

Caraterização mecânica de blocos de terra comprimida com incorporação de agregado e cimento reciclado

Martim Henrique dos Santos Vicente Alves Nabais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Professora Ana Mafalda Saldanha Guedes

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

Junho 2023

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.

Caraterização mecânica de blocos de terra comprimida com incorporação de agregado e cimento reciclado

Martim Henrique dos Santos Vicente Alves Nabais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Dissertação elaborada no âmbito do Projeto FCT Eco+RCEB

Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks

Task 3 – Physical, mechanical and microstructural characterisation of
CSEB

Projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021



Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

Agradecimentos

Com a finalização da presente dissertação chega ao fim mais uma das muitas etapas académicas que fizeram e farão parte do meu percurso como aluno. Apesar de longa, a caminhada, será de certo uma etapa que deixará saudades pelos seus altos e baixos, alegrias e frustrações tão inerentes ao percurso de um estudante como necessárias.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas por toda a ajuda prestada ao longo deste desafio bem como por todos os conselhos e oportunidades tornando esta dissertação num caminho menos sobressaltado e mais motivador, que mesmo com pouco tempo, tudo fez para que esta etapa se desse por terminada.

Aos meus colegas de laboratório Diogo Gonçalves e Ricardo Cruz por todo o companheirismo e boas discussões futebolísticas sem os quais não teria sido possível terminar esta dissertação.

Aos técnicos de laboratório Jorge Pontes, Francisco Almeida e Pedro Costa por toda ajuda e disponibilidade demonstrada ao longo do projeto.

Às investigadoras Ana Chambel e Sofia Real pelo apoio técnico na vertente laboratorial fundamental para o correto desenvolvimento das várias etapas desta dissertação.

À minha família, Mãe, Pai, Irmãos, Avó e Catarina por todo o apoio e paciência, sempre prontos para confortar e motivar nos maiores desafios ao longo do meu percurso no IST. O meu sucesso será, com toda a certeza, fruto de vocês.

A todos os meus amigos que, mesmo estando pouco presente, sempre se esforçaram para tornar o meu percurso mais leve e divertido.

Resumo

Nos dias de hoje, a procura por soluções mais ecológicas e sustentáveis tem assumido um papel crucial na sociedade. Como tal, o setor da construção não tem sido uma exceção. Desta forma, a construção em terra, mais especificamente os BTC, têm vindo a surgir no paradigma construtivo por todo o mundo. Procurando melhorar as propriedades dos BTC tem vindo a ser estudada a possibilidade da estabilização química com recurso a ligantes como o cimento reciclado.

Com este objetivo traçado realizou-se uma campanha experimental onde se começou pela caracterização e seleção da terra a utilizar seguida da produção do cimento e finalizando na produção e caracterização dos blocos de terra comprimida. De forma abreviada, foram realizados quatro grupos de composições: um realizado com cimento Portland (CP), outro com cimento reciclado proveniente de pastas de cimento hidratado (RCP), um terceiro grupo com cimento reciclado de betão (RCC) e por fim um grupo de blocos não estabilizados. Para as várias misturas variou-se o tipo de ligante, o tipo de agregado reciclado, teor de cimento reciclado (0%, 20%, 50% e 100%) e teor de humidade. Foram realizados ensaios de massa volúmica no estado fresco e endurecido, resistência à compressão, resistência à tração por flexão e compressão diametral, esclerómetro pendular, condutibilidade térmica, resistência superficial, módulo de elasticidade e velocidade de ultrassons.

No geral os BTC estabilizados com CP apresentaram um melhor comportamento transversalmente aos vários ensaios. Contudo, é possível verificar que o RCC e o RCP são eficazes para a estabilização química dos blocos.

Palavras-Chave:

Blocos de Terra Comprimida; Cimento Reciclado; Resíduos de Betão; Sustentabilidade; Caracterização mecânica

Abstract

Nowadays, the search for more ecological and sustainable solutions has assumed a crucial role in society. As such, the construction sector has not been an exception. In this way, earth construction, more specifically CEB, have been emerging in the construction paradigm all over the world. Seeking to improve the properties of CEB, the possibility of chemical stabilization using binders such as recycled cement has been studied.

With this objective in mind, an experimental campaign was carried out, starting with the characterization and selection of the earth to be used, followed by the production of cement and ending with the production and characterization of the compressed earth blocks. Briefly, four groups of compositions were created: one made with Portland cement (PC), another with recycled cement from hydrated cement pastes (RCP), a third group with recycled concrete cement (RCC) and finally a group of unstabilized blocks. For the various mixtures, the type of binder, the type of recycled aggregate, recycled cement content (0%, 20%, 50% and 100%) and moisture content were varied. For the characterization of the blocks, tests were performed on fresh and hardened density, compressive strength, tensile strength by bending and diametral compression, pendular sclerometer, thermal conductivity, surface resistance, modulus of elasticity and ultrasound speed.

In general, CP stabilized CEB showed better behavior across the various tests. However, it is possible to verify that the RCC and RCP are effective for the chemical stabilization of the blocks.

Keywords

Compressed Earth Blocks, Recycled Cement; Concrete Waste; Sustainability; Mechanical characterization

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Considerações gerais.....	1
1.2	Objetivos e metodologia	1
1.3	Estrutura da dissertação.....	2
2.	A construção em terra e os BTC	3
2.1	Aplicação da terra na construção.....	3
2.2	Propriedades e características da terra	4
2.2.1	Propriedades da terra.....	4
2.2.2	Caraterísticas da terra	5
2.3	Estabilização da terra	6
2.3.1	Estabilização física	6
2.3.2	Estabilização mecânica.....	7
2.3.3	Estabilização química	8
2.4	Cimento reciclado.....	8
2.5	Blocos de terra comprimida	10
2.5.1	Caraterísticas dos BTC	11
2.5.2	Produção de BTC	11
2.5.3	Processos de construção de alvenarias com BTC.....	12
2.5.4	Regulamentação da construção em terra e com BTC.....	13
2.5.5	Vantagens e desvantagens dos BTC.....	14
2.5.6	Formulação dos BTC.....	15
3.	Campanha Experimental	17
3.1	Descrição da campanha experimental	17
3.2	Caraterização dos solos	18
3.2.1	Análise granulométrica.....	19
3.2.2	Estimativa do teor de argila.....	20
3.2.3	Determinação da massa volúmica das partículas	21
3.2.4	Determinação dos limites de consistência.....	22
3.2.5	Determinação da fração de matéria orgânica.....	23
3.2.6	Ensaio de compactação (Proctor).....	24
3.2.7	Composição mineralógica dos solos.....	25
3.2.8	Pré-seleção do solo	26
3.3	Caraterização dos agregados reciclados	28
3.3.1	HQRS.....	28

3.3.2	Resíduos da construção e demolição	29
3.4	Caraterização dos estabilizantes	31
3.4.1	Cimento Portland	31
3.4.2	Cimento reciclado.....	32
3.4.2.1	Pasta e betão de origem.....	32
3.4.2.2	Cimento reciclado de pasta	33
3.4.2.3	Cimento reciclado de betão	36
3.5	Produção dos BTC.....	37
3.5.1	Composição dos BTC	37
3.5.2	Preparação do solo e RCD	39
3.5.3	Mistura, moldagem e cura dos BTC	40
3.6	Caraterização dos BTC	40
3.6.1	Resistência à compressão.....	41
3.6.2	Resistência à tração por flexão.....	42
3.6.3	Resistência à tração por compressão diametral	42
3.6.4	Módulo de elasticidade	43
3.6.5	Retração	43
3.6.6	Esclerómetro pendular	44
3.6.7	Velocidade de propagação de ultrassons.....	44
3.6.8	Abrasão.....	45
3.6.9	Massa volúmica	45
3.6.10	Condutibilidade térmica	45
3.6.11	Porosidade total	46
4.	Apresentação e análise de resultados.....	47
4.1	Estudo prévio.....	47
4.2	Massa volúmica	50
4.3	Porosidade Total.....	54
4.4	Resistência à compressão	55
4.5	Resistência à tração.....	61
4.6	Módulo de elasticidade	64
4.7	Velocidade de propagação de ultrassons.....	65
4.8	Esclerómetro pendular	68
4.9	Abrasão superficial	69
4.10	Condutibilidade térmica	71
4.11	Retração	75
5.	Conclusões.....	79

5.1	Conclusões finais	79
5.2	Propostas de desenvolvimento futuro.....	80
6.	Referências.....	81
7.	Anexos.....	A.1
	Anexo 1 - Curvas de compactação.....	A.1
	Anexo 2 - Massa volúmica.....	A.3
	Anexo 3 - Resistência à compressão.....	A.4
	Anexo 4 - Resistência à tração.....	A.5
	Anexo 5 - Velocidade de ultrassons.....	A.7
	Anexo 6 - Módulo de elasticidade	A.8
	Anexo 7 - Esclerómetro pendular.....	A.9
	Anexo 8 - Condutibilidade térmica.....	A.10
	Anexo 9 - Abrasão.....	A.11
	Anexo 10 - Retração.....	A.12
	Anexo 11 - Ficha técnica CEM II/B-L 32,5N.....	A.13

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Curva de compactação	6
Figura 2.2 - Ciclo de vida Cimento portland e Cimento reciclado	9
Figura 2.3 - Etapas para a produção de BTC: a) Pulverização. b) Peneiro com 4mm de abertura. c) Mistura húmida. d) Dosagem da mistura. e) Moldagem. f) Desmoldagem.....	12
Figura 2.4 - Fuso granulométrico para produção de BTC estabilizados	15
Figura 3.1 - Curvas granulométricas das terras em análise.....	19
Figura 3.2 - Resultados do método da jarra; a) Amendonça; b) Baldios; c) Maia; d) Pinheiro	21
Figura 3.3 - Classificação textural das terras em análise; a) Amendonça; b) Baldios; c) Maia; d) Pinheiro	21
Figura 3.4 - Sequência do procedimento experimental para determinação dos limites de consistência. a) mistura da terra com água; b) Homogeneização da mistura; c) execução do sulco; d) junção dos bordos inferiores do sulco.....	23
Figura 3.5 – Ensaio de Compactação; a) equipamento utilizado; b) Divisão da amostra; c) molde sem alonga; d) molde com superfície rasada	25
Figura 3.6 - Comparação das análises granulométricas com o fuso granulométrico	27
Figura 3.7 - Curvas granulométricas dos agregados reciclados	30
Figura 3.8 - Análise termogravimétrica dos cimentos CEM II/B-L 32,5 e CEM I 42,5.....	32
Figura 3.9 - - Produção do cimento reciclado; a) britagem; b) moagem em moinho de rolos; c) crivagem para obtenção de RCC d) moagem em moinho de bolas horizontal.....	33
Figura 3.10 - Termoativação; a) forno rotativo da Thermolab Scientific Equipments para termoativação; b) curva de termoativação do cimento	34
Figura 3.11 - Curvas termogravimétricas do resíduo de pasta (CW) e do RCP	35
Figura 3.12 - - Equipamento para separação magnética.....	37
Figura 3.13 - Produção dos BTC; a) pulverização do solo b) peneiração do solo; c) colocação da mistura na prensa; d) desmoldagem dos blocos.....	40
Figura 3.14 - Esquema de ensaio; a) Resistência à compressão; b) Resistência à tração por flexão; c) Resistência à tração por compressão diametral	42
Figura 3.15 - Esquema de ensaio - Módulo de elasticidade.....	43
Figura 3.16 - Ensaio de retração.....	44
Figura 4.1 - Variação da resistência à compressão e massa volúmica com TW em BTC com 8% CP	50
Figura 4.2 - Curva granulométrica das misturas para 8% de cimento e 0 - 25% de RCD nos BTC	52
Figura 4.3 - Variação de massa volúmica fresca e porosidade total (P_T) para diferentes tipos de estabilizante. BTC com 25% de RCD.....	52
Figura 4.4 - Variação da massa volúmica fresca e porosidade total (P_T) para BTC com 8% de CP e diferentes teores de RCD e incorporação de 25 HQRS	53
Figura 4.5 - Curva granulométrica das misturas para 8% de cimento e 25% RCD ou 25% HQRS nos BTC	54
Figura 4.6 - Relação entre a porosidade total e a massa volúmica fresca	54
Figura 4.7 - Relação entre a porosidade total estimada e a determinada experimentalmente.....	55
Figura 4.8 - Resistência à compressão não confinada em função do teor de cimento. Resultados do presente estudo em condições de cura ao ar e de outros autores para BTC ensaiados no estado seco	57
Figura 4.9 - Resistência à compressão aos 28 dias em função do tipo de estabilizante.....	58
Figura 4.10 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a porosidade total de BTC estabilizados e não estabilizados	58
Figura 4.11 - Variação da porosidade total e da resistência à compressão em função da percentagem de substituição de CP por RCC	59

Figura 4.12 - Variação da resistência à compressão e porosidade total com o teor de RCD. BTC com 8% de CP	60
Figura 4.13 - Resistência à compressão e porosidade total de BTC com 25% RCD ou 25% HQRS e CP ou RCP	61
Figura 4.14 - Relação entre a resistência à compressão ($f_{c,28d}$) e a resistência à tração por flexão ($f_{ct,r}$) e compressão diametral ($f_{ct,sp}$) aos 28 dias	62
Figura 4.15 – Relação entre a resistência à tração aos 28 dias e a porosidade total; a) resistência à tração por flexão; b) resistência à tração por compressão diametral	64
Figura 4.16 - Relação entre resistência à tração por compressão diametral, porosidade e teor de agregado reciclado para percentagens de substituição de 0%, 15% e 25% de RCD	64
Figura 4.17 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão aos 28 dias ...	65
Figura 4.18 - Relação entre V_{us} e a resistência à compressão, f_c	67
Figura 4.19 - Relação entre V_{us} e a porosidade total, considerando diferentes tipos de ligante	67
Figura 4.20 – Variação de V_{us} e da porosidade total com o teor de RCC em substituição de CP.....	67
Figura 4.21 - Variação de V_{us} e porosidade total com o teor de agregado reciclado, para percentagens de substituição de 0%, 15% e 25% de RCD ou 25% HQRS nos BTC com 8% CP	68
Figura 4.22 - Índice esclerométrico	68
Figura 4.23 - Relação entre a porosidade total e o índice esclerométrico aos 28d	69
Figura 4.24 - Relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico aos 28d	69
Figura 4.25 - Coeficientes de abrasão dos BTC	70
Figura 4.26 - Relação entre a porosidade total e o coeficiente de abrasão aos 28d	70
Figura 4.27 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de abrasão aos 28d	70
Figura 4.28 - Relação entre o índice esclerométrico e o coeficiente de abrasão aos 28d.....	71
Figura 4.29 - Condutibilidade térmica mediante a condição de cura	72
Figura 4.30 - Relação entre a porosidade total e a condutibilidade térmica dos BTC em estado seco, λ_{OD}	73
Figura 4.31 - Variação da porosidade total e da condutibilidade térmica dos BTC em estado seco, λ_{OC} , com o teor de RCD ou com a incorporação de HQRS	73
Figura 4.32 - Evolução da retração ao longo do ensaio	77
Figura 4.33 - Evolução da perda de massa ao longo do tempo de ensaio	78
Figura 4.34 - Correlação entre a evolução da perda de massa e a retração dos BTC ao longo do tempo	78

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Classificação dos níveis de pressão para a produção de BTC	7
Tabela 2.2 - Valores de referência para granulometria e limites de consistência	15
Tabela 2.3 - Características ótimas para terra a utilizar em BTC	16
Tabela 2.4 - Proporções de cimento recomendadas para a estabilização de blocos de terra comprimida	16
Tabela 3.1 - Designação utilizada	18
Tabela 3.2 - Normas utilizadas para a caracterização das terras.....	19
Tabela 3.3 - Constituição macroscópica das terras em análise.....	20
Tabela 3.4 - Classificação textural e aferição das frações granulométricas para as terras em análise	20
Tabela 3.5 - Massa volúmica das terras em análise	22
Tabela 3.6 - Limites de consistência.....	23
Tabela 3.7 - Teores de matéria orgânica.....	24
Tabela 3.8 - TOA das terras em análise	25
Tabela 3.9 - Fases mineralógicas identificadas por difração de Raio-X.....	26
Tabela 3.10 - Resultados médios obtidos após caracterização dos solos e limites recomendados de acordo com 2.5.7.....	27
Tabela 3.11 - Classificação dos constituintes do RCD1	29
Tabela 3.12 - Valores de massa volúmica e absorção de água dos AR	30
Tabela 3.13 - Características dos ligantes utilizados.....	31
Tabela 3.14 - Propriedades físicas e mecânicas do RCP	34
Tabela 3.15 - Resultados do ensaio de termogravimetria	35
Tabela 3.16 - Propriedades no estado fresco e resistência mecânica de argamassas com a/l 0,67 produzidas com RCP ou CP.....	36
Tabela 3.17 - Composição do BTC e porosidade estimada	39
Tabela 3.18 - Normas e números de provetes ensaiados para caracterização de BTC	41
Tabela 4.1 - Composições utilizadas para o estudo prévio	48
Tabela 4.2 - Soma do quadrado do desvio da curva das misturas face à curva de referência de Fuller	49
Tabela 4.3 - Resultados obtidos no estudo prévio	50
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de massa volúmica	51
Tabela 4.5 - Porosidade total e aberta experimentais e estimativa teórica da porosidade total.....	55
Tabela 4.6 - Resistência à compressão a diferentes idades	56
Tabela 4.7 - Resistência média à tração e à compressão diametral aos 28 dias	61
Tabela 4.8 - Módulo de elasticidade aos 28 dias	65
Tabela 4.9 - Velocidade de propagação de ultrassons.....	66
Tabela 4.10 - Condutibilidade térmica medida para cada BTC	72
Tabela 4.11 - Valores de U para parede simples de BTC e espessuras mínimas de painéis de BTC para U de 1,3 W/m ² °C (com e sem isolamento e sem caixa de ar, Ca) e de isolamento térmico para parede simples de BTC.....	74
Tabela 4.12 - Retração após 3 e 50 dias	75

Símbolos e abreviaturas

Abreviaturas

AR – Agregado reciclado

BTC – Bloco de terra comprimida

CP – Cimento Portland

CR – Cimento reciclado

CV – Coeficiente de variação

CW – Resíduo de pasta de cimento antes de termoativação

DRX – Análise de difração de raio X

Est. – Percentagem de estabilizante

HQRS – Areia reciclada de alta qualidade

IST – Instituto Superior Técnico

IP – Índice de plasticidade

LAB – Ambiente de laboratório

LC – Laboratório de Civil do Instituto Superior Técnico

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

OD – Seco em estufa

NE – Não estabilizado

RCC – Cimento reciclado de betão

RCD – Resíduos da construção e demolição

RCP – Cimento reciclado de pasta

SAT - Saturado

TG – Análise termogravimétrica

TOA – Teor ótimo de água

TW – Teor de água

XPS – Poliestireno extrudido

Simbologia:

A - Área

a/c – Relação água/cimento em massa

a/l – Relação água/ligante em massa

α – Grau de hidratação

b – Largura do bloco

ρ_{28d} - Massa volúmica aos 28dias
 ρ_{7d} - Massa volúmica aos 7dias
 ρ_f - Massa volúmica fresca
 $\rho_{b,s}$ - Massa volúmica seca aparente
 $\rho_{r,s}$ - Massa volúmica real
 ρ_w - Massa volúmica da água
CA – Coeficiente de abrasão
CV – Coeficiente de variação
 σ_i - Tensão inicial
 σ_f - Tensão final
E – Módulo de elasticidade
 ε – Retração
 ε_i – Extensão inicial
 ε_f – Extensão final
F – Força aplicada
 f_c – Valor médio de resistência à compressão
 $f_{c,un}$ – Valor médio de resistência à compressão não confinada
 $f_{ct,r}$ – Valor médio de resistência à tração por flexão
 $f_{ct,sp}$ – Valor médio de resistência à tração por compressão diametral
h – Altura do bloco
HR – Humidade relativa
 λ – Condutibilidade térmica
M – Massa
 M_{vf} – Massa volúmica fresca
 $m_{c,s}$ – Massa de amostra
 $m_{d,s}$ – Massa do provete no estado seco
 $m_{sat,s}$ – Massa do provete no estado saturado
 $m_{w,s}$ – Massa aparente do provete submerso
 P_A – Porosidade acessível
 P_t – Porosidade total estimada
 $P_{t,c}$ – Porosidade total
Rsi – Resistência superficial interior
Rse – Resistência superficial exterior
U – Coeficiente de transmissão térmica

V_b – Volume aparente

$V_{c,s}$ – Volume de água deslocado

V_p – Volume de poros acessíveis

V_{us} – Velocidade de ultrassons

W_b – teor de água combinada não evaporada

W_N – teor de água necessário para hidratar completamente o cimento

Unidades:

m – Metro

cm - centímetro

mm – Milímetro

μm – Micrómetro

s - Segundo

kg – Quilograma

g – Grama

K - Kelvin

MPa – Mega Pascal

GPa – Giga Pascal

N – Newton

W - Watt

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celcius

% - Percentagem

1. Introdução

1.1 Considerações gerais

A terra é, a par da pedra, o material mais antigo utilizado na construção. A necessidade do homem se proteger levou-o a construir os primeiros abrigos com recurso a materiais naturais. Um dos registos mais antigos da utilização da terra na construção data de 10 000 a.C. e pode ser encontrado na antiga Mesopotâmia. Estima-se que, atualmente, cerca de 30% da população mundial ainda habite em habitações de terra (Azevedo, 2021). Em Portugal, a construção em terra é representada por três tipos construtivos, nomeadamente taipa, adobe e tabique (Silva et al., 2005). Estes métodos construtivos representam, aproximadamente, 5% a 6% do património construído em Portugal (Censos, 2011).

Com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas no século XIX, a utilização da terra na construção entrou em declínio. Contudo, pela necessidade de implementação de uma construção mais sustentável e economicamente viável, este material tem vindo a reaparecer em soluções construtivas.

Apesar das vantagens referidas, a terra apresenta duas desvantagens que têm limitado a sua utilização, por um lado o facto de não poder ser aplicado em construções de edifícios altos e por outro lado o seu mau comportamento face à água. Relativamente ao segundo problema, a utilização de blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com materiais cimentícios apresenta-se como uma solução construtiva mais adequada, face a técnicas mais tradicionais como o adobe.

Os BTC garantem uma maior velocidade de produção, maiores níveis de durabilidade e resistência e menor variabilidade, fatores garantidos pela ação de compactação. Na área da estabilização, o cimento tem-se mostrado o ligante mais eficiente no incremento de durabilidade à água e de resistência mecânica. No entanto, a utilização deste estabilizante não se coaduna com o principal intuito da construção em terra, a sustentabilidade e ecologia. Atualmente, é reportado que o setor da construção contribui para mais de 30% das emissões de CO₂ (UNEP, 2021) onde os materiais cimentícios, em particular a produção do cimento, apresenta uma grande fatia. Por essa razão importa encontrar estabilizantes alternativos que, mantendo a sua natureza ecológica e sustentável, tenham a capacidade de garantir uma semelhante qualidade técnica.

Com este objetivo, no Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do IST, vem sendo desenvolvida uma linha de investigação, no âmbito do projeto EcoHydB – PTDC/EI-CON/28308/2017, com o objetivo de produzir e caracterizar cimento reciclado de baixo impacto carbónico a partir de resíduos de betão antigo. Face ao cimento Portland (CP) o cimento reciclado (CR) permite reduzir em mais de 60% as emissões de CO₂. Bogas et al. (2020); Carriço et al. (2020); Real et al. (2020) demonstram a sua eficiência quando inserido em materiais de base cimentícia sendo possível observar valores de resistência semelhantes aos verificados para o CP.

1.2 Objetivos e metodologia

O objetivo primeiro do presente estudo passa por avaliar o desempenho mecânico de blocos de terra comprimida tendo por base a aplicação de diferentes teores de agregados reciclados e de tipos

de cimento reciclado, contribuindo para o desenvolvimento de uma gama de materiais sustentável e económica.

Com base numa extensa campanha experimental foram produzidos diversos BTC com diferentes tipos de CR a partir de resíduos de betão e de pasta de cimento, os quais foram caracterizados com base em ensaios de massa volúmica, velocidade de ultrassons, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e flexão, módulo de elasticidade, resistência à abrasão, dureza superficial e condutibilidade térmica.

Numa primeira fase foi necessário produzir resíduos de pasta e betão, caracterizar e seleccionar diferentes solos e resíduos da construção e demolição (RCD) para substituição, parcial, do solo. Esta etapa culmina com a realização de um estudo preliminar por forma a otimizar a produção de BTC, procedendo-se, posteriormente, à caracterização dos blocos produzidos.

Finalmente procedeu-se à produção e caracterização dos blocos finais onde foi analisada a influência da substituição parcial de CP por diferentes teores de CR (20%, 50% e 100%), do teor e tipo de agregado reciclado (onde se analisou a ação de RCD e de uma areia de melhor qualidade obtida do processo de separação do cimento reciclado de betão) e do teor de água. Para efeitos de comparação, foram realizados BTC não estabilizados (NE) e com cimento Portland.

Como referido anteriormente, o presente estudo foi realizado no âmbito do projeto Eco+RCEB contando com o apoio de um colega de mestrado e outro de doutoramento com ação neste domínio.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, onde o primeiro e o quinto se referem à introdução e conclusão, respetivamente. No segundo capítulo é feita uma síntese do estado da arte do tema. No capítulo 3 descreve-se a campanha experimental e no capítulo 4 a análise e discussão de resultados. Em seguida, são indicados os tópicos abordados em cada capítulo.

- **Capítulo 1:** considerações gerais que servem de base à presente dissertação, objetivos e metodologia do trabalho e forma de organização do documento;
- **Capítulo 2:** estado de arte da construção em terra com dados ilustrativos do impacto da engenharia civil no meio ambiente, técnicas de estabilização para misturas de terra, processo de produção do CR, critérios para a seleção de solo e as principais vantagens e desvantagens da estabilização química com CR;
- **Capítulo 3:** descrição de toda a campanha experimental, apresentação detalhada das várias fases de produção do CR e a respetivos ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido;
- **Capítulo 4:** apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos no estudo prévio e nos ensaios realizados no capítulo 3;
- **Capítulo 5:** resumo das principais conclusões retiradas do capítulo 4 e propostas de desenvolvimentos futuros de forma a dar seguimento ao presente estudo.

No final, é ainda apresentada toda a lista de referências bibliográficas bem como os anexos com os resultados obtidos nos ensaios apresentados no capítulo 3.

2. A construção em terra e os BTC

No presente capítulo pretende realizar-se um enquadramento histórico e científico da utilização de terra em construção. Dão-se também a conhecer as principais propriedades, vantagens e desvantagens deste material. Sendo o objetivo desta tese o estudo de blocos de terra comprimida (BTC), dar-se-á especial atenção a este material pelas suas características face às condições de durabilidade e funcionalidade em novas construções. Neste capítulo, abordar-se-ão ainda os inúmeros processos de estabilização da terra e a importância de métodos mais sustentáveis na construção.

2.1 Aplicação da terra na construção

A terra, a par da pedra, é um dos materiais mais antigos utilizados em construção e com maior registo histórico de utilização. Apesar de alguma incerteza na data concreta de início de utilização, alguns autores acreditam que esta tenha surgido em concomitância com as primeiras sociedades agrícolas, entre 1200 a.C. e 700 a.C. (Pacheco-Torgal et al., 2009). Contudo Minke (2009) apresenta a hipótese de o início da construção em terra ter começado há mais de 9000 anos, sustentada pela descoberta de construções em alvenaria de terra no atual Turquemenistão datadas de 8000 a 6000 a.C. Outros autores, como Berge et al. (2009), afirmam que as mais antigas provas da utilização da terra em construção datam de 7500 a.C. São inúmeros os exemplos que demonstram a durabilidade deste tipo de construções, incluindo o templo de Ramsés II em Gourná, construído em adobe (tijolos de terra crua com incorporação de fibras naturais) há cerca de 3200 anos, ou a muralha da China, com troços em taipa (técnica de construção de paredes em terra crua onde se recorre à utilização de um pilão para a sua compactação) iniciados há cerca de 3000 anos.

Estima-se que cerca de 30 % a 50 % da população mundial habite atualmente em construções de terra (Little & Morton, 2001). Grande parte desta construção está presente em países em desenvolvimento em zonas de África, América central, Médio Oriente e algumas regiões asiáticas (Silva, 2015). Adicionalmente, a necessidade de encontrar alternativas à construção atual, tem levado países como a França, Alemanha, Reino Unido, EUA ou o Brasil a encarar a construção em terra como uma hipótese cada vez mais séria. Portugal, nomeadamente, tem alguns exemplos de construção em taipa como os castelos de Paderne e de Silves, ambos elementos da arquitetura militar islâmica (Pacheco-Torgal et al., 2009).

Em Portugal destacam-se, maioritariamente, construções em taipa, tabique (técnica construtiva onde se aplica terra sobre uma estrutura, geralmente, de madeira ou cana) e adobe. Devido ao domínio islâmico, a taipa aparece predominantemente no centro e sul do país (por exemplo, os castelos de Paderne e de Silves, ambos elementos da arquitetura militar islâmica (Pacheco-Torgal et al., 2009)). A construção em tabique e em adobe surgem sobretudo a norte de Portugal e na zona litoral centro, respetivamente (Azevedo, 2021). A título de curiosidade, é interessante notar que no distrito de Aveiro cerca de 40% da construção é realizada em adobe (Silva, 2015).

Apesar da reduzida utilização de técnicas construtivas em terra, a procura de materiais e técnicas construtivas mais sustentáveis em detrimento do betão/cimento tem sido transversal nos últimos anos. Isto porque o cimento é considerado um dos principais problemas ambientais do século XXI, com cerca de uma tonelada de carbono emitida por cada tonelada de cimento produzido (Gates, 2021) Assim, é

imperativo que se encontrem opções mais eficientes a nível ambiental. Neste contexto, a construção em terra tem vindo a ganhar relevância na indústria da construção. Características como a baixa energia incorporada, elevado potencial de reciclabilidade e enorme abundância de matéria-prima disponível, aliadas a elevado conforto higrotérmico e qualidade do ambiente interior (Hall et al., 2012), podem ser determinantes para incorporação da terra no paradigma construtivo atual.

2.2 Propriedades e características da terra

De acordo com Silva (2015) o material de construção “terra” pode ser descrito como um “conjunto natural de partículas que podem ser separadas por agitação em água”. O solo é constituído maioritariamente por matéria mineral, sendo que até certa profundidade, pode encontrar-se também alguma matéria orgânica, geralmente até um metro. Como matéria-prima para a construção, recorre-se apenas à porção de solo que é composta por matéria mineral.

Devido ao complexo processo de formação dos solos, em que as partículas sólidas têm origem na desagregação da rocha mãe por fatores atmosféricos, este material de construção acaba por apresentar uma elevada heterogeneidade tanto em profundidade como em extensão. A este fator, acresce ainda a dificuldade de utilização resultante da falta de regras e especificações.

2.2.1 Propriedades da terra

As principais características da terra são a coesão, a compressibilidade e a plasticidade (Adam, 2001). A coesão é uma característica que se relaciona diretamente com a resistência do solo e depende da força de atração entre as partículas de solo. Tem origem na pressão capilar da água intersticial (Neves, 2016), dependendo da quantidade e natureza dos elementos finos presentes no solo, nomeadamente das frações argilosa e siltosa (Silva, 2015). Genericamente, a coesão pode ser entendida como a resistência de um solo ao corte quando sobre ele não está aplicada nenhuma ação externa. Também a plasticidade é condicionada pelos elementos finos do solo, dependendo do seu tamanho e formato, e pelo seu teor de humidade. A plasticidade de um solo traduz-se na sua capacidade de ser moldado sem alteração de volume (Silva, 2015). Contrariamente à plasticidade, a compressibilidade consiste na capacidade de variação de volume em resultado da aplicação de uma força de compressão, admitindo que as partículas individuais são indeformáveis. Em consequência da tensão aplicada, as partículas sólidas reorganizam-se, com aumento de densidade do solo (Adam, 2001).

Apesar de não ser uma propriedade fundamental da terra, há que destacar o impacto positivo das suas propriedades higrotérmicas na saúde dos ocupantes de construções em terra, bem como as suas vantagens ambientais. Assim, os elementos construídos em terra têm capacidade de autorregular os níveis de humidade no interior das construções. As trocas de humidade são efetuadas a através dos poros da terra, sendo possível manter a humidade relativa interior entre os 40% e os 60% (McGregor et al., 2014).

A terra apresenta ainda valores reduzidos de condutividade acústica e térmica, pelo que se apresenta como bom material isolante para construção. Contudo, deve referir-se que as paredes em terra crua são geralmente de elevada espessura, pelo que a sua elevada capacidade de isolamento

térmico e acústico se associa mais à inércia da parede do que propriamente ao baixo valor das propriedades de transporte (Adam & Jones, 2000).

2.2.2 Características da terra

Os principais fatores que determinam a possibilidade de utilização de um solo como material de construção são a composição, granulometria e comportamento à água. Assim, os ensaios de análise granulométrica, limites de consistência e teor ótimo de água são fundamentais para a sua caracterização.

Análise granulométrica permite quantificar a distribuição de tamanho dos grãos do solo. O solo é constituído por dois tipos de elementos: grossos e finos. Os elementos grossos incluem seixo e areia, excluindo areias de diâmetro inferior a 0.2mm (LNEC E-239, 1970). Os elementos finos incluem silte, argila e areia fina (LNEC E-239, 1970).

O comportamento do solo depende não só da granulometria, mas também do seu comportamento na presença de água (Rigassi, 1985). O comportamento da fração de solo com dimensão inferior a 0,4mm em presença de água é descrito pelos limites de consistência, também conhecidos por limites de Attenberg:

- Limite de liquidez (LL): Teor em água, obtido de forma empírica, onde o solo passa do estado líquido para o estado plástico.
- Limite de plasticidade (LP): Teor em água ao qual o solo passa de plástico para sólido
- Índice de plasticidade (IP): O índice de plasticidade é calculado como a diferença entre LL e LP. Representa o teor de água ao qual o solo apresenta comportamento plástico.

Para a utilização da terra em engenharia recorre-se por vezes à sua compactação, de modo a obter valores adequados de resistência ao corte, compressibilidade e permeabilidade. Para este fim recorre-se ao ensaio de compactação para a determinação do volume final de compactação e do teor de água de um solo. Fernandes (2011) definiu o teor ótimo de água (TOA) como o teor em água que confere a maior compacidade à terra. O grau de compactação do solo pode ser influenciado por três fatores: força de compactação, teor em água e composição granulométrica do solo. Relativamente à força aplicada, quanto maior for este parâmetro, maior será a massa volúmica do solo compactado.

O aumento do teor de água, até ao TOA, facilita a compactação do solo, devido à lubrificação das partículas e à desagregação de torrões (Figura 2.1) Por essa razão, o aumento do teor de água conduz a um aumento do peso volúmico seco. Contudo, caso o teor de água ultrapasse o TOA a compactação deixa de ocorrer de forma eficaz, conforme mostrado na curva de compactação do solo da Figura 2.1. Isto deve-se à impossibilidade do solo expulsar o ar nele contido. Refere-se, que um solo compactado com TOA poderá não conduzir à maior densidade seca absoluta uma vez que esta depende também da energia de compactação aplicada (Santos, 2008).

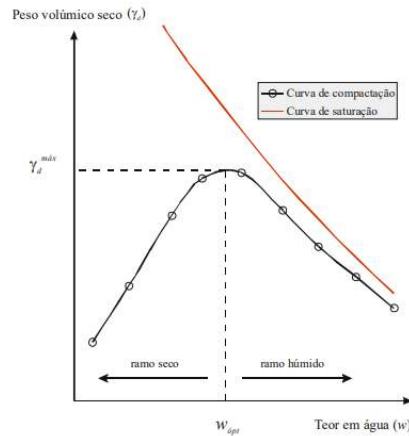


Figura 2.1 - Curva de compactação (Santos,2008)

A curva de compactação de um solo (Figura 2.1) é obtida através do ensaio de Proctor, em que se tomam como constantes o valor de força aplicada e composição do solo, fazendo variar somente o teor de água. A curva define-se pela relação do teor de água e respetivo peso volúmico seco.

O teor de água introduzida na atividade de compactação tem uma elevada influência no comportamento mecânico dos solos nomeadamente na permeabilidade, absorção de água, expansão e resistência inicial. Este último fator, para o caso dos blocos de terra comprimida (BTC), é máximo quando a compactação é realizada no ramo seco da curva de compactação. É de realçar a importância deste dado na medida que condiciona a rapidez de progressão das atividades em obra (CRATerre et al., 1979).

2.3 Estabilização da terra

Frequentemente, as propriedades do solo não correspondem às necessárias para a sua aplicação na construção, procedendo-se à sua estabilização de forma a otimizar propriedades. De acordo com Reddy (2012) o processo de estabilização consiste na alteração das propriedades do solo com o objetivo de potenciar o seu desempenho mecânico, físico e de durabilidade.

De modo geral, a estabilização melhora o comportamento dos solos de três formas: aumentando a coesão entre as partículas; reduzindo o tamanho do espaço vazio (ou seja, eliminando porosidade); e preenchendo os vazios que não reduziram o suficiente. Assim, a estabilização promove a redução da porosidade e da permeabilidade e o aumento da resistência mecânica. É, portanto, expectável a diminuição da sensibilidade à água, à erosão superficial e à fissuração (Rix, 1998). Na secção seguinte abordam-se os três modos de estabilização da terra.

2.3.1 Estabilização física

A estabilização física consiste na introdução ou remoção de um ou vários materiais. O mais comum é a introdução de fibras ou de um determinado agregado, com o objetivo de aumentar a coesão das partículas do solo, aumentando conseqüentemente a sua resistência mecânica.

A introdução de fibras visa reduzir a fendilhação superficial quando da secagem dos BTC, redistribuindo as tensões de retração por todo o bloco. Esta adição é realizada desde as primeiras

utilizações da terra na construção. Historicamente, as fibras utilizadas são a palha seca, pelos de animais, bambu e sisal ou, mais recentemente, fibras de aço (Osula, 1996). Nos BTC, geralmente recorre-se a esta técnica como tentativa de aumentar a sua resistência à tração.

A introdução de agregados, geralmente finos, tem como objetivo melhorar a distribuição granulométrica do solo. A sua introdução no solo em estabilização resulta num aumento da compacidade da mistura devido ao efeito “filler” das novas partículas, e/ou à correção do teor de argila/areia na mistura. De forma a reduzir o impacto ambiental, por vezes utilizam-se resíduos de diversos setores industriais como agregados finos. A determinação de uma curva granulométrica de referência que minimize o volume de vazios na produção de BTC não está definida. Assim, convencionou-se que a curva de Fuller - a curva granulométrica de referência que minimiza o volume de vazios em elementos betonados - constitui uma boa aproximação à granulometria ideal a utilizar nas misturas para BTC (Uzoegbo, 2019). Num estudo recente, Malkanthi et al. (2021) refere que o teor de material fino não deve exceder 15%, dado que o excesso de argila e silte resulta em redução da resistência mecânica.

