desvantagens da sua utilização. Existem vários métodos de construção em terra, os principais dos quais serão descritos, com foco especial nos BTC. Vão evidenciar-se as propriedades que a terra tem, em função do tipo de solo. A terra pode ser estabilizada de várias formas que melhoram as suas qualidades, sendo dado, portanto, neste capítulo, ênfase a esta parte do processo de fabrico dos BTC. Serão apresentadas, também, as vantagens que o cimento reciclado apresenta na sua produção em detrimento de cimento original e quando aplicado na produção de BTC, tanto na melhoria das propriedades deste, quanto na redução do impacto ambiental e nos níveis de energia incorporada no produto final, algo que, nos dias de hoje, se torna cada vez mais relevante.

2.1 CONSTRUÇÃO EM TERRA AO LONGO DA HISTÓRIA

A terra foi dos primeiros materiais a serem utilizados pela Humanidade, por ser o material mais difundido e disponível em todo o mundo. Os primeiros seres humanos a adotar o estilo de vida sedentário, associado à introdução da agricultura nas sociedades, necessitavam de abrigos, e utilizavam os materiais que mais à mão tinham e mais fáceis eram de utilizar. São caso disto a madeira, a pedra e a terra. Esta última apresenta uma capacidade de ser moldada que as primeiras duas não têm, o que lhe dá uma aplicabilidade única em relação aos restantes materiais.

São conhecidos indícios da utilização da terra em construção que remontam a 10000 a.C.. São encontradas construções antigas em terra por todo o mundo, nomeadamente no Egito, Médio Oriente, China e América do Sul. Muitas das construções são reconhecidas pela UNESCO (Vyncke, *et al.*, 2017; Quagliarini *et al.*, 2010).

Na Figura 1a) pode ver-se uma representação egípcia do fabrico de blocos de terra. Uma das construções em terra mais icónicas e reconhecida por todo o mundo são as pirâmides do Egito.

Na Figura 1b) pode-se ver a cidade de Shibam. Uma cidade integralmente contruída de terra e uma das primeiras deste tipo. Foi construída no século III e reconstruída no século XVI, mas ainda hoje esta cidade é habitada, demonstrando a resiliência que as construções em terra podem ter. Os edifícios aqui presentes apresentam entre 5 e 11 andares, sendo que o adobe com que foi feita a construção vai diminuindo de espessura à medida que os andares aumentam, melhorando o desempenho da estrutura, diminuindo o peso dos pisos superiores (Pacheco-Torgal *et al.*, 2009).



Figura 1 – Terra na antiguidade: a) Construção de blocos de terra, Egito; b) Cidade de Shibam, Iémen.

O uso da terra teve maior desenvolvimento em locais onde o clima é propício para este tipo de construção (pouca chuva, longe do mar). É, portanto, em África, Médio Oriente e em certas partes da Ásia que se encontra a maior concentração de exemplos. No entanto, a Europa também tem alguns exemplares que permanecem até hoje como testemunhos de que a terra também aqui esteve sempre presente. A cidade de Alhambra, Espanha é considerada a cidade muçulmana medieval mais bem preservada do mundo, sendo considerada património da Humanidade em 1984. O Mosteiro de Maulbronn, na Alemanha, foi considerado património da Humanidade em 1993 (UNESCO, 2021).

Portugal não é diferente, apresentando, também, construção em terra um pouco por todo o seu território, havendo indícios de várias técnicas distintas, bem como de períodos distintos. No Alentejo encontramos construção em Taipa, no litoral a norte de Lisboa encontramos Adobe e no interior norte, construção em Tabique (Jorge *et al.*, 2005). O tipo de construção escolhido relaciona-se com o clima de cada região, com as matérias primas que se podem encontrar no local, mas também com os povos que habitaram na zona (Figura 2). É exemplo disto o uso da taipa no Alentejo entre os séculos VII e XII, associados à ocupação islâmica. Em termos dos períodos destas construções, existem indícios de serem do pré-histórico, pré-medieval, medieval e pós-medieval (Parracha *et al.*, 2019), mostrando, assim, a ubiquidade e a intemporalidade do uso da terra em Portugal, como material construtivo.

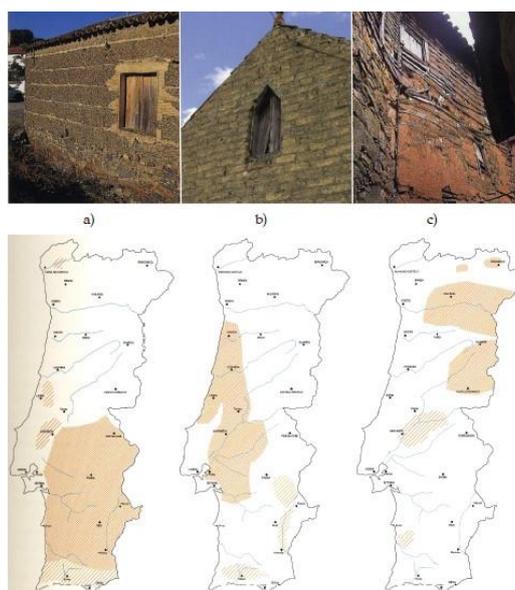


Figura 2 – As construções tradicionais em terra portuguesas e a sua distribuição pelo território nacional: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique.

2.2 CONSTRUÇÃO EM TERRA ATUALMENTE E REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

É estimado que, atualmente, cerca de 30 a 50% da população mundial ainda viva em habitações de terra (Vyncke, *et al.*, 2017; Kakizawa, 2007; Little *et al.*, 2001). Apesar de ter permanecido relevante em países pouco desenvolvidos, a revolução industrial promoveu uma grande mudança na Europa e em países desenvolvidos, devido à introdução do betão que viria a mostrar capacidades de velocidade de implementação, produção, durabilidade, e baixa relação de custo-resistência (Aubert *et al.*, 2019).

Estima-se que um terço das emissões de CO₂ mundiais estejam associadas à indústria da construção, juntamente com 60% do consumo de recursos naturais e a produção de 30% de todos os resíduos criados anualmente, um terço dos quais são resíduos de betão (Wang, *et al.*, 2012; Kamali,

et al., 2019). Se ao betão não estivessem associadas altas libertações de CO₂, associadas à produção de cimento, provavelmente não haveria um interesse em voltar a focar nos materiais de origem natural, tal como a terra, como alternativa (Aubert *et al.*, 2019). No entanto, a situação climática em que o mundo se encontra no início do terceiro milénio, força a Humanidade a reconsiderar o que consome e, em particular, o que constrói. Contudo, materiais que haviam sido abandonados por várias décadas, estão a atrair renovado interesse, não só devido ao seu baixo impacto ambiental (abundância de matéria prima, fácil reciclagem, baixo nível de energia incorporada) mas também pelas suas propriedades específicas, particularmente do ponto de vista do conforto habitacional (alta inércia térmica, alto potencial para controlo de humidade, boa resistência ao fogo) (Hall *et al.*, 2012; Damme *et al.*, 2017; Jayasinghe *et al.*, 2016; Walker, 2004).

No entanto, apesar dos países desenvolvidos se virarem mais para o uso da terra e já muitos arquitetos quererem incorporar esta nos seus projetos, ainda há algumas propriedades da terra que a tornam indesejável, como a sua má resistência à água. O uso de cimento, mesmo que em baixas quantidades, pode vir a eliminar esta contrapartida. Outra barreira, mas esta que poderá ser mais facilmente solucionada, é a falta de normas para a construção em terra, uma vez que, historicamente, a construção com esta era feita de modo empírico (Aubert *et al.*, 2019).

A utilização de componentes obtidos da demolição de estruturas existentes é uma maneira de reduzir ainda mais o impacto ambiental. Isto pode passar pela reciclagem do cimento no betão, mas também ao triturar os resíduos até a um tamanho desejado, por forma a serem depois usados em combinação com a terra, promovendo uma economia circular (Silva, 2014).

2.3 NORMAS E MÉTODOS EXISTENTES E SEU DESENVOLVIMENTO

A terra como material construtivo virá ao encontro de legislação europeia que promove a utilização de materiais mais ecológicos, tendo em vista os compromissos ambientais tomados pelo continente. Isto devido ao 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). O desenvolvimento de estudos, como esta dissertação, levarão a um maior entendimento das propriedades da terra e dos processos e soluções construtivas, maximizando a eficiência no uso da terra, tanto na qualidade do produto final, como do gasto de energia e poluição no processo de fabrico e implementação. Estes resultados servirão para padronizar esta técnica e poderão depois ser implementados em normas.

Apesar de existirem já alguns padrões (na Índia, Nepal, Nova Zelândia, Brasil, Sri Lanka, África, EUA ou Austrália, por exemplo), a falta de maior quantidade destes está a dificultar a renovação do uso da terra, especialmente na Europa, onde há grande dependência e obrigatoriedade de obedecer à legislação. As normas existentes mais recentes foram publicadas pela Alemanha, que publicou 3 normas para produtos de construção em terra (DIN 18945, 2013; DIN 18946, 2013; DIN 18947, 2013) (tijolos de terra, argamassas e rebocos, respetivamente) e a XP P-13 901 (2022), em França. No entanto, é interessante que estas normas não considerem a estabilização química, demonstrando que ainda há grandes lacunas na legislação europeia e avanços que necessitam de ser concretizados, por forma a serem formuladas normas mais atuais e completas (Aubert *et al.*, 2019).

Na França, o Grupo CRATerre é uma referência a nível internacional de pesquisa e desenvolvimento da construção em terra. No Brasil, há um grande desenvolvimento na construção com BTC, conhecido por tijolo ecológico ou bloco terra-cimento. Este tipo de blocos serão os utilizados e estudados nesta dissertação, sendo explicados em maior profundidade posteriormente neste capítulo. Neste país, a construção rege-se pelas normas NBR 8492 (2012) e NBR 10833 (2012). Na Figura 3 apresenta-se dois exemplos de construções modernas em terra, uma moradia construída em BTC no Brasil e a escola de artes plásticas de Oaxaca, no México.

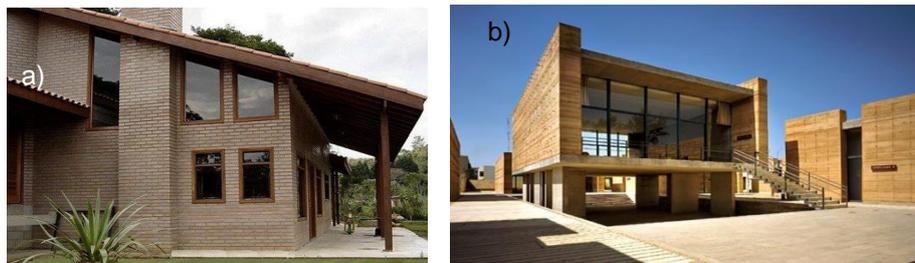


Figura 3 – Construções modernas em terra: a) Edifício habitacional, Brasil; b) Escola de Artes Plásticas em Oaxaca, México.

2.4 PROPRIEDADES DA TERRA E DAS CONSTRUÇÕES EM TERRA

A terra, material de construção geralmente abordado no meio científico como solo, é um material trifásico (sólido, líquido e gasoso) extremamente abundante e disponível na natureza, que tem origem na meteorização e erosão das rochas por ação de agentes atmosféricos (Motta, 1997). É um material heterogêneo com características muito variadas, dependendo da sua constituição, das partículas que o compõem que podem apresentar diversas constituições minerais e com uma enorme gama de dimensões e formas. À superfície, o solo também é constituído por materiais orgânicos, indesejáveis para construção, devido à sua previsível decomposição, aumento de porosidade e imprevisibilidade de desempenho (Lourenço, 2002). A terra tem um comportamento muito diferente em termos da quantidade de humidade presente nela, sendo que a coesão é afetada e melhorada pela presença de água, mas o seu excesso pode ser catastrófico e levar à decomposição e desagregação total do material de construção ou do provete. (Rodrigues, 2005).

A grande variedade de composições e de conseqüentes características de cada solo, leva a que este vá ter desempenhos muito diferentes, dependendo destas. Para além disto, as várias técnicas diferentes existentes para a construção em terra foram criadas para utilizar da melhor maneira possível o tipo de solo presente no local onde viria a ser aplicado. Da mesma maneira, tipos de solo diferentes serão mais eficientes em termos construtivos, se forem utilizados mediante o método que melhor se adapta à sua composição e características. Face a isto, torna-se relevante e importante a caracterização de cada solo (Martins, 2018) (Neves, 2016). Só através desta e dos resultados obtidos, podemos prever o desempenho e efetuar o dimensionamento tanto da produção como da estrutura final, tendo em conta as características determinadas que passam a ser conhecidas e comportamentos que passam a ser previsíveis.

A terra pode ser definida por três propriedades principais: a coesão, a plasticidade e a compressibilidade. A **coesão** é uma característica dos solos argilosos que está mais fortemente ligada à resistência ao corte. Está associada à forma das partículas constituintes, e à presença de água. A

presença de partículas de tamanhos reduzidos (fração argilosa e siltosa) é o fator preponderante na variação desta característica (Teixeira, 2018). A **plasticidade** é a característica do solo que representa a sua capacidade de deformação e rearranjo de partículas, sem variação de volume. Está também relacionada com a presença de elementos finos da constituição do solo. A **compressibilidade** é a característica do solo que define a sua capacidade de diminuição de volume, quando nele é aplicada pressão. Esta diminuição de volume é conseguida através, também, do rearranjo de partículas e da expulsão de água e ar. As partículas consideram-se indeformáveis para o nível de pressões aplicadas (Neves, 2016). Todas estas propriedades podem ser aferidas através de ensaios laboratoriais, abordados de seguida.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

A caracterização dos solos baseia-se em três aspetos essenciais: a análise granulométrica (através de peneiração), os limites de consistência (plasticidade e liquidez) e o teor ótimo de água.

A **análise granulométrica** determina o tipo de elementos que constituem o solo, dependendo do seu tamanho, e a percentagem de cada presente nele. Através de peneirações por malhas cada vez mais fechadas e de tamanho determinado e conhecido, o solo é passado e é feita a pesagem do material retido no peneiro. Esse valor é recolhido e comparado com o valor total da amostra, dando-nos a percentagem desta fração. O ensaio, em Portugal, é realizado obedecendo à norma LNEC E-239 (1970). Recolhidas as percentagens de cada fração, é possível, então, desenhar a curva granulométrica do solo, e classificar a granulometria do solo como extensa, caso existam partículas de várias dimensões, ou uniforme, caso as partículas sejam de dimensão semelhante. Caso se verifique que o solo contém quantidades suficientes de todas as dimensões intermédias, o solo considera-se bem graduado ou, no caso contrário, mal graduado.

As partículas de maior tamanho são consideradas inertes e com um potencial de retenção de água muito reduzido, tendo um comportamento consistente, independentemente da presença ou falta de água. As partículas de menor dimensão são consideradas instáveis, uma vez que a presença de água em quantidades variáveis, origina características diferentes, associadas a esta fração de partículas. As partículas podem ser divididas em quatro tipos, por dimensão crescente: Argila, Silte, Areia e Seixo, sendo que as primeiras duas são consideradas elementos finos e as seguintes duas são consideradas elementos grossos (LNEC E-239, 1970), cujas dimensões são as seguintes:

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

Os **limites de consistência** são determinados em função do comportamento do solo, mediante o seu teor de humidade (%). São conhecidos, também, como limites de Atterberg, existindo 3 limites distintos: limite de retração, limite de plasticidade e limite de liquidez. Estes diferenciam o estado do solo como sendo sólido, semi-sólido, plástico ou líquido. É relevante também o índice de plasticidade.

Um teor de humidade inferior ao limite de retração (LR) significa que o solo tem um comportamento sólido, significando que não tem coesão e não é moldável. Um teor de humidade inferior ao limite de plasticidade (LP) significa que o solo tem um comportamento semi-sólido. Um teor de humidade inferior ao limite de liquidez (LL) e superior ao limite de plasticidade (LP) significa que o solo tem um comportamento plástico. Um teor de humidade superior ao limite de liquidez (LL) significa que o solo se comporta como um líquido.

A estado ideal para a manipulação e compressão da terra é o plástico. A este estado está associado o índice de plasticidade (IP), que é a gama de teores de água para qual o solo tem um comportamento plástico, sendo obtido subtraindo LP a LL. É o intervalo em que o solo apresenta maior coesão e consistência (Falcão, 2014).

O **teor ótimo de água (TOA)** representa o teor de água presente no solo que origina neste a maior capacidade de compressão possível, tendo as restantes variáveis constantes. Sendo que maior compressão está associada a maior resistência mecânica, o TOA é indiretamente equivalente a uma maior resistência no produto final.

É também importante avaliar a quantidade de material orgânico presente no solo uma vez que um solo com um elevado teor de matéria orgânica originará blocos com maior volume de vazios, e consequentemente, porosidade devido à biodeterioração (Maniatidis, *et al.*, 2003).

As variáveis que influenciam a compactação da terra são o teor de água, a força de compactação (diretamente proporcional) e a composição do solo (um solo bem graduado e de granulometria extensa terá maior compactação devido ao melhor preenchimento de espaços vazios), todas relacionadas com a compactação e promoção da redução do volume de vazios (V_v). A um menor V_v está associada maior proximidade entre partículas, promovendo melhor resistência mecânica, bem como o dificultar da entrada de água pelos poros. Considera-se que apenas o teor de água é passível de ser alterado. Para cada solo é possível criar uma curva de compactação, relacionando o teor de água com o peso volúmico seco. Esta curva tem dois ramos (seco e húmido), que se encontram num ponto ótimo (TOA). A partir de um solo seco, a adição de água irá facilitar a compressão através da lubrificação das partículas e desagregação de possíveis conglomerados. No entanto, a partir de certo ponto, a água não permite a saída de ar, que fica preso nos espaços vazios, diminuindo o peso volúmico seco.

2.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DA TERRA

Apresenta-se agora um resumo das vantagens e desvantagens da construção em terra, especialmente face a outras opções construtivas como o betão ou o aço.

Vantagens (Zami, 2020; Vyncke, *et al.*, 2017; Pacheco-Torgal *et al.*, 2012):

- Uso da terra é economicamente vantajoso e abundante mundialmente;
- A terra é um material de construção local, levando à promoção de herança cultural, tradição e prática cultural;
- Permite a criação de emprego à população local e a utilização de materiais locais;
- A construção em terra utiliza ferramentas simples;
- A sua extração não danifica os ecossistemas envolventes (não se utilizam solos aráveis);
- Elevada resistência ao fogo;

- Baixo nível de energia incorporada;
- Regulação natural do teor de humidade e temperatura no interior das construções;
- Bom isolamento térmico e acústico das construções;
- Baixo consumo energético e libertação de dióxido de carbono desde a sua extração até à implementação;
- Facilidade de reciclagem. No caso de elementos não estabilizados, todo o material é reciclável, bastando ser desagregado.

Desvantagens (Zami, 2020; Vyncke, *et al.*, 2017; Pacheco-Torgal *et al.*, 2012):

- Baixa resistência face à ação sísmica, devido ao mau comportamento à tração e flexão e à reduzida ductilidade dos materiais;
- Muito sensível à ação da água se não existir estabilização;
- Durabilidade reduzida, em casos de falta de manutenção adequada;
- A retração da argila, quando não controlada, poderá resultar no aparecimento de fendas;
- Baixa aceitação social, havendo preconceito por ser considerado material de construção de qualidade inferior;
- Falta de normas que assegurem a regulamentação e uniformização da construção em terra.

2.7 ESTABILIZAÇÃO DA TERRA

A maior contrapartida das construções em terra é a sua grande suscetibilidade aos efeitos da água. (Rodrigues, 2005; Bui *et al.*, 2011). Para além disto, como foi referido, existe uma grande variabilidade nas características dos solos, o que dificulta a sua utilização e previsibilidade das características finais do material (Schroeder, 2012). É difícil implementar legislação para materiais com características imprevisíveis. Neste sentido, a estabilização permite melhorar significativamente a resistência mecânica, resistência à água e reprodutibilidade consistente dos materiais em terra (Cruz *et al.*, 2007).

A estabilização tem o propósito de melhorar as propriedades de um solo, permitindo desempenhar a sua função em engenharia. Esta pode ser de três tipos: física, mecânica ou química. A estabilização da terra é um processo tradicional e comumente utilizado, contudo, apenas em 1920 se começou a desenvolver uma abordagem científica. Na antiguidade, é conhecida a utilização de cal, cinzas pozolânicas e gesso em combinação com a terra. Em 1940, aproximadamente, o cimento tornou-se um dos aditivos mais comuns para estabilização da terra. Em 1948, em Haryana, Índia, foram construídas 4000 casas de terra comprimida usando 2,5% de cimento estabilizante, por exemplo. (Cicek *et al.*, 2020).

A **estabilização física** consiste na alteração da constituição do solo que será utilizado, por forma a ir ao encontro das características pretendidas. Pode passar pelo ajuste do conteúdo de um tipo de agregado, melhorando a granulometria, por forma a conseguir um melhor preenchimento de vazios. Considera-se também a adição de fibras naturais ou sintéticas um método de estabilização física. Estas fibras irão promover uma melhor coesão entre as partículas, diminuem a deformação e controlam a abertura de fendas. Esta técnica é muito associada ao Adobe, que será referido mais à frente.

A **estabilização mecânica** consiste na aplicação de uma carga à terra, comprimindo a mesma e aumentando a sua compactação. Esta compressão fará com que as partículas se aproximem, preenchendo vazios e expulsando ar, aumentando a sua densidade. A resistência é aumentada, associado ao facto de quando as partículas são sujeitas à carga, aumentam os pontos de contacto entre si, aumentando, por consequência o atrito entre as mesmas.

A **estabilização química** consiste na combinação da terra com um adjuvante químico, alterando as suas propriedades e promovendo a coesão de partículas. Estes elementos adicionados virão não só aumentar a resistência mecânica do produto final, mas também melhorar as suas condições de durabilidade, especialmente a sua suscetibilidade à água ou a sua retração e dilatação quando em contacto com a mesma. Existem exemplos do uso de cal e cinzas desde tempos antigos, no entanto, o cimento é uma adição bem mais recente. (Cicek *et al.*, 2020; Silva, 2014; Cruz *et al.*, 2007).

2.8 ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO PORTLAND

O cimento é o ligante mais utilizado nos dias de hoje, incluindo nas construções em terra, devido à sua capacidade de aumentar a resistência mecânica, a estabilidade volumétrica e a durabilidade dos materiais, graças à aglutinação das partículas da terra (Pacheco-Torgal *et al.*, 2009; Mahdad *et al.*, 2021; Silva, 2014; Cruz *et al.*, 2007). O cimento, quando aplicado na terra, age principalmente sobre as partículas de maior dimensão, aglomerando estas, aumentando a resistência do material.

O cimento passa pelo processo de hidratação, quando na presença de água. Esta reação origina um gel insolúvel que tem a capacidade de preencher os poros e para além da propriedade de aglutinação, confere também resistência aos efeitos da água.

Na produção dos BTC, as quantidades de cimento são, normalmente, acima de 5% e abaixo de 12% (Maddad *et al.*, 2021), isto porque acima deste valor, deixa de haver um ganho de resistência significativo. A adição de cimento garante um aumento de resistência de até 3 vezes.

Contudo, a estabilização química através do uso de cimento vem aumentar bastante a pegada ecológica da construção em terra, devido às altas temperaturas que têm de ser conseguidas no processo de fabrico de clínquer (1480°C) (responsável por $\frac{3}{4}$ das emissões) e à calcificação do calcário, dentro do forno, que também produz dióxido de carbono. Por cada tonelada de clínquer produzida, estima-se que sejam libertados 800 kg de CO₂ (Bogas *et al.*, 2019) ou 1.25 toneladas e utilizados 1758 kWh, desde a produção até à implementação (Babor *et al.*, 2009). Face a isto, alternativas ao uso de cimento convencional, como o cimento reciclado, devem ser exploradas como forma de manter a terra como uma alternativa construtiva amiga do ambiente.

2.9 O CIMENTO RECICLADO

A construção é uma das sete indústrias que mais contribuem para a emissão de poluentes mundialmente (Sandanayake, 2022). É também responsável por um sexto do consumo mundial de água doce e um quarto do consumo de madeira. Para além das emissões já referidas, a deposição de resíduos e desperdício de construção constituem também um problema ambiental, que poderá ter solução na reciclagem do cimento, promovendo uma economia circular. Cerca de 30% a 35% dos resíduos produzidos mundialmente são provenientes de construção, 1/3 dos quais são resíduos de

betão (Wang *et al.*, 2021). A utilização CR, levará à reutilização de RCD, redução da sobre-exploração de recursos naturais e menores emissões de CO₂, visto que as temperaturas que são necessárias atingir na sua produção são inferiores. É necessário, portanto, analisar as características do CR e de BTC estabilizados com este, tendo em conta as suas propriedades mecânicas e de durabilidade, especialmente quando em comparação com o CP. Neste sentido, o Departamento de Engenharia Civil do IST tem estado na linha da frente da investigação internacional no que toca a este tema, tendo tido um papel fundamental nos mais recentes avanços alcançados ao nível de produção, caracterização e aplicação do CR (Bogas *et al.*, 2020).

Seguidamente (Figura 4), apresenta-se uma comparação dos ciclos de vida dos cimentos:

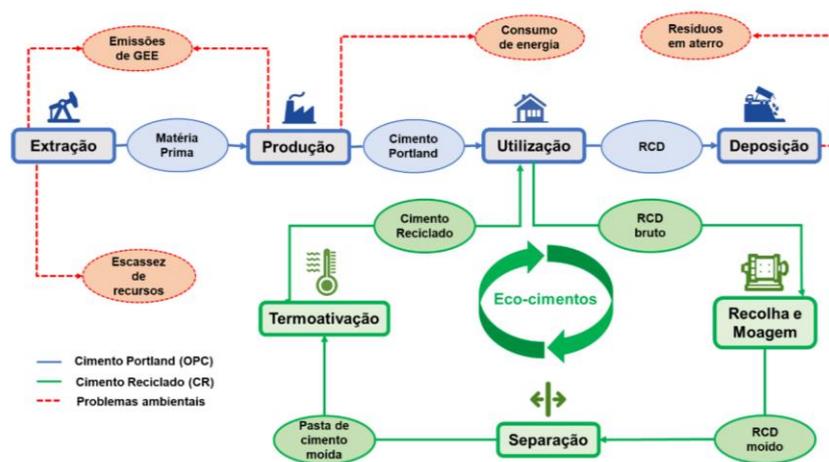


Figura 4 - Ciclo de vida do cimento Portland e do cimento reciclado.

A reciclagem de cimento começou por ser estudada por Cook e Murray (1970), que descobriram esta possibilidade, ao sujeitar elementos de betão a altas temperaturas, enquanto realizavam estudos da ação do fogo. Desde aí mais estudos foram desenvolvidos, nomeadamente por Splittgerber e Mueller (2003) e Alonso e Fernandez (2004), que tentaram a produção de CR a partir de resíduos de betão. Estes foram os primeiros a chegar à conclusão que a termoativação destes detritos permitia a recuperação de propriedades mecânicas, físicas e químicas, aproximando-se do CP de origem.

A produção de cimento reciclado começa pela recolha de resíduos de construção, nomeadamente os restos de betão. Estes RCDs necessitam, depois, de ser triturados por forma a alcançar o mais perto possível da dimensão de partículas do CP (50 µm) e libertar a fração cimentícia dos restantes constituintes, associados a distintas propriedades de fratura (Bogas, Carriço *et al.*, 2019). O processo de moagem levará a um aumento de superfície específica, melhorando a sua reatividade e hidratação, quando em contacto com água (Kurdowski, 2014; Marchon & Flatt, 2016). Procede-se, depois, à separação dos diferentes elementos, através de peneiração entre moagens e processos magnéticos após moagem. Obtendo-se a pasta de cimento moída, esta é sujeita a um processo de termoativação, sendo sujeita a uma temperatura de aproximadamente 600°C-800°C (Carriço *et al.*, 2020; Real *et al.*, 2020). Segundo Bogas (2019), a taxa ótima de aquecimento situa-se entre 5 e 15°C/min. Esta temperatura permite conduzir à desidratação dos compostos previamente hidratados, sem promover a recristalização acentuada, nem a descarbonatação (libertadora de CO₂) (Alonso *et al.*, 2004). O cimento é deixado a arrefecer dentro do forno até temperatura ambiente (Serpell *et al.*, 2015).

A pasta termoativada resultante volta a estar reativa e a comportar-se como um ligante hidráulico, apesar de com características ligeiramente diferentes do CP. A sua superfície específica é maior, associado a uma elevada área superficial e porosidade, levando a uma absorção de água superior (Baldusco *et al.*, 2019). A sua reação ocorre imediatamente após entrar em contacto com água e a sua massa volúmica é inferior (2650-2950 kg/m³) à do CP (3150 kg/m³). A sua composição mineralógica não possui C₃S (presente nos cimentos correntes), sendo constituído por um polimorfo de C₂S, α_H (Bogas, *et al.*, 2022). Através de análises realizadas através de microscópio de varrimento eletrónico (MEV) e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), Bogas *et al.* (2020) estudaram a microestrutura de pastas de cimento reciclado, desde as 8 horas até aos 28 dias de idade, concluindo que esta, ao contrário do CP, desenvolve uma microestrutura bifásica, contendo porosidade interpartícula e intrapartícula. Sendo assim alguma da água da mistura é consumida no interior das partículas porosas de CR, diminuindo a distância entre partículas (Gonçalves, 2023). Isto leva a que para uma mesma porosidade global, as pastas de CR compreendam uma estrutura mais refinada, associada a maior quantidade de poros de pequena dimensão.

Através de análise de calorimetria isotérmica (IC), termogravimetria (TG) e difração de raio-X, é possível notar que durante o processo de hidratação, o CR produz compostos hidratados semelhantes aos cimentos correntes (C-S-H, CH, fases aluminatadas - Afm e Aft). No entanto, o α_H -C₂S referido anteriormente, apresenta tendencialmente um período de hidratação mais ativa entre 1 e 3 dias, ao contrário dos cimentos correntes. Isto significa que a microestrutura só se começa a desenvolver passadas 24h, sendo depois mais acelerada até aos 3 dias de idade. Para além disto, o volume de produtos hidratados passados mais de 28 dias é inferior ao apresentado por cimentos correntes, devido ao facto de a carbonatação ocorrida durante a vida útil do RCD diminuir a quantidade de compostos desidratados presentes no CR (Bogas, 2020; Bogas, *et al.*, 2022).

Neste processo existem vários problemas, que se pretendem solucionar ao longo do tempo com investigação futura. A origem dos RCDs é, muitas vezes, difícil de definir, bem como a sua composição, antes da britagem. Mesmo que haja uma escolha do local de demolição, é difícil conhecer as condições em que o betão foi construído e que cimento foi utilizado, uma vez que as obras são, a maioria das vezes, antigas e já sem registos. Estudos como o de Xuan e Shui (2010), relacionam a proporção a/l do material de origem com a potencial resistência do cimento reciclado, sendo que esta depende da reidratação do cimento hidratado, mas também do cimento que nunca chegou a ser hidratado.

2.10 BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA (BTC)

A técnica de bloco de terra comprimida é a evolução tecnológica dos métodos da taipa e adobe, no sentido em que combina características dos dois, acabando por originar um produto com as propriedades mais positivas de cada. Esta técnica pode ser resumida, segundo a CRATerre (1998), como a produção de pequenos elementos de alvenaria com características regulares e verificadas, obtidas através da compactação estática ou dinâmica da terra num estado húmido, desmoldados imediatamente a seguir e secados.

2.10.1 Produção de BTC

As fases da produção dos blocos são as seguintes (Dorado *et al.*, 2022, Uzoegbo, 2015; CRATerre, 1985): **extração**; **preparação**; **misturação**; **compressão**; **cura**; **armazenamento**.

A **extração** da terra consiste na escolha da terra a utilizar, mediante as suas características, a sua recolha e eventual transporte para o local pretendido.

A **preparação** consiste na secagem da terra, pulverização e peneiração da mesma. Este passo tem por fim uniformizar a granulometria da terra, desfazer aglomerados e garantir que não estão presentes partículas de dimensão superior ao pretendido ou elementos não pretendidos, como os orgânicos. A destruição de aglomerados irá garantir a mistura correta com o estabilizante. A pulverização é mais eficiente quando mais seca a terra estiver, mas a secagem também facilita a determinação do teor de água a adicionar à mistura, mais tarde.

A **misturação** da terra consiste na pesagem dos materiais que irão fazer parte da mistura (de acordo com proporções determinadas experimentalmente), mistura das partes secas (terra, aglomerados, argila, cimento, etc.), seguida da adição de água e mistura húmida de todos os componentes. É necessário garantir os tempos de reação, nomeadamente de incorporação da água na mistura e reação do cimento.

A **compressão** consiste na recolha de uma quantidade de mistura de peso determinado experimentalmente, colocação em molde, compressão da terra a pressão estabelecida e posterior remoção do molde.

A **cura** dos blocos decorre logo após a desmoldagem, sendo necessário manter os blocos molhados para garantir que o eventual cimento presente possa atuar e criar presa. Caso não exista cimento presente, os blocos devem ser secos gradualmente para garantir que não há abertura de fendas. A duração da cura húmida é variável, dependendo do clima e natureza de estabilizadores presentes. 7 dias é um valor usual para a duração desta etapa. De seguida procede-se à secagem ao ar dos blocos, sendo que atingirão a resistência projetada aos 28 dias.

Após isto, procede-se ao **armazenamento** dos blocos prontos a utilizar.

A moldagem e prensagem podem ser efetuados manualmente ou através de máquinas hidráulicas (Figura 5), que conseguem aplicar maiores pressões e que aumentam não só o rendimento de produção, mas também a consistência de características entre os blocos e a qualidade de acabamento. Estes moldes (e os respetivos blocos) existem em tamanho variável, desde 200x100x60 mm a 300x150x120 mm, pesando cerca de 8 kg, com massa volúmica rondando os 1900 Kg/m³ (Walker, 1995; Kerali, 2001).



Figura 5 - Prensas utilizadas na compactação dos BTC: a) Prensa mecânica manual Terstaram; b) Prensa hidráulica OSKAM.

2.10.2 Composição dos BTC

A parte da **terra** propriamente dita constitui entre 80% e 90% do bloco. Este constituinte é, portanto, influenciador das características que o bloco final vai possuir. Para além desta, a **água** e **estabilizante**, bem como as suas proporções, são cruciais na determinação das propriedades do bloco.

Não existe ainda um consenso na comunidade científica quanto às quantidades de cada componente dos BTC, tanto na terra como no estabilizante. No entanto, serão apresentados vários valores de autores distintos (Tabela 1), por forma a fazer uma escolha o mais bem informada possível.

Tabela 1 – Características da terra para a produção de BTC (Silva, 2015).

Autor	Granulometria (%)			Limites de consistência	
	Seixo (fino)	Areia	Argila/silte	LL	IP
Rigassi (1985)	0 - 40	25 - 80	18 - 55	-	-
Barbosa (1996)	-	50 - 70	20 - 40	-	-
Pacheco-Torgal et al. (2009)	-	-	-	7 - 18	30 - 35
Burroughs (2008)	-	<64	20 - 35	30 - 40	15 - 20
Delgado et al. (2007)	-	-	20 - 47	25 - 50	2 - 30

O teor ótimo de água (TOA) é determinante na produção dos BTC. Este tem de ser adaptado ao tipo de terra que se está a utilizar e é bastante afetado pela presença de estabilizante, como o cimento, devido ao consumo de água nas suas reações de hidratação. Rigassi (1985), baliza o TOA entre 9% e 17%, já Riza *et al.* (2010), entre 10% e 13%. Este valor pode ser determinado experimentalmente antes do processo de fabrico, especificamente para a mistura em causa, através de ensaios de laboratório, como o ensaio Proctor.

Quanto a estabilizantes, apenas será explorado o uso de cimento neste trabalho. As quantidades deste encontram-se entre 4% e 10%, sendo que quantidades menores não causam aumentos significativos de resistência em relação aos blocos não estabilizados e quantidades maiores não incrementam mais a resistência já conferida pelos referidos 10% (Tabela 2). Neste trabalho, optou-se por utilizar proporções de 4 e 8%, com base na literatura.

Tabela 2 – Proporções recomendadas de cimento na estabilização do BTC.

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
Uzoegbo (2015)	5 - 10	-
Maïni (2010)	3-10	-
WD-ARS 1333 (2018)	3-10	-

3 CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se a descrição do trabalho experimental que visou o cumprimento dos objetivos inicialmente definidos para o trabalho no capítulo 1, nomeadamente a análise de durabilidade de blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com cimento reciclado. Numa primeira fase será realizada uma descrição da seleção e caracterização dos materiais utilizados (solo e resíduos de construção) e da produção e caracterização do cimento reciclado. Em seguida, descreve-se o processo considerado na produção dos blocos de terra comprimida, as composições utilizadas e os ensaios de caracterização efetuados sobre os mesmos.

Como referido, o trabalho experimental foi planeado e desenvolvido no âmbito do projecto de investigação Eco+RCEB – “Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks”, ref. PTDC/ECI-COM/0704/2021, contando com o apoio da equipa de investigação envolvida no mesmo. A campanha experimental relativa à produção dos BTC foi realizada nas Oficinas do Convento de Montemor-o-Novo (ACOC), enquanto a caracterização do solo, a produção do cimento reciclado e a realização dos ensaios de caracterização dos BTC foi essencialmente efetuada no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil do IST (LabGeo), Laboratório de Geociências e Geotecnologias do Instituto Superior Técnico (GeoLAB-IST) e no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil do IST (LC-IST), respetivamente.

3.1 RESUMO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental envolveu essencialmente quatro etapas relacionadas com: a caracterização e seleção do solo e resíduos de construção e demolição (RCD); a produção e caracterização do cimento reciclado; a produção e cura dos BTC; a caracterização dos BTC, focando-se essencialmente na sua durabilidade face à ação da água.

Após a realização de estudos prévios no âmbito de outros trabalhos inseridos no projeto Eco+RCEB, optou-se por considerar a utilização de um solo proveniente da saibreira do Campo de Tiro de Alcochete, unidade da Força Aérea Portuguesa (FAP), que foi corrigido com a adição de pó de argila resultante do processo de fabrico de telhas cerâmicas, proveniente da empresa Cobert em Torres Vedras (TV). A correção visou compensar a escassez de materiais finos argilosos no solo FA. Esta solução prevaleceu sobre a opção que seria mais lógica de se utilizarem solos locais provenientes de Montemor-o-Novo (local de produção dos BTC), devido às propriedades menos favoráveis dos mesmos para a produção de BTC, nomeadamente a presença de minerais argilosos de natureza expansiva, tal como constatado em trabalhos anteriores (Azevedo 2021, Gonçalves 2022, Nabais 2022).

Para além destes materiais, foi considerada a substituição parcial de solo por até cerca de 25% de resíduos de construção e demolição (RCD) proveniente da empresa gestora de resíduos, a *Vimajas* que foi fornecido com uma dimensão máxima inferior a 8 mm, o que os torna adequados para a incorporação em misturas de terra a utilizar na produção de BTC. A introdução simultânea de RCD e TV visa a obtenção de soluções que privilegiem a reutilização e reaproveitamento de resíduos industriais, seguindo uma das metas principais do desenvolvimento sustentável.

Uma fase posterior foi dedicada à produção de cimento reciclado proveniente de pasta (CRP) ou de betão (CRB). A produção do CRP envolveu as etapas de britagem, moagem e termoativação a partir

de pastas de cimento hidratado, antecipadamente produzidas de modo a serem representativas de resíduos de materiais cimentícios antigos. A produção de CRP diretamente de pasta permitiu um melhor controlo da sua composição e um rendimento superior do volume de CR produzido, mais compatível com a elevada quantidade de BTC a produzir durante o trabalho. Foi ainda produzida uma baixa quantidade de CRB, envolvendo uma etapa adicional de separação dos constituintes de betão, de modo a ser mais representativo da situação real em que se apresentam os RCD. Neste caso houve também necessidade de produzir antecipadamente blocos de betão para posterior reciclagem. Para efeitos de comparação foi considerada a utilização de cimento Portland (CP) como estabilizante de referência. Neste caso foram considerados dois tipos de cimento, o CEM I 42,5 e o CEM II/B-L 32,5. O primeiro cimento de elevado teor de clínquer (>95%) foi considerado como sendo o de referência, visto que está associado a uma menor variabilidade da sua composição. O CEM II/B-L com 65-79% de clínquer é um cimento mais económico e correntemente utilizado na construção, sendo especialmente adequado para elementos de menor exigência estrutural.

A fase seguinte foi a produção dos BTC, envolvendo as várias etapas do processo: pulverização e peneiração do solo; dosagem e mistura dos componentes; moldagem, prensagem e cura dos BTC. Foram consideradas várias composições de modo a avaliar a eficiência de diferentes fatores, nomeadamente o tipo de estabilizante (CRP, CRB, CP, CP32,5), teor deste (0, 4 e 8%), a incorporação parcial de CRP em substituição de CP (20 e 50%) e a substituição de solo por RCD (0, 15 e 25%).

Os BTC foram sujeitos a ensaios de caracterização física (massa volúmica e porosidade), mecânica (resistência à compressão) e de durabilidade (absorção por imersão, capilaridade e de baixa pressão; secagem; erosão acelerada por *drip* e *spray test*, permeabilidade ao vapor de água).

No total, foram produzidos cerca de 150 blocos para a realização dos ensaios de caracterização de durabilidade em laboratório, a que se adicionaram cerca de 300 blocos para realização de outros ensaios de caracterização física e mecânica, bem como mais de 1000 blocos destinados à produção de 24 paredes de alvenaria a expor em ambiente real, envolvendo 4 locais distintos de Portugal e Espanha. Os estudos relativos à caracterização mecânica e de desempenho a longo prazo destes não fazem parte do tema da presente dissertação, mas envolveram a participação do autor da mesma.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA TERRA

O solo FA foi extraído a uma profundidade superior a 1 m de modo a evitar contaminações excessivas, tendo-se recolhido cerca de 15 m³, que foram posteriormente transportados para as oficinas em Montemor (Figura 6). Visualmente trata-se de um solo de granulometria grosseira de tonalidade acastanhada, com presença de areão e aglomerados dispersos de material argiloso.



Figura 6 – Solo FA armazenado em Montemor-O-Novo (a); pormenor de solo FA original (b).

O solo TV trata-se de um resíduo fino seco de elevado teor de argila, que atualmente não tem qualquer utilização prática, sendo usualmente encaminhado para aterro (Figura 7). A sua composição resulta da fração mais fina da mistura de pasta utilizada no fabrico de telhas, contendo essencialmente minerais argilosos de natureza ílítica. No entanto, percebeu-se que este material fino de elevado teor de argila pode ser viável para a correção de solos demasiado arenosos, como é o caso do FA, explorando-se essa estratégia no presente trabalho para a produção de BTC. Na fábrica estes pós são diretamente recolhidos em Big Bags de 1 m³, tendo-se transportado 4 destes para Montemor-o-Novo.



Figura 7 – Material TV recolhido e transportado em Big Bags (a); Material em pormenor (b).

Em seguida descrevem-se os ensaios realizados para caracterização do solo e resíduo TV utilizados no trabalho. O solo foi analisado em termos de granulometria, teor de argila, limites de consistência, teor de água ótimo (compactação), composição mineralógica, teor de matéria orgânica e massa volúmica.

3.2.1 Análise granulométrica e teor de argila

Este ensaio teve por objetivo obter a curva granulométrica do solo, determinando-se a distribuição da dimensão das partículas das frações acima de 75 μm . Para tal, procedeu-se ao ensaio de análise granulométrica por peneiração húmida, de acordo com a norma LNEC E-239 (1970).