2.3.2 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica consiste em submeter a terra a uma ação mecânica de compactação, de modo a aumentar a sua compacidade e a reduzir o volume de vazios. Este processo tem dois efeitos: a diminuição do volume de vazios diminui a permeabilidade e porosidade do bloco; o aumento da compacidade do solo incrementa o número de pontos de contacto entre as partículas, resultando na diminuição da deformabilidade do bloco e no aumento da sua resistência. Assim, além do aumento da resistência mecânica, aumenta também a durabilidade do bloco pela sua superior resistência à água (Exelbirt, 2011).

Para este tipo de estabilização é comum recorrer-se a prensas hidráulicas ou manuais (Tabela 2.1). As prensas hidráulicas apresentam capacidade de produzir blocos com propriedades mecânicas superiores, uma vez que podem atingir pressão de compactação em torno de 10 MPa. Numa prensa manual apenas é possível alcançar valores de tensão entre 4 MPa e 6 MPa (Uzoegbo, 2019).

Tabela 2.1 - Classificação dos níveis de pressão para a produção de BTC (Uzoegbo, 2019)

Classificação	Pressão [N/mm ²]
Muito baixa pressão	1
Baixa pressão	2 – 4
Média pressão	4 – 6
Alta pressão	6 – 10
Hiper pressão	10 – 20
Mega pressão	≥ 20

Num estudo recente, Mansour et al. (2016) estudou a influência da pressão de compactação no comportamento mecânico e térmico de blocos não estabilizados quimicamente. Os resultados mostram que blocos de massa volúmica superior (ou seja, blocos com maior compactação), apresentam valores superiores de resistência à compressão. Contudo, verifica-se a relação inversa relativamente às propriedades de isolamento térmico.

2.3.3 Estabilização química

A estabilização química resulta da introdução de substâncias químicas no solo. A alteração de propriedades físico-químicas resulta da criação de novos compostos e do aumento da coesão entre partículas. Dos três métodos de estabilização, este é o que mais contribui para o incremento das características dos BTC, uma vez que não sofre qualquer alteração pela presença de água.

Os estabilizantes químicos mais usuais são as pozolanas, a cal, o betume e o cimento (Kerali, 2001), sendo o cimento o mais utilizado. A escolha deste material resulta não só das suas características mecânicas e de durabilidade, mas também do facto de nas regiões onde a construção com BTC é mais frequente, África e América Central, a utilização de cimento ser considerado um sinal de estatuto social e económico. O processo de estabilização do solo com cimento resulta da hidratação do cimento, quando em presença de água, a hidratação do cimento origina um gel insolúvel composto por silicatos e aluminatos de cálcio hidratados que irá interagir, maioritariamente, com as frações de seixo e areia do solo. A argamassa solo-cimento formada é a maior contribuição para o aumento de resistência conferida por este processo de estabilização. Adicionalmente, na formação deste gel produz-se cal livre sob a forma de hidróxido de cálcio. A cal, por sua vez, poderá reagir com a fração argilosa do solo criando uma ligação adicional ao gel cimentício (Adam, 2001; Exelbirt, 2011; Kerali, 2001; Rix, 1998).

Apesar do cimento ser o estabilizante que confere melhores características ao solo, é também aquele que apresenta maiores problemas, associados à elevada libertação de CO₂, consumo de matérias-primas e consumo de energia térmica associados à sua produção (WBCSD & IEA, 2009). Por esta razão, nos últimos anos, têm sido efetuados estudos visando encontrar novos estabilizantes naturais a partir de subprodutos industriais, incluindo sílica de fumo (Abdulsalam et al., 2018), resinas naturais (Millogo et al., 2014), cinza volante (Egenti et al., 2013) e escória (Sekhar & Nayak, 2018). No entanto, estas alternativas não se têm mostrado viáveis do ponto de vista técnico e económico. Por essa razão, foi iniciado um estudo no Departamento de Engenharia civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico com o objetivo de produzir cimentos reciclados a partir de resíduos de betão e de os introduzir como estabilizantes para BTC.

2.4 Cimento reciclado

A crescente preocupação com o ambiente tem levado à procura soluções cada vez mais sustentáveis, incluindo no que se refere a todos os aspetos do ciclo de vida dos materiais cimentícios. Nesta secção introduz-se o cimento reciclado como uma nova forma de economia circular e sustentável.

De acordo com dados publicados pela Associação Europeia do Cimento, CEMBUREAU (2021), em 2020 foram produzidas cerca de 4.17 mil milhões de toneladas de cimento. Os maiores produtores são a China, Índia, Europa e Estados Unidos da América (57.2%, 7.0%, 6.1% e 2.1% do cimento produzido, respetivamente).

Durante o seu ciclo de vida, o cimento está associado a inúmeros problemas de âmbito ambiental, incluindo o elevado consumo de matérias-primas, a elevada libertação de CO₂, e o elevado consumo energético associado ao seu tratamento térmico (CEMBUREAU, 2021). Na Figura 2.2 apresenta-se o ciclo de vida do cimento Portland, bem como do cimento reciclado.

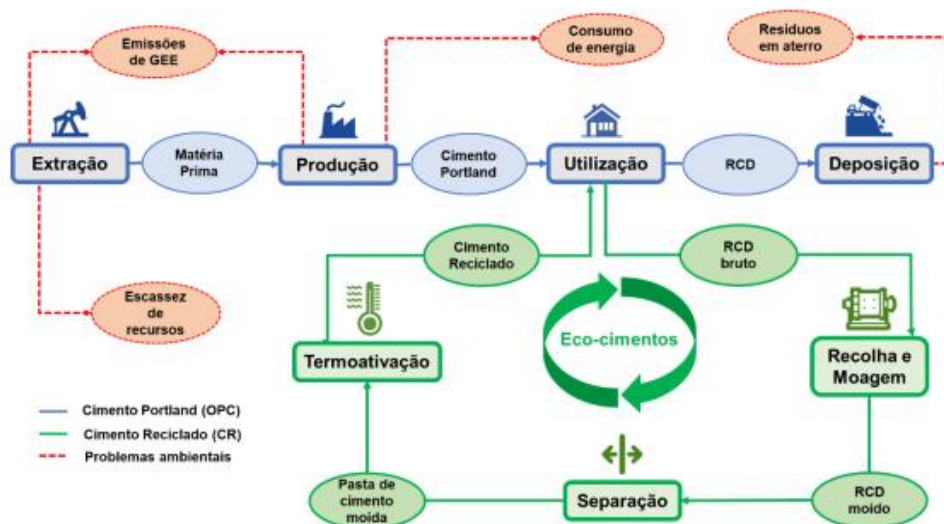


Figura 2.2 - Ciclo de vida Cimento Portland e Cimento reciclado (Bandeira, 2020)

Um dos grandes benefícios do cimento reciclado (CR) é a redução da exploração de matérias-primas, promovendo a reutilização dos materiais cimentícios presentes nos resíduos de construção e demolição (RCD). Deste modo, o cimento reciclado está também associado à diminuição da deposição de resíduos em aterro. A sua produção, para além de associada a um menor consumo energético comparativamente ao cimento Portland, permite uma redução de cerca de 60 % das emissões de gases de efeito estufa (Bandeira, 2020; Carriço et al., 2020).

O primeiro relato da potencial recuperação das propriedades mecânicas de cimentos hidratados após tratamento térmico, resulta do estudo das características residuais de elementos de betão sujeitos à ação do fogo (Crook & Murray, 1970). Desde então, muitos autores que têm vindo a trabalhar nesta área. Splittgerber & Mueller (2003) e Alonso & Fernandez (2004) foram os primeiros a procurar produzir CR diretamente a partir de detritos de betão, confirmando que a termotativação deste tipo de resíduos permitia produzir um material análogo ao cimento Portland (CP). Nos últimos anos, tem-se procurado otimizar a produção de CR e caracterizar as suas propriedades e comportamentos quando incorporado em pastas e argamassas (Serpell & Lopez, 2013).

O conceito associado à produção de cimento reciclado baseia-se na separação da fração cimentícia dos componentes presentes nos RCD's, seguida por redução de tamanho e tratamento térmico a elevada temperatura (Figura 2.2).

A separação dos vários constituintes do betão é um dos principais desafios associado à reciclagem de cimento. De modo a procurar soluções para esta dificuldade, o departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico tem desenvolvido um processo nesta área, com resultados muito promissores (Bogas et al., 2019). Em 2021, o grupo de trabalho integrado neste estudo desenvolveu e patenteou um método de separação que permite obter frações de pasta com pureza superior a 75% (em massa) e areias pouco contaminadas (com menos de 5% de pasta aderida, em massa) (Carriço et al., 2021).

O processo de moagem visa diminuir o tamanho de partícula, com consequente aumento da superfície específica por volume, fatores que influenciam a reatividade, taxa de hidratação e o desenvolvimento da resistência mecânica (Kurdowski, 2014). Alguns estudos relatam que a redução

de tamanho das partículas de CR conduz a menor porosidade da fração mais grossa, afetando a absorção de água. O tamanho de partícula nesses estudos é tipicamente inferior a 150 μm , mas o ideal seria alcançar o tamanho médio de partícula do cimento Portland, 50 μm . Contudo, alcançar esta gama de tamanho apresenta grandes dificuldades (Carriço et al., 2020).

Para que o cimento reciclado recupere as propriedades do cimento hidratado, é necessário proceder à sua reativação térmica (Shui et al., 2009). Este processo é composto por três etapas: rampa de aquecimento, permanência no forno a uma temperatura pré-definida, e rampa de arrefecimento (Serpell & Zunino, 2017; Wang et al., 2018; Yu & Shui, 2014). Não existe consenso na literatura sobre o valor mais adequado de taxa de aquecimento, variando entre 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e 15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. O tempo e a temperatura de permanência no forno variam entre 2 e 3 horas e entre 600 $^{\circ}\text{C}$ e 800 $^{\circ}\text{C}$, respetivamente (Bandeira, 2020). Findo este tratamento, o material é arrefecido até à temperatura ambiente ficando pronto para utilização como ligante.

Na sua constituição, o cimento Portland, possui silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) e aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF). Na hidratação formam-se principalmente C-S-H, CH, etringite e monossulfato aluminato de cálcio. Estes produtos, ao serem submetidos a tratamento térmico, resultam em maior quantidade de cal livre e em menor quantidade de silicato tricálcico comparativamente ao cimento Portland. A reidratação do cimento a 600 $^{\circ}\text{C}$ consta de três etapas (Carriço et al., 2020):

1. Formação de C-S-H, motivada pela recombinação de Ca^{2+} e H_2O com C-S-H desidratado pela polimerização e hidratação do $\beta\text{-C}_2\text{S}$
2. Hidratação de CaO
3. Hidratação de C_2AH_8

Tanto no cimento reciclado como no cimento Portland o processo de hidratação é exotérmico. O pico da hidratação é atingido após 10h, aproximadamente (Carriço et al., 2020; Shui et al., 2009). A utilização de cimento reciclado requer algumas alterações relativamente ao cimento Portland, porque o seu comportamento mecânico e físico diferem. De acordo com inúmeros autores, a maior necessidade de água do cimento reciclado (comparativamente ao cimento Portland), advém da quantidade de cal livre, da elevada superfície específica, da morfologia dos poros e da sua elevada tendência aglutinante (Serpell & Lopez, 2015; Shui et al., 2009; Yu & Shui, 2013). Esta elevada necessidade de água está intrinsecamente ligada ao aumento de trabalhabilidade das pastas e betão com CR. Contudo, afeta negativamente as propriedades físicas e mecânicas destes materiais, já que ao evaporar cria grande quantidade de poros.

De acordo com Carriço et al. (2020), os valores para a resistência à compressão poderão variar de acordo com a relação a/l, origem do cimento, temperatura de termoativação e grau de finura. Estes valores, aos 28 dias, geralmente variam entre 4 e 30 MPa para provetes de argamassa de CR.

2.5 Blocos de terra comprimida

Os blocos de terra comprimida podem ser definidos como: *pequenos elementos de alvenaria com características regulares e verificadas, obtidos pela compactação estática ou dinâmica da terra num estado húmido, desmoldados imediatamente a seguir* (CDI & CRATerre_EAG/OAD, 1998). Pelo facto

de os BTC serem sujeitos a compactação, a coesão do bloco de terra comprimida não depende apenas do teor de argila presente (como acontece no adobe) mas também da pressão para a sua produção.

2.5.1 Características dos BTC

Para a produção dos BTC deve-se recorrer a terras argilosas e arenosas e com larga distribuição granulométrica. A estabilização pode ser feita com diversos produtos, incluindo o cimento e a cal. Para a mistura a ser moldada é necessário que o teor ótimo de água esteja próximo do valor máximo (Figura 2.1). Os BTC podem ser utilizados com diversas finalidades, incluindo como material de enchimento, elementos estruturais ou autoportantes. Pelo seu processo de moldagem, estes blocos têm acabamento liso, o que consiste em mais uma vantagem económica e ambiental uma vez que não precisam de revestimento. Outra vantagem é o facto de, devido à compactação dos blocos durante a moldagem, ser possível transportá-los e empilhá-los para a fase de cura (secção 2.5.2) logo após a moldagem. Adicionalmente, a utilização dos BTC é mais atrativa do que outros métodos construtivos em terra, porque a compactação com aplicação de pressão garante maior estabilidade dimensional.

2.5.2 Produção de BTC

O processo de produção dos BTC é limitado pelo grau de mecanização do estaleiro de produção. Para que o rendimento seja suficiente para o correto desenrolar da obra é necessária correta gestão da produção e controlo apertado de cada etapa. O processo de produção é constituído por onze etapas (Figura 2.3): Extração (por norma abaixo de um metro de profundidade de modo a evitar matéria orgânica), secagem, pulverização (para que a terra não apresente torrões, Figura 2.3a), peneiração (Figura 2.3b), dosagem dos constituintes (para controlo do volume ou o peso dos vários constituintes da amassadura), mistura a seco (para criação d uma mistura homogénea), mistura húmida (adição de água à mistura seca, Figura 2.3c), dosagem da mistura (medição do peso ou volume de mistura a colocar na prensa de forma a obter a densidade pretendida (Figura 2.3d), moldagem (Figura 2.3e), desmoldagem (Figura 2.3f), e cura.

A etapa da pulverização (Figura 2.3a) é uma das mais importantes no processo de produção dos BTC. O objetivo desta fase é garantir que a terra se apresenta sob a forma de um pó fino, de forma a permitir a sua correta dosagem, homogeneidade e coesão nos blocos. A pulverização pode ser feita de forma manual, recorrendo a maços e pilões ou de forma mecânica. De acordo com Adam (2001) a pulverização manual apresenta um rendimento em torno de 1m³/dia por trabalhador, um valor bastante inferior àquele apresentado na pulverização mecânica.

A moldagem dos blocos (Figura 2.3e) pode ser feita de forma manual ou mecânica. Recorrendo a prensas mecânicas é possível obter rendimentos superiores, existindo equipamento com capacidade de realizar cerca de 2000 blocos/dia. O facto de, numa prensa manual, não se conseguir assegurar uma pressão de compactação exatamente igual de bloco para bloco apresenta uma das grandes desvantagens deste tipo de equipamentos. Para uma prensa manual tendem a ser necessários pelo menos 3 operadores (moldagem e transporte) (AVEI, 2014; Rigassi, 1985; Rix, 1998).

A fase de cura dos blocos é muito importante para garantir a qualidade dos blocos no que se refere a fendilhação superficial e permitindo as corretas reações de hidratação com os estabilizadores utilizados. Para blocos não estabilizados recorre-se a uma cura seca, colocando os blocos sob uma lona plástica de modo a controlar a sua secagem. Para blocos estabilizados, a cura depende do estabilizador utilizado. Tipicamente procede-se a cura húmida durante os primeiros 7 dias após desmoldagem, seguindo-se 21 dias de cura seca, totalizando 28 dias de cura. Neste processo, a fase da cura húmida tem o objetivo de garantir o correto teor de humidade dos blocos para que as reações de hidratação se desenvolvam (no caso de ligantes hidráulicos). A fase da cura seca é responsável pela lenta evaporação da humidade dos BTC por forma a aumentar a coesão do bloco. Para o correto desenrolar desta etapa, a cura deve ser feita com exposição solar direta e sob a ação do vento (AVEI, 2014; Rigassi, 1985; Rix, 1998).

De forma abreviada, os fatores que mais contribuem para a qualidade dos blocos são a quantidade de água da mistura, a qualidade/quantidade de estabilizador, a pressão de compactação e as condições de cura



Figura 2.3 - Etapas para a produção de BTC: a) Pulverização. b) Peneiro com 4mm de abertura. c) Mistura húmida. d) Dosagem da mistura. e) Moldagem. f) Desmoldagem

2.5.3 Processos de construção de alvenarias com BTC

A construção em terra apresenta alguma especificidade relativamente à construção convencional. Mesmo quando estabilizada recorrendo a cimento, este tipo de construção apresenta uma suscetibilidade à água superior aos demais processos construtivos. Assim, são necessárias fundações que evitem o contacto entre a construção e eventual humidade do terreno. Estas fundações podem ser construídas em betão, pedra ou tijolo cerâmico maciço, e devem ser complementadas com um sistema de drenagem adequado. Adicionalmente, é aconselhada a utilização de uma barreira ao vapor na divisão entre as fundações e o início da construção com BTC (Silva, 2015).

Na construção de paredes em BTC, os blocos devem ser aplicados de modo a evitar que as juntas verticais se sobreponham, tal como nas alvenarias de blocos de betão ou tijolo. Apesar de os blocos poderem ser aplicados sem o uso de argamassa, isso não é comum. Por norma, recorre-se a uma

argamassa à base de terra, a mesma terra utilizada para a produção dos blocos. Não obstante, para a primeira fiada de blocos, deve utilizar-se uma argamassa cimentícia por forma a garantir a correta adesão entre as paredes e as fundações. Existe ainda a possibilidade de armar as paredes recorrendo a elementos de reforço como varões de aço ou canas de bambu, desde que os blocos sejam perfurados (Ecomáquinas, 2023).

Quanto à argamassa, esta pode ou não ser estabilizada. Devem ser evitadas argamassas constituídas apenas por areia e cimento pela falta de coesão e compatibilidade com os blocos (Barbosa, 1996; Lourenço, 2002). Apesar de não ser necessário recorrer a rebocos, podem ser interessantes do ponto de vista estético ou de proteção à água. Nesse caso, aplicam-se os mesmos cuidados e regras aplicadas às argamassas. O ligante mais eficaz é a cal, uma vez que os rebocos de cimento não apresentam uma excessiva rigidez (Lourenço, 2002).

É possível a aplicação de estuque pelo interior, salientando-se que qualquer revestimento deve ser permeável (à exceção da barreira de vapor), de modo a acomodar a higroscopicidade dos BTC (Silva, 2015).

Independentemente da função das paredes construídas com BTC, deve recorrer-se sempre a uma viga de coroamento em madeira ou betão armado. Além de criar pontos de ancoragem para a cobertura, esta viga distribui as cargas pelas paredes e reforça a sua estabilidade (Azevedo, 2021). Quanto à cobertura, deve evitar o contacto das águas pluviais com os blocos e o interior da construção (Silva, 2015).

Quando é necessário abrir vãos para portas e janelas deve recorrer-se à construção noutros materiais como madeira, betão ou pedra (caso não se opte por arcos). As tubagens devem passar pelo pavimento ou pelo teto, não sendo aconselhável abrir roços nos BTC (Lourenço, 2002). Caso haja a aplicação de blocos perfurados, deve passar-se a rede elétrica, e somente a rede elétrica, pelos vazios. No interior, é boa prática proteger as paredes junto a zonas de água com materiais impermeáveis de modo a evitar efeitos nefastos de eventuais roturas (Lourenço, 2002).

2.5.4 Regulamentação da construção em terra e com BTC

Devido às suas vantagens económicas, ambientais e à elevada versatilidade da construção em terra, a sua utilização tem vindo a crescer nos últimos anos. Contudo, para que possa ser utilizada de forma correta, há que regulamentar a sua aplicação. Atualmente, os documentos existentes estão ainda um pouco dispersos pelo mundo. Um dos principais problemas com esta solução construtiva passa pela disparidade de resultados entre os valores obtidos em laboratório e aqueles que se obtém em ambiente real. Em países como a Alemanha, Austrália, França, Nova Zelândia, Brasil ou Colômbia já é possível encontrar alguns documentos que regulam a construção em terra. Por esta razão, estes países são os maiores impulsionadores desta solução construtiva (Ribeiro et al., 2016; Schroeder, 2012). Infelizmente, Portugal ainda não faz parte deste lote.

Uma das maiores referências internacionais no âmbito da construção em terra é o grupo francês CRATerre. Este grupo tem vindo a desenvolver um trabalho fundamental nas áreas do desenvolvimento sustentável. França tem apresentado documentos normativos desde a Segunda Guerra Mundial, sendo ainda sede das organizações internacionais RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais

et de Recherche sur les matériaux et les constructions) e CIB (Conseil International du Bâtiment pour la recherche, l'étude et la documentation) responsáveis pela criação de recomendações e especificações para a construção em terra (Lourenço, 2002).

Na Alemanha, realçam-se dois documentos de elevada importância: as normas DIN 18951, que surgem no pós Segunda Grande Guerra; e o projeto “*Lehmbau*” com o objetivo de analisar o estado de arte da construção em terra, fornecendo recomendações e técnicas para a sua correta execução (Pacheco-Torgal et al., 2009). Espanha, apesar dos documentos normativos serem bastante recentes, com início em 1992, foi o primeiro país a apresentar uma norma referente somente aos BTC (Cid-Falceto et al., 2011). A Austrália e a Nova Zelândia juntamente com a França e alguns países da América Latina são considerados os maiores criadores de regulamentação nesta área. A primeira regulamentação específica da construção em terra, o “*bulletin 5*”, data de 1952. Mais recentemente, em 2002, foi publicado o Manual Australiano de Construção em Terra (Pacheco-Torgal et al., 2009). A Nova Zelândia desenvolveu o regulamento mais completo a nível internacional para esta técnica (Cid-Falceto et al., 2011). Na América Latina destacam-se três países. O Brasil com treze normas sobre BTC, cilindros de solo-cimento e taipa, a Colômbia que adotou a norma NTC 5324 (derivada da norma Francesa) e o Perú com normas referentes a construção resistente a sismos em adobes estabilizados com betume (Cid-Falceto et al., 2011).

No continente Africano, para além da regulamentação nacional de alguns países, existem as normas regionais ARS 670-683 preparadas pela CRATerre em conjunto com o CDI (Centre pour le Développement Industriel) (Lourenço, 2002).

Infelizmente, Portugal não apresenta regulamentação para a construção em terra. A falta destes documentos foi um dos problemas para o desenvolvimento do trabalho tendo sido necessário recorrer a normas internacionais ou adaptar normas nacionais de outros materiais de construção.

2.5.5 Vantagens e desvantagens dos BTC

Nesta secção enumeram-se algumas das vantagens e desvantagens da utilização dos BTC relativamente a outras técnicas construtivas (Azevedo, 2021; Silva, 2015).

As vantagens incluem:

- Capacidade de armação de paredes e passagem de tubos sem necessidade de abertura de roços
- Aplicação em obra mais eficiente devido à elevada estabilidade dimensional
- Contrariamente aos blocos de adobe, os BTC podem ser empilhados durante o processo de cura, minimizando o espaço ocupado
- Os blocos têm menor dimensão comparativamente ao adobe
- Maior e melhor compatibilidade com sistemas de revestimento
- O facto dos BTC serem prensados, torna os blocos mais resistentes que os de adobe
- Produz menor quantidade de desperdícios face à utilização/produção de adobe
- Em comparação com o adobe, a aceitação social é maior, devido à segurança inspirada pela compactação e estabilidade dimensional
- Menor consumo de água relativamente a outras técnicas construtivas

- Comparativamente à taipa, o processo de produção é considerado mais simples

Listam-se, em seguida, algumas desvantagens:

- Transporte dificultado pelo elevado peso quando comparado ao adobe
- A necessidade de moldes, limita as dimensões dos blocos que podem ser produzidos
- A produção manual de BTC é mais laboriosa que a produção manual de adobe
- As arestas dos blocos tendem a danificar-se frequentemente pela sua fragilidade
- Fraca resistência sísmica

2.5.6 Formulação dos BTC

O processo de produção de BTC começa pela seleção e caracterização do solo a utilizar, seguidas pela determinação das proporções de águas e estabilizantes a empregar.

As características consideradas mais relevantes para a produção de BTC são a granulometria e os limites de consistência (Azevedo, 2021). No presente trabalho, de forma a analisar granulometricamente as terras em utilização, optou-se por agrupar as frações argilosas e siltosas do solo, ou seja, todas as frações de dimensão inferior a 0,074mm foram consideradas como argila/silte pela dificuldade na separação destas partículas.

A distribuição granulométrica deve ser o mais extensa possível de modo a otimizar a compacidade dos blocos e, conseqüentemente, a sua resistência mecânica (Malkanthi et al., 2021). Existem várias abordagens para seleção da curva granulométrica mais adequada. Por exemplo, a *African Standart Organization, ARS 670* (1996), recomenda que a curva granulométrica do solo se enquadre dentro do fuso granulométrico apresentado na Figura 2.5(Uzoegbo, 2019).

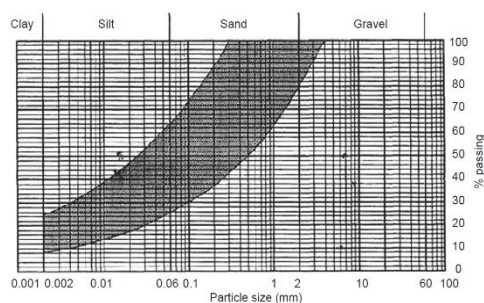


Figura 2.4 - Fuso granulométrico para produção de BTC estabilizados, ARS 670 (1996) (Uzoegbo, 2019)

Não existe ainda consenso sobre as características ótimas da terra a utilizar em BTC. Na Tabela 2.2 apresentam-se alguns dos valores de referência aceites atualmente para limites de consistência e granulometria, segundo diferentes autores.

As pesquisas de Burroughs (2008) e Delgado & Guerrero (2007) são aparentemente as mais completas. Delgado & Guerrero (2007) dedicaram-se à análise de diversos documentos normativos para construções em terra não estabilizada; Burroughs (2008) ensaiou e analisou mais de 100 tipos de solos para construção em taipa estabilizada. Na Tabela 2.3 resumem-se as características ótimas para o trabalho em desenvolvimento.

Tabela 2.2 - Valores de referência para granulometria e limites de consistência (Silva, 2015)

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

Para a técnica construtiva dos BTC a maioria dos estudos aconselha a utilização do TOA para a moldagem dos blocos. Com o objetivo de alcançar estes valores, grande parte dos autores recorrem ao ensaio Proctor ou ao *drop test*. O ensaio de *drop test* é um teste mais expedito e que pode ser realizado *in loco*, já o Proctor deve ser realizado em ambiente laboratorial. De acordo com a organização CRATerre, para a correta moldagem dos blocos devem utilizar-se teores de humidade entre 9 % e 17 % (Lourenço, 2002). Riza et al. (2010) definiram como valores ótimos teores de humidade entre os 10% e os 13%, em relação à massa de terra utilizada

Tabela 2.3 - Características ótimas para terra a utilizar em BTC (Silva, 2015)

	Estabilizados	Não estabilizados
Seixo		0 – 30%
Areia		25 – 70%
Argila	10 – 35%	22 – 45%
LL	25 – 40	25 - 50
IP	2 – 20	2 - 30

Na Tabela 2.4 apresentam-se alguns valores para as percentagens de estabilizantes a incorporar nos blocos segundo vários autores.

Tabela 2.4 - Proporções de cimento recomendadas para a estabilização de blocos de terra comprimida (Azevedo, 2021)

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

A proporção recomendada de cimento está entre 4% e 10%, sendo que valores inferiores a 4 % apresentam reduzida eficácia, enquanto valores superiores a 10 % tornam-se economicamente inviáveis. Salienta-se que, devido há enorme heterogeneidade do solo, qualquer generalização/formulação sobre o mesmo acaba por incorrer em erros pelo que os limites acima apresentados devem ser utilizados meramente como um guia para a produção de BTC.

3. Campanha Experimental

No presente capítulo será apresentado o programa experimental planeado para este trabalho, incluindo a seleção do solo e dos resíduos de construção e demolição (RCD), produção dos BTC e do cimento reciclado (CR), caracterização física, mecânica e de durabilidade dos BTC. Serão descritos os processos de produção, métodos de ensaio e equipamentos utilizados para a produção e caracterização dos blocos.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação FCT – “*Eco-efficient recycled cement compressed earth block*” – Eco+RCEB – PTDC/ECI-CON/0704/2021 (Eco+RCEB, 2023). A campanha experimental foi realizada em três locais, nomeadamente no laboratório de construção de engenharia civil do IST (LC-IST) onde foram caracterizados os blocos e os materiais a utilizar nos mesmos, nas Oficinas do Convento de Montemor-o-Novo (ACOC), onde se produziu os blocos, e no laboratório de geociências e geotecnologias do IST (GeoLab-IST) onde se britou e moeu o material para a produção do CR.

3.1 Descrição da campanha experimental

Para o presente estudo a campanha experimental foi dividida em cinco fases: Caracterização de cinco solos da zona de Montemor-o-Novo; otimização e definição da composição dos BTC; produção e caracterização do cimento reciclado; produção dos BTC; ensaios de caracterização dos BTC. Numa fase inicial foi necessário caracterizar fisicamente os diferentes solos recolhidos no Concelho de Évora, na região de Montemor-O-Novo, e os RCD a utilizar. Foram realizados seis ensaios de modo a avaliar a granulometria, massa volúmica, limites de consistência, teor ótimo de água, fração de matéria orgânica e fração argilosa. Os RCD foram incorporados nos BTC, como agregado reciclado (AR) em substituição parcial do solo, fomentando uma maior reutilização e circularidade na construção. Neste âmbito foi ainda considerada a utilização de uma areia reciclada de melhor qualidade (HQRS), resultante do processo de produção do CR a partir de detritos de betão.

Na segunda etapa foi realizada a primeira missão de campo do presente estudo, em que se procedeu a um estudo preliminar, com o intuito de otimizar a composição e a metodologia de produção dos BTC. Nesta fase, apenas foram consideradas misturas de referência realizadas com cimento Portland normal (CP).

A terceira etapa foi dedicada à produção do cimento reciclado, incluindo a fase de produção das pastas e dos betões de origem sujeitos a reutilização. A produção do CR incluiu tratamentos mecânicos de moagem e de libertação dos constituintes do betão, separação da fração de pasta do agregado e sua termoativação. A separação dos constituintes foi realizada com base num método inovador desenvolvido no IST, no âmbito do projeto EcoHydb – “*Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials*” (EcoHdyb, 2022). A caracterização do CR incluiu ensaios de determinação de exigência de água, tempo de presa, teor de cal livre, resistência à flexão e compressão e análises de termogravimetria. Ao CR produzido a partir de pasta designou-se RCP e ao resultante da separação prévia da fração de pasta do betão, RCC.

Na quarta fase foram produzidos os vários BTC a caracterizar de acordo com o planeamento inicialmente definido e com o estudo preliminar, tendo-se variado o tipo de ligante (CP, RCP e RCC), o tipo de agregado reciclado (RCD e HQRS), o teor de AR (0%, 15% e 25%) e a percentagem de substituição de CP por RCC (0%, 20%, 50% e 100%). As misturas de referência foram realizadas com dois tipos de CP (CEM II/B-L 32,5 e CEM I 42,5) de forma a avaliar o desempenho relativo do CR face a um cimento de utilização comum na construção, de menor teor de clínquer, e face ao cimento que esteve na origem da produção do CR. A designação utilizada para os vários blocos encontra-se apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Designação utilizada

Designação	Descrição
8CP	BTC estabilizado com 8% de CP tipo I 42,5
8CP25RCD	BTC estabilizado com 8% de CP tipo I 42,5 e com incorporação de 25% de RCD
8CP15RCD	BTC estabilizado com 8% de CP tipo I 42,5 e com incorporação de 15% de RCD
8CP32.5	BTC estabilizado com 8% de CP tipo II/B-L 32,5
8CP25HQRS	BTC estabilizado com 8% de CP tipo I 42,5 e com incorporação de 25% de HQRS (Areia reciclada de alta qualidade)
12RCC25RCD	BTC estabilizado com 13% de RCC e com incorporação de 25% de RCD
8RCC25RCD	BTC estabilizado com 8% de RCC e com incorporação de 25% de RCD
8RCC	BTC estabilizado com 8% de RCC
20RCC80CP25RCD	BTC estabilizado com 8% de ligante composto por 20% RCC e 80% CP tipo I 42,5
50RCC50CP25RCD	BTC estabilizado com 8% de ligante composto por 50% RCC e 50% CP tipo I 42,5
NE25RCD	BTC não estabilizados quimicamente com incorporação de 25% de RCD

Finalmente, na quinta fase caracterizou-se os blocos produzidos em termos de algumas das suas principais características físicas e mecânicas, incluindo ensaios de massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por flexão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, retração total, esclerómetro pendular, porosidade total, abrasão superficial e velocidade de propagação de ultrassons.

3.2 Caracterização dos solos

No presente subcapítulo, o objetivo passa por caracterizar os solos recolhidos de forma a seleccionar o que melhor se adequa às características pretendidas para a produção dos BTC. Inicialmente foram considerados 5 tipos de solos provenientes da região de Montemor-o-Novo, aos quais foram atribuídos os nomes Maia, Pinheiro, Cortiçadas de Lavre, Amendonça e Baldios. De forma a evitar a contaminação por quantidade excessiva de matéria orgânica, foi necessário proceder à extração das terras a uma profundidade superior a 1m. Para os ensaios de caracterização, começou por se realizar uma pequena extração de 100 litros de cada um dos solos a analisar. Posteriormente, foi realizada uma extração de

10 m³ do solo selecionado. Para a caracterização dos solos teve-se em consideração os ensaios apresentados na Tabela 3.2. Para a realização dos ensaios, seguiu-se o disposto na especificação LNEC E-195 (1966). Começou-se por selecionar uma porção de amostra, consoante o ensaio a realizar, tendo-se seco em estufa ventilada a 105°C até massa constante. Depois de seco, o solo foi destorrado com o auxílio de um pilão de borracha para que não se diminuísse a dimensão das partículas, adulterando os resultados.

Tabela 3.2 - Normas utilizadas para a caracterização das terras

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	LNEC E239 (1970)
Massa volúmica das partículas	NP83 (1965)
Limites de consistência	NP143 (1969)
Fração de matéria orgânica	Ensaio expedito (Silva, 2015)
Ensaio de compactação	LNEC E197 (1966); ASTM D698 (2000)
Determinação da fração argilosa	Método da jarra (HB 195, 2002)

3.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a norma LNEC E-239 (1970), para a fração de solo acima de 0,075mm. Previamente à realização deste ensaio, as amostras são preparadas num almofariz de forma a desagregar os aglomerados de argila. Na produção dos BTC, este processo ocorre na etapa de pulverização, como descrito em 2.5.2. Começou por se fazer passar uma amostra de 1,0 kg de solo pela série de peneiros de malha quadrada normalizada e de abertura decrescente, entre 75 mm e 2 mm, anotando-se as massas retidas em cada peneiro. O material que passou pelo peneiro de 2 mm foi lavado sobre o peneiro de 0.075 mm e colocado a secar em estufa ventilada a 110°C até massa constante. Uma vez seca a fração fina, procedeu-se a uma segunda análise granulométrica da mesma, fazendo-a passar numa série de peneiros de malha quadrada normalizada com abertura entre 2 mm e 0,075 mm tonando-se a anotar a massa de solo retida em cada um dos peneiros. Para concluir o ensaio e de forma a quantificar a porção de partículas de dimensão inferior a 0,075mm, subtraiu-se a soma das massas obtidas para a peneiração da fração fina à massa do refugo (fração inferior a 2 mm) da fração grossa. As curvas granulométricas dos solos estudados resumem-se na Figura 3.1, traduzindo a percentagem de massa passada acumulada em cada peneiro. Na Tabela 3.3 resumem-se as composições de cada solo, onde se considera a fração de areia acima de 0,075mm (embora seja, usualmente, considerada acima de 0,060 mm, (LNEC E-239, 1970). Realça-se, desde já, o baixo teor de finos nos solos Cortiçadas, Amendonça e Pinheiro.

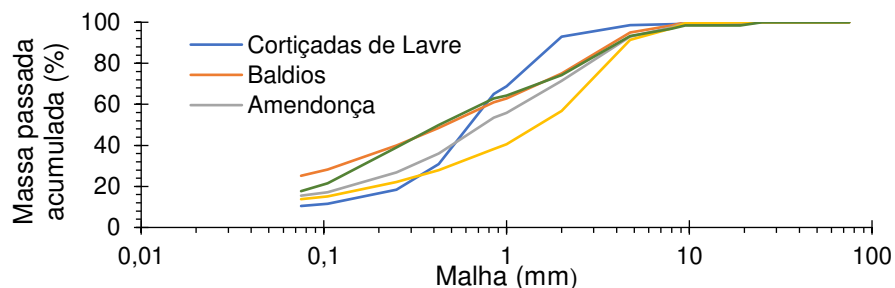


Figura 3.1 - Curvas granulométricas das terras em análise

Tabela 3.3 - Constituição macroscópica das terras em análise

	Cortiçadas	Amendonça	Baldios	Maia	Pinheiro
%Argila + silte [$\leq 0,075$ mm]	10,5	15,5	25,2	17,7	13,8
%Areia [0,075 – 2,0mm]	83,6	54,5	52,3	58,2	44,4
%Seixo [2,0 – 60,0mm]	7,0	28,5	25,0	25,7	43,2

3.2.2 Estimativa do teor de argila

Para a determinação do teor da fração argilosa dos solos recorreu-se ao método da jarra. Através deste ensaio expedito, facilmente realizável in-situ, não só é possível estimar a fração argilosa do solo, como também as restantes frações de partículas sólidas (areia e silte). Para a realização deste ensaio foi seguido o procedimento descrito na norma HB 195 (2002).

Basicamente, uma amostra é peneirada através de um peneiro de abertura 2,0 mm, e colocada dentro de uma jarra de fundo plano até que se atinga um terço da sua capacidade. Em seguida preenche-se a jarra com água, deixando apenas cerca de 10% sem material. A mistura deve ser bem agitada e deixada repousar durante algumas horas até que não se observe material em suspensão. Após aproximadamente 48h é possível constatar a existência de 3 camadas (argila, silte e areia). A primeira camada a assentar é aquela formada por areia seguindo-se o silte e posteriormente a argila que poderá ficar em suspensão por longos períodos de tempo. No final do ensaio, mede-se a espessura de cada camada sendo possível avaliar o teor de cada uma dessas frações no solo.

Os resultados obtidos para os solos em estudo apresentam-se na Tabela 3.4. Uma vez que o solo de *Cortiçadas de Lavre* apresentava um teor de finos demasiado baixo, optou-se por desconsiderar este solo e não realizar o ensaio. A estimativa do teor de argila através deste método é menos precisa uma vez que se torna difícil atingir uma sedimentação estável e completa destas partículas, o que acaba conduzir a um valor mais elevado do que o do real teor de argila. Isto foi particularmente evidente nos solos Pinheiro e Amendonça. Por outro lado, quando se realiza uma análise granulométrica tende-se a subestimar o teor de materiais finos pela dificuldade de desaglomeração destas partículas de pequena dimensão.

Tabela 3.4 - Classificação textural e aferição das frações granulométricas para as terras em análise

	%areia	%silte	%argila	Silte + Argila	Classificação textural (USDA)
Amendonça	76,7	11,1	12,2	23,3	Marga arenosa
Baldios	80,0	13,3	6,7	20,0	Areia argilosa
Maia	85,0	11,3	3,8	15,1	Marga arenosa
Pinheiro	79,4	6,3	14,3	20,6	Marga arenosa

Por análise dos resultados obtidos no método da jarra (Figura 3.2), é possível classificar a textura de cada uma das terras com base no ábaco disponibilizado pelo Serviço para a Conservação dos Recursos Naturais do departamento de Estado da Agricultura dos E.U.A. (USDA) (Figura 3.3).

Finalmente, cruzando os dados obtidos da análise granulométrica em 3.2.1. e a relação argila/silte da Tabela 3.4., pode estimar-se que os teores de argila para as terras Baldios, Amendonça, Maia e Pinheiro foram cerca de 8,4%, 8,1%, 4,5% e 9,6%, respetivamente.

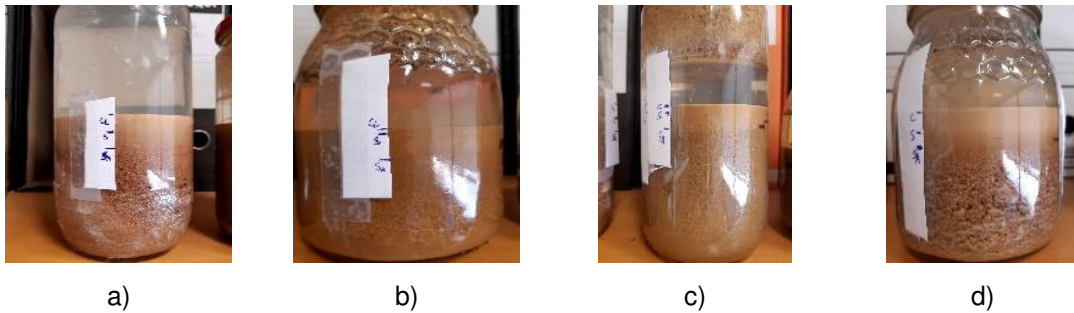


Figura 3.2 - - Resultados do método da jarra; a) Amendonça; b) Baldios; c) Maia; d) Pinheiro

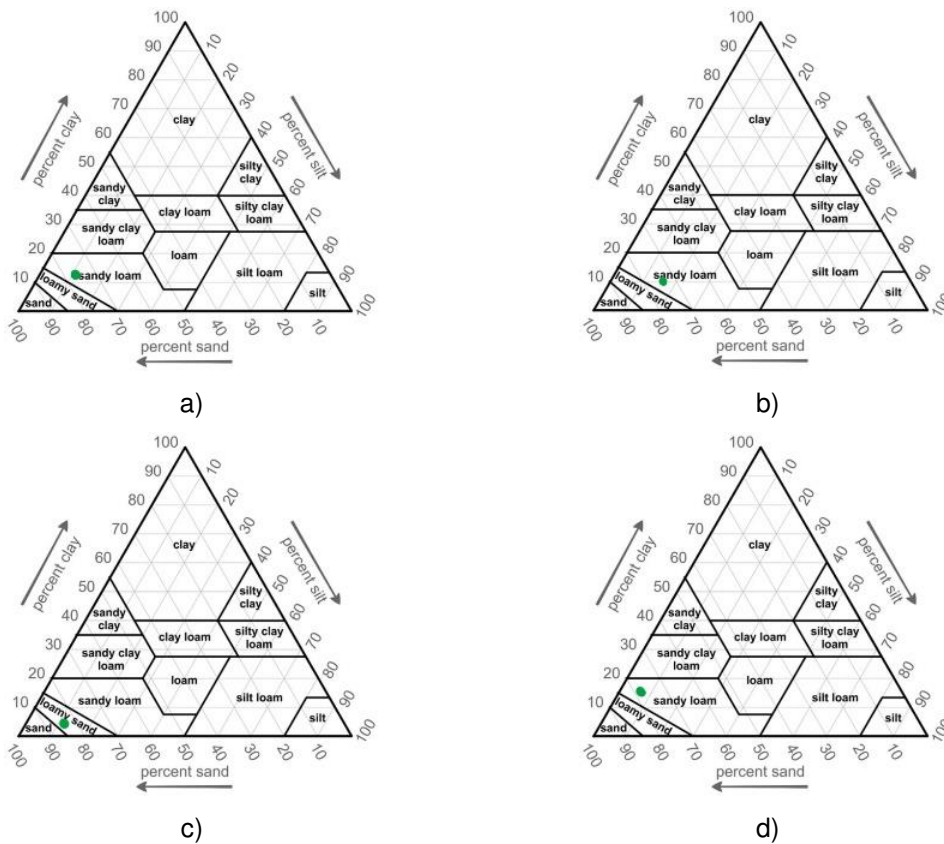


Figura 3.3 - Classificação textural das terras em análise; a) Amendonça; b) Baldios; c) Maia; d) Pinheiro

3.2.3 Determinação da massa volúmica das partículas

Para a determinação da massa volúmica das partículas seguiu-se o procedimento descrito na norma NP-83 (1965) fazendo uso de 3 picnómetros de 250 cm³ de capacidade, 2 picnómetros de 100 cm³ de capacidade, balança e termómetro. Para o ensaio foram utilizadas amostras de 25 g de solo seco peneirado através do peneiro 4,76 mm. De forma a calibrar os picnómetros estes foram preenchidos com água destilada até ao nível de referência e registou-se a sua massa.

A amostra de solo foi colocada dentro do picnómetro com água destilada, até cerca de $\frac{3}{4}$ da sua altura, deixando-o repousar durante pelo menos 12h, de forma a se atingir a saturação. De seguida, e

recorrendo a um agitador magnético, a amostra foi aquecida durante 10 minutos para que se retirasse o ar remanescente. O picnómetro foi deixado a arrefecer até a temperatura ambiente e procedeu-se à correção do nível de água até ao nível de referência, registando-se a massa correspondente.

Através da Equação (1), pode determinar-se a massa volúmica das partículas, onde m_1 corresponde à massa, em gramas, do picnómetro cheio de água, m_2 à massa da amostra (25 g) e m_3 à massa do picnómetro cheio de água mais solo, também em gramas. O parâmetro K melhora a precisão dos resultados, fazendo uma relação entre a massa volúmica da água destilada à temperatura de 20°C e sua a massa volúmica à temperatura a que o ensaio foi realizado.

$$\rho = \frac{m_2}{m_1 - (m_3 - m_2)} \times k \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (1)$$

Os resultados obtidos para os solos em análise apresentam-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Massa volúmica das terras em análise

Solo	ρ [g/cm ³]
Cortiçadas de lavre	2,5
Amendonça	2,4
Baldios	2,6
Maia	2,5
Pinheiro	2,5

3.2.4 Determinação dos limites de consistência

Recorrendo aos limites de consistência é possível extrapolar o comportamento do solo quando em contacto com água bem como a maior ou menor capacidade para se deformar. O ensaio para a determinação dos limites de consistência, de uma forma indireta, permite analisar a presença de argila no solo, uma vez que as propriedades plásticas do mesmo tendem a ser dadas pelos minerais argilosos.

Para a realização deste ensaio foi seguida a norma NP-143 (1969), sendo necessário recorrer aos seguintes instrumentos: concha de Casagrande, riscador, espátula, cápsulas numeradas, placa de vidro e papel milimétrico. Findo o ensaio é possível calcular o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP). O limite de liquidez é definido como o teor de água do solo para o qual os bordos inferiores de um sulco aberto numa mostra se unem numa extensão de 1 cm após 25 pancadas na concha de Casagrande. Dada a dificuldade prática de se obter estes requisitos, recorre-se a uma interpolação a partir de 4 amostras com teor de água variável. De acordo com o objetivo de aumentar ou diminuir o número de pancadas, adiciona-se terra seca ou água destilada à amostra, respetivamente. Para o primeiro provete procura-se realizar 10 (± 2), para o segundo 20 (± 2), para o terceiro 30 (± 2) e para o quarto 40 (± 2) pancadas.

Começa por se peneirar 500g de amostra sobre o peneiro de abertura 0,42 mm. A porção de solo que passa no peneiro é colocada na concha de Casagrande e adiciona-se água destilada até se obter uma mistura homogénea (Figura 3.4a e Figura 3.4b). Seguidamente, distribui-se a mistura pela concha

com uma espessura de aproximadamente 1 cm e de superfície nivelada. Com recurso a um riscador realiza-se um sulco com largura de aproximadamente 2mm (Figura 3.4c). Para o ensaio, foi utilizado um ritmo médio de duas pancadas por segundo tendo-se registado o número de pancadas para que os bordos inferiores do sulco se unissem na extensão de 1 cm (Figura 3.4d). Na zona da união é extraída uma amostra para a qual se retira a massa e se coloca a secar em estufa ventilada a 110°C até massa constante. Após a secagem, torna-se a pesar a amostra e calcula-se o teor de água. Este procedimento é repetido por 4 vezes para 4 teores de água.



Figura 3.4 - Sequência do procedimento experimental para determinação dos limites de consistência. a) mistura da terra com água; b) Homogeneização da mistura; c) execução do sulco; d) junção dos bordos inferiores do sulco

Para a determinação do limite de plasticidade retira-se, da mesma amostra preparada para o limite de plasticidade, 4 porções de semelhante dimensão. Sobre uma placa de vidro são moldados filamentos com cerca de 3mm de espessura até que se formem fissuras transversais ao longo de todo o seu comprimento. De seguida, estes filamentos são colocados em cápsulas, pesados e secos em estufa ventilada a 110 °C até massa constante. Findo este processo, toma-se a pesar os filamentos permitindo aferir a quantidade de água na amostra. O limite de plasticidade do solo corresponde à média do teor das 4 amostras. O índice de plasticidade corresponde à diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (Equação 2).

$$I_p = LL - LP \text{ [%]} \quad (2)$$

Os resultados obtidos para cada uma das terras referentes aos limites de plasticidade, liquidez e índice de plasticidade apresentam-se na Tabela 3.6. Com exceção do solo Pinheiro, os restantes solos apresentam valores muito reduzidos de índice de plasticidade (IP). Contudo, os valores obtidos para qualquer uma das terras analisadas está de acordo com o recomendado em 2.5.6.

Tabela 3.6 - Limites de consistência

Solo	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Cortiçadas de Lavre	19,6	15,3	4,3
Amendonça	26,4	20,0	6,4
Baldios	23,7	18,9	4,7
Maia	27,0	21,8	5,2
Pinheiro	41,8	25,4	16,5

3.2.5 Determinação da fração de matéria orgânica

A existência de elevadas quantidades de matéria orgânica nos blocos não é desejável pois irá afetar a sua resistência, durabilidade e estabilização. A matéria orgânica irá decompor-se ao longo do

tempo, tornando os blocos porosos, e o seu elevado teor está associado a maiores exigências de água, dificultando a ligação do ligante. Por essas razões, a presença de matéria orgânica nos solos a utilizar na produção de BTC, contribui para uma menor resistência mecânica e durabilidade dos blocos.

Para o procedimento experimental, começa-se por secar 1 kg de terra em estufa a 110°C até massa constante. Posteriormente adiciona-se 0,5 L de água oxigenada à mistura, homogeneizando, e deixando-a reagir. Em seguida, torna-se a colocar a mistura a secar na estufa a 110 °C até massa constante. No final, pesa-se a amostra. Ao reagir com a água oxigenada, a fração de matéria orgânica pode ser estimada por determinação da variação de massa após a secagem em estufa. Apesar de não se conseguir eliminar por completo toda a matéria orgânica, é possível realizar uma comparação relativa entre os vários solos. Os resultados obtidos para cada um dos solos estudados apresentam-se na Tabela 3.7. Em qualquer dos casos, foi cumprido o limite máximo de 2 % de matéria orgânica (HB-195, 2002).

Tabela 3.7 - Teores de matéria orgânica

Solo	Matéria Orgânica (%)
Cortiçadas de Lavre	0,3
Amendonça	1,0
Baldios	1,5
Maia	0,4
Pinheiro	0,3

3.2.6 Ensaio de compactação (Proctor)

Ao realizar o ensaio de Proctor o objetivo principal passa pela determinação do teor ótimo de água de um determinado solo. De acordo com Bahar et al. (2004), é possível maximizar a compacidade dos BTC caso se considere o teor ótimo de água (TOA). Desta forma e uma vez que a massa volúmica dos blocos tem influência na durabilidade e no desempenho mecânico, este ensaio de compactação é importante para a correta produção dos blocos. Para o ensaio de compactação foi seguida a norma ASTM D 698 (2000), sendo este ensaio utilizado, somente, para a caracterização de cada amostra de solo e não para as misturas finais dos BTC. Acresce ainda que a energia de compactação utilizada durante o ensaio difere da utilizada para a produção dos blocos. Por essas razões, os resultados extraídos apenas permitem auxiliar a estimativa do teor de água a utilizar nas misturas e no estudo prévio apresentado em 4.1. A determinação do TOA foi realizada através da interpolação de 4 pontos na curva de compactação, infelizmente, e por questões de quantidades de material reduzidas, em determinados casos, optou-se por realizar apenas 3 pontos na curva de compactação. Para a aferição destes pontos, procedeu-se a uma variação do teor de água numa amostra de 2kg de solo. Relativamente ao material utilizado, foi necessário um molde pequeno de 940cm³, um pilão de altura normalizada, um tabuleiro e uma espátula (Figura 3.5a).

Para a realização do ensaio começa-se por peneirar uma amostra de solo sobre o peneiro de 4,76 mm de abertura e divide-se o material passado em porções de 2 kg. Em seguida, adiciona-se água a cada uma destas porções, garantindo-se que a diferença de teor de água entre pontos será, no mínimo, 2%. A mistura é homogeneizada e dividida em 3 partes iguais (Figura 3.5b) e cada uma destas partes

é introduzida no molde e compactada com 25 pancadas igualmente distribuídas. Após o enchimento do molde, retira-se a alonga (Figura 3.5c) e rasa-se a superfície (Figura 3.5d). Finalmente, procede-se à pesagem do molde e retiram-se duas amostras de área quadrada, com cerca de 2 cm de lado, e a uma profundidade de 1 cm. Uma das amostras é retirada do topo do molde e a outra da base, registando-se as respetivas massas. As amostras são depois colocadas em estufa a 110 °C até massa constante, tornando-se a registar as massas no final deste procedimento.

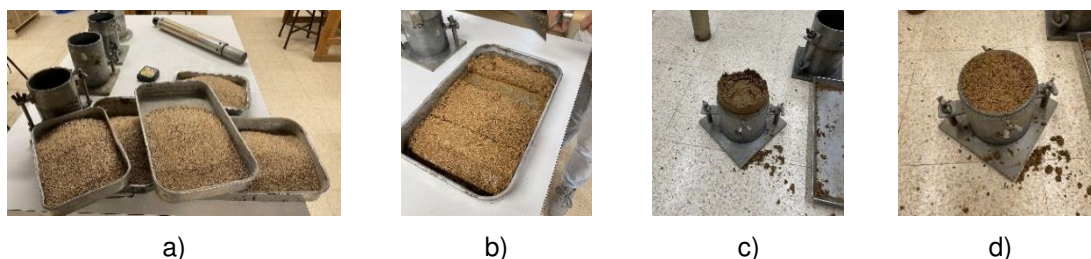


Figura 3.5 – Ensaio de Compactação; a) equipamento utilizado; b) Divisão da amostra; c) molde sem alonga; d) molde com superfície rasada

Findo o ensaio, foi possível obter as curvas de compactação das várias terras, relacionando o teor de água com a massa volúmica seca. O TOA corresponde ao teor de água para o qual se obtém a máxima massa volúmica. Os valores obtidos para os TOA das várias terras encontram-se apresentados na Tabela 3.8, correspondendo a valores máximos de massa volúmica seca de 1950, 1910, 1730, 1840 e 2070 kg/m³ para Maia, Baldios, Pinheiro, Amendonça e Cortiçadas de Lavre, respetivamente.

Tabela 3.8 - TOA das terras em análise

Solo	TOA (%)
Cortiçadas de Lavre	14,7
Amendonça	13,9
Pinheiro	15,3
Baldios	10,9
Maia	13,3

Realça-se que, a menor exigência de água (menor TOA), foi obtido no solo Baldios, também associado a um dos maiores valores de massa volúmica após compactação. As curvas de compactação de cada um dos solos apresentam-se no Anexo A1.

3.2.7 Composição mineralógica dos solos

De forma a analisar a composição mineralógica dos solos realizaram-se ensaios de difração de raios-X (DRX). Para o ensaio recorreu-se ao difractómetro *XPERT-PRO* (40 kV, 35 mA). A aquisição foi executada entre 5,0437° e 69,9547° 2 θ , para um passo de 0,033°. Para a análise da amostra foram consideradas duas etapas, a primeira sem pré-tratamento e a segunda após aquecimento a 450°C. O objetivo deste procedimento passa por uma melhor identificação dos minerais argilosos presentes nos solos, uma vez que os picos associados a alguns destes minerais variam de posição após aquecimento (Pope et al., 2001). Na Tabela 3.9 apresentam-se as principais fases identificadas para cada solo.

Tabela 3.9 - Fases mineralógicas identificadas por difração de Raio-X

Amendonça	Quartzo, Clinocloro, Ilite, Albita, Microlina
Baldios	Quartzo, Albita, Caulinite, Microlina, Montmorilonite
Maia	Quartzo, Albita, Caulinite, Microlina, Montmorilonite
Pinheiro	Quartzo, Albita, Caulinite, Microlina, Montmorilonite, Clorite

Analisando os dados obtidos é possível constatar que os solos contêm minerais argilosos expansivos do grupo da Smectite (Montmorilonite). Este tipo de argilas é desfavorável para aplicação em BTC (Reddi et al., 2012) uma vez que possuem um comportamento pouco estável para ciclos de secagem e molhagem, traduzindo-se numa menor durabilidade dos BTC. Constatou-se que esta é uma característica transversal aos solos da região de Montemor-o-Novo, o que limita a sua seleção para a produção de BTC. No entanto, a filosofia inerente à construção em terra implica a utilização de solos locais. Por outro lado, o teor de argila dos solos selecionados é reduzido, principalmente no caso de Baldios e Maia (3.2.2). Assim, optou-se por produzir os BTC com um dos solos analisados, conforme discutido em 4.1. Note-se que esta opção tem ainda a vantagem de permitir estudar o efeito da incorporação de cimento reciclado em condições muito desfavoráveis, em que o efeito de estabilização é mais difícil.

3.2.8 Pré-seleção do solo

Na Tabela 3.10 resumem-se os valores obtidos nos ensaios de caracterização do solo descritos em 3.2.1 a 3.2.7, bem como a gama de valores recomendados para cada ensaio de acordo com o sugerido na literatura. Na Figura 3.6 apresenta-se ainda a compilação das curvas granulométricas dos vários solos analisados, após pulverização, bem como o fuso granulométrico recomendado na norma XP-13-901 (2001). A distribuição granulométrica do solo tem uma elevada influência na sua compacidade após compactação, sendo um fator importante de seleção do solo mais adequado para a produção dos BTC.

Através da Figura 3.6, é possível perceber que o solo Baldios é o que melhor se adapta ao fuso granulométrico recomendado na norma XP-13-901 (2001), tratando-se de um solo bem graduado de granulometria extensa. Por razões de homogeneidade, compactação e acabamento, a produção de BTC limita a dimensão máxima do solo a cerca de 8 mm (Silva, 2015). Assim, o material retido neste peneiro após pulverização do solo, é considerado desperdício. Nesse sentido, o solo “Baldios” é também aquele que permite uma menor quantidade de desperdício.

Para além dos ensaios já mencionados, foi realizada uma análise qualitativa da facilidade de pulverização das terras. Esta avaliação teve por base uma escala de 0 a 5, por ordem crescente de dificuldade de pulverização e manuseamento do solo (Tabela 3.10). Destacam-se os solos Baldios e Maia pela sua maior facilidade de tratamento, em consequência do seu baixo valor de IP (Burroughs, 2008; Houben & Guillaud, 2008), os BTC estabilizados deverão apresentar cerca de 10–35 % de material fino (silte+argila). Tal como referido anteriormente, o solo Baldios pode ser classificado como “areia argilosa”, com cerca de 16,8% de silte e 8,4% de argila (25,2 % finos), valores enquadrados no intervalo recomendado.

Tabela 3.10 - Resultados médios obtidos após caracterização dos solos e limites recomendados de acordo com 2.5.7

		Cortiçadas de Lavre	Amendonça	Baldios	Maia	Pinheiro
Facilidade de pulverização		3	4	1	2	5
Análise Granulométrica	%argila	10,5	8,1	8,4	4,5	9,6
	%silte		7,4	16,8	13,2	13,2
	%areia	88,2	77,5	69,8	75,6	75,6
	%seixo	1,3	7,0	5,0	6,7	6,7
	Desperdício [d>8mm]	0,9	2,40	1,60	3,10	3,0
Massa vol.	ρ [g/cm ³]	2,5	2,4	2,6	2,5	2,5
	Classificação	Exceccional				
Limites de Atterberg	LL	19,6	26,4	23,7	27,0	41,8
	Limite recomendado	25% - 50%				
	IP	4,3	6,4	4,7	5,2	16,5
	Limite recomendado	2% - 20%				
Ensaio compact.	TOA	14,7	13,9	10,9	13,3	15,3
	Intervalo indicado	10% - 13%				
Método da jarra	%Matéria Orgânica	0,3	1,0	1,5	0,4	0,3
	%Areia	-	76,7	76,4	85,0	79,4
	%Silte	-	11,1	14,5	11,3	6,3
	%Argila	-	12,2	9,1	3,8	14,3
	Limite	5% - 20%				
	%Argila + Silte	-	23,3	23,6	15,0	20,6
	Limite	10% - 35%				

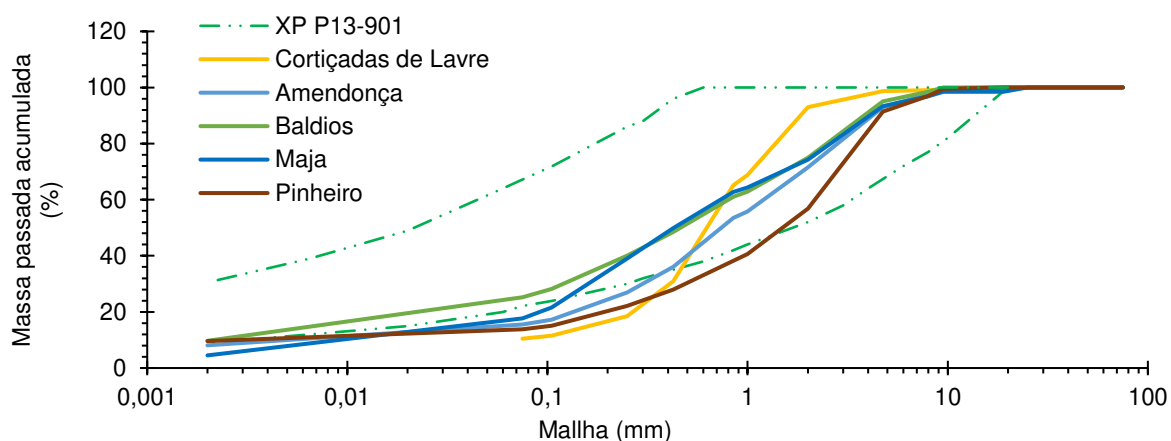


Figura 3.6 - Comparação das análises granulométricas com o fuso granulométrico

Apesar das restantes terras também apresentarem valores que cumprem os limites referidos, apresentam, em geral, menor teor de finos, realçando-se as suas características mais arenosas, pouco adequadas à produção de BTC, em especial quando não estabilizados.

O solo Maia, pelo seu baixo teor de argila, apenas se torna viável para a incorporação de elevadas quantidades de estabilizante. As restantes terras apresentam valores superiores a 8%, o que de acordo com a norma WD-ARS 1333 (2018) é considerado como adequado.

Relativamente aos limites de consistência, o limite de liquidez para Baldios foi ligeiramente inferior ao recomendado na literatura (Delgado & Guerrero, 2007; WD-ARS 1333, 2018) (LL = 25%). Contudo, o limite de plasticidade encontra-se dentro do intervalo sugerido (2% - 20%). Amendonça apresenta valores ligeiramente mais elevados do limite de liquidez e do índice de plasticidade, dentro da gama mais adequada à produção de BTC. Porém, a curva granulométrica e o teor total de finos é menos favorável.

Note-se que o solo “Cortiçadas de Lavre” foi o primeiro a ser eliminado do estudo, pois apresentava uma percentagem de silte + argila de apenas 10,5% e um limite de liquidez inferior a 20%, pouco recomendados à produção de BTC.

Os vários solos apresentaram valores aceitáveis de TOA, enquadrados no recomendado na literatura (Tabela 3.10). Porém, Baldios foi o solo que apresentou menor exigência de água (TOA = 10,9%) para valores máximos de compacidade. Em relação aos teores de matéria orgânica, todos os solos apresentam valores inferiores a 2% (HB 195, 2002).

Pelas razões enumeradas Baldios afigurou-se como o solo mais adequado à produção dos BTC. Contudo, visto que as terras de Amendonça e Maia apresentaram também características razoáveis para a produção de blocos, optou-se por realizar uma campanha experimental preliminar, de modo a confirmar o melhor solo a utilizar nos BTC (estudo prévio apresentado em 4.1).

3.3 Caracterização dos agregados reciclados

Para o presente trabalho optou-se pela utilização de três tipos de agregados reciclados, dois provenientes de RCD e um proveniente da separação do RCC (HQRS, ver 3.4.3.). Os agregados provenientes de RCD foram adquiridos a duas empresas de gestão de resíduos, um deles obtido através de resíduos de construção e demolição de natureza variada (RCD1), cedido pela empresa Vimajas, e outro obtido da britagem de elementos de betão de composição desconhecida (RCD2), fornecido pela empresa ZIRCOM. Estes resíduos foram selecionados entre outros provenientes de outras empresas, devido ao facto de apresentarem granulometria mais compatível com a produção de BTC, com dimensão máxima inferior a 4,75 mm.

Neste subcapítulo apresenta-se a caracterização dos agregados reciclados utilizados, nomeadamente através de ensaios de granulometria e massa volúmica. Para o RCD1 foi ainda determinada a sua composição aproximada, de acordo com a norma EN 933-11 (2009).

3.3.1 HQRS

A areia reciclada de alta qualidade (HQRS) foi obtida através do processo de separação desenvolvido e patenteado no âmbito do projeto EcoHdyb (2022), cuja descrição detalhada se apresenta em Bogas et al. (2021). Basicamente, aproveitando as diferentes propriedades magnéticas dos constituintes do betão, o método permite a obtenção de fração de pasta de maior pureza e areia reciclada de melhor qualidade, associada a menor quantidade de pasta aderida.

Após britagem e moagem do betão de modo a este apresentar granulometria inferior a 1 mm, procede-se à divisão do resíduo nas frações 150–250 µm, 250–500 µm e 500–1000 µm. A divisão em diferentes frações (Hu, 2019) permite uma melhor eficiência do método, visto que as forças de separação magnética são menos afetadas por variações de geometria e forças de gravidade entre partículas. O método tem o máximo da sua eficiência na região 150-500 µm, descartando-se o material fora desta gama. Para o presente trabalho considerou-se apenas a fração de 250-500 µm, visto ter-se demonstrado que para esta fração pode ser dispensado o pré-tratamento de lavagem e secagem do material (Cyrne 2022). Após a separação magnética obtém-se uma fração de pasta de maior pureza (utilizada na produção de RCC) e uma areia reciclada com 2500 kg/m³ de massa volúmica e apenas 2% de absorção, determinado conforme descrito em 3.3.2.

3.3.2 Resíduos da construção e demolição

Como referido, o RCD1 é constituído por diversos materiais de construção, tendo-se recorrido à norma EN 933-11 (2009) para estimar a sua composição. Para tal, selecionou-se uma amostra de aproximadamente 1800 g, que foi colocada em estufa a 40°C até massa constante. Em seguida, a amostra retida entre 4 e 63 mm foi sujeita a lavagem através do peneiro de 0,063 mm, de forma a eliminar o material muito fino aderido às partículas de maior dimensão. Posteriormente, submergiu-se a amostra para retirar as partículas flutuantes. Estas partículas foram colocadas dentro de uma proveta graduada de volume conhecido de modo a determinar o volume de água deslocado. Após esta etapa, as partículas flutuantes foram secas em estufa a 110 °C até massa constante. As restantes partículas foram pesadas e separadas manualmente de acordo com as categorias definidas na norma EN 933-11 (2009). Considerou-se 4 categorias: material cerâmico (Rb), betão e argamassas (Rc), material betuminoso (Ra) e pedra natural (Ru). As quantidades de constituintes como vidro, madeira, plásticos e metais não foram significativas. Na Tabela 3.11 resume-se a composição determinada para o RCD1.

Tabela 3.11 - Classificação dos constituintes do RCD1

Constituinte	Rc	Ru	Rb	Ra	Rg	Outros
Massa (g)	38,4	30,6	15,7	3,1	-	7,1
Proporção (%)	40,3	32,1	16,5	3,3	<0,5	7,4

A análise granulométrica do RCD1 e RCD2 foi determinada segundo a norma EN 12620 (2013). Inicialmente selecionou-se uma amostra de 1 kg, representativa do agregado em análise, onde a máxima dimensão das partículas era 4,75 mm. A amostra foi colocada em estufa ventilada a 110°C até massa constante e registou-se o seu valor. Seguidamente, sujeitou-se o material a peneiração mecânica através de uma série de peneiros composta por peneiros de malha quadrada normalizada com as seguintes aberturas: 8,00 mm; 6,30 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,5 mm; 0,25mm. As curvas granulométricas do RCD1 e RCD2 são apresentadas na Figura 3.7.

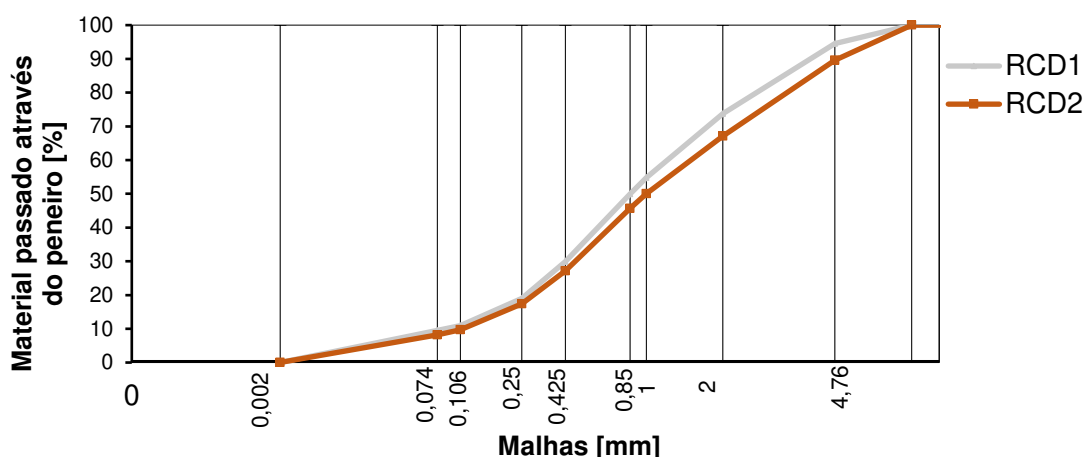


Figura 3.7 - Curvas granulométricas dos agregados reciclados

A massa volúmica das partículas foi determinada segundo a norma NP EN 1097-6 (2016), recorrendo ao seguinte material: picnómetro de 1 L; pilão metálico; molde troncocónico; peneiros de abertura 4,0 e 0,063 mm; pistola de ar quente. Começou-se por lavar 1 kg de agregado sobre os peneiros de 4 e 0,063mm, que em seguida foi seco em estufa ventilada a 110°C até massa constante. Seguidamente, a amostra foi colocada no picnómetro enchendo-o com água e agitando-o para que o ar aprisionado se libertasse. Após este passo, o nível de água foi corrigido até à marca de referência deixando o material absorver água por, pelo menos, 24h, até atingir o estado saturado. Findo este período, corrigiu-se o nível de água até à marca de referência e registou-se a massa M_2 . Em seguida começa-se por decantar a maior parte da água e coloca-se a amostra num tabuleiro metálico para proceder à sua secagem recorrendo a uma pistola de ar quente até que a superfície da amostra estivesse seca, registando-se a massa da amostra saturada com superfície seca (M_1). Para a confirmação do estado seco da superfície da amostra foi compactada uma porção da amostra num molde troncocónico, com 25 pancadas, considerando-se que, para superfície seca a amostra desmoldada perde a sua forma. Concluindo este teste, levou-se a amostra à estufa ventilada até massa constante, e registou-se o valor de M_4 . A massa M_3 corresponde à massa do picnómetro cheio apenas com água.

Para o cálculo da massa volúmica (ρ_s) e da absorção após 24h (WA_{24}) recorreu-se às Equações (3) e (4) respetivamente. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 3.12.

$$\rho_s = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \text{ [kg/cm}^3\text{]} \quad (3)$$

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \text{ [%]} \quad (4)$$

Tabela 3.12 - Valores de massa volúmica e absorção de água dos AR

	RCD1	RCD2
ρ_s [kg/cm ³]	2307	1961
WA_{24} [%]	4,8	10,5

Tendo em consideração os resultados apresentados opta-se por pré-selecionar o agregado RCD1 em detrimento do RCD2. Por um lado, o RCD1 apresenta cerca de metade da absorção do RCD2, reduzindo a exigência de água e facilitando o controlo das propriedades da mesma no estado fresco. Por outro lado, a curva granulométrica do RCD1 é mais extensa e mais grosseira, o que permite uma melhor complementaridade às curvas granulométricas dos solos, com défice de partículas de dimensão superior a 1 mm. Acresce ainda que o RCD1 representa de melhor forma os RCD disponíveis nas gestoras de resíduos, uma vez que é um resíduo de natureza variada consequente de atividades de demolição correntes na construção.

Contudo, a escolha em definitivo do agregado reciclado a utilizar apenas se concretizou após a realização do estudo prévio descrito em 4.1.

3.4 Caracterização dos estabilizantes

Nas secções em seguida apresentam-se as principais características dos materiais utilizados para a estabilização dos BTC, nomeadamente o cimento Portland (CP), o cimento reciclado de pasta (RCP) e o cimento reciclado de betão (RCC).

3.4.1 Cimento Portland

No presente estudo foram utilizados dois tipos de cimento Portland: Cimento tipo I 42,5 R (CEM I 42,5R) e um cimento composto comercial, tipo II, com incorporação de 21-35% de filler calcário (CEM II/B-L 32,5). O CEM II/B-L 32,5 apenas foi utilizado numa mistura de BTC, de forma a atingir uma solução mais económica e de menor impacto ambiental, em linha com aquilo que são as exigências da construção em terra. Por sua vez, o CEM I 42,5 R foi integrado tanto na estabilização dos BTC como na produção da pasta e betão de origem sujeitos a reciclagem. O cimento de referência utilizado foi o CEM I 42,5, uma vez que se conhece melhor a sua composição e que apresenta menor variabilidade entre lotes de fabrico. As principais características destes cimentos apresentam-se na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Características dos ligantes utilizados

Parâmetros	CEM I/425,5 R	CEM II/B-L 32,5 N
Massa volúmica (g/cm ³)	3,0	~3,0
Resistência à compressão 28dias (MPa)	53,3	52,5 ≥ f _{ck} ≥ 32,5
Exigência de água (a/l)	0,3	-
Expansibilidade (mm)	≤ 10	≤ 10
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	38,8 + 5,1 + 2,9	-
CaO + MgO (%)	60,5 + 1,8	-
CaO livre (%)	1,0	-
Pasta de consistência normal	0,3	
Tempo de presa (min.)	Inicial	190
	Final	310
		≥ 75

Para o CEM I 42,5 R foram realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica, tendo estes dados sido disponibilizados pela empresa SECIL. Relativamente ao CEM II/B-L 32,5 N, apenas foram disponibilizados os valores constantes no Anexo A11. Foi ainda realizada uma análise termogravimétrica (TG) de forma a estimar o teor de filler destes cimentos. Para a realização deste

ensaio recorreu-se ao equipamento *Hitachi Nexta STA* e a amostras de cerca de 10 mg. Os ensaios foram realizados a uma taxa de 15 °C/minuto, entre os 20°C e os 950°C, em atmosfera de azoto. Na Figura 3.8 resumem-se as curvas de TG obtidas para cada um dos cimentos utilizados. A existência de uma perda de massa na região acima de 600°C permite inferir o teor de material carbonatado na amostra, sob a forma de dolomite ou calcário. Desta forma, estima-se que o teor de fíler calcário nos cimentos CEM I 42,5 e CEM II B/L 32,5 foi de 3 % e 31 %, respetivamente.

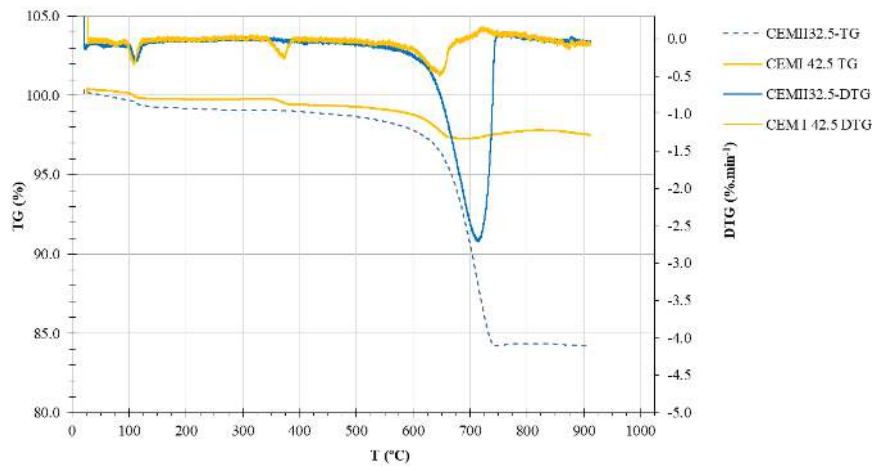


Figura 3.8 - Análise termogravimétrica dos cimentos CEM II/B-L 32,5 e CEM I 42,5

3.4.2 Cimento reciclado

Para a produção do cimento reciclado foi inicialmente necessário produzir pasta e betão de origem, de onde se extraiu a fração de pasta que serviu de matéria-prima a este ligante. Em seguida, procedeu-se à termoativação dos resíduos produzidos, obtendo-se o RCP e RCC.