Inicialmente, preparou-se uma amostra de 1 kg de acordo com a norma LNEC E-195 (1966), secando-se em estufa a 100°C até massa constante. Depois, utilizando um pilão de borracha e almofariz, procedeu-se à desagregação dos aglomerados presentes na terra, sem alteração da granulometria do solo (Figura 8a). De seguida, peneirou-se a seco o material através de vários peneiros de malhas cada vez mais fechadas, até ao peneiro número 10 (2mm), registando-se as massas retidas em cada fração (Figura 8b). A amostra equivalente ao passado no peneiro 10 foi então pesada e preparada para ser colocada no peneiro número 200 (75 μm), de modo a se proceder à lavagem desta fração. Para auxiliar a lavagem, diluiu-se 0,5 g de hexametáfosfato de sódio em 250 cm³ de água e misturou-se com o solo, num copo de precipitação. Este aditivo serve para promover a separação das partículas de pequena dimensão, como a argila, das de maior dimensão, agilizando o processo de lavagem (Figura 8c). Após repouso, lavou-se a amostra com jato de água (Figura 8d). O material retido no peneiro foi então colocando na estufa para secagem. Após isto, a amostra foi peneirada entre os peneiros números 10 e 200, registando-se a massa de material retido. Os resultados foram depois registados e desenhada a curva granulométrica do solo.



Figura 8 – Análise granulométrica da terra: a) desagregação de aglomerados; b) peneiração; c) mistura com solução de hexametáfosfato de sódio; d) lavagem da amostra.

Visto que na produção dos BTC o solo é utilizado após pulverização e peneiração numa malha de 8 mm, optou-se por realizar a análise granulométrica nessas condições. Em relação ao resíduo TV, de dimensão inferior a 1 mm, foi realizada também peneiração a seco até à fração de 75 μm , embora essa fração represente apenas cerca de 10% deste resíduo.

De modo a analisar a granulometria das partículas finas de dimensão inferior a 75 μm , em que se insere a fração de silte e de argila do solo FA e a quase totalidade de TV, foi também realizado uma análise granulométrica por adsorção de Raios X à fração inferior a 75 μm . Esta análise foi adjudicada ao Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro. Na Tabela 3 apresentam-se os resultados obtidos neste ensaio para a fração abaixo de 63 μm .

Tabela 3 – Análise granulométrica por adsorção de Raios X da fração < 63 μm

Malha (μm)	63	50	40	30	25	20	15	10	8	6	5	3	2	1.5	1
FA	100,0	99,2	98,4	97,6	96,9	96,1	95,3	93,7	92,1	90,6	89,8	87,4	84,3	82,7	79,5
TV	100,0	99,3	97,1	93,7	91,3	88,0	75,3	71,1	66,3	63,2	59,5	54,0	47,6	43,7	38,1

Na Figura 9 resumem-se as curvas granulométricas obtidas para o solo FA e TV, considerando em simultâneo a fração obtida por peneiração a seco e por adsorção de Raios X.

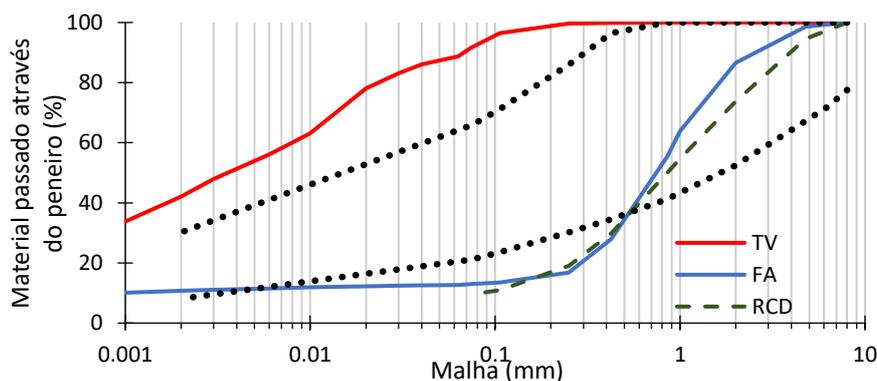


Figura 9 – Análise granulométrica do solo FA, resíduo argiloso TV e dos RCD (envolvendo granulometria por peneiração a seco acima de 75 μm e por adsorção de Raio X abaixo de 75 μm)

Das curvas granulométricas é possível inferir diretamente que o solo FA e o resíduo TV são compostos por cerca de 10,7% e 42,2% de argila (< 2 μm), respetivamente. Por sua vez, o teor de silte é de 2,3% e 49,3% no FA e TV, respetivamente.

Na Figura 9 apresenta-se ainda o fuso de granulometria recomendado na norma XP P13-901 (2001) para a produção de BTC estabilizados. Observa-se que o solo FA apresenta características mais

arenosas, pouco adequadas à produção de BTC, em especial quando não estabilizado. Assim sendo, a incorporação TV, um resíduo rico em material fino, pode ser viável para a correção do solo FA.

3.2.2 Determinação dos limites de consistência

Procedeu-se à determinação dos limites de consistência (ou de Atterberg) de acordo com a norma NP-143 (1969), nomeadamente o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e o respetivo índice de plasticidade (IP). Estes limites foram abordados no capítulo 2.5.

Tomou-se 500 g amostrais do solo a ensaiar e, com um almofariz de borracha, procedeu-se à desagregação das partículas sem alteração da sua granulometria, passando-se, de seguida, o material pulverizado pelo peneiro nº 40. Do material passado no peneiro, tomaram-se 100 g que se amassaram à espátula com água destilada até formar uma pasta homogénea. Colocou-se esta porção de solo na concha de Casagrande de modo a obter uma camada, com espessura máxima de 1 cm e superfície nivelada (Figura 10a). Em seguida, com o auxílio do riscador, realiza-se um sulco com largura de 2 mm, representado na Figura 10b). Em seguida, submeteu-se a concha a cerca de 2 quedas por segundo, até se obter a união dos bordos do sulco numa extensão de 1 cm, anotando o número de pancadas necessárias. Posteriormente, retirou-se uma amostra de cerca de 10 g da zona do sulco em que ocorreu a união, colocando-a numa estufa a 100°C por 24h, de modo a determinar o teor de humidade a partir da comparação das massas antes e depois da secagem (Figura 10c). Este procedimento foi repetido quatro vezes, com teores de água variáveis, de modo que o número de pancadas estivesse sempre entre as 10 e as 40. Foram obtidos dois provetes acima e dois provetes abaixo das 25 pancadas, de forma a obter, mais tarde, o valor do LL por interpolação.

Da porção de terra preparada para os limites de liquidez, retirou-se uma porção de 20 g. Misturou-se esta terra com água destilada e amassou-se com uma espátula. Após isto, formou-se uma esfera e procedeu-se à rolagem da terra sempre com o auxílio da mão, até produzir um filamento com cerca de 3mm de diâmetro (Figura 11). Este processo foi repetido até que os filamentos obtidos apresentassem pequenas fissuras transversais ao longo de todo o seu comprimento. Neste ponto, recolheu-se o provete e, após pesagem, colocou-se numa estufa a 100°C durante 24h. Após este período, as amostras foram novamente pesadas. O teor de água calculado equivale ao LP e corresponde à média de quatro provetes.

O **índice de plasticidade** foi obtido pela diferença entre os valores de LL e LP, $I_p = LL - LP$.



Figura 10 – Determinação do limite de liquidez: a) preparação da concha de Casagrande; b) concha de Casagrande preparada para impactos; c) recolha da amostra para levar à estufa

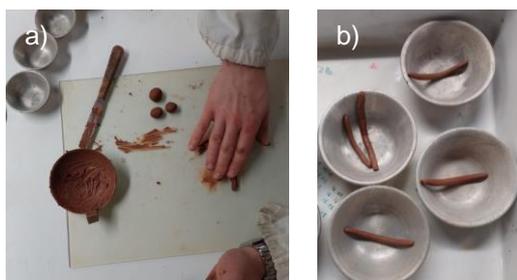


Figura 11 – Determinação do limite de plasticidade: a) rolagem das esferas em filamentos; b) amostras prontas a serem colocadas em estufa.

Destaca-se o baixo valor de I_p obtido para o FA (solo fracamente argiloso) (Tabela 4), justificando, novamente, a correção deste solo com o solo TV. Ainda assim, o solo FA inclui-se, só por si, nos limites de consistência recomendados na literatura para a produção de BTC não estabilizados ou estabilizados com cimento, para LL entre 25 e 40% e IP entre 2 e 18% (NBR 10833 1989, ASR 1333 2018, HB 195 2002). Apenas o LL é ligeiramente inferior ao intervalo recomendado. Observando o diagrama de plasticidade, proposto pelo documento normativo XP P13-901 (Figura 12), verifica-se que o solo FA encontra-se ligeiramente fora dos fusos propostos.

Tabela 4 – Índices de Atterberg para o solo FA e resíduo TV

	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo FA	24	18	6
Resíduo TV	47	26	21

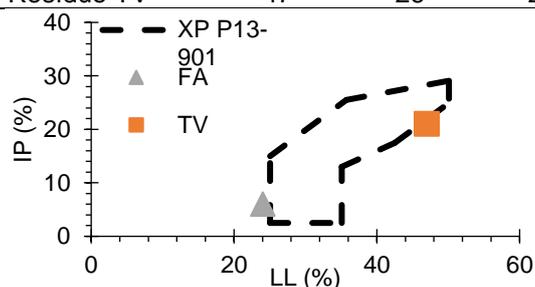


Figura 12 - Diagrama de plasticidade (XP P13-901 (2022))

3.2.3 Ensaio de compactação (Proctor)

O ensaio de compactação (Proctor) tem como objetivo a determinação do teor ótimo de água (TOA) do solo. O TOA foi abordado no capítulo 2.5. Resumidamente, este ensaio permite obter o teor de humidade que conduz à maior compactação possível. Este valor permite dar uma primeira ideia do teor de água a utilizar na produção dos BTC, embora este processo esteja associado a uma energia de compactação diferente. Este ensaio foi realizado de acordo com a Norma ASTM D698 (2000).

Tomou-se uma amostra da terra, que se passou pelo peneiro nº 4 de forma a obter 12,5 kg de amostra, separada seguidamente em cinco porções de 2,5 kg. Colocou-se uma porção num tabuleiro e misturou-se com uma quantidade de água pré-definida até se conseguir uma mistura homogénea. Esta foi depois compactada em 3 camadas no molde de ensaio. A compactação foi realizada através de 25 pancadas por camada, com o uso de um pilão de 2,5 kg, largado de uma altura de 305 mm. Após o enchimento e compactação do molde retirou-se a alonga, removeu-se o excesso de material e alisou-se a superfície. De seguida, o molde com terra compactada foi pesado e retirou-se uma pequena amostra quadrada, com cerca de 2 cm de aresta, 1 cm de profundidade, tanto do topo como da base do molde, registando-se as respetivas massas. As amostras foram colocadas a secar a 105°C por 24

horas, pesando-se novamente após secagem. Repetiu-se o processo para as restantes porções de 2,5 kg (Figura 13).



Figura 13 – Ensaio de compactação: a) solo preparado; b) compactação do solo; c) provete após compactação.

A comparação da massa antes e após a secagem permite determinar o teor de humidade da amostra, que irá ser associado à sua massa volúmica (através do peso do molde). Estes dados, quando traçados em gráfico, representam a relação curvilínea conhecida como curva de compactação. O ponto máximo desta curva corresponde ao TOA. Na Figura 14 apresenta-se a curva de compactação obtida para FA, cujo valor de TOA foi de 12,8%. Note-se que a produção dos BTC envolveu uma mistura de terra composta por FA e TV, servindo o TOA do solo FA apenas como valor indicativo para um primeiro ponto de partida no estudo prévio.

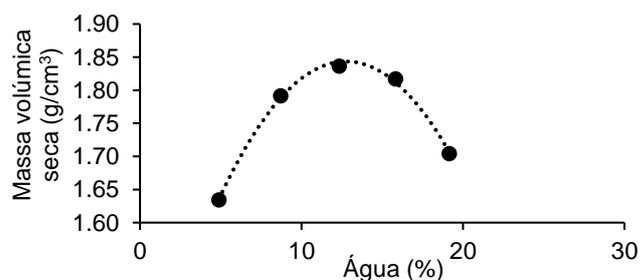


Figura 14 - Curva de compactação do solo FA

3.2.4 Determinação da massa volúmica e absorção de água

Este ensaio tem como objetivo determinar o valor da massa volúmica das partículas constituintes do solo FA e do resíduo TV, bem como da sua absorção de água. O ensaio foi realizado de acordo com a Norma NP 83 (1965) para materiais grosseiros (solo FA), e de acordo com a NP EN1097-7 (2008), para materiais finos (resíduo TV). O ensaio de acordo com a EN 1097-7 (2008), nomeadamente para a determinação da massa volúmica real das partículas muito finas do resíduo TV, foi realizado no Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV).

Os ensaios de acordo com a NP 83 (1965), mais adequados para o solo FA, foram realizados no LEC do IST. Após a secagem numa estufa ventilada a 110 °C, uma amostra de solo foi crivada no peneiro de 4,75 mm. Cerca de 25g de material foram recolhidos (m_2). O picnómetro foi calibrado através da introdução de água destilada até ao traço de referência, medindo-se a sua massa (m_1) (Figura 15). Após a calibração, e com o picnómetro seco, colocou-se a amostra e encheu-se com água destilada até cerca de três quartos da sua capacidade, deixando a terra em repouso absorvendo a água. Após pelo menos 12 horas, o picnómetro foi depois agitado em posição inclinada, de modo a retirar-se o ar existente entre as partículas e foi deixado repouso por 24 horas. Após este período adicionou-se água destilada até ao nível de referência e registou-se a massa final (m_3). Por aplicação da Equação 3.1, determinou-se a massa volúmica das partículas.

$$\rho = \frac{m_2}{m_1 - (m_3 - m_2)} \quad (3.1)$$

A absorção de água do solo FA foi determinada de maneira análoga à absorção de água nos agregados, através da NP EN 1097-6 (2003). Na Tabela 5 resumem-se os resultados obtidos nos ensaios realizados no IST e no CTCV no presente trabalho. Para o resíduo TV, assumiu-se a absorção de água como 1%.

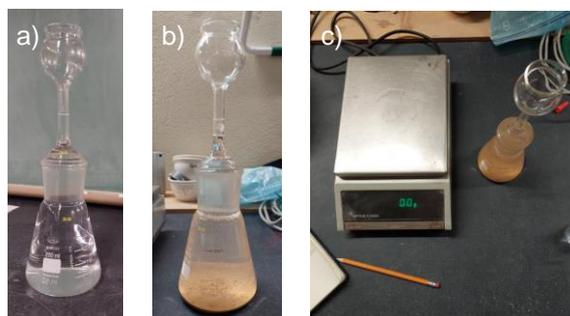


Figura 15 – Determinação da massa volúmica das partículas dos solos: a) picnómetro com água destilada; b) picnómetro pronto para pesagem; c) pesagem do picnómetro.

Tabela 5 – Massa volúmica e absorção de água dos solos

	Abs (%) NP EN 1097-6 (2003)	ρ (kg/m³) NP-83 (1965)	ρ_{real} (kg/m³) EN1097-7 (2008)
Solo FA	1,4	2633	NA
Resíduo TV	NA (\cong 1%)	NA	2630

3.2.5 Determinação da fração de matéria orgânica

A presença de matéria orgânica nos solos é indesejada para a produção de BTC, como visto no capítulo 2. Solos com um teor de matéria orgânica inferior a 4% são considerados adequados para a produção de BTC, segundo a norma WD-ARS 1333 (2018).

O procedimento experimental utilizado tem como base a norma XP P94-047. As amostras de FA e TV foram secas numa estufa ventilada a 50 °C até massa constante. Tomou-se 300g de ambas amostras e crivou-se em 2 mm. De seguida, procedeu-se à desagregação das partículas por intermédio de um pilão de borracha e um almofariz. Tomaram-se três amostras de 50g e colocou-se em cadinhos, previamente pesados (Figura 16). Os cadinhos foram colocados numa mufla seguindo uma taxa de incremento de temperatura de 10°C/min até aos 450 °C, onde permaneceu por 3 horas. Depois, os cadinhos foram colocados num exsiccador onde arrefeceram até temperatura ambiente, sendo depois pesados.



Figura 16 - Determinação da percentagem de matéria orgânica: a) cadinhos com amostra; b) mufla

O teor de matéria orgânica é a média aritmética das 3 amostras e é expresso em percentagem. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Percentagem de matéria orgânica

Solo FA	Resíduo TV
0,8%	1,5%

3.2.6 Composição mineralógica

A composição mineralógica do solo FA e do resíduo TV foi determinada através de ensaios de difração de raios-X (DRX). Para tal, recorreu-se a um difractómetro XPERT-PRO (40kv, 35 mA). A aquisição dos dados foi efetuada entre 5,0437° e 69,9547° 2θ, para um passo de 0.033 e a identificação da composição mineralógica foi efetuada através do software *X'Pert Highscore Plus*. As amostras foram analisadas sem qualquer pré-tratamento de temperatura visto que os picos associados a alguns dos minerais argilosos não mudaram de posição após aquecimento. Os difractogramas obtidos apresentam-se em Anexo 1. Na Tabela 7 resumem-se as principais fases identificadas.

Tabela 7 - Fases mineralógicas identificadas por difração de Raios-X

FA	TV
Quartzo	Quartzo
Albita	Caulinita
Caulinita	Microclina
Microclina	Ilite
Ilite	
Ortoclase	

Os mesmos minerais pertencentes ao grupo dos tectossilicatos, nomeadamente o quartzo e a microclina, estão presentes nas duas amostras. Além disto, o solo FA também apresenta albita e ortoclase, outros minerais pertencentes a esse grupo. Os restantes minerais em cada amostra pertencem ao grupo dos filossilicatos, nomeadamente a caulinita e a ilite. Estas argilas não são consideradas expansivas, o que é considerado favorável à sua aplicação em BTC (Gomes *et al.*, 2014).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO

O agregado reciclado utilizado neste trabalho experimental é resultado de resíduos de construção de demolição (RCD) de natureza variada e foi proveniente da empresa Vimajas. Em fábrica, este material foi apenas sujeito a um processo preliminar de britagem e crivagem, tratando-se de material de dimensão maioritariamente inferior a 4 mm (Figura 17). O RCD é composto por uma mistura de vários materiais, como betão, argamassa e outros materiais cimentícios, pedra natural, cerâmica, vidro e betuminoso.



Figura 17 –RCD: Material recolhido e transportado em Big Bags (a); Material em pormenor (b).

No presente ponto procede-se à caracterização do RCD utilizado, apresentando-se os ensaios realizados, nomeadamente de granulometria, massa volúmica, absorção de água e de estimativa de composição.

3.3.1 Análise granulométrica

A preparação das amostras exigiu a redução das mesmas de acordo com a norma NP 932-3. As amostras foram secas numa estufa ventilada até atingirem massa constante, seguida de redução através de esquadramento. Para garantir que uma correta caracterização e evitar a aglomeração de partículas devido à presença de material betuminoso, as amostras de RCD foram secas a temperaturas abaixo de 40°C.

A análise granulométrica foi realizada conforme o indicado na norma EN 933-1 (2012). As amostras de RCD, com dimensão máximo inferior a 8 mm, apresentavam cerca de 0,6 kg. Estas amostras foram colocadas em um recipiente com água e agitadas vigorosamente para garantir a completa separação e suspensão do material fino. Em seguida, foram lavadas com água num peneiro com uma malha de 0,075 mm, e o material retido foi seco até atingir massa constante. O material foi então introduzido em uma coluna de peneiros, composta por peneiros dispostos em ordem decrescente. A coluna foi agitada manualmente e a massa retida em cada peneiro foi registada. A curva granulométrica encontra-se representada na Figura 9 do capítulo 3.2.1. Destaca-se o facto da granulometria do RCD não ser muito diferente da do solo FA, o que facilita a substituição parcial de FA por RCD, sem alterar de forma significativa a compacidade granular dos BTC.

3.3.2 Massa volúmica e absorção de água às 24 horas

A massa volúmica e a absorção de água foram determinadas de acordo com o definido na NP EN 1097-6 (2003). Conforme indicado nesta norma, apenas a fração de 0,063/4 mm foi avaliada.

A amostra foi crivada num peneiro de 4 mm e o material retido foi descartado. O material com dimensão inferior a 4 mm foi lavado com água num peneiro de 0,063 mm com o intuito de remover todas as partículas mais finas. Em seguida, a amostra foi seca em estufa até massa constante. Depois de seca, a amostra foi imersa em água destilada a 22 ± 3 °C num picnómetro (Figura 18). O ar aprisionado foi removido agitando suavemente o picnómetro e, de seguida, foi colocado em banho-maria a 22 ± 3 °C por 24 horas. Após este período, o picnómetro foi preenchido com água até ao traço de referência. Em seguida, o picnómetro foi seco por fora e a massa foi registada (m_2). Após isto, o conteúdo do picnómetro foi esvaziado num tabuleiro (Figura 18). O mesmo picnómetro foi novamente preenchido com água, seco por fora e pesado (m_3). A amostra encharcada foi distribuída uniformemente no tabuleiro e exposta a um fluxo de ar quente através de um secador elétrico (Figura 18). Para avaliar se o estado de superfície seca foi alcançado, um molde cónico de metal (Figura 18) foi mantido com sua face de maior diâmetro virada para baixo no fundo do tabuleiro e preenchido com parte da amostra. Em seguida, um pilão foi utilizado para compactar levemente a superfície 25 vezes através do orifício no topo do molde. Após isso, o molde foi levantado. Esse processo foi repetido até que ocorresse um colapso quase completo, mas o pico do cone ainda fosse visível (Figura 18). A amostra saturada e com superfície seca foi pesada (m_1). Por fim, a amostra foi seca numa estufa ventilada até atingir massa constante (m_4).



Figura 18 - Determinação da absorção de água das partículas dos solos: a) picnómetro; b) tabuleiro e secador; c) molde de ensaio; d) ensaio completo.

As massas volúmicas e absorção de água foram determinadas aplicando as expressões 3.2, a 3.6. Os resultados apresentam-se na Tabela 8.

$$\text{Massa volúmica impermeável, } \rho_a = \rho_w \frac{m_4}{m_4 - (m_2 - m_3)} \quad (3.2)$$

$$\text{Massa volúmica seca, } \rho_{rd} = \frac{m_4}{m_1 - (m_2 - m_3)} \quad (3.4)$$

$$\text{Massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, } \rho_{ssd} = \frac{m_1}{m_1 - (m_2 - m_3)} \quad (3.5)$$

$$\text{Absorção de água, } Abs = \frac{(m_1 - m_4)}{m_4} * 100 \quad (3.6)$$

Tabela 8 - Massas volúmicas e absorção de água do RCD

ρ_a (kg/m ³)	ρ_{rd} (kg/m ³)	ρ_{ssd} (kg/m ³)	abs (%)
2559	2303	2403	4,3

ρ_a : massa volúmica impermeável; ρ_{rd} : massa volúmica seca; ρ_{ssd} : massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca; abs: absorção de água

3.3.3 Composição dos RCD

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 933-11 (2011), tendo por objetivo determinar o tipo e teor de constituintes presentes nos RCD. Os constituintes foram separados de acordo com as seguintes tipologias: Rc (betão e produtos de betão); Ru (pedra e agregados soltos); Rb (produtos de barro, tijolo, telhas); Ra (produtos betuminosos); Rg (vidro); X (outros).

Este ensaio foi realizado em duas amostras diferentes do mesmo RCD. Em primeiro lugar, as amostras foram peneiradas a 4 mm e o material de dimensão inferior foi lavado em água. As partículas flutuantes foram recolhidas e o seu volume foi determinado, V_{FL} (Figura 19). Depois, o material foi seco a 40°C em estufa ventilada até massa constante. De seguida, separaram-se as partículas segundo as tipologias anteriormente referidas, através de avaliação visual. Finalmente, foi determinada a percentagem de cada constituinte, conforme indicado na (Tabela 9).



Figura 19 – Determinação fração de agregados nos RCD: a) determinação do volume das partículas flutuantes; b) processo de separação por tipologia; c) separação concluída

Tabela 9 - Frações constituintes do RCD

V _{FL} (cm ³)	R _c (%)	R _u (%)	R _b (%)	R _a (%)	R _g (%)	X (%)
1,22	45,30	27,90	16,40	2,20	0,03	8,30

3.4 ESTABILIZANTES

3.4.1 Cimento Portland

Para a produção dos BTC de referência, bem como dos provetes que serão sujeitos a reciclagem, foi utilizado um cimento Portland tipo I 42,5 (CP). Foi também utilizado, numa das misturas, o cimento corrente do tipo II/B-L 32,5, de forma a obter uma alternativa mais económica e de menor impacto ambiental. As principais características destes apresentam-se na Tabela 10. Os valores foram os fornecidos pelo fabricante, exceto o relativo à superfície específica BET, em que foi solicitado o seu ensaio à Universidade de Aveiro.

Tabela 10 - Propriedades do cimento Portland

Parâmetros		CEM I 42,5 R	CEM II/B-L 32,5 N
Massa volúmica (g/cm ³)		3,07	~3,0
Superfície específica blaine (cm ² /g)		4 437	52,5 ≥ f _{ck} ≥ 32,5
Superfície específica BET ^a (cm ² /g)		19707	
Resíduo no peneiro de 45 µm (%)		6,8	-
Resistência à compressão em pastas (MPa)	1 dia	16,8	-
	7 dias	43,6	-
	28 dias	57,0	-
Expansão (mm)		1,0	≤ 10
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	≥ 75
	Final	280	-

^aEnsaio realizado na Universidade de Aveiro – Adsorção N₂

Devido à falta de informação providenciada pelo fabricante e de modo a ter uma ideia do teor de fíler calcário presente no cimento tipo II/B-L, foi realizada uma análise termogravimétrica no âmbito do trabalho de Gonçalves (2023). A partir deste ensaio foi estimado um teor de fíler de 31%.

3.4.2 Cimento reciclado

O cimento reciclado e a sua ação de estabilização nos BTC são os pontos centrais desta dissertação. O cimento reciclado foi produzido no GeoLAB-IST e no LEC-IST. Neste trabalho foi produzido cimento reciclado a partir de pasta (CRP) e de betão (CRB) de acordo com o procedimento seguido otimizado em outros trabalhos realizados no IST (Leal, 2021; Real *et al.*, 2020; Gonçalves 2023). Nos próximos pontos apresenta-se os processos associados à sua produção e termoativação, bem como as suas principais características.

3.4.2.1 Produção da pasta e betão de origem

Inicialmente procedeu-se à produção do betão e pasta de origem, que serviu de fonte para a obtenção do cimento reciclado. O betão e a pasta de origem foram produzidos com CEM I 42,5 e com a/c de 0,55, sendo representativo de resíduos de betão comuns. Segundo Carriço *et al.* (2022) não se verificam diferenças significativas nas propriedades de cimentos reciclados obtidos a partir de pastas com 0,35 a 0,55 de a/c. No caso do betão de origem foi ainda utilizado 2 tipos de areia (fina e grossa) e 3 tipos de brita (bago, brita 1 e brita 2).

A pasta foi produzida em moldes cúbicos de 15 cm de aresta e o betão em moldes de cerca de 15x30 cm, recorrendo a cofragem de contraplacado. Produziram-se ao todo cerca de 70 provetes de pasta de cimento e 70 de betão (Figura 20). Após 24 horas, os provetes de pasta foram desmoldados e curados durante pelo menos 7 dias na câmara húmida e os provetes de betão aspergidos por água bi-diariamente.

Após a produção, as pastas apresentavam consistência fluída e os betões cerca de 12 cm de abaixamento, de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2009), sendo necessário recorrer a vibração para a sua compactação. Para que fossem representativos de resíduos antigos de elevado grau de hidratação, os provetes foram submetidos a reciclagem apenas após possuírem uma idade mínima de 90 dias. A resistência média à compressão aos 28 dias da pasta e betão de origem, determinada de acordo com a EN 12390-3 (2011), foi de 36 MPa e 47 MPa, respetivamente.



Figura 20 – Provetes: a) pasta de cimento de origem; b) betão de origem.

3.4.2.2 Produção do cimento reciclado

Após mais de 3 meses de idade, os vários provetes de pasta foram submetidos a um processo sucessivo de britagem e moagem, recorrendo a diferentes britadeiras de maxilas e a moinho de rolos (Figura 21). A britagem teve início no LEC-IST, por recurso a uma britadeira de mandíbulas (Figura 21a), onde os provetes foram transformados em partículas de dimensão inferior a cerca de 70 mm (Figura 21ai). De seguida, já no Geolab-IST, este material foi submetido a uma passagem sobre outra britadeira de mandíbulas de menor abertura até se reduzir a uma dimensão média inferior a 10 mm (Figura 21bi). Estas partículas foram depois sujeitas a duas passagens em moinho de rolos, atingindo-se um material de dimensão maioritariamente inferior a 2 mm (Figura 21ci).

O mesmo procedimento foi realizado para os provetes de betão, diferindo apenas no facto de se incluir na parte final o procedimento de separação dos constituintes de betão. De facto, neste resíduo existia a preocupação adicional de separar a matriz cimentícia dos restantes constituintes do betão (agregado), de modo a ser viável a obtenção de um cimento reciclado eficiente. Este procedimento teve por base um método idealizado e patenteado no IST (Hu 2019, Bogas *et al.*, 2021) e que implicou uma primeira etapa de sucessivas crivagens e moagens no moinho de rolos, de modo a atingir partículas de dimensão inferior a 1 mm (Figura 21d). Posteriormente, o material foi separado nas frações 0-150 μm ; 150-250 μm ; 250-500 μm e 500-1000 μm , submetendo-se as frações intermédias entre 150 e 500 μm a separação magnética (Hu 2019, Bogas *et al.*, 2021). Assim, aproveitando as características paramagnéticas da pasta foi possível individualizar um produto cimentício com menor contaminação de agregado, mais adequado à produção de cimento reciclado.

Visto que os resíduos de pasta e de betão ainda se apresentavam muito grosseiros, com áreas de superfície específica não adequadas à sua utilização como material ligante, procedeu-se à sua

moagem em moinho horizontal de bolas (Figura 21e). Para tal, inicialmente secou-se o material em a 110°C por um mínimo de 24 horas e depois introduziu-se o material (no máximo 15 kg) no moinho em conjunto com 625 esferas de aço de diâmetros variáveis, entre 10 mm e 50 mm, e aproximadamente 0,2% em peso de um agente de moagem. O aditivo tem por objetivo evitar a aglomeração das partículas, facilitando a moagem. A moagem ocorreu durante 2 horas, após as quais se recolheu o material. No final, o material atingiu dimensão maioritariamente inferior a cerca de 150 µm.

Finalmente, os materiais cimentícios assim obtidos foram sujeitos ao processo de termoativação, a fase relevante que permite que o cimento volte a adquirir capacidade de hidratação. Este processo foi realizado em dois fornos distintos, um rotativo e um horizontal estático (Figura 21ei).

O forno rotativo foi utilizado para a produção do cimento reciclado de pasta (CRP) e de betão (CRB) a incorporar nos BTC sujeitos a ensaios de caracterização. Este procedimento foi ajustado com base em trabalhos anteriores (Real *et al.*, 2020, Nabais 2022), seguindo a seguinte curva térmica (Figura 21g): 1- 10°C/min até 150°C; 2 - 1 hora a 150°C; 3 - 10°C/min até 450°C; 4 - 1 hora a 450°C; 5 - 10°C/min até 650°C onde se mantém por 3 horas; 6 - arrefecimento no forno até próximo da temperatura ambiente.

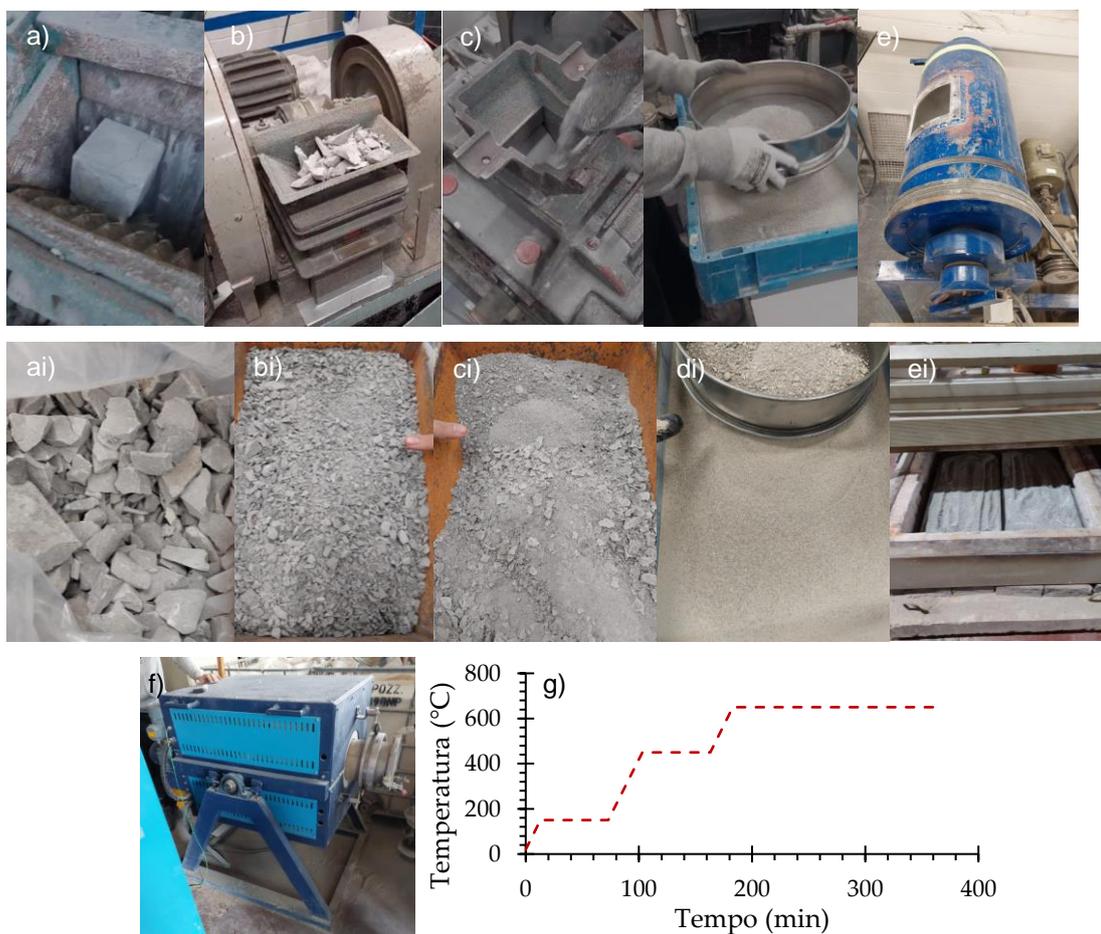


Figura 21 - Produção do cimento reciclado: a) britagem na britadeira no LC-IST; b) britagem na britadeira de menor abertura do Geolab-IST; c) moagem no moinho de rolos; d) peneiração intermédia do resíduo de betão; e) moinho de bolas; ai) partículas depois de a); bi) partículas depois de b); ci) partículas depois de c); di) partículas depois de d); ei) partículas depois de e) no forno horizontal; f) forno rotativo da *Thermolab Scientific Equipments*; g) curva de termoativação do cimento.

O forno horizontal estático (Figura 21ei) foi utilizado em alternativa para a produção do cimento reciclado a utilizar nos blocos de BTC, que foram destinados à execução dos muros de alvenaria para exposição em ambiente real (3.7). A opção por este forno, em que existia menor experiência na sua utilização e onde é mais difícil garantir condições homogêneas de calor pelo material a tratar, deveu-se à necessidade de produção simultânea de grandes quantidades de CR. Note-se que durante o ano da presente dissertação foram produzidos mais de 1000 blocos para a execução dos muros de alvenaria. A curva térmica imposta no material a tratar foi semelhante à definida anteriormente para o forno rotativo, tendo sido ajustada experimentalmente com recurso a monitorização por termopares. Este ajuste foi realizado em paralelo por outro investigador, no âmbito do projeto Eco+RCEB.

Após a termoativação, o material foi recolhido e armazenado em sacos de plástico duplos, guardados em barricas fechadas até à altura da sua utilização.

3.4.3 Caracterização do cimento reciclado

Na Tabela 11 resumem-se as características do CRP e na Figura 22 apresenta-se a curva granulométrica obtida para este cimento, confrontada com a obtida para o cimento tipo I 42,5.

A análise granulométrica foi realizada por granulometria laser, através do equipamento da Malvern, *Mastersizer 3000*. O ensaio foi realizado na empresa Sifucel, tendo-se realizado o ensaio a húmido, com sonicação prévia das amostras.

Tabela 11 - Propriedades do cimento reciclado.

Parâmetros		CRP
Massa volúmica (g/cm ³)		3,0
Superfície específica BET ^a (cm ² /g)		98123
Resíduo no peneiro de 45 µm (%)		27,5
Resistência à compressão aos 28 dias em pastas de a/c de 0,74 (MPa)		23,4
Cal livre (%)		17,9
Pasta de consistência normal (a/l)		0,74
Tempo de presa (min)	Inicial	170
	Final	460

^aEnsaio realizado na Universidade de Aveiro – Adsorção N₂

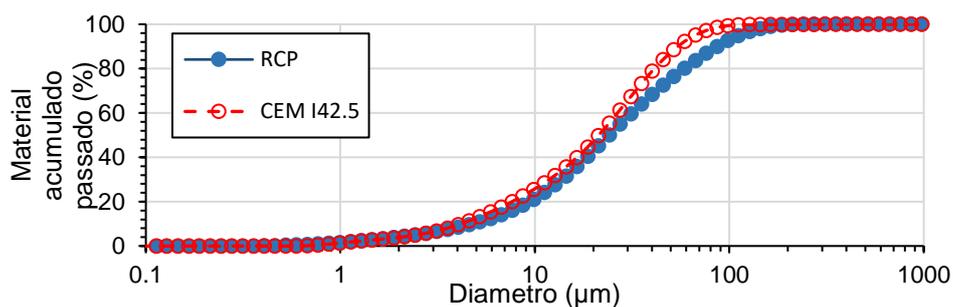


Figura 22– Análise granulométrica laser de CRP (RCP) e de cimento tipo 42,5 (CP)

O teor de cal livre foi determinado de acordo com um procedimento interno tendo por base as normas EN 1015-6 (1998) e EN 196-3 (2016). Destaca-se a elevada exigência de água e teor de cal livre do CRP, quando comparado com o CP (Tabela 10 vs Tabela 11) (Real, *et al.*, 2021; Bogas *et al.*, 2022). Esta elevada exigência de água é essencialmente atribuída à natureza porosa e à elevada área superficial do CRP, cerca de 5 vezes superior à do CP (Tabela 10 vs Tabela 11). Ainda assim, obteve-se uma área superficial inferior ao reportado noutros estudos realizados no mesmo laboratório

(Gonçalves, 2023; Nabais 2023). O fim de presa do CRP foi cerca de 65% ao do CP (Tabela 11) relacionado com o maior atraso no desenvolvimento do α' -C₂S do CR até 1 dia de idade (Bogas *et al.*, 2022). O início de presa do CRP foi semelhante ao do CP (Tabela 11). Esta tendência é contrária à reportada em outros trabalhos no mesmo laboratório. Em Bogas (2023), por exemplo, este valor foi determinado como sendo de 290 minutos. Vyšvařil *et al.* (2014) relaciona a diminuição do tempo de presa com o aumento do teor de cal livre. Neste trabalho, a incorporação de um novo patamar de temperatura na etapa de termoativação terá reduzido a hidratação precoce do CaO, que, por sua vez, promove a capacidade de reidratação e o desenvolvimento do tempo de presa. Os valores indicados de massa volúmica foram determinados no âmbito do trabalho de Leal (2021), também realizado no mesmo laboratório, mas no âmbito do projeto EcoHydb.

De seguida, procedeu-se à caracterização do CRP quando inserido em pastas, permitindo avaliar a sua resistência à flexão e à compressão. A pasta de CRP foi produzida com consistência normal, para um a/c de 0,74. As pastas de cimento foram moldadas e compactadas em prismas de 160x40x40 mm, de acordo com a norma EN 1015-2 (1998), recorrendo a uma mesa de compactação, onde a pasta foi colocada em duas camadas e sujeita a 60 pancadas em cada uma. No final, removeu-se o excesso, alisou-se a superfície dos provetes e cobriu-se o molde com película aderente, deixando em ambiente de laboratório durante 24h (Figura 23a)). Após desmoldagem os provetes foram curados em câmara húmida até à idade do ensaio. Os provetes foram secos superficialmente e testados à resistência à flexão e à resistência à compressão segundo a norma EN 1015-2 (1998). Estes ensaios foram realizados na prensa *Form + Test Seidner 505/200/10 DM1* (Figura 23b)). Os provetes foram ensaiados à flexão e as metades resultantes foram posteriormente ensaiadas à compressão, ambos a uma taxa de carga de cerca de 0,2-0,4 MPa/s. Na Tabela 11 apresenta-se a resistência à compressão média aos 28 dias.

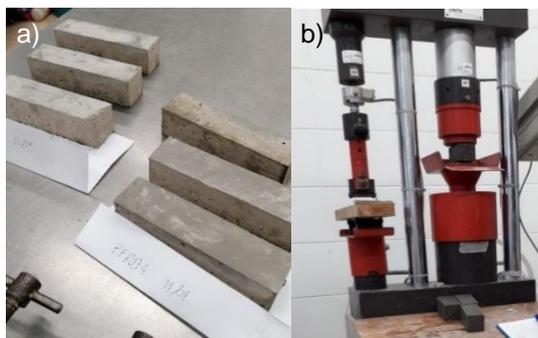


Figura 23 – Caracterização do cimento reciclado: a) provetes de pasta de cimento reciclado termoativado; b) ensaio à compressão.

A pasta antes da termoativação (resíduo de pasta, RP) e o CRP foram também caracterizados com recurso a termogravimetria. A curva de perda de massa em função da temperatura permite identificar as principais fases presentes, e estimar o nível de hidratação do RP, e o nível de pré-hidratação e pré-carbonatação do CRP na altura da sua utilização. A análise termogravimétrica foi realizada com recurso ao equipamento Hitachi Nexta STA, considerando-se amostras de cerca de 10 mg. Os ensaios foram realizados em atmosfera de azoto, a uma taxa de temperatura de 15°C/min, entre 20 e 950°C. A Figura 24 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e da sua derivada (DTG) para o RP e para o CRP.

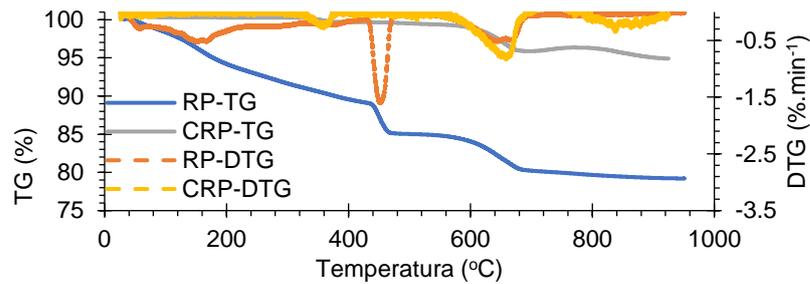


Figura 24 – Curvas termogravimétricas do RP e CRP

Esta análise possibilitou a identificação das três principais regiões de perda de massa do processo (Angulo, *et al.*, 2015; Lothenbach, *et al.*, 2018; Real, *et al.*, 2020)), nomeadamente: a desidratação dos produtos de hidratação do cimento, como as fases aluminadas e silicatadas, até aproximadamente 400-500 °C (Ldh); a desidroxilação do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , que ocorre entre 400-550 °C (Ldx); e a fase de descarbonatação que ocorre acima de 600 °C (Ldc). Estes valores são apenas aproximados, podendo variar consoante a amostra de cimento ensaiada. O Ldc foi corrigido tendo em consideração o CO_2 libertado pelo material carbonato no cimento anidro. Foram também determinados o teor de água combinada não evaporada (W_b), o coeficiente de hidratação do material (α), a quantidade de hidróxido de cálcio livre (CH), e o teor de calcite, ou seja, o teor de material carbonatado (CaCO_3). O grau de hidratação da amostra, α , foi determinado conforme a equação proposta por Monteagudo *et al.* (2014). O autor relaciona o teor de água combinada não evaporada, W_b , com a proporção de água necessária para hidratar completamente o cimento. De acordo com Neville (1995) este último parâmetro é, de, aproximadamente, 0,23. Por sua vez, W_b , CH e CaCO_3 são determinados de acordo com as Equações 3.7, 3.8 e 3.9, respetivamente.

$$W_b = Ldh + Ldx + 0,41Ldc \quad (3.7)$$

$$CH = 4,11Ldx + 1,68Ldc \quad (3.8)$$

$$\text{CaCO}_3 = \frac{Ldc * M_{\text{CaO}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.9)$$

Os valores obtidos para o RP e CRP encontram-se resumidos na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de termogravimetria

	Ldh (%)	Ldx (%)	Ldc (%)	Wb	α	CH (%)	CaCO_3 (%)
RP	10,91	3,30	1,00	0,15	63,6	13,6	7,0
CRP	0,07	0,59	2,69	0,02	7,7	2,4	10,8

Em relação ao RP foi estimado um coeficiente de hidratação de aproximadamente 63,6%, o que indica um elevado grau de hidratação dos resíduos de pasta. Como esperado, o valor deste parâmetro para o CRP foi pouco significativo (7,7%), o que sugere que o arrefecimento e o armazenamento do CRP não provocaram a reidratação da cal livre. Isso é confirmado pelo reduzido teor de CH (2,4%) no CRP. Constata-se, também, que a perda de massa devido à desidratação das fases silicatadas e aluminadas foi bastante reduzida (0,07%). Por fim, o processo de produção do cimento reciclada originou um aumento do teor de material carbonatado.

No caso dos resíduos de betão, o seu grau de contaminação por agregado foi também estimado por intermédio de análise termogravimétrica em ambas as frações anteriormente peneiradas (Figura 25). Como tal, foi analisada a perda de massa entre 200-350 °C nas amostras de RB e nas amostras

RP. Deste estudo foi possível estimar um nível de pureza de 83,5%, em percentagem de massa, para a fração 250-500 μm e de 58,6% para a fração 150-250 μm . A percentagem para a fração 150-250 μm é consideravelmente inferior ao reportado noutros estudos realizados no mesmo laboratório, cuja pureza foi superior a 88% (Hu, 2019). Isto deve-se ao facto de a separação não ter sido realizado por intermédio de uma peneiração húmida em 150 μm . Considerando, que durante o processo de termoativação, ou seja, até 650°C, a perda de massa dos resíduos de pasta foi de cerca 18% (Figura 25). Foi possível estimar um grau de pureza final para o CRB de cerca de 80,6% em massa para a fração 250-500 μm e de 53,9% para a fração 150-250 μm . Tendo em conta a reduzida quantidade de material resultante da separação magnética, ambas as frações foram misturadas numa proporção 1 para 1. Como tal, o grau de pureza final para o CRB foi de 67,2%, ou seja, este ligante encontra-se contaminado por 32,8% em massa de agregado. Este valor é semelhante ao reportado por outro trabalho realizado no mesmo laboratório (Nabais, 2023).

A massa volúmica do CRB foi estimada através de uma média ponderada tendo em conta o seu grau de contaminação. Para tal foi considerado uma massa volúmica para o agregado de 2650 kg/m^3 e para o cimento de 3000 kg/m^3 , tendo-se obtido um valor de, aproximadamente, 2885 kg/m^3 .

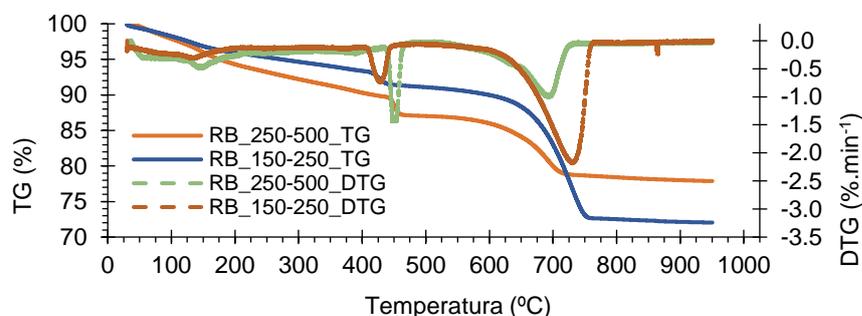


Figura 25 – Curvas termogravimétricas das duas frações de resíduos de betão

3.5 ESTUDOS PRÉVIOS

Foram efetuados dois estudos experimentais preliminares com o objetivo de otimizar o processo de produção e qualidade dos BTC. O primeiro estudo teve como objetivo principal analisar a influência da incorporação do resíduo argiloso (TV) e do teor de água da mistura (TA). Nesta fase foram considerados BTC não estabilizados, e BTC estabilizados com CP ou CRP, visando atingir composições otimizadas em termos de compacidade e resistência mecânica. O segundo estudo, realizado em fase posterior, baseou-se na adaptação do ensaio de compactação (Proctor) e teve como objetivo avaliar o impacto do ligante, ou da sua ausência, no teor ótimo de água.

3.5.1 Composições preliminares

Na Tabela 13 resumem-se as composições dos BTC consideradas na primeira fase do estudo prévio. Todas as composições foram produzidas com 25% de RCD, em relação à massa de solo mais RCD. Idealmente a mistura dos constituintes deveria ser realizada numa misturadora vertical. No entanto, devido à reduzida quantidade de material utilizado para produzir os blocos, cada mistura foi preparada manualmente, utilizando-se um balde com capacidade de 20 kg.

Os blocos foram produzidos por intermédio de uma prensa semiautomática Oskam V/F (Figura 28b). Após a moldagem dos blocos, mediu-se a sua massa e a espessura de forma a controlar a

qualidade de execução. A espessura dos blocos foi definida como 90±1 mm. Nesta fase fixou-se a massa a introduzir no molde como 8 kg, independente da incorporação de estabilizante na mistura.

Tabela 13 – Composições preliminares (Fase 1)

Composição	% Ligante ^a	%CRP	%TV ^a	%TA ^b	q	Δ ²	ρ _f (kg/m ³)
UCEBTV1711TA	0	0	17	11	0,30	373	2161
UCEB-TV30-11TA	0	0	30	11	0,25	258	2171
UCEB-TV10-11TA	0	0	10	11	0,33	465	2137
UCEB-TV17-10TA	0	0	17	10	0,30	373	2137
CP8-TV9-11TA	8	0	9	11	0,30	354	2134
CP8-TV9-13TA	8	0	9	13	0,30	354	2144
CRP8-TV9-12TA	8	100	9	12	0,30	354	2049
CRP8-TV9-13TA	8	100	9	13	0,30	354	2065
CRP8-TV9-14TA	8	100	9	14	0,30	354	2088
CRP8-TV9-15TA	8	100	9	15	0,30	354	2086
CRP8-TV17-14TA	8	100	17	14	0,27	265	2085

^a – Em relação à massa de solo+RCD+TV; ^b – Em relação à massa de solo+RCD+TV+ligante

De modo a atingir BTC de maior compacidade, as curvas granulométricas das misturas foram otimizadas à curva de referência de Fuller modificada (Equação 3.10). Para tal assumiu-se um valor de “q” entre 0,25 e 0,33 (Malkanthi *et al.* 2021 e Koutous 2019) e para a dimensão máxima do agregado (D_{max}) 4.76 mm. O parâmetro P(x) designa a percentagem de material passado acumulado no peneiro de diâmetro di. A soma dos desvios quadrados (Δ²) das curvas das misturas com a curva de referência de Fuller modificada encontra-se representada na Tabela 13.

$$P(x) = \left(\frac{d_i}{D_{max}} \right)^q \quad (3.10)$$

Verifica-se que para maiores valores de q são obtidos maiores Δ², afastando-se da curva teórica de Fuller. Porém, a maiores valores de q estão associados menores teores de TV, tornando mais fácil a estabilização e permitindo o melhor cumprimento dos limites recomendados de teor de argila e de finos nos BTC, de cerca de 5-20% e 20-40%, respetivamente (ARS-ASR 1333 2018, HB 195 2002, Malkanthy *et al.*, 2021; Silva, 2015).

A Tabela 13 apresenta também a massa volúmica fresca (ρ_f) registada para cada mistura produzida. Para obter este parâmetro foi necessário pesar e medir a altura de cada bloco, utilizando-se, uma balança analítica e uma régua metálica com precisão de 0,1 g e 0,1 cm, respetivamente. Verificou-se uma diminuição na massa volúmica fresca nos blocos estabilizados com CRP. Nas composições que apresentam 8% de ligante, 9% de TV e 13% de TA, a massa volúmica fresca foi 1,7% menor quando o CRP foi utilizado como ligante. Isso não pode ser justificado apenas pela ligeira redução da massa volúmica do CRP em comparação com o CP (Tabela 10 vs Tabela 11). De facto, a maior exigência de água do ligante reciclado resultou em misturas com menor massa volúmica devido à sua maior dificuldade de compactação.

Os blocos foram curados em ambiente de laboratório no LEC-IST, após 3 dias de cura húmida em Montemor-o-Novo. Determinou-se a massa volúmica e a resistência à compressão aos 14 dias de metades dos blocos, servindo estes valores como fatores de comparação. As metades foram ensaiadas em duas condições diferentes: ambiente laboratorial com 55-70% de humidade relativa ou saturados.

Na Tabela 14 resumem-se os vários resultados de resistência mecânica e massa volúmica obtidos em cada uma das misturas. A Tabela 14 apresenta também uma estimativa da porosidade total

(P_T) dos blocos, tendo como base a massa volúmica fresca (ver 4.1). A porosidade total variou entre 25,9 e 31,0%. Confirma-se a menor compactidade dos blocos estabilizados com CRP.

A resistência à compressão apresentou uma correlação positiva com a incorporação de resíduo TV. Para os blocos não estabilizados, o triplo do teor de TV (10% para 30%) levou a um aumento de 22,2% na resistência à compressão (2,94 MPa para 3,78 MPa). Estes resultados estão de acordo com as massas volúmicas aparentes e com a porosidade total dos blocos e, portanto, com o aumento da sua compactidade. Como esperado, a resistência à compressão foi negativamente afetada pelo aumento do teor de humidade dos blocos. Após saturação em água, a resistência reduziu para valores de apenas 52,9% (RCP) e 47,2% (CP) da sua resistência em ambiente laboratorial.

Para a influência do teor de água da mistura foram consideradas quatro composições com CRP como ligante, duas com CP e duas não estabilizadas. Os blocos estabilizados foram produzidos com igual teor de TV e de ligante, variando apenas o TA. Os BTC não estabilizados foram produzidos com 17% TV. Nos BTC estabilizados com RCP a resistência à compressão mais elevada foi alcançada para um teor de água de 14% (6,3 MPa). Nos BTC estabilizados com CP, a maior resistência foi obtida para a mistura com TA de 11% (10,5 MPa). Nas misturas não estabilizadas a maior resistência foi obtida para um teor de água de 11% (3,2 MPa). Para um dado tipo de estabilizante, as diferenças obtidas estão de acordo com a variação da compactidade dos blocos. Isso salienta a importância do TA no desempenho dos BTC no estado fresco e endurecido.

Tabela 14 - Principais resultados obtidos para as composições preliminares (Fase 1)

Composição	P_T (%)	Massa volúmica aparente (kg/m^3)		Resistência à compressão aos 14 dias (MPa)	
		Amb. Lab	Saturado	Amb. Lab	Saturado
UCEBTV10TA11	28,0	1928	-	2,94	-
UCEBTV17TA11	27,1	1992	-	3,17	-
UCEBTV30TA11	26,6	2027	-	3,78	-
UCEBTV17TA10	27,3	1989	-	2,96	-
CP8TV9TA11	26,8	2021	2164	10,52	4,97
CP8TV9TA13	27,8	2027	-	9,16	-
CRP8TV9TA12	30,4	1929	-	5,75	-
CRP8TV9TA13	30,5	1933	-	5,96	-
CRP8TV9TA14	30,3	1917	2094	6,33	3,35
CRP8TV9TA15	31,0	1929	-	6,05	-

De modo a complementar a campanha experimental anterior foram produzidas misturas adicionais (Tabela 15). Para atingir a espessura estipulada de 90 ± 1 mm, a massa dos BTC estabilizados com CRP foi reduzida para 7,8 kg e a dos não estabilizadas foi aumentada para 8,1 kg. A Tabela 15 apresenta o parâmetro “q”, a soma dos desvios quadrados (Δ^2) face à curva de referência de Fuller modificada e a massa volúmica fresca (ρ_f) do bloco, imediatamente após a sua produção.

Tabela 15 - Composições preliminares (Fase 2)

Composição	% Ligante ^a	%CRP	%TV ^a	%TA ^b	q	Δ^2	ρ_f (kg/m^3)
UCEBTV26TA12	0	0	26	12	0,30	356	2160
UCEBTV20TA12	0	0	26	11	0,33	412	2155
UCEBTV26TA11	0	0	20	12	0,30	356	2173
CP8TV13TA12	8	0	13	12	0,33	369	2145
CP8TV13TA13	8	0	13	13	0,33	369	2145
CP8TV13TA14	8	0	13	14	0,33	369	2143
CRP8TV13TA14	8	100	13	14	0,33	369	2068
CRP8TV13TA16	8	100	13	16	0,33	369	2085
CRP8TV13TA18	8	100	13	18	0,33	369	2078

^a – Em relação à massa de solo+RCD+TV; ^b – Em relação à massa de solo+RCD+TV+ligante

Na Tabela 16 resumem-se os vários resultados de resistência mecânica e massa volúmica obtidos em cada uma das misturas, determinados aos 12 dias de idade. Assim, os resultados desta campanha experimental não podem ser diretamente comparados com os da fase anterior. A Tabela 16 apresenta também uma estimativa da porosidade total (P_T) dos blocos. Observa-se, tal como na fase anterior, uma menor compactidade dos blocos estabilizados com CRP.

Nos blocos estabilizados com CRP, a maior resistência à compressão (6,9 MPa) foi alcançada com um teor de água de 14%, o que está em conformidade com os resultados observados na composição com 9% de TV produzida na fase anterior. Para os blocos estabilizados com CP, a resistência máxima (9,0 MPa) foi obtida na mistura com o menor teor de água, refletindo resultados semelhantes à fase anterior, mas para misturas produzidas com 9% de TV. Finalmente, nos blocos não estabilizados, produzidos com 26% de TV, houve uma diminuição da resistência à compressão de 3,23MPa para 2,66 MPa, após aumentar o teor de água de 11% para 12%. Estas variações são consistentes com a diferença de compactidade dos blocos. A resistência à compressão dos blocos não estabilizados com 26% e 20% TV foram semelhantes.

Deste estudo, conclui-se que a inclusão de 9-13% de resíduo TV proporciona resultados satisfatórios em blocos estabilizados com CRP e CP. Para os BTC não estabilizados é necessário um teor mais elevado deste material, visto que a argila é o único componente ligante destes blocos. Adicionalmente, é importante que o teor de água dos BTC estabilizados com CRP seja superior ao utilizado em BTC estabilizados com CP e em BTC não estabilizados.

Tabela 16 - Principais resultados obtidos para as composições preliminares (Fase 2)

Composição	P_T (%)	Massa volúmica aparente (kg/m^3)		Resistência à compressão aos 12 dias (MPa)	
		Amb. Lab	Saturado	Amb. Lab	Saturado
UCEBTV26TA12	27,7	1954	-	2,66	-
UCEBTV20TA12	27,9	1950	-	2,78	-
UCEBTV26TA11	26,6	1984	-	3,23	-
CP8TV13TA12	27,1	1968	2088	9,04	4,13
CP8TV13TA13	27,7	1955	2145	8,59	2,98
CP8TV13TA14	28,4	1954	2157	8,41	4,10
CRP8TV13TA14	30,9	1891	2119	6,89	3,35
CRP8TV13TA16	31,7	1906	2106	6,34	3,15
CRP8TV13TA18	32,9	1850	2061	4,88	2,88

3.5.2 Teor Ótimo de Água (Proctor)

Numa segunda fase considerou-se a modificação do ensaio de Proctor para avaliar o impacto da introdução de estabilizante no teor ótimo de água, de modo a alcançar a máxima compactidade. Este valor fornece uma primeira indicação do teor de água apropriado para a produção dos BTC. Em oposição ao sugerido pela norma ASTM D698 (2000), as amostras não foram peneiradas em 4 mm, mantendo-se o restante procedimento conforme descrito no capítulo 3.2.3.

Foram avaliadas quatro composições: três com 11% de resíduo TV, sendo uma estabilizada com 8% de CP (CP8/TV11), outra com 8% de CRP (CRP8/TV11), e a terceira e quarta sem estabilização (UCEB/TV11 e UCEB/TV18). Todas as misturas incluíam 25% de RCD. Estas composições foram selecionadas com base na conclusão anterior de que a inclusão de 9-13% de resíduo TV proporciona resultados satisfatórios em blocos estabilizados com CRP e CP. A mistura não estabilizada com 11% de resíduo TV foi considerada para comparação direta com as misturas estabilizadas, de modo a avaliar de forma mais correta a influência destes no TOA.

Na Figura 26 são exibidas as curvas de compactação obtidas para as misturas. Os TOA foram de 10,6%, 10,0%, 12,7% e 11,8% para as composições UCEB/TV11, CP8/TV11, CRP8/TV11 e UCEB/TV18, respetivamente. Estes níveis de teor de água estão associados a massas volúmicas secas de 1,78 kg/m³, 1,79 kg/m³, 1,71 kg/m³ e 1,78 kg/m³, respetivamente. Estudos anteriores, como o de Silva *et al.* (2009), também indicaram uma redução do TOA para misturas de solo-cimento. Confirma-se o aumento da exigência de água e a redução da compacidade após incorporação de CRP.

Importa salientar que a energia aplicada durante o processo de compactação influencia diretamente o teor ótimo de água necessário para alcançar a máxima compacidade. À medida que a energia de compactação aumenta, aumenta a massa volúmica máxima seca e reduz o TOA (Yusoff, *et al.*, 2016; Shivaprakash, 2021). Isso deve-se ao fato de que quanto maior a energia de compactação, mais próximos ficam os grãos da mistura uns dos outros. A energia de compactação é calculada pela Equação 3.11, na qual "N" representa o número de golpes (25), "n" o número de camadas (3), "P" a massa do pilão (2,5 kg), "h" a altura de queda do pilão (0,305 m), "g" a aceleração da gravidade (9.81 m/s²) e "V" o volume do molde (0,001 m³). No ensaio de Proctor, a energia de compactação foi de aproximadamente 0,56 MPa, um valor muito inferior ao utilizado na prensagem dos blocos (5-6 MPa).

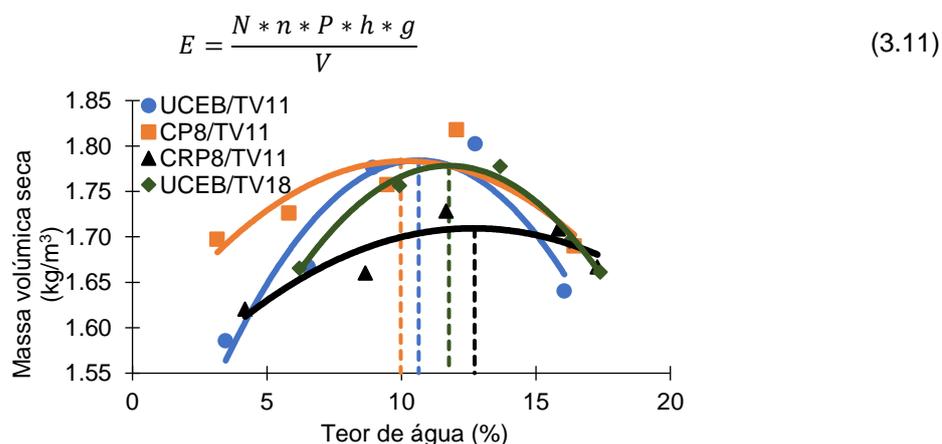


Figura 26 - Curva de compactação para as misturas UCEB/TV11, CP8/TV11, CRP8/TV11 e UCEB/TV18

3.6 PRODUÇÃO DOS BTC

Neste capítulo, apresenta-se as composições e descreve-se o processo de produção dos BTC, incluindo as etapas de mistura, moldagem e cura. Os blocos foram produzidos com uma dimensão de 295x140x90 mm. A produção contou com o apoio 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 150 blocos para ensaios de durabilidade. Para a produção da quantidade estipulada, foram precisos aproximadamente 1,4 m³ de terra, 40 kg de cimento Portland, 20 kg de cimento reciclado de cimento e 3 kg de cimento reciclado de betão.

3.6.1 Composição dos BTC

Na Tabela 17 apresenta-se a composição das várias misturas produzidas neste trabalho. De acordo com a ESCS (*European Soil Classification System*), baseada na EN ISO 14688-2 (2017), o solo FA é classificado como siciSa (*silty clayey sand*), o resíduo TV como cIM (*medium plasticity clay*) e as misturas FA+TV como cISA (*clayey sand*). A percentagem de resíduo TV nas misturas foi estabelecida tendo como referência os resultados do estudo preliminar em 3.5.

Tabela 17 – Composição dos BTC produzidos

Denominação	Ligante	% Ligante	%H ₂ O	% RCD	%TV
CEM8	CP 42,5	8	9	25	11
CEM8TH	CP 42,5	8	12	25	11
CEM8RCD0	CP 42,5	8	9	0	11
CEM8RCD15P	CP 42,5	8	9	15 (P)	11
CEM8RCD25P	CP 42,5	8	9	25 (P)	11
CEM4	CP 42,5	4	9	25	14
32.5CEM8	CP 32,5	8	9	25	11
CRP8	100% CRP	8	12	25	11
CRP4	100% CRP	4	10	25	14
CRP20CEM80	20% CRP + 80% CP	8	9	25	11
CRP50CEM50	50% CRP + 50% CP	8	10	25	11
CRB20CEM80	27% CRB + 73% CP	8.8	9	25	11
CRB50CEM50	60% CRB + 40% CP	10	9	25	11
UCEB	Não estabilizado	0	9	25	18

REF: referência; TH: igual teor de humidade a CEM8; CP: Cimento portland; CRP: Cimento reciclado de pasta; CRB: Cimento reciclado de betão; TV: Resíduo de Torres Vedras; P: Peneirado

A designação de cada mistura foi estabelecida com base nos seguintes critérios: as letras iniciais são referentes ao tipo de ligante utilizado (CEM, 32,5CEM, RCP ou RCB), seguidas por um número que indica o seu teor (4% ou 8%) na mistura; a abreviatura “UCEB” refere-se à mistura não estabilizada; finalmente, é indicada a quantidade de RCD utilizada, caso esta seja diferente de 25%. Nas misturas com dois ligantes, os algarismos indicam a percentagem de cada um deles na composição.

As misturas cuja designação termina em “P”, contêm RCD com granulometria superior a 250µm e fração de solo FA com granulometria inferior a 250µm. Isso permitiu realizar uma substituição direta de solo FA por RCD, garantindo condições idênticas de granulometria. Desse modo, é possível analisar a influência de diferentes percentagens de RCD, sem ser afetada por eventuais efeitos relacionados com diferenças na compacidade granulométrica.

O teor de ligante utilizado nas misturas foi definido em percentagem de solo FA, resíduo TV e RCD secos e tem por base as recomendações para a produção de BTC apresentadas no capítulo 2. No presente trabalho optou-se por considerar o valor de referência de 8%, igual a outros estudos também realizados no âmbito do Eco+RCEB (Nabais, 2023; Gonçalves, 2023). Para a maximização da sustentabilidade, valores mínimos de 4% de ligante foram também adotados.

De modo a compensar o facto do RCB apresentar uma percentagem de contaminação de agregado de 32,8%, promoveu-se um aumento no teor ligante até que a quantidade de material cimentício fosse igual. Assim, para as duas composições com 20% e 50%RCB, o teor de ligante total foi incrementado para 8,8% e 10%, respetivamente. Deste modo, garante-se o mesmo teor efetivo de 8% de material cimentício para ambas as misturas ($12\% \cdot 0,2 + 8\% \cdot 0,8$ e $12\% \cdot 0,5 + 8\% \cdot 0,5$). No que diz respeito à quantidade de água, esta foi estabelecida tendo como referência os resultados do estudo preliminar em 3.5. Porém, como a energia de compactação utilizada na prensagem dos blocos foi muito superior à da utilizada no estudo preliminar, a quantidade de água nas misturas de referência (CEM8, RCP8 e UCEB) foi reduzida. É importante salientar que a quantidade de água a ser adicionada à mistura teve em consideração o teor de humidade do solo FA, do resíduo TV e do RCD, na altura de utilização. Estes teores foram avaliados por intermédio de um humidímetro. Considerou-se ainda a água absorvida pelos constituintes da mistura, conforme determinado em 3.2 e 3.3. O teor de água foi estabelecido como uma percentagem em massa de todos os constituintes sólidos da mistura.

Após otimização, optou-se por produzir os BTC, com 8% CP e 8% CRP, com um teor de água de 9% e 12%, respetivamente e os não estabilizados com um teor de água de 9%. Para os BTC com CP foram também previstas misturas com 12% de água de modo a permitir uma comparação direta face aos BTC com CRP. Esta distinção é realizada através da sigla TH no final da sua designação. Para a mistura com 4% CP o teor de água foi mantido em 9% enquanto para a mistura com 4% CRP foi reduzido de 12% para 10%, pois diminuiu a exigência de água.

Na Figura 27 apresentam-se as curvas granulométricas limite da fração sólida das várias composições indicadas na Tabela 17. Conforme é possível observar, em todos os casos respeita-se o fuso limite sugerido na XP P-13-901 (2001) para a produção de BTC. Para as composições indicadas garante-se ainda que o teor de argila é inferior a 15% e o de finos inferior a 30%, estando de acordo com o recomendado na literatura.

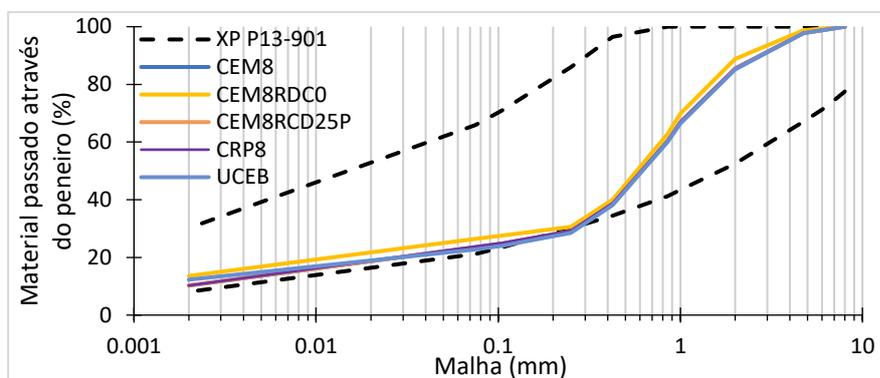


Figura 27 – Curvas granulométricas limite das composições de BTC e fuso XP P-13-901 (2001).

3.6.2 Preparação dos constituintes da mistura

O solo FA foi previamente espalhado em películas plásticas de forma a promover a secagem ao sol (Figura 28a). Isso facilita as etapas de pulverização e crivagem. Após secagem, a terra foi transportada por carrinhos de mão até ao pulverizador de pás mecânicas (Figura 28b). Neste equipamento o solo foi pulverizado, tendo sido sujeito a uma passagem. 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 crivo rotativo (Figura 28c) de malha quadrada de 8 mm, de modo a remover as pedras, os torrões e a matéria orgânica, e a corrigir a granulometria da terra a utilizar nos BTC. A terra foi seguidamente armazenada e protegida, até que chegasse a altura da sua utilização. No caso do resíduo TV e do RCD não existiu a necessidade de um tratamento prévio adicional.



Figura 28 – Preparação do solo FA: a) secagem ao sol; b) pulverização; c) crivagem

3.6.3 Mistura, prensagem e cura

Após a preparação do solo FA, seguiu-se a pesagem e a mistura dos constituintes numa misturadora de eixo vertical (Figura 29a), com uma capacidade em volume equivalente à de 20 blocos (cerca de 160 kg). Primeiramente começou-se por homogeneizar o solo FA, o resíduo TV, o RCD e o ligante. Durante a mistura, a betoneira era parada 2 vezes para manualmente remover o material aderido ou mal misturado nos bordos da betoneira, onde a mistura era menos eficiente. Em seguida, colocou-se a água gradualmente e misturou-se, parando a betoneira 2 vezes para remistura manual.

Seguidamente, a mistura húmida foi pesada e transportada até à prensa para ser moldada e compactada em blocos, utilizando-se uma prensa hidráulica OSKAM V/F (Figura 29b). Esta prensa hidráulica semi-automática tem a capacidade de produzir 60 blocos por hora. Os blocos foram produzidos com 295x140x90 mm. A operação de prensagem consiste na colocação prévia da quantidade de mistura pretendida num compartimento a jusante. Depois, ao acionar uma alavanca, a terra é inserida automaticamente no molde. Em seguida a terra é compactada hidraulicamente com uma pressão equivalente a cerca de 5-6 MPa. Esta é considerada de “pressão média” por Uzoegbo (2019), o terceiro grau em seis, nesta escala. Por fim, o bloco produzido é empurrado para fora do molde, enquanto a rampa é, de novo, acionada e o processo repetido.

Após a desmoldagem foram pesados 3 blocos por cada composição por forma a estimar a massa volúmica fresca das misturas. Nesta fase os blocos são frágeis, possuindo fraca coesão, pelo que o seu transporte até às paletes deve ser cuidadoso, por forma a evitar defeitos nas arestas e/ou fissuras. Nestas paletes os blocos foram colocados com espaçamento regular entre eles, regados regularmente com água e cobertos por uma lona de plástico. Após, pelo menos, 7 dias de cura, procedeu-se à arrumação dos blocos nas paletes por camadas (Figura 29c) de forma a se efetuar o transporte até aos LC-IST, onde se realizaram os vários ensaios de caracterização descritos em 3.8. Aqui, todos os blocos estiveram sujeitos às mesmas condições de cura em ambiente de laboratório, com temperatura variável entre 19 - 26°C e humidade relativa entre cerca de 55-75%.



Figura 29 – Produção BTC: a) misturadora de eixo vertical; b) prensa hidráulica; c) arrumação dos blocos

3.6.4 Construção dos muros de alvenaria

Dado que a realização de muros de alvenaria não foi o principal objetivo desta dissertação, remete-se para anexo a descrição desta atividade. A referência a este trabalho justifica-se pela participação ativa do autor desta dissertação nesta campanha experimental e pelo facto da exposição dos muros em ambiente real dar continuidade aos objetivos do presente trabalho e do plano definido no âmbito do projeto Eco+RCEB, em que este se insere.

3.7 CARACTERIZAÇÃO DOS BTC

Os BTC foram caracterizados em termos das suas principais propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. A falta de normas portuguesas levou, em alguns casos, à utilização de normas provenientes de outros países. Os blocos foram caracterizados aos 28 dias. As condições de ensaio dos BTC variaram de acordo com o 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 em ambiente laboratorial com temperatura de 19-26°C e humidade relativa de 55 a 75%;

Foram ensaiados meios blocos com dimensões médias de 147,5x140x90 mm³, exceto para o ensaio do tubo de Karsten, do *spray test* e para três provetes das composições CEM8, CEM8TH, CRP8 nos ensaios de absorção de capilar em que foram ensaiados blocos inteiros (295x140x90 mm³).

Na Tabela 18 é apresentado um resumo de todos os ensaios realizados, as normas utilizadas, bem como o número de provetes utilizados, a idade de ensaio e as condições de ensaio.

Tabela 18 – Resumo dos provetes utilizados em cada ensaio.

Ensaio	Norma	Composições	Nº de provetes	Idade (dias)	Condições de ensaio
Massa volúmica	NP EN 772-13 (2002)	Todas	-	0, 28	Fresco, AL
Resistência à compressão	NP EN 772-1 (2002) e NBR 8492 (1984)	Todas	2 – 10	28	AL, SAT
Erosão (<i>drip test</i>)	NZS 4298 (1998)	CEM8, CEM8TH, CRP8, UCEB	2	>28	AL
Perm. Vapor	ASTM E96 (1995) e EN 1015-19 (1998)	CEM8, CEM8TH, CEM8RCD0, CEM8RCD15P, CEM8RCD25P, CEM4, 32.5CEM8, CRP8, CRP4, CRP20CEM80, CRP50CEM50 e UCEB	2	>28	SE
Secagem	EN 16322 (2013)	Todas (exceto UCEB)	3	>28	ST
Abs. Imersão	LNEC E-394 (1993) e NBR 8492 (1984)	Todas (exceto UCEB)	2	28	SE
Abs. Capilar	NTC 5324 (2004) e NP EN 772-11 (2002)	CEM8, CEM8TH, CRP8	6	28	AL, SE
		CEM8RCD0, CEM8RCD15P, CEM8RCD25P, CEM4, 32.5CEM8, CRP4, CRP20CEM80, CRP50CEM50, CRB20CEM80, CRB50CEM50	3		
Tubo de Karsten	RILEM N° 11.4 (1980) e EN 16302 (2013)	Todas (exceto UCEB)	2	28	SE
<i>Spray test</i>	NZS 4298 (1998)	Todas	2	28	AL

3.7.1 Massa volúmica

A massa volúmica dos BTC é uma das características fundamentais destes, sendo medida imediatamente após a produção dos blocos (massa volúmica fresca), como aos 28 dias. O ensaio foi realizado de acordo com o previsto na norma EN 772-13 (2000) para blocos de alvenaria e consistiu na relação entre a massa e o volume do bloco. O volume foi determinado pela medição da geometria do bloco. Para a determinação da massa dos blocos, foi utilizada a balança Kern FKB, com uma precisão de 0,1 g. A massa volúmica fresca permitiu estimar a compactidade dos blocos, de forma indireta tendo sido determinada para três blocos por tipo de mistura.

3.7.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão seguiu as orientações da norma europeia para tijolos cozidos EN 772-1 (2002) e da norma brasileira para blocos de terra comprimida NBR 8492 (1984). Os blocos foram ensaiados em metades e segundo a face de maior área (147,5x140 mm²).

Antes da realização do ensaio, foi determinada a massa e a geometria de cada bloco. Este ensaio decorreu no LEC-IST, utilizando a prensa Controls, com uma capacidade de até 3000 kN e velocidade de carregamento mínimo de 0,1 kN/s. O ensaio consistiu na colocação de tábuas de madeira entre o bloco e o prato inferior e o prato superior da prensa. Isto assegura uma distribuição uniforme da carga no bloco e reduz o atrito entre o bloco e os pratos da prensa. De modo a reduzir a variabilidade dos resultados, a taxa de carregamento foi definida para 4kN/s. A força máxima suportada pelo bloco foi obtida diretamente do gráfico força-tempo, registado pelo software Automax Multitest (Figura 30).

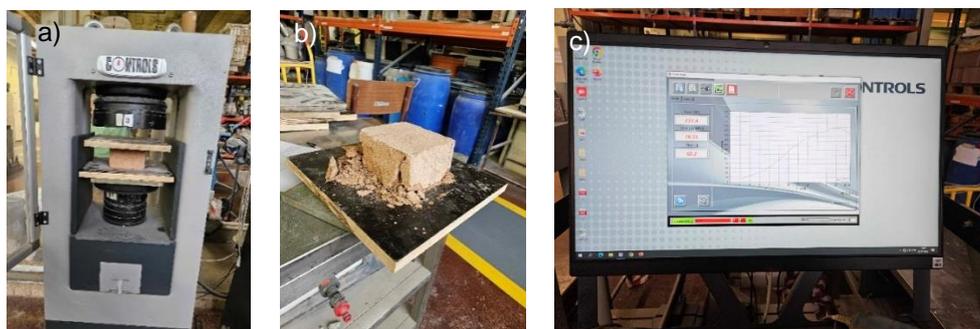


Figura 30 – Ensaio de compressão: a) preparação do ensaio; b) provete após ensaio; c) gráfico força-tempo registado pelo software Automax Multitest

A resistência á compressão foi calculada segundo a Equação 3.12:

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (3.12)$$

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.

3.7.3 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção por imersão foi realizado no LEC-IST, respeitando as normas LNEC E394 (1993) e NBR 8492 (1984). Este ensaio permite obter a porosidade aberta dos blocos, propriedade que se pode relacionar com a durabilidade e resistência à água.

Os blocos foram mantidos em ambiente de laboratório até aos 28 dias. Após este tempo, os provetes foram imersos em água (Figura 31a). Entre o tanque e os blocos foram colocadas ripas com, aproximadamente, 0,5 cm de altura, de forma a permitir que a absorção se desse, também, pela face inferior do bloco. Registou-se a massa dos blocos saturados, retirando a água em excesso, de fora do provete, com um pano. Foi também medida a massa imersa, colocando o bloco numa balança hidrostática (Figura 31b). Por fim, os provetes foram secos em estufa ventilada a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante e repetiu-se o ensaio, desta vez com os provetes secos, medindo-se a sua massa ao fim de 24 e 48 horas, limpando-se o excesso de água na superfície dos blocos.

O valor da absorção de água por imersão num determinado instante, é determinado em percentagem de massa segundo a Equação 3.13:

$$A_i = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.13)$$

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.



Figura 31 - Ensaio de absorção de água por imersão: a) tanque com os blocos; b) balança hidrostática

3.7.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade de acordo com as normas NTC 5324 (2004) e NP EN 772-11 (2002). Este ensaio permite avaliar o coeficiente de absorção capilar.

A preparação dos blocos passou pelo isolamento total das faces laterais do bloco, para que a absorção só pudesse ocorrer pela face submersa, como se verifica na Figura 32. Este isolamento foi conseguido utilizando fita adesiva de alumínio, material impermeável. Após esta preparação, os blocos foram colocados em tiras metálicas com cerca de 0,5 cm de altura. Estas tiras permitem que a água possa circular por baixo do bloco, não deixando que o contacto direto com o tanque obstrua a absorção. Contrariamente ao indicada nos documentos normativos, os provetes foram ensaiados ao alto, prolongando o tempo necessário a atingir a absorção total. Apenas 3 metades adicionais de 3 misturas (CEM8, CEM8TH e CRP8) foram ensaiadas deitadas, para fins comparativos. As metades de bloco foram previamente secos em estufa a 70 °C, até massa constante.

Os blocos foram pesados após 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 2 horas, 6 horas, 24 horas (Figura 32b) e 72 horas. Antes de cada pesagem, removeu-se a humidade superficial exterior com um pano absorvente.

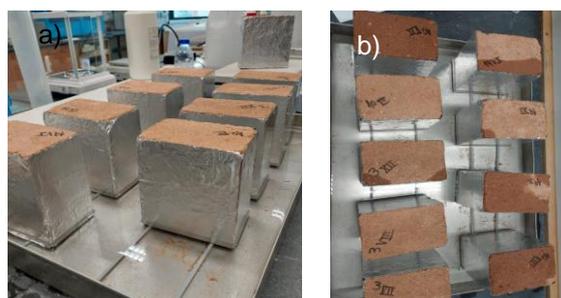


Figura 32 - Ensaio de absorção capilar: a) início do ensaio; b) provetes ao fim de 24 horas

O coeficiente de absorção de água por capilaridade, é determinado segundo a Equação 3.14:

$$C_c = \frac{(m_t - m_s)}{A\sqrt{t}} \times 100 \quad (3.14)$$

Em que, C_b (g/(cm².min^{0.5})) é o coeficiente de absorção de água por capilaridade, m_t (g) é a massa do provete em 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 (m²) é a área de contacto entre o provete e a água.

3.7.5 Absorção de água a baixa pressão (Tubo de Karsten)

O ensaio de absorção de água a baixa pressão foi realizado seguindo a norma EN 16302 (2013) Este ensaio pretende avaliar a permeabilidade da superfície do bloco ao contacto com a água. Este ensaio utiliza como instrumento o tubo de Karsten que possui uma abertura de 2,9 cm de diâmetro e uma capacidade de 4 cm³ de volume de água, mantida na vertical, como é visível na Figura 33. O ensaio decorreu na câmara seca, onde a temperatura e humidade relativa são de, aproximadamente, 22°C e 75%, respetivamente.

Previamente, os blocos foram secos em estufa ventilada a 70 °C, até massa constante. De seguida, os blocos foram levados para a câmara seca, onde lhes foi acoplado o tubo de Karsten na face lateral, com o auxílio de massa mástique, de forma a garantir que não há vazamento de água pelas bordas do tubo de Karsten. Este é, depois, enchido com água, começando a contar-se o tempo quando se atingirem os 4 cm³, e os volumes absorvidos após determinada passagem de tempo foram medidos. A norma EN 16302 (2013) recomenda medições aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, no entanto, estes intervalos demonstraram-se demasiados largos para o nível de absorção destes provetes. Desta maneira, optou-se por medições aos 5, 10 e 20 segundos, medindo novamente a cada 20 segundos a partir daí, até se passar para incrementos de 1 minuto, 2 minutos e assim sucessivamente.

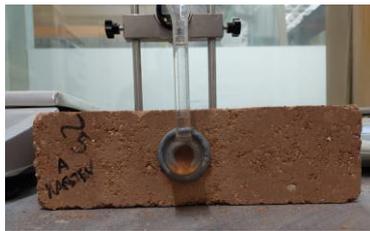


Figura 33 - Ensaio de absorção de água à baixa pressão (Karsten)

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 3.15:

$$C_{abs}^i = Declive \begin{cases} x : [0, t_i] \\ y : [0, \frac{m_i}{A}] \end{cases} \quad (3.15)$$

Em que, C_{abs}^i (kg.s/m²) é o coeficiente de absorção no instante i , A (cm²) é a área de absorção de água do bloco ($1,45^2 \times \pi$), 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 .

3.7.6 Erosão (*drip test*)

Este ensaio obedeceu a norma NZS 4298 (1998) e simula as condições de erosão de chuva leve, a que o bloco estará sujeito depois de implementado. Trata-se de um ensaio qualitativo, classificando os blocos em relação à profundidade de erosão (PE).

Os provetes foram mantidos em ambiente de laboratório durante mais de 28 dias. O ensaio consistiu em promover a queda de 100ml de água em gotas sobre a face de moldagem de menor dimensão de metade de um bloco, inclinado com um ângulo de 27° (Figura 34a). As gotas foram largadas a 400mm de altura, durante 20 a 60 minutos, a partir de um pano absorvente (Figura 34b) com uma largura de 22mm. Após o gotejamento dos 100ml, a profundidade de erosão foi medida. O provete foi, seccionado de acordo com o local de maior erosão (Figura 34c), medindo-se a penetração da humidade (PH) verificada. Os ensaios foram realizados em duas metades de bloco por mistura. Com base na norma NZS 4298 (1998) foram estabelecidos os seguintes índices de erosão em função do

valor de PE: índice 1 – erosão de 0mm; índice 2 – erosão entre 0 e 5mm; índice 3 – erosão entre 5 e 10mm; índice 4 – erosão entre 10 e 15 mm; índice 5 – erosão superior a 15 mm. Considerou-se que os provetes são adequados, quando a profundidade de penetração de humidade seja inferior a 120mm.



Figura 34 - *Drip test*: a) Esquema do ensaio; b) Pano absorvente; c) Profundidade de penetração da água

3.7.7 Erosão acelerada (*spray test*)

Este ensaio foi realizado no espaço exterior do LEC-IST, seguindo a norma NZS 4298 (1998). O intuito deste ensaio é determinar a erosão do provete ao longo do tempo, quando submetido a um jato de água a alta pressão. Este processo pretende simular vários anos de erosão em pouco tempo.