3.4.2.1 Pasta e betão de origem

Para o presente trabalho optou-se por considerar betões e pastas de origem com relação a/l de 0,55, considerando-se ser representativo de resíduos de betão existentes. Acrescente-se que Carriço et al. (2020) verificaram que as características do cimento reciclado não foram afetadas significativamente pela relação a/l, pelo menos na gama 0,35 a 0,55. Na produção da pasta e betão de origem foi utilizado o CEM I 42.5 R indicado em 3.4.1.

A pasta de origem foi produzida de acordo com a metodologia definida em estudos anteriores realizados no IST (Carvalho, 2020; D. Leal, 2021; Real et al., 2020), tendo-se efetuado amassaduras de 25 litros, com recurso a um berbequim misturador. A produção do betão de origem recorreu a uma misturadora de eixo vertical e descarga de fundo, com capacidade de 80 litros. Neste caso, começou-se por colocar os agregados por ordem decrescente de dimensão média das partículas (brita 2, brita 1, bago de arroz, areia grossa e areia fina) e cerca de 50% da água de mistura, misturando-se por cerca de 2 minutos. Em seguida, após cerca de 1 minuto de repouso, misturou-se mais 2 minutos. Findo este passo adicionou-se o cimento e a restante água da mistura, misturando-se mais 4 minutos.

O betão foi moldado em provetes de 300 x 150 x 150 mm, recorrendo-se a vibração mecânica para a sua adequada compactação. Já as pastas foram moldadas em provetes cúbicos de 15 cm de lado e sem necessidade de compactação mecânica, devido à sua elevada fluidez.

Os provetes foram desmoldados após 24h sendo sujeitos a dois métodos de cura diferentes. Os provetes a ensaiar mecanicamente foram sujeitos a cura húmida (humidade relativa superior a 95%) e os restantes destinados à produção de cimento reciclado, foram colocados em ambiente exterior por 120 dias, havendo o cuidado de humedecer periodicamente a sua superfície durante os 15 dias iniciais. O objetivo deste passo era a obtenção de betões suficientemente hidratados que pudessem replicar detritos de betões antigos.

A massa volúmica fresca e a resistência à compressão aos 28 dias da pasta e betão de origem foram determinadas de acordo com as normas NP EN12350-6 (2009) e NP EN12390-3 (2011), respetivamente. Os valores médios resultantes de 3 provetes foram de 2415 kg/m³ e 1734 kg/m³ e 47,3 MPa e 35.6 MPa para o betão e pasta de origem, respetivamente.

3.4.2.2 Cimento reciclado de pasta

Após 120 dias procede-se à britagem dos provetes com recurso a uma britadeira de maxilas. Nesta etapa, o objetivo passa por diminuir o tamanho das partículas para dimensões inferiores a cerca de 70 mm. Em seguida, e com o intuito de reduzir a dimensão das partículas, os detritos foram sujeitos a uma segunda passagem por uma britadeira de maxilas de menor abertura (Figura 3.9a), a que se seguiu duas passagens em moinho de rolos (Figura 3.9b).

Visto que a granulometria do resíduo de pasta ainda é grosseira (até cerca de 1-2mm de dimensão máxima), é necessário proceder a moagem adicional em moinho horizontal de bolas (Figura 3.9d). Para isso recorreu-se a 515 esferas de aço de diâmetros entre 20 mm e 30 mm. Dentro do moído, pode ser colocado, no máximo, 15 kg de material previamente seco que é moído durante cerca de 2 h. Para evitar a aglomeração de partículas, o material é seco previamente a 100°C durante 24 h e recorre-se à utilização de um aditivo de moagem (0,2% da massa do material colocada no moinho).

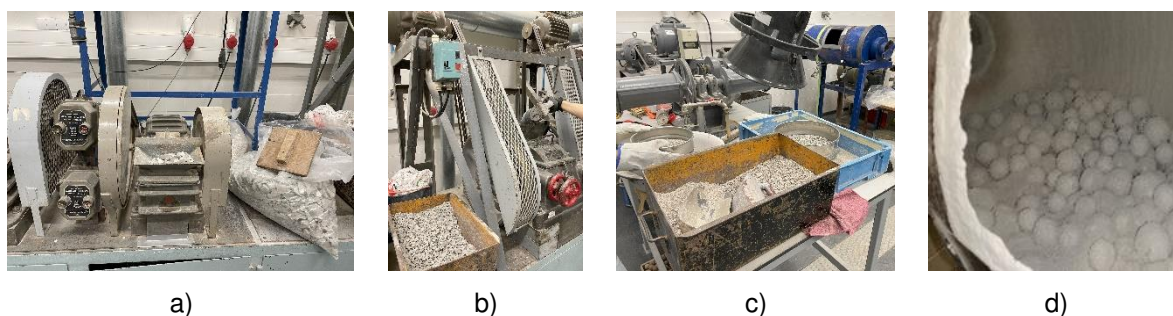


Figura 3.9 - Produção do cimento reciclado; a) britagem; b) moagem em moinho de rolos; c) crivagem para obtenção de RCC d) moagem em moinho de bolas horizontal

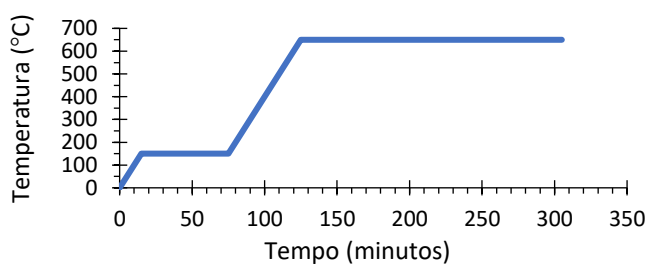
Após o processo de moagem no moinho de bolas, duas amostras de material foram peneiradas no peneiro de 250 µm de modo a avaliar a finura do material. Observou-se que o material retido neste peneiro foi inferior a 2%, concluindo-se que foi possível atingir um nível de moagem aceitável e em linha com o realizado em outros trabalhos (Carvalho, 2020; Leal, 2021; Real et al., 2020).

Finalmente, o resíduo de pasta foi sujeito a termoativação, de modo a recuperar a sua capacidade de reidratação. Tendo por base o trabalho desenvolvido por Real et al. (2020), processo de

termoativação seguiu a curva indicada na Figura 3.10b, para um estágio de temperatura máxima de 650°C durante 3h. O cimento reciclado começou por ser caracterizado em termos de massa volúmica, exigência de água e teor de cal livre. A massa volúmica foi determinada através de picnómetro de hélio, realizado na Universidade de Aveiro. Para a determinação do teor de cal livre seguiu-se um procedimento interno, tendo por base as normas EN 1015-6 (1998) e EN 196-3 (2016). Tal como observado na Tabela 3.14 o RCP apresenta uma elevada exigência de água e teor de cal livre quando comparado com o CP (Tabela 3.13). A maior exigência de água, também foi notada por outros autores, sendo associada à elevada porosidade do RCP e à sua elevada área superficial, cerca de 9 vezes superior à do CN (Bogas et al., 2022; Carriço et al., 2022; Carriço, Real, et al., 2020). É possível observar que o início de presa do RCP foi cerca de 76% superior ao CP, fator relacionado com o atraso no desenvolvimento do α' -C₂S até 1 dia de idade (Bogas et al., 2022).



a)



b)

Figura 3.10 - Termoativação; a) forno rotativo da Thermolab Scientific Equipments para termoativação; b) curva de termoativação do cimento

Tabela 3.14 - Propriedades físicas e mecânicas do RCP

Parâmetro	Pasta de consistência normal (a/l)	Tempo de presa		Massa volúmica (g/cm ³)	Cal livre (%)
		Início	Fim		
RCP	0,67	335	465	3,0	17,9

Recorrendo a ensaios de termogravimetria foi analisado o nível de hidratação da pasta antes da sua termoativação, bem como o nível de pré-hidratação e pré-carbonatação do cimento reciclado na altura da sua utilização. Para isso, recorreu-se à termobalança referida em 3.4.1. em que as amostras foram ensaiadas em atmosfera de azoto para uma taxa de temperatura de 15 °C/minuto entre os 20 °C e os 950 °C. Na Figura 3.11 apresentam-se as curvas de termogravimetria (TG) e derivada da TG (DTG) para o resíduo de pasta de cimento, antes (CW) e após termoativação (RCP). Através desta análise, é possível distinguir 3 grandes regiões de perda de massa (Angulo et al., 2015; Lothenbach et al., 2018; Real et al., 2020b) associadas a: desidratação dos produtos de hidratação do cimento (fases aluminadas e silicatadas) até cerca de 400-500°C (Ldh); desidroxilação do hidróxido de cálcio, Ca(OH)², entre 400-550°C (Ldx); fase de descarbonatação, essencialmente acima de 600°C (Ldc).

Deste ensaio avaliaram-se os parâmetros: W_b – teor de água combinada não evaporada, que resulta da soma de Ldh com Ldx; CH – quantidade de hidróxido de cálcio livre; α – grau de hidratação do material; CaCO₃ – teor de material carbonatado na amostra (calcite). O grau de hidratação inicial da amostra resulta do quociente entre W_b e W_N , em que este último parâmetro traduz o teor de água

necessário para hidratar completamente o cimento (Monteagudo et al., 2014). De acordo com Neville (1995), assumiu-se W_N igual a 0,23. Na Tabela 3.15 resumem-se os valores obtidos para o CW e RCP.

Por observação da Tabela 3.15, o CW atingiu um valor de α de 73%, o que significa que os detritos de pasta antes de serem reciclados apresentavam um elevado grau de hidratação. Por sua vez, o RCP apresentou um valor de α de 18%, indicativo da ocorrência de pré-hidratação após termoativação. Um fenômeno semelhante foi documentado por Real et al. (2020), tendo sido atribuído à elevada rapidez na reidratação da cal livre durante o arrefecimento e armazenamento do CR, confirmado pelo elevado teor de CH (11,1%) no RCP. Apesar disso, o valor de Ldh foi bastante baixo (0,48%), o que denota que não ocorreu reidratação significativa dos silicatos e aluminatos de cálcio. Realça-se ainda que, durante as etapas de britagem, moagem, termoativação e armazenamento do CW se observa um ligeiro aumento do teor de material carbonatado no RCP (cerca de 2,2% face ao CW).

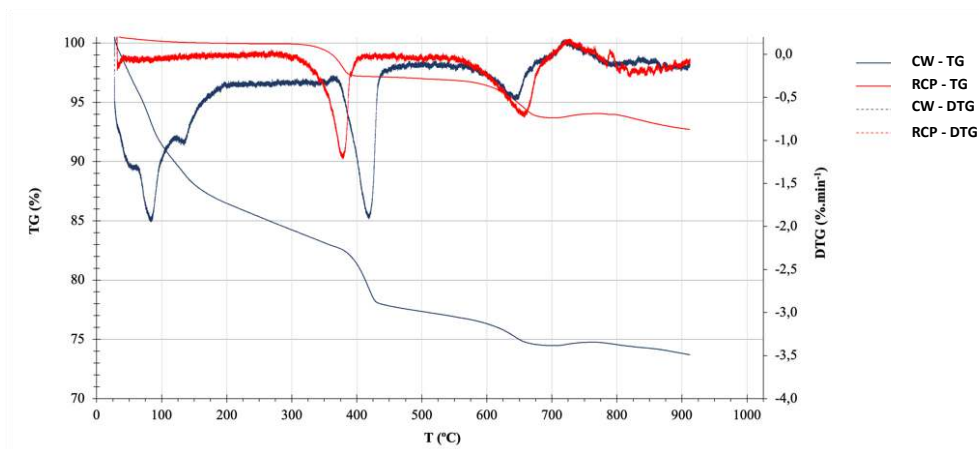


Figura 3.11 - Curvas termogravimétricas do resíduo de pasta (CW) e do RCP

Tabela 3.15 - Resultados do ensaio de termogravimetria

Mistura	Ldh (%)	Ldx (%)	Ldc (%)	W_b (%)	α (%)	CH (%)	CaCO ₃ (%)
CW	12,7	3,6	3,2	0,2	72,9	14,8	7,3
RCP	0,5	2,7	4,2	0,04	17,6	11,1	9,5

Foi também analisada a capacidade de reidratação do cimento reciclado quando inserido em argamassas. As argamassas foram caracterizadas no estado fresco (espalhamento e massa volúmica) e em termos de resistência mecânica à flexão e compressão. Em paralelo, foi também produzida uma argamassa de referência de igual a/l, mas com CP. Desta forma, é possível analisar a eficiência do RCP antes da sua incorporação nos BTC. Devido à elevada exigência de água do RCP, foi necessário adicionar cerca de 2% de superplastificante à argamassa produzida com este ligante (em % de massa de cimento). Após ensaios preliminares, fixou-se a relação a/l em 0,67 e o traço em 1:3, o que permitiu alcançar argamassas com um valor mínimo de espalhamento de cerca de 140 mm. Para a realização do ensaio de espalhamento recorreu-se à norma EN 1015-3 (1999). Observa-se que, para a mesma relação a/l, a argamassa com CP atingiu consistência fluída, o que confirma a elevada exigência de água do RCP.

A massa volúmica fresca foi determinada de acordo com a norma EN 1015-6 (1998), fazendo uso de um recipiente de 1 litro. A massa volúmica fresca da argamassa de RCP foi ligeiramente inferior à de CP, essencialmente atribuído ao aumento do volume de vazios resultante da sua menor trabalhabilidade (Tabela 3.16). Após produção e caracterização das argamassas no estado fresco, produziram-se 6 moldes de 160 x 40 x 40 mm, por composição. A argamassa com RCP foi compactada segundo o procedimento descrito na norma EN 196-1 (2016). Para este processo fez-se uso de uma mesa de compactação onde se colocou a argamassa em duas camadas sujeitas a 60 pancadas cada. Devido à consistência fluída da argamassa de CP, esta não foi sujeita a compactação mecânica. Após 24h, os provetes foram desmoldados e curados em câmara húmida até à idade de ensaio (3 e 28 dias). Para a realização dos ensaios de resistência mecânica fez-se uso da prensa *Form+ testSeidner 505/200/10DM1*. Os provetes foram ensaiados à tração de onde resultam duas metades que foram posteriormente ensaiadas à compressão. A realização destes ensaios, seguiu a norma EN 1015-11 (2019), para uma taxa de carregamento de cerca de 0,2 – 0,4 MPa/s.

Na Tabela 3.16 resumem-se os resultados de resistência mecânica para ambas as argamassas. A resistência à compressão aos 3 e 28 dias da argamassa com RCP foi 25% e 46% inferior à da argamassa com CP, respetivamente. Esta diminuição foi mais elevada que a apresentada por outros autores (Cariço, Real, et al., 2020; Real et al., 2020b). Estes dados mostram que o RCP produzido neste trabalho terá sido menos efetivo, o que pode ser justificado pela ocorrência de pré-hidratação do RCP, pelo elevado teor de ar com que se produziu a argamassa de RCP e pela granulometria grosseira do ligante. A maior proximidade de valores entre o RCP e o CP aos 3 dias de idade, quando comparado com os resultados aos 28 dias, resulta da maior reatividade do α' -C₂S no RCP entre 1 e 3 dias de idade (Bogas et al., 2022).

Tabela 3.16 - Propriedades no estado fresco e resistência mecânica de argamassas com a/l 0,67 produzidas com RCP ou CP

Norma	Parâmetro	CP	RCP	
EN 1015-3	Espalhamento (mm)	201	145	
EN 1015-6	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	2127	2029	
EN 1015-6	Teor teórico de vazios (%)	2,8	7,2	
EN 1015-11	Resistência à compressão (MPa)	3 dias	22,4	16,8
		28 dias	37,0	19,9
	Resistência à flexão (MPa)	3 dias	4,6	3,8
		28 dias	8,3	5,6

3.4.2.3 Cimento reciclado de betão

O cimento reciclado resultante da fração de pasta de betão foi obtido por um processo similar ao descrito em 3.4.2.2., diferindo deste apenas pelo facto de incluir uma etapa adicional de separação dos constituintes de betão. Neste caso, os resíduos britados de betão são crivados no peneiro de 1 mm, seguindo para o moinho de rolos apenas as partículas de dimensão superior (Figura 3.9c). O resíduo passou no moinho de rolos as vezes necessárias até que a quantidade de partículas superiores a 1 mm fosse inferior a 20%.

Em seguida, todo o material inferior a 1 mm foi crivado em diferentes frações: <125 µm; 150-250 µm; 250–500 µm; 500–1000 µm. Apenas as frações intermédias entre 125 µm e 500 µm foram

utilizadas. Estas partículas foram, posteriormente, sujeitas a um processo de separação magnética de modo a separar o agregado da pasta de cimento (Figura 3.12, Hu, 2019). Como referido em 3.3.1, para além de fração de cimento de maior pureza, é possível obter uma areia reciclada de alta qualidade (HQRS).

Tal como descrito em 3.4.2.2, após separação da fração cimentícia, esta é sujeita a moagem em moinho de bolas e finalmente termoativada para se obter o RCC.

O grau de contaminação do CW por agregado foi analisado com recurso a ensaios de perda de massa em mufla. Neste caso, foi analisada a perda de massa entre 150 - 350°C em amostras de CW e amostras de referência com resíduo proveniente da pasta de igual a/l, de 0,55. Deste estudo foi possível estimar um nível de pureza de 72%, em percentagem de massa, inferior ao reportado em outros trabalhos realizados no IST, cuja pureza foi superior a 75 - 80% (Fortes, 2022; Hu, 2019; Cyrne, 2022). Isso resulta do facto da separação ter sido realizada sem recurso a lavagem prévia dos resíduos de betão. Conforme constatado em Sousa & Bogas (2021) a realização deste tratamento térmico tem um elevado impacto ambiental e deve ser evitado. Tendo em conta que durante a termoativação a perda de massa de uma pasta de a/c de 0,55 é cerca de 18% (Carvalho, 2020), é possível estimar um grau de pureza final para o RCC de cerca de 68% em massa. Por outras palavras, o RCC apresentou-se contaminado por cerca de 32% em massa de agregado.

Para a massa volúmica do RCC foi considerado o valor de 2960 kg/m³, tendo em consideração Real et al. (2021)



Figura 3.12 - - Equipamento para separação magnética

3.5 Produção dos BTC

Nesta secção descreve-se o processo de produção dos BTC, incluindo as fases de formulação, composição, mistura, moldagem e cura dos blocos. Para o processo de produção, o projeto de investigação em que este trabalho se insere contou com o apoio logístico e a cedência de espaço e de equipamento por parte da Associação Cultural de Arte e Comunicação das Oficinas do Convento de Montemor.

3.5.1 Composição dos BTC

Na Tabela 3.17 resumem-se as composições consideradas para a realização deste trabalho. Para a designação das misturas foi definido o seguinte critério: o primeiro número refere o teor de ligante (8% ou 12%); a sigla seguinte refere-se ao tipo de ligante (CP, RCP e RCC); “CP” e “CP32,5” refere-se aos BTC estabilizados com CEM I/42,5R e CEM II/B-L 32,5, respetivamente; a sigla “NE” aparece

quando o bloco não foi estabilizado; segue-se o teor de RCD utilizado (15%, 25% e 35%), seguido do tipo de AR reciclado utilizado (RCD ou HQRS). Quando não aparece RCD ou HQRS na designação significa que estes materiais não foram utilizados na produção dos BTC.

O teor de ligante utilizado nas misturas foi definido em percentagem de solo seco e tem por base valores usuais considerados para a produção de BTC (Silva, 2015; HB-195, 2002; CRATerre, 1998). O documento HB-195 (2002) recomenda teores de cimento entre 4% e 10%, assumindo um ganho crescimento de desempenho com o aumento do teor de ligante. No presente trabalho optou-se por considerar o valor de referência de 8%, ligeiramente inferior ao adotado por Azevedo (2021), num estudo anterior realizado no IST. Valores limite de 5% de estabilizante, para maximização da sustentabilidade da mistura, foram analisados num estudo de mestrado paralelo ao presente trabalho, também realizado no âmbito do Eco+RCEB. Finalmente, visto que o RCC apresenta uma percentagem de contaminação de agregado de 32% (3.4.2.3), optou-se por considerar uma mistura adicional com RCC, em que o teor de ligante foi incrementado para 12%. Desse modo, garante-se que o teor efetivo de cimento reciclado era de cerca de 8% ($12\% \cdot 0.68$).

O teor de RCD utilizado como referência foi estabelecido com base no estudo prévio apresentado em 4.1, sendo de 25%. Este valor é determinado em percentagem de massa de terra seca (solo+RCD). Nos BTC com CP foi analisada a influência do teor de RCD, considerando-se ainda composições com 0 e 15% deste material.

Para este trabalho, optou-se por proceder à substituição direta de solo por RCD ou por HQRS, sem garantir condições idênticas de granulometria. Isso significa que a substituição parcial de solo por agregados reciclados (AR) pode afetar o desempenho dos BTC, não apenas pela diferença de características do próprio AR, mas também derivado das diferenças introduzidas na distribuição granulométrica das misturas, com consequências na compacidade granular.

Relativamente à quantidade de água a utilizar, esta começou por ser definida com base nos valores obtidos no estudo prévio, em 4.1. No entanto, este método foi abandonado por se ter percebido que se obtinha BTC de melhor qualidade caso se reduzisse o teor de água das misturas, mais perto do TOA determinado em 3.2.6. A quantidade de água a adicionar à mistura foi determinada tendo por base o teor de humidade do solo e do RCD, obtidas com recurso a um humidímetro, bem como a água de absorção dos RCD (3.3.2). O teor de água (TW) foi definido em percentagem de massa dos materiais sólidos (solo + RCD + estabilizante).

No presente trabalho foram consideradas misturas de CP e CR com diferente TW, pois, como referido, o CR apresenta mais do dobro da exigência de água do CP (3.4.2). Assim, optou-se por definir as misturas de BTC tendo em conta idêntico TW ou condições semelhantes de aplicabilidade (TW superior nos BTC com CR do que com CP). Para condições ótimas de aplicabilidade, os BTC com CP e CR foram produzidos com TW de 14% e 20%, respetivamente. Para os BTC com RCP foram também previstas misturas com 14% TW, de modo a permitir uma comparação direta com os BTC de referência com CP, de igual teor em água. Os BTC não estabilizados (NE) foram produzidos apenas com o teor em água mais adequado à sua melhor aplicabilidade (TW=12%, mais próximo do TOA determinado para o solo *Baldios*, que não teve em consideração a incorporação adicional de RCD).

Na Tabela 3.17 são estimadas as composições das misturas por m³, com base nos valores de massa volúmica fresca dos BTC, determinada imediatamente após a moldagem dos blocos (ver 4.2). Na mesma tabela é também apresentada a massa total de água da mistura (M_{água,T}) e a massa de água efetiva da mistura (M_{água,ef}), que corresponde à massa total de água da mistura subtraída da massa de água de absorção do solo e do RCD. Por fim, na última coluna é apresentada uma estimativa da porosidade total dos BTC (P_T), tendo em consideração a sua composição e massa volúmica fresca, bem como a redução de vazios devido à hidratação do estabilizante. Este parâmetro tenciona quantificar o teor de vazios após compactação somado dos vazios resultantes da evaporação da água. A água de evaporação corresponde à massa de água total descontada da água de hidratação do ligante.

Tabela 3.17 - Composição do BTC e porosidade estimada

Mistura	Est. (%)	TW (%)	M _{solo} (kg/m ³)	M _{RCD} (kg/m ³)	M _{HQRS} (kg/m ³)	M _{CP} (kg/m ³)	M _{RCP} (kg/m ³)	M _{RCC} (kg/m ³)	M _{água,T} (kg/m ³)	M _{ságua,ef} (kg/m ³)	P _t (%)
8CP25RCD	8	14	1317	443	0	145	0	0	322	276	27,7
8CP15RCD	8	14	1468	262	0	142	0	0	318	278	29,4
8CP	8	14	1735	0	0	142	0	0	312	278	29,8
8CP32,5_25RCD	8	14	1266	418	0	139	0	0	317	274	30,9
8CP25HQRS	8	14	1293	0	441	142	0	0	311	276	29,3
8RCP25RCD	8	20	1146	386	0	0	126	0	382	342	37,1
8RCP25RCD14TW	8	14	1225	412	0	0	135	0	299	257	32,8
8RCP25HQRS	8	14	1175	0	402	0	130	0	289	258	35,6
8RCC	8	20	1611	0	0	0	0	131	387	355	34,6
20RCC80CP25RCD	8	20	1208	399	0	105	0	26	391	350	34,0
50RCC50CP25RCD	8	20	1208	399	0	66	0	66	391	350	33,9
8RCC25RCD	8	20	1191	390	0	0	0	130	389	349	34,9
12RCC25RCD	12	14	1142	360	0	0	0	210	367	329	34,0
NE25RCD	0	12	1365	454	0	0	0	0	280	234	32,3

3.5.2 Preparação do solo e RCD

A preparação do solo envolveu a sua pulverização e peneiração. O processo de pulverização permite desagregar os torrões de terra, aumentando a superfície de solo em contacto com o estabilizante e libertando partículas de argila oclusas. O objetivo da peneiração passa por limitar a dimensão máxima das partículas a 8 mm, melhorando a coesão e a qualidade de acabamento dos blocos. Inicialmente, o solo foi pulverizado num equipamento de hélices rotativas, tendo sido sujeito a duas passagens (Figura 3.13a). Posteriormente, a peneiração foi realizada com recurso a um peneiro rotativo de malha quadrada com abertura de 8 mm (Figura 3.13b).

Pelo facto de se ter optado pelo RCD fornecido pela empresa Vimajas, de dimensão inferior a 8 mm, não foi necessário proceder a tratamentos adicionais de pulverização e crivagem. Para o caso

deste RCD em específico, apenas foi necessário corrigir as quantidades de água de modo a compensar o seu elevado valor de absorção.

3.5.3 Mistura, moldagem e cura dos BTC

Após a preparação do solo, segue-se a pesagem e mistura de todos os constituintes numa misturadora de eixo vertical com descarga de fundo. Contudo, para a utilização deste tipo de misturadora é necessário que a quantidade de material sólido seja, pelo menos, 50 kg, o que obrigou a que algumas amassaduras fossem realizadas directamente num carrinho-de-mão. Em ambos os cenários, começou-se por homogeneizar o solo e o RCD, juntando-se em seguida o ligante de forma faseada, e por fim a água de mistura.

Após a amassadura, seguiu-se o processo de moldagem e compactação dos blocos com recurso a uma prensa manual (Terstaram da Appro Techno) cedida pela Associação das Oficinas do Convento. Os blocos foram produzidos com 220x105x70 mm³. A mistura deve ser colocada nos pratos da prensa sem compactação manual (Figura 3.13c). Depois de se preencher os moldes, deve rasar-se a terra e calcar os quatro cantos de forma a garantir a integridade destes pontos de maior fragilidade. Visto que neste trabalho se recorreu a uma prensa manual, foi impossível garantir forças de compactação constante. Por essa razão, a altura dos blocos, inicialmente programada para 70 mm, variou entre 65 mm e 80 mm.

Depois de realizada a compactação, os blocos são desmoldados (Figura 3.13d) e transportados para paletes onde são cobertos por uma película de plástico humedecida. Esta película deve ser humedecida de forma periódica de modo a evitar uma secagem demasiado rápida dos blocos e facilitar a sua cura. Antes de serem cobertos, são pesados 3 blocos por cada composição por forma a estimar a massa volúmica fresca das misturas.

Ao fim de 3 dias de cura, os blocos foram transportados para o Laboratório de Engenharia Civil do IST onde se realizaram os vários ensaios de caracterização descritos em 3.6. No IST, 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 55-75%.



Figura 3.13 - Produção dos BTC; a) pulverização do solo b) peneiração do solo; c) colocação da mistura na prensa; d) desmoldagem dos blocos

3.6 Caracterização dos BTC

Para o presente estudo, os BTC foram caracterizados em termos das suas principais propriedades físicas e mecânicas de acordo com as normas apresentadas na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 - Normas e números de provetes ensaiados para caracterização de BTC

Ensaio	Norma	Número ¹	Idade de ensaio (dias)	Condição de cura ²
Compressão	EN 772-1 (2000)	3 - 6	28	LAB
Tração por flexão	EN 772-6 (2001)	6	28	LAB
Tração por compressão diametral	EN 12390-6 (2009)	4	28	LAB
Módulo de elasticidade	LNEC E 397 (1993)	2	>28d	LAB
Retração	LNEC E 398 (1998)	3	3-55	
Esclerómetro pendular	ASTM C805 NP EN 12504-2 (2003)	2	28	LAB
Ultrassons	NP EN 12504-4 (2007)	3 - 6	28	LAB
Abrasão	XP P13-901 (2001)	3	28	LAB
Porosidade total	EN 772-4 (1998)	1	-	LAB
Condutibilidade térmica	Método transiente modificado (Isomet 2114)	1	28	LAB
		1	28	OD
		1	28	SAT

Os provetes apresentavam dimensões médias de 220x105x70 mm³, excepto para o ensaio de porosidade, em que apenas foram ensaiados meios blocos (110x105x70). Note-se que apenas algumas das misturas foram sujeitas aos vários ensaios indicados na Tabela 3.18. Isso será salientado ao longo do trabalho, em função da propriedade analisada.

3.6.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada seguindo a norma EN 772-1 (2000), recorrendo-se à prensa hidráulica *Toni Pact* disponível no LC do IST, com capacidade de 3000 kN. Uma vez que esta prensa apresenta baixa sensibilidade para valores de força inferiores a 200 kN, foi necessário recorrer a uma célula de carga com capacidade de 400 kN, acoplada a um *data logger* Spider 8. A força máxima suportada pelo bloco foi determinada diretamente a partir da análise do gráfico força-tempo registado pelo software Catman Express.

Uma vez registada a dimensão e a massa do bloco, iniciaram-se os ensaios. Começou por se colocar a célula de carga sobre o prato inferior da prensa seguida de uma chapa metálica de forma a assegurar a distribuição uniforme da carga pela área do bloco e a reduzir o atrito entre os pratos da prensa e os blocos (Figura 3.14a). Para este ensaio, os blocos foram colocados segundo a maior área transversal (220x105 mm²), que corresponde à direção do seu leito de colocação. A taxa de carregamento foi de 4 kN/s.

Com recurso à Equação (5) é possível determinar a tensão máxima suportada pelo bloco em MPa. F representa a força máxima aplicada (N) e A a área de aplicação (mm²). Os resultados de cada mistura estão apresentados em 4.4.

¹ Número de provetes ensaiados por composição

² LAB – Ambiente de laboratório; SAT – Saturado; OD – Seco em estufa

$$f_c = \frac{F}{A} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

3.6.2 Resistência à tração por flexão

Tal como em 3.6.1 foi utilizada a prensa hidráulica Toni Pact, a célula de carga de 400 kN de força máxima e o *data logger* Spider 8. O ensaio foi realizado de acordo com a EN 772-6 (2001).

O ensaio inicia-se pela pesagem e medição de todos os blocos. Os blocos são assentes numa base metálica com dois apoios fixos distanciados de 108 cm e um varão metálico colocado entre a face superior do bloco e a parte superior da prensa, centrado no provete. Este varão tem o objetivo de transformar a carga distribuída exercida pela prensa numa carga pontual aplicada no centro do bloco (Figura 3.14b). Para este ensaio, fixou-se a taxa de carregamento em 0,1 kN/s, uma vez que o valor de resistência esperado era inferior a 10% da resistência à compressão. Com recurso à Equação (6) é possível determinar a resistência à tração por flexão do bloco. $f_{ct,r}$ corresponde à tensão máxima dada em MPa, F à força máxima suportada pelo bloco (N), b à largura do bloco (105 mm), h à altura (mm) e l à distância entre apoios (mm). Os resultados de cada mistura estão apresentados em 4.2.

$$f_{ct,r} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

3.6.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 12390-6 (2009), tendo-se utilizado a mesma célula de carga e o mesmo software de aquisição de dados mencionados em 3.6.1 e 3.6.2.

Após medição da geometria do bloco e registo da sua massa, este é colocado no engenho metálico indicado na Figura 3.14c. O engenho metálico é colocado sobre a célula de carga, seguido de uma chapa metálica para ajustar a altura do bloco. São ainda utilizadas duas ripas de madeira, uma na face superior e outra na face inferior do bloco, permitindo distribuir a carga ao longo do eixo longitudinal do BTC. Para a taxa de carregamento definiu-se 0,1 kN/s.

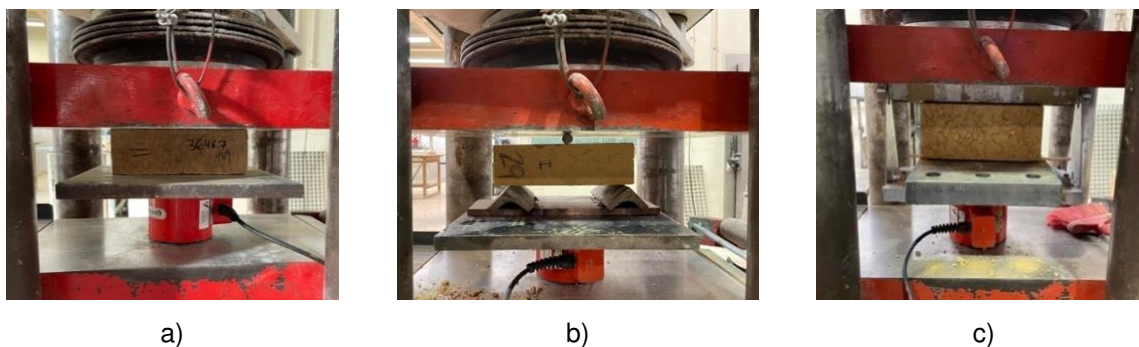


Figura 3.14 - Esquema de ensaio; a) Resistência à compressão; b) Resistência à tração por flexão; c) Resistência à tração por compressão diametral

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral recorreu-se à Equação (7). $f_{ct,sp}$ é a tensão máxima em MPa, F é a força máxima aplicada (N), l é o comprimento do bloco (220 mm) e h é a altura do bloco (mm).

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times h} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

3.6.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade estático foi determinado com recurso a vídeo-extensometria. Basicamente, o objetivo consiste em medir a variação da distância entre duas referências previamente marcadas nos blocos, enquanto este é submetido a carga. Para tal, uma das faces dos blocos foi pintada com uma tinta branca, sobre a qual se marcaram as referências a cor escura, materializado por uma grelha de 6 pontos, distanciados de determinado valor conhecido.

Foi utilizada uma prensa INSTROM com capacidade até 250 kN, tendo-se medido o módulo de elasticidade segundo a maior dimensão do bloco (colocado na vertical, Figura 3.15). Com auxílio de um data logger SPIDER 8, foram registadas as variações de deslocamento entre dois pontos selecionados de referência, bem como a evolução de carga no bloco. Para uma melhor precisão na aquisição de dados, os ensaios foram conduzidos na presença de um holofote.

Para a determinação do módulo de elasticidade impôs-se um mínimo de 3 ciclos de carga-descarga, para uma variação progressiva de carga entre 0,5 MPa e 1/3 da resistência à compressão do BTC. Esta resistência foi estimada a partir de ensaios prévios de compressão sobre provetes de BTC de igual composição. O módulo de elasticidade foi calculado a partir da Equação (8), em que σ_f e σ_i são as tensões finais e iniciais aplicadas entre cada ciclo e ε_f e ε_i as respetivas extensões correspondentes a essas tensões.

Este ensaio foi realizado em colaboração com outro colega de mestrado, que também desenvolveu em paralelo um trabalho no âmbito da caracterização mecânica de BTC



Figura 3.15 - Esquema de ensaio - Módulo de elasticidade

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} * 10^{-3} \text{ [GPa]} \quad (8)$$

3.6.5 Retração

Em alguns dos BTC analisados no trabalho foi medida a retração total ao longo do tempo, tendo por base a norma LNEC E-398 (1998). Os ensaios foram iniciados aos 4 dias de idade, após 3 dias de cura húmida, e prolongaram-se por um período de cerca de 50 dias. Durante a monitorização da retração, os BTC estiveram sujeitos a condições ambientais controladas de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ HR,

através de uma câmara meio-seca localizada no LC do IST. A retração foi medida diariamente nos 15 dias iniciais e de dois em dois dias até ao fim dos ensaios.

Após 24h de idade, na face de assentamento dos BTC foram colados discos metálicos distanciados diagonalmente de 200mm entre si (d_0 , Figura 3.16). A monitorização da retração (variação da distância entre pontos) foi realizada com recurso a um DEMEC Mitutoyo Absolute com 1 μm de precisão (Figura 3.16). As pastilhas foram aderidas com auxílio de prego líquido.

Tal como para o módulo de elasticidade, este ensaio foi efetuado em colaboração com outro colega de mestrado, também integrado no projeto de investigação *Eco+RCEB*.

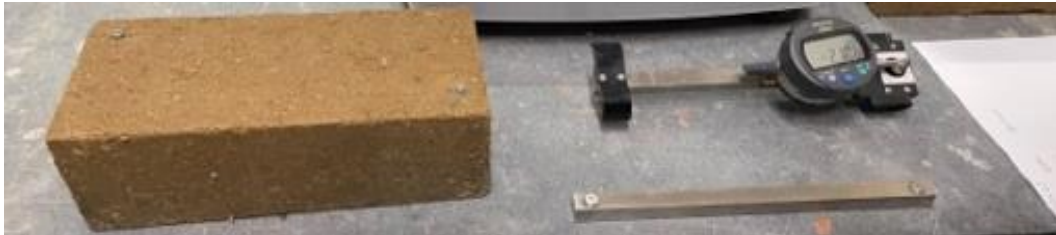


Figura 3.16 - Ensaio de retração

A retração (ε_i) é determinada através da Equação (9), em que (Δ_i) é a diferença entre a distância medida entre discos e a distância padrão (200 mm) registadas no instante i .

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{d_0} \quad [m/m] \quad (9)$$

3.6.6 Esclerómetro pendular

O ensaio do esclerómetro pendular apresenta uma grande vantagem por ser um ensaio de rápida execução e não destrutivo. Para este procedimento seguiu-se a norma NP EN 12504-2 (2003). Foi utilizado o esclerómetro do tipo PT onde a massa de 40 mm de diâmetro está acoplada a um eixo horizontal, descrevendo uma semicircunferência quando libertada.

Este equipamento permite avaliar a dureza superficial dos blocos relacionando-a com a resistência à compressão. Para a execução deste ensaio começa por se encostar o bloco a uma superfície rígida e lisa, por forma a não afetar os valores do ressalto, coloca-se o esclerómetro na vertical em contacto com a face do provete e ativa-se o mecanismo que faz cair a massa em pêndulo de uma altura normalizada. O equipamento integra uma escala onde é possível ler o valor do ressalto e representa a quantidade de energia recuperada pelo pêndulo. O valor do ressalto corresponde ao índice esclerométrico do provete que, com recurso a ábacos fornecidos pelo fabricante, permite estimar de forma grosseira a resistência à compressão do bloco.

3.6.7 Velocidade de propagação de ultrassons

A propagação de ultrassons apresenta uma relação direta com o volume de vazios do bloco, uma vez que as ondas se propagam com maior velocidade em meio sólido do que gasoso, ou seja, quanto maior a compacidade dos blocos e conseqüente menor volume de vazios maior a velocidade de propagação de ultrassons. Através do mesmo princípio é também possível determinar a existência de

descontinuidades como fissuras dentro do bloco. A velocidade de propagação é dada pelo quociente da distância entre os transdutores e o tempo de propagação das ondas. Para este ensaio a norma considerada foi a NP EN 12504-4 (2007).