O ensaio consiste em direcionar um jato de água horizontal e perpendicularmente ao bloco com uma pressão controlada de 50 kPa e a 47cm de distância, durante 1 hora ou até à rotura do bloco, com paragens a cada 15 minutos para controlo da profundidade erodida (Figura 35a). A norma adotada determina que a face de exposição do bloco deve ser uma área circular com 150 mm de diâmetro. No entanto, devido à reduzida dimensão dos BTC produzidos (295x140x90 mm), foi necessário diminuir a área de exposição para 100 mm de diâmetro. Foram ensaiados 2 provetes inteiros por mistura, que ficaram armazenados em ambiente de laboratório até aos 28 dias. Todos os blocos, salvo os não estabilizados, apresentaram muito pouca ou nenhuma profundidade de erosão. Neste sentido, o ensaio para os blocos estabilizados foi realizado a uma pressão de 250 kPa, equivalente à pressão da rede de distribuição de Lisboa. Após completado o ensaio, os provetes foram seccionados ao meio da área erodida, por forma a medir a penetração da humidade no bloco, como se vê na Figura 23c.

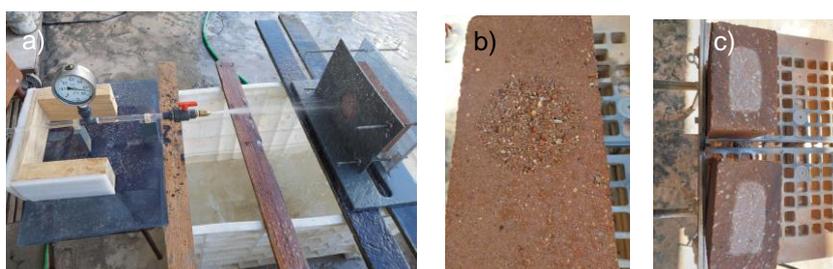


Figura 35 - Ensaio de erosão acelerada: a) equipamento utilizado; b) erosão superficial do bloco; c) penetração de humidade.

3.7.8 Permeabilidade ao vapor

A realização deste ensaio teve como base as normas ASTM E96 (1995) e EN 1015-19 (1998). O intuito deste ensaio é determinar a permeabilidade ao vapor, propriedade intrínseca de cada provete.

O ensaio consistiu na colocação, após secagem a 70°C até massa constante, de dois provetes em forma de disco (cerca de 1cm de espessura e 5,4 cm de raio) na abertura de copos de plástico, dentro dos quais se encontram cerca de 20g de CaCl₂. Após pesagem prévia, estes copos foram, então, colocados em tanques com cerca de 3cm de altura de água destilada, que permanece abaixo da rede

onde os copos estão colocados, não havendo contacto da água com estes. O tanque é depois tapado e selado, garantindo que se consegue uma atmosfera de, aproximadamente, 75% humidade relativa dentro do tanque e à volta dos copos (Gomes 2019). O CaCl_2 presente dentro do copo reage com o ar, absorvendo a humidade nele, e criando uma atmosfera sem humidade relativa dentro dos copos. Este gradiente de humidade relativa irá promover a passagem de água em forma de vapor pelo provete, reagindo novamente com o CaCl_2 , aumentando a massa do provete. Esta variação de massa traduz-se, portanto, na passagem de vapor pelo provete. As massas dos copos são medidas sem abrir o tanque, através de pequenos orifícios na sua tampa, a cada 24 horas tendo sido efetuadas, no nosso caso, medições intermédias. As medições são efetuadas com uma balança de suspensão. Este processo, bem como a montagem do ensaio, encontra-se representado na Figura 36.

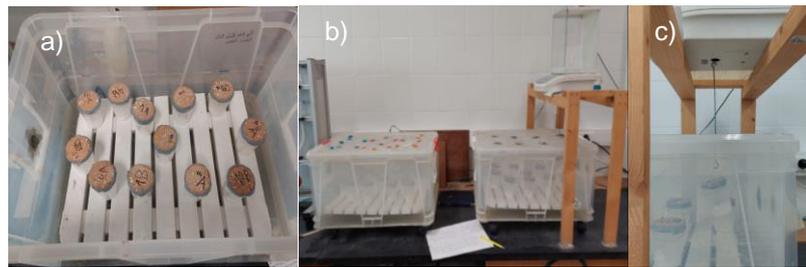


Figura 36 - Ensaio de permeabilidade ao vapor: a) e b) copos com provetes e CaCl_2 no tanque; c) pesagem dos copos.

Os resultados deste ensaio são obtidos através da permeância ao vapor, permeabilidade ao vapor do material e coeficiente de resistência à difusão do vapor de água, seguindo a Equação 3.16, 3.17 e 3.18.

$$\Lambda = \frac{m}{A \times \Delta p} \times 100 \quad (3.16)$$

$$W_{vp} = \Lambda \times t \quad (3.17)$$

$$\mu = \frac{W_{vp_air}}{W_{vp}} \quad (3.18)$$

Em que Λ é a permeância ao vapor de água [$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa})$], A é a área de contacto do provete (m^2), Δp é a diferença entre a pressão de vapor exterior e interior (Pa), t é a espessura média do provete (m), W_{vp} é a permeabilidade ao vapor de água do provete [$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa})$], W_{vp_air} é a permeabilidade ao vapor de água do ar [$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa})$] e μ é o coeficiente de resistência à difusão do vapor de água (adimensional).

A permeabilidade ao vapor de água do ar é obtida através da Equação 3.19, proposta por Künzle (1995).

$$W_{vp_air} = \frac{2 \times 10^{-7} \times T^{0,81}}{p_0} \quad (3.19)$$

A norma EN ISO 12752 propõe uma correção para a permeância ao vapor de água que tem em consideração a resistência da camada de ar entre o provete e o CaCl_2 (Equação 3.20)

$$A_{corr} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda} - S_d} \quad (3.20)$$

Em que S_d [s.m².Pa/kg] corresponde à resistência ao fluxo de vapor de água imposta pela camada de ar, que por sua vez é determinada a partir da Equação 3.21.

$$S_d = \frac{l_{air}}{W_{vp_air}} \quad (3.21)$$

Em que l_{air} é a espessura da camada de ar entre o provete e o CaCl₂ dentro do copo (0,05m). Com isto, é possível obter a permeabilidade ao vapor de água do provete e o coeficiente de resistência à difusão do vapor de água corrigidos (Equação 3.22 e Equação 3.23, respetivamente).

$$W_{vp_corr} = \Lambda_{corr} \times t \quad (3.22)$$

$$\mu_{corr} = \frac{W_{vp_air}}{W_{vp_corr}} \quad (3.23)$$

3.7.9 Secagem

Este ensaio permite aferir a taxa de secagem de água nos blocos e o seu índice de secagem. Para a realização deste ensaio recorreu-se à norma EN 16322 e foi realizado com os provetes do ensaio de absorção capilar. O ensaio foi realizado na face de moldagem perpendicular à de prensagem dos blocos.

Os blocos foram saturados até massa constante e transportados para a câmara seca (22°C ±3°C, 75% HR). De seguida, e como as faces laterais já estavam previamente seladas devido ao ensaio de absorção capilar a face inferior foi selada com fita adesiva de alumínio (Figura 37). Isto garante que a secagem só se efetuará através da face superior, ou seja, garantindo um fluxo unidirecional. Após isto, iniciou-se a contagem de tempo, começando a medição das massas dos provetes a cada hora. Após o primeiro dia, as massas dos provetes foram medidas uma vez por dia. Estes valores permitiram obter a evolução da perda de massa ao longo do tempo e, com isto, determinar a inclinação da reta de regressão e, conseqüentemente, estabelecer a taxa de secagem de água. O índice de secagem (IS) foi calculado através da Equação 3.24.



Figura 37 – Ensaio de secagem: provetes selados na câmara seca

$$IS = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(W_i) * dt}{W_o * t_f} \quad (3.24)$$

Em que t_f é o tempo final do ensaio (min), W_o é a quantidade de água inicial, expressa em percentagem relativamente à massa seca do provete e W_i é a quantidade de água no interior do provete em função do tempo, expressa em percentagem relativa à massa seca do provete. A um maior valor de IS está associada uma maior dificuldade de secagem.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo analisam-se e interpretam-se os resultados obtidos durante a campanha experimental descrita no capítulo 3, planeada de acordo com os objetivos definidos no capítulo 1. Conforme referido, o principal objetivo consiste em avaliar a eficiência do novo ligante de baixo carbono, cimento reciclado, na estabilização de blocos de terra comprimida (BTC), nomeadamente no que se refere à sua durabilidade face à ação da água. Para tal, diferentes BTC, associados a vários tipos (CRP, CRB, CP, CP32.5) e teores de estabilizante (0%, 4%, 8%), à incorporação parcial de CRP em substituição de CP (20%, 50%) e à substituição parcial de solo por RCD (0%, 15%, 25%), foram analisados em termos de resistência mecânica, absorção de água, permeabilidade ao vapor e erosão acelerada por ação da água. Por motivos de comparação, foram também considerados BTC de referência produzidos com cimento Portland corrente (CP) e BTC não estabilizados. Na Tabela 19 em seguida resumem-se as composições consideradas neste estudo.

Tabela 19 – Resumo das composições dos BTC

Denominação	Ligante	%Ligante	%TH _{ef}	% RCD	%TV	a/l _{ef}
CEM8	CP 42,5	8	9	25	11	1,22
CEM8TH	CP 42,5	8	12	25	11	1,62
CEM8RCD0	CP 42,5	8	9	0	11	1,22
CEM8RCD15P	CP 42,5	8	9	15 (P)	11	1,22
CEM8RCD25P	CP 42,5	8	9	25 (P)	11	1,22
CEM4	CP 42,5	4	9	25	14	2,34
32.5CEM8	CP 32,5	8	9	25	11	1,22
CRP8	100% CRP	8	12	25	11	1,62
CRP4	100% CRP	4	10	25	14	2,60
CRP20CEM80	20% CRP + 80% CP	8	9	25	11	1,22
CRP50CEM50	50% CRP + 50% CP	8	10	25	11	1,35
CRB20CEM80	27% CRB + 73% CP	8.8	9	25	11	1,11
CRB50CEM50	60% CRB + 40% CP	10	9	25	11	0,99
UCEB	Não estabilizado	0	9	25	18	-

TH: igual teor de humidade a CEM8; CP: Cimento portland; CRP: Cimento reciclado de pasta; CRB: Cimento reciclado de betão; TV: Resíduo de Torres Vedras; P: Peneirado

4.1 MASSA VOLÚMICA E POROSIDADE

Para as composições indicadas em 3.6.1, na Tabela 20 resumem-se os valores de massa volúmica obtidos imediatamente após a execução dos blocos (de agora em diante designada de massa volúmica fresca, MV_f) e após 28 dias (MV_{28d}). Com base no conhecimento da composição dos BTC, das massas volúmicas dos materiais utilizados e dos valores determinados de MV_f , é possível estimar o teor de vazios acidentais (V_v), que ficam nos BTC e não são invadidos pela água de mistura (Tabela 20). Finalmente, é ainda possível estimar a porosidade total dos blocos, $P_{T,BTC}$, através da expressão 4.1, a que corresponde um valor de porosidade a longo prazo, após hidratação suficiente dos blocos. Basicamente, $P_{T,BTC}$ é estimada pela soma de V_v e o volume de vazios associados à água não consumida na hidratação. Na expressão 4.1, V_v é o volume de vazios, M_w e ρ_w são a massa de água total e a massa volúmica da água, respetivamente, M_L é a massa de estabilizante, w_b é a água combinada após hidratação completa, considerada 0,23 para CP e 0,22 para CR (Bogas *et al.*, 2022), e α_H é o grau de hidratação a longo prazo, considerado 0.8 para ambos os tipos de estabilizantes.

$$P_{T,BTC} = Vv + \frac{M_w - \alpha_H \times w_b \times (1 - 0.254) \times M_t}{\rho_w} \quad (4.1)$$

Tabela 20 – Massa volúmica, MV, e porosidade total, $P_{T,BTC}$, dos BTC

BTC	TH _{ef} (%)	a/l _{ef}	V _v (%)	MV _f (Kg/m ³)	MV _{28d} (Kg/m ³)	P _{T,BTC} (%)
CEM8	9	1,22	6,9	2155	2018	26,0
CEM8TH	12	1,62	3,8	2151	1986	28,1
CEM8RCDO	9	1,22	8,2	2169	2082	26,4
CEM8RCD15P	9	1,22	7,7	2153	2043	26,4
CEM8RCD25P	9	1,22	6,7	2159	2058	25,8
CEM4	9	2,34	5,9	2168	2012	26,2
32.5CEM8	9	1,22	6,8	2157	2038	26,0
CRP8	12	1,62	6,0	2097	1978	29,8
CRP4	10	2,60	7,1	2112	1961	28,7
CRP20CEM80	9	1,22	7,6	2137	1998	26,6
CRP50CEM50	10	1,35	7,8	2107	1960	28,2
CRB20CEM80	9	1,11	8,4	2122	2018	27,0
CRB50CEM50	9	0,99	8,6	2118	2012	27,0
UCEB	9	-	4,5	2188	2001	26,2

A massa volúmica fresca relaciona-se diretamente com a composição dos BTC, teor de água (TH) com que foram produzidos, e o grau de compactação atingido após prensagem. Os valores de massa volúmica fresca encontram-se entre 2097 kg/m³ e 2188kg/m³, dentro do intervalo de valores recomendado por Rigassi (1985) para BTC. Estes valores são ligeiramente superiores aos atingidos em trabalhos anteriores realizados no IST, cujas massas volúmicas foram geralmente inferiores a 2100 kg/m³, (Silva 2015, Lopes 2015, Azevedo 2021). Dois motivos contribuem para os maiores valores de compacidade atingidos face a outros autores. Por um lado, neste trabalho foi utilizado pela primeira vez uma prensa hidráulica semi-automática que garante maiores pressões de compactação (5-6 MPa) e menor variabilidade entre blocos do que a prensa manual utilizada nos trabalhos anteriores (2-4 MPa, Gonçalves 2022, Silva 2015). Por outro lado, conforme discutido em 3.5, no presente trabalho privilegiou-se a otimização das misturas granulares à curva de referência de Fuller e de modo a respeitar o fuso recomendado para os BTC.

Por sua vez, a porosidade total variou entre 25,8 e 29,8%, dependendo do tipo de composição, que pelas razões já referidas para a massa volúmica foram inferiores às obtidas em trabalhos anteriores (Silva 2015, Lopes 2015, Azevedo 2021). De facto, em geral verifica-se um aumento consistente da porosidade com a redução de massa volúmica fresca (Figura 38). Porém a correlação não é elevada. Isso resulta do facto da massa volúmica fresca considerar toda a água da mistura, ao passo que a porosidade total é reduzida da quantidade de água de hidratação. Por esse motivo, os BTC não estabilizados tendem a apresentar uma maior porosidade para uma dada massa volúmica fresca do que os BTC estabilizados. O mesmo sucede em misturas com diferente TH. Por exemplo, os BTC com 8% CP, mas diferente TH (CEM8, CEM8TH, Tabela 20), apresentam idêntica massa volúmica fresca, mas diferente porosidade total. Apesar de até se terem atingido condições de maior compacidade para TH de 12% (V_v inferior em CEM8TH), o aumento da relação a/l_{ef} leva a que grande parte da água não participe na hidratação, evaporando e aumentando a porosidade (Tabela 20). Constatações idênticas

foram obtidas por Gonçalves (2022), que apenas verificou correlações elevadas quando a porosidade total foi confrontada com a massa volúmica seca.

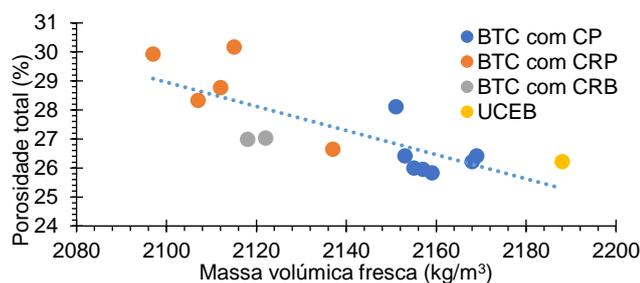


Figura 38 – Relação entre porosidade total e massa volúmica fresca.

A estabilização com CRP conduziu a uma redução geral da massa volúmica fresca e ao aumento da porosidade, face aos BTC de referência com CP ou não estabilizados. Por comparação entre BTC de idêntico teor de ligante e de RCD, MV_f reduziu cerca de 3% e a porosidade aumentou, em média, 14%. Uma razão para essa diferença resulta dos BTC com CRP terem sido produzidos com maior TH, e maior a/l , devido à sua maior exigência de água. Conforme documentado por vários autores, uma grande desvantagem do cimento reciclado é a sua elevada demanda de água, resultante da sua elevada área superficial, natureza porosa e presença de grande quantidade de CaO livre (Shui, *et al.* 2009; Zhang, *et al.*, 2018; Baldusco, *et al.*, 2019; Real *et al.*, 2020; Bogas *et al.*, 2022). Na Tabela 11 em 3.4.3 é verificável que a área superficial do CRP foi cerca de 5 vezes superior à do CP. Mesmo tendo em consideração misturas de igual TH, e como tal, de igual relação a/l_{ef} , a porosidade total foi 6,5% superior nos BTC com CRP (CRP8 vs CEM8TH). Isso resulta de se terem atingido condições de maior compactidade no BTC com maior TH (12%), levando à redução do volume de vazios, V_v . Logo, para idêntico TH, a compactação foi dificultada pela inclusão de CRP. Porém, importa salientar que para os valores de TH definidos como ótimos na produção dos BTC com 8%PC (9%) e com 8%CRP (12%), o teor de vazios foi semelhante a ligeiramente inferior nos BTC com CRP.

Como esperado, em geral, a massa volúmica aos 28 dias seguiu a mesma tendência da massa volúmica fresca, sendo superior nos BTC com CP do que com CRP (Tabela 20). Porém, a MV_{28d} depende das condições de secagem e nível de hidratação dos BTC, para além dos fatores referidos para a MV_f . Por esse motivo, os BTC não estabilizados foram os que sofreram maior redução de massa volúmica até aos 28 dias (187 kg/m³), visto que a água não é retida para hidratação e a microestrutura não é densificada, facilitando a secagem. Em relação às restantes misturas, a redução de massa volúmica não seguiu uma tendência clara, tendo sido semelhante nos BTC com CRP e com CP de igual teor de ligante (4% ou 8%). Em rigor, a redução de massa volúmica para 4 e 8% de ligante foi ligeiramente superior nos BTC com CP do que com CRP, de 156 kg/m³ e 137 kg/m³ face a 151 kg/m³ e 119 kg/m³, respetivamente. Isso demonstra que os BTC com CRP terão atingido níveis de hidratação semelhantes ao dos BTC com CP. O mesmo foi concluído noutros trabalhos realizados em argamassas, betões (Real *et al.*, 2020; Bogas *et al.*, 2023) e BTC estabilizados (Azevedo *et al.*, 2023).

No entanto, apesar de isso não ser confirmado nos resultados obtidos, poderia ser esperada uma menor fixação de água nas misturas com CRP do que com CP. Por um lado, o CRP ao ser essencialmente composto por um polimorfo de C_2S (α_H-C_2S), gera produtos de hidratação com ligeiramente menos água combinada do que o C_3S do CP, 22% e 23%, respetivamente (Bogas *et al.*,

2020, Neville 1995). Por outro lado, é reconhecido que o CRP tende a gerar menor volume de produtos hidratados a longo prazo, visto que ao ser fabricado a partir de pastas antigas, possui uma pequena parte de compostos carbonatados, que se tornam inativos após termoativação (Bogas *et al.*, 2021; Real, *et al.*, 2021; Carriço *et al.*, 2022).

Os BTC com 4% de teor de ligante revelam diferenças de massa volúmica intermédias entre as obtidas nos BTC não estabilizados e nos BTC com 8% CP, visto que atingem níveis de hidratação inferiores para idênticas quantidades de água inicial da mistura. Ainda em relação à influência do teor de ligante, constata-se que independentemente do tipo de ligante, a compacidade (teor de V_v) não foi significativamente afetada por este facto, o mesmo se passando com a porosidade total, $P_{T,BTC}$. O ligeiro aumento de porosidade total dos BTC com 4% PC face a 8% PC justifica-se pelo menor volume de produtos hidratados que foi gerado. Nos BTC com 4% CRP ($P_{T,BTC}=28,8\%$) verificou-se uma tendência contrária face aos BTC com 8% CRP ($P_{T,BTC}=29,9\%$), pois a diminuição do TH terá compensado o aumento da relação a/l_{ef} .

Os BTC não estabilizados apresentaram baixa porosidade que resultou da elevada compacidade atingida durante a produção dos blocos, para valores reduzidos de TH, conforme demonstra o mais baixo valor de V_v atingido (4,5%, Tabela 20). Note-se que os TH indicados na Tabela 19 são valores efetivos, sem ter em consideração a água de absorção dos agregados. A elevada aproximação de MV_{28d} entre os BTC não estabilizados e os BTC com CRP, comprova a capacidade de reidratação deste ligante.

A substituição parcial de CP por CRP conduziu a valores de massa volúmica e porosidade intermédias das obtidas nos BTC produzidos com 100% de cada um destes estabilizantes, conforme observado na Tabela 20 e Figura 38. Em relação aos BTC com CRB, conforme abordado em 3.4.3, este ligante foi produzido com cerca de 67% de pureza, apresentando também na sua constituição uma percentagem elevada de agregado composto por areia siliciosa e brita calcária presente no betão de origem. Purezas mais elevadas, superiores a 75% em peso, foram reportadas em trabalhos anteriores (Hu 2019, Cyrne 2021). Como referido, esse nível de pureza foi apenas atingido na fração 250-500 μ m, obtendo-se purezas menos aceitáveis na fração 150-250 μ m, que constituía 50% do CRB (3.3.2). Assim, houve necessidade de corrigir o teor de ligante das misturas, de modo a que a quantidade de material cimentício fosse semelhante à dos BTC de referência com 8%CP ou 8%CRP. Neste caso, CRB20CEM80 e CRB50CEM50 foram produzidos com 8,8% e 10% de ligante, respetivamente. Por sua vez, foi possível produzir ambos os BTC com o mesmo teor de água, TH, dos BTC de referência com CP, verificando-se que a exigência de água foi semelhante. Dessa forma, garante-se que estas misturas foram produzidas com a mesma relação a/l_{ef} equivalente dos BTC com CP. De facto, tendo em consideração que apenas 67% do CRB é material cimentício (equivalente ao CRP), a relação a/l_{ef} indicada na Tabela 20 corresponde a um a/l_{ef} equivalente de 1,22, quer para CRB20CEM80 quer para CRB50CEM50. Isso justifica as idênticas massas volúmicas e porosidades totais obtidas nestas misturas, cuja compacidade atingida foi ligeiramente inferior à do CEM8 (maior percentagem de V_v e de $P_{T,BTC}$, Tabela 20)

Como esperado, a utilização de cimento CEM II/B-L 32,5 N em substituição de CEM I 42,5 R teve uma influência pouco significativa na massa volúmica e porosidade total dos BTC.

Em relação à incorporação de RCD, conforme discutido em 3.3, para os BTC com 0 a 25% RCD (CEM8RCD0, CEM8RCD15, CEM8RCD25) houve a preocupação de se realizar a substituição sem alterar a granulometria. Como tal, a principal diferença entre estas misturas reside na incorporação de um agregado ligeiramente mais poroso e da menor massa volúmica. Assim, verifica-se uma ligeira tendência para a redução de massa volúmica fresca com a incorporação de RCD. Esta redução é mais importante aos 28 dias, após secagem, devido ao facto dos BTC com RCD estarem associados a maior quantidade de água total resultante da água de absorção dos agregados. Porém, as diferenças de massa volúmica foram pequenas, em especial devido a uma ligeira melhoria que ocorreu ao nível da compacidade granular com o aumento da percentagem de RCD (% Vv, Tabela 20). Por esse motivo, não se verificou um aumento esperado da porosidade total, que inclui os vazios dos agregados acessíveis à água, com o aumento do teor de RCD.

Comparando os BTC produzidos com substituição direta de terra por 25% RCD (CEM8) com os BTC produzidos com substituição de 25% RCD mantendo a mesma granulometria (CEM8RCD25), verifica-se que as diferenças de massa volúmica e porosidade total foram muito pouco significativas, embora conducentes a compacidades ligeiramente superiores no último caso. Isso contraria a melhor aproximação à curva de Fuller observada em 3.5.1, embora a diferença entre estas composições tenha tido pouco impacto na curva granulométrica da mistura. Assim, pode-se concluir que a substituição direta ou respeitando a granulometria fez pouca diferença, o que está de acordo com o facto do solo FA e o RCD apresentarem curvas granulométricas parecidas (3.2.1). Em suma, conclui-se que a substituição de solo por RCD não afetou negativamente a porosidade e compacidade global dos BTC, melhorando inclusivamente estas propriedades. Neste aspeto a escolha de 25% RCD para as misturas de referência foi apropriada.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Tabela 21 resumem-se os resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias obtidos nos BTC ($f_{c,28d}$), bem como os respetivos coeficientes de variação. Na mesma tabela indica-se também os valores obtidos de resistência à compressão dos BTC ensaiados em condições saturadas ($f_{c,sat}$), e da resistência não confinada ($f_{c,un}$), ambos à mesma idade de 28 dias.

A resistência não confinada permite uma melhor perceção das resistências obtidas e da sua comparação com a de outros autores, visto que por princípio não depende da geometria dos mesmos. De facto, é reconhecido que como em qualquer material, a resistência à compressão dos BTC é muito afetada pelo *aspect ratio* do bloco (H/L) (Rodrigues, 2019, Neves, 2019, Morel *et al.* 2007, Nabais 2022). De acordo com a norma HB 195 (2002), $f_{c,un}$ pode ser obtido, corrigindo o valor de resistência à compressão dos blocos por valores interpolados dos seguintes fatores de correção, em função de H/L: 1 (H/L=5); 0,8 (H/L=2); 0,7 (H/L=1); e 0,5 (H/L=0,4). Dado que os blocos foram produzidos com H/L=9/14=0,643, o fator de correção usado para determinar $f_{c,un}$ foi de 0,58.

Em relação à resistência em condições saturadas, foram apenas ensaiados os BTC com 8% de estabilizante e com diferentes percentagens de substituição de CP por CRP ou CRB (0 a 100%). Nos não estabilizados não se apresenta a resistência saturada, visto que estes blocos perderam a sua coesão em poucos minutos quando imersos em água.

Tabela 21 – Resistência média à compressão aos 28 dias, $f_{c,28d}$, saturada, $f_{c,sat}$, e não confinada $f_{c,un}$

BTC	Binder (%)	TH _{ef} (%)	a/l _{ef}	P _{T,BTC} (%)	$f_{c,28d}$ (MPa)	CV _{fc} (%)	$f_{c,sat}$ (MPa)	$f_{c,un}$ (MPa)
CEM8	8	9	1,22	26,0	13,6	4,8	6,5	7,9
CEM8TH	8	12	1,62	28,1	12,6	1,1	5,6	7,3
CEM8RCD0	8	9	1,22	26,4	13,6	4,7	-	7,9
CEM8RCD15	8	9	1,22	26,4	11,9	8,4	-	6,9
CEM8RCD25	8	9	1,22	25,8	14,1	2,4	-	8,2
CEM4	4	9	2,34	26,2	9,0	1,5	-	5,5
32.5CEM8	8	9	1,22	26,0	11,0	2,9	-	6,4
CRP8	8	12	1,62	29,9	9,8	2,1	4,8	5,7
CRP4	4	10	2,60	28,8	6,0	4,3	-	3,5
CRP20CEM80	8	9	1,22	26,6	12,5	7,4	6,2	7,2
CRP50CEM50	8	10	1,35	28,3	10,9	5,3	5,3	6,3
CRB20CEM80	9	9	1,11	27,0	12,5	5,6	6,1	7,2
CRB50CEM50	10	9	0,99	27,0	11,1	3,3	5,5	6,4
UCEB	-	9	-	26,2	3,6	9,5	-	2,1

Como referido, para além da geometria, a resistência à compressão dos BTC é ainda afetada por outros fatores, como o teor de água da mistura, as condições de cura e as características da prensa, o que dificulta a comparação com os resultados de outros autores (Kerali 2001). Neste estudo, para os BTC com 8 % de CP, foi obtida uma resistência não confinada de 6,4 a 8,2 MPa, dependendo do teor de RCD e tipo de cimento (II/B-L 32,5 ou I42,5). Valores inferiores a 4 MPa são reportados por Bahar *et al.* (2004), Elahi *et al.* (2020) e Namango (2006) em BTC ensaiados secos com 9-10% de CP. O valor de 5 MPa foi obtido por Ngowi (1997), também em BTC secos com 10% CP. Em trabalhos realizados no IST com prensas manuais, Azevedo (2021) e Gonçalves (2022) obtiveram resistências não confinadas de 4,26 MPa e 7,4 MPa para BTC secos com 10% e 8% CP, respetivamente. Note-se que estes valores, ao contrário dos obtidos no presente trabalho, referem-se a ensaios em condições secas, para o qual as resistências tendem a ser mais elevadas. Assim, apenas o trabalho de Gonçalves (2022) conduziu a valores próximos dos obtidos no presente estudo (7,9 MPa no CEM8, mas ensaiado em ambiente de laboratório). Um aspeto comum entre este trabalho e o de Gonçalves (2022) que pode justificar esta melhoria significativa de resultados é o facto de ambos terem procurado otimizar a curva granulométrica do solo à curva de Fuller, permitindo atingir maiores compacidades. De facto, Azevedo (2021) e Gonçalves (2022) estimaram valores de porosidade total de 38,4% e 27,7%, respetivamente, sendo apenas este último ligeiramente superior ao obtido no presente estudo em BTC de composição semelhante (26%). De facto, conforme discutido mais adiante, existe uma boa correlação entre a resistência à compressão e a porosidade total. Ainda em relação aos valores de $f_{c,un}$, importa salientar que mesmo em misturas com apenas 4% de teor de CP foi possível atingir resistências superiores a 5 MPa. Mesmo nos BTC com cimento reciclado, associados a menores resistências, conforme discutido mais à frente, $f_{c,un}$ foi de 3,5 e 5,7 MPa, para 4% e 8% de teor de ligante, respetivamente. Qualquer destes valores é largamente superior ao mínimo de 2,0 MPa recomendado na norma HB-195 (2002) para BTC secos. Mesmo os não estabilizados superaram este valor.

A mesma norma refere que em provetes saturados a resistência deve ser superior a 1,0 MPa. No presente estudo a resistência não confinada convertida de $f_{c,sat}$ é de 2,8 MPa e 3,8 MPa nos BTC com 8% CRP e 8% CP, respetivamente, cumprindo também os valores exigidos. Nos BTC, a resistência deverá depender essencialmente da porosidade global e da coesão atingida entre as partículas de solo. Assim, quanto melhor forem as características do estabilizante (desenvolvimento de produtos de

hidratação), menor for a porosidade da matriz ligante e maior a compacidade atingida nos blocos, maior será a resistência mecânica (Houben e Guillaud, 2008, Gonçalves 2022).

Assim, tal como observado em outros trabalhos, a resistência à compressão aumentou com o teor de ligante (Tabela 21, Bahar *et al.*, 2004, Elahi *et al.*, 2020, Namango 2006, Silva 2015). De facto, a um menor teor de ligante está associada uma matriz cimentícia de maior a/l_{ef} (Tabela 21) e menor compacidade, reduzindo a capacidade de ligação entre as partículas de solo (Kerali 2001). A redução foi de 21% e 39% entre 8 e 4% de CP e CRP, respetivamente. Esta redução foi inferior à obtida por Azevedo (2011), de 45% entre 10% e 5%. Uma razão poderá estar relacionada com o facto do solo de Azevedo (2011) conter maior teor de argila ($\cong 13\%$) e minerais argilosos expansivos (Nontronite), dificultando mais a ação estabilizante do cimento. De qualquer forma, ambos os estabilizantes, mesmo quando utilizados em baixas dosagens (4%), conduziram a resistências muito superiores à dos BTC não estabilizados, 1,7 e 2,6 vezes superiores nos BTC com CRP e CP, respetivamente.

Ainda assim, apesar dos dois tipos de estabilizantes utilizados terem sido eficientes a aumentar a resistência mecânica, o CRP terá sido menos efetivo do que o CP. De facto, tendo em conta iguais teores de estabilizante, a resistência nos BTC com CRP foi 38% (8% ligante) e 57% (4% ligante) inferior à dos BTC com CP. Como referido, devido à maior exigência de água do ligante, houve necessidade de considerar maiores TH na produção dos BTC com CRP, fazendo aumentar a relação a/l_{ef} . No entanto, mesmo os BTC com CP e igual TH (CEM8TH) apresentaram resistências 27% superiores. Por sua vez, o TH foi relativamente semelhante nos BTC com 4% CP ou 4% CRP. Assim, outro fator deverá ser mais importante do que o TH. Neste caso, conforme salientado anteriormente, a porosidade total deverá assumir um papel mais relevante.

Tal como é possível observar na Figura 39, existe uma boa correlação entre a resistência à compressão e a porosidade total quando se tem em consideração diferentes tipos e teores de ligante. Conforme referido, a resistência depende essencialmente da capacidade ligante do estabilizante e da porosidade total. Assim, isolando o segundo fator do tipo de ligante, confirma-se uma boa correlação.

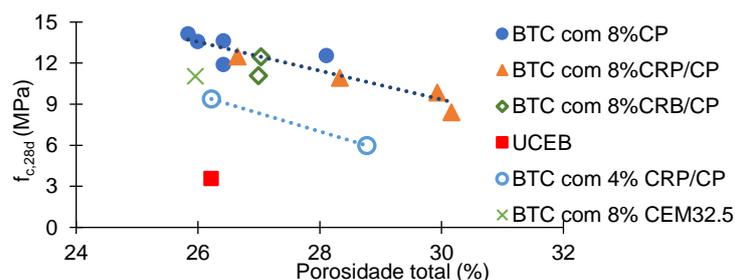


Figura 39 – Resistência à compressão aos 28 dias *versus* porosidade total

Salienta-se o facto de existir uma única relação entre a porosidade e a resistência à compressão nos BTC com CP ou CRP. O mesmo foi observado por Gonçalves (2022). Isso confirma que ambos os tipos de estabilizante exerceram uma ação ligante semelhante, estando as diferenças de resistência relacionadas apenas com a compacidade atingida nos blocos. Logo, caso fosse possível garantir porosidades idênticas nos BTC com CP e com CRP, a sua resistência seria também idêntica. Esta é uma importante conclusão que valida a utilização do CRP como agente estabilizante.

Na Figura 39 é claro que para uma mesma porosidade, a resistência diminui com a quantidade de estabilizante, ocorrendo uma fraca capacidade ligante nos BTC não estabilizados, cuja coesão é

apenas assegurada pelo seu fraco teor de argila. Observa-se ainda que o cimento II/B-L 32,5, de menor capacidade de hidratação do que o CP, conduziu a um comportamento mais próximo do observado nos BTC com apenas 4% estabilizante. Isso resulta de cerca de 30% deste cimento ser composto por fíler calcário (3.4.1). Assim, pode-se também concluir que o CRP é mais efetivo na estabilização do que um cimento de baixa classe de resistência.

É reconhecido na literatura que tende a ocorrer um menor desenvolvimento de produtos de hidratação a longo prazo no cimento reciclado, em resultado da maior quantidade de substâncias carbonatadas no produto anidro (Bogas *et al.*, 2021; Carriço *et al.*, 2021). Dessa forma, a capacidade de hidratação é diminuída e o cimento reciclado torna-se menos eficiente. Em face da curva apresentada na Figura 39, este fator não terá tido grande importância no presente estudo. Isso justifica-se pelo facto do CRP ter sido produzido a partir de blocos de pasta expostos durante muito pouco tempo a carbonatação real.

A incorporação parcial de CRP ou CRB em substituição de CP conduziu a resistências intermédias das obtidas com 100% de CRP ou 100% CP (Figura 40). A evolução da resistência seguiu o inverso do aumento da porosidade total, e foi muito semelhante nos BTC com CRP ou com CRB. Conforme referido, a menor pureza do CRB foi compensada pelo aumento do teor de ligante, de modo a que o teor de material cimentício e a relação a/l se mantivessem semelhantes. Dessa forma demonstra-se que o método de separação considerado foi efetivo em produzir cimento reciclado a partir de betão. Até 50% de incorporação, a redução de resistência foi inferior a 20%. Conclui-se ainda que para valores de TH idênticos (CEM8TH, Tabela 20), a resistência nos BTC com 100% CP ou com 20% de CRP foi idêntica.

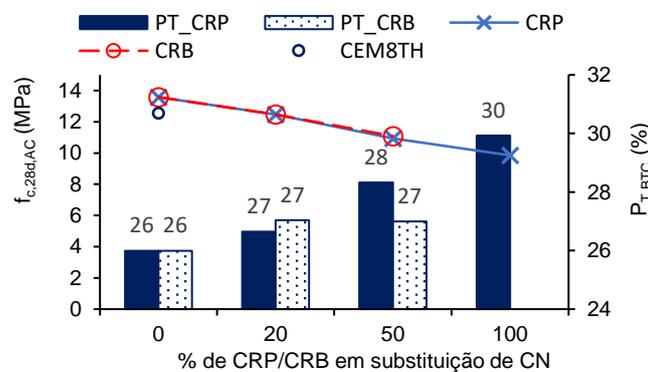


Figura 40 – Resistência à compressão em função da percentagem de substituição de CP por CR

A Figura 40 permite ainda verificar que a utilização conjunta de 4% CP e 4% CRB conduziu a uma resistência 18% superior à do BTC com apenas 4% CP, demonstrando a atividade do CR. A qualidade da estabilização de um BTC está fortemente ligada à sua resistência enquanto saturado (Riza and Rahman 2015, Lea 1970), sabendo que um bloco não estabilizado apresenta resistência praticamente nula. Uma diferença elevada de resistência em condição seca e saturada sugere uma fraca estabilização do material argiloso, permitindo que ocorra absorção e desabsorção de água, com conseqüente variação dimensional dos BTC (Kerali, 2001). Isso agrava-se na presença de minerais argilosos expansivos (Reddi *et al.*, 2012), o que justifica a variação de até 3 vezes na resistência dos BTC testados por Nabais (2022). No presente trabalho, utilizou-se uma argila essencialmente composta por ilite, não expansiva (Arthur *et al.*, 2020), tornando mais favorável as condições de estabilização.

Ainda assim verifica-se uma redução de 50-52% entre a resistência em ambiente de laboratório e a resistência em condições saturadas, independentemente do tipo de estabilizante. Ao contrário do observado em trabalhos anteriores (Azevedo 2021, Gonçalves 2022), a redução de resistência não foi superior nos BTC com CRP ou CRB, sugerindo idênticos níveis de eficiência na ação de estabilização do solo. Acrescente-se que os BTC com CRP apresentaram resistências até 3 vezes superiores às dos BTC não estabilizados, mesmo apresentando porosidades até 14% superiores.

Em relação à influência da incorporação de RCD, verifica-se que esta variou de forma pouco importante com o teor de RCD (Figura 41) e sem existir uma tendência clara. A maior resistência foi observada para 25% RCD, sendo pequena a diferença entre a mistura em que se promoveu a substituição direta e a mistura em que não se fez variar a granulometria. Esta mistura coincidiu com a obtenção dos blocos de menor porosidade total (Figura 41). Tal como sucede nos betões com agregados reciclados (Kazmi *et al.*, 2022), poderia ser esperada uma redução da resistência com o aumento do teor de RCD. No entanto, os BTC comportam-se como betões muito fracos, em que a resistência da sua matriz é inferior à dos betões que deram origem aos agregados reciclados. Assim, a resistência é condicionada pela porosidade e pela pasta que liga as partículas de solo, tendo pouca influência a capacidade resistente e a porosidade do RCD. Neste caso, os vários BTC com diferente teor de RCD foram produzidos com idêntico TH, teor e tipo de ligante e relação a/l.

Pode também verificar-se uma melhor qualidade de ligação da matriz com as partículas de RCD, aproveitando-se a porosidade dos mesmos para aumentar a aderência e coesão da mistura (Kerali, 2001; Young *et al.*, 1998). Assim, neste sentido, pode ser uma vantagem adicionar RCD na produção de BTC. Porém, isso não se confirma entre os BTC com 0 e 15% RCD.

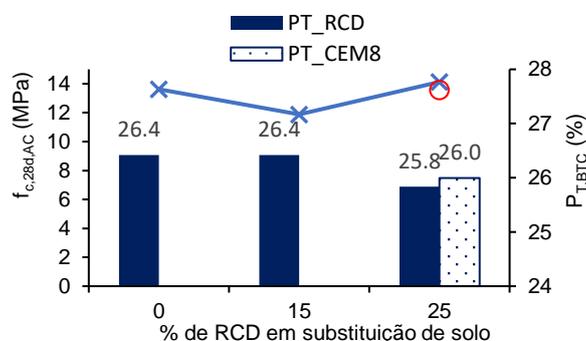


Figura 41 – Resistência à compressão em função da percentagem de substituição de solo por RCD

4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

A absorção de água por imersão está diretamente relacionada com a porosidade aberta ou acessível dos materiais, dando uma indicação da interconetividade da sua microestrutura e da penetrabilidade por ação da água. Na Tabela 22 resumem-se os resultados do ensaio de absorção por imersão, indicando-se os valores médios e os respetivos coeficientes de variação após 24 e 48 horas. Na tabela são indicados os valores em percentagem de massa, $abs_{i,m}$, e também de volume, $abs_{i,v}$. Este último parâmetro permite uma melhor comparação entre misturas, visto que traduz mais corretamente a quantidade de água absorvida pelos BTC, sem que dependa da sua massa volúmica. É ainda indicado o volume de absorção total, $abs_{i,v,T}$, após absorção até massa constante, traduzindo uma medida máxima da sua porosidade acessível à água. Desde logo se verifica que a variabilidade

dos ensaios (envolvendo pelo menos 3 provetes) foi baixa, para coeficientes de variação, em geral, inferiores a 1,5%.

Tabela 22– Absorção de água por imersão às 24h e 48h, em massa, $abs_{i,m}$, e em volume, $abs_{i,v}$

BTC	a/l_{ef}	$P_{T,BTC}$ (%)	$abs_{i,m,24h}$ (%)	CV_{24h} (%)	$abs_{i,m,48h}$ (%)	CV_{24h} (%)	$abs_{i,v,24h}$ (%)	$abs_{i,v,48h}$ (%)	$abs_{i,v,t}$ (%)
CEM8	1,22	26,0	10,1	1,4	10,2	1,2	20,0	20,2	21,6
CEM8TH	1,62	28,1	11,9	0,1	12,0	0,4	22,9	23,1	24,7
CEM8RCD0	1,22	26,4	8,7	1,5	8,8	1,5	17,7	17,9	18,8
CEM8RCD15	1,22	26,4	9,7	0,5	9,8	0,5	19,5	19,7	21,2
CEM8RCD25	1,22	25,8	10,2	1,4	10,3	1,5	20,3	20,5	22,0
CEM4	2,34	26,2	10,2	0,4	10,3	0,3	20,2	20,4	21,7
32.5CEM8	1,22	26,0	10,3	1,4	10,4	1,4	20,5	20,7	22,4
CRP8	1,62	29,9	12,2	0,4	12,3	0,3	23,2	23,3	25,1
CRP4	2,60	28,8	11,1	0,4	11,3	0,5	21,4	21,7	23,3
CRP20CEM80	1,22	26,6	10,3	1,4	10,4	1,3	20,3	20,7	21,3
CRP50CEM50	1,35	28,3	10,6	4,9	10,7	4,9	20,0	20,3	21,2
CRB20CEM80	1,11	27,0	10,3	0,1	10,4	0,6	20,3	20,5	22,0
CRB50CEM50	0,99	27,0	10,7	0,8	10,8	0,9	21,0	21,2	22,6

Na Figura 42 ilustra-se o comportamento de alguns dos blocos quando imersos em água, verificando-se desde logo que ao contrário dos BTC estabilizados, os não estabilizados desintegraram-se completamente após alguns minutos de imersão. Neste caso, ocorre forte absorção de água por parte da componente argilosa do solo, com conseqüente liquefação e perda de coesão (Riza e Rahman 2015). Basicamente, ocorre a destruição da ação ligante da argila e a pressão da água no interior dos poros faz desmoronar os blocos (Kerali, 2001). O mesmo foi verificado por outros autores (Cid-Falceto 2012, Galíndez, 2009, Ngowi 1997, Ozkan *et al.*, 1995, Azevedo 2021). Assim, conclui-se que em ambientes exteriores não protegidos da água, deve-se evitar a utilização de BTC não estabilizados ou, pelo menos, aplica-los com reboco de proteção. Por sua vez, os BTC estabilizados mostraram adequada resistência à ação da água, pelo menos durante o período de 48 horas de imersão, mantendo a sua forma e a coesão entre partículas, independentemente do tipo de ligante (Figura 42).



Figura 42 – Dois blocos de UCEB desintegrados (à direita) enquanto os blocos com CP ou CRP mantêm a sua integridade (à esquerda)

Na Figura 43 apresenta-se a evolução média da absorção em volume para cada uma das composições. Conforme seria de esperar a absorção de água evoluiu com a idade de ensaio, embora esta tenha sido maioritariamente realizada durante as primeiras 24 horas. De facto, constata-se que 92-95% da absorção total a longo prazo ocorreu às 24 horas, com um incremento de apenas cerca de 1% entre as 24h e as 48h de imersão.

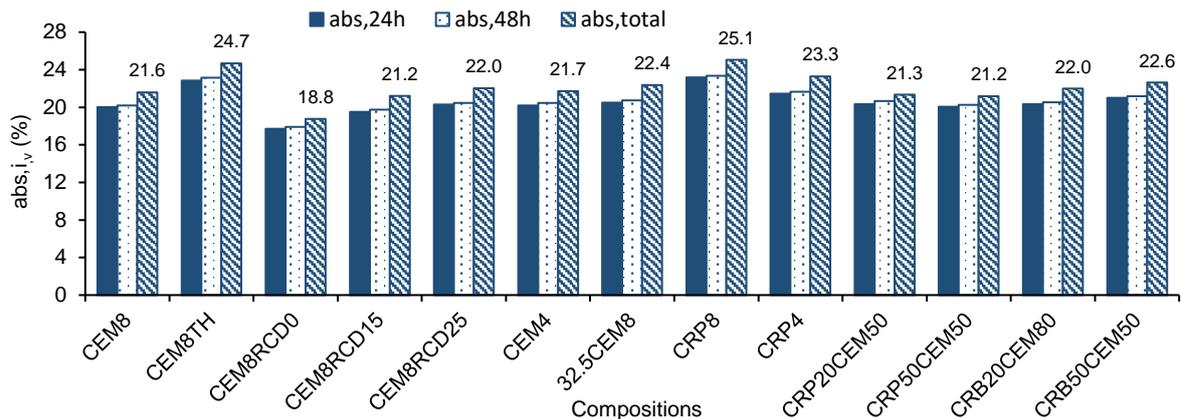


Figura 43 – Absorções por imersão, em percentagem de volume (apenas os valores máximos de absorção ao longo do tempo são indicados).

Os valores de absorção em massa após 48 horas, obtidos neste estudo para os BTC com 8% CP (10%), são inferiores aos referidos por Silva (2015), considerando igual teor de CP (14%) e bastante inferiores aos obtidos por Azevedo (2021), considerando 10% CP (19%). Isso reflete os valores de porosidade total reportados nestes trabalhos, de 29,7% e 38,4%, respetivamente, que são 48% e 14% superiores aos atingidos no presente estudo, respetivamente. Como referido, a razão principal prende-se com a otimização granular e a utilização de uma prensa semi-automática em lugar da prensa manual utilizada por estes autores. Absorções em massa de 15% são indicadas por Bahar *et al.* (2004), também em misturas com 8% CP, mas compactadas apenas com recurso ao proctor. Em contrapartida, Kerali (2001) reporta absorções em massa de apenas 7%, inferiores às do presente estudo, o que se justifica pelo facto de nesse trabalho se terem produzido BTC com *a/c* de apenas 1,06 e de se ter considerado uma prensa de 6 MPa, permitindo uma porosidade total de apenas 15% (43% inferior à obtida no presente estudo). Conclui-se que o nível de absorção e porosidade dos BTC é fortemente condicionado pelas características da pasta e sobretudo pela compacidade atingida após a prensagem.

A norma NBR 8492 (1984) sugere que a absorção às 24 horas deve ser inferior a 20% (em massa) de modo a que os blocos possam ser considerados aptos para aplicação em ambientes húmidos. Neste estudo, todos os blocos cumpriram largamente este limite, mesmo após 48 horas, incluindo os produzidos com cimento reciclado ($abs_{i,m,48h} < 12\%$). Verifica-se inclusivamente que os BTC produzidos enquadram-se no limite inferior do intervalo indicado como mais usual na norma HB 195 (2002), entre 10 e 25% em massa.

A absorção a curto e a longo prazo foi superior nos BTC com CR do que com CP. É expectável que o facto destes primeiros apresentarem uma porosidade mais elevada possa contribuir para uma maior absorção. Para idêntico teor de ligante, a absorção em volume, $abs_{i,v,t}$, foi 7% (para 4% estabilizante) e 16% (para 8% estabilizante) superior nos BTC com CRP. Este aumento foi consistente entre as 24h e a longo prazo, devendo estar essencialmente associado à maior porosidade com que foram produzidos os BTC com CRP. De facto, confirma-se que existe uma tendência esperada de aumento de absorção em função da porosidade total (Figura 44). As misturas com diferente teor de RCD fogem a esta tendência, conforme discutido mais adiante. O desfasamento obtido para CRP50CME50 pode estar relacionado com uma sobrestimativa da porosidade total desta mistura, pois

os valores de absorção aproximam-se mais do observado nos BTC com idêntico teor de CRB, associado a menor porosidade total.

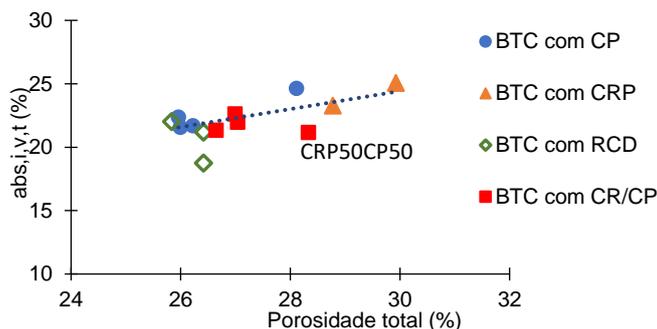


Figura 44 – Relação entre a absorção em volume a longo prazo ($abs_{i,v,t}$) e a porosidade total.

Ao contrário do observado na resistência à compressão, a redução do teor de ligante teve pouca influência na absorção por imersão. Inclusivamente, verifica-se que a redução do teor de estabilizante nos BTC com CRP, de 8% para 4%, conduziu a uma diminuição da absorção. Isso justifica-se pelo facto desta propriedade depender mais das características físicas dos BTC (porosidade e interconetividade da microestrutura) do que da capacidade ligante entre as partículas de solo. Por esse motivo, existe uma fraca correlação entre a resistência à compressão e a absorção. Na Figura 44 confirma-se que nos BTC de diferente teor de ligante predominou a influência da compactação atingida nos blocos. A mesma constatação é obtida para os BTC com cimento II/B-L 42,5, em que a menor capacidade do ligante afetou apenas ligeiramente a absorção.

Porém, o maior TH na mistura CEM8TH, causou um aumento de absorção, aproximando-se do obtido nos BTC com CRP (CRP8). Isso resultou diretamente do aumento provocado na relação a/l e na porosidade total. Ainda assim, o valor de porosidade total estimado para o CEM8TH foi inferior ao de CRP8 (em 6%), ao passo que as suas absorções foram idênticas. Isso poderá significar que, para idênticos níveis de porosidade, os BTC com CP são mais propícios à absorção de água. De facto, na Figura 44 constata-se também que os BTC com CR estão associados a absorções ligeiramente inferiores para uma dada porosidade total. É possível que se atinjam condições de menor conectividade nas misturas com CR. De acordo com Bogas *et al.* (2021), as pastas com CR desenvolvem uma microestrutura diferente das pastas com idêntico teor de CP. Devido à natureza porosa do CR, as pastas com CR apresentam uma microestrutura bifásica, composta por poros intrapartícula e interpartícula. Neste caso, parte da água é consumida no interior das partículas de CR, fazendo com que o espaço interpartícula seja menor do que o observado em pastas com CP de igual a/l. Assim, apesar da porosidade total ser idêntica, a microestrutura torna-se mais refinada, dificultando a interconetividade entre poros. Isso foi demonstrado por ensaios de microporosimetria de mercúrio e de adsorção de N_2 (Bogas *et al.*, 2021, Real *et al.*, 2020). Logo, a absorção tende a ser mais dificultada na presença de CR. Na Figura 44 verifica-se também que os BTC com incorporação parcial de CR apresentam um comportamento intermédio dos restantes com apenas CP ou CR. Mais uma vez, os BTC com incorporação parcial de CRP ou CRB manifestaram comportamentos semelhantes.

Em relação à incorporação de RCD, verifica-se um aumento crescente da absorção com o teor de RCD que contraria a tendência observada para a evolução da porosidade total (Figura 45). Isso

sugere que, após imersão, um maior volume de poros dos RCD fica acessível à água, aumentando a sua absorção. Nota-se que a porosidade total foi estimada tendo em consideração a água total na mistura, podendo não refletir toda a porosidade disponível dos agregados. Aliás, verifica-se que a diferença entre absorções às 24 horas é menos acentuada, o que também indicia que ocorre um enchimento progressivo dos RCD a longo prazo (Figura 45). Por estes motivos, existe uma fraca correlação entre a absorção e a porosidade total na Figura 45. Mais uma vez, as diferenças entre as misturas CEM8 e CEM8RCD25 foram pouco significativas.

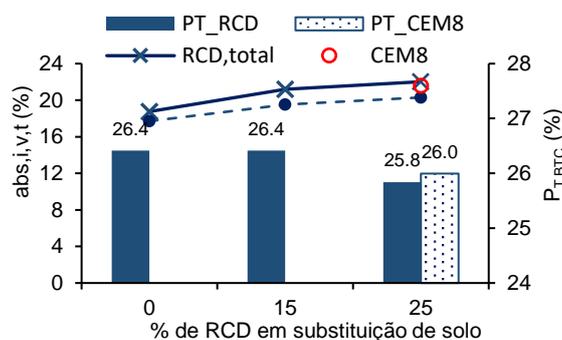


Figura 45– Absorção em volume ($abs_{i,v,t}$) em função da percentagem de substituição de solo por RCD

Os valores de absorção a longo prazo, $abs_{i,v,t}$, corresponderam maioritariamente a cerca de 80-88% da porosidade total estimada em 4.1 e igualmente indicada na Tabela 22. Isso significa que grande parte da porosidade é acessível à água, existindo, no entanto, poros que se comportam como fechados. Nos BTC com 0% RCD verificou-se a relação mais baixa, de apenas 71%, visto que conforme referido, a ausência de RCD reduz a absorção a longo prazo. O rácio de porosidade acessível à água foi inferior ao reportado por Azevedo (2021), que refere valores na ordem de 90% em BTC com CP e 87-89% nos BTC com CRP. Isso resulta da estrutura menos compacta atingida nos BTC de Azevedo (2021), cuja porosidade total estimada foi mais de 40% superior à obtida no presente trabalho. Por outro lado, terá também ocorrido uma estabilização menos efetiva dos BTC, conforme mostram os resultados de resistência deste autor, o que permite uma maior participação da argila na absorção.

Tal como constatado por Azevedo (2021), o rácio de absorção foi ligeiramente inferior nos BTC com CR (80 a 84%) do que com CP (83 a 88%). Mais uma vez, isso sugere que se deverá ter atingido uma microestrutura mais refinada e de conectividade mais difícil nos BTC com CR.

4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Nas Figuras 46 a 48 apresenta-se a evolução da absorção capilar ao longo do tempo, tendo em conta o ensaio descrito em 3.8.4. Confirma-se que, pelo menos nas primeiras 6 horas, a absorção evolui de forma aproximadamente linear com a raiz quadrada do tempo, o que está de acordo com a dedução teórica do mecanismo de absorção capilar nos materiais, quando se assume que estes são compostos por poros cilíndricos (Bogas *et al.*, 2015). A partir das 6-24 horas, essa relação deixa de ser linear, ocorrendo uma redução da taxa de absorção, que pode ser atribuída ao atingimento da saturação dos poros de maior conectividade e a participação progressiva dos poros menos acessíveis. Por outro lado, durante os primeiros 10 minutos ocorre uma absorção mais rápida, que se justifica pelo contacto direto dos primeiros milímetros do bloco imersos numa espessura de 5 mm de água. Assim,

optou-se por determinar o coeficiente de absorção correspondente à pendente da linha de regressão da absorção entre a raiz quadrada de 10 minutos e a raiz quadrada de 6 horas, $C_{abs,10min-6h}$. Nas mesmas Figuras 46 a 48 apresenta-se este coeficiente, bem como o coeficiente de absorção aos 10 minutos, que é o parâmetro usualmente considerado na literatura para caracterizar a absorção dos BTC. Estes valores e a absorção capilar no final do ensaio, após 72 horas, $abs_{c,72h}$, são também resumidos na Tabela 23. Na mesma tabela é ainda apresentada uma estimativa desta absorção em percentagem de volume do bloco ($abs_{c,v,72h}$), de modo a facilitar uma eventual comparação com a absorção por imersão (4.3). Novamente, foi impossível testar os BTC de referência não estabilizados, que perderam a sua coesão instantes depois de entrarem em contacto com a água.

Tabela 23– Absorção capilar a 72h, $abs_{c,72h}$, coeficiente de absorção $C_{abs,10min}$ e $C_{abs,10min-6h}$ e coeficiente de variação de $C_{abs,10min}$.

BTC	a/l_{ef}	$P_{T,BTC}$ (%)	$abs_{c,72h}$ (g/cm ²)	$abs_{c,v,72h}$ (%vol)	$C_{abs,10min}$ (x10 ⁻² g/cm ² .min ^{0.5})	$C_{abs,10min-6h}$	C.V. $C_{abs,10min}$ (%)
CEM8	1,22	26,0	2,7	18,0	11,60	5,30	17,79
CEM8TH	1,62	28,1	3,1	21,2	18,98	6,47	1,95
CEM8RCD0	1,22	26,4	2,5	16,9	7,39	5,60	16,73
CEM8RCD15	1,22	26,4	2,7	18,5	10,12	6,01	5,38
CEM8RCD25	1,22	25,8	2,8	18,9	10,46	5,37	8,33
CEM4	2,34	26,2	2,9	19,8	17,11	8,05	14,38
32.5CEM8	1,22	26,0	2,8	19,2	11,01	5,51	3,99
CRP8	1,62	29,9	3,3	22,7	16,05	9,34	3,92
CRP4	2,60	28,8	3,2	21,7	20,89	11,93	5,11
CRP20CEM80	1,22	26,6	2,8	19,1	10,01	5,35	4,02
CRP50CEM50	1,35	28,3	3,1	20,8	11,47	6,18	5,87
CRB20CEM80	1,11	27,0	2,5	16,8	11,41	5,25	4,22
CRB50CEM50	0,99	27,0	2,4	15,9	15,24	6,05	6,59
CEM8_H	1,22	26,0	1,7	11,7	9,39	4,36	6,41
CEM8TH_H	1,62	28,1	1,9	12,8	8,80	4,72	1,42
CRP8_H	1,62	29,9	2,0	13,7	16,02	8,01	7,32

O coeficiente de absorção aos 10 minutos, $C_{abs,10min}$, é usualmente considerado na literatura para caracterizar os BTC. Nos BTC com 8% CP, o $C_{abs,10min}$ foi de 12×10^{-2} g/cm².min^{0.5}, semelhante ao reportado por Azevedo (2021) (13×10^{-2} g/cm².min^{0.5}), que como referido em 4.3 está associado a maior porosidade e absorção. Para 8% CP, e considerando condições idênticas de pré-condicionamento, Silva (2015) reporta um coeficiente de 21×10^{-2} g/cm².min^{0.5}, cerca de 2 vezes superior. Para 10% CP, Bahar *et al.* (2004) refere um coeficiente de 29×10^{-2} g/cm².min^{0.5}. Estes resultados estão de acordo com o menor nível de pressão de compactação considerado por estes autores, utilizando prensa manual e o ensaio de Proctor, respetivamente, o que conduziu a maiores porosidades globais.

No presente trabalho o $C_{abs,10min}$ variou entre 7,3 e $20,9 \times 10^{-2}$ g/cm².min^{0.5}. Segundo a norma NETC 5324 (2004) a classificação em termos de absorção capilar é: I - $C_{abs,10min} \leq 20 \times 10^{-2}$ g/cm².min^{1/2} – “muito baixa absorção”; II - $C_{abs,10min} \leq 40 \times 10^{-2}$ g/cm².min^{1/2} – “baixa absorção”. Conclui-se que os BTC ensaiados neste estudo podem ser globalmente classificados de “muito baixa absorção”.

Porém, apesar de ser um parâmetro adotado na literatura, o $C_{abs,10min}$ depende muito das características superficiais do bloco, bem como da menor estabilização da fração argilosa em contacto direto com os primeiros milímetros de água. Por esse motivo, verifica-se que este parâmetro se correlaciona mal com o $C_{abs,10min-6h}$ (Figuras 46 a 48). Assim, considera-se que o $C_{abs,10min-6h}$ é mais

representativo das características dos BTC, traduzindo melhor a sua microestrutura. Em seguida os resultados são interpretados em função deste parâmetro.

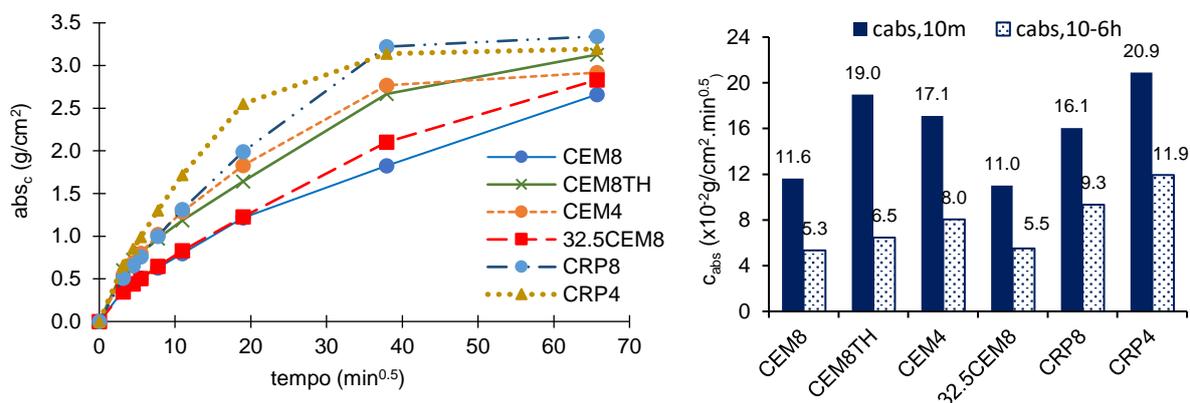


Figura 46– Diferentes tipos de estabilizante: absorção capilar ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 10 minutos, $C_{abs,10m}$ e até 6 horas, $C_{abs,10m-6h}$ (direita)

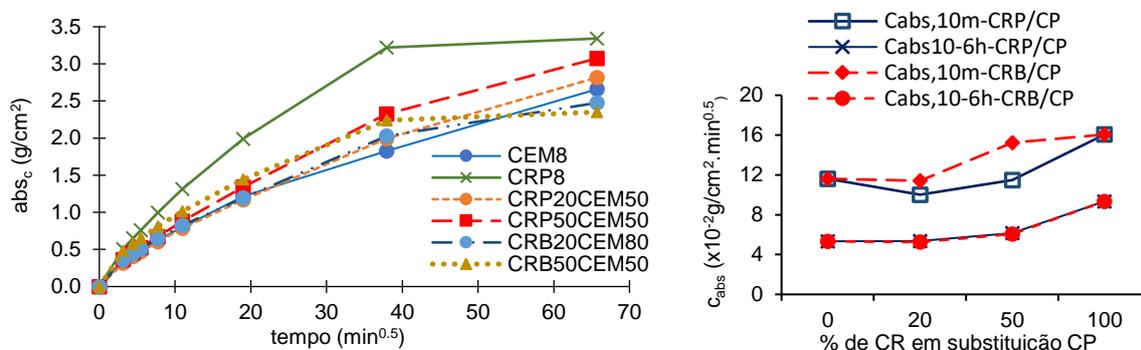


Figura 47– Substituição de CP por CR: absorção capilar ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 10 minutos, $C_{abs,10m}$ e até 6 horas, $C_{abs,10m-6h}$ (direita)

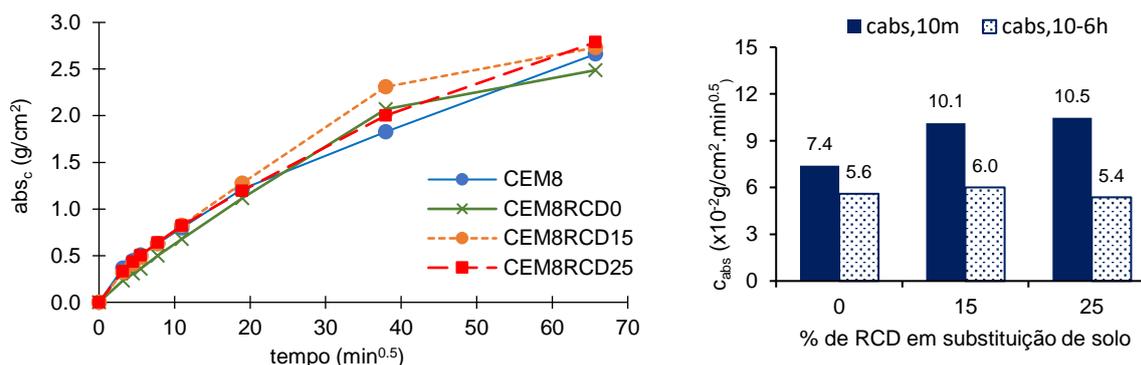


Figura 48– Substituição de solo por RCD: absorção capilar ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 10 minutos, $C_{abs,10m}$ e até 6 horas, $C_{abs,10m-6h}$ (direita)

Em linha com o observado no ensaio de absorção por imersão, os BTC com CRP apresentaram maior volume de absorção final às 72h e maior coeficiente de absorção do que os BTC com CP (Figura 46). Isso está em parte associado à maior porosidade total e maior a/l dos BTC com CRP. No entanto, para 4% e 8% de ligante, o aumento de $abs_{c,72h}$ nos BTC com CRP foi de 9% e 26%, respectivamente, ao passo que na absorção por imersão, esse aumento foi de apenas 6% e 16% respectivamente. A

diferença torna-se ainda mais relevante quando se considera o coeficiente de absorção, que aumentou 48% e 75%, para 4% e 8% de ligante, respetivamente. Por outro lado, na mistura CEM8TH de maior TH, com relação a/l e porosidade total mais próximas de CRP8, o coeficiente de absorção capilar foi 31% inferior, enquanto que a absorção por imersão foi semelhante. Como tal, a diferença de porosidade total, só por si, não justifica as diferenças obtidas.

Assim, não há dúvidas de que o CR promove uma maior taxa de absorção do que o CP, algo que não pode ser medido no ensaio de absorção por imersão, mais relacionado apenas com a porosidade global dos blocos. Por outras palavras, o ensaio de absorção por imersão é uma medida da porosidade acessível à água, dependendo essencialmente do volume de poros disponíveis. Por sua vez, a absorção capilar traduz a velocidade de entrada de água, estando também relacionado com a dimensão e distribuição da porosidade. De facto, tal como discutido em 4.3, para a mesma porosidade global, a matriz cimentícia com CR apresenta uma microestrutura mais refinada, associada a um maior volume de poros de menor dimensão. Logo, as forças capilares tendem a ser superiores, promovendo uma taxa de absorção mais elevada. Dessa forma, face ao observado para a absorção por imersão, verifica-se uma correlação mais fraca da absorção capilar com a porosidade total (Figura 47). Pela mesma razão, a correlação é fraca entre a absorção a longo prazo por imersão, $abs_{i,v,t}$, e a $abs_{c,v,72h}$ (Figura 48). Como esperado, $abs_{c,v,72h}$ é menor do que $abs_{i,v,t}$, pois não se atinge a saturação no ensaio de absorção capilar.

Naturalmente, a diferença de absorção capilar é diluída para menores teores de ligante, visto que a microestrutura se torna menos dependente das características da matriz ligante.

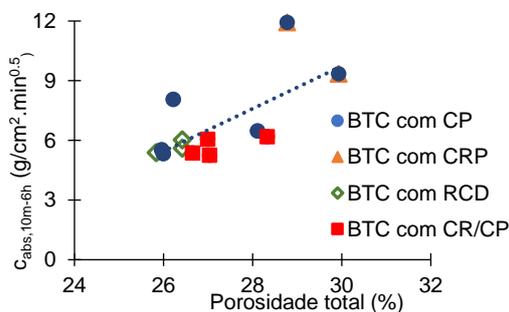


Figura 49– Relação entre o coeficiente de absorção ($C_{abs,10m-6h}$) e a porosidade total.

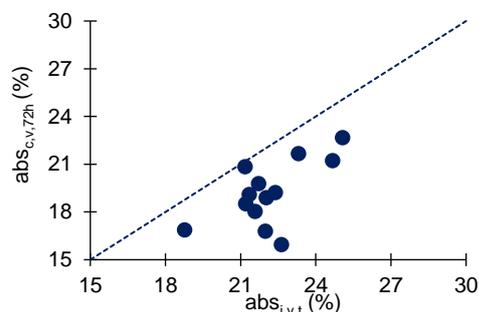


Figura 50– Relação entre a absorção por imersão, $abs_{i,v,t}$, e a absorção capilar, $abs_{c,v,72h}$.

Existe um aumento natural da taxa de absorção com a redução do teor de estabilizante, ou a utilização de um ligante de menor classe de resistência (CEM II/B-L 32,5), em ambos os casos associados a misturas de menor a/clínquer (Figura 46). Pelos motivos referidos, a substituição progressiva de CP por cimento reciclado causou um aumento na taxa de absorção capilar, especialmente para teores de CR superiores a 50% (Figura 47). Até 20% de substituição, a taxa de absorção não foi significativamente alterada. O desempenho foi idêntico nas misturas com CRP e com CRB, confirmando-se que a compensação do teor de ligante tendo em conta a contaminação do CRB foi eficiente. Mais uma vez salienta-se a fraca qualidade do parâmetro $C_{abs,10m}$ na avaliação do desempenho dos BTC (Figura 47 à direita).

Em relação à influência do RCD, não se verifica uma tendência clara de evolução do coeficiente de absorção com o aumento do seu teor em substituição de solo. A absorção final às 72 horas seguiu

uma tendência lógica e semelhante à observada na absorção por imersão, aumentando com o incremento de RCD. Porém, a absorção capilar seguiu uma tendência mais parecida com o verificado na resistência à compressão, demonstrando ser mais afetada pela matriz que envolve as partículas de solo. Desse modo, $C_{abs,10m-6h}$ consegue traduzir melhor a diferença de qualidade dos BTC.

Tal como descrito em 3.8.4, os provetes foram testados perpendicularmente à sua face de assentamento, de modo a apresentarem a sua maior dimensão na vertical. Isso permite garantir a realização de um maior tempo de ensaio sem ocorrerem fenómenos de saturação. No entanto, devido à técnica de prensagem dos blocos, estes tendem a apresentar propriedades anisotrópicas, sofrendo maior ação de compactação na direção perpendicular ao seu leito de assentamento. Assim, optou-se também por testar os BTC de referência com 8% de CP ou CRP, com a maior face em contacto com a água, no sentido em que são aplicados na construção. Os resultados obtidos indicam-se na Tabela 23, apresentando a letra “H” no final da sua designação. Conforme esperado, existe uma redução importante do nível e taxa de absorção quando os blocos são testados segundo a face de assentamento. Neste caso, a $abs_{c,72h}$ e o $C_{abs,10min-6h}$ foram 35-40% e 73-86% inferiores. Isso confirma a natureza anisotrópica dos blocos. Note-se que as duas direções de ensaio são importantes, visto que os blocos estão expostos no exterior segundo a direção perpendicular de assentamento, mas a subida de água proveniente do solo ocorre segundo a maior face. A variação das características de absorção entre estas misturas segundo a direção perpendicular à face de assentamento seguiu a mesma tendência do verificado e discutido anteriormente, podendo-se atribuir a mesma justificação.

4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA A BAIXA PRESSÃO (KARSTEN)

O ensaio de Karsten permite obter uma ideia da absorção superficial dos BTC ao longo do tempo, sob condições de baixa pressão (3.8.5). Neste ensaio, para além da sucção capilar, a permeabilidade também afeta a penetrabilidade da água. Os resultados obtidos no presente trabalho, nomeadamente as curvas de absorção ao longo do tempo, os coeficientes de absorção referentes aos primeiros 5 minutos de ensaio, $C_{abs,k,5min}$, e o tempo médio, t_{med} , com que foi atingida a absorção máxima de 4 ml, são apresentados nas Figuras 51 a 53. Optou-se por considerar o coeficiente de absorção aos 5 minutos, dado ser representativo de um tempo suficiente de ensaio e para o qual as curvas de absorção têm uma evolução aproximadamente linear com a variação do tempo. De notar que nas misturas CRP4 e CRP50CEM50 os coeficientes foram obtidos a cerca de 3 e 4 minutos, respetivamente, pois coincidiu com o final dos ensaios. Em termos médios, estas foram as misturas que apresentaram maiores taxas de absorção.

O ensaio foi realizado segundo a direção perpendicular à de assentamento, conforme os blocos são expostos na construção. Conforme apresentado em anexo, os resultados obtidos neste ensaio apresentam elevada variabilidade, com diferenças entre coeficientes de absorção que podem exceder 33%. Isso resulta do ensaio ser uma medida da absorção na superfície, dependendo muito das características do bloco nesta região. Comparando com o ensaio de absorção capilar, os resultados obtidos serão mais próximos de $C_{abs,10min}$ do que de $C_{abs,10m-6h}$, conforme discutido mais adiante.

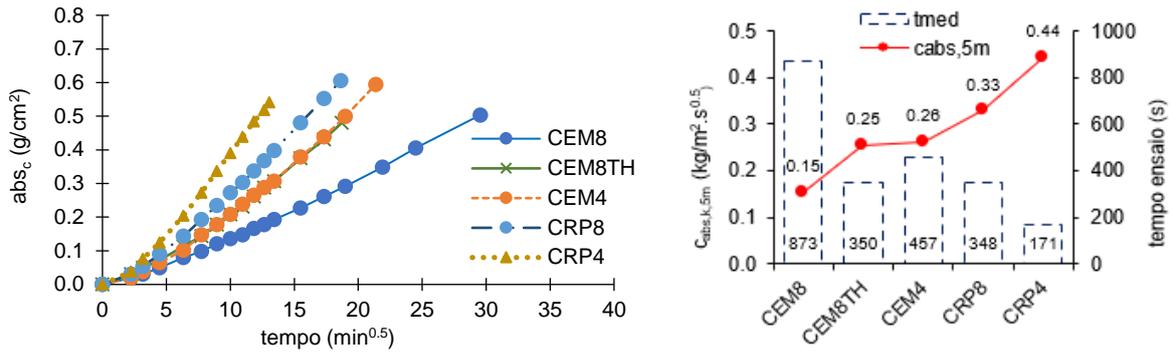


Figura 51– Diferentes tipos de estabilizante: absorção a baixa pressão ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 5 minutos, $C_{abs,5m}$ e tempo de ensaio, t_{med} (direita)

Tendo em conta BTC com 10%CP, Azevedo (2001) verificou coeficientes de absorção aos 5 minutos de cerca de 0,14 e 0,21 kg/min.s^{0.5} para 10% CP e 10% CRP, respetivamente. Estes valores são inferiores aos obtidos no presente trabalho, de 0,15 e 0,33 kg/min.s^{0.5} para 8% CP e 8% CRP, respetivamente. Dado que os BTC do presente estudo foram produzidos com maior compactidade, seria esperado um comportamento contrário. É possível que no período de arrefecimento após pré-condicionamento em estufa, os BTC de Azevedo (2021) tenham reabsorvido água, o que reduz a capacidade de absorção capilar. Note-se que o autor trabalhou com solos mais argilosos, de maior higroscopicidade do que os do presente estudo. De facto, Lopes (2015), utilizando blocos de igual geometria e o mesmo tipo de prensa do que Azevedo (2021), mas com 8%CP, obteve 0,22 kg/min.s^{0.5} após 10 minutos, estando mais de acordo com o esperado face aos resultados do presente trabalho.

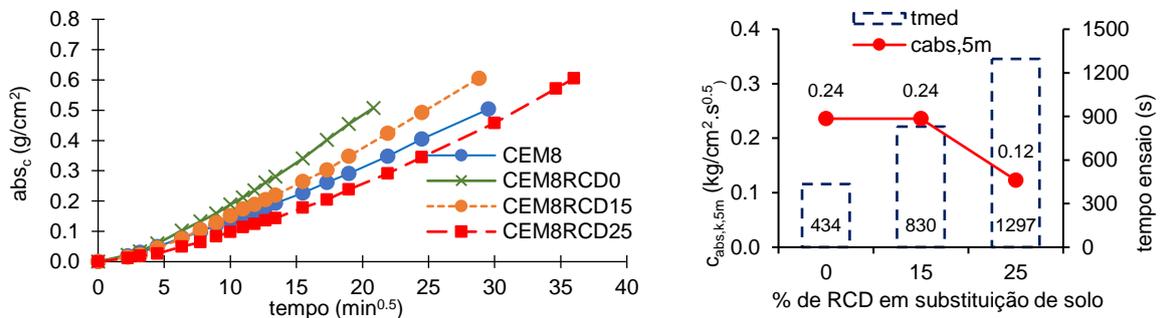


Figura 52– Substituição de solo por RCD: absorção a baixa pressão ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 5 minutos, $C_{abs,5m}$ e tempo de ensaio, t_{med} (direita)

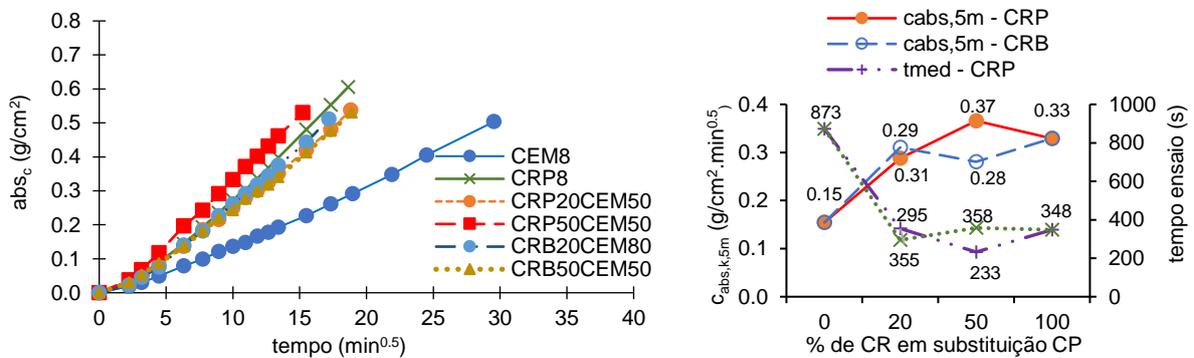


Figura 53– Substituição de CP por CR: absorção a baixa pressão ao longo do tempo (esquerda); Coeficiente de absorção capilar a 5 minutos, $C_{abs,5m}$ e tempo de ensaio, t_{med} (direita)

Como verificado nos restantes ensaios, os BTC com cimento reciclado apresentaram maiores coeficientes de absorção e tempos de ensaio inferiores (Figura 51). O coeficiente de absorção foi cerca de 2 vezes superior, podendo-se, em geral, atribuir os mesmos motivos referidos para a absorção capilar. O tempo de absorção foi cerca de 60% inferior, semelhante ao observado por Azevedo (2021).

Mais uma vez verifica-se uma fraca correlação entre o coeficiente de absorção a baixa pressão e a porosidade total, assumindo também importância o tipo de ligante (Figura 54). Destaca-se o facto do BTC com CP de igual teor em água e relação a/l ter apresentado um comportamento próximo do observado no CRP8. Porém, como referido, os resultados estiveram sujeitos a grande variabilidade.

Na Figura 55 relacionam-se os coeficientes de absorção calculados em 4.4 ($C_{abs,10min}$) e os de Karsten ($C_{absk,5min}$), para períodos de ensaio semelhantes. Verifica-se uma fraca tendência de ambos os parâmetros evoluírem no mesmo sentido, com a relação a ser afetada pelo tipo de ligante e teor de RCD. Principalmente nas misturas com incorporação de CR ou com menor teor de RCD, o coeficiente de absorção de Karsten foi superior ao do ensaio capilar. Por um lado, o ensaio de Karsten refere-se apenas aos primeiros 5 minutos e envolve uma maior área de absorção, dado que neste ensaio a água também é absorvida lateralmente à zona de influência de saída do tubo. Por outro, a penetrabilidade é ainda beneficiada de um mecanismo de permeabilidade promovido pela pequena coluna de água do ensaio. Neste caso, a diferença deverá ser tanto mais importante quanto maior a absorvidade do material, como sucede nos BTC com CRP ou menor teor de ligante. Note-se que conforme explicado em 4.4, para além de possuírem maior porosidade, as matrizes com CRP tendem a ser mais refinadas.

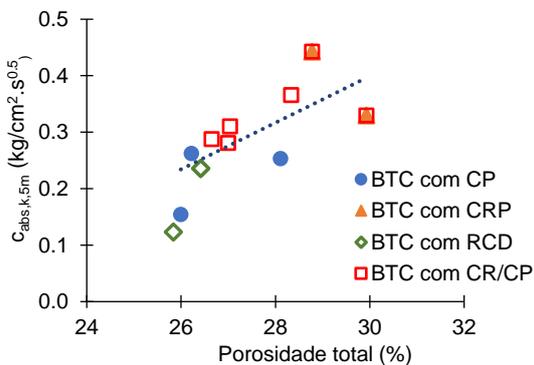


Figura 54– Relação entre o coeficiente de absorção ($C_{abs,10m-6h}$) e a porosidade total.

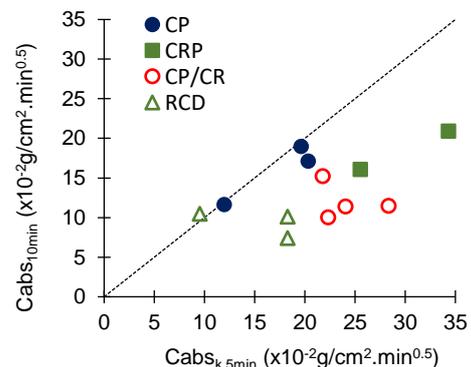


Figura 55 – Relação entre os coeficientes de absorção $C_{abs,10min}$ e $C_{abs,k,5min}$

O aumento da taxa de absorção com o teor de CRP ou CRB seguiu a mesma tendência geral do observado em 4.4, embora a diferença seja mais acentuada, especialmente para teores de substituição até 50% (Figura 54). Como referido, a ação de penetração de água é mais importante neste ensaio. Apenas para 50% CR os BTC com CRP ou CRB não tiveram desempenho semelhante. Pequenas diferenças podem ser atribuídas à variabilidade do ensaio e condições superficiais dos provetes. À semelhança do verificado para a absorção capilar, a taxa de absorção diminuiu com o teor de RCD (com aumento claro do tempo de ensaio, Figura 52), aproximando-se do comportamento observado para a resistência à compressão (Figura 53). Isso demonstra o alcance de uma microestrutura mais refinada nos blocos com RCD, que se faz notar de forma mais evidente nesta propriedade, também sujeita a fenómenos de permeabilidade.

4.6 SECAGEM

O ensaio de secagem foi realizado posteriormente ao ensaio de absorção capilar, partindo dos provetes em condição saturada. O ensaio foi realizado na face de moldagem perpendicular à de prensagem e de assentamento dos blocos. Foi medida a sua perda de massa ao longo do tempo através da face superior não isolada do provete, de modo a garantir o fluxo unidirecional.

Maiores velocidades de secagem são preferíveis na medida em que se garante um menor período de tempo em que a água reside no material. Isso é especialmente importante na construção em terra, cuja resistência mecânica depende do teor em água (Ngoulou, 2019).

As curvas de secagem ao longo do tempo dos BTC analisados no trabalho são apresentadas nas Figuras 55 a 57. Verifica-se que a secagem tende a ser realizada segundo duas fases, tal como sucede em outros materiais (Azil 2023, Scheffler e Plagge 2010): fase inicial de maior taxa de secagem (transporte de água líquida para a superfície); fase de menor taxa de secagem até ocorrer a estabilização (transporte de vapor de água torna-se mais relevante). As diferenças entre BTCs ao nível da absorção ou teor de água iniciais, justifica-se pela diferente porosidade de cada composição.

No período de ensaio, que envolveu cerca de 48 horas, os BTC não atingiram a estabilização total. Por outro lado, os provetes ficaram longe da sua secagem completa (Figuras 55 a 57), o que se justifica pelo facto do ensaio ter decorrido num ambiente com 75% HR (3.8.9).

Tendo em consideração o troço inicial da curva de secagem determinou-se a taxa de secagem DR_{1-172h} , que corresponde à inclinação da reta de regressão dos valores de absorção entre 1h e 172h de ensaio. Determinou-se também o índice de secagem, IS, após 1130 horas (tempo após o qual a maioria dos BTC atingiu a estabilização), conforme a equação 3.24 em 3.8.9. O IS variou entre 0,54 e 0,71, confirmando-se que os BTC ficaram longe da secagem completa. Note-se que um maior IS significa uma menor perda de água e menor facilidade de secagem. Importa ainda referir que a variabilidade observada neste ensaio foi elevada, obtendo-se um coeficiente de variação de DR_{1-172h} de até 27%, tendo em conta 3 ensaios por composição (Anexo 4).