3.6.8 Abrasão

O ensaio de abrasão permite aferir a resistência superficial do bloco quando sujeito a ações abrasivas de erosão. Para a realização deste ensaio recorreu-se à norma XP-13-901 (2001). Começa por se arranjar uma escova de aço à qual se adiciona uma chapa de 3 kg, por forma a que se realize uma força constante ao longo de todo o ensaio. Em seguida, executam-se movimentos circulares sobre a superfície do bloco durante um minuto, evitando que se realize força vertical adicional. No final, são removidas as partículas que se desagregam e pesa-se o bloco.

Para o cálculo do coeficiente de abrasão recorreu-se à Equação (10) que relaciona a área da escova de aço e a massa abradada.

$$CA = \frac{\text{Área}_{\text{superfície}}}{\text{Massa}_{\text{abradada}}} [\text{cm}^2 / \text{g}] \quad (10)$$

3.6.9 Massa volúmica

Os valores de massa volúmica foram determinados de forma semelhante para três estados: estado fresco, logo após a sua produção, estado endurecido, antes dos ensaios de resistência à tração e compressão e no estado seco, após secagem em estufa a 100°C. A massa volúmica do bloco é determinada pela medição da sua geometria relacionando a massa e o volume do provete.

3.6.10 Condutibilidade térmica

O intuito do presente ensaio passa por quantificar a capacidade de transmissão de calor pelos provetes. A condutibilidade térmica é propriedade intrínseca a cada material e influenciada por características como a estrutura interna ou a fase (gasoso, líquido ou sólido). Para a realização deste ensaio fez-se uso do equipamento ISOMET 2114 da Applied Precision Enterprise, e a sua respetiva sonda de superfície. Segundo o fabricante, o equipamento possui um erro aproximado de 5% para valores de condutividade térmica compreendidos entre 0,0015 e 0,7 W/mK e 10% para valores entre 0,7 e 2,5 W/mK.

O ensaio foi realizado para três tipos de estados: blocos secos, blocos em ambiente de laboratório e blocos saturados. Por forma a não adulterar os resultados, foi colocada uma placa de poliestireno entre a superfície do bloco e a bancada que funcionou como um isolante térmico. Para iniciar o ensaio, apenas se deve colocar a sonda em contacto com a superfície do bloco.

No fim é possível obter a condutibilidade térmica (λ) em W/mK e a capacidade calorífica volumétrica (c_p) em J/m³.K, este valor representa a quantidade de energia que é necessário fornecer a 1 m³ de material para elevar a sua temperatura 1°C.

3.6.11 Porosidade total

A porosidade total foi determinada após 28 dias, de acordo com o constante na norma EN 772-4 (1998). Em primeiro lugar, colocaram-se os blocos dentro de uma estufa ventilada a cerca de 70°C até que se atingisse massa constante – massa do provete seco ($m_{d,s}$). Depois, os blocos foram colocados dentro de um exsiccador e submetidos a vácuo, durante 24h, para uma pressão de 2,0 kPa. Findo este período, adicionou-se lentamente água desionizada até submergir por completo o bloco, mantendo sempre a pressão inicial dentro do exsiccador, e deixou-se em repouso durante 24h. Passado um dia, elevou-se a pressão para a pressão atmosférica e deixou-se novamente em repouso por 24h, concluindo, assim, a primeira etapa deste ensaio.

No final, foi possível calcular os seguintes parâmetros: volume de poros acessíveis, V_p , (Equação 11), dado pelo quociente entre a diferença da massa do provete no estado saturado ($m_{sat,s}$) e a massa do provete seco ($m_{d,s}$), e a massa volúmica da água (ρ_w); volume aparente, V_b , (Equação 12), dado pelo quociente entre a diferença da massa do provete no estado saturado e a massa aparente do bloco submerso ($m_{w,s}$), e a massa volúmica da água; a massa volúmica seca aparente, $\rho_{b,s}$, (Equação 13); e a percentagem de porosidade aberta dada pelo quociente entre o volume de poros acessíveis e o volume aparente (V_p/V_b).

$$V_p = \frac{m_{sat,s} - m_{d,s}}{\rho_w} [cm^3] \quad (11)$$

$$V_b = \frac{m_{sat,s} - m_{w,s}}{\rho_w} [cm^3] \quad (12)$$

$$\rho_{b,s} = \frac{m_{d,s} * \rho_w}{m_{sat,s} - m_{w,s}} = \frac{m_{d,s}}{V_b} [kg/cm^3] \quad (13)$$

Após a determinação destes parâmetros, cada bloco foi moído, passado no peneiro de abertura 0,1 mm, e recolhido cerca de 50g de material directamente do tabuleiro de fundo. Esta amostra foi colocada a secar numa estufa ventilada até que não se verificassem variações de massa. De forma faseada, colocou-se a amostra do bloco moído num recipiente de Le Chatelier, agitando a mistura de cada vez que se adicionava material. No final, registou-se o volume deslocado.

Para concluir, calculou-se a massa volúmica real ($\rho_{r,s}$, Equação 14), em que $m_{c,s}$ é a massa da amostra de bloco moído (50g) e $V_{c,s}$ corresponde ao volume de água deslocado. A porosidade total de cálculo é determinada pela Equação (15).

$$\rho_{r,s} = \frac{m_{c,s}}{V_{c,s}} [kg/cm^3] \quad (14)$$

$$P_{T,C} = \left(1 - \frac{\rho_{b,s}}{\rho_{r,s}}\right) * 100 [\%] \quad (15)$$

4. Apresentação e análise de resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental descrito no capítulo 3. Inicialmente interpretam-se os resultados relativos à realização de um estudo prévio com vista à definição das composições e do processo de produção dos BTC a adotar no restante trabalho. O restante capítulo é dedicado à análise dos resultados do estudo de caracterização mecânica dos BTC. Como referido, será analisado o efeito de diferentes tipos de ligante (CP, RCP ou RCC), do teor de RCC em substituição de CP (0%, 20%, 50% e 100%), do teor de RCD (0%, 15% e 25%) e da influência da incorporação de HQRS. De modo a analisar a eficiência dos ligantes reciclados RCP e RCC na estabilização dos BTC, que é o principal objetivo do trabalho, são analisadas misturas de referência não estabilizadas (NE) ou com CP. As composições dos vários BTC analisados no trabalho apresentam-se em detalhe em 3.5.1.

4.1 Estudo prévio

No âmbito de um estudo preliminar, foram produzidos e caracterizados diferentes BTC estabilizados com CP, em que se fez variar o tipo de solo, o tipo e teor de RCD e o teor de água (TW). A utilização apenas de CP resulta do objetivo ser apoiar o processo de seleção do solo e do RCD, que não deverá depender significativamente do tipo de ligante.

Na Tabela 4.1 resumem-se os diferentes tipos de BTC analisados nesta fase. As terras selecionadas, Amendonça, Baldios, Maia e Pinheiro são designadas pelas siglas “A”, “B”, “M” e “P”, respetivamente. Apenas em BTC com Amendonça e Maia foi analisada a influência do tipo de RCD (RCD1 ou RCD2, 3.3.2), assumindo-se que constatações semelhantes seriam obtidas. Isso não é exatamente verdade, pois os solos apresentam granulometria diferente e a substituição não foi realizada para idêntica granulometria. A razão dos estudos preliminares de análise da influência de diferentes fatores não terem sido generalizados a todos os tipos de solo deveu-se a questões de tempo e de disponibilidade de amostra de solo. Porém, este estudo prévio visa apenas auxiliar a definição das composições a adotar no estudo de caracterização, cujo objetivo principal não é a otimização composicional dos BTC.

Conforme discutido em 3.2, o solo Cortiçadas de Lavre foi descartado deste estudo, visto que não apresentava características adequadas à produção de BTC.

Por forma a obter BTC de maior compacidade procurou-se otimizar a granulometria da mistura de acordo com a curva de referência de Fuller modificada (Equação 16), assumindo-se o valor de 0,33 para o fator q (Malkanthi et al., 2021). A dimensão máxima do agregado ($D_{\text{máx}}$) foi de 4,76, de acordo com as curvas granulométricas dos solos após pulverização (3.2.1). $P(x)$ corresponde à percentagem de material passado acumulado no peneiro de diâmetro d_i .

Neste estudo prévio, foi analisada a substituição de solo por 3 teores de RCD1 (15%, 25% e 35%). Para a definição destes valores analisou-se teoricamente diferentes BTC com 15% a 50% de RCD1, quantificando-se a soma dos desvios quadrados da curva destas misturas face à curva de referência de Fuller (Tabela 4.2). Considerando que a curva de Fuller conduz a soluções de máxima compacidade, conclui-se que o nível ótimo de incorporação de RCD1 é atingida para teores entre 0 e 35%. Note-se

que como analisado mais adiante, em 4.2, a curva de Fuller está inserida no fuso granulométrico recomendado na norma XP-13-901 (2001) para BTC.

Tabela 4.1 - Composições utilizadas para o estudo prévio

Tarefa	Objetivo	Designação	Tipo de solo	Tipo de RCD	% RCD ³	%CP ⁴	TW ⁵ (%)
1	Tipo de solo e de RCD	BBCD1	Baldios	RCD1	25	8	14
		MBCD1	Maia	RCD1	25	8	15
		MBCD2	Maia	RCD2	25	8	16
		ARCD1	Amendonha	RCD1	25	8	15
		PRCD1	Pinheiro	RCD1	25	8	15
	Teor de RCD	B15RCD1	Baldios	RCD1	15	8	13
		B35RCD1	Baldios	RCD1	35	8	14
2	Teor de água	B12W	Baldios	RCD1	25	8	12
		B13W	Baldios	RCD1	25	8	13
		B15W	Baldios	RCD1	25	8	15
	Teor de água	M12W	Maia	RCD1	25	8	12
		M13W	Maia	RCD1	25	8	13
		M14W	Maia	RCD1	25	8	14
3	Tipo de RCD	ARCD1	Amendonha	RCD1	25	8	12
		ARCD2	Amendonha	RCD2	25	8	12

$$P(x) = \left(\frac{d_i}{D_{max}} \right)^q \quad (16)$$

Para a determinação do teor de água (TW) de cada mistura recorreu-se ao método expedito de *drop test*. Para este ensaio começa-se por um TW inferior ao teor ótimo de água (calculado de acordo com 3.2.6) e incrementa-se a quantidade de água até que seja possível realizar uma pequena bola do tamanho da palma da mão. Esta bola deve ser largada a uma altura equivalente à altura da cintura de forma a embater no solo sem que se parta em mais de 4 frações. Caso a bola se desfaça em mais do que 4 frações significa que a mistura ainda está muito seca e que deve ser acrescentada água.

Para cada uma das misturas, procedeu-se à determinação da massa volúmica e da resistência à compressão aos 7 dias, cujos resultados se apresentam na Tabela 4.3. Os vários blocos foram sujeitos a 3 dias de cura húmida seguido de 4 dias em ambiente de laboratório. A produção dos blocos foi realizada de acordo com 3.5, e os ensaios de massa volúmica e compressão segundo 3.6.9 e 3.6.1, respetivamente.

O tipo de RCD a utilizar foi analisado em BTC com Maia e com Amendonha. Para ambos os casos, a resistência à compressão foi ligeiramente superior quando se utilizou RCD1, embora as diferenças não fossem muito significativas. O RCD1 tem as vantagens adicionais de permitir um melhor controlo de água da mistura (cerca de metade da absorção de RCD2, ver 3.3.2) e ainda de ser o resultado de RCD mais comuns, de natureza variada. Desse modo, para o restante trabalho optou-se por considerar o RCD1, de agora em diante apenas denominado por RCD.

³ Em relação à massa de solo + RCD

⁴ Em relação à massa de solo + RCD

⁵ Em relação à massa de solo + RCD + ligante

Tabela 4.2 - Soma do quadrado do desvio da curva das misturas face à curva de referência de Fuller

% RCD1		Amendonça	Baldios	Maia	Pinheiro
0%	Δ^2	92	301	393	837
15%	Δ^2	158	127	213	836
25%	Δ^2	221	65	152	846
35%	Δ^2	300	47	137	864
40%	Δ^2	345	54	148	876
50%	Δ^2	447	101	203	906

Em relação à influência da percentagem de AR a incorporação de 25% de RCD nos BTC com baldios conduziu a resistências acima de 10 MPa, cerca de 76% e 58% superiores à dos BTC com 15% e 35% de RCD, respetivamente. Estes resultados também corroboram o aumento de 8% verificado na massa volúmica. Conclui-se assim que a substituição de solo por 25% RCD1 conduziu à solução de maior compactidade. Da Tabela 4.2 poderia ter sido expectável que se obtivesse uma maior compactidade granular nas misturas com incorporação de 35%RCD, o que não se verificou. Para além da compactidade granular, também o teor de água livre na mistura (descontando a água de absorção dos agregados) influencia a compactidade dos BTC. Em face dos resultados obtidos não se pode concluir da influência do AR, para além da forma como é afetada a compactidade granular. Após este estudo, foi definido o teor de 25% RCD1 para a mistura de referência.

De acordo com o analisado em 3.2.8, Baldios e Maia são os dois solos que melhor se adequam ao fuso granulométrico recomendado na literatura, para além de ser mais fácil o seu pré-tratamento face aos restantes. A mistura BRCD1, com Baldios, atingiu um valor médio de resistência à compressão (10,5 MPa) bastante superior ao da mistura MRCD1, com Maia (6,6 MPa), superiorizando-se também ao dos BTC com os restantes solos (cerca de 5 MPa em ARCD1 e PRCD1). Este aumento de resistência foi acompanhado por maiores valores de massa volúmica, confirmando-se a maior compactidade dos BTC com Baldios. Para os resultados obtidos terá contribuído a menor exigência de água de Baldios (menor TOA, 3.2.6), permitindo que os BTC fossem produzidos com menor TW. Assim, tal como sugerido em 3.2.8, Baldios foi o solo selecionado para a produção dos BTC a considerar na segunda fase deste trabalho, referente ao estudo de caracterização mecânica para diferentes tipos de estabilizante. A influência do teor em água (TW) foi analisado nos solos com Baldios e com Maia, cuja granulometria era mais adequada ao fuso granulométrico recomendado (3.2.8) e para os quais se atingiram menores desvios face à curva teórica de Fuller (Tabela 4.2). Para estes solos, fez-se apenas variar o TW para valores próximos do TOA (11% em Baldios e 13% em Maia, 3.2.6). Nos BTC com Baldios, observou-se que o máximo de resistência foi atingido para 13-14% de TW, ao passo que nos BTC com Maia, a maior resistência foi atingida para 15% TW (Figura 4.1). Ou seja, o máximo das resistências foram atingidas para cerca de 2-3% mais teor de humidade do que o TOA. Isso justifica-se pelo facto do TW da Tabela 4.3 incluir a percentagem de água extra absorvida pelo RCD1 e resultante da incorporação de 8% de cimento. Para além disso, as pressões de compactação no ensaio de Proctor são inferiores às utilizadas na produção dos BTC. Na mesma Figura 4.1 é ainda possível constatar que a evolução da resistência segue a tendência da massa volúmica e, como tal, da

compacidade atingida nos BTC. Em especial nos BTC com Baldios, confirma-se a importância do TW na compacidade.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos no estudo prévio

Tipo de solo	Designação	$\rho_{7 \text{ dias}}$		$f_{c,7 \text{ dias}}$	
		Média [kg/m ³]	Coef. Var. [%]	Média [MPa]	Coef. Var. [%]
Baldios	BRCD1	2389	5,0	10,5	8,5
Maia	MRCD1	2347	1,0	6,6	1,5
Maia	MRCD2	2356	0,8	5,8	13,4
Amendoça	ARCD1	2299	2,7	5,3	13,3
Pinheiro	PRCD1	2191	4,5	5,4	0,7
Baldios	B15RCD1	2217	2,3	6,0	10,2
Baldios	B35RCD1	2210	1,2	6,6	9,7
Baldios	B12W	2206	2,4	5,5	6,8
Baldios	B13W	2333	5,4	10,2	27,7
Baldios	B15W	2284	3,5	6,2	0,7
Maia	M12W	2256	0,6	4,5	4,6
Maia	M13W	2161	0,5	3,8	3,6
Maia	M14W	2311	0,8	5,4	9,8
Amendoça	ARCD1	2378	1,9	7,4	2,8
Amendoça	ARCD2	2254	1,5	5,4	5,9

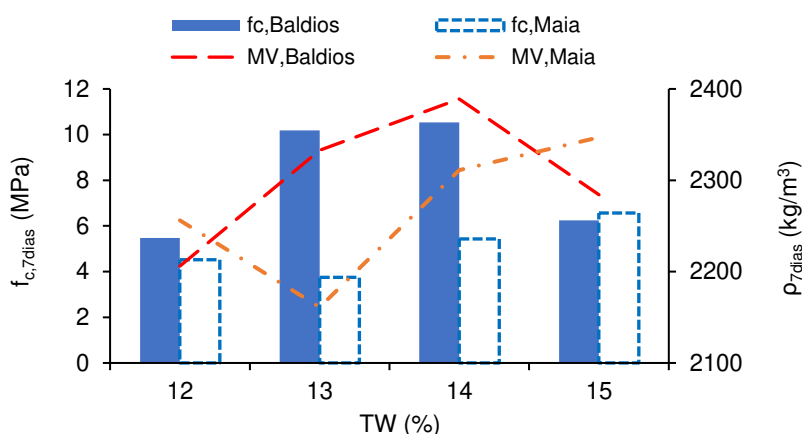


Figura 4.1 - Variação da resistência à compressão e massa volúmica com TW em BTC com 8% CP

4.2 Massa volúmica

Neste e nos próximos pontos discute-se os resultados obtidos no estudo de caracterização dos BTC, cujo o programa experimental foi apresentado no Capítulo 3. Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores médios de massa volúmica no estado fresco (ρ_f), imediatamente após a produção dos BTC, bem como de massa volúmica aos 28 dias após cura em laboratório (ρ_{28d}) e da estimativa da porosidade total (P_T). A análise da massa volúmica permite, ainda que indiretamente, avaliar o grau de compactação dos BTC. Este parâmetro depende não só do TW e da composição da mistura, como também da força de compactação na moldagem dos blocos e da quantidade de material colocado nos

moldes. Tal como referido, o facto de se ter utilizado uma prensa manual dificulta a garantia de condições de espessura e composição idênticas entre blocos.

No presente trabalho a massa volúmica fresca variou entre 2000 e 2227 kg/m³, dependendo essencialmente do tipo de estabilizante. Estes valores enquadram-se no limite superior do intervalo recomendado por Rigassi (1985), de 1800 e 2200 kg/m³. Recorrendo à mesma prensa utilizada no presente trabalho, e para teores de estabilizante semelhantes (8-10%), Azevedo (2021) e Silva (2015) atingiram valores de massa volúmica ligeiramente inferiores a 2100 kg/m³. Para tal terá contribuído a utilização de composições otimizadas, conforme a filosofia seguida em 4.1, em que a curva granulométrica se insere no fuso recomendado para os BTC, e aproxima-se da curva de referência de Fuller modificada, também ela inserida no mesmo fuso (Figura 4.2). Tal como esperado, a massa volúmica aos 28 dias foi inferior à massa volúmica fresca (Tabela 4.4), visto que os BTC perderam parte da água de mistura por secagem.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de massa volúmica

	Mistura	TW (%)	Massa volúmica (kg/m ³)		P _T (%)
			ρ _f	ρ _{28d}	
CP	8CP25RCD	14	2227	2048	27,7
	8CP15RCD	14	2210	2030	28,3
	8CP	14	2230	2042	28,2
	8CP32,5_25RCD	14	2138	1960	30,9
	8CP25HQRS	14	2190	1963	29,3
RCP	8RCP25RCD	20	2039	1879	37,1
	8RCP25RCD14TW	14	2071	1966	32,8
	8RCP25HQRS	14	2000	1882	35,6
RCC	8RCC	20	2130	1892	35,2
	20RCC80CP25RCD	20	2130	1970	34,1
	50RCC50CP25RCD	20	2130	1970	34,2
	8RCC25RCD	20	2100	1927	35,5
	12RCC25RCD	20	2080	1919	35,5
NE	NE25RCD	12	2150	1938	32,1

Analisando a influência do tipo de estabilizante, percebe-se que os BTC produzidos com RCP ou RCC apresentaram valores de massa volúmica fresca inferior, em cerca de 6-8%, face aos BTC com CP de igual teor de ligante e quantidade de RCD (Figura 4.3). Esta diminuição foi igualmente confirmada ao nível da massa volúmica aos 28 dias, e é superior aquela que resultaria da ligeira redução de massa volúmica do RCP e do RCC face ao CP. A redução de massa volúmica, após introdução do CR, refletiu-se num aumento geral da porosidade total (Figura 4.3). Este aumento de porosidade total confirma que foram atingidas menores compacidades nos BTC após substituição do CP por CR, mesmo não se tendo alterado de forma significativa a compacidade granular da mistura.

Por um lado, a maior exigência de água do RC levou a que os BTC fossem produzidos com maior quantidade de água face aos BTC com CP (TW de 20% face a 14%), aumentando a porosidade total. Por outro lado, mesmo no caso em que se forçou a produção de BTC com RCP de igual teor em água (8RCP25RCD14TW), verificou-se um aumento da porosidade (18%), que resulta da maior dificuldade de aplicação e compactação das misturas. O ligeiro aumento de massa volúmica (e diminuição de porosidade) dos BTC com RCC face aos BTC com RCP de igual TW, resulta da menor exigência de água e facilidade de aplicação do RCC. De facto, conforme constatado por outros autores, a contaminação parcial de agregado no RCC reduz a área superficial e a percentagem de absorção deste ligante (Real et al., 2021).

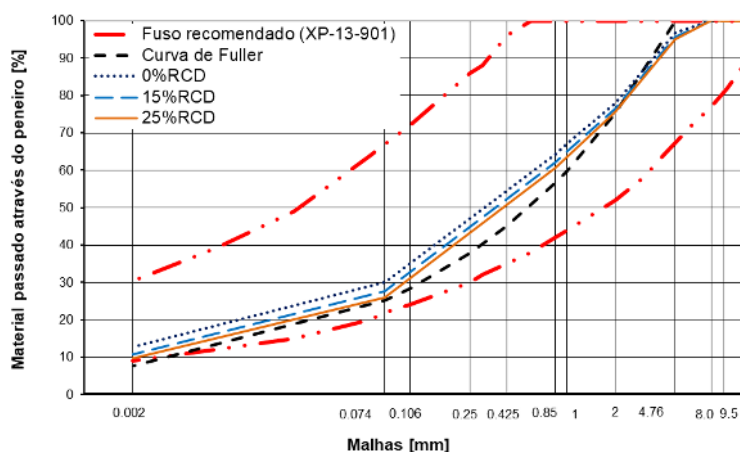


Figura 4.2 - Curva granulométrica das misturas para 8% de cimento e 0 - 25% de RCD nos BTC

O aumento do teor de ligante na mistura 12RCC25RCD (de 8 para 12% RCC), de modo a compensar a contaminação de agregado na fração de pasta recuperada de betão (3.5.1) teve pouca influência na massa volúmica e porosidade total dos BTC (Tabela 4.4). Ainda assim, verifica-se que face à mistura 8RCC25RCD, a massa volúmica foi ligeiramente inferior, tal como a porosidade total. A adição de maior volume de pasta no 12RCC25RCD reduz a massa volúmica, e a incorporação de maior quantidade de cimento reciclado capaz de hidratar, reduz a quantidade de água evaporável e, como tal, a porosidade total a longo prazo (3.5.1).

Relativamente às misturas com substituição parcial do CP por RCC, tal como seria de esperar, observa-se que os valores das massas volúmicas destes BTC se encontra entre os valores apresentado pelos blocos com 0% e 100% de CP, estando mais próximo do atingido para 100% RCC, devido à diferença de TW com que foram produzidos (Tabela 4.4).

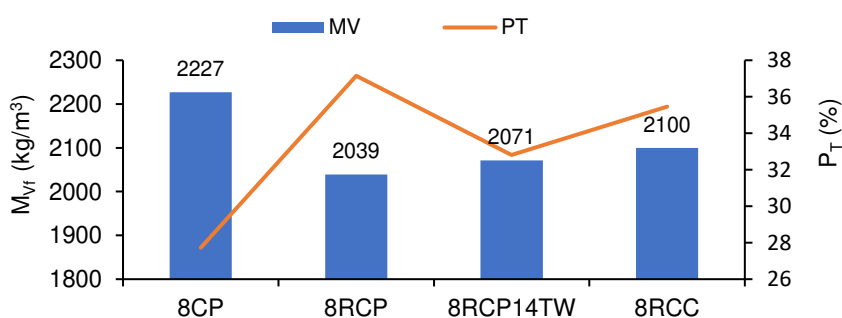


Figura 4.3 - Variação de massa volúmica fresca e porosidade total (P_T) para diferentes tipos de estabilizante. BTC com 25% de RCD

Na Figura 4.4 resume-se a variação de massa volúmica e de porosidade total nos BTC com 8% CP e diferente teor de RCD ou com incorporação de 25% HQRS, recordando que todas as misturas foram produzidas com igual TW.

Tal como constatado no estudo prévio realizado em 4.1., o BTC com 25% RCD apresentou o menor valor de P_T , e como tal, a maior compacidade. No entanto, a maior massa volúmica foi atingida na mistura com 0% de RCD, embora a diferença seja pouco significativa. Neste caso, o aumento de compacidade da mistura terá sido compensado pela menor massa volúmica do RCD face ao solo Baldios (3.3.2). De facto, para igual curva granulométrica, a porosidade aumenta com o aumento de RCD. Note-se que a estimativa da porosidade total inclui apenas o volume de poros acessíveis à água por parte dos AR.

Voltando à Figura 4.2, observa-se que à medida que se incrementa o teor de RCD nos BTC, a curva granulométrica da mistura aproxima-se da curva teórica de Fuller, ocorrendo uma redução progressiva da soma dos desvios quadrados (ver Tabela 4.2). Assim, é possível obter duas conclusões: a substituição de 25% de solo por RCD melhora a compacidade dos BTC; confirma-se que a curva de Fuller tende a traduzir condições de maior compacidade nos BTC. Porém, as diferenças de porosidade entre misturas foram inferiores a apenas 2%, o que está de acordo com as ligeiras alterações ocorridas na granulometria das misturas.

Em relação à incorporação de 25% de areia de melhor qualidade (HQRS) em substituição do solo, constata-se uma redução na massa volúmica, que foi acompanhado por um aumento da porosidade total (Figura 4.4). Esta HQRS apresenta menor porosidade e maior massa volúmica do que o RCD, possuindo menor exigência de água e aproximando-se mais das características do solo. Desse modo, para idêntica granulometria, seria esperado observar variações pouco significativas na massa volúmica e porosidade total. No entanto, como salientado em 3.5.1, neste trabalho procedeu-se a uma substituição direta do solo por HQRS, não respeitando condições de idêntica granulometria. Conforme observado na Figura 4.5, essa substituição introduziu uma variação significativa na curva granulométrica da mistura, afastando-a da composição com 25% RCD, bem como da curva de referência de Fuller. Embora ainda dentro do fuso recomendado na norma XP-13-901 (2001), a curva revela défice de grossos acima de 0,5 mm.

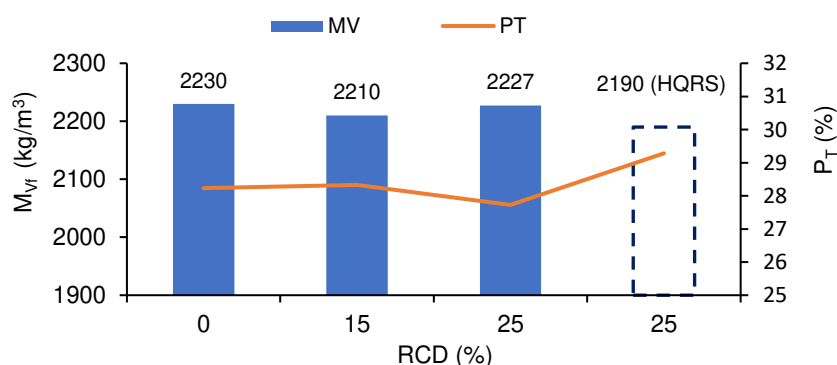


Figura 4.4 - Variação da massa volúmica fresca e porosidade total (P_T) para BTC com 8% de CP e diferentes teores de RCD e incorporação de 25% HQRS

A substituição para idêntica granulometria teria permitido aferir melhor a influência de se utilizar AR de menor porosidade, porém não foi viável realizar esse estudo no período de tempo afeto a este trabalho de mestrado.

Na Figura 4.6 observa-se uma elevada correlação entre a massa volúmica fresca e a porosidade total, quando se tem em consideração BTC produzidos com igual TW. Tal é justificado pelo facto do TW apresentar maior impacto na massa volúmica fresca (o teor de água também contribui para o aumento desta propriedade) do que na porosidade total (maior TW está associado a maiores vazios após evaporação, reduzindo esta propriedade). Realça-se o facto da relação obtida ser independente do tipo de ligante e do tipo e teor de AR.

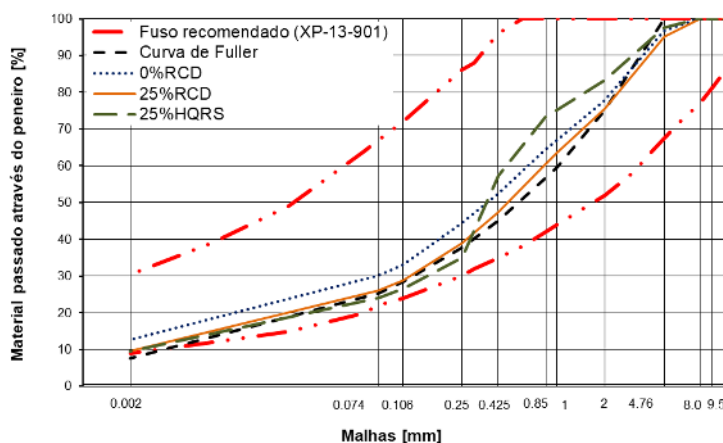


Figura 4.5 - Curva granulométrica das misturas para 8% de cimento e 25% RCD ou 25% HQRS nos BTC

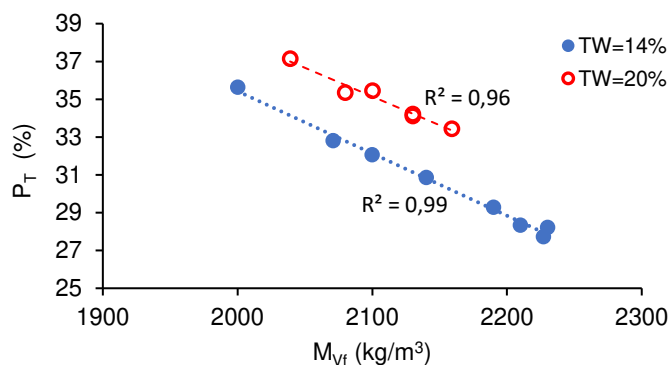


Figura 4.6 - Relação entre a porosidade total e a massa volúmica fresca

4.3 Porosidade Total

Na Tabela 4.5 resumem-se os resultados do ensaio experimental de determinação da porosidade total ($P_{T,C}$), determinados de acordo com 3.6.11. Na mesma tabela, apresentam-se ainda os valores da porosidade acessível (P_A), conforme 3.6.11, e os valores estimados de porosidade total (P_T), conforme 3.5.1.

Tal como esperado, a porosidade total foi superior à porosidade acessível à água, independentemente da composição da mistura (Tabela 4.5). Porém, a diferença foi reduzida,

constatando-se que P_A foi cerca de 90-99% de $P_{T,C}$. Conclui-se assim que a porosidade dos BTC é maioritariamente comunicável entre si.

Tabela 4.5 - Porosidade total e aberta experimentais e estimativa teórica da porosidade total

Mistura	$P_{T,C}$ (%)	P_A (%)	P_T (%)
8CP25RCD	26,0	25,7	27,7
8CP15RCD	26,6	26,1	28,3
8CP	26,2	25,1	28,2
8CP25HQRS	28,9	26,4	29,3
20RCC80CP25RCD	29,8	26,2	34,1
8RCC25RCD	30,4	29,9	35,5
12RCC25RCD	30,2	28,7	35,3

A maior dificuldade na determinação experimental da porosidade total, de acordo com 3.6.11, reside na determinação exata da massa volúmica real, sendo que esta tende a ser subestimada, conduzindo a valores mais baixos de $P_{T,C}$. Por outro lado, a estimativa da porosidade total (P_T), para além de ser teórica, não tem em consideração os efeitos de retração da pasta ligante e da argila presente nos BTC, sobrestimando o valor de P_T . Assim, verifica-se que a porosidade teórica foi sistematicamente superior à determinada experimentalmente, inferior a 2% nos BTC com CP e de 5% nos betões com RCC. A maior dificuldade em determinar o valor exato da água de mistura (diferenças no teor de humidade e absorção do solo e do RDC na altura da sua utilização), contribuem igualmente para as diferenças observadas. Ainda assim, verifica-se uma tendência de evolução semelhante em P_T e $P_{T,C}$ (Figura 4.7), confirmando-se que a introdução de RCC em substituição de CP conduz a maiores aumentos de porosidade. Na Figura 4.7 apenas o BTC com HQRS foge à tendência dos restantes BTC, com os resultados experimentais a indicarem diferenças maiores de porosidade nesta mistura.

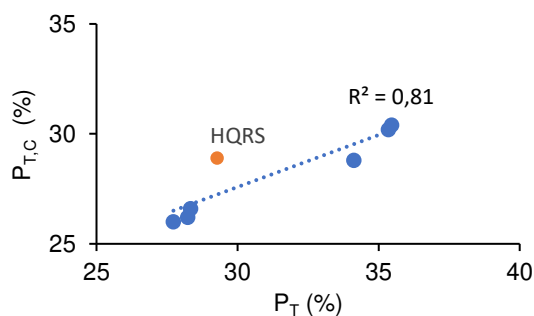


Figura 4.7 - Relação entre a porosidade total estimada e a determinada experimentalmente

4.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos BTC é afetada pelo teor de água da mistura, pressão de compactação, condições de cura e teor e tipo de estabilizante (Azevedo, 2021; A. Kerali, 2001). No presente estudo pretende-se essencialmente avaliar a influência de se utilizar RCP e RCC em alternativa a CP e de se substituir parcialmente RCD por solo.

Na Tabela 4.6 apresentam-se os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, bem como os valores de P_T e ainda a relação água/ligante efetiva (a/l_{efet}), que não inclui a absorção do solo e do RCD.

Na Tabela 4.6 indicam-se ainda os valores estimados da resistência à compressão não confinada, $f_{c,un}$, que pretende eliminar o efeito favorável de restrição dos pratos da prensa. De facto, a resistência à compressão é significativamente afetada pela geometria dos blocos, nomeadamente pela relação altura/largura (H/L) (Azevedo, 2021; Morel et al., 2007; M. Neves, 2019), podendo variar em mais do dobro em função deste parâmetro (Krosnowski, 2011). Neste sentido, a norma HB 195 (2002) propõe fatores corretivos de 1, 0,8, 0,7 e 0,5 para H/L de 5, 2, 1 e 0,4, respetivamente, sendo que a maioria dos BTC apresenta valores de H/L inferiores a 0,7. Estes fatores são depois diretamente multiplicados pela resistência à compressão, estimando-se $f_{c,un}$, que é uma grandeza mais facilmente comparável entre diferentes autores. Neste estudo, os blocos foram produzidos com H/L de 0,67, a que está associado um fator corretivo de 0,6.

Nos BTC com 8% CEM I 42.5 e sem incorporação de RCD a resistência à compressão foi de 9,3 MPa, cerca de 57% superior à obtida por Azevedo (2021) em BTC de geometria semelhante produzidos com 10% CP (idêntico H/L) e utilizando a mesma prensa do presente trabalho. Entre estes estudos variou apenas o tipo de solo e o TW da mistura, concluindo-se que foi atingida uma composição mais otimizada e de maior compacidade no presente trabalho. De facto, a porosidade total reportada por Azevedo (2021) foi 21% superior à estimada para 8CP.

Tabela 4.6 - Resistência à compressão a diferentes idades

	Mistura	a/l _{efet.}	P _T (%)	f _{c,28d} (MPa)	CV _{f_{c,28d}} (%)	f _{c,un} (MPa)
CP	8CP25RCD	1,91	27,7	9,0	8,2	5,4
	8CP15RCD	1,87	28,3	10,0	6,1	6,0
	8CP	1,89	28,2	9,4	7,3	5,6
	8CP32,5_25RCD	1,97	30,9	6,8	7,3	4,1
	8CP25HQRS	1,94	29,3	8,7	5,0	5,2
RCP	8RCP25RCD	2,72	37,1	3	12,0	1,8
	8RCP25RCD14TW	1,91	32,8	5,5	12,2	3,3
	8RCP25HQRS	1,99	35,6	3,8	9,2	2,3
RCC	8RCC	2,70	35,2	2,3	10,1	1,4
	20RCC80CP25RCD	2,66	34,1	6,8	18,9	4,1
	50RCC50CP25RCD	2,66	34,2	4,9	7,4	2,9
	8RCC25RCD	2,69	35,5	2,4	36,9	1,4
	12RCC25RCD	1,82	35,3	3,1	5,6	1,9
NE	NE25RCD	0,00	32,1	2,1	8,1	1,2

Como referido a comparação dos resultados obtidos com o de outros autores não é correta, visto que envolvem geometrias e pressões de compactação diferentes. Porém, tendo em conta os valores estimados de $f_{c,un}$ é possível verificar que as resistências obtidas no presente estudo são pelo menos da mesma grandeza das reportados por outros autores (Figura 4.8). Note-se que os resultados de outros autores foram obtidos para BTC no estado seco, cuja resistência é superior à dos BTC húmidos. Por exemplo, Azevedo (2021) reporta uma redução de 20% na resistência à compressão do estado seco para condições de cura ao ar. A norma HB-195 (2002) recomenda um limite mínimo de 2,0 MPa para a resistência não confinada de blocos secos não estabilizados. Mesmo considerando que a

resistência dos BTC foi obtida em condições menos favoráveis de não secagem, apenas para 100% RCC e elevado TW não se cumpriu este requisito.

Na Figura 4.9 resumem-se os valores de resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos de estabilizante analisados no trabalho, nomeadamente CP, RCP e RCC, considerando apenas as misturas de referência com 25% RCD. A resistência do BTC com RCP foi 39% inferior à do BTC com CP de igual TW, verificando-se uma menor eficiência do cimento reciclado, tal como já tinha sido constatado aquando da produção e caracterização de argamassas (3.4.2.2), em que se verificou uma redução de 46%. Em ambos os casos, a compacidade foi afetada pela menor exigência de água do RCP, aumentando o teor de vazios. A redução de resistência a longo prazo é também resultado de existirem menos produtos hidratáveis no RCP, visto que existe uma maior quantidade de compostos carbonatados não disponíveis para reidratar (Bogas et al. 2022).