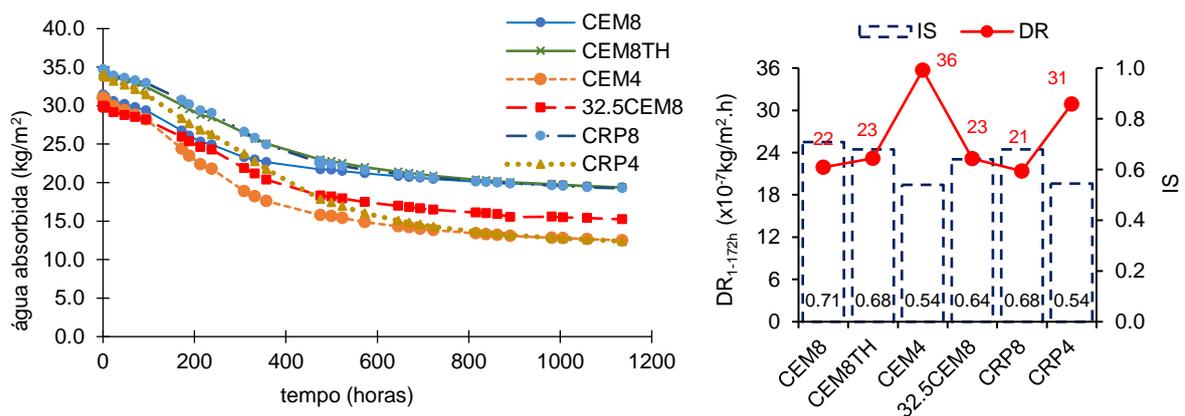


Figura 55– Diferentes tipos de estabilizante: Curva de secagem ao longo do tempo (esquerda); Taxa de secagem entre 1h e 172h, DR_{1-172h} , e índice de secagem, IS (direita)

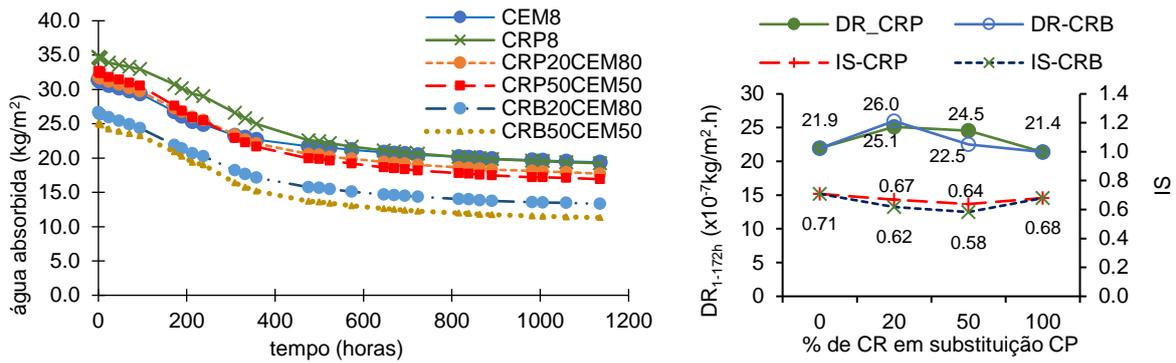


Figura 56– Substituição de CP por CR: Curva de secagem ao longo do tempo (esquerda); Taxa de secagem entre 1h e 172h, DR_{1-172h} , e índice de secagem, IS (direita)

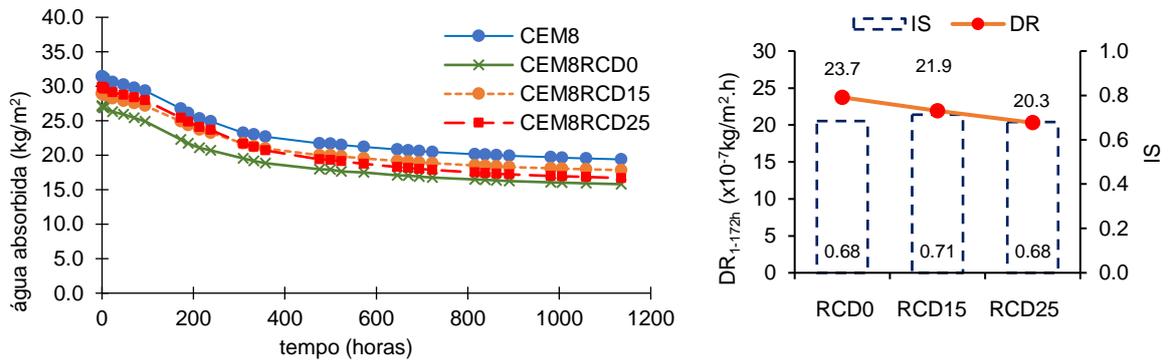


Figura 57– Substituição de solo por RCD: Curva de secagem ao longo do tempo (esquerda); Taxa de secagem entre 1h e 172h, DR_{1-172h} , e índice de secagem, IS (direita)

De acordo com o observado nas restantes propriedades analisadas, a velocidade de secagem aumentou com a redução do teor de ligante, visto que estas composições estão associadas a maior porosidade total e matrizes cimentícias de maior a/l.

No entanto, ao contrário do que poderia ser esperado, a velocidade de secagem inicial não aumentou com a substituição de CP por cimento reciclado (CEM8 versus CRP8 e CEM4 versus CRP4). De facto, apesar da perda de massa após secagem ter sido maior nos BTC com CRP (Figura 55 à esquerda), pois estes apresentam maior porosidade, a taxa de secagem inicial, DR_{1-172h} , foi ligeiramente inferior (Figura 55 à direita). Isso pode ser justificado pelo maior refinamento da matriz de CR face ao CP, conforme discutido em 4.5.

A secagem envolve a curva de desabsorção dos materiais, em que a libertação de água por evaporação dos macroporos, de dimensão superior a cerca de 50 nm, ocorre de forma livre (McGregor *et al.*, 2014). Nos poros de menor dimensão (< 50 nm), a eliminação de água, fortemente agarrada por tensão superficial, tende a seguir a equação de Kelvin (Voigt and Tomlinson 1955). Esta é a região higroscópica, em que o transporte de água ocorre por difusão de vapor e gradientes de pressão capilar (Gomes *et al.*, 2021). Por exemplo, de acordo com a equação de Kelvin, admitindo que a microestrutura é formada por poros cilíndricos de diâmetro uniforme, apenas para HR abaixo de 90% ocorre o esvaziamento dos poros de dimensão inferior a 10 nm (Gomes *et al.*, 2021). Assim, quanto maior a quantidade de poros de reduzida dimensão, mais difícil e demorada deverá ser a secagem. Dado que a secagem foi realizada até 75% HR, em termos teóricos isso significa que os poros inferiores a cerca de 7-8 nm continuam preenchidos de água. Como demonstrado em Bogas (2020), a quantidade de

poros nesta dimensão é maior nas matrizes de CRP do que de CP. Desse modo, apesar do nível de secagem ser superior nos BTC com CRP, a taxa de secagem foi menor. Isso faz com que o IS seja semelhante a apenas ligeiramente inferior nos BTC com CRP do que com CP.

Pelos motivos referidos, percebe-se que terá de existir uma baixa correlação entre a porosidade total e a taxa de secagem (Figura 58) ou o IS (Figura 59). Nota-se uma dependência clara do tipo de ligante, verificando-se que com o aumento do teor de CR, as composições encontram-se mais à direita dos gráficos. Isto é, para uma maior porosidade, os BTC com CR apresentam DR_{1-172h} ou IS semelhante a inferior, confirmando-se o referido.

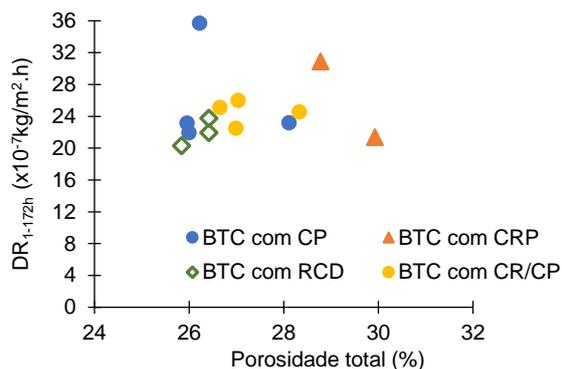


Figura 58– Relação entre a taxa de secagem (DR_{1-172h}) e a porosidade total.

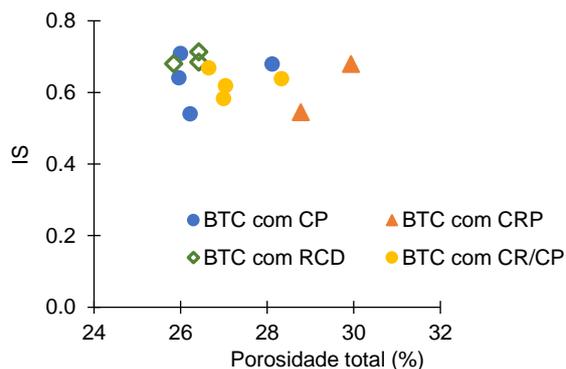


Figura 59– Relação entre o índice de secagem (IS) e a porosidade total.

Menos esperado é o facto da taxa de secagem no CEM8 ter sido apenas ligeiramente inferior à do CEM8TH e do CEM 32.5 (Figura 55). No primeiro caso, a microestrutura é mais porosa e mais grosseira e no segundo caso a microestrutura deverá ser menos refinada, como demonstram os resultados de resistência à compressão (4.2). Importa salientar que, conforme referido, o ensaio esteve associado a uma variabilidade elevada, o que dificulta a interpretação de resultados para valores próximos de desempenho, como sucede nos BTC de igual teor de ligante. Como esperado, o IS foi mais elevado no CEM8.

A substituição de CP por CR não seguiu uma tendência lógica na medida em que até 20% de substituição aumento a taxa de secagem, diminuindo depois progressivamente para teores mais elevados de CR (Figura 56). Para além da variabilidade do ensaio, até 50% CR terá prevalecido a menor compacidade destes BTC. Mais uma vez destaca-se o comportamento muito semelhante observado nos BTC com CRP ou CRB.

O aumento do teor de RCD em substituição de solo conduziu a uma ligeira redução da taxa de secagem, o que está de acordo com a tendência de redução da porosidade total e do aumento de compacidade das misturas. O IS seguiu uma tendência diferente, visto que este parâmetro está mais ligado à porosidade acessível total (4.3).

Do presente trabalho não é possível perceber se as mesmas constatações obtidas neste estudo são válidas para outros tipos de solo. No entanto, Ngoulou (2019) verificou que o teor de argila teve uma influência pouco significativa na duração de secagem dos BTC, sugerindo que o comportamento observado não é muito afetado pelo tipo de solo.

4.7 EROÇÃO POR GOTEJAMENTO (*DRIP TEST*)

Como sabido, a erosão por ação da água é um dos principais mecanismos de deterioração das construções em terra, senão mesmo o mais grave (Heathcote 1995). Como tal, para a validação de um dado tipo de estabilizante é necessário analisar o seu comportamento quando submetido a ações aceleradas de erosão. Neste caso, os documentos normativos sugerem a realização de dois tipos de ensaios importantes, o *drip* e o *spray test* (HB 195 2002, NTC 5324 2004, NZS 4298 1998). O primeiro teste permite caracterizar os blocos sob condições de chuva ligeira, enquanto o segundo simula chuva intensa, por exemplo, batida pelo vento.

No presente ponto discutem-se os resultados do ensaio de *drip test*, realizado de acordo com 3.8.6, com o intuito de se medir a profundidade de erosão e de humidade dos provetes quando sujeitos a gotejamento. Para este estudo foram apenas ensaiadas as composições com 8% de estabilizante indicadas na Tabela 24, bem como os BTC de referência não estabilizados. Na tabela resumem-se os valores médios da profundidade de erosão, PE, e da penetração de humidade, PH, determinada após seccionamento do provete.

Tabela 24 –Resultados ensaio de gotejamento – *drip test*.

Composição	Tempo de ensaio (min)	PE profundidade de erosão (mm)	PH penetração de humidade (mm)
CEM8	33	0	23,7
CEM8TH	32	0	31,5
CRP8	32	0	39,4
UCEB	32	7.4	76,8

A ação de gotejamento é responsável por dois efeitos; remoção de material por impacto e amolecimento do material quando este não se encontra estabilizado e a ligação entre partículas é débil. Assim, o ensaio permite dar uma primeira ideia da eficiência do estabilizante utilizado.

Verifica-se uma elevada efetividade dos estabilizantes utilizados na redução da ação de erosão por gotejamento. Durante os 30 minutos de ensaio não se verificou qualquer dano significativo na superfície dos BTC estabilizados, independentemente do tipo de ligante (Figura 60). Por sua vez, os BTC não estabilizados sofreram forte dano, para uma taxa de erosão de 0,23 mm/min. Para além do impacto direto da água ter contribuído para a erosão do UCEB, a escorrência da água também amoleceu e lavou a superfície do bloco, deixando-o sucessivamente mais vulnerável para os ciclos seguintes de gotejamento. Os valores de erosão foram superiores aos obtidos por Silva (2015) em BTC não estabilizados (2 a 6 mm). Isso pode estar relacionado com o tipo de solo, visto que a mistura de terra utilizada no presente estudo para o UCEB apresenta um índice de plasticidade, IP, superior a 6 (após correção com o TV), ao passo que Silva (2015) utilizou um solo com apenas 2 de IP.



Figura 60– Provetes CEM8, CEM8TH, CRP8 e UCEB após ensaio, respetivamente.

Em termos de resistência à erosão, o CRP revelou ser bastante efetivo, permitindo estabilizar o solo e assemelhar o seu comportamento ao do bloco com 8% CP. Note-se que a ação de gotejamento

não é severa, permitindo que o BTC com CP de maior a/l também apresente excelente desempenho. Cid-Falceto (2012) também não observou erosão em BTC estabilizados com cimento ou com cal, mesmo tendo considerado alturas de queda de água superiores, o que relativiza a sensibilidade deste ensaio. Porém, a erosão superficial, mesmo ligeira, aumenta a permeabilidade do bloco, tornando-o mais suscetível a outros mecanismos de deterioração (Kerali 2001). Desse modo, consideram-se importantes os resultados obtidos neste estudo, de modo a validar a utilização de cimento reciclado.

De acordo com a norma NZS 4298 (1998) são estabelecidos os seguintes índices de erodibilidade: índice 1 – erosão de 0mm; índice 2 - erosão entre 0 e 5mm; índice 3 – erosão entre 5 e 10mm; índice 4 – erosão entre 10 e 15mm; índice 5 (falha) – erosão superior a 15mm. Desse modo, conclui-se que os BTC estabilizados com CRP inserem-se no índice 1, enquanto e os BTC não estabilizados apresentam apenas índice 3.

O comportamento dos BTC estabilizados foi apenas diferenciado pelo parâmetro de penetração de humidade, PH. Neste caso, o PH foi superior nos BTC com CRP, seguindo a tendência observada nos ensaios de absorção (4.3-4.5). A PH no BTC com CRP foi 1,66 e 1,25 vezes superior ao de CEM8 e CEM8H, respetivamente. Isso resulta da menor compactidade e maior a/l dos BTC com CRP. Quando se fez aumentar o TH (relação a/l) de CEM8, o PH aumentou 33%. De facto, este parâmetro avalia apenas a absorvidade do bloco sobre condições de baixa pressão, sugerindo que o seu comportamento seja semelhante ao identificado na absorção capilar (4.4 e 4.5). Nestes ensaios a absorção capilar do BTC com CRP foi 1,75 (de 4.4) e 2,13 (de 4.5) vezes superior à do CEM8.

De acordo com a NZS 4298 (1998) os BTC apresentam desempenho aceitável face à ação de gotejamento caso possuam PH inferior a 120 mm, o que é respeitado pelas misturas ensaiadas, incluindo o UCEB. Conclui-se que o ensaio é pouco exigente, apresentando reduzida sensibilidade e critério para distinguir a resistência à erosão da água dos BTC, sobretudo quando são estabilizados.

4.8 EROSÃO ACELERADA (*SPRAY TEST*)

Este ensaio permite avaliar a resistência dos provetes quando submetidos a um jato de água com pressão de 50 kPa, sendo medida a profundidade de erosão a cada 15 minutos e o tempo decorrido até à penetração completa do jato de água, caso isso se verifique (3.8.7). Para estas condições considera-se que o ensaio é representativo de chuva intensa, de elevada violência (Heathcote 2002, Turco 2021). Porém, no presente trabalho verificou-se que, para estas condições, apenas os provetes não estabilizados sofreram danos visíveis (Figura 61). Os restantes BTC não estabilizados apresentaram apenas uma remoção desprezável de partículas superficiais.

Tendo em consideração o exposto na NZS 4298 (1998), os BTC podem ser classificados da seguinte forma, segundo o seu índice de erosão IE (em mm): $0 \leq PE < 10$ (IE1); $10 \leq PE < 25$ (IE 2); $25 \leq PE < 45$ (IE 3); $45 \leq PE < 60$ (IE4); $60 \leq PE$ (IE5). Neste caso, todos os BTC estabilizados inseriram-se no IE1 de elevada resistência à água, não sendo possível diferenciar o comportamento entre misturas.

Desse modo, ao contrário do sugerido em norma, optou-se por aumentar o nível de pressão para 250 KPa e estender o período de ensaio para 120 minutos. Uma estratégia semelhante foi considerada em trabalhos anteriores (Silva 2015, Marujo 2015, Azevedo 2021, Exelbirt 2011). Terminado o ensaio, seccionaram-se os provetes perpendicularmente à região de impacto do jato e

mediu-se a penetração de humidade. Os resultados de erosão, PE_{250kPa} , e penetração de humidade, PH_{250kPa} , a esta pressão, apresentam-se na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados ensaio de erosão acelerada.

Composição	Pressão (kPa)	Tempo de ensaio (min)	PE_{250kPa} profundidade de erosão (mm)	PH_{250kPa} penetração de humidade (mm)	Índice de erosão
CEM8	50, 250	120	-	26	Aceite
CEM8TH	50, 250	120	-	66	Aceite
CEM8RCD0	50, 250	120	-	28	Aceite
CEM8RCD15	50, 250	120	-	32	Aceite
CEM8RCD25	50, 250	120	-	21	Aceite
CEM4	50, 250	120	-	35	Aceite
32.5CEM8	50, 250	120	-	37	Aceite
CRP8	50, 250	120	<1	31	Aceite
CRP4	50, 250	120	2,5; 4,4	90	Aceite
CRP20CEM80	50, 250	120	-	21	Aceite
CRP50CEM50	50, 250	120	-	28	Aceite
CRB20CEM80	50, 250	120	-	28	Aceite
CRB50CEM50	50, 250	120	-	36	Aceite
UCEB	50	26	90	N/A	Rejeitado

Mesmo tendo em consideração condições bastante severas de erosão, para pressões 5 vezes superiores às referidas em norma, verifica-se que, em geral, os BTC estabilizados não sofreram danos significativos, revelando excelente resistência a esta ação (Figura 61). Exelbirt (2011), em BTC estabilizados com 7% cimento, verificou também muito reduzidas taxas de erosão, inferior a 1 mm/h, mesmo considerando 4000 kPa de pressão de água. Note-se que mesmo nas condições da norma considera-se que este ensaio acelerado simula uma ação mais agressiva do que o observado em ambiente real (Elenga *et al.* 2011, Exelbirt 2011, Heathcote 2002). Isso realça ainda mais a elevada resistência à água dos BTC estabilizados do presente estudo. Apenas os BTC com CRP sofreram algum dano superficial, evidenciando piores condições de estabilização (Figura 65). Ainda assim, o valor médio de PE_{250kPa} foi inferior a 1 e 3 mm para 8% CRP e 4% CRP, respetivamente, correspondendo a menos de apenas 1-2 mm/hora. A maior porosidade total e menor relação a/l (ver secções anteriores) terão reduzido a capacidade ligante entre partículas nos BTC com CRP, sobretudo para baixos teores de ligante. Nos BTC de referência de maior TH (CEM8TH), com idêntico a/l , mas menor porosidade total do que o CRP8, não foi visível erosão superficial significativa.

De qualquer forma, apesar do desempenho ligeiramente pior dos BTC com cimento reciclado face aos restantes BTC estabilizados, a resistência à ação da água foi bastante elevada e muito superior à observada nos BTC não estabilizados.

Os BTC não estabilizados foram totalmente erodidos em menos de meia hora e para pressões 5 vezes inferiores à dos BTC estabilizados com CR (Figura 61, Tabela 25), correspondendo a uma erosão de 207 mm/hora. De acordo com a classificação da NZS 4298 (1998) o UCEB seria “não aceite”, nem sequer conseguindo atingir a classe mais fraca de durabilidade IE5 (Tabela 25). Fica mais uma vez claro a importância de se proceder à estabilização dos BTC, bem como o adequado desempenho e eficiência do cimento reciclado, cujos BTC pertencem à classe mais elevada de durabilidade IE1. A necessidade de estabilização dos BTC para resistirem à erosão acelerada da água foi igualmente salientada por Exelbirt (2011) e Cid-Falceto *et al.* (2012).

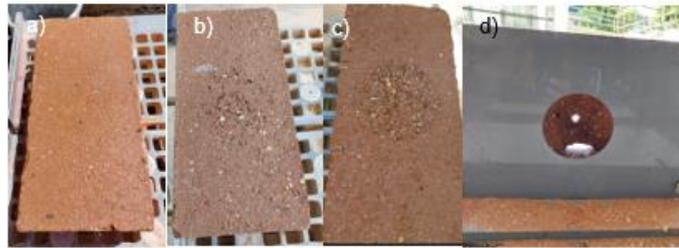


Figura 61– Diferentes níveis de erosão: a) provete CEM8; b) provete CRP8; c) provete CRP4; d) provete UCEB.

Tal como no ensaio de gotejamento (4.6), apenas o parâmetro PH consegue distinguir mais adequadamente o desempenho das diferentes misturas. Em relação aos BTC de referência com 8% CP, os resultados de PH obtidos no presente estudo foram inferiores aos reportados por Azevedo (2021), que refere 38 mm/h, cerca de 3 vezes superior à do CEM8 (13 mm/h).

Tal como discutido em 4.6, dado que o PH está relacionado com a absorvidade e permeabilidade, justifica-se que os BTC de maior porosidade total evidenciem maior PH (Figura 62).

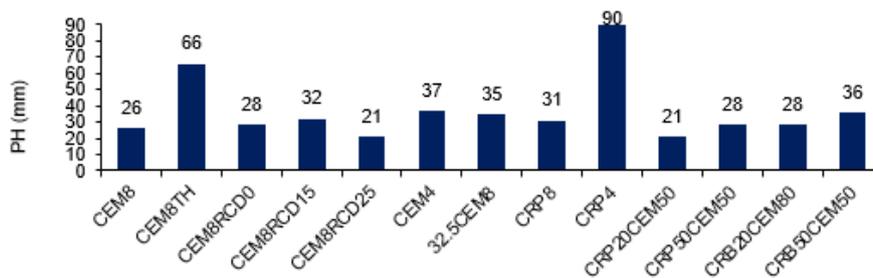


Figura 62– Penetração de humidade, nos BTC analisados após 120 minutos de erosão acelerada (120kPa).

Existe uma fraca correlação entre a porosidade total e o parâmetro PH, indicando que esta não será a única propriedade relevante nesta ação. De facto, observam-se BTC de porosidades muito distintas associados a níveis de PH semelhantes. Neste caso, a qualidade do estabilizante, que afeta a dimensão e conectividade da microestrutura, vai também condicionar o valor de PH. Note-se que esta ação implica a entrada de água sobre pressão, que está diretamente relacionada com a permeabilidade dos BTC. Assim, visto que a permeabilidade é mais afetada pelo diâmetro crítico dos poros do que a absorção (Garboczi *et al.*, 1995; Halamiczkova *et al.*, 1995), torna-se mais relevante o refinamento e interconetividade da microestrutura. Desse modo, os BTC associados a menor teor de ligante (CEM4, CRP4) ou ligante de menor classe de resistência (CEM 32.5) vão apresentar maior PH (Figuras 62 e 63). Destaca-se o CRP4 e o CEM8TH, associados a elevado valor de porosidade total e de a/l.

Nos BTC com incorporação total a parcial de CRP seria esperado observar valores bem mais elevados de PH do que em CEM8, devido à maior porosidade total e a/l destas misturas. Porém, os resultados mostram que as diferenças não foram muito elevadas, sendo menores do que o constatado em 4.6. Isso pode estar associado ao maior refinamento da estrutura porosa do CRP do que do CP, para uma dada porosidade. Como referido, este aspeto assume maior importância na erosão sobre pressão, em que também ocorre o fenómeno de permeabilidade. Apenas para 50% CRB ocorreu um incremento anómalo de PH, para o qual não se encontra grande justificação.

Finalmente, tal como verificado em 4.4 e 4.5, O valor de PH evoluiu de forma não linear com o teor de RCD (aumentando para 15% RCD e diminuindo para 25% RCD), semelhante ao observado na resistência à compressão (Figura 62 e 63).

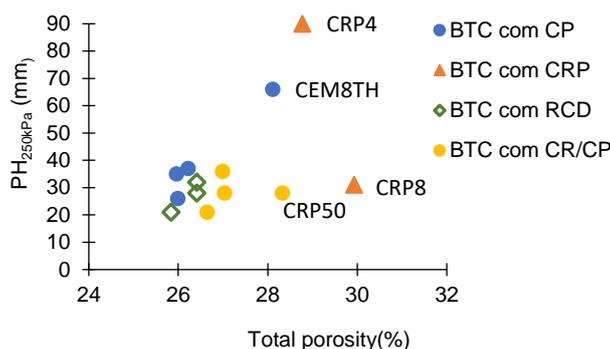


Figura 63 – Relação entre a penetração de humidade, PH250 kPa, e a porosidade total.

Em suma, pelos resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que os BTC estabilizados apresentam elevada resistência à água, independentemente do tipo de ligante utilizado. Os resultados tanto deste ensaio como do de gotejamento, vêm desmistificar a máxima de que a construção em terra é muito suscetível à água, concluindo-se que mesmo para condições de fraca estabilização (reduzido teor e menor classe de resistência do ligante), os BTC podem apresentar elevada resistência à água.

4.9 PERMEABILIDADE AO VAPOR

A capacidade dos BTC permitirem a passagem de vapor de água através da sua espessura foi medida de acordo com 3.8.8, *dry method*, tendo em conta a variação ocorrida entre dois ambientes controlados, de aproximadamente 75% HR e 0% HR, respetivamente. Os provetes foram previamente secos em estufa antes do ensaio. A permeabilidade ao vapor foi medida após se atingir uma condição estacionária. A maior permeabilidade ao vapor de água e maior higroscopicidade de um material, permite que este seja mais regularizador da humidade ambiente (Azil *et al.*, 2023, McGregor 2014).

Na Tabela 26 apresentam-se os valores médios da permeabilidade ao vapor, W_{vp} , e da resistência à difusão do vapor de água, μ , obtidos nos BTC. Em anexo apresenta-se em detalhe os resultados obtidos em cada provete, tendo sido ensaiados 2 por composição. A percentagem de variação dos resultados face à média foi de 0.1 a 14%.

Tabela 26– Permeância, Δ , Permeabilidade W_{vp} , e resistência à difusão, μ , de vapor de água

BTC	$P_{T,BTC}$ (%)	a/l_{ef}	Permeância ao vapor, Δ ($\times 10^{-10} \text{kg/s.m}^2.\text{Pa}$)	Permeabilidade ao vapor, W_{vp} ($\times 10^{-11} \text{kg/s.m.Pa}$)	Resistência à difusão do vapor de água, μ
CEM8	26,0	1,22	7,94	1,16	16,9
CEM8TH	28,1	1,62	10,78	1,71	11,5
CEM8RCD0	26,4	1,22	9,44	1,39	14,2
CEM8RCD15	26,4	1,22	8,58	1,27	15,6
CEM8RCD25	25,8	1,22	8,02	1,17	16,8
CEM4	26,2	2,34	12,68	1,93	10,2
32.5CEM8	26,0	1,22	7,98	1,35	14,6
CRP8	29,9	1,62	11,04	1,62	12,1
CRP4	28,8	2,60	12,01	1,95	10,1
CRP20CEM80	26,6	1,22	8,28	1,27	15,4
CRP50CEM50	28,3	1,35	8,17	1,23	16,0
UCEB	26,2	-	12,64	2,82	7,0

Na Figura 64 resumem-se na forma gráfica os resultados de W_{vp} e μ , que variaram entre 1,16-2,82x10⁻¹¹ kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ e 7,0 e 16,9, respetivamente.

Valores indicativos de μ para BTC e taipa não estabilizados são de 6-14 (Tabela 3.3 - pg.97-Rilem, Cagnon *et al.*, 2014). Estes valores tendem a aumentar nas soluções estabilizadas. McGregor *et al.*, (2014) confirmaram essa tendência após a estabilização dos blocos, com 4-8% de cal ou cimento. A maior redução foi atingida para 8% cimento, atingindo-se 2,59-2,84x10⁻¹¹ kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ (μ de 7-7.7) face a 3,42-3,66x10⁻¹¹ kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ no não estabilizado (μ de 5,5-5,8). Note-se que na construção em terra é desejável que após a estabilização a resistência à difusão não sofra um grande aumento, pois isso diminui a sua capacidade higroscópica e de transmissão de vapor. De facto, quanto maior a permeabilidade ao vapor, maior a capacidade reguladora da humidade (McGregor *et al.* 2014).

Em BTC estabilizados com cimento II 32.5, Touré *et al.* (2017) verificou permeabilidades ao vapor de 2,5-2,9x10⁻¹¹ kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ e valores de μ de 7-8, semelhantes ao reportado por McGregor *et al.* (2014). Estes valores de permeabilidade são cerca de 2 vezes superiores aos indicados na Tabela 26. Valores de μ mais de acordo com os obtidos no presente estudo são reportados por Liuzzi *et al.* (2013), que refere 8,1-11,1 para terra estabilizada com cal hidratada, e por Azil (2023) que reporta o valor de 12.9 para elementos em cob.

Os maiores valores obtidos neste trabalho podem estar relacionados com o facto de não se ter em consideração o efeito de reinsistência superficial ao vapor de água, tal como não é considerado nas normas EN 1015-19 (1998) e ASTM E96 (1995).

De facto, apesar da permeabilidade ao vapor ser uma propriedade intrínseca do material, Gomes (2019) verificou que esta varia com a espessura do provete de ensaio. Este fenómeno foi atribuído à variação da resistência à transferência de vapor superficial (*surface film resistance*). Por esse motivo, McGregor (2017) propõe corrigir a permeabilidade ao vapor tendo em conta este efeito, salientando que as condições convectivas na superfície das amostras porosas têm influência na medição da permeabilidade ao vapor. Esta resistência superficial deve ser considerada em ambas as faces do provete. Não tendo em conta este efeito, Gomes (2019) obteve em provetes de terra não estabilizada compactada (3.8 MPa) permeabilidades médias de 1,7-2,1x10⁻¹¹ kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ (μ de 9,4-11,7), perto do obtido no presente trabalho. Quando teve em atenção o efeito superficial, os valores de permeabilidade foram de 2,77-2,93x10⁻¹¹ kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ (μ de 6,74-7,14). Independentemente das diferenças obtidas face a outros autores, os vários ensaios foram realizados nas mesmas condições, sendo válida a comparação relativa entre os diferentes tipos de BTC testados no presente estudo.

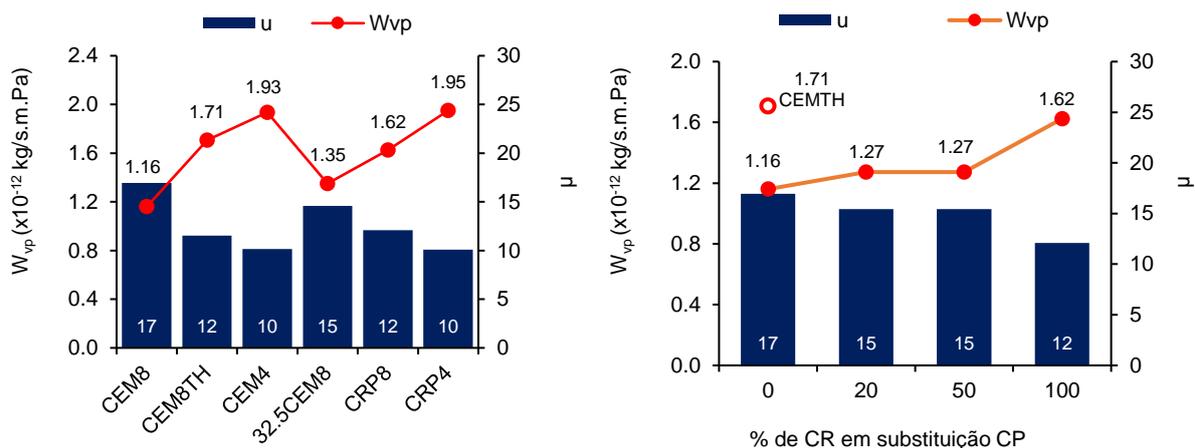


Figura 64– Permeabilidade ao vapor, W_{vp} , e resistência à difusão, μ , de BTC com diferentes tipos de estabilizante (esquerda) ou percentagens de substituição de CP por CRP (direita)

Os BTC com menor teor de ligante apresentaram os maiores valores de permeabilidade ao vapor, visto que estão associados a porosidades mais grosseiras e de maior interconetividade. O provete UCEB apresentou uma permeabilidade duas vezes e meia superior à do provete CEM8 e 74% superior à do CRP8. Segue-se os provetes com 8% cimento reciclado ou 8% de CP de maior a/l (CEM 8TH). A maior porosidade total destes BTC justifica em parte os valores mais altos de permeabilidade. No entanto, apesar do CEM8TH possuir menor porosidade total, a permeabilidade ao vapor foi ligeiramente mais elevada do que no BTC com 8%CRP de igual a/l. Isso sugere uma vez mais que, para idêntico nível de porosidade, o CRP conduz a matrizes mais refinadas e menos interconectadas, reduzindo a permeabilidade intrínseca dos BTC. Na mistura com CEM II/B-L 32,5 obteve-se um resultado intermédio, com a menor capacidade do ligante a ser compensada pelo valor reduzido de a/l.

Na Figura 66 confirma-se uma fraca relação entre a porosidade total e a permeabilidade ao vapor, visto que esta última propriedade depende igualmente da dimensão e distribuição dos poros. Pelas razões referidas, a relação é alterada, especialmente quando muda o teor e o tipo de ligante. Como discutido, a substituição de CP por CRP tende a conduzir a valores ligeiramente superiores de resistência à difusão, para idêntica porosidade total. Porém, como se constata, a utilização de CRP conduz a maiores porosidades, o que compensa este aspeto. Assim, pode-se concluir que o CRP tem um impacto na capacidade de regularização de humidade (buffering capacity, McGregor 2014) semelhante a inferior ao do CP.

A substituição parcial de CP por CRP conduziu a valores intermédios de permeabilidade face aos BTC com 100% CP ou 100% CRP, resultante do aumento da relação a/l. Porém, para até 50% de substituição a permeabilidade sofreu alteração pouco significativa e, como referido, foi sempre inferior à de CEM8TH. Confirma-se assim a tendência para se aumentar a resistência à difusão com a incorporação de CRP.

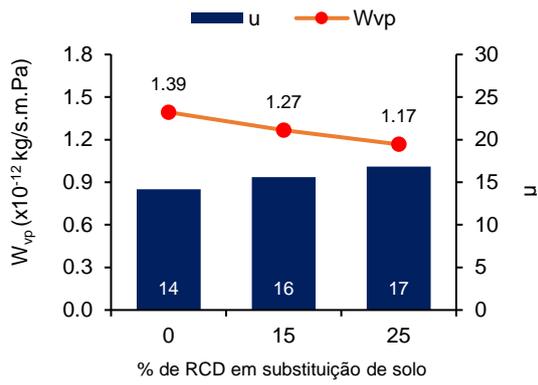


Figura 65– Permeabilidade ao vapor, W_{vp} , e resistência à difusão, μ , de BTC com diferentes teores de RCD

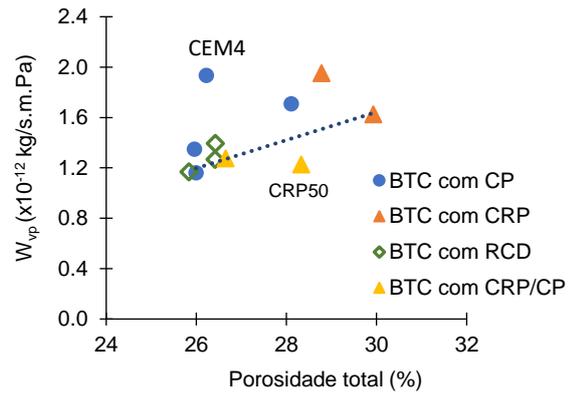


Figura 66– Permeabilidade ao vapor, W_{vp} , versus porosidade total, P_T

A permeabilidade ao vapor diminuiu proporcionalmente com a substituição de solo por RCD (Figura 65). Neste caso, conforme discutido para as restantes propriedades, terá ocorrido uma densificação da matriz, aumentando a resistência à passagem de vapor.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo final da dissertação resume-se as principais conclusões obtidas no trabalho experimental descrito no capítulo 3 e cujos resultados foram apresentados e discutidos no capítulo 4. Em geral considera-se que o principal objetivo do trabalho foi atingido, nomeadamente no que se refere à análise da influência e de eficiência do cimento reciclado na estabilização e durabilidade de blocos de terra comprimida (BTC), em especial face à ação da água, que é o principal mecanismo de degradação das construções em terra. Apoiado numa forte componente experimental, o trabalho envolveu a produção e caracterização de diferentes BTC, com vários tipos (CRP, CRB, CP, CP32.5) e teores de estabilizante (0%, 4%, 8%), percentagens de substituição de CR por CP (20%, 50%) e substituição parcial de solo por RCD (0%, 15%, 25%). A caracterização em termos de durabilidade abrangeu ensaios de absorção (imersão, capilar, baixa pressão), de secagem, de permeabilidade ao vapor e de erosão acelerada (*drip* e *spray test*). Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Eco+RCEB, contribuindo para o cumprimento dos objetivos do mesmo e visando também contribuir para uma maior aceitação da construção em terra e de soluções que permitam a sua utilização de forma mais eficiente, ecológica e sustentável. Em face da extensão deste trabalho, considera-se que foi muito importante o apoio da equipa de investigação ligada ao projeto Eco+RCEB.

Em seguida apresenta-se um breve resumo das principais conclusões do trabalho, bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Após a realização de um estudo preliminar, optou-se por considerar na produção dos BTC uma mistura de terra composta por um solo fracamente argiloso, que foi corrigido por um sub-produto industrial resultante da atividade de despoeiramento da fabricação de telhas de barro vermelho. Esta opção teve por objetivo afinar a composição e granulometria da mistura tendo em conta as gamas recomendadas para a produção de BTC, bem como a utilização de terras livres de minerais argilosos expansivos.

Os BTC produzidos no trabalho atingiram compacidade e valores de resistência elevados, superiores ao observado por outros autores, tendo em consideração iguais níveis de estabilização. Para tal, contribuiu a utilização de uma prensa semi-automática (maiores pressões de prensagem e maior homogeneização dos blocos), bem como a otimização realizada à curva granulométrica da mistura. A produção de BTC com CR excedeu largamente a mínima resistência recomendada na norma HB-195 (2002), mesmo em condições saturadas. Além disso, todos os BTC estabilizados apresentaram níveis de absorção e erosão acelerada à água dentro do recomendado pela normalização para níveis de durabilidade aceitável, independentemente do tipo de ligante.

A absorção por imersão depende essencialmente da porosidade acessível dos materiais, ao passo que as restantes propriedades analisadas são igualmente afetadas pelas características da matriz ligante e como esta é responsável pela coesão das partículas do solo. Desse modo, as restantes propriedades afiguram-se como mais adequadas para avaliar a durabilidade dos BTC. Por sua vez, o

ensaio de gotejamento revelou-se pouco sensível para a avaliação da durabilidade de BTC estabilizados, simulando uma ação pouco severa sobre os mesmos.

O coeficiente de absorção entre 10 minutos e 6 horas mostrou ser menos variável e mais representativo do comportamento dos BTC do que o coeficiente de absorção aos 10 minutos, usualmente considerado na literatura. A taxa de absorção foi bastante inferior segundo a direção de assentamento dos blocos do que na direção perpendicular, demonstrando o carácter anisotrópico dos BTC. Os ensaios de Karsten e de secagem estiveram associados a maior variabilidade, dificultando a interpretação dos resultados.

A produção dos BTC com CR está associada a maior teor em água e menor compacidade, ocorrendo uma redução geral da sua massa volúmica e conseqüentemente da sua porosidade total. Isso resulta da maior exigência de água do CR, que dificulta a compactação ou faz incrementar o a/l_{ef} . No entanto, verifica-se que o CR tem capacidade de hidratação idêntica à do CP, atingindo níveis semelhantes de fixação de água combinada.

A menor compacidade e maior a/l contribuíram para a redução de resistência mecânica nos BTC com CRP. Porém, para um dado teor de ligante, verificou-se uma boa correlação entre a resistência à compressão e a porosidade total, independentemente do tipo de ligante. Assim, demonstra-se que o CR permite um desempenho mecânico semelhante ao CP, caso a porosidade total dos BTC seja idêntica. Acrescente-se que, em condições saturadas, a resistência decresceu cerca de 50%, independentemente do tipo de ligante, sugerindo idêntica eficiência na capacidade estabilizante de ambos os ligantes.

Nos BTC com CRP verifica-se um incremento importante da taxa de absorção capilar, não justificável apenas pela maior porosidade total e a/l destas misturas. Tendências semelhantes foram confirmadas no ensaio de Karsten. Isso justifica-se pelo facto do CR conduzir a matrizes cimentícias mais refinadas para uma dada porosidade total. Neste caso, as matrizes de CR estão associadas a um maior volume de poros de menor dimensão.

A estabilização dificultou a secagem dos BTC, aumentando o tempo de permanência da água no seu interior. Este aspeto foi tanto mais relevante quanto maior o seu teor de ligante e menor a sua compacidade. Porém, apesar da maior porosidade dos BTC com CR, a sua taxa de secagem não foi superior à dos BTC com CP. Mais uma vez isso foi atribuído ao maior refinamento da microestrutura da matriz com CR.

Os vários estabilizantes manifestaram excelente comportamento na resistência dos BTC à erosão por ação da água. Isso foi verificado, independentemente do tipo de ligante. Não foram registados danos significativos no ensaio de erosão por *drip test* (“chuva ligeira”) e *spray test* (“chuva intensa”), ao contrário do observado nos BTC não estabilizados. Em ambos os ensaios, foi atingido o índice máximo de durabilidade de acordo com a normalização. Apenas para condições severas de erosão, os BTC com CRP sofreram ligeiro dano superficial, revelando menor desempenho à ação da água, principalmente para baixo teor de ligante (4%). No entanto, isso apenas ocorreu perante uma pressão do jato de água 5 vezes superior à referida em norma. Acrescente-se que os BTC não estabilizados apresentaram uma taxa de erosão até cerca de 200x superior à dos BTC com CRP, e estando sujeitos a pressões de água 5 vezes inferiores.

Como a ação de erosão por jato de água envolve simultaneamente mecanismos de absorção e permeabilidade, a dimensão e distribuição dos poros, também condicionada pela qualidade do ligante, afeta a penetração de umidade, PH. Assim, os BTC com CP apresentaram pior desempenho do que os BTC com CR de igual a/l. Mais uma vez confirma-se o maior refinamento da microestrutura dos BTC com CR.

A permeabilidade ao vapor foi superior nos BTC com porosidade mais grosseira e de maior interconetividade, coincidindo com as misturas de menor teor de ligante ou maior relação a/l, como sucede nos BTC com CRP. No entanto, uma vez mais os BTC com CRP apresentaram menor permeabilidade ao vapor do que os BTC com CR de igual a/l, confirmando-se a importância da maior densificação da matriz de CR. Conclui-se que o CR tem um impacto na capacidade de regularização da umidade semelhante a superior à do CP.

Em geral a incorporação parcial de CRP ou CRB conduziu a propriedades intermédias das analisadas para 100% CRP ou 100% CP. Até 50% de substituição de CP por CR, ocorreu uma redução de resistência inferior a 20% face ao CEM8, e até 20% de CR a resistência foi idêntica à de CEM8TH. Para teores até 50%CR, a taxa de absorção e de permeabilidade ao vapor não variou de forma significativa. Apenas no ensaio de secagem, a tendência de evolução não seguiu uma tendência óbvia, verificando-se maiores taxas de secagem para 20-50% CR.