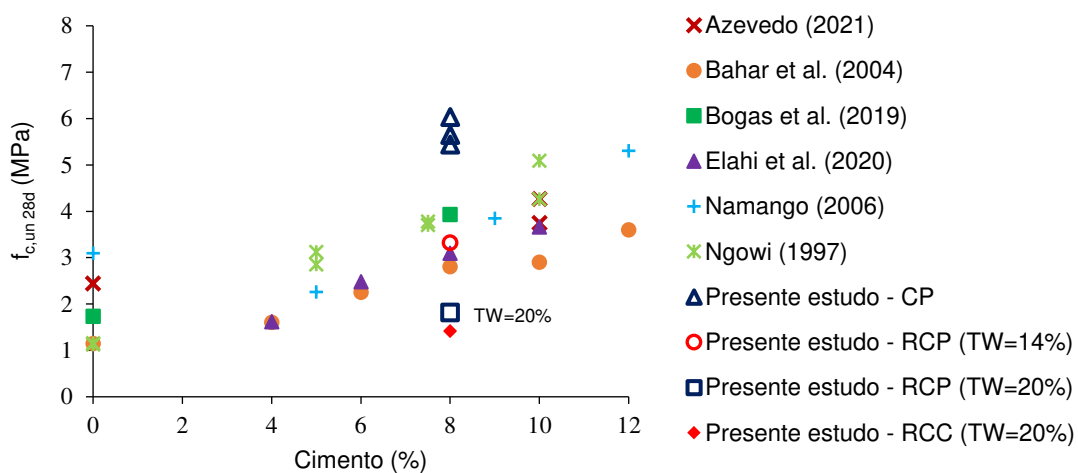


Figura 4.8 - Resistência à compressão não confinada em função do teor de cimento. Resultados do presente estudo em condições de cura ao ar e de outros autores para BTC ensaiados no estado seco

A importância da influência da porosidade na resistência mecânica é confirmada na Figura 4.10, observando-se correlações elevadas entre estas propriedades, mas apenas quando não se considera em simultâneo o mesmo tipo de estabilizante. Isso seria esperado, visto que a resistência não depende apenas da porosidade total, mas também da coesão estabelecida entre partículas, que é promovida pela argila (no NE) ou pelos produtos de hidratação do ligante (nos BTC estabilizados). Porém, se isso é claro entre os BTC estabilizados e não estabilizados, a diferença é menos evidente para os BTC com CP ou RC, em especial no caso dos BTC com RCP. Isso indica que o cimento reciclado foi eficiente na estabilização e promoção de coesão entre as várias partículas do solo, sendo apenas a resistência essencialmente condicionada pela porosidade total. Esta constatação é muito importante pois a curva sugere que caso se atinjam BTC de igual compacidade (igual P_T), a resistência nos BTC com CP e RCP vai ser idêntica.

Naturalmente, quando se faz variar o TW, aumentou a relação a/l efetiva e a porosidade total, conduz-se a uma redução proporcional da resistência à compressão (Figura 4.10). Da Tabela 4.6, verifica-se que o aumento de TW de 14% para 20% conduziu a um incremento de a/l_{efet} de 1,91 para 2,70 (diferença de 0,8). De acordo com (Bogas & Gomes, 2013), que ajustaram a lei de Abrams à resistência de argamassas com CEM I 42.5, variações de 0,8 na relação a/c podem significar reduções

superiores a 80% na resistência à compressão. Neste caso, os BTC com RCP e maior TW apresentaram uma resistência 46% inferior à dos BTC produzidos com menor TW (Figura 4.9).

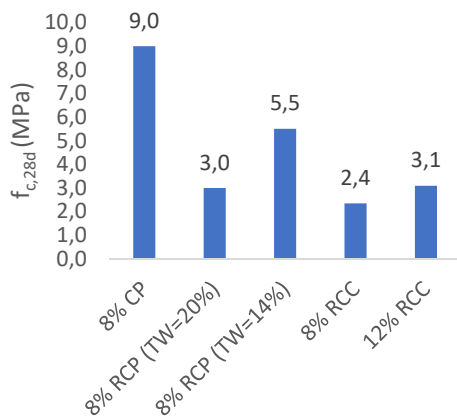


Figura 4.9 - Resistência à compressão aos 28 dias em função do tipo de estabilizante

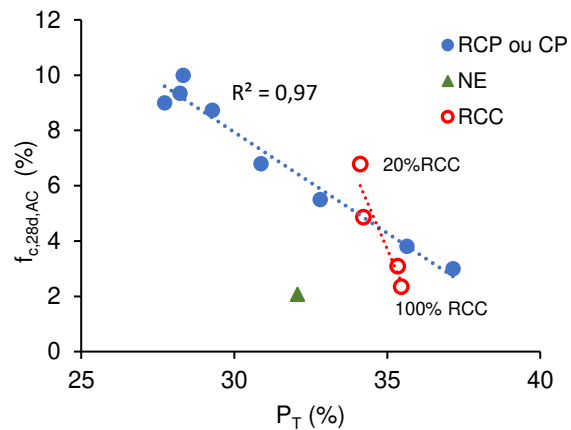


Figura 4.10 - Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a porosidade total de BTC estabilizados e não estabilizados

No entanto, verifica-se que os BTC com RCC fogem à tendência de evolução de f_c em função de P_T dos BTC com RCP ou CP. Uma razão poderá estar relacionada com a estimativa menos precisa de P_T . De facto, em 4.3, verificou-se que a diferença entre a porosidade de cálculo e a estimada aumentou nos BTC com RCC. Ainda assim, ocorreria apenas uma translação da curva a vermelho na Figura 4.10, não justificando a tendência observada, principalmente para os BTC com 100% RCC. Assim, os resultados sugerem uma perda de eficiência do ligante para 100% RCC, reduzindo a capacidade de ligação entre partículas, e aproximando-se do comportamento observado no NE.

De facto, tendo em conta BTC de igual TW (20%), a substituição de RCP por igual teor de RCC conduziu a uma redução de resistência à compressão de 3 MPa para 2.35 MPa (22%, Figura 4.9). Ou seja, o RCC foi menos eficiente do que igual teor de RCP.

Por um lado, no RCC obtido a partir de betão antigo poderão ser formados mais produtos de carbonatação durante o processo de tratamento e separação dos resíduos, o que o torna menos reativo (Cariço et al. 2021). Por outro lado, como discutido em 3.3.2, o RCC apresenta-se contaminado com cerca de 32% de agregado, o que faz com que o BTC tenha sido produzido com apenas 5,4% de ligante cimentício, aumentando a relação a/l efetiva de 2,69 para 3,96.

Tal como referido em 3.5.1, de modo a eliminar o efeito da diluição do teor de ligante no RCC, foi produzido um BTC adicional com 12% de RCC, a que corresponde uma fração equivalente de pasta de 8% (12RCC25RCD). Desse modo, este novo BTC foi produzido com a/l de 1.82 (Tabela 4.6), a que corresponde uma relação água/pasta de 2,68, semelhante à do BTC com RCP (8RCP25RCD). Como se pode verificar, as resistências entre estes BTC foram muito semelhantes (Figura 4.9), sugerindo que o RCC pode apresentar capacidade de reidratação semelhante ao RCP. Cyrne (2022) obteve conclusões semelhantes em argamassas produzidas com RCP e RCC de igual relação a/l, verificando idênticas resistências à compressão quando aumentou o teor de RCC de modo a compensar a contaminação de agregado. Porém, dado que a mistura com 12%RCC apresenta uma porosidade total 5% inferior à do BTC com 8%RCP (Figura 4.10), seria expectável que esta atingisse uma maior resistência. Como referido, isso faz com que a evolução da resistência à compressão em função de P_T

tenha sido diferente (Figura 4.10). Para além do maior teor de material carbonatado, parte das partículas de RCC não se encontram libertas, coexistindo partículas compostas por agregado e fração de pasta, o que reduzir a área superficial do ligante e a sua eficiência.

Na Figura 4.11 analisa-se a evolução da resistência à compressão e da porosidade total em função do teor de RCC em substituição de CP. Porém, como os BTC com 100% CP foram produzidos com 14% de TW, a sua comparação com os restantes BTC não permite analisar devidamente a influência do RCC. De modo a ter em consideração BTC de igual teor em água, foi produzida uma mistura adicional de referência com 8%CP, 25% RCD e 20% TW. Porém, para esta composição foi apenas possível obter resultados de massa volúmica fresca e porosidade total, sendo 2159 kg/m³ e 33,4%, respetivamente. A resistência à compressão aos 28 dias não conseguiu ser determinada até a conclusão da presente dissertação. Desse modo, a partir do conhecimento da porosidade total e tendo em consideração a curva de tendência da Figura 4.10, estimou-se o valor de 5,4 MPa para a resistência à compressão aos 28 dias. Dado que se trata de um valor estimado, na Figura 4.11 a resistência à compressão para 0% RCC aparece indicada a tracejado.

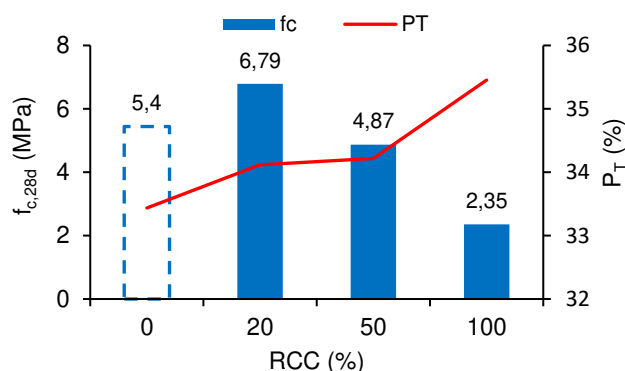


Figura 4.11 - Variação da porosidade total e da resistência à compressão em função da percentagem de substituição de CP por RCC

Em geral, a resistência diminuiu com a substituição parcial de CP por RCC, acompanhando o aumento verificado na porosidade total. Porém, para 20% RCC, a resistência atingiu valores mais elevados (25%) do que o estimado para o BTC com 100% CP. Este aumento não era esperado, nomeadamente tendo em conta que P_T foi ligeiramente inferior nos BTC com 100%CP. Assim, conclui-se que a incorporação de até 20% RCC foi benéfica. Em betões com até 15% de substituição Real et al. (2021) também verificou um ligeiro aumento de resistência mecânica, sendo atribuído a um eventual adensamento da matriz cimentícia por efeitos de fíler e nucleação.

Estes resultados corroboram a ideia de que a resistências mecânica dos BTC pode não ser prejudicada, caso a compactidade dos BTC não seja afetada. Por sua vez, a incorporação de 50% RCC implicou apenas uma redução de apenas 11% na resistência à compressão, estando em linha com o aumento de 2% na porosidade total (Figura 4.10).

Independentemente do tipo de cimento reciclado (RCP ou RCC) a resistência à compressão nos BTC estabilizados foi sempre superior à dos não estabilizados (NE), mesmo sabendo que estes últimos foram produzidos com maior compactidade. Face aos BTC com 8% RCP e TW=14%, em que os valores de P_T foram semelhantes, o NE apresentou uma resistência 2,6 vezes inferior. Isso demonstra a

capacidade reativa e a eficiência do cimento reciclado na função de estabilização do solo. Mesmo para teores de humidade de 20%, a resistência foi 44% superior nos BTC com CR do que no NE.

De modo a desenvolver uma solução mais próxima do que se utiliza na realidade, foi também produzido um BTC com CEM 32.5 II B/L. Neste caso a resistência diminuiu 24,4% e a porosidade aumentou 11,3%, seguindo a tendência da Figura 4.10. Conforme estimado em 3.4.1, este cimento é composto por cerca de 31% de fíler calcário. Desse modo, à relação a/l de 1,97 (Tabela 4.6) corresponde uma relação a/c equivalente de 2,86. Interessante o facto do BTC com 20% RCC ter atingido a mesma resistência para um valor de porosidade 10% superior, mas idêntico a/l (2,66).

Na Figura 4.12 apresenta-se a evolução da resistência à compressão e P_T em função do teor de RCD nos BTC com 8% CP.

Tal como nos betões de baixa resistência, a resistência à compressão dos BTC tende a ser condicionada pela matriz ligante e pela forma como esta se liga às diferentes partículas do solo (Houben & Guillaud, 2008). Neste caso, se a resistência das partículas de solo não for demasiado baixa, o aumento da sua porosidade pode permitir uma melhor ligação entre estas e a matriz ligante (Kerali, 2001; Young et al., 1998), o que pode ser favorável na utilização de AR. Por outro lado, conforme discutido em 4.3, a incorporação de maiores teores de RCD melhorou ligeiramente a compacidade da mistura granular, conduzindo a menores valores de P_T (Figura 4.12). Assim, até poderia ser esperado um ligeiro aumento de desempenho nos BTC com maior teor de RCD, conforme observado em 4.1. Porém, isso não foi observado, constatando-se que a substituição de solo por até 25% de RCD teve uma influência muito pouco significativa na resistência à compressão (Figura 4.12). O ligeiro aumento na resistência média à compressão dos BTC com 15% RCD poderá estar relacionado com o menor a/l utilizado nesta mistura face às restantes (Figura 4.12).

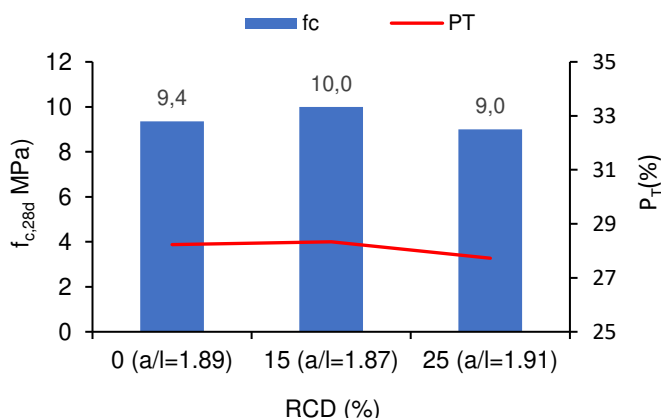


Figura 4.12 - Variação da resistência à compressão e porosidade total com o teor de RCD. BTC com 8% de CP

Tendo em consideração os BTC com RCC, também se verifica que a substituição de solo por 25% RCD (8RCC versus 8RCC25RCD) conduziu a uma variação desprezável de P_T e da resistência à compressão (inferior a 1%), inserida na variabilidade do próprio ensaio.

Assim, apenas se pode concluir que a incorporação de RCD é viável, podendo-se atingir soluções mais sustentáveis, associadas à menor exploração de recursos naturais e uma maior reutilização de resíduos, sem comprometer o seu desempenho mecânico.

Finalmente, constata-se que a substituição de 25% de RCD por igual quantidade de HQRS conduziu a um aumento da porosidade total, que se refletiu na redução da resistência à compressão (Figura 4.13). Conforme discutido em 4.2, dado que a substituição de HQRS não foi realizada de modo a não alterar a granulometria dos BTC, ocorreu um afastamento da curva teórica de máxima compactidade. Porém, a variação de resistência e porosidade foi superior nos BTC com RCP do que com CP, indicando que a alteração de granulometria não terá sido a única razão para os resultados obtidos. De facto, as misturas com HQRS foram produzidas com um ligeiro aumento de a/l, tendo sido mais significativo nos BTC com RCP (Figura 4.13).

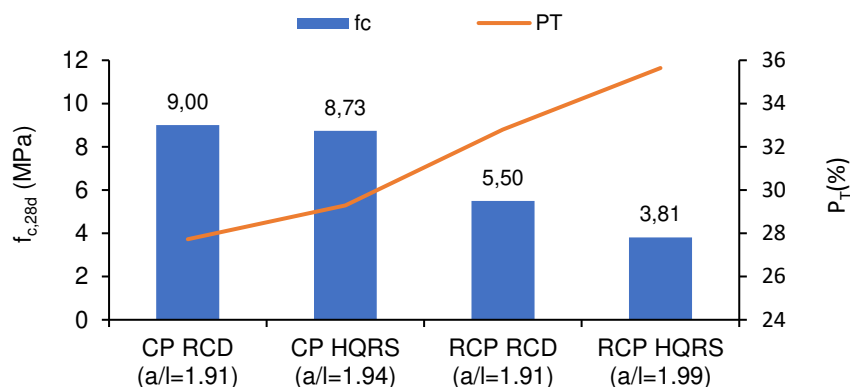


Figura 4.13 - Resistência à compressão e porosidade total de BTC com 25% RCD ou 25% HQRS e CP ou RCP

4.5 Resistência à tração

Na Tabela 4.7, apresentam-se os valores médios aos 28 dias e os respetivos coeficientes de variação referentes aos ensaios por compressão diametral e por flexão.

Tabela 4.7 - Resistência média à tração e à compressão diametral aos 28 dias

	Mistura	a/l _{efet.}	P _T (%)	f _{ctsp,28d} (MPa)	CV _{fctsp,28d} (MPa)	f _{ctr,28d} (MPa)	CV _{fctr,28d} (MPa)
CP	8CP25RCD	1,91	27,7	0,5	7,9	1,2	5,6
	8CP15RCD	1,87	28,3	0,5	22,1	-	-
	8CP	1,89	28,2	0,5	9,1	-	-
	8CP32,5_25RCD	1,97	30,9	-	-	1,0	8,8
	8CP25HQRS	1,94	29,3	0,3	6,2	-	-
RCP	8RCP25RCD	2,72	37,1	0,2	2,7	0,5	7,7
	8RCP25RCD14TW	1,91	32,8	0,2	15,8	0,6	20,3
	RRCP25HQRS	1,99	35,6	0,1	2,4	-	-
RCC	8RCC	2,70	35,2	0,1	7,6	0,3	4,9
	8RCC25RCD	2,69	35,5	0,1	13,4	0,3	2,9
NE	NE25RCD	0,00	32,1	0,1	3,7	0,3	32,0

Nos betões de referência com 8% CP a resistência à tração por compressão diametral (f_{ct,sp}) variou entre 0,34 e 0,51 MPa e a resistência à tração por flexão, ou módulo de rotura (f_{ct,r}), variou entre 1,04 e 1,16 MPa. Estes valores são da ordem de grandeza do obtido por outros autores (Azevedo, 2021). Silva (2015), também tendo em conta BTC com 8%CP, reporta valores semelhantes de f_{ct,sp} e f_{ct,r}, de

0,61 MPa e 1,19 MPa, respetivamente. Eventuais diferenças estão relacionadas com a diferente geometria e teor em água dos blocos.

Na Figura 4.14 constata-se uma elevada correlação entre a resistência à compressão e a resistência à tração, tanto para a flexão como para a compressão diametral. Isso já seria expectável em virtude destas propriedades dependerem essencialmente dos mesmos fatores, nomeadamente a porosidade e tipo de ligante.

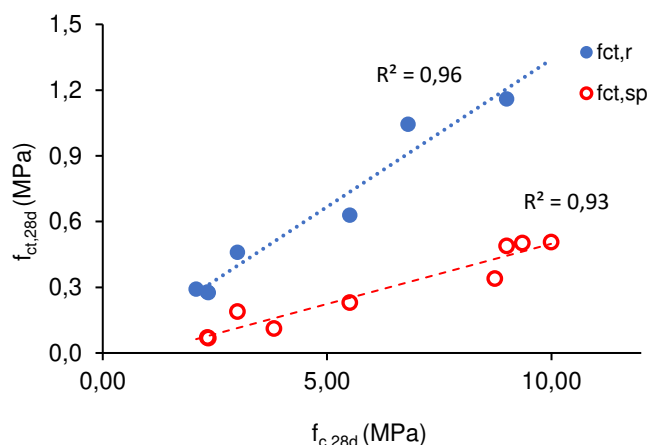


Figura 4.14 - Relação entre a resistência à compressão ($f_{c,28d}$) e a resistência à tração por flexão ($f_{ct,r}$) e compressão diametral ($f_{ct,sp}$) aos 28 dias

A menor resistência à tração foi obtida nos ensaios de compressão diametral, visto que nestes testes a solicitação é mais próxima de um estado de tensão axial. Para provetes de betão refere-se que a resistência à tração axial é cerca de 90% da resistência à compressão diametral, $f_{ct,sp}$ (EN 1992-1-1, 2004) Por sua vez, na resistência à tração por flexão, ou módulo de rotura, $f_{ct,r}$, a relação tensão-extensão deixa de ser linear, ocorrendo plastificação das fibras externas da secção, com redistribuição das tensões pelas fibras intermédias (Bogas, 2011; Canovas & Fernandez, 2004). Assim, $f_{ct,r}$ tende a sobrestimar a resistência à tração axial, reportando-se para betões valores até cerca de 2 vezes superiores (Canovas & Fernandez, 2004; Dreux & Festa, 2002). Estes valores dependem do esquema de ensaio, sendo mais baixos para ensaios de flexão com carga pontual a meio vão (como realizado neste trabalho, 3.6.2) e em blocos de menor espessura (Bogas, 2011; EN 1992-1-1, 2004).

No presente estudo, $f_{ct,r}$ foi cerca de 2.4 a 4 vezes maior do que $f_{ct,sp}$, dependendo da composição. A diferença foi maior nos BTC com RCC e NE, associados a menor resistência mecânica, e foi semelhante nos BTC com CP e RCP. Uma tendência semelhante foi observada por Silva (2015), que reportou aumentos de $f_{ct,r}$ face a $f_{ct,sp}$ de 2 para BTC com CP e 3,1 para NE.

Em qualquer dos casos, face ao anteriormente referido, obteve-se uma maior diferença entre $f_{ct,r}$ e $f_{ct,sp}$, do que poderia ser esperado. Isso resulta das resistências à tração serem baixas nos BTC, em especial nos NE. De notar ainda que os BTC foram ensaiados em diferentes direções, sendo que a resistência à tração por compressão diametral é medida na direção perpendicular à face de assentamento do bloco e a resistência à flexão segundo a direção paralela. Acrescente-se ainda que a variabilidade destes ensaios pode ser muito elevada, tal como observado na Tabela 4.7, justificado pela reduzida capacidade de deformação e baixa energia de rotura dos BTC.

A resistência à flexão foi cerca de 11-15% da resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral cerca de 3-6% da resistência à compressão. Estes fatores podem variar muito entre autores, dependendo do tipo de ensaio (compressão e tração) e da geometria e teor de humidade dos blocos. Por exemplo, Silva (2015) refere rácios de 15% para $f_{ct,sp}$ e 28% para $f_{ct,r}$, ao passo que Azevedo (2021) reporta 8-10% para $f_{ct,sp}$ e 16-23% para $f_{ct,r}$.

Por um lado, como observado em 4.4, a resistência à compressão depende da relação H/L, sendo mais correto estabelecer o rácio com a compressão não confinada. Por outro lado, a resistência à tração por flexão é afetada pela distribuição do teor de humidade na espessura do provete. De facto, quando os BTC são sujeitos a secagem durante a cura ao ar, o interior dos blocos seca mais lentamente, ocorrendo retração da região extrema sobre o núcleo. Nesse caso geram-se tensões de tração nas fibras extremas que reduzem a resistência à tração. Este fenómeno deve ser mais relevante na flexão do que na compressão diametral.

Assim, uma comparação mais correta destes rácios entre diferentes autores exigiria ter em consideração a resistência compressão não confinada e condições de humidade uniformes (seca ou saturada).

Visto que se observa uma forte relação entre a resistência à tração e à compressão, no geral, a influência do tipo de estabilizante e do teor e tipo de RCD segue a mesma tendência em ambas as propriedades. Neste caso, $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,r}$ foi cerca de 53% e 46% inferior nos BTC com RCP do que com CP de igual TW, respetivamente. Tal como discutido em em 4.4. isso justifica-se essencialmente pela maior porosidade atingida nos BTC com RCP4, que se correlaciona bem com a resistência à tração (Figura 4.15). Ainda assim, $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,r}$ no BTC estabilizado com RCP foi 3,2 e 2,2 vezes superior à do NE, respetivamente, demonstrando mais uma vez a boa eficiência do CR na estabilização dos BTC. No entanto, a resistência à tração nos BTC com 8%RCC foi particularmente baixa, sendo cerca de 63% ($f_{ct,sp}$) e 40% ($f_{ct,r}$) inferior à do BTC de referência com CRP de igual TW. Neste caso, a resistência à tração atingida foi idêntica à do NE, apresentando ambas as misturas baixa coesão. As baixas resistências afetam a sensibilidade do ensaio, dificultando a análise comparativa entre resultados, o que justifica a dispersão observada na Figura 4.15 para a região dos BTC de elevada porosidade total. Estes resultados foram pouco promissores, visto que coloca em causa a viabilidade e eficiência do RCC. Isso resulta da melhor capacidade ligante do RCC face à fração argilosa do NE, ter sido compensada pelo aumento significativo de porosidade total (36% no BTC com RCC face a 32% no NE, 4.3). Note-se ainda que para o BTC 12RCC25RCD, cuja contaminação do agregado foi compensada pelo aumento de teor de ligante, não foi realizado este ensaio.

Quando se fez variar o teor de RCD nos BTC com 8% CP, verificaram-se novamente diferenças pouco significativas, concluindo-se que este teve fraca influência na resistência mecânica (Figura 4.16). O mesmo foi verificado entre os BTC com RCC e 0% ou 25% RCD (Tabela 4.7). Tal como observado em 4.4, o BTC com 15% RCD, associado a menor a/l, apresentou um ligeiro aumento de $f_{ct,sp}$.

Em relação à substituição de 25% de solo por 25% HQRS nos BTC com 8%CP, ocorreu uma quebra de 33% na resistência à tração, superior ao observado para a resistência à compressão (13%, 4.4). Esta redução dos BTC com HQRS resulta essencialmente destes terem apresentado maior porosidade total e maior relação a/l.

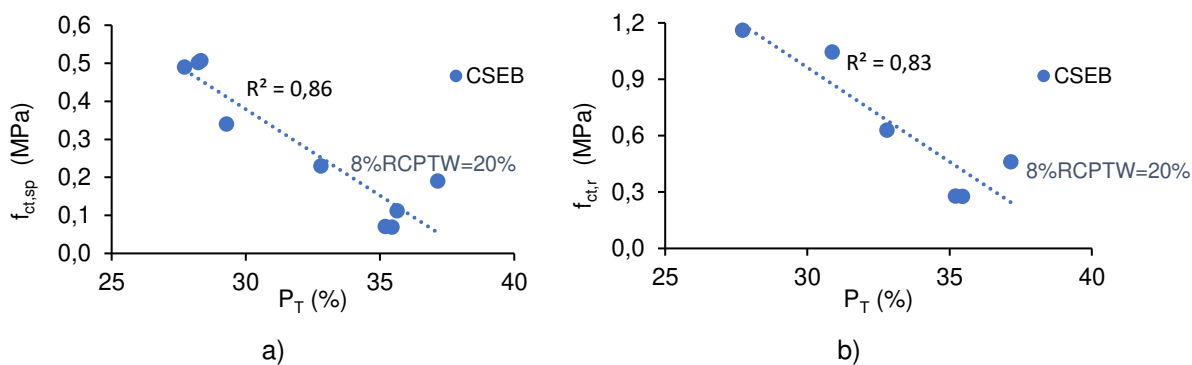


Figura 4.15 – Relação entre a resistência à tração aos 28 dias e a porosidade total; a) resistência à tração por flexão; b) resistência à tração por compressão diametral

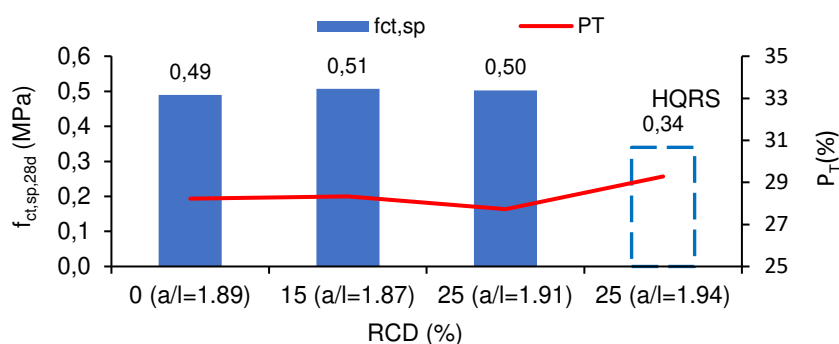


Figura 4.16 - Relação entre resistência à tração por compressão diametral, porosidade e teor de agregado reciclado para percentagens de substituição de 0%, 15% e 25% de RCD

A norma HB 195 (2002) indica valores mínimos de 0.35 MPa para a resistência à flexão, verificando-se apenas que os BTC não estabilizados ou com RCC não cumprem este limite (Tabela 4.7). Como referido, os ensaios são afetados pelas condições de humidade dos provetes, não só porque a resistência mecânica depende do teor em água dos blocos, mas também porque a distribuição de humidade na espessura do bloco afeta a resistência à tração.

4.6 Módulo de elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade envolveu um número mais limitado de misturas, tendo-se privilegiado as misturas de referência com 25% RCD, não estabilizadas (NE) e com 8% CP e 8% RCP, de igual TW. De modo a analisar o efeito do teor de RCD, foi ainda ensaiado o BTC com 8% CP e sem incorporação de agregado reciclado. Na Tabela 4.8 resumem-se os resultados obtidos.

O valor médio do módulo de elasticidade variou entre 0,78 GPa e 3,62 GPa, dependendo das condições de estabilização, o que salienta a sua importância nesta propriedade.

Azevedo (2021), considerando um teor de 10% CP, obteve um valor médio de 2,8 GPa, cerca de 22% inferior ao obtido no presente estudo no BTC com 8% CP. Este resultado está de acordo com as diferenças de resistência à compressão e porosidade total verificadas, conforme discutido em 4.4.

Na Tabela 4.8 é possível confirmar uma tendência geral de redução do módulo de elasticidade com o aumento da porosidade total para os BTC estabilizados. Porém, essa relação deixa de ser válida nos BTC não estabilizados, pois a rigidez não depende apenas da porosidade do material, mas também

da forma como se ligam as partículas entre si. Neste caso, a capacidade ligante foi bastante superior quando se adicionou CP ou RCP.

Visto que o módulo de elasticidade, tal como a resistência à compressão, dependem essencialmente do teor de vazios e capacidade ligante da matriz que envolve o agregado, observa-se uma correlação elevada entre estas propriedades (Figura 4.17). Assim, em geral, as mesmas tendências e justificações apresentadas em 4.4 relativamente à influência do tipo de ligante e teor de RCD são válidas para o módulo de elasticidade.

O BTC com 8% RCP apresentou um módulo de elasticidade 31% inferior ao do BTC com CP e cerca de 3,2 vezes mais elevado do que o NE. Este valor foi também cerca de 20% superior ao dos BTC com 8% CP produzidos por Azevedo (2021), tendo-se beneficiado de uma melhor otimização das misturas produzidas no presente trabalho. Para a mesma compacidade, a redução do módulo de elasticidade nos materiais de base cimentícia com incorporação de CR é também atribuída à menor rigidez e dureza das suas partículas de natureza porosa (Carriço et al., 2020; Yu & Shui, 2013). Ainda assim, foi atingido 2,5 GPa nos BTC com RCP, igual ao reportado por Bahar et al. (2004) em BTC com 10% CP.

Mais uma vez, a incorporação de até 25% RCD teve influência pouco significativa nas características mecânicas dos BTC, neste caso no módulo de elasticidade (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 - Módulo de elasticidade aos 28 dias

Mistura	ρ_{28d} (kg/m ³)	P _T (%)	$f_{c,28d}$ (MPa)	E_{28d} (GPa)
8CP25RCD	2048	27,7	9,0	3,6
8CP	2042	28,2	9,4	3,6
8RCP25RCD14TW	1966	32,8	5,5	2,5
NE25RCD	1938	32,1	2,1	0,8

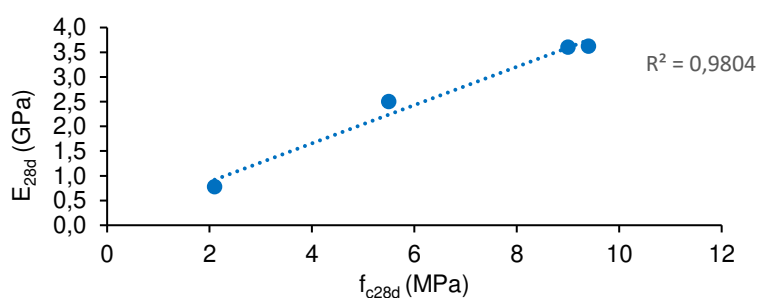


Figura 4.17 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão aos 28 dias

4.7 Velocidade de propagação de ultrassons

Na Tabela 4.9, apresentam-se os valores da velocidade de propagação de ultrassons, V_{us} , obtida aos 28 dias de idade. Esta variou entre 1239 m/s e 2300 m/s, tendo sido mais alta do que a verificada por Azevedo (2021) e Silva (2015), envolvendo BTC com 0 a 10% de CP (1000 m/s a 1700 m/s). As diferenças resultam essencialmente de se ter atingido soluções de maior compacidade no presente estudo.

É sabido que para sólidos homogêneos, V_{us} relaciona-se de forma diretamente proporcional com a raiz quadrada do quociente entre o módulo de elasticidade dinâmico e a massa volúmica (Bogas et al., 2013; Nazarian et al., 1997). Assim, é de esperar que os BTC associados a menor rigidez e maior porosidade apresentem menor valor de V_{us} . Por sua vez, como a resistência à compressão se relaciona com estas propriedades, na Figura 4.18 verifica-se uma correlação razoável entre a resistência à compressão e V_{us} . A correlação entre V_{us} e a porosidade total só é elevada, quando se considera em separado o tipo de estabilização. Isso justifica-se pelo facto de V_{us} depender também da rigidez, para além da porosidade, que conforme se discutiu em 4.6, é afetada pela forma como a matriz ligante une as diferentes partículas do solo. Conclui-se assim, que o ensaio não destrutivo de ultrassons é adequado na distinção de BTC de diferente qualidade.

Tabela 4.9 - Velocidade de propagação de ultrassons

	Mistura	TW (%)	ρ (kg/m ³)	P_T (%)	$f_{c,28d}$ (MPa)	$V_{us, 28d}$ (m/s)
CP	8CP25RCD	14	2048	27,7	9,0	2304
	8CP15RCD	14	2030	28,3	10,0	2209
	8CP	14	2042	28,2	9,4	2076
	8CP32,5_25RCD	14	1960	30,9	6,8	2085
	8CP25HQRS	14	1963	29,3	8,7	2049
RCP	8RCP25RCD	20	1879	37,1	3,0	1509
	8RCP25RCD14TW	14	1966	32,8	5,5	1668
	8RCP25HQRS	14	1882	35,6	3,8	1432
RCC	8RCC	20	1892	35,2	2,3	1239
	20RCC80CP25RCD	20	1970	34,1	6,8	2047
	50RCC50CP25RCD	20	1970	34,2	4,9	1937
	8RCC25RCD	20	1927	35,5	2,4	1303
	12RCC25RCD	20	1919	35,5	3,1	1353
NE	NE25RCD	12	1938	32,1	2,1	1298

Importa referir que V_{us} é fortemente afetada pelo teor em água dos BTC, visto que as ondas se propagam mais rapidamente em meio líquido. Assim, alguma variabilidade decorre dos provetes terem sido ensaiados com teores variáveis de humidade, em função do seu grau de secagem após condicionamento em laboratório.

Para um aumento de 18% na porosidade total, ocorreu uma redução de 39% na resistência à compressão e 28% em V_{us} , quando se substituiu 8% CP por 8% RCP nos BTC de igual TW (Tabela 4.9). Ou seja, existe uma menor diminuição de V_{us} face a f_c , o que está de acordo com a tendência dada pela relação teórica destas propriedades, $V_{us} \propto f_c^{1/4}$ (Bogas et al., 2013).

Na Figura 4.20 analisa-se a variação de V_{us} em função do teor de RCC. Adotando o mesmo raciocínio utilizado em 4.4 para a análise da variação de resistência à compressão com o teor de RCC, procedeu-se à estimativa do valor de V_{us} para a composição com 8% CP e TW=20%, sabendo que esta possui uma porosidade total de 33.4%. Assim, com base na Figura 4.19, estimou-se um valor de V_{us} de 1728 m/s para 0% RCC. Tal como verificado para a resistência à compressão, em geral a substituição de CP por RCC diminuiu o valor desta propriedade com o aumento de RCC, embora o

maior valor tenha sido atingido para 20% RCC. Isso contraria o aumento de porosidade face à mistura com 0% RCC, mas está de acordo com o aumento verificado na resistência à compressão.

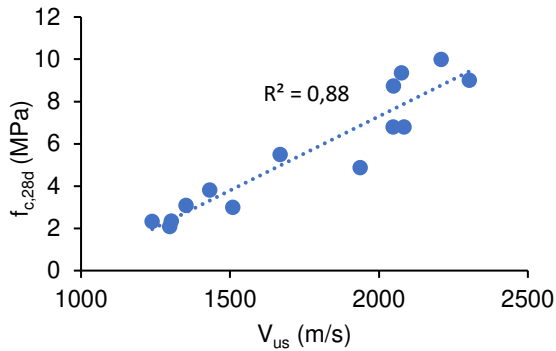


Figura 4.18 - Relação entre V_{us} e a resistência à compressão, f_c

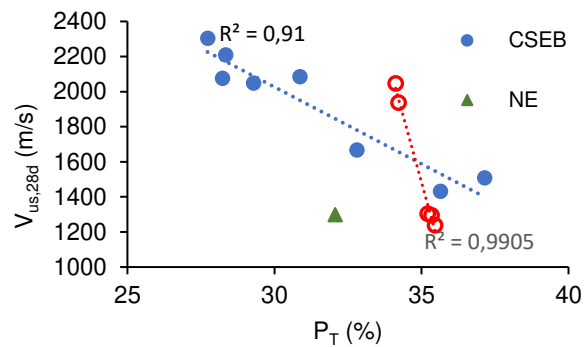


Figura 4.19 - Relação entre V_{us} e a porosidade total, considerando diferentes tipos de ligante

Em particular, os BTC com 20% RCC apresentaram V_{us} semelhante aos BTC 8CP32,5, apesar de terem sido produzidos com mais 11% de porosidade total. A consideração de 12% RCC (12RCC25RCD) conduziu a apenas um ligeiro aumento de V_{us} , mas que é compatível como aumento de $f_{c,28d}$ observado em 4.4. Finalmente, apesar da porosidade ter sido 10% superior, V_{us} foi ligeiramente superior neste BTC do que no NE, o que significa que se terá atingido uma melhor coesão entre partículas e uma maior rigidez com a incorporação de RCC.

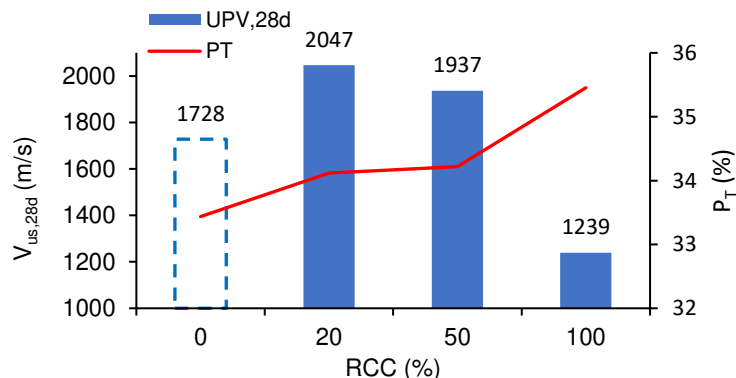


Figura 4.20 - Variação de V_{us} e da porosidade total com o teor de RCC em substituição de CP

Ao contrário do observado em outras propriedades analisadas no presente trabalho, V_{us} aumentou claramente com a percentagem de incorporação de RCD (Figura 4.21). A variação de rigidez foi pouco significativa para 0 e 25% RCD (4.6), não sendo a razão para as diferenças observadas. Nos BTC com maior teor de RCD verificou-se uma ligeira diminuição da porosidade total, em sintonia com o aumento de V_{us} . No entanto, ocorreu também um aumento de V_{us} entre 0 e 15% RCD, apesar da porosidade total ter sido idêntica. Assim, outro fator terá contribuído para o aumento de V_{us} . Uma razão deverá estar relacionada com o maior teor de água inicial nas misturas com RCD e a sua maior lentidão de secagem. De facto, durante a cura em laboratório, os RCD têm capacidade de restituir parte da água de absorção para a matriz circundante atrasando a sua secagem e aumentando o teor em água dos BTC. Isso é observado em 4.11 quando se discute a retração. Desse modo, o maior teor de humidade nos BTC com maior teor de RCD faz com que V_{us} aumente de forma proporcional, para níveis

semelhantes de porosidade total. Porém, nos BTC com RCC, o aumento de V_{us} foi pouco significativo com o aumento de RCD.

Como verificado em 4.2 - 4.4, a incorporação de HQRS promoveu um aumento da porosidade total, conduzindo à redução da resistência mecânica. Neste caso, V_{us} foi similar à da mistura sem RCD (8CP) e significativamente inferior à do BTC com 25% RCD. Por um lado, a porosidade total foi superior no BTC com HQRS, e mais próxima da obtida em 8CP. Por outro lado, visto que HQRS apresenta menor absorção do que o RCD, o efeito de cura interna é menos relevante, e o teor de humidade tende a ser inferior, diminuindo V_{us} .

No restante confirma-se o menor valor de V_{us} quando se considerou a incorporação do ligante mais fraco, CEM 32.5 IIB/L, e o incremento de TW de 14 para 20%.

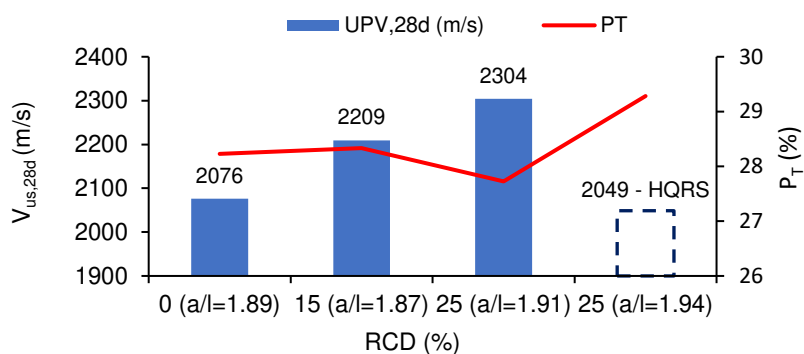


Figura 4.21 - Variação de V_{us} e porosidade total com o teor de agregado reciclado, para percentagens de substituição de 0%, 15% e 25% de RCD ou 25% HQRS nos BTC com 8% CP

4.8 Esclerómetro pendular

O outro ensaio não destrutivo analisado neste trabalho foi o do esclerómetro pendular, envolvendo o impacto de uma massa pendular na superfície dos BTC. Com isso pretende-se obter uma ideia da dureza superficial do bloco, que indiretamente se tenta relacionar com a sua resistência mecânica. Na Figura 4.22 resumem-se os valores médios do índice esclerométrico (IE), cujos os resultados individuais por composição se apresentam-se no Anexo A7.

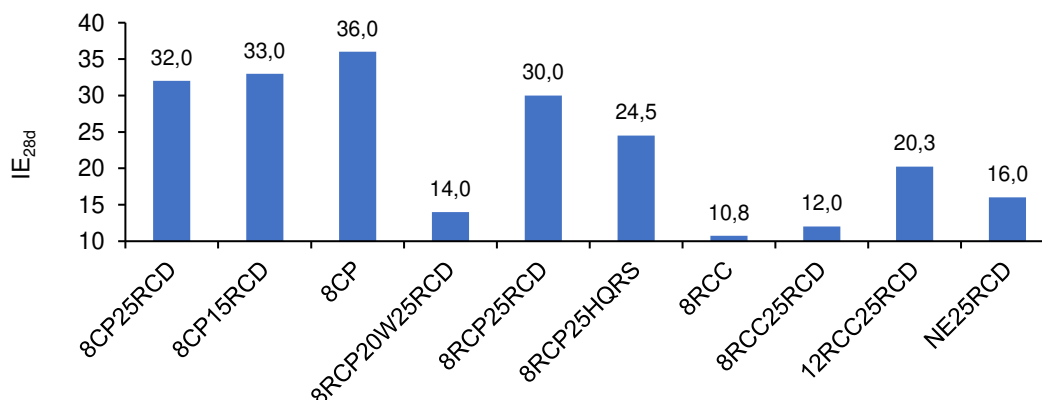


Figura 4.22 - Índice esclerométrico

Em geral, verifica-se que os BTC associados a maior porosidade total apresentaram menor IE aos 28 dias (Figura 4.23). Afastam-se da tendência os BTC não estabilizados ou com 8%RCC, cujo o ligante

não permite uma coesão tão forte entre partículas. Tal como observado em 4.6, estes BTC estão associados a uma quebra de rigidez importante. A correlação melhora quando se tem em conta a resistência à compressão (Figura 4.24), pois esta propriedade também já é afetada simultaneamente pela rigidez e pela porosidade. O incremento do TW de 14 para 20% teve grande impacto no IE na forma como promoveu o aumento significativo da porosidade e a redução da capacidade de ligação da matriz ligante.

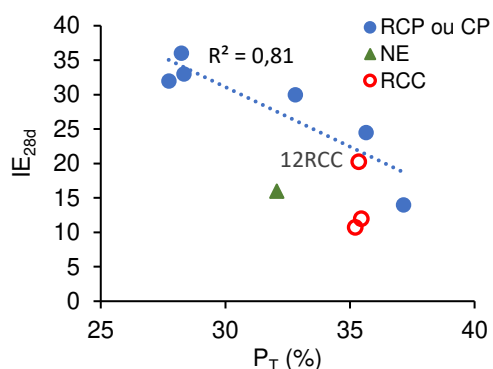


Figura 4.23 - Relação entre a porosidade total e o índice esclerométrico aos 28d

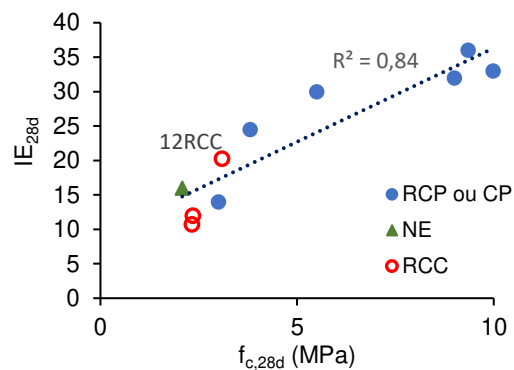


Figura 4.24 - Relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico aos 28d

Para grandes diferenças de porosidade o IE foi capaz de distinguir de forma adequada BTC de diferente qualidade. Porém, a variabilidade e imprecisão deste ensaio pode ser elevada, pois depende muito das características da superfície onde ocorre o impacto. A presença de uma região com agregado de diferente dureza ou porosidade pode distorcer os resultados. Por exemplo, ao contrário do observado em outras propriedades, o IE aumentou de forma proporcional com o incremento de RCD nos BTC com 8% CP (Figura 4.22), mesmo tendo em conta que a mistura com 25% RCD possuía menor porosidade total. Neste caso, a presença de RCD de natureza porosa junto à superfície pode reduzir a resistência ao impacto.

Destaca-se o facto dos BTC com 8% RCP e igual TW terem apresentado idêntico desempenho aos BTC de referência com 8% CP. Para baixos valores de IE a influência das heterogeneidades na superfície e a variabilidade do ensaio é maior, dificultando a comparação entre misturas. Porém, salienta-se o comportamento diferenciado do 12RCC25RCD, em que a compensação da fração contaminada do agregado, permitiu melhorar a resistência superficial deste BTC face ao BTC com 8% RCP de igual TW. Com base neste e noutros ensaios, conclui-se que é adequado compensar a contaminação de agregado com o aumento do teor de ligante.

4.9 Abrasão superficial

O coeficiente de abrasão (CA), traduzido pela Equação (10) em 3.6.8, dá uma ideia da resistência à abrasão superficial dos BTC, relacionando-se também de certa forma com a sua dureza superficial e coesão entre partículas. Na Figura 4.25 apresentam-se os valores de CA para os BTC estudados. Apenas para o BTC 12RCC25RCD não foi realizado o ensaio, devido à escassa quantidade de RCC que foi possível produzir.

Quanto maior o CA menor é a quantidade de material desagregado e maior é a resistência ao desgaste do BTC, verificando-se que isso sucedeu tendencialmente nos BTC estabilizados de menor porosidade total (Figura 4.26). Porém, verificou-se uma correlação pobre entre a porosidade total e o CA, que foi afetada pelos resultados menos esperados das misturas 8CPHQRS, 8CP15RCD e 8CP (Figura 4.26). Estes resultados foram difíceis de explicar em face da tendência observada em outros ensaios. Também se verifica uma fraca correlação entre a resistência à compressão e o CA (Figura 4.27), concluindo-se que este coeficiente não foi adequado para avaliar BTC de diferentes características mecânicas.

O resultado destes ensaios depende muito da condição de superfície do bloco e do operador que conduz o ensaio. Visto que a coesão entre partículas é um fator importante na sua resistência à abrasão, os BTC não estabilizados ou produzidos com TW de 20% apresentaram valores baixos de CA.

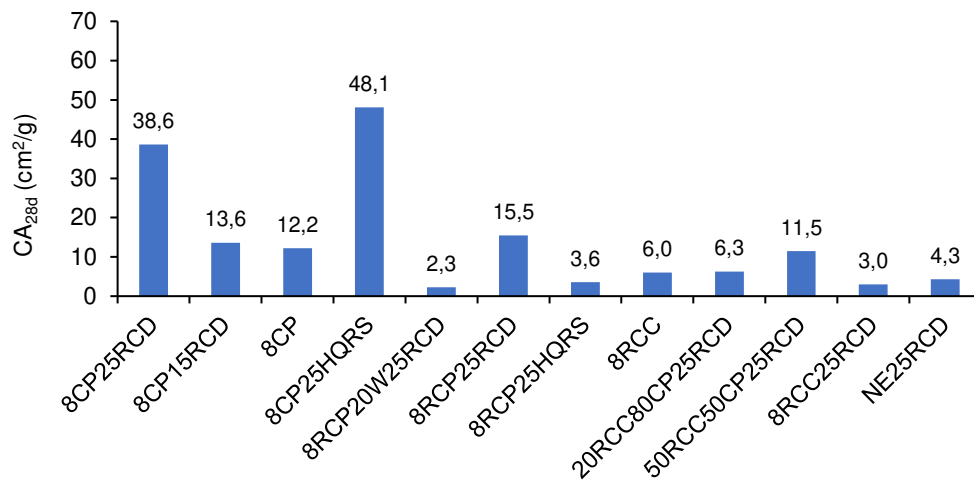


Figura 4.25 - Coeficientes de abrasão dos BTC

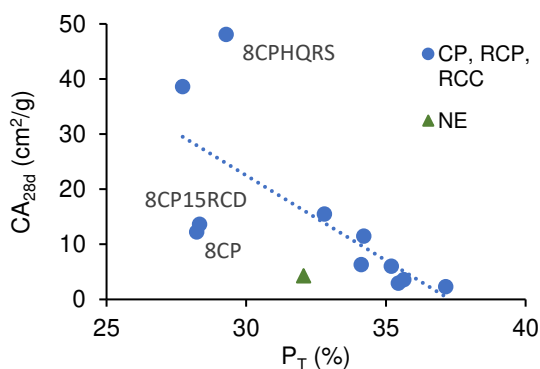


Figura 4.26 - Relação entre a porosidade total e o coeficiente de abrasão aos 28d

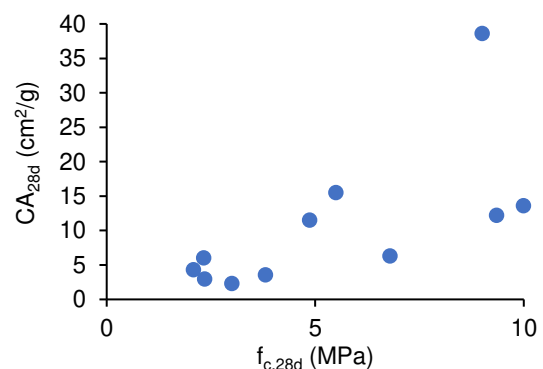


Figura 4.27 - Relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de abrasão aos 28d

Pela natureza dos ensaios, seria também de esperar uma correlação razoável entre CA e IE, pois ambos dependem da dureza e porosidade superficial dos BTC. Porém, isso não foi verificado (Figura 4.28).

Outro resultado menos esperado foi o obtido com 20% RCC, pois ao contrário do observado nas restantes propriedades, este BTC apresentou baixa resistência à abrasão. Também não é possível concluir sobre a influências do teor de RCD, pois foi favorável nas misturas com CP e desfavorável nos BTC com RCC. O mesmo se conclui do HQRS, sendo favorável para 8% CP e desfavorável para 8% RCP.

Apesar dos resultados serem pouco conclusivos, é possível salientar a importância da estabilização e do aumento de compacidade na resistência à abrasão dos BTC.

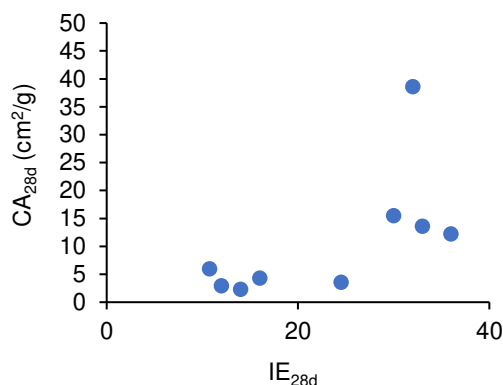


Figura 4.28 - Relação entre o índice esclerométrico e o coeficiente de abrasão aos 28d

4.10 Condutibilidade térmica

Os resultados relativos à determinação da condutibilidade térmica, λ , dos BTC resumem-se na Tabela 4.10, tendo em consideração diferentes teores de humidade (AC – cura ao ar, OD – seco em estufa, SAT - saturado). Na Figura 4.29 resumem-se estes resultados na forma gráfica.

A condutibilidade térmica dos BTC no estado seco variou em geral entre 0,60 e 0,81 w/m°C, dependendo da composição, em especial da porosidade total dos blocos. A exceção ocorreu nos BTC 20RCC80CP25RCD, cujo λ foi de apenas 0,42 w/m°C, cerca de 50 a 70% do λ dos restantes BTC. Não foi encontrada uma justificação para estes valores, constatando-se apenas que apesar da tendência de redução se confirmar no estado SAT e AC, as diferenças foram menores do que o observado no estado seco.

Visto que a condutibilidade térmica da água é cerca de 25 vezes superior à do ar, o teor de humidade dos blocos assume grande relevância nesta propriedade, aumentando significativamente a capacidade de condução de calor (Ashworth & Ashworth, 1991; Real et al., 2016). Para as diferentes misturas, a condutibilidade térmica dos blocos saturados foi cerca de 2,1 – 2,6 vezes superior à dos blocos secos, com exceção para 20%RCC, que como referido atingiu um valor inesperadamente baixo de λ . Por sua vez, a λ dos blocos em equilíbrio com o ambiente de laboratório foi apenas 1,1 – 1,6 vezes superior à dos BTC secos. Isso salienta que em condições normais de exposição em ambiente interior protegido da chuva, os blocos aproximam-se das condições secas. Apesar de em condições de exposição no laboratório, os BTC poderem apresentar diferentes níveis de secagem, as diferenças entre composições seguiram a mesma tendência.

Tabela 4.10 - Condutibilidade térmica medida para cada BTC

Mistura	TW (%)	ρ_{28d} (kg/m ³)	P _T (%)	λ_{28d} (W/m.°C)			
				AC	OD	SAT	
CP	8CP25RCD	14	2048	27,7	0,9	0,7	1,6
	8CP15RCD	14	2030	28,3	1,0	0,8	1,7
	8CP	14	2042	28,2	1,0	0,8	1,8
	8CP25HQRS	14	1963	29,3	0,8	0,7	1,5
RCP	8RCP25RCD	20	1879	37,1	0,7	0,6	1,2
	8RCP25RCD14TW	14	1966	32,8	0,8	0,6	1,6
RCC	8RCC	20	1892	35,2	0,8	0,7	1,7
	20RCC80CP25RCD	20	1970	34,1	0,7	0,4	1,3
	8RCC25RCD	20	1927	35,5	0,7	0,7	1,5
	12RCC25RCD	20	1919	35,3	0,8	0,7	1,7
NE	NE25RCD	12	1938	32,1	0,8	0,8	-

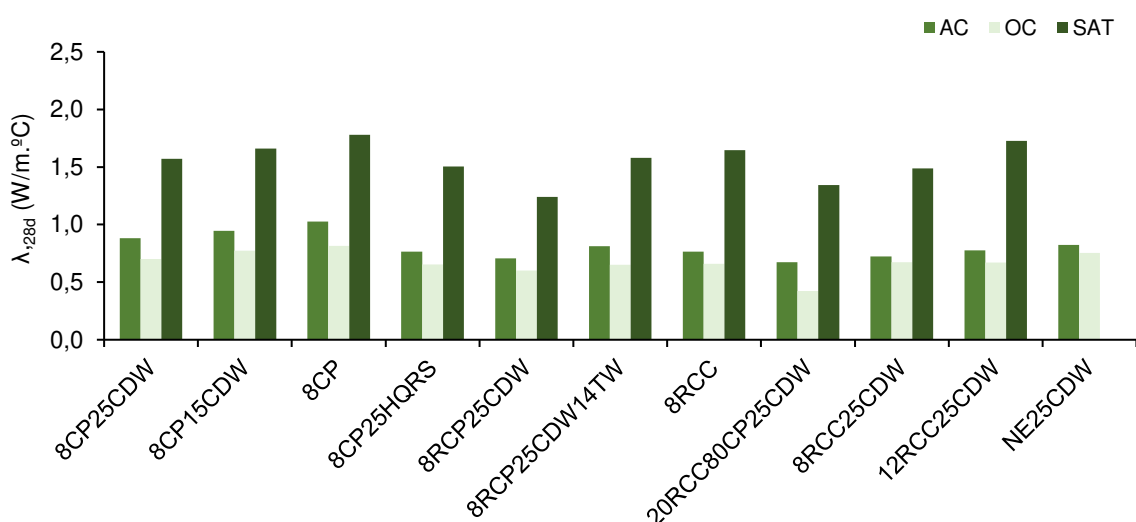


Figura 4.29 - Condutibilidade térmica mediante a condição de cura

Em geral, verifica-se uma tendência natural para a redução de λ com o aumento da porosidade total (Figura 4.30), com exceção para a mistura já referida, 20RCC25RCD. Porém, a correlação é baixa verificando-se casos em que apesar da porosidade total ter sido superior, λ foi mais elevado (8CP versus 8CP25RCD). Em parte, isso está relacionado com a elevada proximidade dos resultados obtidos, sendo difícil, dentro da variabilidade do próprio ensaio, distinguir os diferentes tipos de BTC. Para os BTC com RCP, o aumento do TW de 14 para 20% (8RCP25RCD) com conseqüente aumento da porosidade total, permitiu diminuir λ_{OD} em 8%. Porém, o aumento do TW e da porosidade nos BTC com RCC não reduziu o valor de λ (Figura 4.29).

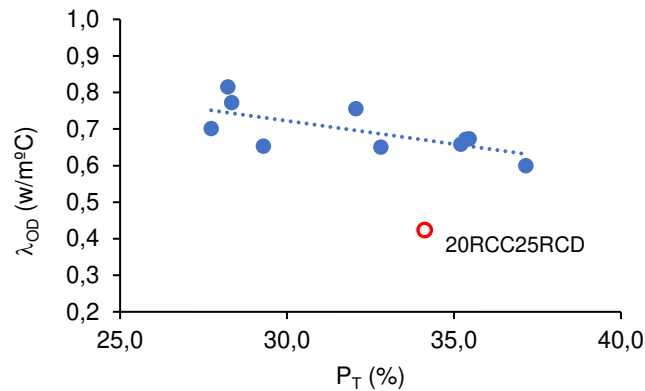


Figura 4.30 - Relação entre a porosidade total e a condutibilidade térmica dos BTC em estado seco, λ_{OD}

Por outro lado, λ , é ainda afetada por outros fatores para além da porosidade total. Ao contrário do observado em outras propriedades (4.3 - 4.5), λ diminuiu com o aumento da percentagem de incorporação de RCD (Figura 4.31). De certa forma, a substituição de solo por RCD poroso terá promovido uma redução de λ , apesar da capacidade dos BTC ter aumentado (4.2). No entanto, a mesma tendência não foi verificada quando se substituiu solo por 25% RCD nos BTC com RCC. Em relação à introdução de HQRS, a redução obtida em λ está de acordo com a maior porosidade total desta mistura (Figura 4.31). Deve ainda realçar-se a inexistência de dados para os blocos NE pela sua incapacidade de manter a integridade quando submersos em água.

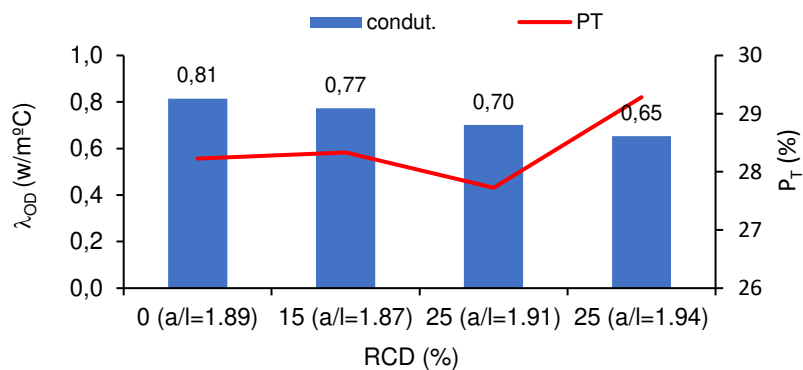


Figura 4.31 - Variação da porosidade total e da condutibilidade térmica dos BTC em estado seco, λ_{OC} , com o teor de RCD ou com a incorporação de HQRS

A capacidade de isolamento térmico de uma dada solução construtiva pode ser avaliada pelo coeficiente de transmissão térmica, U , que determina a permeabilidade de um dado elemento à transferência de calor. Este coeficiente pode ser calculado a partir da Equação (17), em que d_i é a espessura e λ_i a condutividade térmica de cada material que compõe essa solução construtiva, e R_{si} (0,13 m².°C/W) e R_{se} (0,04 m².°C/W) são as resistências superficiais interior e exterior, respetivamente, para elementos verticais.

De acordo com a Portaria nº138-I/2021 do diário da República, os elementos da envolvente corrente opaca dos edifícios devem apresentar um coeficiente de transmissão térmica superficial igual ou inferior a 0,90 W/m²°C, ou no caso de soluções construtivas em taipa ou similares, igual ou inferior a 1,30 W/m²°C. De acordo com o ITE50 (2006), os valores declarados são definidos para teores de

água de equilíbrio num ambiente com 23°C de temperatura e 50% de humidade relativa. De acordo com este documento, os valores de cálculo devem ser inferiores para ter em consideração agravamentos resultantes de condições específicas de utilização.

$$U = \frac{1}{\sum \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{si} + R_{se}} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (17)$$

Na Tabela 4.11 resumem-se os valores de U para uma parede simples de BTC com 14 cm de espessura (espessura corrente de BTC), tendo-se considerado os valores de λ para condições de laboratório (mais próximo do indicado no ITE50 2006), sem agravamento adicional para o valor de cálculo. Como esperado, nenhuma destas soluções cumpre as exigências do regulamento, visto que à semelhança do que sucede com qualquer material cerâmico, isso só seria possível aumentando significativamente a espessura do elemento ou incluindo materiais isolantes térmicos ($\lambda < 0,065 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, ITE50 2006), como é prática comum. Os BTC apresentaram cerca de 2,6 - 3 W/m²°C (Tabela 4.11), garantindo um nível de isolamento semelhante ao de uma parede simples de alvenaria com tijolo furado de 7 cm de espessura (U= 2.8 W/m²°C, ITE50 2006) e de uma parede com blocos de betão vazados de idêntica espessura – 15 cm (U= 2.7 W/m²°C, ITE50 2006). Em paredes de betão normal ou alvenaria de pedra as espessuras teriam de ser cerca de 30 e 50 cm, respetivamente, de modo a se atingir o mesmo desempenho dos BTC.

Considerando paredes duplas compostas por panos simples de 14 cm de espessura e uma caixa de ar superior a 25 mm (resistência térmica de 0,18 W/m²°C, ITE50 2006), os BTC produzidos apresentariam um U de 1,3 – 1,6 W/m²°C. Neste caso, apenas os BTC com RCP ou RCC de maior porosidade cumpririam o limite de 1.3 W/m²°C. Este aspeto é importante, pois permitiria encontrar uma solução sem necessidade de adicionar isolamento térmico.

Tabela 4.11 - Valores de U para parede simples de BTC e espessuras mínimas de painéis de BTC para U de 1,3 W/m²°C (com e sem isolamento e sem caixa de ar, Ca) e de isolamento térmico para parede simples de BTC

Observações		8CP 25RCD	8CP 15RCD	8CP	8CP HQRS	8RCP 20W	8RCP 25RCD	8RCC	20RCC 25RCD	8RCC 25RCD	13RCC 25RCD	NE 25RCD
U (W/m ² °C)	BTC (14 cm espessura)	3,04	3,14	3,27	2,83	2,72	2,92	2,83	2,65	2,75	2,86	2,94
X_{BTC} (cm)	Espessura de BTC em parede dupla para U= 1,3 W/m ² °C (sem caixa de ar)	52,8	56,6	61,6	45,9	42,4	48,7	45,9	40,4	43,3	46,6	49,3
X_{BTC} (cm)	Espessura de BTC em parede dupla para U= 1,3 W/m ² °C (com caixa de ar)	36,9	39,6	43,1	32,1	29,7	34,1	32,1	28,3	30,3	32,6	34,5
X_{XPS} (cm)	Espessura de de isolamento para U= 1,3 W/m ² °C (parede simples com 14 cm de espessura de BTC e XPS com 0,035 W/m°C)	1,0	1,1	1,2	0,9	0,8	0,9	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0

Na Tabela 4.11 apresenta-se a espessura mínima dos BTC de modo a cumprir a Portaria nº138-I/2021 (U=1,3 W/m²°C), tendo em consideração a presença ou não de caixa de ar. Sem caixa de ar, as paredes deveriam possuir cerca de 40 a 60 cm de espessura, de modo a cumprir o regulamento, e com

caixa de ar, cerca de 30 a 40 cm. Na Tabela 4.11 apresenta-se também a espessura de material isolante, como por exemplo poliestireno extrudido (0,035 W/m°C), necessária para que uma parede simples de BTC a uma vez (BTC de 14 cm de espessura) cumpra as exigências da Portaria nº138-I/2021.

Destaca-se o facto da substituição simultânea de CP por RCP e solo por RCD ter permitido uma redução de 11% no valor de U e 21% na espessura de BTC ou de isolamento térmico necessário para se atingir igual desempenho térmico.

4.11 Retração

O ensaio de retração foi realizado apenas para cinco composições, em que se fez variar o tipo de estabilizante e o tipo e teor de agregado reciclado. O estudo da retração foi iniciado aos 3 dias de idade e durou cerca de 50 dias, com os blocos expostos em câmara condicionada com temperatura média de 21,5 °C e 65 ± 5% de humidade relativa. Na Tabela 4.12 apresentam-se os valores da extensão de retração após 3 dias ($\epsilon_{cst,3d}$) e 50 dias ($\epsilon_{cst,50d}$) de medição, bem como os valores de porosidade total e módulo de elasticidade, ambos com influência nesta propriedade. As curvas de evolução da retração ao longo do tempo apresentam-se na Figura 4.32.

Tabela 4.12 - Retração após 3 e 50 dias

Mistura	a/l efe	ρ_{28d} (kg/m ³)	P_T (%)	$f_{c,28d}$ (MPa)	E_{28d} (GPa)	$\epsilon_{cst,3d}$ (x10 ⁻⁶ m/m)	$\epsilon_{cst,50d}$ (x10 ⁻⁶ m/m)
8CP25RCD	1,91	2048	27,7	9,0	3,6	426	1705
8CP	1,89	2042	28,2	9,4	3,6	589	2183
8CP25HQRS	1,94	1963	29,3	8,7	-	521	2414
8RCP25RCD14TW	1,91	1966	32,8	5,5	2,5	553	1373
NE25RCD	-	1938	32,1	2,1	0,8	1347	3045

Como esperado, a maior taxa de retração ocorreu durante os primeiros dias, tendendo para a estabilização após o primeiro mês de exposição (Figura 4.32). Dependendo do tipo composição, cerca de 20 a 40% da retração aos 50 dias ocorreu nos primeiros 3 dias. As extensões finais variaram entre 1,4 mm/m e 2,4 mm/m nos blocos estabilizados tendo atingido o valor máximo de 3 mm/m nos blocos não estabilizados. Estes valores foram bastante elevados, excedendo o limite de 0,5 mm/m recomendado na norma NZS 4298 (1998) para a construção em taipa e o limite de 0,45 mm/m recomendado na norma NTC 5324 (2004) para BTC estabilizados sujeitos a 50% de humidade relativa e 33 – 45 °C.

De acordo com Walker (1995) a retração depende essencialmente do índice de plasticidade (IP) do solo, ou seja do seu teor de argila, e com menos importância do teor de cimento. Porém para valores de IP inferiores a 20, como sucede no presente trabalho, este autor refere retrações inferiores a 0,4 mm/m, independentemente do teor de ligante. Apenas para valores de IP superiores a 30 verificam-se retrações na ordem de 2 - 5 mm/m. Assim, os valores anormalmente elevados obtidos no presente trabalho, onde o IP foi 5 (3.2.4), deverão estar relacionados com o facto do solo ser composto por minerais expansivos, do grupo da smectite. De facto, tendo em conta BTC de composições semelhantes, Arsene et al. (2020) verificou retrações volumétricas 100 vezes maiores quando utilizou

solos com argilas expansivas face a solos com a argilas cauliníticas ou ílíticas. Ainda assim, apesar de se terem atingido valores elevados de retração, todas as misturas foram produzidas com o mesmo tipo de solo, sendo válida a comparação relativa entre diferentes tipos de BTC.

Os BTC não estabilizados foram aqueles que apresentaram a taxa de retração inicial mais elevada (Figura 4.32), associado à contração da fração argilosa do solo e à fraca restrição imposta pela matriz às variações dimensionais, lembrando que apresentam módulo de elasticidade 3 - 4 vezes inferior ao dos BTC estabilizados (4.6).

Ao contrário do que poderia ser esperado, a menor retração aos 50 dias foi atingida nos BTC com 8% RCP, tendo sido cerca de 24% inferior à dos BTC de referência com 8% CP e igual TW. Assim, apesar da maior porosidade (4.2) e menor rigidez (4.6) dos BTC com RCP, a retração foi inferior à dos BTC com CP. Uma razão para esta tendência deverá estar relacionada com o maior refinamento atingido na microestrutura das matrizes de RCP, desde as idades iniciais (Bogas et al. 2020). Neste caso, a absorção de parte de água da mistura nas partículas porosas do RCP faz com que o espaço interpartícula diminua e a porosidade seja refinada (Bogas et al. 2020). Assim, por um lado aumenta a rigidez inicial da matriz e reduz a quantidade de água livre no sistema. Por outro lado, a acção capilar promovida pelos poros de menor dimensão tende a ser maior. Logo, para a mesma porosidade total, estas matrizes mais refinadas podem conduzir a maiores taxas de retração inicial (Cariço et al., 2022; Real et al., 2021), conforme observado na Tabela 4.12 e Figura 4.32 ($\epsilon_{cst,3d}$ mais elevado em 8RCP). No entanto, conforme observado por outros autores, em BTC (Azevedo 2021) ou em betões (Real et al., 2021), seria de esperar uma menor retração final nas misturas com CP, o que não se verificou. Não se encontra grande explicação para esta tendência, a não ser o facto de os BTC com RCP terem desenvolvido uma estrutura porosa mais grosseira a longo prazo, que conforme analisado mais adiante reduz a taxa de retração.

Nas misturas com 8% CP, em que se procedeu à substituição de 25% de solo por 25%RCD, ocorreu uma redução importante da retração a curto (28%) e a longo prazo (22%). Isso contraria alguns estudos em betão, em que a incorporação de agregado reciclado tende a aumentar a retração, devido ao incremento do teor de pasta e à redução da rigidez do betão (Bogas et al., 2016; Fortes, 2022). Porém, três motivos podem ser atribuídos à redução observada: a substituição de solo por RCD não conduziu a uma variação significativa do módulo de elasticidade (4.6); a inclusão de agregado reciclado poroso pode atuar como agente de cura interna, restituindo ao longo do tempo parte da sua água de absorção para a matriz cimentícia – isso faz com que a secagem seja mais lenta e com que os pequenos poros capilares promotores da retração eliminem a sua água mais tarde, quando a microestrutura já é mais densa e mais rígida; parte do solo, constituído por argilas expansivas, é substituído por RCD cuja retractilidade é inferior.

Principalmente pelo último motivo referido, teria sido esperado que os BTC com 25% HQRS apresentassem menor retração do que a mistura 8CP, o que não se verificou (Tabela 4.12 e Figura 4.32). Por um lado, como referido, os BTC com 25% HQRS foram produzidos com maior porosidade total e maior a/l efetivo (Tabela 4.12). Por outro lado, o HQRS apresenta menor absorção do que o RCD, não permitindo beneficiar do efeito de cura interna.

De modo a compreender melhor o fenómeno de retração dos BTC estudados, nas Figura 4.33 e Figura 4.34 apresenta-se a perda de massa ao longo do tempo e a sua relação com a evolução da retração, respetivamente. Tal como seria de esperar, os BTC não estabilizados (NE) e os BTC estabilizados de maior porosidade total (8RCP e 8CPHQRS) foram os que apresentaram maior perda de água ao longo do tempo. No caso dos NE, a água encontra-se num estado livre não combinado, acabando por ser mais facilmente eliminada. Assim, apesar destes BTC terem sido produzidos com maior compacidade e menor teor de água inicial, estão associados a maiores taxas e volumes de evaporação de água.

Na Figura 4.33 destaca-se o facto da perda de água total ter sido semelhante nos BTC com 0% (8CP) e com 25% RCD (8CP25RCD), demonstrando apresentarem microestrutura semelhante. Porém, como os BTC com 25% RCD foram produzidos com maior quantidade de água inicial (água extra de absorção nos RCD), a secagem foi mais lenta fazendo com que a quantidade de água na matriz circundante fosse superior. Como consequência deste efeito de cura proporcionado pelo agregado diminui o fenómeno de retração.

Por análise da Figura 4.34 verifica-se que após um período inicial a taxa de retração por variação de perda de massa aumentou nos BTC com CP, associados a menor porosidade total. De facto, nestes BTC o declive da curva começou por ser mais acentuado, associado à perda de água livre dos poros de maior dimensão, alterando depois para um menor declive, em que a perda de água promove uma maior retração (capilares mais refinados). Nestes BTC, apesar da rigidez aumentar, também aumenta a fonte de retração ao longo do tempo.

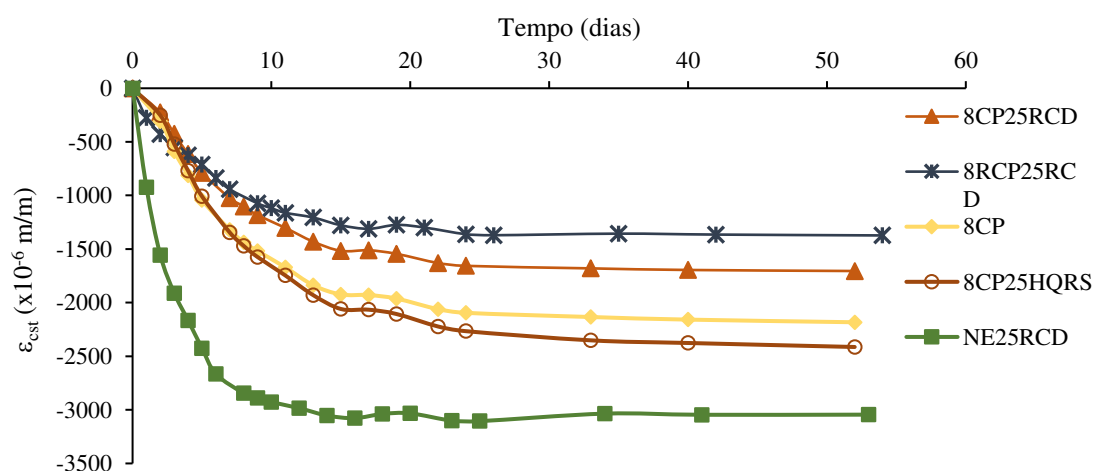


Figura 4.32 - Evolução da retração ao longo do ensaio

Por sua vez, nas misturas de maior porosidade, como é o caso de NE, observa-se um fenómeno contrário (Figura 4.34). Neste caso, a taxa de retração por perda de massa é maior no período inicial, diminuindo depois ao longo do tempo. Isso sugere que a retração no período inicial é essencialmente comandada pela contração da fração argilosa do solo. De facto, nos materiais argilosos, a maior variação dimensional ocorre no período inicial de secagem, enquanto as lamelas de argila ainda estão suficientemente afastadas entre si.

No caso dos BTC com 8%RCP verifica-se que estes também apresentam um maior declive da curva de retração versus perda de massa, estando associados a menores taxas de retração por

variação de massa. Isso indicia a formação de uma porosidade mais grosseira nos BTC com RCP, o que está em linha com a maior porosidade total calculada para estas misturas (4.2).

Finalmente, na Figura 4.34 verifica-se que a taxa de retração em função da perda de massa foi muito semelhante nos BTC com diferentes teores de RCD, sugerindo-se que estes terão desenvolvido microestruturas semelhantes.