O cimento reciclado produzido a partir da separação de detritos de betão (CRB) apresenta um nível de pureza de 67%. Tendo isso em consideração, aumentou-se o teor de CRB, de modo a que a quantidade de material cimentício fosse semelhante à das misturas com 8% CP ou 8% CRP. Devido à sua menor exigência de água face ao CRP, foi possível produzir BTC de relação a/l igual à dos BTC com CP. As várias propriedades analisadas no trabalho foram pouco alteradas quando se considerou a utilização de CRB em vez de CRP. A compensação do teor de ligante em face da contaminação do CRB terá sido eficiente. Em geral pode-se concluir que o método de separação do betão para obter o CRB foi efetivo.

A resistência mecânica e a resistência à ação da água aumentaram com o teor de ligante, demonstrando ser crucial proceder à estabilização dos BTC de modo a garantir a sua durabilidade.

A consideração de um cimento comum de menor resistência (II/B-L 32.5N) teve pouca influência na compacidade dos BTC, mas reduziu de forma esperada o seu desempenho mecânico e de durabilidade. O seu efeito ligante é similar ao da mistura CEM8TH, de maior a/l, reduzindo a capacidade de ligação e solidarização entre as partículas do solo. Para idêntico nível de porosidade, o CRP mostra ser mais efetivo do que o cimento 32.5 no aumento da resistência mecânica.

A substituição de solo por RCD conduziu a uma ligeira melhoria da compacidade dos BTC, mesmo tendo-se respeitado a mesma composição granulométrica da terra. A substituição direta de solo por RCD, ou de modo a respeitar a mesma granulometria, teve pouca influência nas propriedades estudadas, devido ao facto da granulometria original do solo e do RCD serem parecidas. O teor de RCD teve pouca influência na resistência mecânica e durabilidade dos BTC. O ligeiro aumento de resistência mecânica e à ação da água com o incremento de RCD é essencialmente atribuído ao aumento de compacidade da matriz. Conclui-se ser viável a incorporação de grandes percentagens de

RCD na produção de BTC, até pelo menos 25%, melhorando a natureza sustentável deste tipo de construção.

Em suma, os resultados obtidos no presente estudo validam a utilização do cimento reciclado na estabilização da construção em terra. Face aos BTC não estabilizados, a incorporação de CRP permitiu aumentar até 3 vezes a resistência à compressão. Em termos de durabilidade, os BTC não estabilizados apresentaram uma deterioração acelerada após contacto com a água, desintegrando-se após poucos minutos de imersão e sofrendo erosão em toda a sua espessura após sujeitos aos ensaios de erosão acelerada. Assim, conclui-se que a estabilização dos BTC é fundamental, com o cimento reciclado a mostrar ser uma alternativa viável face ao CP.

5.2 PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

O desenvolvimento e caracterização do cimento reciclado é muito recente, encontrando-se ainda em fase de investigação a nível internacional, com a maioria dos estudos neste tema a terem sido realizados nos últimos 10 anos. Para tal, tem contribuído o trabalho desenvolvido no IST desde 2018, no âmbito do projeto EcoHyd e atualmente do projeto em curso Eco+RCEB. Se o desenvolvimento do cimento reciclado ainda é algo recente, a sua aplicação na construção em terra está quase completamente por explorar. Destaca-se apenas 3 trabalhos de mestrado realizados no IST nos últimos 2 anos, embora mais ligados à caracterização mecânica destes materiais. Assim, considera-se que o presente estudo pode ser uma contribuição importante para o desenvolvimento deste tema e para a validação da utilização de cimento reciclado na estabilização das construções em terra. Porém, como referido, o tema é ainda muito recente, justificando-se a realização de investigação adicional, até porque os resultados obtidos são promissores em relação à utilização do CR nos BTC. Desse modo, sugerem-se possíveis estudos a realizar num futuro próximo:

- Otimização da compacidade dos BTC com CR, contornando o seu problema de maior exigência de água, recorrendo, por exemplo, a aditivos naturais ou à incorporação parcial de outras adições minerais que trabalhem em sinergia com o CR;
- Análise da compatibilidade do CR com diferentes classes de minerais argilosos, no que se refere ao desenvolvimento da hidratação e microestrutura. Entendimento do mecanismo de estabilização envolvido;
- Análise microestrutural dos BTC com CR, de modo a confirmar a sua capacidade de estabilização e de eventual desenvolvimento de porosidades mais refinadas;
- Análise da durabilidade de BTC estabilizados com CR quando expostos em ambiente real;
- Influência da incorporação de CR no comportamento higrotérmico dos BTC;
- Influência da incorporação de CR no comportamento dos BTC a elevada temperatura;
- Análise económica e ambiental dos BTC com cimento reciclado e sua confrontação com a estabilização corrente com cimento comum.

6 REFERÊNCIAS

- 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.
- Angulo, S., Guilge, M., Quarcioni, A., Baldusco, R., & Cincotto, M. (2015). Rehydration of Cement Fines: A TG/Calorimetry Study. In *III Progress of Recycling in the Built Environment*. 222-229 RILEM Publications SARL.
- Arthur, E., & Tuller, M. (2020). Clay content and mineralogy, organic carbon and cation exchange capacity affect water vapour sorption hysteresis of soil. *European Journal of Soil Science*. 204-214.
- Aubert, J.E. (2019). Earth construction material: from past to modern buildings. *3rd International Conference on Bio-Based Building Materials*, 37. 217-220.
- Azevedo, B (2021). Blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Azil, A., Touati, K., Sebaibi, n.n Guern, M., Streiff, F., Goodhew, S., Gomina, M., & Boutouil, M. (2023). Monitoring of drying kinetics evolution and hygrothermal properties of new earth-based materials using climatic chamber simulation. In *Case Studies in Construction Materials*.
- Babor, D., & Judele, L. (2009) Environmental impact of concrete. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy*. 27-35.
- Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and concrete composites*, 26(7), 811-820.
- Bandeira J. (2020). Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado. *Dissertação em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- 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.
- Boden, T. A., Andres, R. J., & Marland, G. (2020). Global, Regional, and National fossil-fuel CO₂ emissions, carbon dioxide information analysis center. Oak Ridge national laboratory, U.S. department of energy, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Bogas, J.A., Gomes, M., & Real, S. (2015). Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete. In *Materials and Structures Vol. 48*. 2869-2883.
- Bogas, J., Silva, M., Gomes, M. (2018). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *Int. J. Archit. Herit.* 13. 569–584.
- 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., 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.

Bogas, J.A., Carriço, A., & Real, S. (2022). Thermoactivated Recycled Cement. *Sustainability of Concrete with Synthetic and Recycled Aggregates*.

Bogas, J. A., Carriço, A., & Real, S. (2022). Durability of concrete produced with recycled cement from waste concrete. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1149–1154.

Bogas, J. A., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J. C. C., & Guedes, M. (2022). Hydration and phase development of recycled cement. *Cement and Concrete Composites*, 127.

Bui, Q.B., Hans, S., Morel, J.C., & Mollion, V. (2011). Influence of water on the mechanical characteristics of rammed-earth material. *Structural Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XII*. 565-575.

Burroughs, S. (2008). Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 264–273.

Cagnon, H., Aubert, J., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. In *Energy build*. 80. 208-217.

Carriço, 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.

Cicek, B., Pires, N., Brumaud, C. Habert, G., & Plötze, M. (2020). A reverse engineering approach for low environmental impact earth stabilization technique. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 588(4).

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.

CRATerre (1991). The basics of compressed earth blocks. *Deutsches zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE*.

Cruz, M., & Jalali, S. (2007). Avaliação do melhoramento de terra estabilizada com cimento e ativadores. *Terra em seminário*. 82-85.

Elenga, G. (2011). Characterization of Clayey Soils from Congo and Physical Properties of Their Compressed Earth Blocks Reinforced with Post-Consumer Plastic Wastes. In *Geomaterials*, 01. 88–94.

Exelbirt, J. (2011). Characterizing Compressed Earth Bricks Based on Hygrothermal Aging and WindDriven Rain Erosion.

- Falcão, J.M.F.V.N (2014), "Arquitetura Contemporânea em Terra". *Tese de Mestrado em Construção e Reabilitação, IST, Portugal*.
- Garboczi, E. (1995). Microstructure and transport properties of concrete. In *Rilem report 12-performance criteria for concrete durability*.
- Gomes, M., Gonçalves, T., & Faria, P. (2014). Unstabilised rammed earth: characterization of the material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements. *International Journal of Architectural Heritage*. 8:2, 185-212.
- 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, M., Rodrigues, A., Bogas, J., & Freitas, A. (2021). Thermophysical properties under different hygroscopic conditions of an innovative composite concrete pre-walls system. In *Construction and building materials Vol. 307, 124938*.
- Gonçalves, D. (2023). Estabilização de blocos de terra com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão – Caracterização mecânica e retração. *Dissertação de Mestrado em engenharia civil*. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa.
- Halamickova, P., Detwiller, R., bentz, D., & Garboczi, E. (1995). Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. In *Cem. Concr. Res.* 25. 790-802.
- 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.
- Heathcote, K. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and building materials*. 185-189.
- Houben, H., Boubekur, S., (1998). Compressed earth blocks: standards. Bruxelles, Villefontaine : CDI, CRATerre-EAG. 142 p. ISBN 2-906901-19-9.
- Houben, H., & Guillaud, H. (2008). Earth construction: a comprehensive guide. Practical Action Publishing, Warwickshire.
- Hu, S. (2019). Separação de constituintes do betão visando a obtenção de cimentos reciclados. *Dissertação em engenharia civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Jayasinghe, C., Fonseka, W., & Abeygunawardhene, Y. (2016). Load bearing of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. In *Construction and building materials* 102. 471-477.
- Jorge, F.; Fernandes, M.; & Correia, M. (2006) *Arquitetura de Terra em Portugal*. 1ª Edição, Lisboa, Argumentum ISBN 972-8479-36-0.
- Kamali, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings*, 204, 109479.

- Kazmi, S., Wu, Y. (2022). Recycled aggregate concrete. *Handbook of sustainable concrete and industrial waste management*.
- Kerali, A. G. (2001). Durability of compressed and cement-stabilised building blocks. *University of Warwick, PhD thesis*.
- Kinuthia, J. (2012). The durability of compressed earthbased masonry blocks. In *Eco-efficient masonry bricks and blocks, design, properties and durability*.
- Koutous, A., Hilali, E. (2019). Grain shape effects on the mechanical behaviour of compacted earth. ISSN 2214-5095.
- Kuenzel, H. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. *Fraunhofer Institute of Building Physics*.
- Lea, F. M. (1970). *The Chemistry of Cement and Concrete* (3rd ed.). Edward Arnold Publishers Limited.
- Leal, D. (2021). Durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado. *Dissertação de mestrado em engenharia civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Liuzzi, S., Hall, M., Stefanizzi, P., & Casey, S. (2013). Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. In *Build. Environ.* 61. 82-92.
- Lothenbach, B., Durdzinski, P., & Weerdt, K. (2018). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. CRC Press – Taylor & Francis Group.
- Malkanathi, S., Wickramasinghe, W., & Perera, A. (2021). Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. ISSN 2214-5095.
- Mahdad, M., Benidir, A. & Brara, A. (2021). Experimental assessment of mechanical behaviour of a compressed stabilized earth blocks (CSEB) and walls. In *Journal of materials and engineering structures*. 95-110.
- Martins, C. (2018). Caracterização laboratorial de solos - Nova normalização. *Relatório de estágio*. Instituto superior de engenharia do Porto.
- McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., & Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. In *Building environment* 75. 11-18.
- McGregor, F., & Fabbri, A. (2017). Impact of the determination of the sorption-desorption curves on the prediction of the hemp concrete hygrothermal behaviour. In *Constr. build. mat.* 157. 108-116.
- Monteagudo, S., Moragues, A., Gálvez, J., Casati, M., & Reyes, E. (2014). The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis Morphological evolution of the solid phases. In *Thermochimica Acta* (Vol. 592, pp. 37–51).
- Morel, J. C., Pkla, A., & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. In *Construction and building materials*, 21(2), 303–309.
- Motta, M. (1997). Construções rurais em alvenaria de terra crua no Baixo Alentejo. *Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico*.

- Nabais, M. (2023). Caracterização mecânica de blocos de terra comprimida com incorporação de agregado e cimento reciclado. *Dissertação em engenharia civil*. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa.
- 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. Faculty of environmental science and process engineering of the brandenburg technical University Cottbus.
- Neves, M. F. F. (2019). Proposta de procedimentos normativos para a caracterização mecânica de blocos de terra compactada estabilizada com cimento. Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa.
- Neville, A.M. (1995). *Properties-of-Concrete-AM 149*. 4th Edition, Addison Wesley Longman Ltd., Essex.
- Ngowi, A. (1997). Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. *Construction and building materials*. 1-7.
- Ngoulou, M., Elenga, R., Ahouet, L., Bouyila, S., & Kinda, S. (2019). Modeling the drying kinetics of eath bricks stabilized with cassava flour gel and amylopectin. In *Geomaterials*. 40-53.
- Parracha, J. L., Lima, J., Freire, M. T., Ferreira, M., & Faria, P. (2019). Vernacular earthen buildings from Leiria, Portugal–material characterization. In *International Journal of Architectural Heritage*, 1-16.
- Rodrigues, P. (2005). Earth construction conservation: pathologies due to water. In *Houses and cities built with earth*. 46-48.
- 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.
- Real, S., Sousa, V., Meireles, I., Bogas, J. A., & Carriço, A. (2022). Life cycle assessment of thermoactivated recycled cement production. *materials*, 15(19), 6766.
- Reddi, L. N., Jain, A. K., & Yun, H. B. (2012). Soil materials for earth construction: Properties, classification and suitability testing. In *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 155–171).
- 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.
- Rigassi, V. (1985). Compressed earth blocks: Manual of production. *CRAterre-EAG, GATE*, 1.
- Rodrigues, R. A. (2019). Otimização geométrica do bloco de terra comprimida. *Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa.

- Sandanayake, M. (2022). Environmental Impacts of Construction in Building Industry—A Review of Knowledge Advances, Gaps and Future Directions. *Victoria University, Melbourne, VIC 3011, Australia*.
- Scheffler, G., & Plagge, R. (2010) Introduction of a drying coefficient for building materials. In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings - 11th International Conference*.
- Schroeder, H. (2012). Modern earth building codes, standards and normative development. In *Modern Earth Buildings* (pp. 72-109). Woodhead Publishing.
- Shivaprakash, S., & Sridharan, A. (2021). Correlation of compaction characteristics of standard and reduced Proctor tests. In *Geotechnical engineering*, pp. 170-180.
- 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.
- Silva, R., Oliveira, D., Miranda, T., Esteves, P., Soares, E., Cristelo, N. (2014). Mechanical behaviour of compressed earth blocks stabilised with industrial wastes. Universidade do Minho.
- Silva, S., Fonseca, A., & Consoli, N. (2009). Strength and stiffness properties of mixtures of granitic soil-cement. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Egypt*. 312-315.
- Sousa, V., Bogas, J.A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. In *Journal of Cleaner Production* 306.
- 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. In *Constr. Build. Mater.* 104. 52–62.
- Teixeira, T. (2018). Diagramas de comportamento geotécnico de solos residuais baseados no ensaio DMT. *Dissertação em engenharia civil*. Departamento de Geociências. Universidade de Aveiro.
- Torgal, F. Pacheco, Eires, R., & Jalali, S. (2009). Construção em terra. *TecMinho*. ISBN 978-972-8692-40-7.
- Torgal, F. Pacheco, & Jalali, S. (2011). Construção sustentável. Vantagens ambientais da construção em terra. *Concreta – Feira internacional de construção e obras públicas*. 32-34.
- Touré, M., Sambou, V., Faye, M, Thiam, A., Adj, M., & Azilnon, D. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). In *Journal of building engineering*, 13. 266-271.

UNESCO, W. H. C. 1992-2021. (2023). UNESCO World Heritage List. *Consultado em setembro de 2023*: <http://whc.unesco.org/en/list/>

Uzoegbo, H. C. (2019). Dry-stack and compressed stabilized earth-block construction. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications*, 305–350.

Voigt, E., & Tomlinson, R. (1955). The determination of pore size distribution and surface area from adsorption isotherms. In *Can. J.Chem.* 33. 215-231.

Vyncke, J., Kupers, L., & Denies, N. (2017). Earth as Building Material – an overview of RILEM activities and recent Innovations in Geotechnics. *MATEC Web of Conferences*.

Vyšvařil, M., Bayer, P., Chromá, M., & Rovnaníková, P. (2014). Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 54, 413–420.

Walker, P., Maniatidis, V. (2003). A Review of Rammed Earth Construction. *DTI project report. University of Bath*.

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.

Xuan, D. X., & Shui, Z. H. (2011). Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature. *Fire and materials*, 35(7), 481-490.

Young, J. F., Mindess, S., Gray, R. J., & Bentur, A. (1998). *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Yusoff, S., Bakar, I., Wikeyesekera, D., Zainorabidin A., Azmi, M., & Ramli, H. (2017). The effects of different compaction energy on geotechnical properties of kaolin and laterite. *International conference on applied physics and engineering*. 030009-1 – 03009-7.

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.

Zami, M. (2020). Understanding the advantages of earth construction in urban housing in the United Kingdom. King Fahd University of Petroleum & Minerals (KFUPM).

Zhang, L., Ji, Y., Huang, G., Li, J., Hu, Y. (2018). Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag. In *Constr. Build. Mater.* 164 525–534.

6.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS

ASTM D698 (2000) - Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.

ASTM E96 (2000) - Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.

EN 196-3 (2016) - Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness.

EN 933-1 (2012) - Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.

EN 1015-2 (1998) - Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars.

EN 1015-6 (1998) - Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar.

EN 1015-19 (1998) - Methods of test for mortar for masonry - Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars.

EN 1097-7 (2008) - Tests for mechanical and physical properties of aggregates.

EN 16302 (2013) - Conservation of cultural heritage - Test methods - Measurement of water absorption by pipe method.

EN 16322 (2013) - Conservation of Cultural Heritage - Test methods - Determination of drying properties

EN ISO 14688-2 (2017) - Geotechnical investigation and testing Identification and classification of soil Part 2: Principles for a classification.

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

LNEC E-195 (1966) - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação.

LNEC E394 (1993) - Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica.

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.

NBR 10833 (1989) - Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica.

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

NP-143 (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 932-3 (2010) - Ensaio das propriedades gerais dos agregados: parte 3: método e terminologia para a descrição petrográfica simplificada.

NP EN 933-11 (2011) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: parte 11: ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados.

NP EN 1097 (2012) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados.

NP EN 12350-2 (2009) - Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento.

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

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

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

HB 195 (2002) - The Australian earth building handbook.

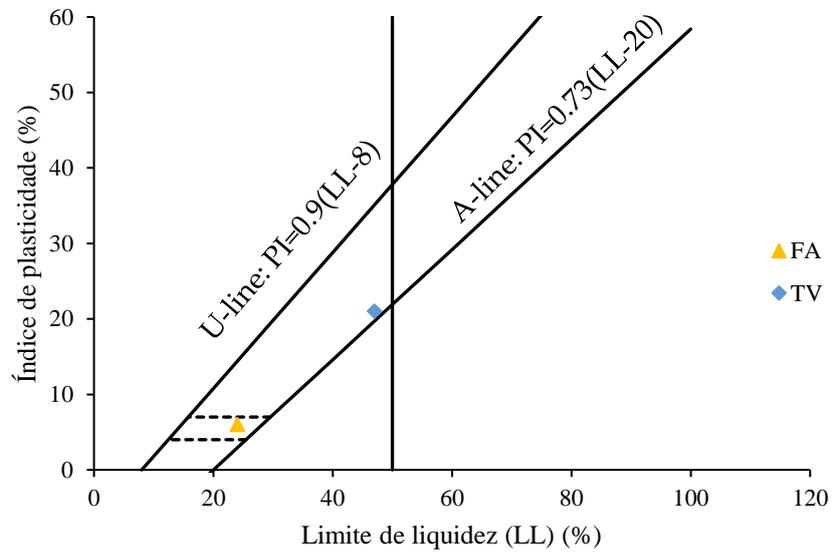
XP P13-901 (2022) - Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions - Specifications - Test methods - Delivery acceptance conditions.

XP P94-047 (1998) - Soils: investigation and testing. Determination of the organic matter content. Ignition method.

WD-ARS 133 (2018) - Compressed stabilized earth blocks - Requirements, production and construction.

7 ANEXOS

A.1 – Difractogramas obtidos através do ensaio de difração de raios-x.



B.1 – Processo construtivo de paredes de alvenaria de BTC.

Embora não sejam o foco de análise neste trabalho, será descrita sucintamente a construção dos muros de alvenaria utilizando BTCs. Uma descrição detalhada destes muros e os resultados correspondentes serão abordados em trabalhos futuros no âmbito do projeto Eco+RCEB.

Foram erguidos um total de 24 muros de alvenaria, distribuídos em diferentes localidades: 6 no IST e outros 6 em Montemor-o-Novo, Alicante e na Covilhã, respetivamente. Metade dessas paredes foi construída em orientação perpendicular em relação às restantes. O processo de construção dos muros teve início com a criação das suas fundações. Estas são compostas por 6 blocos de betão furados, que foram organizados em 3 pares sequenciais. Em seguida, os blocos foram envolvidos e preenchidos com argamassa de CP, preparada no local utilizando um misturador elétrico portátil (conforme mostrado na Figura B-1). A superfície da argamassa foi alisada utilizando um rodo, resultando no aspeto visível na Figura B-1. A base foi regularmente regada e coberta com lonas de plástico para garantir uma cura eficaz. Após esse período, deu-se início à construção dos muros.

Em cada local, foram erguidos três tipos de muros usando BTCs não estabilizados, estabilizados com CP e estabilizados CR. Em todos esses casos, as juntas foram preenchidas com argamassa de CP. Em seguida, em metade de cada muro foi aplicada uma argamassa composta por ligante e areia fina na proporção de 1:3, com uma espessura de aproximadamente 2 mm. O tipo de ligante usado variou dependendo do muro em questão, sendo CP, CR ou o resíduo argiloso TV. A aplicação dessa argamassa foi dividida em três etapas: chapisco, emboço e reboco. Entre cada etapa, a argamassa era humedecida diariamente e coberta com lonas. Por fim, um telhado de ferro foi aplicado para proteger as paredes da exposição direta à chuva (conforme mostrado na Figura B-1).



Figura B-1 – Construção de paredes: a) produção de argamassas; b) fundação fresca; c) parede terminada

Anexo C.1 – Determinação da massa volúmica e da absorção de água dos agregados (solo FAP).

Determinação da Massa volúmica e da absorção de água de agregados (NP EN 1097-6:2016)					
Método do picnómetro para partículas com >1mm					
Simbologia e Formulário	Grandeza		Ensaio Nº		
			1	2	3
t	Temperatura do ensaio	°C	17		
pw	Massa volúmica da água à temp do ensaio	kg/m ³	998.82		
M1	Massa provete saturado com superfície seca	kg	672.5		
M2	Massa do picnómetro com o provete saturado e água	kg	1964.5		
M3	Massa do picnómetro com água	kg	1544.2		
M4	Massa do provete seco em estufa	kg	663.1		
pa	Massa volúmica do material impermeável das partículas	kg/m ³	2727.8		
prd	Massa volúmica das partículas secas em estufa	kg/m ³	2626.2		
pssd	Massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca	kg/m ³	2663.388		
WA24	Absorção de água do agregado	%	1.42		
Valor médio da massa volúmica do material impermeável das partículas			2727.8	kg/m ³	
Valor médio da massa volúmica das partículas secas em estufas			2626.2	kg/m ³	
Valor médio da massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca			2663.4	kg/m ³	
Valor médio da absorção de água			1.4	%	

Anexo C.2 – Determinação dos limites de consistência (solo FAP).

Limite de liquidez					
Número da cápsula		45	113	200	80
m1	Peso da cápsula (g)	12.2	11.3	11.1	11.1
m2	P. cápsula + solo húmido (g)	23.3	23.1	19.2	19.6
m3	P. cápsula + solo seco (g)	21.3	21	17.5	17.9
Ws=m3-m1	Peso do solo seco (g)	9.1	9.7	6.4	6.8
Ww=m2-m3	Peso da água (g)	2	2.1	1.7	1.7
(Ww/Ws)x100	Teor em água (%)	21.98	21.65	26.56	25.00
Número de golpes		30	38	13	18
				LL=	24
Limite de plasticidade					
Número da cápsula		47	73	74	67
m1	Peso da cápsula (g)	10.9	11.2	11.3	11.5
m2	P. cápsula + solo húmido (g)	14	13.6	14.5	14.5
m3	P. cápsula + solo seco (g)	13.5	13.2	14.1	14
Ws=m3-m1	Peso do solo seco (g)	2.6	2	2.8	2.5
Ww=m2-m3	Peso da água (g)	0.5	0.4	0.4	0.5
(Ww/Ws)x100	Teor em água (%)	19.23	20.00	14.29	20.00
Média dos teores em água		18.38			
				LP=	18
				IP=	5.4

Anexo D.1 - Composição por metro cúbico e porosidade total das misturas

Mistura	M _{FA} (kg/m ³)	M _{RCD} (kg/m ³)	M _{TV} (kg/m ³)	M _{CP} (kg/m ³)	M _{CR} (kg/m ³)	M _{H₂O,T} (kg/m ³)	M _{H₂O,ef} (kg/m ³)	P _T (%)
CEM8	1246	402	152	144	0	211	175	26.0
CEM8TH	1211	390	148	140	0	262	227	28.1
CEM8RCD0	1623	0	198	146	0	202	177	26.4
CEM8RCD15P	1364	238	200	144	0	207	175	26.4
CEM8RCD25P	1198	402	203	144	0	211	175	25.8
CEM4	1258	420	202	75	0	214	176	26.2
32.5CEM8	1247	402	152	144	0	211	175	26.0
CRP8	1181	381	144	0	136	255	221	29.8
CRP4	1214	405	195	0	73	225	189	28.7
CRP20CEM80	1236	398	151	114	29	209	173	26.6
CRP50CEM50	1207	389	147	70	70	223	188	28.2
CRB20CEM80	1218	393	149	113	42	208	172	27.0
CRB50CEM50	1203	388	147	69	104	207	172	26.9
UCEB	1258	440	273	0	0	217	177	26.2

Anexo E.1 – Resultado do ensaio de massa volúmica fresca

Designação	Peso (g)	Dimensões (mm)			Mvfresca (kg/m ³)	Coefficiente de Variação	Mvfresca
CEM8	7973	89	295	140	2.169	0.53%	2155
	7978	89	295	140	2.170		
	7987	90	295	140	2.149		
	7974	89.5	295	140	2.157		
	7987	90	295	140	2.149		
	7993	90.5	295	140	2.139		
CEM8TH	7946	89.5	295	140	2.150	0.08%	2151
	7938	89.5	295	140	2.148		
	7991	90	295	140	2.150		
	7951	89.5	295	140	2.151		
	7958	89.5	295	140	2.153		
	7999	90	295	140	2.152		
CEM8-CDW0	7984	89	295	140	2.172	0.18%	2169
	7982	89	295	140	2.172		
	7997	89.5	295	140	2.163		
CEM4	7969	89	295	140	2.168	0.12%	2168
	7980	89	295	140	2.171		
	8001	89.5	295	140	2.165		
RCP8-CDW0	7781	89	295	140	2.117	0.23%	2115
	7795	89.5	295	140	2.109		
	7795	89	295	140	2.121		
RCP4	7866	90	295	140	2.116	0.16%	2112
	7879	90.5	295	140	2.108		
	7895	90.5	295	140	2.112		
UCEB	8070	89.5	295	140	2.183	0.37%	2188
	8081	89	295	140	2.198		
	8107	90	295	140	2.181		
	8061	89	295	140	2.193		
	8045	89.5	295	140	2.176		
	8070	89	295	140	2.196		

Anexo F.1 – Resultado do ensaio de massa volúmica fresca

Designação	Peso (g)	Dimensões (mm)			Mvfresca (kg/m ³)	Coefficiente de Variação	Mvfresca
20RCP80CEM	7979	90	295	140	2.147	0.41%	2137
	7996	90.5	295	140	2.139		
	7995	91	295	140	2.127		
	7986	90	295	140	2.149		
	7987	90.5	295	140	2.137		
	7989	91	295	140	2.126		
50RCP50CEM	7887	90.5	295	140	2.110	0.49%	2107
	7894	91	295	140	2.100		
	7892	91.5	295	140	2.088		
	7879	90	295	140	2.120		
	7897	90.5	295	140	2.113		
	7897	90.5	295	140	2.113		
RCP8	7785	89.5	295	140	2.106	0.21%	2097
	7788	90	295	140	2.095		
	7794	90	295	140	2.097		
	7777	90	295	140	2.092		
	7782	90	295	140	2.094		
	7795	90	295	140	2.097		
RCP8-WC	7789	90	295	140	2.096	0.31%	2087
	7816	91	295	140	2.080		
	7797	90.5	295	140	2.086		
CEM8-WC	7978	89	295	140	2.170	0.94%	2147
	7990	90	295	140	2.150		
	8016	91.5	295	140	2.121		
CEM8-25CDWPENEIR	7974	89	295	140	2.169	0.36%	2159
	7978	89.5	295	140	2.158		
	7993	90	295	140	2.150		
32.5CEM8	7981	89	295	140	2.171	0.49%	2157
	7981	90	295	140	2.147		
	7998	90	295	140	2.152		
CEM8-15CDWPENEIR	7982	89.5	295	140	2.159	0.21%	2153
	7987	90	295	140	2.149		
	7998	90	295	140	2.152		
20RCC80CEM	7984	91	295	140	2.124	0.23%	2122
	7992	91	295	140	2.126		
	7994	91.5	295	140	2.115		
	7978	91	295	140	2.123		
50RCC50CEM	7990	91.5	295	140	2.114	0.17%	2118
	7999	91.5	295	140	2.117		

Anexo F.2 – Resultados do ensaio de absorção capilar

min	Absorção (g/cm ²)									C _{abs,10min}	C _{abs,10min-6h}
	0	10	20	30	60	120	360	1440	4320		
min ^{0.5}	0.00	3.16	4.47	5.48	7.75	10.95	18.97	37.95	65.73	(x10 ⁻² g/cm ² .min ^{0.5})	
CEM8	0.00	0.37	0.44	0.51	0.63	0.80	1.22	1.83	2.66	11.6	5.3
CEM8TH	0.00	0.60	0.72	0.81	0.97	1.19	1.64	2.67	3.13	19.0	6.5
CEM8RCD0	0.00	0.23	0.31	0.36	0.50	0.68	1.12	2.07	2.49	7.4	5.6
CEM8RCD15	0.00	0.32	0.41	0.48	0.63	0.82	1.28	2.31	2.73	10.1	6.0
CEM8RCD25	0.00	0.33	0.44	0.50	0.64	0.82	1.19	2.00	2.79	10.5	5.4
CEM4	0.00	0.54	0.69	0.80	1.02	1.29	1.83	2.77	2.92	17.1	8.0
32.5CEM8	0.00	0.35	0.44	0.50	0.65	0.83	1.23	2.10	2.83	11.0	5.5
CRP8	0.00	0.51	0.65	0.76	1.00	1.31	1.99	3.22	3.34	16.1	9.3
CRP4	0.00	0.66	0.85	0.99	1.30	1.72	2.55	3.14	3.19	20.9	11.9
CRP20CEM50	0.00	0.32	0.40	0.47	0.61	0.78	1.17	1.99	2.82	10.0	5.4
CRP50CEM50	0.00	0.36	0.45	0.52	0.67	0.88	1.34	2.33	3.07	11.5	6.2
CRB20CEM80	0.00	0.36	0.44	0.51	0.65	0.82	1.20	2.03	2.47	11.4	5.3
CRB50CEM50	0.00	0.48	0.58	0.65	0.81	1.01	1.44	2.24	2.35	15.2	6.1
CEM8 H	0.00	0.30	0.36	0.41	0.51	0.66	0.99	1.63	1.73	9.4	4.4
CEM8TH H	0.00	0.28	0.35	0.41	0.53	0.68	1.03	1.79	1.89	8.8	4.7
CRP8 H	0.00	0.51	0.62	0.71	0.94	1.19	1.77	1.99	2.02	16.0	8.0

Anexo G.1 – Resultados médios do ensaio de secagem

	Mseca (g)	w0	sum(wi.(ti+1-ti))	IS após 1130h	Initial Drying Rate (x10 ⁻⁶ kg/m2.h)	Coefficiente de Variação (%)
CEM8-Vert	3636.3	0.111	5254.1	0.706	21.92	22.10
CEM8TH-Vert	3524.0	0.121	5752.4	0.679	23.17	19.78
CEM8RCD0	3635.9	0.092	4237.3	0.679	26.39	17.64
CEM8RCD15	3642.9	0.100	4866.4	0.713	21.93	17.55
CEM8RCD25	3598.2	0.104	4698.4	0.664	20.30	27.05
CEM4	3593.5	0.108	3961.9	0.540	35.71	9.22
32.5CEM8	3594.6	0.104	4518.7	0.639	21.63	20.89
CRP8- Vert	3454.1	0.125	5776.4	0.679	21.38	11.43
CRP4	3531.3	0.121	4542.0	0.545	30.90	6.68
CRP20CEM80	3635.3	0.114	5189.9	0.668	25.12	14.12
CRP50CEM50	3528.8	0.118	5111.8	0.637	24.53	17.59
RCB20CEM80	3064.4	0.112	4698.8	0.618	25.98	6.62
RCB50CEM50	2838.7	0.114	4521.6	0.583	22.51	12.57
CEM8-Hor	3566.7	0.108	4655.0	0.644	27.35	3.19
CEM8TH-Hor	3497.0	0.119	4681.8	0.577	27.10	1.33
CRP8- Hor	3421.3	0.125	5031.0	0.586	28.70	5.70

Anexo G.2 – Resultados médios do ensaio de absorção de água a baixa pressão (Karsten)

	Coefficiente de absorção final médio (kg/m2/s)	Coefficiente de variação (%)	Coefficiente de absorção 5 minutos	Duração média ensaio (s)
CEM8	0.0057	31.84	0.154	873
CEM8TH	0.0133	33.04	0.253	350
CEM8RCD0	0.012	32.53	0.236	434
CEM8RCD15P	0.007	-	0.236	830
CEM8RCD25P	0.005	0.96	0.123	1296.5
CEM4	0.013	8.38	0.262	456.5
CRP8	0.017	0.01	0.329	347.5
CRP4	0.031	23.71	0.443	170.5
CEM80CRP20	0.015	20.77	0.288	354.5
CEM50CRP50	0.023	25.21	0.366	232.5
CEM80CRB20	0.017	26.12	0.310	295
CEM50CRB50	0.014	23.18	0.281	357.5

Anexo H.1 – Resultados do ensaio de erosão acelerada (*Spray test*)

Mistura	Proвете	Pressão (kPa)	Tempo de ensaio (min)	Penetração de humidade para 250 kPa (mm)	
CEM8	I	50, 250	60	20.0	26
	II	50, 250	60	31.3	
CEM8TH	I	50, 250	60	42.2	66
	II	50, 250	60	90.0	
CEM8RCD0	I	50, 250	60	24.0	28
	II	50, 250	60	32.5	
CEM8RCD15P	I	50, 250	60	31.8	32
CEM8RCD25P	I	50, 250	60	21.6	21
	II	50, 250	60	21.3	
32.5CEM8	I	50, 250	60	34.5	35
	II	50, 250	60	35.0	
CEM4	I	50, 250	60	39.0	37
	II	50, 250	60	35.5	
CRP8	I	50, 250	60	32.0	31
	II	50, 250	60	30.0	
CRP4	I	50, 250	60	90.0	90
	II	50, 250	60	90.0	
CEM80CRP20	I	50, 250	60	19.7	21
	II	50, 250	60	21.5	
CEM50CRP50	I	50, 250	60	22.0	28
	II	50, 250	60	34.0	
CEM80CRB20	I	50, 250	60	29.1	28
	II	50, 250	60	26.7	
CEM50CRB50	I	50, 250	60	29.8	36
	II	50, 250	60	41.5	
UCEB	I	50	00:23:40	N/A	
	II	50	00:29:03		

Anexo I.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Composição	Provete	Força (kN)	MV aparente (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Coefficiente de Variação	Resistência à compressão (MPa)
CEM8RCDO	I	278.02	2041	13.81	4.65%	13.62
	II	246.28	2127	12.54		
	III	286.73	2062	14.04		
	IV	285.81	2096	14.08		
CEM4	I	189.32	2049	9.23	1.48%	9.38
	II	191.84	2041	9.41		
	III	190.58	1966	9.29		
	IV	194.82	1991	9.60		
CRP4	I	115.17	1939	5.62	10.89%	5.98
	II	95.00	1957	4.66		
	III	125.83	1958	6.18		
	IV	125.26	1988	6.14		
CEM8	I	261.98	1986	12.81	4.76%	13.58
	II	271.60	1998	13.11		
	III	295.44	2029	14.43		
	IV	287.76	2059	13.96		
	V	640.20	2047	15.49	10.19%	17.57
	VI	750.40	2077	18.18		
	VII	618.40	2030	14.97		
	VIII	786.20	2074	19.03		
CEM8TH	I	254.30	1968	12.44	1.13%	12.55
	II	259.23	2010	12.74		
	III	253.27	1971	12.39		
	IV	255.67	1995	12.64		
	V	661.20	2000	15.97	1.62%	16.38
	VI	678.40	2001	16.41		
	VII	679.00	1977	16.41		
	VIII	691.60	2000	16.72		
UCEB	I	79.53	2022	3.89	9.47%	3.57
	II	75.87	2003	3.79		
	III	73.57	2004	3.57		
	IV	61.43	1976	3.02		
RCP20CEM80	I	269.9	2001	13.09	7.35%	12.47
	II	278.2	2024	13.64		
	III	238.8	1986	11.64		
	IV	235.3	1979	11.51		

Anexo J.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias (continuação).