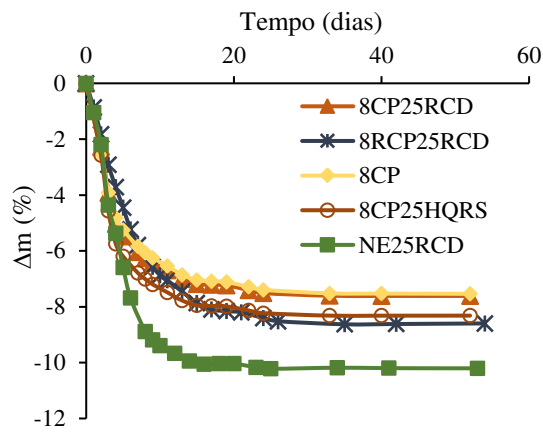


Figura 4.33 - Evolução da perda de massa ao longo do tempo de ensaio

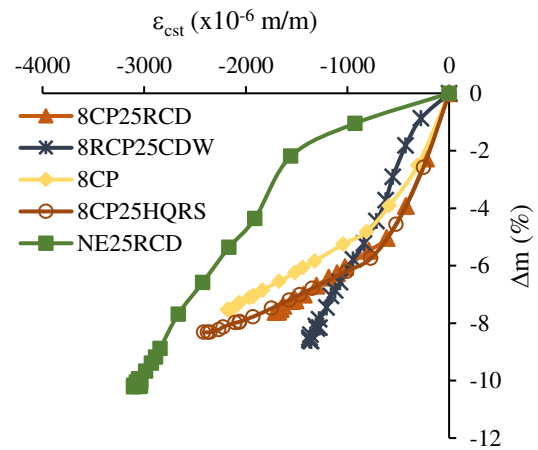


Figura 4.34 - Correlação entre a evolução da perda de massa e a retração dos BTC ao longo do tempo

5. Conclusões

No presente capítulo são apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho com o objetivo de analisar a eficiência do cimento reciclado na estabilização de BTC e da incorporação de diferentes agregados reciclados. Para tal foi desenvolvida uma campanha experimental onde se procedeu à produção de provetes de betão e de pasta com a/l de 0,55 para posterior obtenção de CR. Da separação do cimento reciclado de betão foi ainda possível extrair uma areia de melhor qualidade, a qual foi estudada para substituição parcial da terra. Tal como a HQRS, foi testada a hipótese da utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de betão. Para a produção de RCC, utilizou-se uma estratégia inovadora patenteada no âmbito do projeto *EcoHydB* (PTDC/EI-COM/28308/2017).

Em seguida, são apresentadas as principais conclusões bem como algumas sugestões de desenvolvimentos futuros.

5.1 Conclusões finais

Para a presente dissertação foi utilizado um solo com cerca de 20% a 25% de material fino (silte e argila) com um índice de plasticidade (4,70%) dentro daquilo que se tende a considerar adequado para a produção de BTC. Realça-se o baixo limite de liquidez que acaba por não cumprir os valores desejados. Para a estabilização química dos blocos, foi utilizado CP e CR obtido de pastas de cimento hidratado e de provetes de betão, ambos com mais de 3 meses de idade.

Como seria expectável, o CR apresentou maiores exigências de água e tempos de presa superiores ao CP. Foram realizados ensaios de termogravimetria e de difração de raio X por forma a aferir a adequada capacidade de hidratação do CR.

Na produção dos BTC obteve-se valores massa volúmica fresca entre os 2000 kg/m³ e os 2227 kg/m³, com valores de porosidades totais entre os 27,7% e 37,1%, um pouco inferior a outros autores, indicador da otimização das misturas para produção dos blocos. A natureza porosa do CR conduz a uma grande exigência de água, o que acaba por prejudicar a qualidade dos BTC pelo aumento da relação a/l efetiva e conseqüente porosidade. Os BTC com incorporação de RCC apresentam superior valor de porosidade total derivado do aumento do TW da mistura, minimizando o nível de compactidade dos blocos.

Consoante o tipo de ligante foi possível perceber que a resistência à compressão variou entre 2,8MPa e 9,99 MPa. A incorporação de 12% de RCC, de forma a compensar o material contaminado presente no CR, mostrou-se mais efetiva quando comparada com as composições de 8%, sendo possível alcançar valores semelhantes aos de RCP. Comparativamente com os blocos não estabilizados, é notória a melhoria de propriedades dos blocos promovida pela estabilização química. Foi ainda constatado que a incorporação parcial de CR, combinada com CP, promoveu resistências mecânicas superiores às apresentadas por blocos com introdução, somente, de CP. Como expectável, a tendência analisada nos ensaios de compressão seguiu-se nos ensaios de tração e flexão. No entanto, foi notória uma quebra significativa na resistência dos blocos com RCC quando comparados com CP. No geral, demonstra-se que a resistência mecânica dos blocos é afetada, maioritariamente, pelo teor de água com que se produz os blocos, afetando a compactidade do bloco,

acabando por se denotar uma baixa relevância do teor de ligante, ponto positivo para a garantia da viabilidade do CR.

Contrariamente ao que seria expectável a substituição de terra por RCD ou por HQRS acabou por não demonstrar uma melhoria significativa na capacidade resistente dos blocos. Tal resultado está associado ao facto de ter sido realizada a substituição direta de solo por RCD ou HQRS, fazendo alterar a granulometria da mistura, ou seja, a incorporação de AR afetou o desempenho dos blocos não só pelas suas características próprias, mas também pela alteração granulométrica das misturas prejudicando a compacidade granular.

Relativamente ao ensaio de propagação de ultrassons, é possível distinguir blocos de qualidades diferentes, uma vez que maiores porosidades e menores valores de rigidez conduziram a menores velocidades de propagação de ultrassons.

No que toca ao ensaio de condutibilidade térmica, é notória a influência do teor de humidade dos BTC, atingindo valores duas vezes superiores para blocos saturados comparativamente com blocos secos. O menor valor de condutibilidade tornou a coincidir com a mistura onde se incorpora CP e CR. Os resultados obtidos permitem comparar o desempenho dos presentes blocos com tijolos cerâmicos furados de semelhante espessura.

Por último, uma das grandes vantagens observadas ao longo do estudo assenta no facto de os blocos estabilizados terem a capacidade de manter a sua integridade mesmo quando submersos, cenário não replicável para blocos não estabilizados, uma vez mais comprovando a eficácia desta solução na resolução de um dos principais problemas da construção em terra.

5.2 Propostas de desenvolvimento futuro

O presente estudo permitiu, pela primeira vez, analisar a utilização de cimento reciclado de betão na estabilização de blocos de terra comprimida. Este poderá ser um dos primeiros passos para uma construção mais sustentável. Apesar da extensão do trabalho realizado e de se acreditar que possa contribuir para o aumento de conhecimento nesta área, é necessário continuar os trabalhos de modo a validar a hipótese apresentada. Em seguida, apresentam-se algumas propostas para desenvolvimentos futuros nesta matéria.

- Analisar mais níveis de compactação e avaliar o seu desempenho nos BTC
- Utilização de AR para idênticas condições de granulometria
- Estudar a utilização de solos sem argilas expansivas
- Caracterizar alvenarias de BTC em ambiente real
- Analisar a durabilidade, comportamento térmico e resistência à água da presente solução
- Estudar a viabilidade económica da produção da presente solução
- Analisar se a curva de Fuller utilizada é a mais adequada

6. Referências

- Abdulsalam, M., Abdulkarem, M., Olumide, E., & Hejazi, F. (2018). Effect of Addition of Silica Fume and Oil Palm Fiber on the Engineering Properties of Compressed Earth Block. *Civil Eng Res J*.
- Adam, E. (2001). *Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan* - Technical Note No. 12. UNESCO.
- Adam, E., & Jones, P. (2000). Thermophysical properties of stabilised soil building blocks. In *Building and Environment* (Vol. 30, pp. 245–253). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)00041-P](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)00041-P)
- Alonso, C., & Fernandez, L. (2004). Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of Materials Science*, 39. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000025827.65956.18>
- 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.
- Arsene, M., Frédéric, C., & Nathalie, F. (2020). Improvement of lifetime of compressed earth blocks by adding limestone, sandstone and porphyry aggregates. *Journal of Building Engineering*, 29. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101155>
- Ashworth, T., & Ashworth, E. (1991). Thermal conductivity of several concretes as a function of moisture. In *Insulation Materials: Testing and Applications (Graves RS and Wysocki DC (eds))*. ASTM International, West Conshohocken (pp. 415–429).
- ASTM D 698. (2000). *Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- AVEI. (2014). *Compressed Stabilised Earth Block*. https://www.earth-auroville.com/compressed_stabilised_earth_block_en.php (Acedido em Maio de 2023)
- Azevedo, B. (2021). *Blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 26, pp. 811–820). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>
- Bandeira, J. (2020). *Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Barbosa, N. P. (1996). *Inovação, Gestão da Qualidade & Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional* (Vol. 2).
- Berge, B., Butters, C., & Henley, F. (2009). The chemical and physical properties of building materials. In *The Ecology of Building Materials* (pp. 57–63). Elsevier Ltd.
- Bogas, J. (2011). *Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- Bogas, J., Brito, J., & Ramos, D. (2016). Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 115, 294–306. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.065>
- Bogas, J., Carriço, A., & Pereira, M. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 218, pp. 377–389). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325>

- Bogas, J., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 138). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>
- Bogas, J., & Gomes, A. (2013). A simple mix design method for structural lightweight aggregate concrete. *Materials and Structures*, 46. Springer. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0029-1>
- Bogas, J., Gomes, M., & Gomes, A. (2013). A Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. In *Ultrasonics* (Vol. 53, pp. 962–972). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>
- Bogas, J., Pereira, M., Guedes, A., Carriço, A., Hu, S., & Sousa, R. (2021). *Processo de separação dos componentes de resíduos de betão endurecido para obtenção de cimento reciclado* (Patent No. 116130). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/075539885/publication/WO2021173022A1?q=WO%202021%2F173022>
- Bogas, J., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J., & Guedes, M. (2022). Hydration and phase development of recycled cement. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 127). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>
- Burroughs, S. (2008). Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 264–273. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:3\(264\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(264))
- Canovas, & Fernandez, M. (2004). *Hormigon* (7ª edição). Ibergarceta Publicaciones S.L.
- Carriço, A., Bogas, J., & Guedes, M. (2020). Thermoactivated cementitious materials - a review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 250). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
- Carriço, A., Bogas, J., Hu, S., Real, S., & Pereira, M. (2021). Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 309. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127375>
- Carriço, A., Bogas, J., Real, S., & Pereira, M. (2022). Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. In *Construction and Building Materials* (Vol. 333). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>
- Carriço, A., Real, S., Bogas, J., & Pereira, M. (2020). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. In *Construction and Building Materials* (Vol. 256). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502>
- Carvalho, M. (2020). *Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- CDI, & CRATerre_EAG/OAD. (1998). *Compressed Earth Blocks Standards* (11).
- CEMBUREAU. (2021). *Activity report, 2021*.
- Censos. (2011). https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos_quadros_edif. Acedido em Março de 2023
- Cid-falceto, J., Manzarrón, F., & Cañas. I. (2011). *Las normativas de construcción con tierra en el mundo*. (No. 523; 63), 159–169. doi:10.3989/ic.10.011
- CRATerre, Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. AnArchitecture.
- CRATerre, Centre pour le developpement industriel ACP – EU (1998) *Guide – Blocs de terre comprimé*

- Crook, D., & Murray, M. (1970). Regain of strength after firing of concrete. In *Magazine of Concrete Research* (Vol. 22, pp. 149–154). ICE. <https://doi.org/10.1680/mac.1970.22.72.149>
- Cyrne, C. (2022). *Separação de constituintes do betão para a produção de argamassas com cimento reciclado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- Delgado, M., & Guerrero, I. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 21, pp. 237–251). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006>
- Dreux, G., & Festa, J. (2002). *Nouveau Guide du béton et de ses constituants*. Eyrolles.
- Eco+RCEB. (2023, May). *Eco-efficient recycled cement compressed earth blocks, PTDC/ECI-CON/0704/2021 (2022-2025), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT)*. <https://Cdwvalue.Eu/Project-Ecorceb>.
- EcoHdyb (2022, May). *EcoHdyb, Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials, PTDC/ECI-CON/28308/2017 (2018-2022), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT)*. <https://Cdwvalue.Eu/Project-Ecohydb>. <https://cdwvalue.eu/project-ecohydb>
- Ecomáquinas (2023). *Vigas e amarrações*. <https://www.ecomaquinas.com.br/vigas-e-amarracoes/>. (Acedido em maio de 2023)
- Egenti, C., Khatib, J., & Oloke, D. (2013). *High carbon fly ash and soil in a shelled compressed earth block*.
- EN 772-1. (2000). *Methods of test for masonry units – Part 1: Determination of compressive strength*. European Committee for standardization (CEN).
- EN 772-4. (1998). *Methods of Test for Masonry Units - Part 4: Determination of Real and Bulk Density and of Total and Open Porosity for Natural Stone Masonry Units*. European Committee for standardization (CEN).
- EN 772-6. (2001). *Methods of Test for Masonry Units - Part 6: Determination of Bending Tensile Strength of Aggregate Concrete Masonry Units*. EN 933-11. (2009). *Tests for geometrical properties of aggregates*. European Committee for standardization (CEN).
- EN 1015-3. (1999). *Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)*. European Committee for standardization (CEN).
- EN 1015-6. (1998). *Methods of test for mortar masonry*. European Committee for standardization (CEN).
- EN 1015-11. (2019). *Methods of test for mortar fro masonry*. European Committee for standardization (CEN).
- EN 1992-1-1. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for standardization (CEN).
- EN 12390-6. (2009). *Testing hardened concrete*. European Committee for standardization (CEN).
- EN 12620. (2013). *Aggregates for concrete*. European Committee for standardization (CEN).
- Exelbirt, J. (2011). *Characterizing compressed earth bricks based on hygrothermal aging and wind-driven rain erosion*. PhD dissertation, University of Florida.
- Fernandes, M. D. M. (2011). *Mecânica dos solos-Introdução à engenharia geotécnica* (2nd ed.). FEUP edições.
- Fortes, P. (2022). *Caracterização mecânica, retração e fluência de betões com cimento reciclado e agregados reciclados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

- Gates, B. (2021). *How to Avoid a Climate Disaster*. PENGUIN BOOKS LTD.
- Hall, M., Najim, K., & Dehdezi, P. (2012). Soil stabilisation and earth construction: materials, properties and techniques. In *Modern Earth Buildings* (pp. 222–255). Woodhead Publishing.
- HB 195. (2002). *THE AUSTRALIAN EARTH BUILDING HANDBOOK*.
- 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 de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Lisboa.
- Kerali, A. (2001). *Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks*. PhD Dissertation, University of Warwick.
- Krosnowski, A. (2011). *A Proposed Best Practice Method of Defining a Standard of Care for Stabilized Compressed Earthen Block Production*. Master of Science, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering. University of Colorado.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. Springer Science & Business.
- Leal, D. (2021). *Durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Little, B., & Morton, T. (2001). *Building with earth in Scotland: Innovative design and sustainability. Scottish Executive*.
- LNEC E 398. (1998). *Betões – Determinação Da Retracção e Da Expansão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa
- LNEC E-195. (1966). *Preparação por via seca de amostras (Reparação Por via Seca de Amostras Para Ensaios de Identificação)*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa
- LNEC E-239. (1970). *Solos: análise granulométrica do solo peneiração húmida*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa
- Lothenbach, B., Durdzinski, P., & Weerd, K. (2018). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. CRC Press – Taylor & Francis Group
- Lourenço, P. (2002). *Construções em Terra*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Malkanathi, S., Wickramasinghe, W., & Perera, A. (2021). Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. In *Case Studies in Construction Materials* (Vol. 15). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00717>
- Mansour, M., Cherif, A., Jelidi, A., & Jabrallah, S. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). In *Construction and Building Materials*. (Vol. 104, pp 44 – 51). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., & Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. In *Building and Environment* (Vol. 75, pp. 11–18). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009>
- Milogo, Y., Morel, J., Aubert, J., & Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. In *Construction and Building Materials* (Vol. 52, pp. 71–78). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094>
- Minke, G. (2009). *Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser. Springer Science & Business.

- 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). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.08.008>
- Morel, J., Pkla, A., & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. In *Construction and Building Materials* (Vol. 21, pp 303 - 309). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Namango, S. (2006). *Development of cost-effective earthen building material for housing wall construction*. PhD Dissertation. Brandenburg Technical University.
- Nazarian, S., Baker, M., & Crain, K. (1997). Assessing quality of concrete with wave propagation techniques. *Materials Journal*, 94(4), 296–305.
- Neves, E. M. (2016). *Mecânica dos estados críticos, solos saturados e não saturados*. (IST Press, Ed.).
- Neves, M. (2019). *Proposta de procedimentos normativos para a caracterização mecânica de blocos de terra compactada estabilizada com cimento*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.
- Neville, A.M. (1995) *Properties-of-Concrete-AM 149*. 4th Edition, Addison Wesley Longman Ltd., Essex.
- NP EN 196-1. (2016). Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 196-3. (2016). *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos*. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 1097-6. (2016). *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN 12504-2. (2003). *Ensaio Do Betão Nas Estruturas Parte 2: Ensaio Não Destrutivo Determinação Do Índice Esclerométrico*. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN 12504-4. (2007). *Ensaio Do Betão Nas Estruturas Parte 4: Detecção de dano com ultrassons em elementos de betão*. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN12350-6. (2009). *Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica*. Instituto Português da Qualidade (IPQ)
- NP EN12390-3. (2011). *Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP-83. (1965). *Solos: densidade de partículas*. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP-143. (1969). *Solos: determinação dos limites de consistência*. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NTC 5324. (2004). *Bloques de suelo cemento para muros y divisones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega*. ICONTEC. Bogotá.
- NZS 4298. (1998). *Materials and workmanship for earth buildings*. SNZ, Wellington
- Osula, D. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. In *Engineering Geology* (Vol. 42, pp. 71–81). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00067-4)
- Pacheco-Torgal, F., Eires, R., & Jalali, S. (2009). *Construção em Terra*. Universidade do Minho. TecMinho

- Poppe, L., Paskevich, V., Hathaway, J., & Blackwood, D. (2001). *Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction*. <https://doi.org/10.3133/ofr0141>
- Real, S., Bogas, J., Gomes, M., & Ferrer, B. (2016). *Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete*. *Magazine of Concrete Research*, 798–808. ICE. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00424>
- Real, S., Bogas, J., & Hu, S. (2021). Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete. *Applied Sciences*, 11. <https://doi.org/10.3390/app11062454>
- 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). <https://doi.org/10.3390/ma13183937>
- Reddi, L., Jain, A., & Yun, H. (2012). Soil materials for earth construction: properties, classification and suitability testing. In *Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 155–171). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.155>
- Reddy, B. (2012). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. In *Modern Earth Buildings* (pp. 324–363). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.324>
- Ribeiro, D., Silva, V., & Faria, P. (2016). Caracterização de blocos de terra comprimida. In TEST&E 2016 (Ed.), *1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil—Ensaia para Reabilitar*.
- Rigassi, V. & CRATerre-EAG (1985). *Compressed Earth Blocks : Manual of Production: Vol.1*. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE
- Rix, C. (1998). *Stabilisation of a highly plastic clay soil for the production of compressed earth blocks*. Master thesis. Faculty of Architecture. University of the Witwatersrand, Johannesburg
- Riza, F., Rahman, I., & Zaidi, A. (2010). *A brief review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB)*. 2010 International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010). (pp. 999-1004). IEEE.
- Santos, C., & Matias, L. (2006). *ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa
- Santos, J. A. (2008). *Obras Geotécnicas-Compactação—Elementos Teóricos*. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura-Instituto Superior Técnico.
- Schroeder, H. (2012). Modern earth building codes, standards and normative development. In *Modern Earth Buildings* (pp. 72–109). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.1.72>
- Sekhar, D., & Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. In *Construction and Building Materials* (Vol. 166, pp. 531–536). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>
- Serpell, R., & Lopez, M. (2013). Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 39, pp. 104–114). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.020>
- Serpell, R., & Lopez, M. (2015). Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 64, pp. 16–26). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003>
- Serpell, R., & Zunino, F. (2017). Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of α' -H-C2S. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 100, pp. 398–412). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.001>

- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. In *Construction and Building Materials* (Vol. 23, pp. 531–537). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>
- Silva, F., Fernandes, M., & Correia, M. (2005). *Arquitetura de Terra em Portugal* (1ª edição). Argumentum. Lisboa
- Silva, M. (2015). *Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Sousa, V., & Bogas, J. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>
- Splittgerber, F., & Mueller, A. (2003). *Inversion of the cement hydration as a new method for identification and/or recycling?*
- UNEP. (2021). *United Nations Environment Programme*. <https://www.Unenvironment.Org/>. Acedido em Maio de 2023
- Uzoegbo, H. (2019). Dry-stack and compressed stabilized earth-block construction. In *Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications* (pp. 305–350). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00012-3>
- Walker, P. (1995). Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 17, pp. 301–310). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00019-9](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00019-9)
- Wang, J., Mu, M., & Liu, Y. (2018). Recycled cement. In *Construction and Building Materials* (Vol. 190, pp. 1124–1132). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>
- WBCSD, & IEA. (2009). *Cement technology roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA)*.
- WD-ARS 1333. (2018). *Compressed stabilized earth blocks – requirements, production and construction*. African Organization for Standardization (ARSO)
- XP-13-901. (2001). *Compressed earth blocks for walls and partitions: Definitions; Specifications; Test Methods; Delivery acceptance conditions*. (AFNOR)
- 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 e ©1998.
- Yu, R., & Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. In *Construction and Building Materials* (Vol. 49, pp. 841–851). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>
- Yu, R., & Shui, Z. (2014). Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 78, pp. 202–207). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.003>

7. Anexos

Anexo 1 – Curvas de compactação

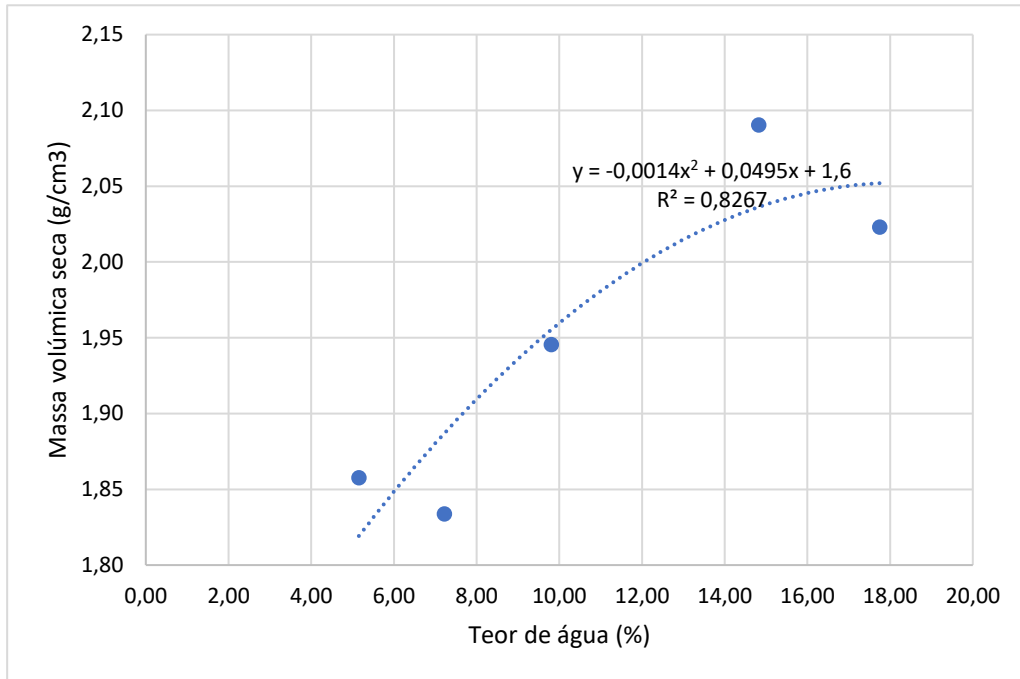


Figura A1 - 1 – Curva de Compactação Cortiçadas de Lavre

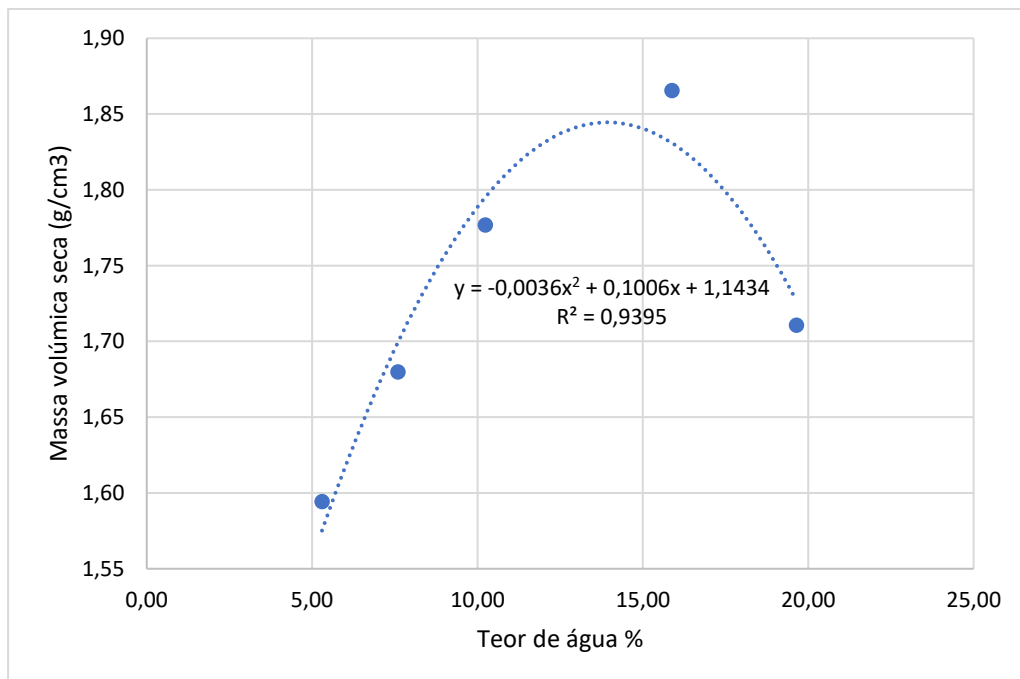


Figura A1 - 2 – Curva de Compactação Amendonça

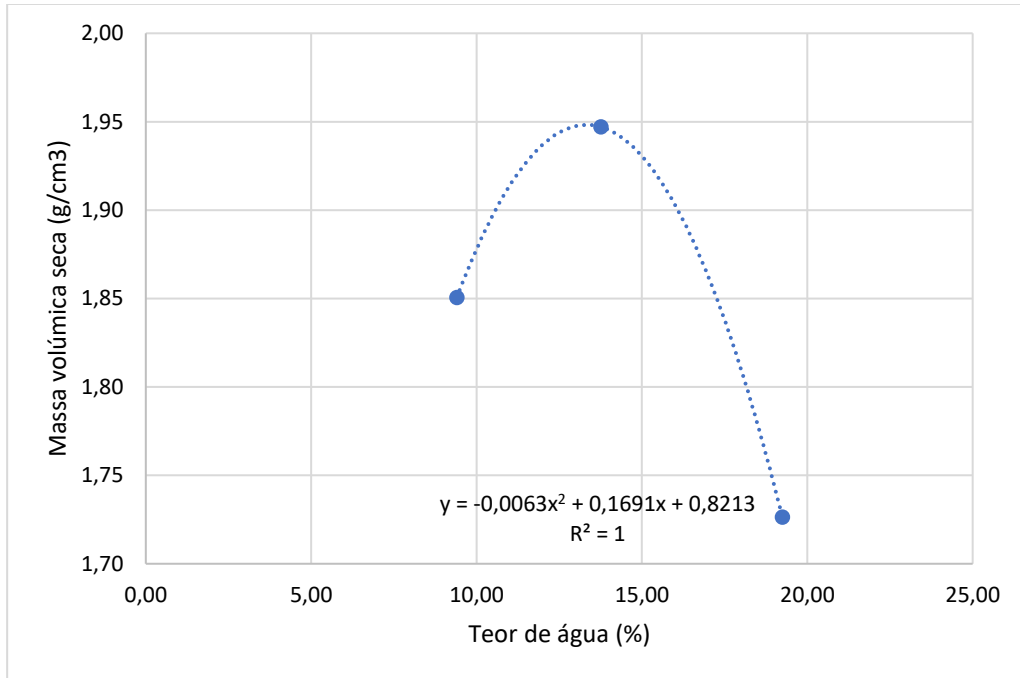


Figura A1 - 3 – Curva de Compactação Maia

Anexo 2 – Massa volúmica

Tabela A2 – Valores de ensaio de massa volúmica aos 28 dias

Mistura	#	ρ_{28d} (g/cm ³)	Mistura	#	ρ_{28d} (g/cm ³)
8CP25RCD	41	2,072	8RCP25RCD	42	1,990
		2,037			1,977
		2,036			1,980
		2,033			1,942
		2,069			1,929
		2,038			1,976
8CP15RCD	2	2,054	8RCP25HQRS	22	1,826
		2,085			1,869
		2,058			1,914
		2,003			1,935
		2,038			1,868
		1,943			1,881
8CP	3	2,049	8RCC25RCD	39	1,879
		2,063	1,914		
		2,031	12RCC25RCD	43	1,929
		2,024			1,934
		2,042			1,894
		2,040			1,879
8CP32,5_25RCD	9	1,964	1,930		
		1,941	8RCC	23	1,978
		1,942			1,881
		1,885	1,844		
		1,952	1,837		
		2,076	1,940		
8CP25HQRS	10	2,016	20RCC80CP25RCD	27	2,065
		1,944			1,935
		1,902			1,965
		1,971			1,963
		1,973			1,951
		1,970			1,936
8RCP25RCD	11	1,900	50RCC50CP25RCD	28	1,922
		1,884			1,931
		1,855			2,018
		1,899			1,976
		1,882			2,039
		1,855			1,955
NE25RCD	30	1,969	1,901		

Anexo 3 – Resistência à compressão

Tabela A3 – Valores de ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Mistura	#	$f_{c,28d}$ (MPa)	Mistura	#	$F_{c,28d}$ (MPa)
8CP25RCD	41	9,2	8RCP25RCD	42	6,6
		9,1			5,7
		7,8			5,0
		10,1			6,1
		9,6			4,9
		8,4			4,8
8CP15RCD	2	8,9	8RCP25HQRS	22	3,6
		10,7			3,5
		10,5			3,7
		9,7			4,4
		10,2			3,9
		9,9			3,2
8CP	3	8,9	8RCC25RCD	39	2,1
		9,7			1,7
		8,3	12RCC25RCD	43	3,0
		9,2			2,9
		10,5			3,3
		9,5			2,2
8CP32,5_25RCD	9	7,0	8RCC	23	2,7
		7,6			2,4
		6,1			2,0
		6,5			2,5
		6,5			2,2
		7,0			4,0
8CP25HQRS	10	9,3	20RCC80CP25RCD	27	7,9
		9,3			7,6
		8,2			7,1
		8,8			6,7
		8,4			7,3
		8,5			5,1
8RCP25RCD	11	2,3	50RCC50CP25RCD	28	4,2
		3,1			4,7
		3,3			5,1
		2,8			4,7
		3,2			5,3
		3,4			2,4
		NE25RCD	30	2,1	
				2,0	

Anexo 4 – Resistência à tração

Tabela A4.1 – Valores de ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

Mistura	#	$f_{ctsp,28d}$ (MPa)
8CP25RCD	41	0,61
		0,61
		0,63
		0,51
8CP15RCD	2	0,65
		0,56
		0,47
		0,35
8CP	3	0,48
		0,44
		0,52
		0,57
8CP25HQRS	10	0,32
		0,33
		0,38
		0,33
8RCP25RCD	11	0,18
		0,19
		0,05
		0,18
8RCP25RCD	42	0,25
		0,24
		0,16
		0,20
8RCP25HQRS	22	0,11
		0,11
		0,12
8RCC25RCD	39	0,07
		0,06
		0,08
8RCC	23	0,07
		0,08
		0,07
		0,06
NE25RCD	30	0,08
		0,07
		0,07

Tabela A4.2 – Valores de ensaio de resistência à tração por flexão aos 28 dias

Mistura	#	$f_{ct, r28d}$ (MPa)
8CP25RCD	41	1,203
		1,125
		1,124
		1,258
		1,183
		1,055
8CP32,5_25RCD	9	1,121
		1,122
		0,955
		1,124
		0,897
		1,046
8RCP25RCD	11	0,488
		0,405
		0,424
		0,455
		0,507
		0,475
8RCP25RCD	42	0,527
		0,618
		0,521
		0,904
		0,631
		0,597
8RCC25RCD	39	0,272
		0,287
		0,268
8RCC	23	0,303
		0,283
		0,285
		0,262
		0,273
		0,266
NE25RCD	30	0,296
		0,331
		0,264

Anexo 5 – Velocidade de propagação de ultrassons

Tabela A5 – Valores de ensaio da velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias

Mistura	#	V _{us} (m/s)	Mistura	#	V _{us} (m/s)
8CP25RCD	41	2345,5	8RCP25RCD	42	1704,5
		2317,9			1702,8
		2290,9			1665,4
		2238,8			1647,1
		2356,0			1609,8
		2276,0			1679,4
8CP15RCD	2	2241,1	8RCP25HQRS	22	1410,0
		2221,5			1372,0
		2217,0			1507,9
		2173,2			1431,8
		2211,1			1440,3
		2192,7			1303,3
8CP	3	2019,0	8RCC25RCD	39	1225,4
		2138,0			1188,8
		2049,7	12RCC25RCD	43	1305,4
		2084,0			1254,0
		2096,6			1325,2
		2069,0			1280,3
8CP32,5_25RCD	9	2076,8	8RCC	23	1322,9
		2082,0			1333,6
		2028,3			1277,1
		2110,6			1274,1
		2101,9			1331,5
		2107,3			1793,0
8CP25HQRS	10	2075,5	20RCC80CP25RCD	27	2093,9
		2023,3			2091,9
		2048,4			2077,4
		2044,6			2117,4
		2038,3			2110,6
		2062,5			1902,0
8RCP25RCD	11	1532,7	50RCC50CP25RCD	28	2079,4
		1527,1			1937,8
		1537,0			1876,6
		1402,5			1937,2
		1521,4			1887,9
		1532,4			1332,5
			NE25RCD	30	1328,5
					1261,7

Anexo 6 – Módulo de elasticidade

Tabela A6 – Valores de ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

#	Ponto	Ciclo	E 28d (Gpa)
BTC 42	L2-5	1º ciclo	2,21
		2º ciclo	2,29
		3º ciclo	2,42
	L8-11	1º ciclo	2,66
		2º ciclo	2,68
		3º ciclo	2,78
BTC 41-1	L2-5	1º ciclo	3,89
		2º ciclo	4,22
		3º ciclo	4,06
	L8-11	1º ciclo	4,49
		2º ciclo	4,74
		3º ciclo	4,58
BTC 41-2	L2-5	1º ciclo	2,64
		2º ciclo	2,86
		3º ciclo	2,95
	L8-11	1º ciclo	2,83
		2º ciclo	2,87
		3º ciclo	3,03
BTC 3-1	L2-5	1º ciclo	3,95
		2º ciclo	3,81
		3º ciclo	3,84
	L8-11	1º ciclo	4,48
		2º ciclo	4,24
		3º ciclo	4,32
BTC 3-2	L2-5	1º ciclo	3,20
		2º ciclo	3,14
		3º ciclo	3,11
	L8-11	1º ciclo	3,16
		2º ciclo	3,12
		3º ciclo	3,14
BTC30	L2-5	1º ciclo	0,32
		2º ciclo	0,92
		3º ciclo	1,02
	L8-11	1º ciclo	0,45
		2º ciclo	0,97
		3º ciclo	0,98

Anexo 7 – Esclerómetro pendular

Tabela A7 – Valores de ensaio para esclerómetro pendular aos 28 dias

#	Mistura	IE,28d (mm)			
		Provete 1		Provete 2	
		Face 1	Face 2	Face 1	Face 2
41	8CP25CDW	31	33	29	34
2	8CP15CDW	37	35	31	29
3	8CP	36	37	33	37
11	8CRP20W	17	16	11	12
42	8CRP25CDW	29	30	31	31
22	8CRP25HQRS	25	24	22	24
23	8RCC	10	13	12	9
39	8RCC25CDW	10	12	11	13
43	13RCC25CDW	20	21	19	21
30	NE25CDW	16	15	17	16

Anexo 8 – Condutibilidade térmica

Tabela A8 – Valores de ensaio de condutibilidade térmica aos 28 dias

#	Mistura	I _{28d} (W/m.°C)		
		AC	OD	SAT
41	8CP25CDW	0,88	0,70	1,57
2	8CP15CDW	0,95	0,77	1,66
3	8CP	1,03	0,81	1,78
9	8CP32,5_25CDW	-		
10	8CP25HQRS	0,77	0,65	1,51
11	8CRP20W	0,71	0,60	1,24
42	8CRP25CDW	0,81	0,65	1,58
22	8CRP25HQRS	-		
23	8RCC	0,77	0,66	1,65
27	20RCC80CP25CDW	0,67	0,42	1,34
28	50RCC50CP25CDW	-		
39	8RCC25CDW	0,72	0,67	1,49
43	13RCC25CDW	0,78	0,67	1,73
30	NE25CDW	0,82	0,76	-

Anexo 9 – Abrasão

Tabela A9 – Valores de ensaio de abrasão aos 28 dias

#	Mistura	CA _{28d} (cm ² /g)
41	8CP25CDW	38,6
2	8CP15CDW	13,62
3	8CP	12,21
9	8CP32,5_25CDW	-
10	8CP25HQRS	58,05
11	8CRP20W	2,3
42	8CRP25CDW	15,5
22	8CRP25HQRS	3,57
23	8RCC	6
27	20RCC80CP25CDW	6,29
28	50RCC50CP25CDW	11,5
39	8RCC25CDW	2,96
43	13RCC25CDW	-
30	NE25CDW	4,3

Anexo 10 – Retração

Tabela A10 – valores de ensaio de retração aos 3 e 50 dias

#	Mistura	$\epsilon_{cst,3d}$ ($\times 10^{-6}$ m/m)	$\epsilon_{cst,50d}$ ($\times 10^{-6}$ m/m)
41	8CP25CDW	426	1705
2	8CP15CDW	-	-
3	8CP	589	2183
9	8CP32,5_25CDW	-	-
10	8CP25HQRS	521	2414
35	8CP20W	-	-
11	8CRP20W	-	-
42	8CRP25CDW	553	1373
22	8CRP25HQRS	-	-
23	8RCC	-	-
27	20RCC80CP25CDW	-	-
28	50RCC50CP25CDW	-	-
39	8RCC25CDW	-	-
43	13RCC25CDW	-	-
30	NE25CDW	1347	3045

Anexo 11 – Ficha Técnica CEM II/B-L 32,5N

Tabela A11 – Ficha técnica CEM II/B-L 32,5N

Propriedade	Valor específico
Teor de sulfatos	<3,5%
Teor de cloretos	<0,1%
Princípio de presa	>75min
Resistência à compressão (28d)	>32,5 e <52,5