Composição	Provete	Força (kN)	MV aparente (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Coefficiente de Variação	Resistência à compressão (MPa)
RCP50CEM50	I	214.5	1953	10.58	5.30%	10.93
	II	222.3	1946	10.72		
	III	211.4	1947	10.26		
	IV	238.4	1995	11.79		
CRP8	I	206.3	1981	10.13	2.06%	9.85
	II	202.9	1979	9.94		
	III	204.1	1952	9.71		
	IV	193.3	2000	9.61		
CEM8RCD15P	I	213.1	2043	10.48	8.40%	11.88
	II	261.4	2049	12.73		
	III	254.2	2038	12.43		
CEM8RCD25P	I	278.2	2036	13.61	2.39%	14.13
	II	288.3	2067	14.20		
	III	296.2	2065	14.55		
	IV	287.8	2061	14.15		
CEM32.5	I	235.7	2057	11.46	2.88%	11.03
	II	226.4	2045	11.19		
	III	215.9	2013	10.63		
	IV	222.2	2036	10.83		
CEM20CRB80	I	234.5	1993	11.50	5.55%	12.46
	II	262.8	2025	12.79		
	III	269.4	2036	13.09		
CEM50CRB50	I	233.9	2028	11.39	3.34%	11.08
	II	214.9	2001	10.56		
	III	231	2007	11.30		

Anexo K.1 – Resultado do ensaio de absorção por imersão

Composição	Ensaio 1							Ensaio 2							Média (%)	CV24h (%)	CV48h (%)	Aumento de volume	Média (%)	Aumento de volume	Média (%)	Aumento volume total	Média (%)
	Massa antes do ensaio (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada com superfície seca (g)	Volume (m ³)	Massa seca em estufa 100°C (g)	Mvseca real (kg/m ³)	Abs (%)	Média (%)	Massa saturada com superfície seca às 24h (g)	Massa saturada com superfície seca às 48h (g)	Abs24h (%)	Abs48h (%)	Média (%)										
CEM8RCD0	3678.4	2163.8	3912.5	0.00175	3584.9	2045.94	9.14	9.18	3692.6	3896.6	8.583	8.67	8.695	8.78	1.51	1.53	1.18	17.71	1.18	17.32	1.19	18.76	
	3695.7	2172.2	3939.5	0.00177	3601.8	2033.95	9.38		3920.5	3924.7	8.848		8.965				1.18		1.18		1.19		
	3748.7	2202.8	3987.7	0.00179	3651.1	2041.46	9.22		3970.4	3974.1	8.745		8.847				1.18		1.18		1.19		
	3758.8	2118.5	3995.2	0.00188	3665.2	1949.10	9.00		3977.3	3981.1	8.515		8.619				1.17		1.17		1.18		
CEM4	3673.1	2152.3	3936.8	0.00179	3548.4	1984.48	10.95	10.92	3909.4	3913.7	10.174	10.18	10.295	10.31	0.39	0.26	1.20	20.20	1.20	20.45	1.22	21.71	
	3694.3	2158.7	3949.6	0.00179	3560.2	1983.96	10.94		3922.7	3927.4	10.182		10.314				1.20		1.20		1.22		
	3716.2	2169.8	3961.3	0.00180	3570	1988.76	10.96		3935.6	3939.5	10.241		10.350				1.20		1.20		1.22		
	3686.5	2159.6	3956.7	0.00180	3569.9	1982.51	10.84		3931.5	3936.8	10.129		10.278				1.20		1.20		1.21		
CRP4	3618.5	2117.9	3942	0.00183	3512.4	1921.70	12.23	12.12	3903.5	3907.7	11.135	11.15	11.254	11.28	0.43	0.54	1.21	21.44	1.22	21.66	1.24	23.30	
	3576.3	2098.1	3912.5	0.00182	3487.5	1918.28	12.19		3878.8	3884.4	11.220		11.381				1.22		1.22		1.23		
	3629.7	2110.4	3926.1	0.00182	3506.4	1927.29	11.97		3897.2	3900.9	11.145		11.251				1.21		1.21		1.23		
	3572.8	2077.4	3869.3	0.00180	3452.4	1922.82	12.08		3835.2	3839.8	11.088		11.221				1.22		1.22		1.23		
CEM8	3731.9	2173.9	3981.1	0.00181	3599.3	1987.66	10.61	10.85	3955.1	3959.6	9.885	10.08	10.010	10.17	1.43	1.24	1.20	20.03	1.20	20.17	1.21	21.57	
	3772.2	2190.7	4013.6	0.00183	3619.6	1981.66	10.89		3985.5	3988.1	10.109		10.181				1.20		1.20		1.22		
	3730.5	2165.8	3980	0.00182	3583.3	1971.19	11.07		3950	3953	10.234		10.317				1.20		1.20		1.22		
CEM8TH	3616.9	2119.5	3923	0.00181	3474.1	1922.46	12.92	12.82	3887.2	3892.4	11.891	11.90	12.041	12.03	0.10	0.41	1.23	22.85	1.23	23.15	1.25	24.66	
	3671	2145	3977.9	0.00184	3530.5	1922.33	12.67		3950.2	3953	11.888		11.967				1.23		1.23		1.24		
	3588.6	2102.4	3903	0.00180	3458.1	1916.69	12.87		3870.1	3876.1	11.914		12.088				1.23		1.23		1.25		
CEM80CRP20	3776.4	2189	4021.9	0.00184	3621.9	1972.10	11.04	10.81	4000.9	4004.9	10.464	10.29	10.575	10.43	1.42	1.29	1.21	20.31	1.21	20.65	1.21	21.34	
	3672.1	2123.1	3918	0.00179	3535.5	1972.40	10.82		3899.6	3905.7	10.298		10.471				1.20		1.20		1.21		
	3824.1	2216.3	4061	0.00185	3672.6	1986.91	10.58		4043.8	4049.1	10.107		10.252				1.20		1.20		1.21		
CME50CRP50	3715.5	2144.5	3989	0.00185	3562.4	1927.50	11.98	11.19	3965.5	3971.5	11.315	10.59	11.484	10.74	4.93	4.95	1.22	20.05	1.22	20.26	1.23	21.17	
	3617.1	2081.6	3878.3	0.00180	3497.2	1942.56	10.9		3858.1	3861.9	10.320		10.428				1.20		1.20		1.21		
	3638.6	2094.5	3906.9	0.00182	3529.1	1943.30	10.71		3886.3	3892.5	10.122		10.297				1.20		1.20		1.21		
CRP8	3605.5	2079.5	3883.4	0.00181	3434.1	1899.90	13.08	13.17	3850.4	3854.2	12.129	12.18	12.233	12.29	0.39	0.34	1.23	23.17	1.23	23.35	1.25	25.06	
	3622.2	2120.5	3893.8	0.00178	3440.2	1936.12	13.19		3859.6	3863.2	12.191		12.296				1.24		1.24		1.26		
	3584.4	2070.9	3874.7	0.00181	3421.7	1893.15	13.24		3840.5	3843.7	12.240		12.333				1.23		1.23		1.25		
CEM8RCD15P	3743.5	2203.7	4001.5	0.00180	3617.3	2008.05	10.62	10.58	3969.7	3973.2	9.742	9.73	9.839	9.84	0.55	0.50	1.20	19.51	1.20	19.75	1.21	21.20	
	3706.2	2177.9	3981.8	0.00181	3598.6	1990.91	10.65		3950.6	3954.6	9.782		9.893				1.19		1.20		1.21		
	3710.1	2188.9	3958.7	0.00177	3583.1	2020.53	10.48		3929	3933.3	9.654		9.774				1.20		1.20		1.21		
CME8RCD25P	3688.5	2156.8	3960.7	0.00181	3557.6	1968.23	11.33	11.08	3928	3932.1	10.412	10.21	10.527	10.31	1.42	1.53	1.20	20.30	1.21	20.47	1.22	22.02	
	3733	2194.9	3985.8	0.00179	3590.6	2000.90	11.01		3954.9	3958	10.146		10.232				1.20		1.20		1.22		
	3789.7	2235.9	4049.8	0.00182	3651.5	2009.04	10.91		4019.4	4022.6	10.075		10.163				1.20		1.20		1.22		
32.5CEM8	3757.5	2210.9	4017	0.00181	3620.8	2000.75	10.94	11.15	3985.5	3988.7	10.072	10.26	10.161	10.36	1.36	1.38	1.20	20.49	1.20	20.75	1.22	22.38	
	3741.5	2200.5	4005.4	0.00181	3600.7	1990.97	11.24		3971.3	3975.9	10.292		10.420				1.21		1.21		1.22		
	3684.4	2169.2	3945.2	0.00178	3545.6	1992.40	11.27		3914.7	3917.7	10.410		10.495				1.21		1.21		1.22		
CEM80CRB20	3680.6	2141.8	3936.5	0.00180	3541.1	1969.14	11.17	11.12	3905.7	3910.8	10.296	10.29	10.440	10.38	0.08	0.58	1.20	20.33	1.21	20.51	1.22	21.98	
	3817.3	2221.7	4061.9	0.00184	3656.8	1983.20	11.08		4032.7	4034.2	10.279		10.320				1.20		1.20		1.22		
CME50CRB50	3808.7	2197.6	4035.3	0.00184	3619.7	1965.75	11.48	11.57	4005.3	4008.1	10.653	10.74	10.730	10.83	0.79	0.92	1.21	21.00	1.21	21.18	1.23	22.62	
	3716.9	2199.7	3957.6	0.00182	3544.6	1945.93	11.65		3928.2	3932	10.822		10.929				1.21		1.21		1.23		

Anexo L.1 – Resultado do ensaio de secagem. Perda de massa em percentagem.

tempo (minutos)	CEM80CRB20			RCP4			CEM8TH-Ver			CEM80CRP20			CEM8RCD0			CEM8RCD015P			32.5CEM8			CME8RCD25P		
60	-0.05	-0.06	-0.02	-0.02	-0.02	-0.04	-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.03	-0.05	-0.03	-0.04	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.02	-0.01	-0.04	-0.03
120	-0.07	-0.09	-0.03	-0.05	-0.05	-0.06	-0.05	-0.04	-0.05	-0.04	-0.06	-0.06	-0.06	-0.04	-0.05	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.04	-0.04	-0.02	-0.04	-0.05
180	-0.09	-0.11	-0.05	-0.07	-0.07	-0.08	-0.06	-0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.07	-0.09	-0.06	-0.07	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	-0.06	-0.05	-0.04	-0.05	-0.06
240	-0.11	-0.13	-0.07	-0.10	-0.09	-0.09	-0.07	-0.06	-0.07	-0.07	-0.07	-0.09	-0.10	-0.06	-0.09	-0.05	-0.04	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.05	-0.07	-0.09
300	-0.16	-0.14	-0.07	-0.10	-0.10	-0.11	-0.09	-0.07	-0.08	-0.08	-0.10	-0.10	-0.11	-0.07	-0.10	-0.06	-0.06	-0.09	-0.09	-0.08	-0.07	-0.07	-0.08	-0.10
1416	-0.32	-0.31	-0.22	-0.27	-0.28	-0.27	-0.26	-0.21	-0.21	-0.24	-0.24	-0.26	-0.31	-0.22	-0.25	-0.23	-0.20	-0.25	-0.29	-0.24	-0.24	-0.20	-0.24	-0.29
2817	-0.55	-0.49	-0.36	-0.41	-0.42	-0.45	-0.35	-0.31	-0.37	-0.40	-0.38	-0.37	-0.42	-0.33	-0.41	-0.36	-0.30	-0.35	-0.46	-0.35	-0.32	-0.28	-0.33	-0.45
4228	-0.79	-0.68	-0.54	-0.59	-0.60	-0.65	-0.44	-0.42	-0.53	-0.59	-0.53	-0.49	-0.54	-0.46	-0.62	-0.51	-0.39	-0.43	-0.56	-0.42	-0.40	-0.36	-0.44	-0.62
5653	-1.01	-0.87	-0.73	-0.79	-0.78	-0.90	-0.55	-0.54	-0.74	-0.80	-0.66	-0.61	-0.67	-0.59	-0.84	-0.66	-0.49	-0.52	-0.70	-0.50	-0.47	-0.44	-0.55	-0.82
10333	-1.96	-1.76	-1.68	-1.75	-1.75	-1.96	-1.20	-1.21	-1.66	-1.67	-1.39	-1.35	-1.42	-1.33	-1.82	-1.51	-1.12	-1.17	-1.57	-1.14	-1.10	-1.08	-1.29	-1.80
11333	-2.18	-1.96	-1.86	-1.96	-1.96	-2.19	-1.38	-1.36	-1.85	-1.85	-1.54	-1.51	-1.60	-1.49	-1.98	-1.69	-1.29	-1.33	-1.77	-1.30	-1.27	-1.25	-1.48	-1.99
12793	-2.44	-2.21	-2.11	-2.20	-2.24	-2.46	-1.61	-1.57	-2.10	-2.09	-1.76	-1.75	-1.81	-1.70	-2.16	-1.91	-1.49	-1.54	-2.02	-1.54	-1.51	-1.47	-1.74	-2.21
14268	-2.64	-2.38	-2.25	-2.39	-2.40	-2.64	-1.75	-1.67	-2.19	-2.27	-1.91	-1.86	-1.92	-1.81	-2.29	-2.01	-1.63	-1.72	-2.15	-1.63	-1.60	-1.58	-1.86	-2.38
18553	-3.37	-3.23	-2.97	-3.20	-3.20	-3.45	-2.40	-2.28	-2.81	-2.93	-2.62	-2.53	-2.32	-2.21	-2.58	-2.41	-2.19	-2.19	-2.96	-2.34	-2.36	-2.22	-2.56	-2.90
19916	-3.54	-3.48	-3.19	-3.51	-3.52	-3.77	-2.67	-2.55	-3.04	-3.10	-2.86	-2.79	-2.45	-2.32	-2.67	-2.52	-2.34	-2.33	-3.15	-2.56	-2.59	-2.38	-2.74	-3.02
21466	-3.69	-3.73	-3.38	-3.83	-3.86	-4.07	-2.89	-2.80	-3.17	-3.22	-3.08	-2.98	-2.55	-2.41	-2.76	-2.61	-2.45	-2.43	-3.37	-2.81	-2.88	-2.55	-2.91	-3.13
28551	-4.13	-4.35	-3.90	-5.05	-5.18	-5.24	-3.46	-3.71	-3.64	-3.61	-3.65	-3.48	-2.85	-2.71	-3.01	-2.88	-2.79	-2.73	-3.89	-3.48	-3.66	-2.96	-3.38	-3.47
29985	-4.16	-4.40	-3.93	-5.19	-5.33	-5.35	-3.51	-3.81	-3.67	-3.63	-3.69	-3.51	-2.87	-2.71	-3.01	-2.90	-2.80	-2.73	-3.91	-3.50	-3.72	-2.99	-3.41	-3.50
31426	-4.20	-4.46	-4.00	-5.34	-5.50	-5.50	-3.59	-3.93	-3.72	-3.72	-3.81	-3.62	-2.99	-2.78	-3.07	-2.93	-2.85	-2.78	-3.99	-3.58	-3.80	-3.04	-3.47	-3.55
34377	-4.35	-4.61	-4.12	-5.63	-5.82	-5.78	-3.73	-4.15	-3.87	-3.81	-3.90	-3.71	-3.01	-2.85	-3.14	-3.03	-2.93	-2.87	-4.12	-3.73	-3.97	-3.17	-3.60	-3.65
38768	-4.49	-4.77	-4.28	-5.94	-6.14	-6.06	-3.91	-4.38	-4.02	-3.94	-4.05	-3.85	-3.14	-2.96	-3.25	-3.14	-3.07	-2.99	-4.27	-3.88	-4.14	-3.30	-3.76	-3.79
40178	-4.52	-4.81	-4.32	-6.03	-6.21	-6.14	-3.95	-4.44	-4.07	-3.97	-4.09	-3.91	-3.16	-2.99	-3.28	-3.17	-3.10	-3.02	-4.31	-3.94	-4.19	-3.35	-3.80	-3.85
41613	-4.57	-4.87	-4.36	-6.11	-6.30	-6.21	-4.03	-4.49	-4.10	-4.01	-4.14	-3.94	-3.20	-3.03	-3.31	-3.21	-3.14	-3.05	-4.35	-3.98	-4.25	-3.39	-3.84	-3.87
43373	-4.62	-4.92	-4.42	-6.21	-6.39	-6.31	-4.09	-4.58	-4.16	-4.06	-4.20	-4.00	-3.25	-3.07	-3.35	-3.25	-3.18	-3.10	-4.42	-4.03	-4.31	-3.43	-3.90	-3.93
48933	-4.73	-5.04	-4.54	-6.42	-6.60	-6.50	-4.22	-4.75	-4.28	-4.17	-4.32	-4.12	-3.35	-3.16	-3.44	-3.34	-3.28	-3.20	-4.52	-4.16	-4.43	-3.55	-4.01	-4.04
50293	-4.75	-5.06	-4.55	-6.45	-6.64	-6.53	-4.25	-4.78	-4.31	-4.19	-4.35	-4.15	-3.36	-3.18	-3.45	-3.36	-3.30	-3.21	-4.55	-4.19	-4.46	-3.57	-4.03	-4.06
51773	-4.80	-5.09	-4.61	-6.50	-6.68	-6.58	-4.30	-4.81	-4.34	-4.20	-4.38	-4.19	-3.39	-3.21	-3.48	-3.39	-3.32	-3.24	-4.58	-4.23	-4.49	-3.59	-4.06	-4.10
53438	-4.82	-5.14	-4.63	-6.57	-6.74	-6.63	-4.33	-4.87	-4.39	-4.25	-4.42	-4.24	-3.42	-3.23	-3.51	-3.41	-3.34	-3.27	-4.87	-4.24	-4.54	-3.63	-4.10	-4.13
58888	-4.89	-5.21	-4.70	-6.68	-6.85	-6.74	-4.42	-4.96	-4.44	-4.32	-4.49	-4.29	-3.48	-3.29	-3.56	-3.47	-3.41	-3.33	-4.67	-4.34	-4.61	-3.69	-4.17	-4.19
60363	-4.91	-5.23	-4.72	-6.71	-6.88	-6.76	-4.44	-4.99	-4.48	-4.34	-4.51	-4.32	-3.49	-3.30	-3.58	-3.48	-3.43	-3.34	-4.69	-4.35	-4.63	-3.72	-4.19	-4.21
63513	-4.93	-5.25	-4.76	-6.75	-6.93	-6.81	-4.50	-5.03	-4.52	-4.38	-4.55	-4.35	-3.51	-3.33	-3.59	-3.50	-3.45	-3.37	-4.71	-4.37	-4.68	-3.74	-4.23	-4.24
68118	-4.99	-5.30	-4.82	-6.83	-7.00	-6.88	-4.55	-5.11	-4.56	-4.42	-4.61	-4.45	-3.56	-3.37	-3.64	-3.55	-3.50	-3.40	-4.77	-4.43	-4.72	-3.79	-4.28	-4.29

Anexo M.1 – Resultado do ensaio de secagem. Perda de massa em percentagem (continuação).

tempo (minutos)	CEM8-Ver			CRP8			CEM50CRP50			CEM50CRB50			CEM4			CME8TH-Hor			CRP8-Hor			CME8-Hor		
60	-0.05	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	-0.04	-0.03	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03
120	-0.05	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.03	-0.04	-0.04	-0.06	-0.05	-0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
180	-0.08	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.07	-0.05	-0.06	-0.08	-0.04	-0.05	-0.05	-0.04	-0.07	-0.07	-0.08	-0.09	-0.08	-0.10	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07
240	-0.08	-0.07	-0.08	-0.07	-0.06	-0.07	-0.07	-0.08	-0.09	-0.09	-0.08	-0.08	-0.07	-0.09	-0.09	-0.11	-0.11	-0.09	-0.14	-0.10	-0.11	-0.12	-0.11	-0.11
300	-0.10	-0.08	-0.08	-0.09	-0.08	-0.08	-0.09	-0.10	-0.11	-0.11	-0.10	-0.10	-0.09	-0.11	-0.11	-0.13	-0.14	-0.12	-0.17	-0.12	-0.13	-0.15	-0.13	-0.14
1416	-0.29	-0.24	-0.25	-0.24	-0.26	-0.28	-0.25	-0.29	-0.32	-0.39	-0.32	-0.36	-0.33	-0.34	-0.37	-0.49	-0.48	-0.42	-0.60	-0.51	-0.54	-0.57	-0.52	-0.52
2817	-0.39	-0.35	-0.40	-0.39	-0.34	-0.35	-0.40	-0.40	-0.42	-0.54	-0.44	-0.48	-0.48	-0.49	-0.53	-0.70	-0.70	-0.65	-0.84	-0.73	-0.78	-0.80	-0.89	-0.74
4228	-0.48	-0.46	-0.61	-0.50	-0.43	-0.44	-0.49	-0.53	-0.63	-0.69	-0.56	-0.59	-0.65	-0.67	-0.75	-0.94	-0.94	-0.92	-1.10	-0.97	-1.04	-1.03	-0.92	-0.98
5653	-0.58	-0.56	-0.79	-0.63	-0.51	-0.54	-0.60	-0.66	-0.82	-0.85	-0.67	-0.71	-0.83	-0.84	-0.97	-1.17	-1.16	-1.21	-1.35	-1.23	-1.31	-1.26	-1.15	-1.30
10333	-1.27	-1.28	-1.82	-1.46	-1.16	-1.21	-1.39	-1.58	-1.95	-1.93	-1.54	-1.66	-1.96	-2.00	-2.26	-2.54	-2.59	-2.62	-2.88	-2.61	-2.85	-2.66	-2.43	-2.47
11333	-1.46	-1.50	-2.02	-1.66	-1.33	-1.39	-1.60	-1.82	-2.19	-2.23	-1.79	-1.92	-2.20	-2.30	-2.56	-2.84	-2.92	-2.85	-3.25	-2.96	-3.18	-2.82	-2.57	-2.61
12793	-1.71	-1.78	-2.23	-1.94	-1.57	-1.63	-1.88	-2.12	-2.50	-2.64	-2.13	-2.25	-2.55	-2.65	-2.92	-3.20	-3.33	-3.17	-3.62	-3.32	-3.55	-2.96	-2.74	-2.76
14268	-1.82	-1.92	-2.35	-2.07	-1.67	-1.73	-2.01	-2.27	-2.68	-2.79	-2.24	-2.40	-2.71	-2.83	-3.12	-3.38	-3.52	-3.39	-3.81	-3.52	-3.75	-3.07	-2.83	-2.86
18553	-2.32	-2.66	-2.67	-2.91	-2.41	-2.48	-2.84	-3.20	-3.38	-3.90	-3.26	-3.49	-3.65	-3.78	-3.97	-4.02	-4.20	-4.06	-4.35	-4.16	-4.34	-3.37	-3.15	-3.16
19916	-2.40	-2.77	-2.73	-3.17	-2.66	-2.73	-3.07	-3.46	-3.52	-4.13	-3.55	-3.75	-3.88	-4.00	-4.14	-4.16	-4.32	-4.21	-4.46	-4.28	-4.44	-3.45	-3.22	-3.24
21466	-2.50	-2.89	-2.80	-3.39	-2.96	-3.05	-3.31	-3.68	-3.64	-4.33	-3.81	-4.01	-4.11	-4.21	-4.30	-4.28	-4.45	-4.34	-4.55	-4.40	-4.56	-3.51	-3.30	-3.31
28551	-2.78	-3.25	-3.06	-3.99	-3.83	-3.86	-3.93	-4.29	-4.07	-4.85	-4.47	-4.63	-4.71	-4.81	-4.80	-4.68	-4.86	-4.79	-4.92	-4.78	-4.92	-3.77	-3.55	-3.58
29985	-2.79	-3.26	-3.09	-4.03	-3.89	-3.90	-3.98	-4.33	-4.09	-4.88	-4.52	-4.67	-4.77	-4.85	-4.83	-4.71	-4.87	-4.83	-4.93	-4.81	-4.94	-3.77	-3.56	-3.59
31426	-2.84	-3.32	-3.13	-4.10	-3.99	-3.98	-4.04	-4.40	-4.16	-4.95	-4.59	-4.75	-4.84	-4.92	-4.90	-4.76	-4.94	-4.89	-4.98	-4.87	-4.99	-3.80	-3.59	-3.62
34377	-2.93	-3.43	-3.21	-4.24	-4.15	-4.15	-4.18	-4.56	-4.29	-5.11	-4.76	-4.91	-5.00	-5.11	-5.07	-4.89	-5.08	-5.02	-5.12	-5.01	-5.14	-3.92	-3.71	-3.73
38768	-3.04	-3.55	-3.32	-4.42	-4.34	-4.33	-4.37	-4.75	-4.44	-5.24	-4.93	-5.07	-5.17	-5.28	-5.22	-5.06	-5.21	-5.17	-5.25	-5.15	-5.27	-4.03	-3.82	-3.85
40178	-3.09	-3.59	-3.37	-4.46	-4.39	-4.38	-4.41	-4.79	-4.49	-5.30	-4.99	-5.11	-5.22	-5.34	-5.26	-5.09	-5.27	-5.21	-5.29	-5.21	-5.33	-4.07	-3.86	-3.88
41613	-3.10	-3.63	-3.38	-4.52	-4.45	-4.45	-4.46	-4.84	-4.54	-5.36	-5.04	-5.16	-5.27	-5.40	-5.32	-5.14	-5.31	-5.27	-5.33	-5.24	-5.37	-4.10	-3.89	-3.92
43373	-3.14	-3.69	-3.43	-4.56	-4.52	-4.49	-4.52	-4.90	-4.59	-5.40	-5.10	-5.23	-5.33	-5.46	-5.37	-5.20	-5.37	-5.33	-5.39	-5.30	-5.43	-4.15	-3.93	-3.96
48933	-3.24	-3.78	-3.54	-4.69	-4.66	-4.62	-4.65	-5.03	-4.70	-5.52	-5.23	-5.34	-5.46	-5.61	-5.49	-5.31	-5.47	-5.46	-5.49	-5.42	-5.54	-4.24	-4.03	-4.06
50293	-3.25	-3.81	-3.54	-4.71	-4.68	-4.66	-4.67	-5.06	-4.73	-5.53	-5.23	-5.36	-5.49	-5.63	-5.53	-5.33	-5.51	-5.48	-5.51	-5.43	-5.55	-4.26	-4.04	-4.08
51773	-3.28	-3.83	-3.57	-4.75	-4.70	-4.69	-4.72	-5.08	-4.77	-5.58	-5.28	-5.42	-5.53	-5.66	-5.56	-5.37	-5.54	-5.51	-5.55	-5.47	-5.59	-4.28	-4.07	-4.11
53438	-3.33	-3.86	-3.60	-4.79	-4.77	-4.73	-4.75	-5.13	-4.80	-5.61	-5.32	-5.44	-5.57	-5.71	-5.58	-5.41	-5.58	-5.54	-5.58	-5.49	-5.62	-4.30	-4.10	-4.13
58888	-3.36	-3.93	-3.67	-4.87	-4.84	-4.81	-4.89	-5.20	-4.87	-5.68	-5.40	-5.51	-5.64	-5.78	-5.66	-5.46	-5.63	-5.60	-5.63	-5.55	-5.67	-4.37	-4.14	-4.19
60363	-3.39	-3.94	-3.69	-4.88	-4.85	-4.83	-4.85	-5.21	-4.89	-5.69	-5.41	-5.53	-5.66	-5.81	-5.68	-5.48	-5.64	-5.63	-5.65	-5.57	-5.70	-4.38	-4.16	-4.20
63513	-3.42	-3.99	-3.73	-4.96	-4.91	-4.89	-4.88	-5.24	-4.93	-5.73	-5.45	-5.57	-5.69	-5.84	-5.70	-5.52	-5.68	-5.65	-5.68	-5.59	-5.72	-4.40	-4.18	-4.21
68118	-3.46	-4.03	-3.77	-4.98	-4.97	-4.93	-4.93	-5.29	-4.98	-5.77	-5.51	-5.60	-5.75	-5.88	-5.77	-5.55	-5.72	-5.69	-5.71	-5.64	-5.76	-4.44	-4.22	-4.26

Anexo N.1 – Resultados do ensaio de capilaridade a baixa pressão (Karsten)

CEM8										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0.00	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.1	0.02	0.030	0.15	0.02	0.045	0.125	0.02	0.038
10	3.16	0.15	0.02	0.0227	0.25	0.04	0.0378	0.2	0.03	0.0303
20	4.47	0.25	0.04	0.0182	0.4	0.06	0.0294	0.325	0.05	0.0238
40	6.32	0.4	0.06	0.0144	0.65	0.10	0.0235	0.525	0.08	0.0189
60	7.75	0.5	0.08	0.0121	0.8	0.12	0.0195	0.65	0.10	0.0158
80	8.94	0.6	0.09	0.0109	1	0.15	0.0179	0.8	0.12	0.0144
100	10.00	0.7	0.11	0.0101	1.1	0.17	0.0162	0.9	0.14	0.0131
120	10.95	0.75	0.11	0.0092	1.2	0.18	0.0147	0.975	0.15	0.0120
140	11.83	0.85	0.13	0.0087	1.35	0.20	0.0139	1.1	0.17	0.0113
160	12.65	0.9	0.14	0.0082	1.45	0.22	0.0131	1.175	0.18	0.0107
180	13.42	1	0.15	0.0079	1.55	0.23	0.0124	1.275	0.19	0.0102
240	15.49	1.2	0.18	0.0073	1.8	0.27	0.0112	1.5	0.23	0.0093
300	17.32	1.35	0.20	0.0067	2.1	0.32	0.0102	1.725	0.26	0.0085
360	18.97	1.5	0.23	0.0061	2.35	0.36	0.0095	1.925	0.29	0.0078
480	21.91	1.8	0.27	0.0056	2.8	0.42	0.0086	2.3	0.35	0.0071
600	24.49	2.1	0.32	0.0051	3.25	0.49	0.0079	2.675	0.40	0.0065
900	30.00	2.65	0.40	0.0044	4	0.61	0.0070	3.325	0.50	0.0057
1200	34.64	3.2	0.48	0.0040						
1500	38.73	3.625	0.55	0.0036						
1750	41.83	4	0.61	0.0034						

CEM8TH										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.1	0.02	0.030	0.3	0.05	0.091	0.2	0.03	0.061
10	3.16	0.15	0.02	0.0227	0.5	0.08	0.0757	0.325	0.05	0.0492
20	4.47	0.25	0.04	0.0182	0.7	0.11	0.0510	0.475	0.07	0.0346
40	6.32	0.45	0.07	0.0163	1.05	0.16	0.0367	0.75	0.11	0.0265
60	7.75	0.6	0.09	0.0147	1.3	0.20	0.0303	0.95	0.14	0.0225
80	8.94	0.75	0.11	0.0138	1.6	0.24	0.0277	1.175	0.18	0.0208
100	10.00	0.9	0.14	0.0132	1.85	0.28	0.0259	1.375	0.21	0.0195
120	10.95	1	0.15	0.0125	2.05	0.31	0.0242	1.525	0.23	0.0183
140	11.83	1.15	0.17	0.0121	2.3	0.35	0.0231	1.725	0.26	0.0176
160	12.65	1.3	0.20	0.0119	2.5	0.38	0.0221	1.9	0.29	0.0170
180	13.42	1.4	0.21	0.0115	2.65	0.40	0.0211	2.025	0.31	0.0163
240	15.49	1.75	0.26	0.0110	3.2	0.48	0.0195	2.475	0.37	0.0152
300	17.32	2	0.30	0.0102	3.7	0.56	0.0180	2.85	0.43	0.0141
360	18.97	2.35	0.36	0.0098	4	0.61	0.0170	3.175	0.48	0.0133
480	21.91	2.85	0.43	0.0090						
600	24.49	3.45	0.52	0.0086						
734	27.09	4	0.61	0.0082						

Anexo O.1 – Resultados do ensaio de capilaridade a baixa pressão (Karsten)

CEM8-CDW0										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.2	0.1	0.02	0.030	0.2	0.03	0.061	0.15	0.02	0.045
10	3.2	0.15	0.02	0.023	0.3	0.05	0.045	0.225	0.03	0.034
20	4.5	0.3	0.05	0.022	0.5	0.08	0.036	0.4	0.06	0.029
40	6.3	0.5	0.08	0.019	0.85	0.13	0.031	0.675	0.10	0.025
60	7.7	0.65	0.10	0.016	1.1	0.17	0.027	0.875	0.13	0.022
80	8.9	0.75	0.11	0.014	1.35	0.20	0.025	1.05	0.16	0.019
100	10.0	0.9	0.14	0.013	1.6	0.24	0.023	1.25	0.19	0.018
120	11.0	1	0.15	0.012	1.8	0.27	0.022	1.4	0.21	0.017
140	11.8	1.1	0.17	0.012	2	0.30	0.021	1.55	0.23	0.016
160	12.6	1.25	0.19	0.011	2.2	0.33	0.020	1.725	0.26	0.016
180	13.4	1.35	0.20	0.011	2.35	0.36	0.019	1.85	0.28	0.015
240	15.5	1.65	0.25	0.010	2.85	0.43	0.018	2.25	0.34	0.014
300	17.3	1.95	0.30	0.010	3.35	0.51	0.017	2.65	0.40	0.013
360	19.0	2.2	0.33	0.009	3.8	0.58	0.016	3	0.45	0.012
480	21.9	2.7	0.41	0.008	4	0.61	0.015	3.35	0.51	0.012
600	24.5	3.25	0.49	0.008						
792	28.1	4	0.61	0.008						

CEM8-CDW15				
Provete 1				
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0	
5	2.2	0.1	0.02	0.030
10	3.2	0.15	0.02	0.023
20	4.5	0.3	0.05	0.022
40	6.3	0.5	0.08	0.019
60	7.7	0.7	0.11	0.017
80	8.9	0.85	0.13	0.016
100	10.0	1	0.15	0.015
120	11.0	1.15	0.17	0.014
140	11.8	1.25	0.19	0.014
160	12.6	1.35	0.20	0.013
180	13.4	1.45	0.22	0.012
240	15.5	1.75	0.26	0.011
300	17.3	2	0.30	0.010
360	19.0	2.3	0.35	0.010
480	21.9	2.8	0.42	0.009
600	24.5	3.25	0.49	0.008
830	28.8	4	0.61	0.007

Anexo P.1 – Resultados do ensaio de capilaridade a baixa pressão (Karsten)

CEM8-CDW25										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.1	0.02	0.030	0.05	0.01	0.015	0.075	0.01	0.023
10	3.16	0.15	0.02	0.023	0.1	0.02	0.015	0.125	0.02	0.019
20	4.47	0.2	0.03	0.014	0.15	0.02	0.011	0.175	0.03	0.013
40	6.32	0.35	0.05	0.012	0.3	0.05	0.011	0.325	0.05	0.012
60	7.75	0.45	0.07	0.011	0.4	0.06	0.010	0.425	0.06	0.010
80	8.94	0.6	0.09	0.010	0.5	0.08	0.009	0.55	0.08	0.010
100	10.00	0.7	0.11	0.010	0.6	0.09	0.009	0.65	0.10	0.010
120	10.95	0.8	0.12	0.010	0.7	0.11	0.009	0.75	0.11	0.009
140	11.83	0.85	0.13	0.009	0.8	0.12	0.008	0.825	0.12	0.009
160	12.65	0.95	0.14	0.009	0.85	0.13	0.008	0.9	0.14	0.008
180	13.42	1	0.15	0.008	0.9	0.14	0.008	0.95	0.14	0.008
240	15.49	1.25	0.19	0.008	1.1	0.17	0.007	1.175	0.18	0.007
300	17.32	1.4	0.21	0.007	1.3	0.20	0.007	1.35	0.20	0.007
360	18.97	1.65	0.25	0.007	1.5	0.23	0.006	1.575	0.24	0.006
480	21.91	2	0.30	0.006	1.85	0.28	0.006	1.925	0.29	0.006
600	24.49	2.3	0.35	0.006	2.25	0.34	0.006	2.275	0.34	0.006
900	30.00	3.05	0.46	0.005	3	0.45	0.005	3.025	0.46	0.005
1200	34.64	3.85	0.58	0.005	3.7	0.56	0.005	3.775	0.57	0.005
1273	35.68	4	0.61	0.005	4	0.61	0.005	4	0.61	0.005

CEM4										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.1	0.02	0.030	0.15	0.02	0.045	0.125	0.02	0.038
10	3.16	0.2	0.03	0.030	0.3	0.05	0.045	0.25	0.04	0.038
20	4.47	0.4	0.06	0.030	0.45	0.07	0.034	0.425	0.06	0.032
40	6.32	0.7	0.11	0.026	0.65	0.10	0.023	0.675	0.10	0.025
60	7.75	0.9	0.14	0.023	1.05	0.16	0.024	0.975	0.15	0.024
80	8.94	1.1	0.17	0.021	1.25	0.19	0.023	1.175	0.18	0.022
100	10.00	1.3	0.20	0.020	1.45	0.22	0.022	1.375	0.21	0.021
120	10.95	1.5	0.23	0.019	1.65	0.25	0.020	1.575	0.24	0.020
140	11.83	1.65	0.25	0.018	1.85	0.28	0.020	1.75	0.26	0.019
160	12.65	1.8	0.27	0.017	2	0.30	0.019	1.9	0.29	0.018
180	13.42	1.9	0.29	0.016	2.15	0.33	0.018	2.025	0.31	0.017
240	15.49	2.35	0.36	0.015	2.65	0.40	0.017	2.5	0.38	0.016
300	17.32	2.75	0.42	0.014	3.05	0.46	0.015	2.9	0.44	0.015
360	18.97	3.1	0.47	0.013	3.5	0.53	0.014	3.3	0.50	0.014
480	21.91	3.85	0.58	0.012	4	0.61	0.014	3.925	0.59	0.013
508	22.54	4	0.61	0.012						

Anexo Q.1 – Resultados do ensaio de capilaridade a baixa pressão (Karsten)

RCP8										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.2	0.03	0.061	0.2	0.03	0.061	0.2	0.03	0.061
10	3.16	0.35	0.05	0.053	0.35	0.05	0.053	0.35	0.05	0.053
20	4.47	0.6	0.09	0.045	0.6	0.09	0.045	0.6	0.09	0.045
40	6.32	0.95	0.14	0.035	0.95	0.14	0.035	0.95	0.14	0.035
60	7.75	1.25	0.19	0.030	1.3	0.20	0.032	1.275	0.19	0.031
80	8.94	1.55	0.23	0.028	1.55	0.23	0.029	1.55	0.23	0.028
100	10.00	1.8	0.27	0.026	1.8	0.27	0.027	1.8	0.27	0.027
120	10.95	2	0.30	0.025	2	0.30	0.025	2	0.30	0.025
140	11.83	2.25	0.34	0.024	2.2	0.33	0.023	2.225	0.34	0.023
160	12.65	2.45	0.37	0.023	2.4	0.36	0.022	2.425	0.37	0.022
180	13.42	2.65	0.40	0.022	2.6	0.39	0.021	2.625	0.40	0.021
240	15.49	3.2	0.48	0.020	3.15	0.48	0.020	3.175	0.48	0.020
300	17.32	3.65	0.55	0.018	3.65	0.55	0.018	3.65	0.55	0.018
350	18.71	4	0.61	0.017	4	0.61	0.017	4	0.61	0.017

RCP4										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.2	0.03	0.061	0.3	0.05	0.091	0.25	0.04	0.076
10	3.16	0.4	0.06	0.061	0.6	0.09	0.091	0.5	0.08	0.076
20	4.47	0.65	0.10	0.049	1	0.15	0.075	0.825	0.12	0.062
40	6.32	1.05	0.16	0.039	1.65	0.25	0.061	1.35	0.20	0.050
60	7.75	1.45	0.22	0.035	2.15	0.33	0.053	1.8	0.27	0.044
80	8.94	1.8	0.27	0.033	2.65	0.40	0.049	2.225	0.34	0.041
100	10.00	2.1	0.32	0.031	3.05	0.46	0.045	2.575	0.39	0.038
120	10.95	2.4	0.36	0.030	3.4	0.51	0.042	2.9	0.44	0.036
140	11.83	2.7	0.41	0.028	3.7	0.56	0.040	3.2	0.48	0.034
160	12.65	2.9	0.44	0.027	3.95	0.60	0.037	3.425	0.52	0.032
180	13.42	3.15	0.48	0.026	4	0.61	0.036	3.575	0.54	0.031
240	15.49	3.85	0.58	0.024						
256	16.00	4	0.61	0.021						

Anexo R.1 – Resultados do ensaio de capilaridade a baixa pressão (Karsten)

CEM80RCP20										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.15	0.02	0.045	0.2	0.03	0.061	0.175	0.03	0.053
10	3.16	0.3	0.05	0.045	0.35	0.05	0.053	0.325	0.05	0.049
20	4.47	0.5	0.08	0.038	0.6	0.09	0.045	0.55	0.08	0.041
40	6.32	0.8	0.12	0.030	1	0.15	0.037	0.9	0.14	0.033
60	7.75	1.1	0.17	0.027	1.35	0.20	0.033	1.225	0.19	0.030
80	8.94	1.25	0.19	0.024	1.6	0.24	0.030	1.425	0.22	0.027
100	10.00	1.45	0.22	0.022	1.85	0.28	0.028	1.65	0.25	0.025
120	10.95	1.6	0.24	0.020	2.1	0.32	0.026	1.85	0.28	0.023
140	11.83	1.725	0.26	0.018	2.25	0.34	0.024	1.9875	0.30	0.021
160	12.65	1.85	0.28	0.017	2.45	0.37	0.023	2.15	0.33	0.020
180	13.42	2	0.30	0.016	2.65	0.40	0.022	2.325	0.35	0.019
240	15.49	2.4	0.36	0.015	3.15	0.48	0.020	2.775	0.42	0.017
300	17.32	2.75	0.42	0.014	3.6	0.55	0.018	3.175	0.48	0.016
360	18.97	3.1	0.47	0.013	4	0.61	0.017	3.55	0.54	0.015
480	21.91	3.7	0.56	0.011						
537	23.17	4	0.61	0.011						

CEM50RCP50										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.3	0.05	0.091	0.2	0.03	0.061	0.25	0.04	0.076
10	3.16	0.6	0.09	0.091	0.3	0.05	0.045	0.45	0.07	0.068
20	4.47	1	0.15	0.075	0.55	0.08	0.040	0.775	0.12	0.058
40	6.32	1.6	0.24	0.059	1	0.15	0.037	1.3	0.20	0.048
60	7.75	1.95	0.30	0.048	1.25	0.19	0.031	1.6	0.24	0.040
80	8.94	2.3	0.35	0.042	1.55	0.23	0.029	1.925	0.29	0.036
100	10.00	2.6	0.39	0.038	1.8	0.27	0.027	2.2	0.33	0.032
120	10.95	2.9	0.44	0.035	2	0.30	0.025	2.45	0.37	0.030
140	11.83	3.15	0.48	0.033	2.15	0.33	0.023	2.65	0.40	0.028
160	12.65	3.35	0.51	0.031	2.35	0.36	0.022	2.85	0.43	0.026
180	13.42	3.6	0.55	0.029	2.5	0.38	0.021	3.05	0.46	0.025
225	15.00	4	0.61	0.026	3	0.45	0.019	3.5	0.53	0.023
					3.45	0.52	0.017			
					3.9	0.59	0.016			
					4	0.61	0.015			

Anexo S.1 – Resultados do ensaio de capilaridade a baixa pressão (Karsten)

CEM80RCC20										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.1	0.02	0.030	0.2	0.03	0.061	0.15	0.02	0.045
10	3.16	0.2	0.03	0.030	0.4	0.06	0.061	0.3	0.05	0.045
20	4.47	0.35	0.05	0.026	0.65	0.10	0.049	0.5	0.08	0.038
40	6.32	0.65	0.10	0.024	1.2	0.18	0.044	0.925	0.14	0.034
60	7.75	0.85	0.13	0.021	1.55	0.23	0.039	1.2	0.18	0.030
80	8.94	1.1	0.17	0.020	1.9	0.29	0.036	1.5	0.23	0.028
100	10.00	1.3	0.20	0.020	2.15	0.33	0.033	1.725	0.26	0.026
120	10.95	1.5	0.23	0.019	2.35	0.36	0.030	1.925	0.29	0.024
140	11.83	1.65	0.25	0.018	2.55	0.39	0.028	2.1	0.32	0.023
160	12.65	1.8	0.27	0.017	2.75	0.42	0.026	2.275	0.34	0.021
180	13.42	1.95	0.30	0.016	3	0.45	0.025	2.475	0.37	0.020
240	15.49	2.35	0.36	0.015	3.5	0.53	0.022	2.925	0.44	0.019
300	17.32	2.75	0.42	0.014	4	0.61	0.020	3.375	0.51	0.017
360	18.97	3.15	0.48	0.013						
480	21.91	3.8	0.58	0.012						
521	22.83	4	0.61	0.011						

CEM50RCC50										
Provete 1					Provete 2			Média		
Tempo (s)	Tempo ^{0.5}	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)	Absorção (ml)	Absorção (g/cm ²)	Cabs (kg/m ² /t)
0	0.00	0	0		0	0		0	0	
5	2.24	0.2	0.03	0.061	0.2	0.03	0.061	0.2	0.03	0.061
10	3.16	0.35	0.05	0.053	0.35	0.05	0.053	0.35	0.05	0.053
20	4.47	0.55	0.08	0.041	0.6	0.09	0.045	0.575	0.09	0.043
40	6.32	0.8	0.12	0.029	1	0.15	0.037	0.9	0.14	0.033
60	7.75	1.1	0.17	0.026	1.3	0.20	0.032	1.2	0.18	0.029
80	8.94	1.3	0.20	0.023	1.6	0.24	0.029	1.45	0.22	0.026
100	10.00	1.45	0.22	0.021	1.75	0.26	0.026	1.6	0.24	0.024
120	10.95	1.65	0.25	0.020	2	0.30	0.025	1.825	0.28	0.022
140	11.83	1.75	0.26	0.018	2.2	0.33	0.023	1.975	0.30	0.021
160	12.65	1.85	0.28	0.017	2.35	0.36	0.022	2.1	0.32	0.019
180	13.42	1.95	0.30	0.016	2.55	0.39	0.021	2.25	0.34	0.018
240	15.49	2.35	0.36	0.014	3.1	0.47	0.019	2.725	0.41	0.017
300	17.32	2.7	0.41	0.013	3.6	0.55	0.018	3.15	0.48	0.015
360	18.97	3	0.45	0.012	4	0.61	0.017	3.5	0.53	0.014
480	21.91	3.55	0.54	0.011						
580	24.08	4	0.61	0.010						

Anexo T.1 – Resultados do ensaio de capilaridade a baixa pressão (Karsten)

	2A	2B	4A	4B	1A	1B	11A	11B	14A	14B	10A	10B
Permeância ao vapor (kg/(s.m ² .Pa))	1.14E-09	1.01E-09	8.13E-10	9.03E-10	7.83E-10	8.06E-10	7.83E-10	8.13E-10	9.25E-10	1.28E-09	1.35E-09	1.19E-09
water vapour resistance of air layer					2.54E+08							
Permeância ao vapor corrigida (kg/(s.m ² .Pa))	1.61E-09	1.37E-09	1.03E-09	1.17E-09	9.78E-10	1.01E-09	9.78E-10	1.03E-09	1.21E-09	1.90E-09	2.06E-09	1.70E-09
Permeabilidade ao vapor de água (kg/(s.m.Pa))	1.67E-11	1.75E-11	1.36E-11	1.17E-11	1.16E-11	1.16E-11	1.35E-11	1.35E-11	1.62E-11			1.93E-11
Resistência à difusão do vapor de água, μ		1.12E+01	1.44E+01	1.68E+01	1.69E+01	1.70E+01	1.46E+01	1.46E+01	1.21E+01	9.69E+00	9.10E+00	1.02E+01

	21A	21B	19A	19B	5A	5B	20A	20B	3A	3B	25A	25B
Permeância ao vapor (kg/(s.m ² .Pa))	8.21E-10	8.13E-10	1.13E-09	1.28E-09	8.28E-10	7.76E-10	7.68E-10	8.88E-10	8.80E-10	1.01E-09	1.33E-09	1.20E-09
water vapour resistance of air layer	2.54E+08											
Permeância ao vapor corrigida (kg/(s.m ² .Pa))	1.04E-09	1.03E-09	1.58E-09	1.89E-09	1.05E-09	9.67E-10	9.55E-10	1.15E-09	1.13E-09	1.35E-09	2.01E-09	1.73E-09
Permeabilidade ao vapor de água (kg/(s.m.Pa))	1.24E-11	1.21E-11		1.95E-11	1.16E-11	1.17E-11	1.24E-11	1.31E-11	1.30E-11	1.49E-11	2.99E-11	2.66E-11
Resistência à difusão do vapor de água, μ	1.59E+01	1.62E+01	1.20E+01	1.01E+01	1.69E+01	1.68E+01	1.59E+01	1.50E+01	1.51E+01	1.32E+01	6.58E+00	7.39E+00

Anexo T.2 – Resultados do ensaio de gotejamento (*Drip test*)

Mistura	Provete	Tempo (min)	Profundidade de erosão (mm)				Profundidade de humidade (mm)								
CEM8	I	33	0				25.74	27.03	27.04	25.07	24.3	24.25	25.57	23.72	
	II	32	0				20.85	20.28	21.62	22.76	22.45	23.26	21.87		
CEM8TH	I	32	0				30.9	30.59	30.26	31.04	30.81	30.09	30.62	31.54	
	II	32	0				33.17	33	31.1	33.35	32.14	32.07	32.47		
CRP8	I	31	0				37.17	37.81	36.99	35.61	35.38	34.03	36.17	39.39	
	II	32	0				41.22	42.15	45.5	40.85	42.6	43.39	42.62		
UCEB	I	32	9.87	7.18	7.11	8.05	7.35	77.48	75.59	81.44	79.33	78.2	76.85	78.15	76.75
	II	32	6.26	5.72	7.96	6.65		75.66	75.69	74.68				75.34	